

2009年度 修士論文

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

李 孝振  
Lee, Hyojin

2009年7月31日

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻

Department of Socio-Cultural Environmental Studies,  
Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo



# 目次

第 1 章	序章	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	4
1.3	論文の構成	5
第 2 章	乱反射率の測定法に関する考察	7
2.1	はじめに	7
2.2	測定原理	7
2.3	測定条件	9
2.4	結果算出	13
2.5	まとめ	14
第 3 章	測定環境に関する基礎的検討	15
3.1	はじめに	15
3.2	測定概要	15
3.3	測定結果と考察	23
3.2.1	同期加算回数による影響	24
3.2.2	測定間隔による影響	25
3.2.3	縮尺による影響	26

---

3.4	他機関との比較 .....	26
3.5	まとめ .....	27
 <b>第 4 章 試料の適用条件に関する検討</b>		<b>29</b>
4.1	はじめに .....	29
4.2	1 次元周期構造の乱反射率の測定 .....	29
4.2.1	測定条件 .....	29
4.2.2	結果と考察 .....	32
4.2.3	数値解析との比較 .....	35
4.3	基準円盤の枠の高さによる影響 .....	36
4.3.1	測定条件 .....	37
4.3.2	結果と考察 .....	39
4.4	基準円盤への枠の設置による影響 .....	41
4.4.1	測定条件 .....	41
4.4.2	結果と考察 .....	43
4.5	まとめ .....	46
 <b>第 5 章 インパルス応答測定に関する検討</b>		<b>47</b>
5.1	はじめに .....	47
5.2	信号長による影響 .....	47
5.2.1	測定条件 .....	47
5.2.2	結果と考察 .....	49
5.3	回転速度による影響 .....	57
5.3.1	測定条件 .....	57
5.3.2	結果と考察 .....	58
5.4	測定間隔による影響 .....	66
5.4.1	測定条件 .....	66
5.4.2	結果と考察 .....	67



目次	iii
----	-----

---

5.5 まとめ .....	75
---------------	----

第 6 章 総論	77
----------	----

付録	79
----	----

参考文献	115
------	-----

謝辞	121
----	-----

発表論文一覧	123
--------	-----



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

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、室内音響空間の壁面には多種多様の形状が用いられている。平滑な壁面に囲まれた直方形のホールで音楽を聴くとき、その音は鋭く硬質で耳障りな響きとなり、カラレーション (coloration)、グレア (glare) と呼ばれる現象が生じる[36]。それに対し、壁面に凹凸面がある場合、初期反射音は幾何学的な反射点からではなく、壁の広い範囲から発生して到達する(Fig. 1)。音波がこの不規則表面で反射する度に散乱されるため、室内で多数回の反射を繰り返した後に、音響エネルギーの空間分布が均一化する。すなわち、初期反射音が支配的ではなく、さらに、後部残響音が側方、頭上、そして前方などあらゆる方向から到来するように感じられる。上記のように、壁面の細かい凹凸は、室の全体形状、吸音率のみならず、室内音響特性に大きな影響を及ぼすため、音響設計において重要な検討項目の一つとなる。

19 世紀に建設されたウィーンの楽友協会大ホール (1870 年、[61])、アムステルダムのコンセルトヘボウ (1888 年、[62])、ボストンのシンフォニーホール (1900 年、[63]) などの最高水準のコンサートホールでは、天井に格子や曲面、側壁にはしばしば細かいスケールの装飾が施されている。これらの不規則凹凸面や装飾により音は自然に拡散され、音楽に柔和な音色を付加する。しかし、現代建てられたホールの場合は、装飾を最小限に抑えたことから、鏡面反射を生じる平面が多く設計されている。

拡散現象は室の音響性能を左右する重要な要素であるだけに、適切に拡散体が設置さ

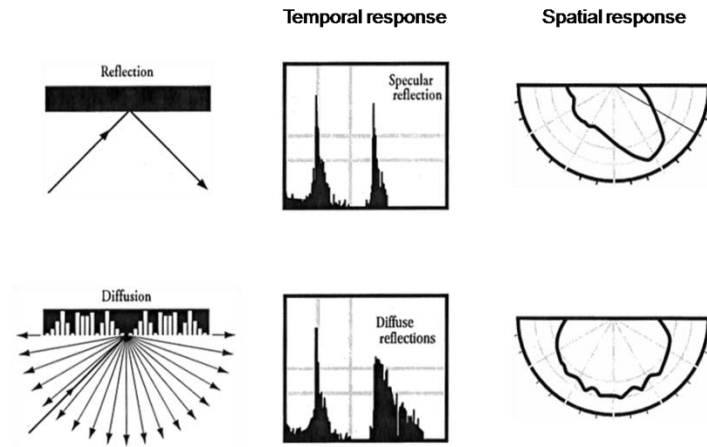


Fig. 1.1 Reflection and diffusion on surface.

れなければならない。しかしながら、現在の拡散体設計は、拡散の程度が定量的に把握されてないため、拡散の多少を定性的に推測する水準に止まっていて、その有効性及び性能の数値的検証が難しい状況である。従って、設計実務に応える形でのデータの整備が望まれている。

建築音響分野での数値解析手法は「波動音響解析手法」と「幾何音響解析手法」に大別される。「波動音響解析手法」とは音の波動性を考慮して解析する方法で、精度の高い計算が可能であるが、ホールのような大空間の解析にはコンピュータによる数値計算を利用することから計算量が膨大になるため、あまり実用的でない場合が多い。

「幾何音響解析手法」とは音の波動性を無視して扱うもので、直接音と反射音の間の干渉や、回折などの波動現象は起こらず、光と同じように直進および幾何学的反射のみで音の伝搬を記述する方法である[50]。波動音響シミュレーションに比べて劣ることは明白であるが、視覚的にもわかりやすいためエコーも発見しやすく、プレゼンテーション等にも向いていると言える。ホールのような大空間であっても CAD (Computer Aided Design) の図面データから読み込んでパソコンで数十分程度で計算できるため、大規模空間の時系列応答を求めるには非常に重宝される。様々な商業用のソフトウェア[34]が売り出されていて、設計実務において不可欠なツールとして良く用いられている。従来の設計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、鏡面反射成分に加え、散乱成分を幾何音響シミュレーションへ直接的に導入することが可能になり壁面の拡散性の影響を検討可能となっている[51]。

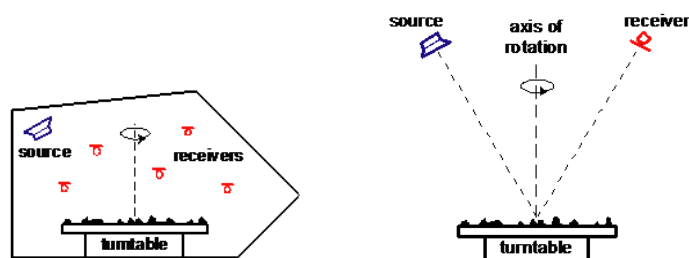


Fig. 1.2 sample rotation methods (left: reverberation room, right: free field).

壁面による拡散反射を幾何音響シミュレーションに導入することを主たる目的として、指向拡散度(Diffusion coefficient)[23]ならびに乱反射率 (Scattering coefficient) [38] が提案されている。前者は反射指向特性の均一性を、後者は非鏡面反射成分の割合を表す指標であり、AES (Audio Engineering Society) やISO (International Organization for Standardization) においてその測定法が規格化されつつある。特に乱反射率については、幾何音響シミュレーションの予測計算に簡単に利用できるものとして、その役割が期待されている。

乱反射率の測定法として、Vorländer *et al.* [16] は円形の試料を回転させながら多数のインパルス応答を測定し、それらを同期加算することにより鏡面反射成分のみを抽出する測定法を、残響室と自由音場を想定した以下の 2 通りで提案されており、前者について ISO17497-1:2004[1]にて規格化されている。

#### ■ 残響室法[3]

試料静止状態と回転状態の残響室吸音率の測定[37]を通して乱反射率を求める。残響時間測定には室内インパルス応答計測に基づくシュレーダー法を用いる。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ことに着目し、それぞれの状態の残響時間の差から乱反射率を算出する方法である。この方法では入射角度に対する乱反射率の統計入射平均値としてランダム入射乱反射率 (Random-incidence scattering coefficient) が直接求められる。

#### ■ 自由音場法[2]

垂直入射角を固定した上で試料を回転させ、複素反射係数の加算平均により鏡面反射成分のみの複素反射係数を取り出すことで、まず垂直入射角依存の乱反射率  $s_0$  が求められる。さらに、その平均としてランダム入射乱反射率が求められる。

現時点では、自由音場法は試行にとどまっていることに比べて、残響室法は比較的簡便で実用的が高いことから非常に有効である。

2004 年に ISO17497-1 が制定されて以来、ここ数年海外では乱反射率の残響室法測定に関する発表が増加しているが、その大半は 1/4～1/10 の縮尺模型による測定[44, 48, 59]であり、実物大の測定例[28, 33]は少ない。実大測定では試料回転装置が大掛かりとなるのが難点である上、反射性が前提となる試料では縮尺模型で吸音特性を再現する必要がないため、模型測定が普及している。

測定法における誤差要因について様々な検討が行われている。試料形状・寸法や試料中に含まれる凹凸数等の試料適用条件に関する検討[32, 44]、空気吸収や測定時間による測定システムの誤差に関する検討[25, 31, 59]などが行われている。

建築・都市空間においては周期的な構造を持つ壁面・部材等が頻繁に存在する。1次元周期構造を対象として乱反射率測定を行う場合には、試料端部の凹凸により拡散が生じてしまい、乱反射率の測定値が過大評価される可能性が考えられる。一方、ランダム入射吸音率測定においては、エッジ効果回避のため、測定試料の周囲にDeep-wellを配置した測定法[9]がF. Kawakami *et al.*により提案されており、乱反射率の測定への適用も考えられる。

また、乱反射率の測定法としては、残響室において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試料回転法が提案されているが、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状況である。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、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である。乱反射率の導入により、将来には、幾何音響シミュレーションの性能が高まること、壁面の拡散性能を定量的に評価することから設計手法上に役立つこと、また ISO[38]の曖昧な測定法の測定条件を提案することが期待される。

## 1.3 論文の構成

以上を研究の目的とした本論文の構成を示す。

第 1 章では、研究の背景と既往研究の概説、研究目的と本論文の構成について示す。

第 2 章では、本研究の基礎となる乱反射率の測定原理から、ISO に規格化されている残響室法を既往研究とともに具体的に考察する。

第 3 章では、模型残響室における縮尺およびインパルス応答測定に関する乱反射率の基礎的な実験を行う。また、他機関の測定結果との比較を通して本測定システムを検証し、乱反射率の測定環境を構築する。

第 4 章では、1 次元周期構造である三角および矩形波形の試料を対象とした乱反射率の測定を行い、試料側面による乱反射率の挙動を把握する。

第 5 章では、縮尺模型を用いた乱反射率測定において、インパルス測定用の **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。

第 6 章で本論文の総括を述べる。





## 第 2 章

# 乱反射率の測定法に関する考察

### 2.1 はじめに

本章では、乱反射率の測定法を具体的に考察する。はじめに、乱反射率の測定原理について述べる。次には ISO17497-1 に規定されている残響室法について、既往研究を挙げながら測定法の留意点について述べる。

### 2.2 測定原理

ISO17497-1:2004[38]で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反射エネルギーの割合を乱反射率（Scattering Coefficient）として定義している。従って、反射指向特性の均一性は考慮されず、全反射エネルギーを $E_{\text{total}}$ 、鏡面反射エネルギーを $E_{\text{spec}}$ として次式により表される。（Eq. 2.1）

$$s_{\theta} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha}{1 - \alpha} = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}} \quad (2.1)$$

ただし、 $\alpha$  は試料表面の吸音率、 $\alpha_{\text{spec}}$  は鏡面反射成分のみを反射エネルギーとみなした場合の吸音率（specular absorption coefficient）である。完全鏡面反射では $s_{\theta}=0$ となるが、鏡面反射成分さえなければ $s_{\theta}=1$ となるので、必ずしも完全拡散反射を指すことにはならない。ランダム入射乱反射率は、上記値の統計入射平均値として定義される。

測定原理は時間軸上での反射と散乱による影響を見ればよく理解することができる。

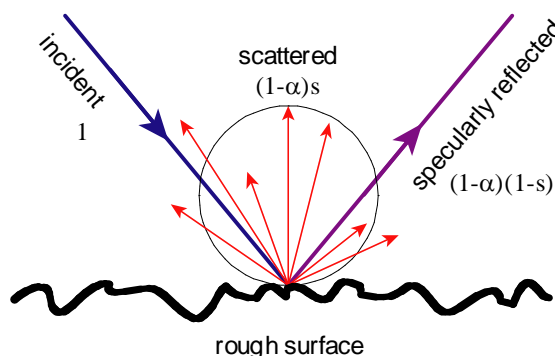


Fig. 2.1 Scattering from rough surface ( $\alpha$ : absorption coefficient,  $s$ : scattering coefficient).

Fig. 2.2 は、凹凸をもつ表面から取った三つインパルス応答 (Impulse Response) である。インパルス回答の初期直接音部分(Initial Parts)はほとんど一致することが見られることから、三つのインパルス応答の初期部分は高い相関があることが分かる。

インパルス応答の初期反射部分は Fig. 2.3 と同様に Fermat の原理によって一番短い経路を取る。一致する部分は同一位相で音圧が補強されて強くなるが、インパルス応答の後期部分は表面の形状によって音の経路が変わることから位相が変わる。従って、インパルス応答の後期部分には材料の表面による音の経路差が含まれていて音の拡散現象に対する情報が入っていると見られる。各方向で収録したインパルス応答を位相固定平均(Synchronized, Phase-Locked Average)すれば後期音部分が相殺されて直接音の成分のみを持っているインパルス応答を得ることができる。後期部分に拡散成分を含んだインパルス回答と直接音の成分を含んだインパルス応答から乱反射率が求められる。

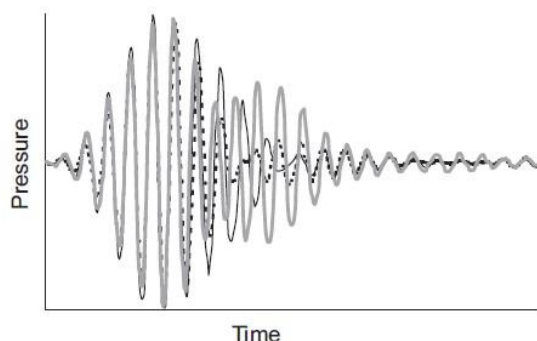


Fig. 2.2 Examples of band-pass filtered impulse responses measured at three different positions of the test sample.

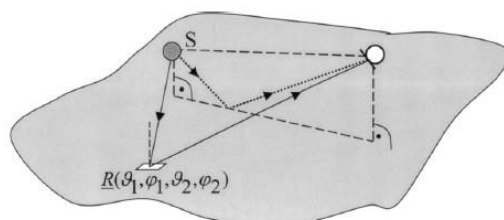


Fig. 2.3 Reflection paths: (...) specular according to Fermat's principle and (—) scattered.  $R(\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2)$  indicates that the reflection amplitude depends on the two incident angles and the two reflection angles in the local polar coordinate system at the reflection point.

## 2.3 測定条件

### 2.3.1 残響室

残響室とは、拡散音場の条件を近似的に実現するために、壁、床、天井を反射性に仕上げた室である。残響室では、音のエネルギーは様々な方向から到来し、音の響き(残響時間)は非常に長く、室内の音圧レベル分布はほぼ一様になるのが特徴である。ISO 3382[8]には「reverberation room」或いは「reverberation chamber」と記し、残響室を実現するための設計指針が示されており、要約すると要件は下記の通りである。(1)測定対象周波数と関連した、適切な容積、(2)拡散音場を近似的に実現するための、適切な室形状と拡散装置、(3)低い平均吸音率(壁、床、天井は基本的に反射面)、(4)十分に低い暗騒音レベル等が挙げられる。

#### 容積

測定は、周波数範囲 100～5000 Hz の 1/3 オクターブ帯域で行うため、容積が小さいと、モードなどにより測定結果に影響を及ぼす。また、500 m<sup>3</sup> より大きくなると空気吸収の影響で高周波数領域での測定が不可能となるので注意する必要がある。乱反射率の測定では、室容積 200 m<sup>3</sup> 以上が推奨されている。

#### 等価吸音面積

試料を入れない状態における残響室の最大等価吸音面積は空気吸収を含め  $0.3V^{2/3}\text{m}^3$  以下にする。

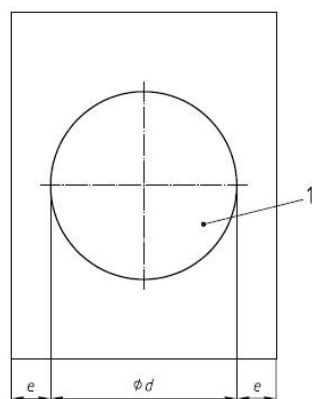


Fig. 2.4 Plan of a reverberation room with a turntable for the test sample  
(1: turntable,  $d$ : diameter,  $e$ : minimum distance to the walls of the room).

Table 2.1 Maximum scattering coefficients for the base plate alone.

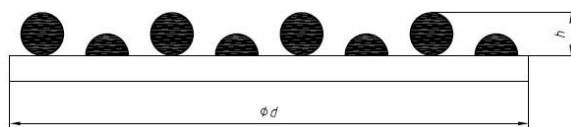
Frequency( $f/N$ ), Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$s_{\text{base}}$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10
Frequency( $f/N$ ), Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$s_{\text{base}}$	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.25

## 拡散板

対向する壁が完全な平行面である場合、壁面間で音が減衰せずに行き来するので、高音域ではフラッターリング・エコーを、低音域では定在波という音響的な障害を生じる。完全拡散音場の仮定を前提としていることから、残響室の拡散性を高めるために、平行壁面をもたない不整形室を用いたり、拡散装置を設置したりするなどの対策がとられている。乱反射率測定には静止つり下げ拡散板の使用が要求される。

### 2.3.2 ターンテーブルと台盤

試料を回転するためターンテーブルを要する。円形平板をターンテーブル上に固定し、試料を乗せる台盤とする。台盤台盤は、Fig. 2.4 に示すように壁から 1 m 以上離し、寸法は試料寸法以上にする。台盤自体の乱反射率は最大許容値以下にする (Table 2.1)。

Fig. 2.5 Definition of the structural depth,  $h..$ 

### 2.3.3 試料

#### 形状と寸法

円形の台盤上に乗せる試料は、直径3 m 以上の円形で、正方形の場合は一辺2.65 m以上にISOにて規定されている。試料の有限性に起因する端部回折効果により乱反射率が最大評価される可能性がある。

試料形状に関する研究としては、Vorländer *et al.*による縮尺1/5、1次元正弦波形周期構造を用いた円形の台盤の上に、台盤と同寸法の試料、四角試料および台盤に試料を埋め込んだ検討により、正方形の試料の場合は台盤に試料を埋め込むことで試料端部からの影響を防ぐことができることが確認された。

#### 高さ

Fig. 2.5 に示すように、試料の凹凸深さは直径 ( $d$ ) の 1/16 以下にする。

#### 試料の位置

1次元周期構造の場合には試料端部の凹凸により拡散が生じてしまい、乱反射率の測定値が過大評価される可能性が考えられる。ランダム入射吸音率測定においては、エッジ効果回避のため、測定試料の周囲にDeep-wellを配置した測定法[9]がF. Kawakami *et al.*により提案されており、乱反射率の測定への適用も考えられる。

#### 試料の吸音率

乱反射率は、試料の吸音率 ( $\alpha$ )と見掛け上の吸音率 ( $\alpha_{\text{spec}}$ ) との差から求めるため、高い吸音性の試料を用いると、信頼性の高い測定結果は得られない。ISO では吸音率 0.5 以下を推奨している。

### 2.3.4 音源と受音点

測定信号は M 系列信号(Maximum Length Sequence signal)などの擬似ランダムノイズが推奨される。M 系列信号とは長さ  $L = 2N - 1$  の周期を持つ 2 値 (-1 と 1) 系列であり、試料回転法による乱反射率の測定に非常に有効である。

また、音源間の距離は  $3m/N$  以上にする。受音点は壁および試料から  $1m/N$  以上、音源から  $2m/N$  以上、受音点間は  $1.5m/N$  以上離れて設置する。少なくとも音源点 2 か所、受音点 3 か所の 6 系統で測定が要する。

### 2.3.5 インパルス応答の測定条件

インパルス応答測定は ISO354 に準じるものとし、試料の有無と回転の有無の組合せによる 4 条件 (Table 2.2) で行う。回転角度を離散化して測定する場合、60~120 方向の同期加算が必要であり、5° 毎が推奨される。連続回転の場合は、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試料回転法[3]が提案されている。しかし、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。

測定は退室閉扉後 15 分以上経過した後に開始し、残響時間 (T15: 初期の傾斜 -5 ~ -20 dB) の算術平均値を各条件で算出する。残響時間については、残響室内のある点でのインパルス応答を測定し、その自乗積分を用いて計算した音圧レベル減衰波形から算出する。

Table 2.2 Measurement conditions for the four different reverberation times.

Reverberation time	Test sample	Turntable
$T_1$	not present	not rotating
$T_2$	present	not rotating
$T_3$	not present	rotating
$T_4$	present	rotating

## 2.4 算出方法

### 2.4.1 ランダム入射吸音率 (random-incidence absorption coefficient, $\alpha_s$ )

$$\alpha_s = \frac{55.3V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2 - c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (2.2)$$

$V$  : Volume of the reverberation room ( $\text{m}^3$ )

$S$  : Area of the test sample ( $\text{m}^2$ )

$T_1$  : reverberation time obtained without sample, but with the base plate present (s)

$T_2$  : reverberation time obtained for the test sample (s)

$c_1$  : speed of sound in air, during the measurement of  $T_1$  (m/s)

$c_2$  : speed of sound in air, during the measurement of  $T_2$  (m/s)

$m_1$  : energy attenuation coefficient of air, during the measurement of  $T_1$  (m/s)

$m_2$  : energy attenuation coefficient of air, during the measurement of  $T_2$  (m/s)

$$c = 343.2 \sqrt{\frac{273.15 + t}{293.15}} \quad (\text{m/s})$$

$$m = \frac{a}{10 \lg(e)} \approx \frac{a}{4.343} \quad (\text{m}^{-1})$$

$a$  : sound pressure attenuation coefficient (dB/m)

### 2.4.2 見かけ上吸音率 (random-incidence specular absorption coefficient, $\alpha_{\text{spec}}$ )

$$\alpha_{\text{spec}} = \frac{55.3V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4 - c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (2.5)$$

$T_3$  : reverberation time obtained without sample, but with the base plate present (s)

$T_4$  : reverberation time obtained for the test sample (s)

$c_3$  : speed of sound in air, during the measurement of  $T_3$  (m/s)

$c_4$  : speed of sound in air, during the measurement of  $T_4$  (m/s)

$m_3$  : energy attenuation coefficient of air, during the measurement of  $T_3$  (m/s)

$m_4$  : energy attenuation coefficient of air, during the measurement of  $T_4$  (m/s)

### 2.4.3 ランダム入射乱反射率 (random-incidence scattering coefficient, $s$ )

$$s = 1 - \frac{1 - \alpha_{\text{spec}}}{1 - \alpha_s} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (2.6)$$

### 2.4.4 基準円盤の乱反射率 (scattering coefficient for the base plate, $s_{\text{base}}$ )

$$s_{\text{base}} = \frac{55.3V}{S} \left( \frac{1}{c_3 T_3 - c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (2.7)$$

## 2.5 まとめ

本章では、乱反射率の測定法について、測定法の基礎となる測定原理から、ISO17497-1に規定されている残響室法について具体的に述べた。また、既往研究を挙げながら測定法の留意点について述べた。



## 第 3 章

# 測定環境に関する基礎的検討

### 3.1 はじめに

前章では、本研究の基礎となる乱反射率の残響室法[16] による測定法を具体的に考察した。本章では、その残響室法に基づいて測定システムを設定することに当たり、縮尺およびインパルス応答測定に関する乱反射率の基礎的な検討を行う。また、他機関[43]の測定結果との比較を通して本測定システムを検証し、乱反射率の測定環境を構築する。

### 3.2 測定概要

ISO[38]に準じて測定システムを設定する。周波数範囲は 100～5,000 Hz の 1/3 オクターブ帯域で、1/4 および 1/5 縮尺模型実験ではそれぞれ中心周波数の 4 および 5 倍にする。インパルス応答測定には M 系列信号を用い、残響時間は  $T_{20}$  を用いる。

#### 残響室

Fig. 3.1 の縮尺模型残響室を用いて測定を行った。模型残響室は 10 mm 厚の亚克力板からなる直方体室（内寸 1,200 × 1,500 × 900 mmH）であり、詳細は Table 3.1 に示す。本残響室は地下室に位置しているため、外部からの影響は受けにくく、温度・湿度の変化は極めて小さい。また、室内の拡散性を高めるため、曲面状のプラスチック製拡散板 10 枚を吊り下げて設置した。固定されている拡散板の詳細を Table 3.2 に示す。

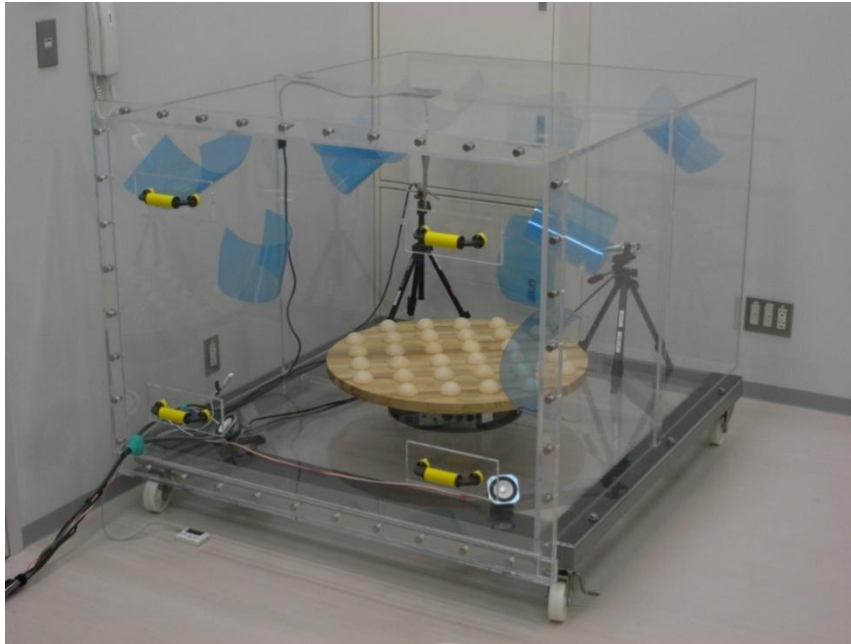


Fig. 3.1 Reduced reverberation chamber.

Table 3.1 The specification of the reduced reverberation chamber.

Parameter	Detailed contents
$W \times L \times H$ [mm]	$1,200 \times 1,500 \times 900$
Thickness [mm]	10
Volume [ $\text{m}^3$ ]	1.62
Total surface area [ $\text{m}^2$ ]	8.46
Material	Acrylic
Location	Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo

Table 3.2 The specification of the diffuser.

Parameter	Detailed contents
$W \times L \times T$ [mm]	$200 \times 400 \times 1$
Material	Plastic
Number of plates	10 fixed plates

## ターンテーブルと台盤

ターンテーブルと台盤を Fig. 3.2, Fig. 3.3 に示す。ターンテーブル (Brüel & Kjær、Type 5960) は直径 354 mm、高さ 120 mm で、1 回転 80 秒に固定されている。台盤として実寸直径 3m の 1/4 および 1/5 縮尺で作成した木製円盤 (厚さ 30 mm、カバ集成材のウレタンクリア塗装) をターンテーブルに取り付けた。詳細は Table 3.3 に示す。

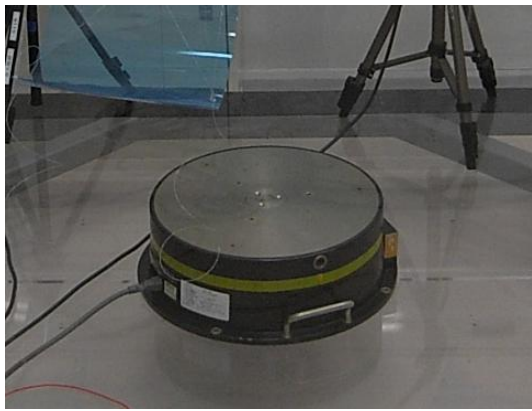


Fig. 3.2 Turntable



Fig. 3.3 Base plate

Table 3.3 The specifications of the base plate.

Physical scale ratio	1/4	1/5
Shape	Circular	
Diameter [mm]	750	600
Thickness [mm]	30	
Total surface area [m <sup>2</sup> ]	0.44	0.28
Material	Laminated wood coating with Urethane	
Minimum distance to the wall [mm]	225	300

## 試料

木製円盤の上面に木製半球 32 個を等間隔に配置して拡散体試料とした。詳細は Fig. 3.4, Fig. 3.5, Table 3.4 に示す。半球の寸法と配列は各縮尺で相似則を保っている。

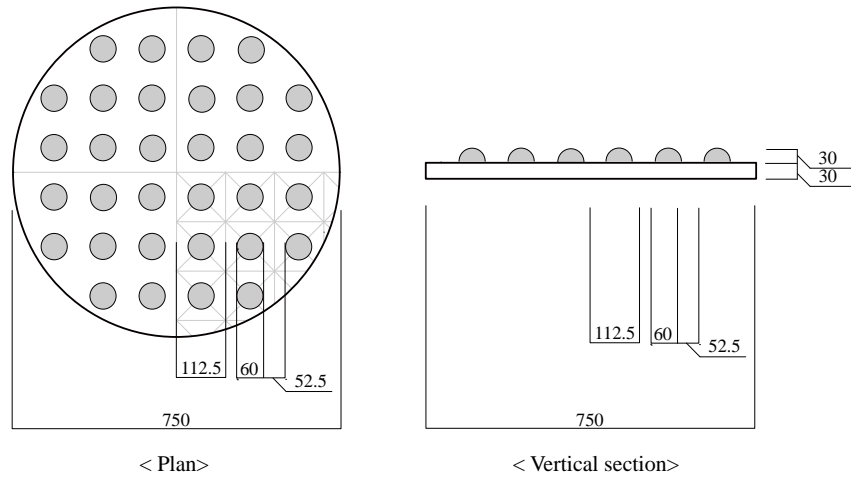


Fig. 3.4 The specification of the test sample (Scale 1/4).

Table 3.4 The specifications of the test sample

Physical scale ratio	1/4	1/5
Diameter [mm]	60	48
Structural depth [mm]	30	24
Material	Laminated wood coating with Urethane	
Number of test sample	32	



Fig. 3.5 Test sample

Table 3.5. Determination of physical scale ratio.

Physical scale ratio	1/ <i>N</i> (ISO)	1/4	1/5
Frequency, <i>f</i> [Hz]	$N \times 100 \sim N \times 5k$	400 $\sim$ 20k	500 $\sim$ 25k
Volume, <i>V</i> [m <sup>3</sup> ]	$V \geq 200 \text{ m}^3 \times N^{-3}$	1.62 < 3.13	1.62 > 1.6
Diameter of base plate, <i>d</i> [m]	$d \geq 3 \text{ m} \times N^{-1}$	0.75	0.60
Structural depth of test sample, <i>h</i> [mm]	$h \leq d / 16$	30 < 46.88	24 < 37.5
Minimum distance to the wall, <i>e</i> [m]	$e \geq 1 \text{ m} \times N^{-1}$	225 < 250	300 < 200
Evaluation of decay curves	$T_{20}$ -5dB $\sim$ -20dB	-5dB $\sim$ -25dB	-5dB $\sim$ -25dB

## 音源・受音点位置

音源、受音点の位置を Fig. 3.6 に示す。音源には無指向性のツイータースピーカを用い、残響室の隅の 2 箇所に設置した。音源間の距離は  $3\text{m}/N$  以上にした。受音点は Fig. 3.8 に示すように 3 箇所に設置し、壁および試料から  $1\text{m}/N$  以上、音源から  $2\text{m}/N$  以上、受音点間は  $1.5\text{m}/N$  以上離れて設置した。

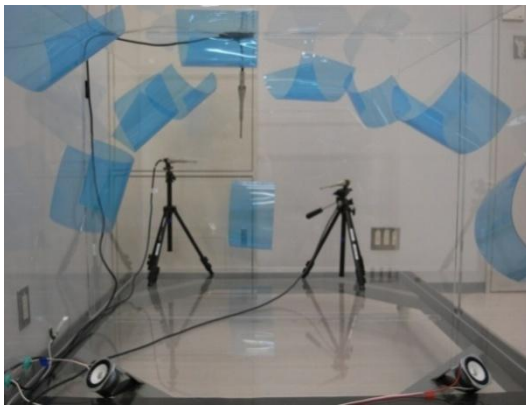


Fig. 3.6 Source and receiving equipment.



Fig. 3.7 Measurement system.

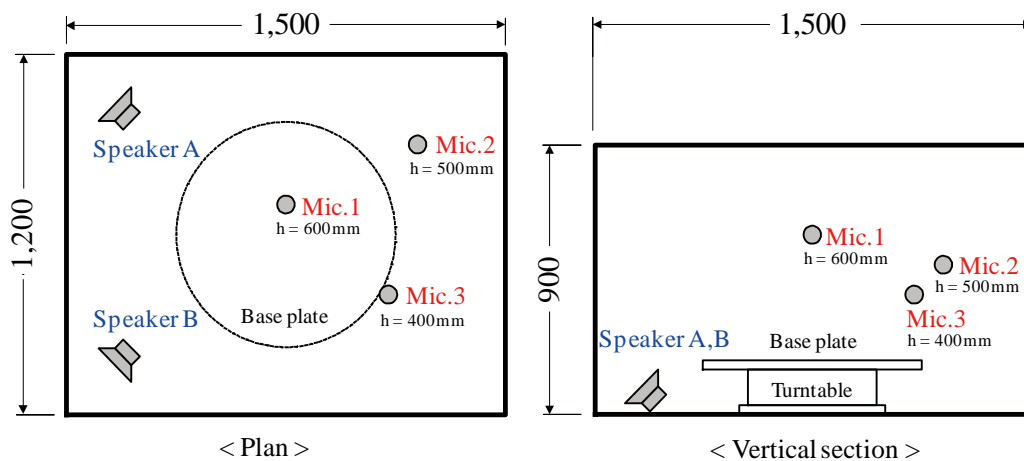


Fig. 3.8 The specifications of the reverberation room.

## 測定系統

測定経路はスピーカ 2 箇所、マイクロホン 3 箇所の計 6 通りとし、擬似ランダム信号である M 系列信号によるインパルス応答測定を通して残響時間を同定した。再生・録音を同期に再現できる日東紡音響エンジニアリング（Nittobo Acoustic Engineering Co., Ltd）のインパルス応答測定システム AEIRM[65]を用いてインパルス応答測定を行った。サンプリング周波数 96 kHz である。系統図を Fig. 3.9 に示す。機材を以下に列挙する。

Fig. 3.7 参照

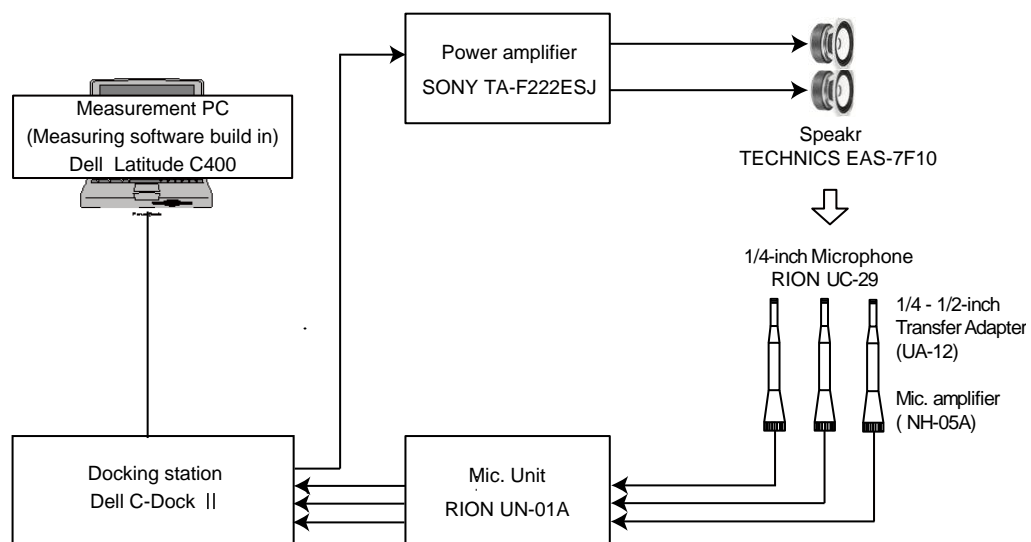


Fig. 3.9 Measurement system block diagram.

- 音源系：スピーカ（TECHNICS, EAS-7F10）、パワーアンプ（SONY, TA-F222ESJ）、測定用 PC（Dell, Latitude C400）、ドッキングステーション（Dell, C-Dock II）
- 受音系：1/4 インチコンデンサマイクロホン（RION, UC-29）、1/4-1/2 変換アダプタ（RION, UA-12）、1/2 インチコンデンサマイク用プリアンプ（RION, NH-05）、コンデンサマイク用コード（RION, EC-04B）、騒音計用ユニット（RION, UN-01A）、三脚、マイクスタンド

## 測定条件

縮尺およびインパルス応答測定に関する乱反射率の差異などの基礎的な実験を行う。縮尺については比較検討のため 1/4 および 1/5 の 2 条件を設定した。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調べるため、Table 3.7 に示す 5 条件を設定した。ここでは 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 回としている。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。また、試料回転数が完全な 1 回転ではないため、Table 3.6 の条件で測定を行い、測定システムの精度を検討する。

Table 3.6 Measurement conditions for different revolutions

Condition	Averages number	Signal length (angle)	Revolution number
A	115	0.68s (3.07 deg.)	approx. 1 (0.981)
B	116		approx. 1 (0.990)
C	117		approx. 1 (0.998)
D	118		approx. 1 (1.007)
E	119		approx. 1 (1.015)
F	120		approx. 1 (1.024)

Table 3.7 Measurement conditions for different revolutions.

Condition	Averages number	Signal length (angle)	Revolution number
A	117	0.68s (3.07 deg.)	approx. 1 (0.998)
B	59	1.37s (6.14 deg.)	approx. 1 (1.007)
C	117	1.37s (6.14 deg.)	approx. 2 (1.997)
D	176	1.37s (6.14 deg.)	approx. 3 (3.004)
E	234	1.37s (6.14 deg.)	approx. 4 (3.994)



### 3.3 測定結果と考察

まず、縮尺およびインパルス応答測定を行う前提として押さえておくべき回転精度、基準円盤の乱反射率および試料の吸音率について検討した。縮尺 1/4・信号長 0.68 秒として、Table 3.6 の通り同期加算回数を 1 回転付近で変化させた場合の乱反射率測定結果を Fig. 3.10 に示す（以降、周波数は実物換算）。1 回転に対して約  $\pm 6$  度の範囲では全周波数帯域にわたり乱反射率の測定値に影響は現れないことが確認された。また、基準円盤の乱反射率 ( $s_{\text{base}}$ ) および試料の吸音率 ( $\alpha$ ) は ISO の最大基準値以下になることが確認された。Fig. 11, Fig. 12 参照。

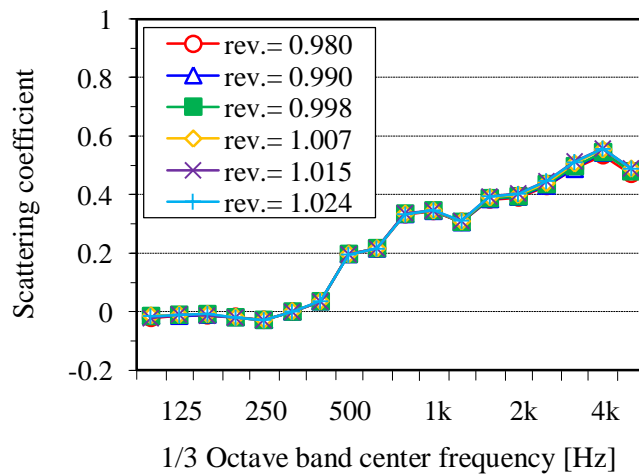


Fig. 3.10 Scattering coefficients of different revolution approx. 1.

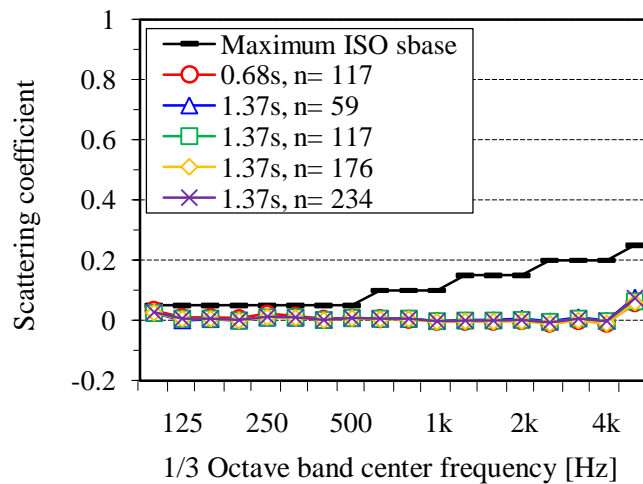


Fig. 3.11 Scattering coefficients for the base plate. (scale 1/4, signal length= 0.68s)

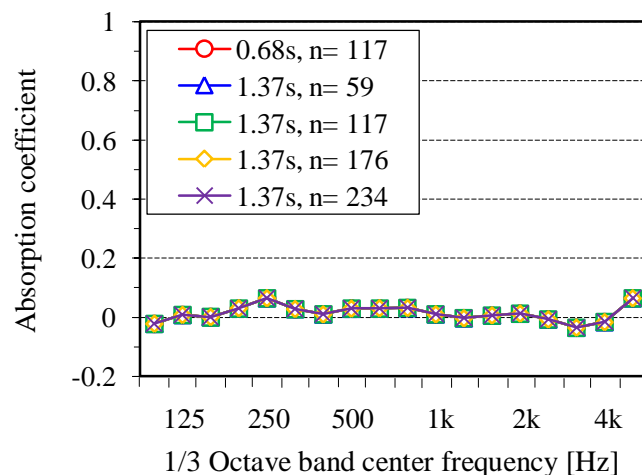


Fig. 3.12 Absorption coefficients for the test sample (scale 1/4)

### 3.3.1 同期加算回数による影響

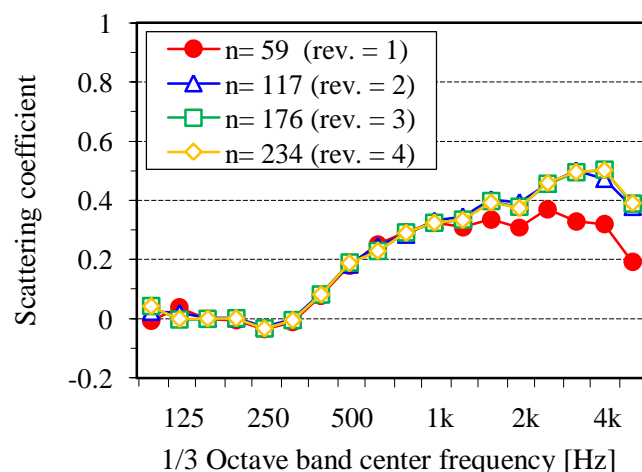


Fig. 3.13 Scattering coefficients measured for different averages number. (scale 1/4, signal length= 1.37s)

縮尺 1/4・測定間隔 1.365 秒において同期加算回数を変化させた場合 (Table 3.7 の条件 B~E) の乱反射率測定結果を Fig. 3.13 に示す (以降、周波数は実物換算)。2 回転以上 (同期加算回数 117、176、234 回) の場合ではほぼ一致する値を示したが、1 回転 (同期加算回数 59 回) では中音域まで一致するものの高音域で値が小さくなっている。SN 比の影響も考えられるが、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 ~ 6deg を若干上回っていることが影響した可能性がある。

## 3.3.2 測定間隔による影響

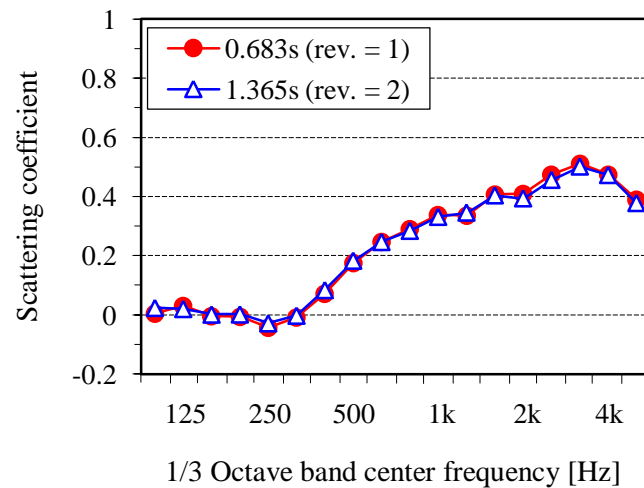


Fig. 3.14 Scattering coefficients measured for different signal lengths. (scale 1/4)

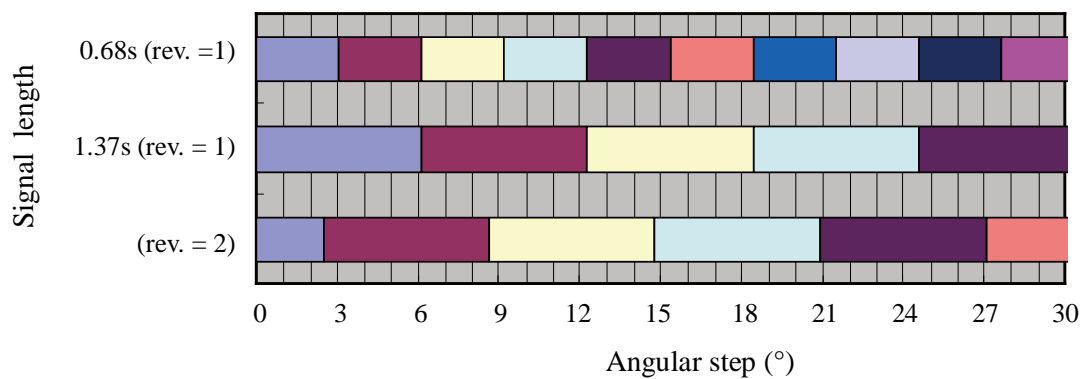


Fig. 3.15 Angular steps for different signal lengths. (scale 1/4, number of averaging= 117)

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 (Table 3.7 の条件 A、C) の乱反射率測定結果を Fig. 3.14 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。特に測定間隔が 0.68 秒の場合は低音域で残響時間を下回るが、その影響もみられない。

### 3.3.3 縮尺による影響

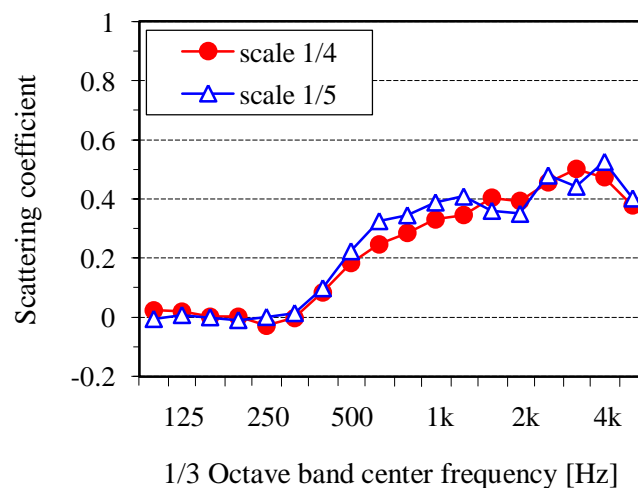


Fig. 3.16 Scattering coefficients measured for different scales  
(signal length= 1.37s, averages number = 117).

Table 3.7 の条件 C における縮尺 1/4 および 1/5 の乱反射率測定結果を Fig. 3.16 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<sup>3</sup>、202.5m<sup>3</sup>、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。

## 3.4 他機関との比較

Table 3.7 の条件 C (縮尺 1/4、信号長 1.37 秒、同期加算回数 117 回) におけるランダム入射乱反射率の測定結果と、他機関の結果とを比較する (Table 3.8)。乱反射率値は 500~4k Hz (1/3 oct. 実物換算) の平均で求め、Fig. 3.17 に示す。本研究で用いた半球の密度は 20.48 % であり、他機関とよく対応していることが確認された。

Table 3.8 Measurement conditions for different revolutions.

Institution	Physical scale ratio	Structural depth [mm]
RWTH Aachen university, Germany	1/5	100
Hanyang University, Republic of Korea	1/10	100
Tokyo University, Japan	1/4, 1/5	120

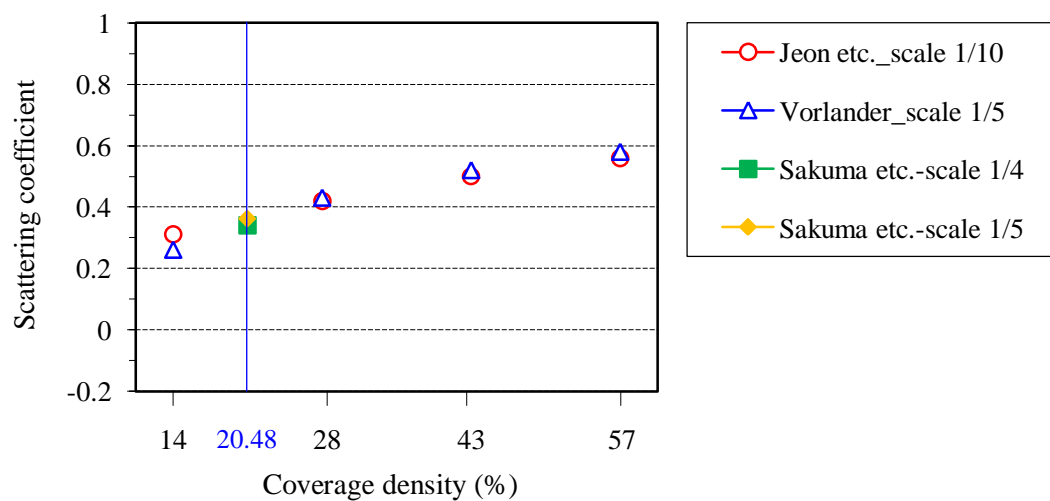


Fig. 3.17 Effect of different scale (signal length= 1.37s, number of averaging= 117).

### 3.5 まとめ

壁面反射の拡散性指標として ISO17497-1 で規定されたランダム入射乱反射率の測定法に基づいて測定システムを設定し、模型残響室における縮尺およびインパルス応答測定に関する乱反射率の基礎的な実験を行った。測定条件の違いによる測定結果の差異を把握したので、その概略を以下にまとめる。

回転精度に関しては、同期加算回数を 1 回転付近で変化させた場合の乱反射率測定結果、1 回転に対して約  $\pm 6$  度の範囲では乱反射率の測定値に影響は殆どないことが確認された。同期加算回数に関しては、2 回転以上（同期加算回数 117、176、234 回）の場合ではほぼ一致する値を示したが、1 回転（同期加算回数 59 回）は中音域までは一致するものの高音域の値が小さくなっている。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。測定間隔に関しては、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。本測定システムによる測定結果は他機関とよく対応していることが確認された。

## 第 4 章

# 試料の適用条件に関する検討

### 4.1 はじめに

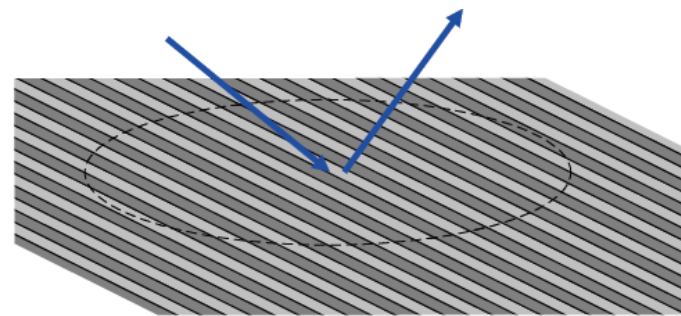
有限寸法の試料を用いて測定を行う場合には、試料端部からの影響が含まれていることから、試料条件によっては結果に大きな差が生じることが予想される (Fig. 4.1)。乱反射率の測定法[3]においては、試料を回転させながら測定したインパルス応答により鏡面反射成分を抽出するという原理から円形の試料を用いることとされている。1次元周期構造の場合には試料端部の凹凸により拡散が生じてしまい、乱反射率の測定値が過大評価される可能性が考えられる。そこで本章では、1次元周期構造である三角および矩形波形の試料を対象とした乱反射率の測定を行い、試料端部による乱反射率の挙動を把握する。また、試料端部からの影響を防ぐ方法を提案する。

### 4.2 1次元周期構造の乱反射率の測定

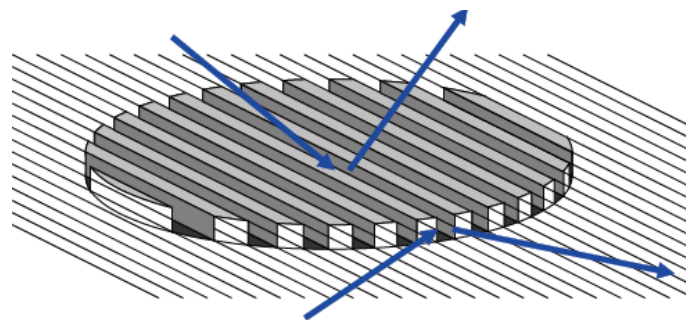
建築・都市空間においては周期的な構造を持つ壁面・部材等が頻繁に存在する1次元周期構造を対象として乱反射率の測定を行い、数値解析[58]との対応について検討する。

#### 4.2.1 測定条件

測定は Fig. 3.1 の縮尺模型残響室、Fig. 3.9 の測定系統を用い、縮尺 1/4、同期加算回



(a) Infinte surface



(b) Circular sample

Fig. 4.1 The diagrammatic view of 1D rectangular periods.

数 117 回、信号長 1.37 秒で行った。測定試料の写真を Fig. 4.2 に、概略図を Fig. 4.3 に、試料の形状パターンを Table 4.1 に示す。断面形状が三角波・矩形波の凹凸の高低差を変化させた 15 周期の 1 次元周期構造 4 種類を、MDF（木粉成形材）、表面ウレタンクリア塗装仕上げで円盤状（直径 750 mm）に作成した。ここで、Type T の  $h/L = 30$  [%] および Type R の  $h/L = 20, 50$  [%] は数値解析が行われている[3]。





(a) Triangular periods. (b) Rectangular periods.

Fig. 4.2 The diagrammatical view of the 1D measurement patterns

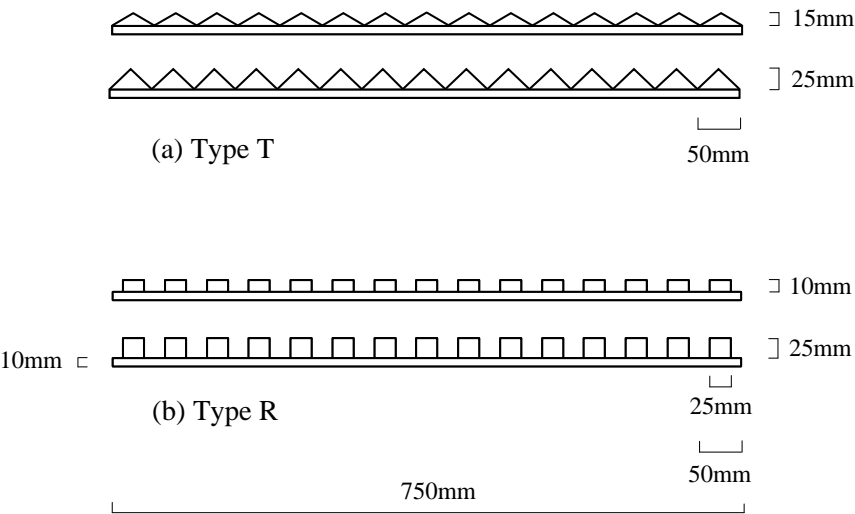


Fig. 4.3 Illustration of a sample.

Table 4.1 Measurement patterns of the periodical shapes

Type	Shape	$h / L$ [%]	$h$ [mm]
Type T	Triangular period	30	15
		50	25
Type R	Rectangular period	20	10
		50	25

$h$  : Unevenness pitch difference     $L$  : Period ( = 50 [mm] )

#### 4.2.2 結果と考察

Type T と Type R の基準円盤の乱反射率 ( $s_{\text{base}}$ )、吸音率および乱反射率 ( $s$ ) の測定結果を述べる。周波数は実物換算で表した。

**基準円盤の乱反射率 ( $s_{\text{base}}$ )** : ISO の最大基準円盤の乱反射率値以下 (Fig. 4.4)。

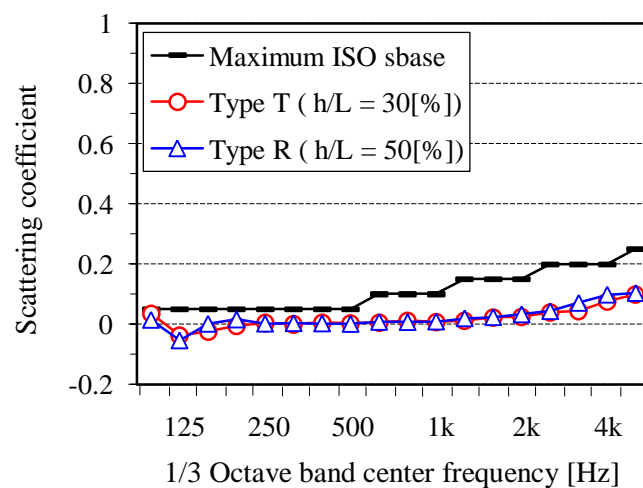


Fig. 4.4 Scattering coefficients for the base plate

## Type T (三角波形)

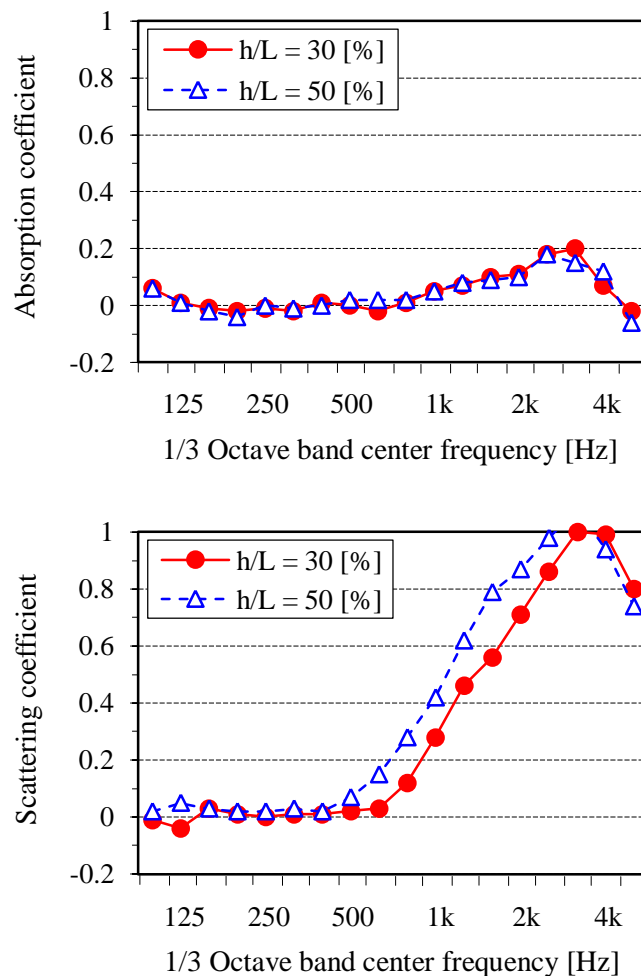


Fig. 4.5 Absorption coefficients and Scattering coefficients  
measured for Type T with  $h/L = 30, 50$  [%]

Type T における  $h/L = 30, 50$  [%] の吸音率および乱反射率の実験結果を比較して Fig. 4.5 に示す。吸音率は全周波数帯域に渡ってほぼ一致しているが、乱反射率は差がみられ、400 Hz より低い周波数でほぼ 0 の値を示すものの、500~2k Hz の範囲では、 $h/L = 50$  [%] が 30 % と比べて 0.1~0.2 大きい結果となった。

## Type R (矩形波形)

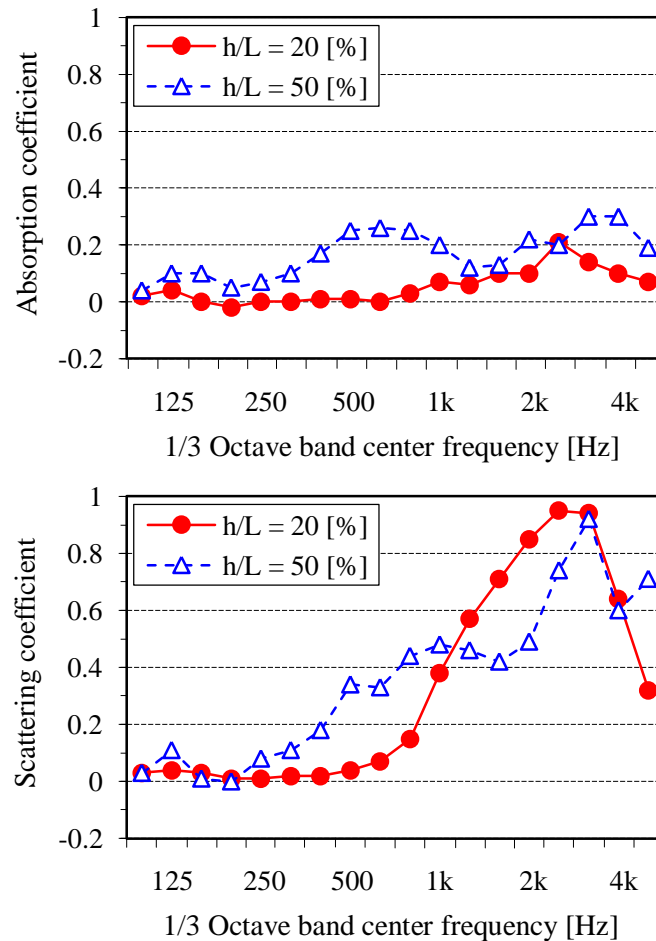


Fig. 4.6 Fig. 4.5 Absorption coefficients and Scattering coefficients  
measured for Type R with  $h/L = 20, 50$  [%]

Type R における  $h/L = 20, 50$  [%] の吸音率および乱反射率の実験結果を比較して Fig. 4.6 に示す。 $h/L = 20$  [%] の乱反射率は 2.5k Hz でピークを持つ。一方、 $h/L = 50$  [%] は、凹部の形状における空気振動あるいは多重回折の作用による吸音現象が顕著になり、全周波数帯域で 0.1～0.3 と比較的大きく、中音域と高音域で 2 つのピークを持つが、乱反射率も 1.6k Hz で一度落ち込み、それより高い周波数で再び値が大きくなる傾向を示している。 $h/L = 50$  [%] は 20 % と比べて、250～800 Hz で 0.1～0.4 と比較的大きな値を示しているが、1.25k～2.5k Hz では逆転して 0.2～0.4 小さくなっている。

## 4.2.3 数値解析との比較

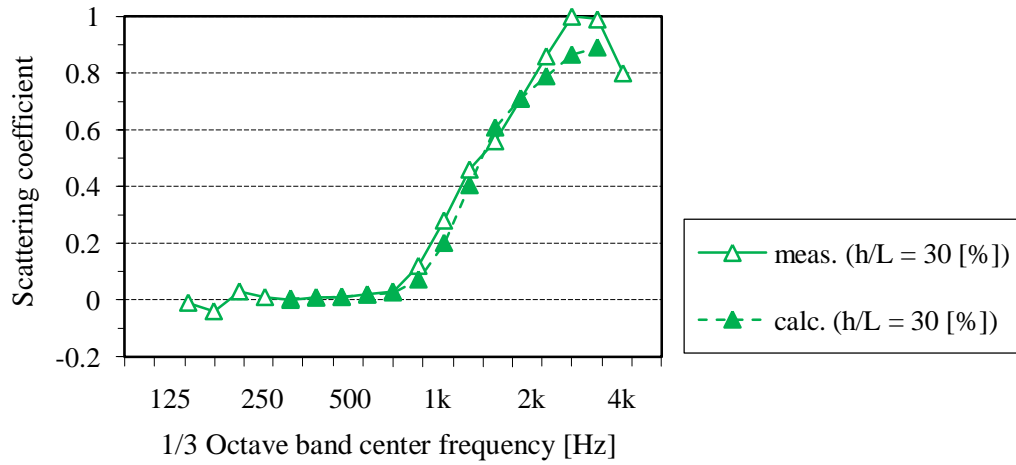


Fig. 4.7 Comparison of the result with random-incidence scattering coefficient calculated for Type T  $h/L$  with = 30 [%]

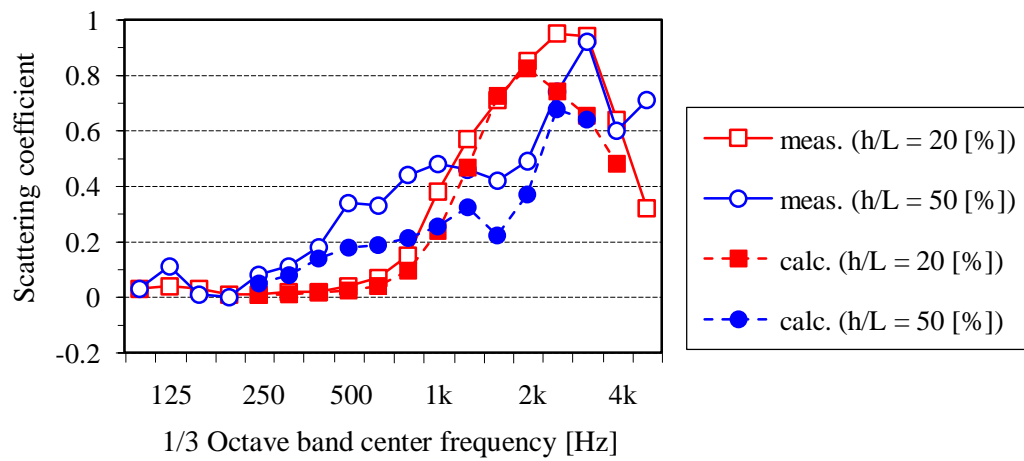
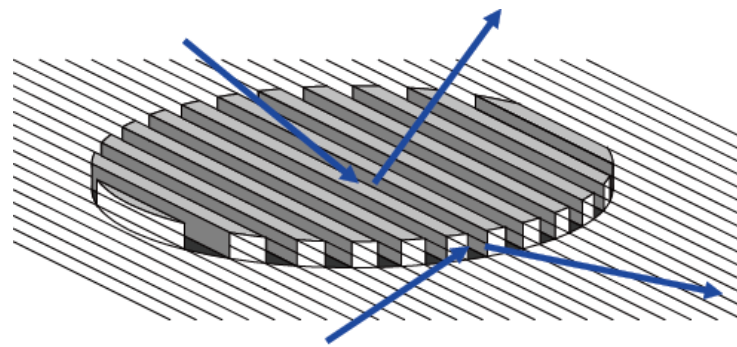
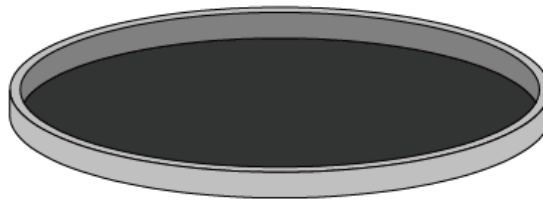


Fig. 4.8 Comparison of the result with random-incidence scattering coefficient calculated for Type R  $h/L$  with = 20, 50 [%]



(a) Circular sample



(b) Base plate (covered the perimeter with a rigid border of fixed height).

Fig. 4.9 The diagrammatic view of measurement concept.

Fig. 4.7、Fig. 4.8 に Type T・Type R それぞれの形状における実測および数値解析の乱反射率を比較して示す。Type T の  $h/L = 30$  [%]、Type R の  $h/L = 20$  [%] は、2.5k~4k Hz で若干の乖離がみられるものの、よい対応を示している。Type R の  $h/L = 50$  [%] は、周波数特性の形状は近似しているが、実測の方が値は大きい。これは試料の形状に関わる吸音現象に、材料の吸音が影響しているためと考えられる。

### 4.3 基準円盤の枠の高さによる影響

Fig. 4.9 (a) に示すように、1次元周期構造などの試料端部形状が凹凸である場合は、試料端部から拡散が生じ、乱反射率値が過大評価される可能性が考えられる。そこで、基準円盤の縁に枠を取り付けることから試料端部の影響を防ぐ方法を提案する (Fig. 4.9 の b)。本節では、ケーススタディーを通して枠の高さによる乱反射率の挙動を把握し、枠の高さによる様々な知見を得ることを目的とする。

### 4.3.1 測定条件

測定は縮尺 1/4、同期加算回数 117 回、信号長 1.37 秒で行った。Table 4.2 に示すように、矩形波の凹凸の高低差を変化させた直径  $d = 750$  [mm]、15 周期の 1 次元周期構造 4 種類を用い、枠の高さによる影響を検討する。枠の高さパターンについては、枠なし、試料の高さと同一、ISO[4]の試料高さ  $h = d / 16$  以内という規定値 ( $46.875 \text{ mm} = 750 / 16$ ) の最大に設定して変化させた。測定試料の写真を Fig. 4.10 に、概略図を Fig. 4.11 に示す。枠の詳細は Table 4.3 を参照。

Table 4.2 Measurement conditions for different structural depth of test sample

Condition	Structural depth of test sample, $h$ [mm]	Height of border [mm]
A	10	0
		50
B	25	0
		25
		50
C	35	0
		35
		50
D	45	0
		35
		50

Table 4.3 Specifications of border.

Parameter	Detailed contents
Thickness [mm]	1
Material	Plastic



Fig. 4.10 Measurement set-up with border.



(a)  $h = 10$  [mm]  
(height of border = 0, 50 [mm])



(b)  $h = 25$  [mm].  
(height of border = 0, 25, 50 [mm])



(c)  $h = 35$  [mm]  
(height of border = 0, 35, 50 [mm])



(d)  $h = 45$  [mm]  
(height of border = 0, 35, 50 [mm])

Fig. 4.11 The diagrammatical view of the measurement patterns



### 4.3.2 結果と考察

1次元矩形波周期構造の高さ  $h = 10$  [mm]における枠の高さを変化させた (Table 4.2 の条件 A) 乱反射率の測定結果を Fig. 4.12 に示す。乱反射率値が全周波数域にわたりほぼ一致しており、矩形波周期に対する高さの比  $h/L = 10$  [%] の場合は試料端部からの影響は見られない。

1次元矩形波周期構造の高さ  $h = 25, 35, 45$  [mm] において、枠の高さを変化させた (Table 4.2 の条件 B~D) 乱反射率の測定結果を Fig. 4.13 に示す。乱反射率の周波数特性は近似しているものの、枠ありの場合は枠なしに比べ、乱反射率値が低下することが確認された。また、枠の高さが試料の高さ以上になるに従って乱反射率値は収束した。Table 4.2 の条件 D においては、枠の高さが試料の高さより低い 35 mm の場合は、収束した値との乖離が見られた。枠の高さを決める際には、試料の高さ以上かつ測定できる試料の高さである  $d/16$  以下にすることが望ましい。

(a) 10 mm

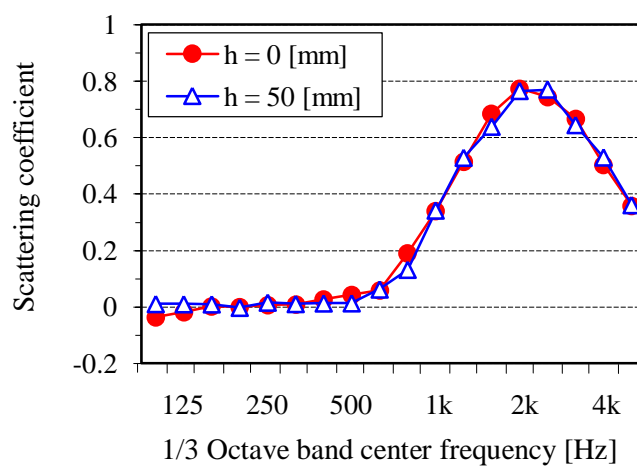
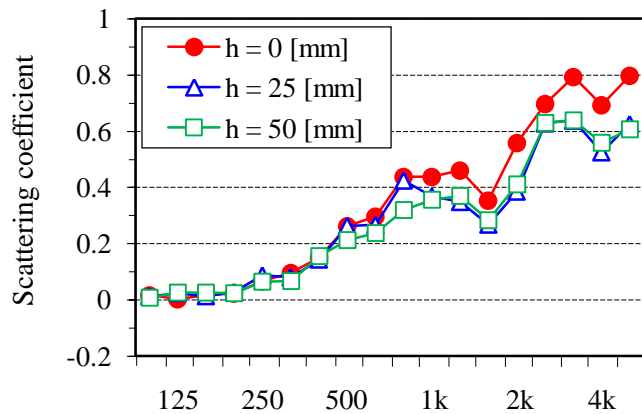


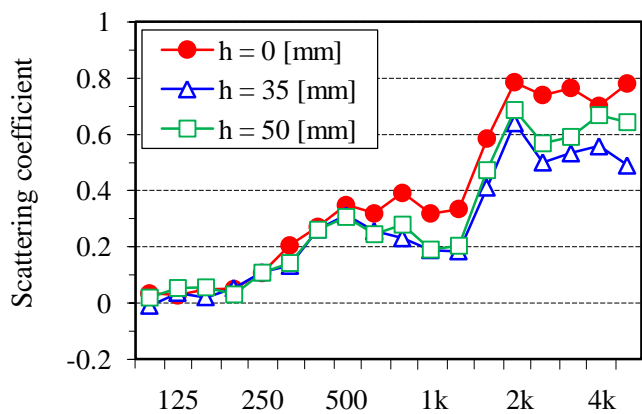
Fig. 4.12 Scattering coefficients measured for different heights of borders.

(a): structural height of test sample = 10 [mm].

(b) 25 mm



(c) 35 mm



(d) 45 mm

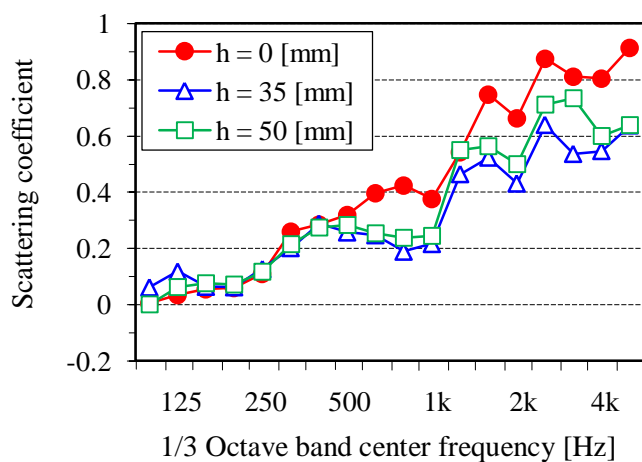


Fig. 4.13 Scattering coefficients measured for different heights of borders.

(b), (c), (d): structural height of test sample = 25, 35, 45 [mm]

## 4.4 基準円盤への枠の設置による影響

試料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、Fig. 4.7, Fig.4.8 で乖離がみられた数値解析との対応、また吸音材を含む 1 次元周期構造について検討する。

### 4.4.1 測定条件

測定方法は前節の検討で用いたものと同一とし、縮尺 1/4 で行った。使用試料である矩形 1 次元周期構造の種類を Table 4.4 に、測定写真を Fig. 4.15 に、概略図を Fig. 4.16 に示す。拡散体を構成する材料はタモ集成材ウレタンクリア塗装、吸音材はスポンジ 10 mm である。基準円盤の断面を Fig. 4.14 に示す。第 4 章の 2 節で使用した基準円盤は枠のないもので、新たに作成した枠あり基準円盤は、既存の基準円盤直径  $d = 750$  [mm] の周囲に厚 25 mm、円盤の内表面から高さ 50 mm の枠を取り付けた形状である。前節での検討により、枠の高さは ISO[4]の試料高さ  $d / 16 = 46.875$  [mm] 以内という規定値の最大に近似した 50 mm に決めた。

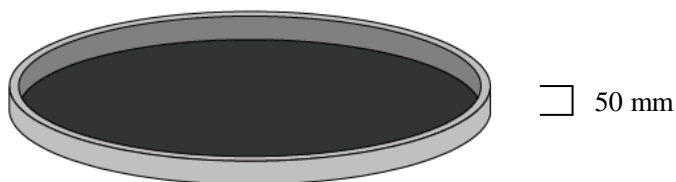


Fig. 4.14 The diagrammatical view of the base plate with border.

Table. 4.4 Specification of samples ( $L$ : surface period,  $h$ : height,  $t$ : thick) [unit: mm].

Shape	$h$	$t$	Interval of Sponge	Height of border
Rectangular $L = 25$	10	10	none	50
	25	25	none	50
	10	10	25	50
	35	25	All area	50

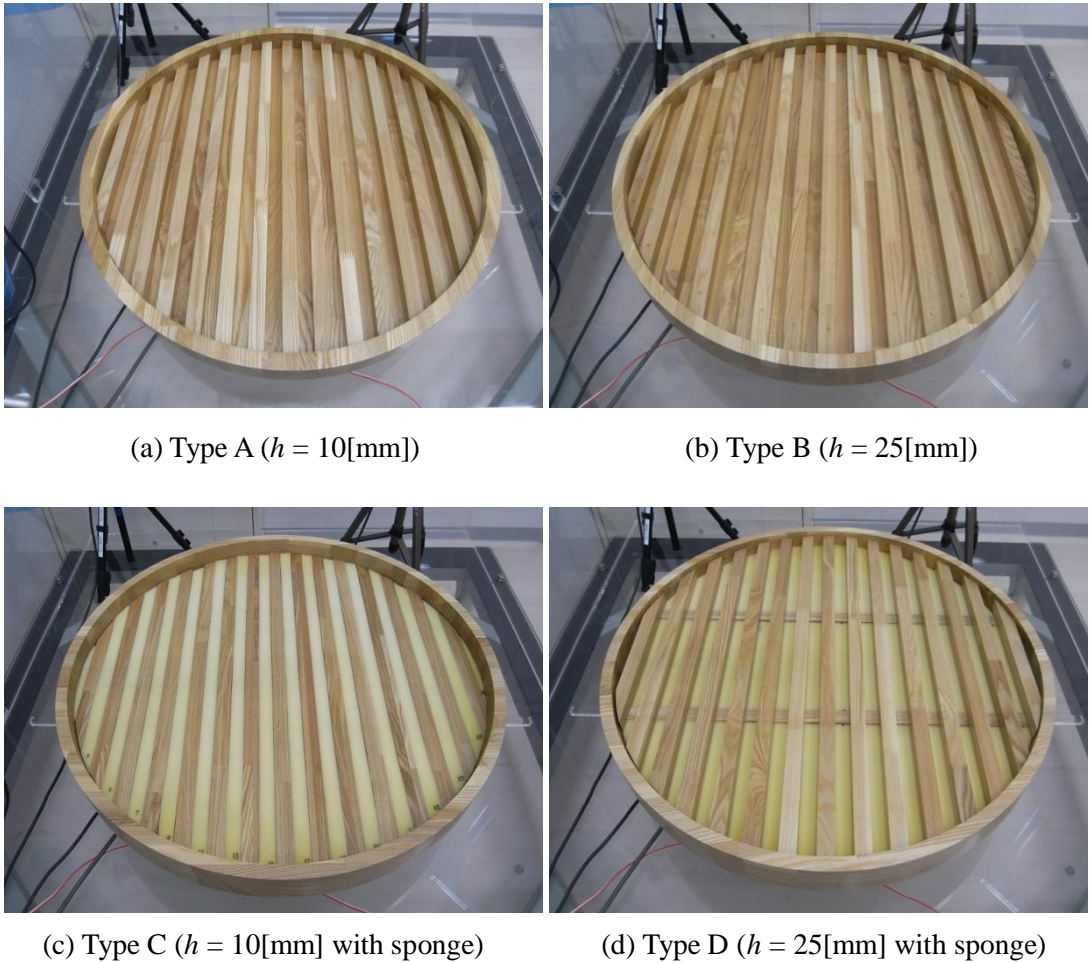


Fig. 4.15 The diagrammatical view of the measurement patterns.

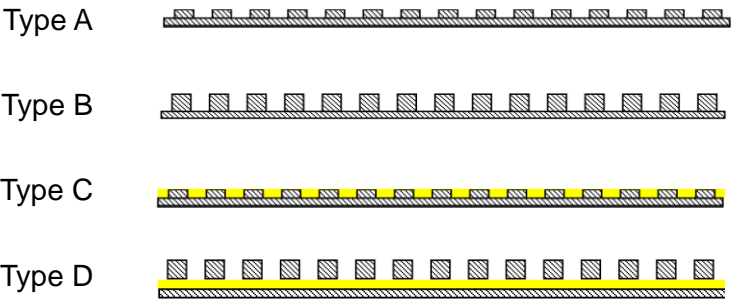


Fig. 4.16 The diagrammatical view of the the measurement types (1/4 scale).

## 4.4.2 結果と考察

## 数値解析との対応

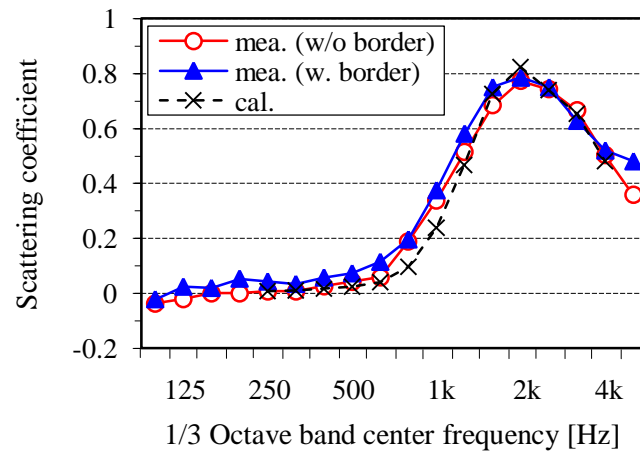


Fig. 4.17 Scattering coefficients measured and calculated Type A.

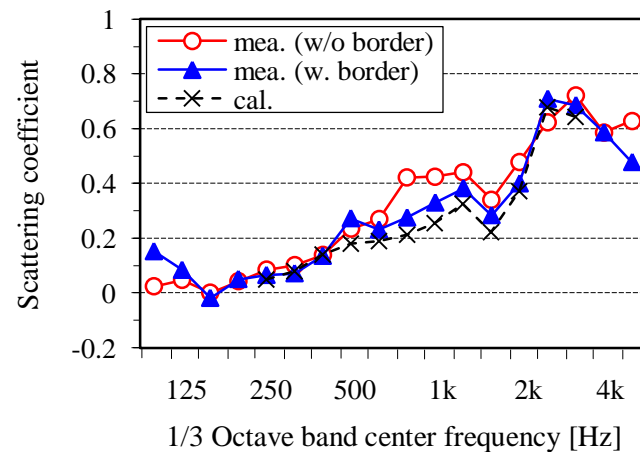


Fig. 4.18 Scattering coefficients measured and calculated Type C.

矩形 1 次元周期構造 Type A, B の基準円盤枠なし・ありによる実測と数値解析の乱反射率を Fig. 4.17, Fig. 4.18 に示す。縮尺 1/4 で  $h = 10$  [mm] の Type A では、枠なし・あり、数値解析共により対応を示し(Fig. 4.17)、 $h = 25$  [mm] の Type B では、枠なしの測

定値が数値解析と比べて 500 Hz 以上で乖離がみられ値が大きくなったが、枠ありの測定値は数値解析に近似する値を示した(Fig. 4.18)。1 次元周期構造拡散体の基準円盤枠なしが枠ありより値が大きくなる理由は、拡散体の表面以外に側方による音の散乱も散乱成分として乱反射率の測定値に含まれるためと考えられる。Type A の枠なし・ありにおける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。

### 吸音材を含む場合

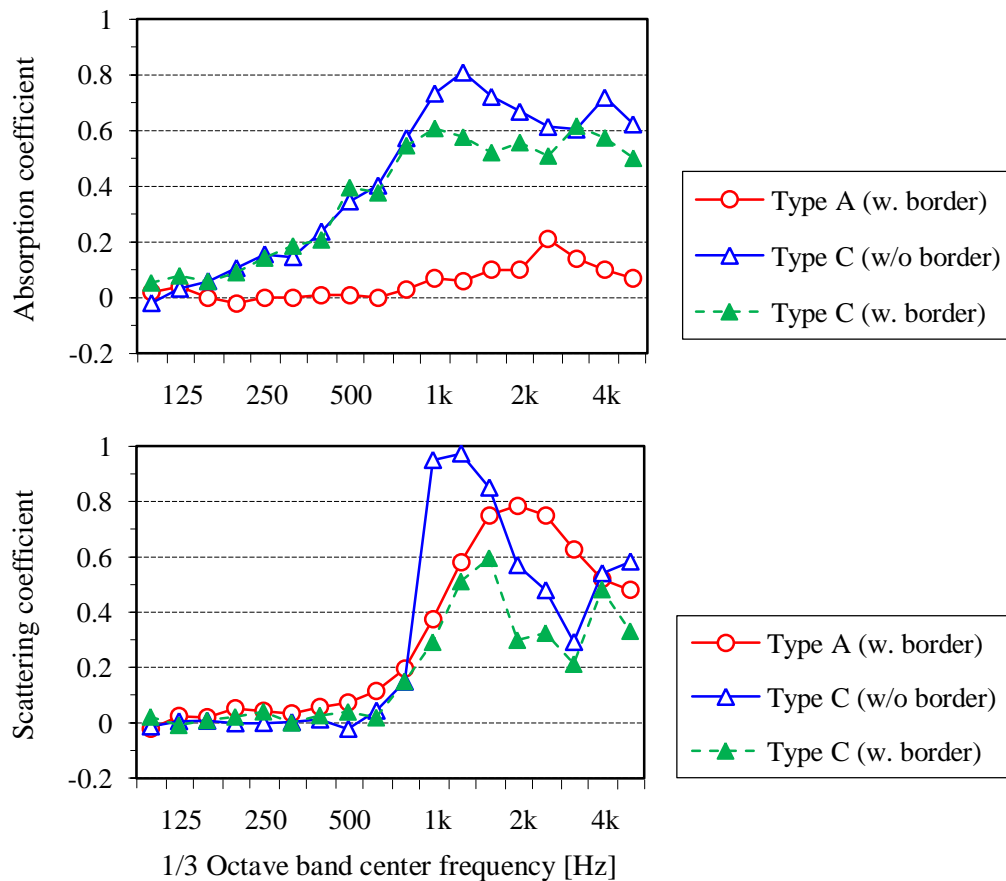


Fig. 4.19 Absorption and scattering coefficients measured Type A and C.

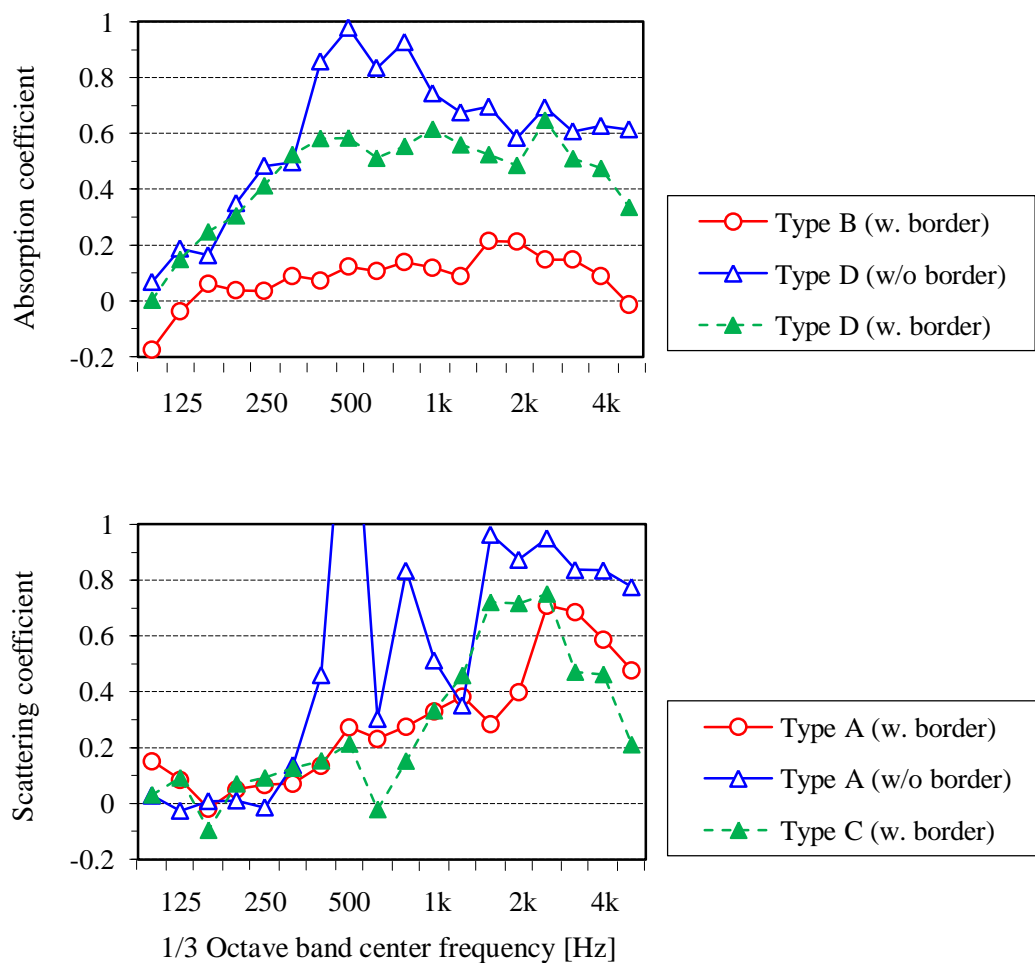


Fig. 4.20 Absorption and scattering coefficients measured Type B and D.

吸音材を配置した Type C, D の吸音率・乱反射率を Fig.4.19, Fig. 4.20 に示す。JIS A 1409[5]の残響室法吸音率測定では試料に枠を付けることが規定されているが、ISO[4]の測定では枠付が規定されておらず、吸音率は、基準円盤が枠なしの場合試料側方の吸音も測定値に反映され、枠なし・ありの比較では枠なしの方が大きな値となる。Type C,D の吸音率は枠ありで 0.6 程度以下となった。Type D の乱反射率は 500 Hz で 1 を大きく超える値となったが、この理由として、測定で算出される鏡面反射以外の見かけ上の吸音率には試料の吸音率も含まれるものの、試料の吸音率と鏡面反射以外の見かけ上の吸

音率が共に大きすぎて乱反射率を正確に抽出できていないためと推察される。Type C, D の枠あり基準円盤による乱反射率測定値は吸音材のない Type A, B と比較して妥当であり、本測定システムでは吸音率が 0.6 程度以下で乱反射率が算出できていると考えられる。なお、ISO [4] の規定による試料の吸音率許容値は 0.5 以下である。

## 4.5 まとめ

そこで本章では、建築・都市空間においては頻繁に用いられている 1 次元周期構造の乱反射率の測定を行い、試料端部による影響を検討した。

測定結果から、1 次元周期構造形状を実測した乱反射率は、高低差の大きい矩形波形状で、数値解析と特性は近似しているものの値に乖離を生じた。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、側方の影響により過大に測定されていた吸音率・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。なお、拡散体の高低差が小さい、またはキューブ・半球配置など円盤内で完結するような構成の拡散体で、ISO[38]の規定内であれば、枠なしの基準円盤による測定でも適用できるものと考えられる。



## 第 5 章

# インパルス応答測定に関する検討

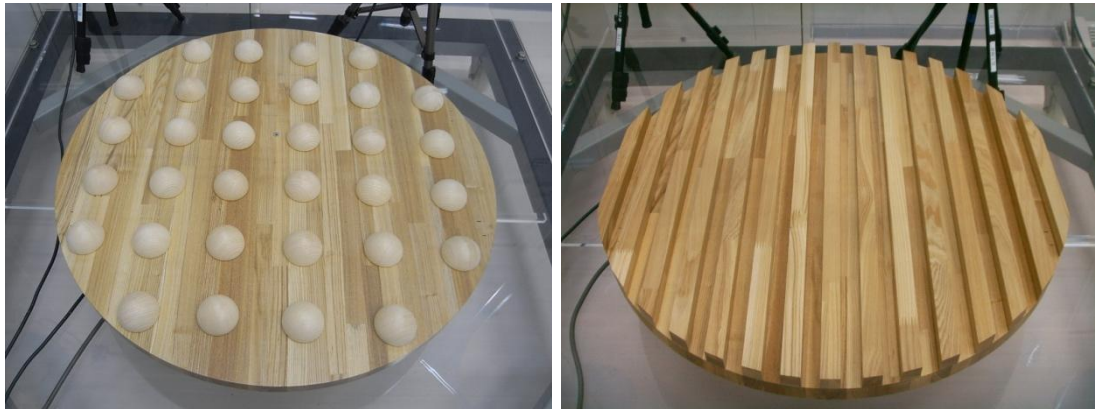
### 5.1 はじめに

乱反射率（Scattering coefficient）の測定法としては、残響室において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試料回転法が提案されているが、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。本章では、縮尺模型を用いた乱反射率測定において、インパルス測定用の 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。

### 5.2 信号長による影響

#### 5.2.1 測定条件

本実験は縮尺 1/4 で行った。測定試料は Fig. 5.1 に示すように、基準円盤（直径 750mm）上に、木製半球 32 個を格子状に均等配置して Type H と矩形 1 次元周期構造 Type R を作成した。インパルス応答測定では、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 5.1）。なお、残響時間の同定には T15 (-5 ~ -20 dB) を用いた。ターンテーブルは日東紡音響エンジニアリング（Nittobo Acoustic Engineering Co., LTD.）の TT-1000[67]を使用した。Fig. 5.2 を参照。寸法は W402 × H170 × D402 mm、回転速度は 1 回転で 4 秒～6 分操作可能、停止制度は ±1 度である。



(a) Type H

(b) Type R

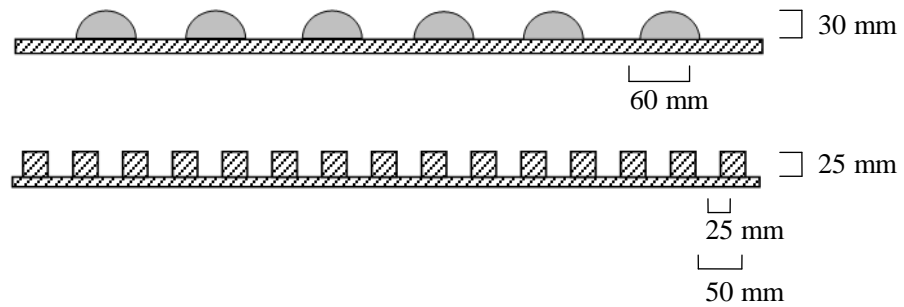


Fig. 5.1 The diagrammatical view of measurement patterns (Hemisphere, Rectangular Type).

Table 5.1 Conditions of impulse response measurement (rev. = 1).

Signal length [s]	Revolution speed [s/rev]					
0.68	-	-	41	82	164	328
1.37	20.5	41	82	164	328	-
2.73	-	82	164	328	-	-
5.46	82	-	328	-	-	-
Angular step [deg]	24	12	6	3	1.5	0.75
Averaging number	15	30	60	120	240	480



Fig. 5.3 Turntable (Nittobo Acoustic Engineering Co., Ltd, TT-1000).

## 5.2.2 結果と考察

### ■ Type H(半球)の場合

信号長 0.68, 1.37, 2.73, 5.46 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. 5.4 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から低下する傾向が見られる。信号長 0.68 秒の場合、回転速度 41 秒/回転で若干の低下が見られるのに対して、信号長 1.37 秒では 82 秒/回転以下で、信号長 2.73 秒では 164 秒/回転以下で、信号長 5.46 秒では 328 秒/回転以下で低下が生じている。なお、各信号長における T4（試料有・回転有）の残響減衰曲線を Fig. 5.5-8 に示す。信号長が長くなると SN 比が低下し、残響時間を過大評価することが確認された。従って、信号長が長い程、回転速度を遅く設定する必要がある。Fig. 5.9 には、信号長 1.37 秒における T2（試料有・回転無）と T4（試料有・回転有）の残響減衰曲線を示す。

(a) 0.68 s

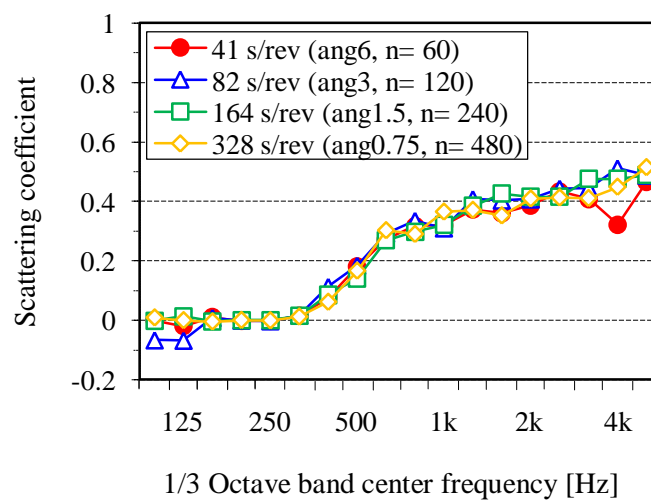
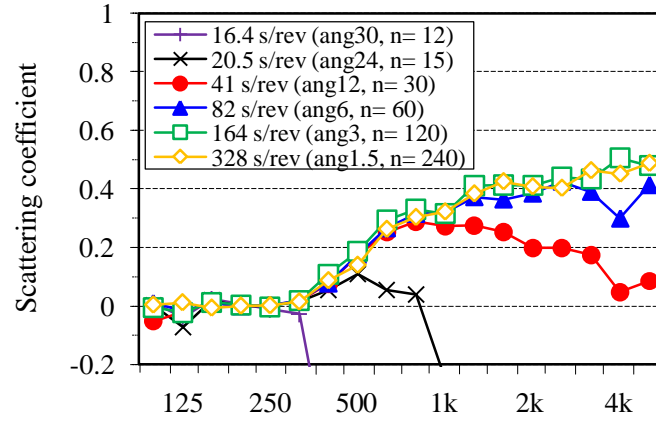
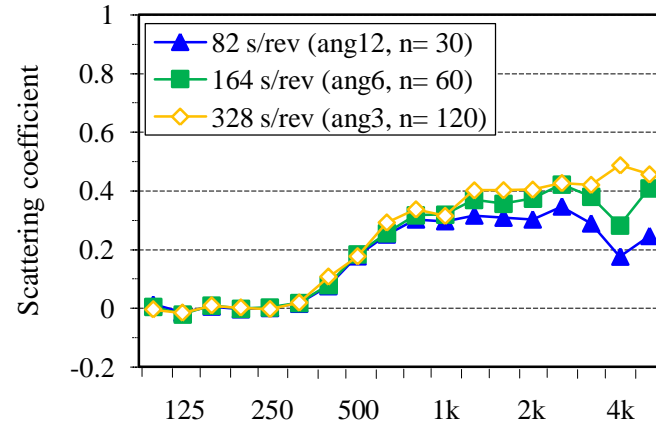


Fig. 5.4.1 Scattering coefficients measured for Type H with fixed signal lengths.

(b) 1.37 s



(c) 2.73 s



(d) 5.46 s

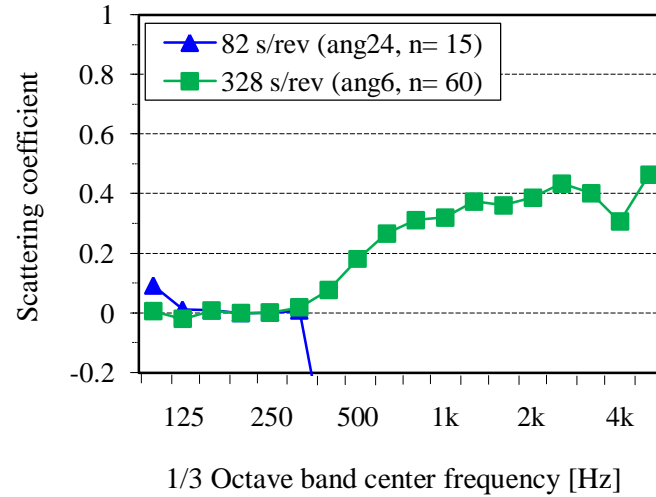


Fig. 5.4.2 Scattering coefficients measured for Type H with fixed signal lengths.

&lt;Signal length: 0.68 s&gt;

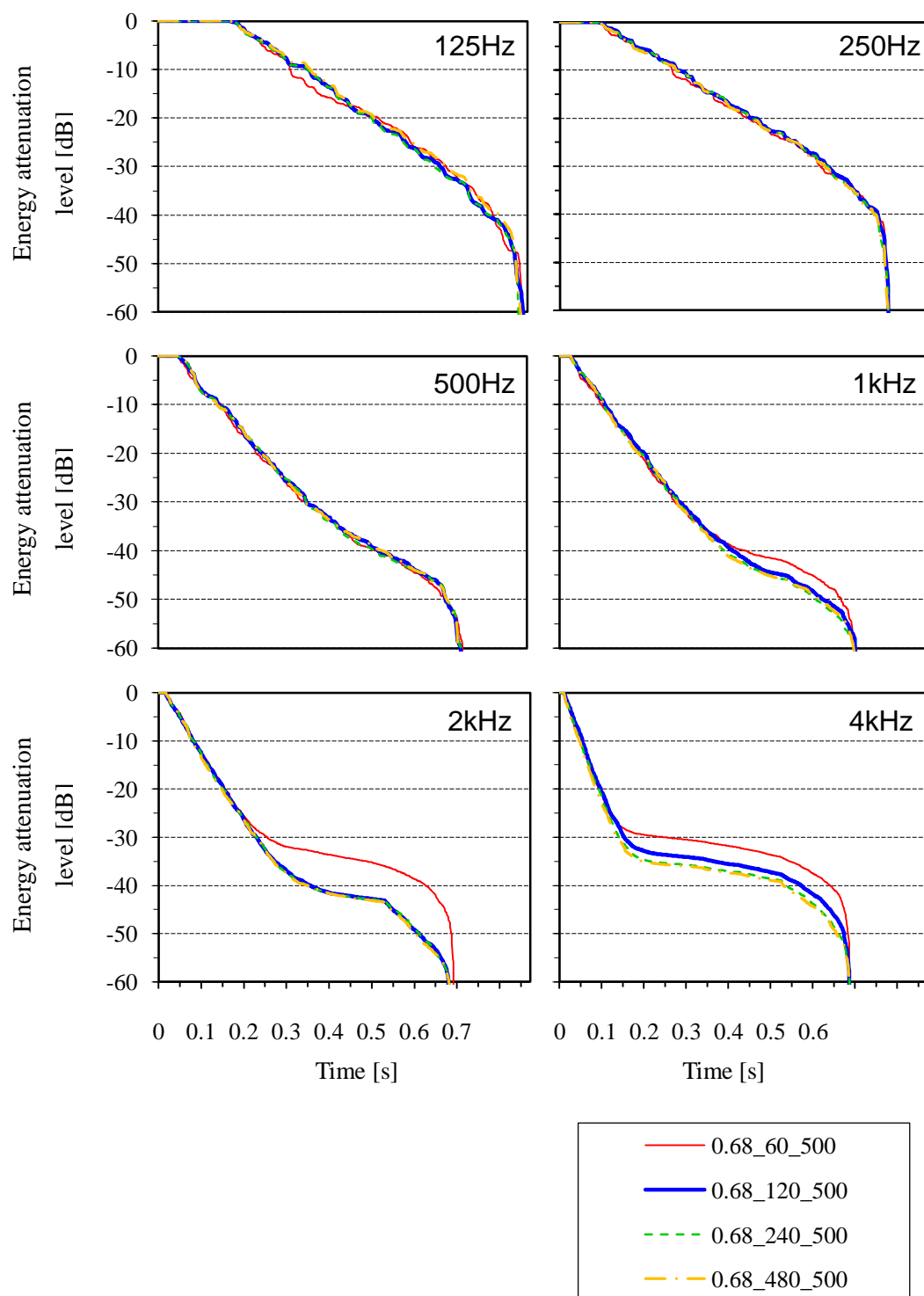


Fig. 5.5 Energy attenuation decay curves for Type H (signal length: 0.68 s, T4).

<Signal length: 1.37 s>

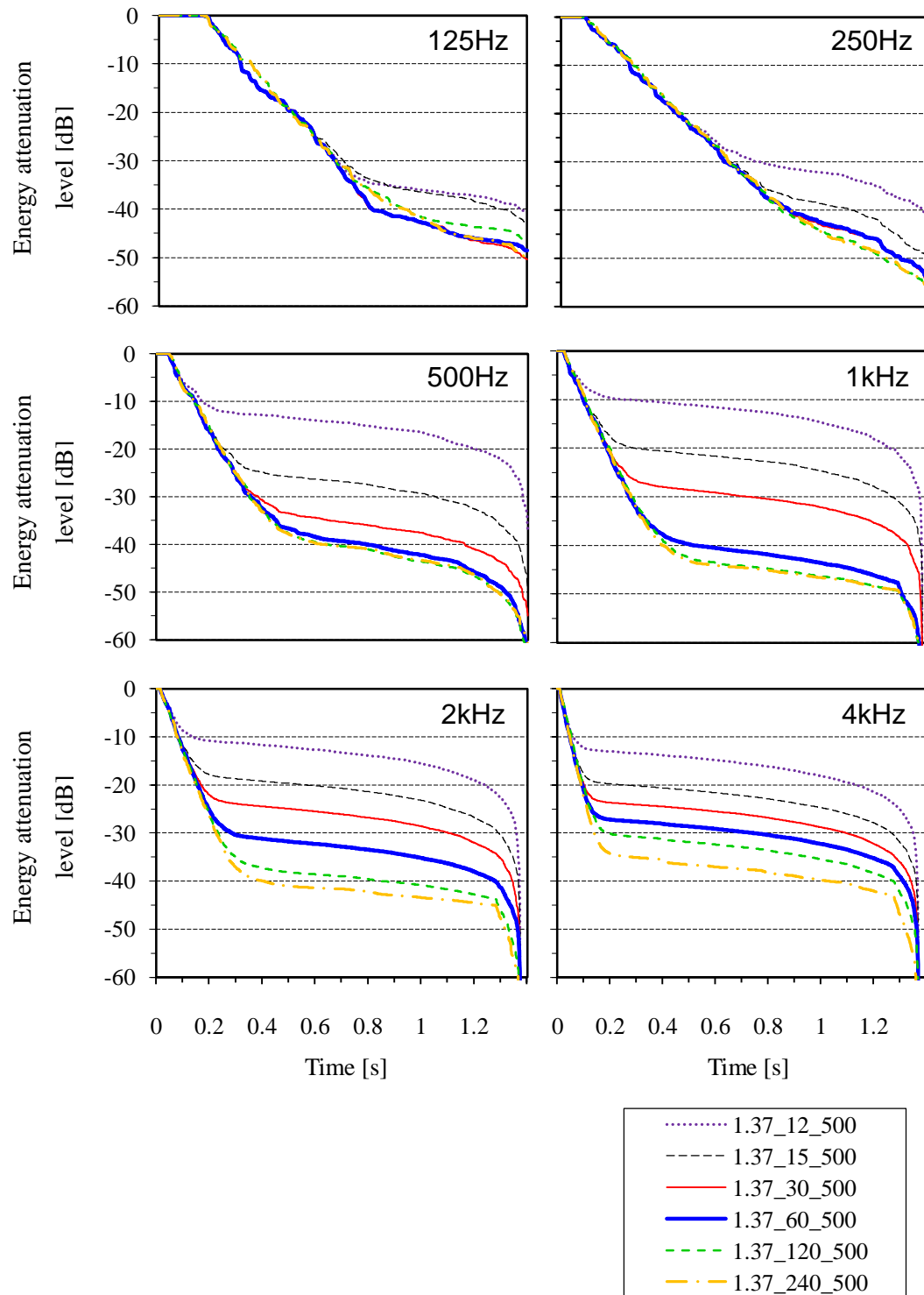


Fig. 5.6 Energy attenuation decay curves for Type H (signal length: 1.37 s, T4).

&lt;Signal length: 2.73 s&gt;

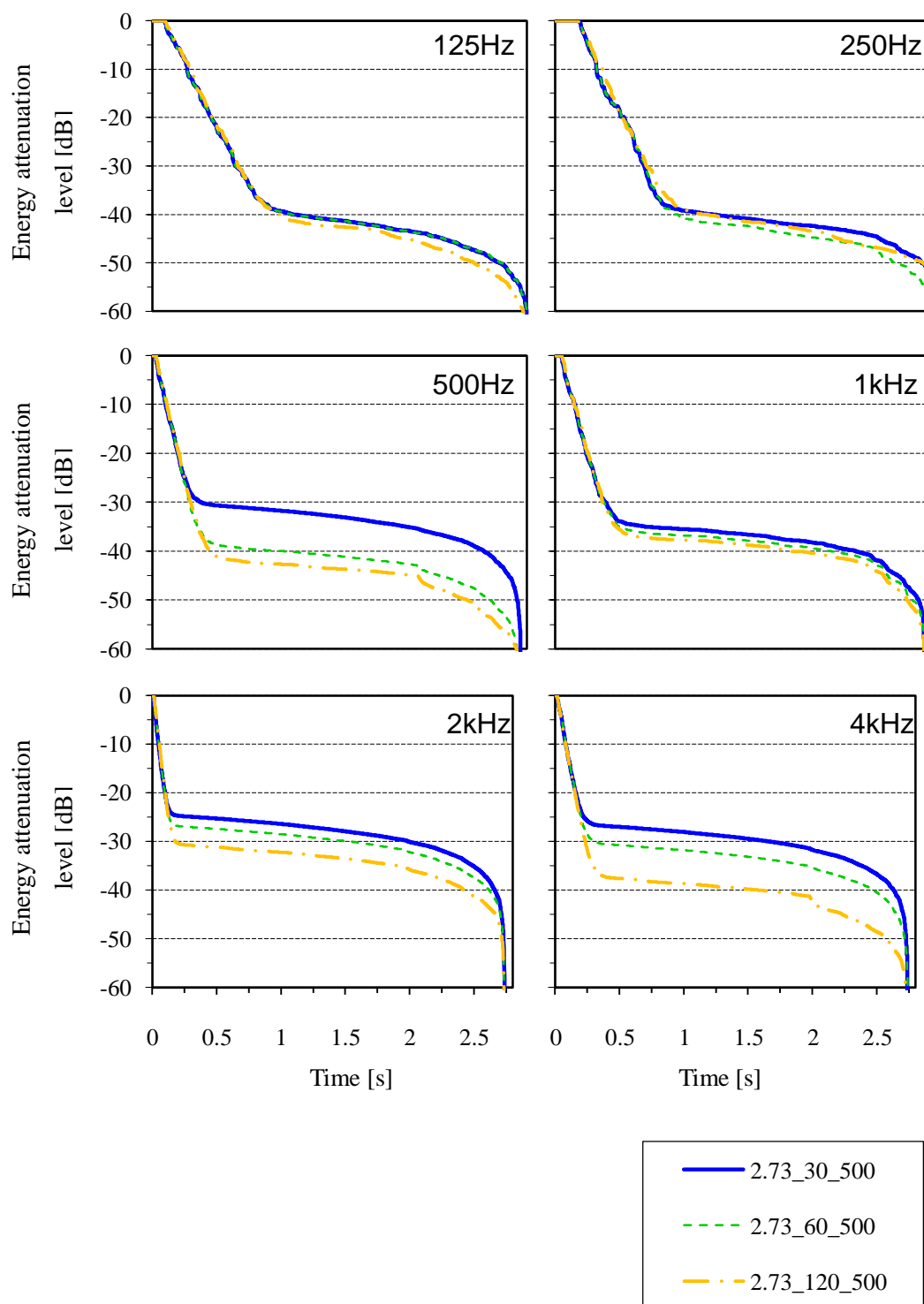


Fig. 5.7 Energy attenuation decay curves for Type H (signal length: 2.73 s, T4).

<Signal length: 5.46 s>

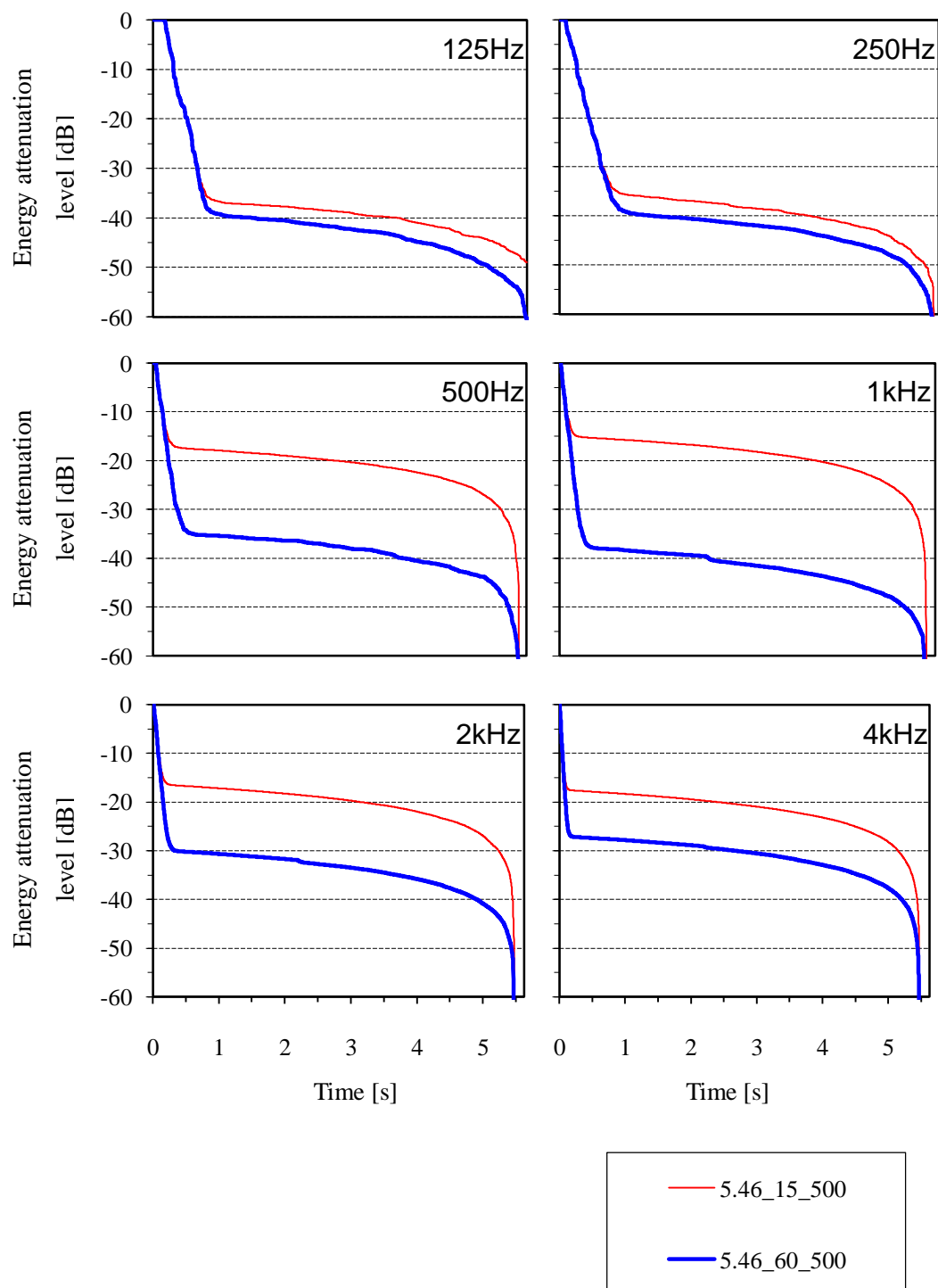


Fig. 5.8 Energy attenuation decay curves (signal length: 5.46 s, T4).



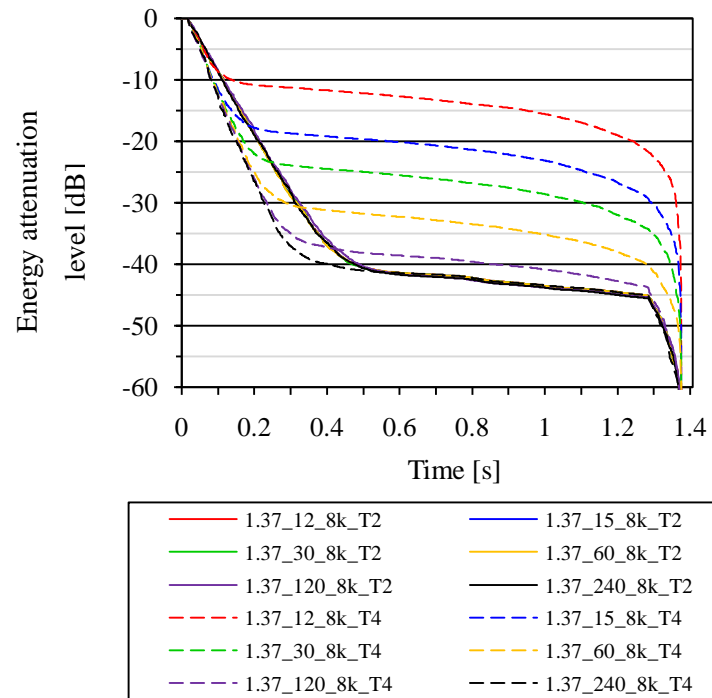


Fig. 5.9 Comparison of the energy decay curves for Type H (T2&T4. Signal length: 1.37s)

## ■ Type R (1次元矩形波周期構造) の場合

信号長 0.68, 1.37, 2.73, 5.46 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. 5.10 に示す。Type H の場合と同一であることが確認された。

(a) 0.68 s

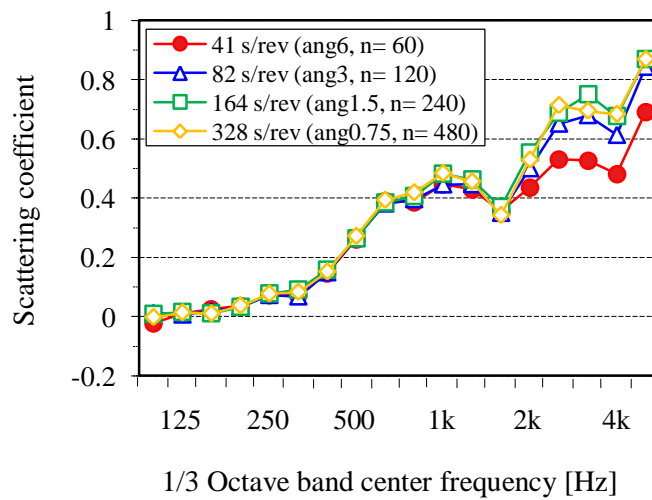
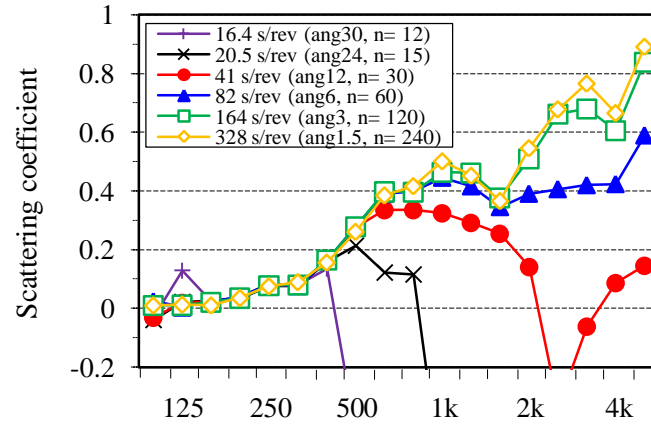
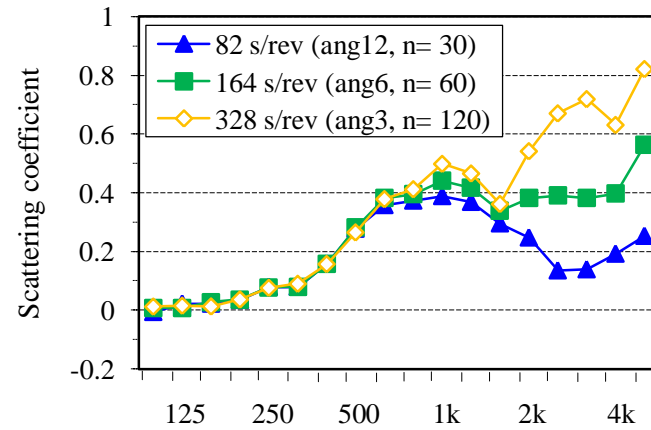


Fig. 5.10.1 Scattering coefficients measured for Type R with fixed signal lengths.

(b) 1.37 s



(c) 2.73 s



(d) 5.46 s

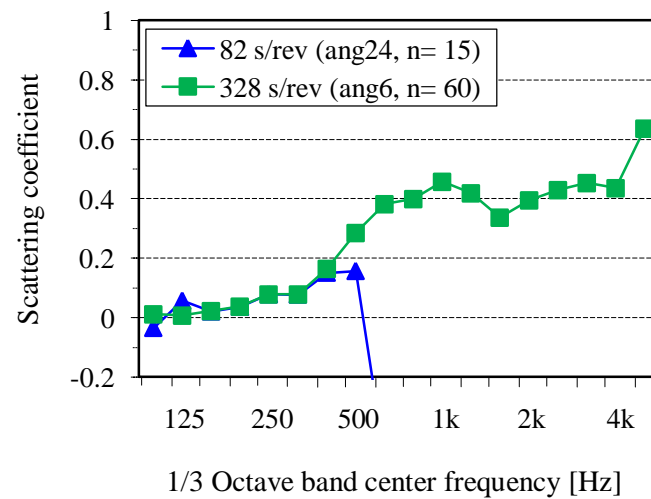


Fig. 5.10.2 Scattering coefficients measured for Type R with fixed signal lengths.

## 5.3 試料回転速度による影響

### 5.3.1 測定条件

測定試料は前節の検討で用いたものと同一とし (Fig. 5.1)、縮尺 1/4 で行った。インパルス応答測定では、試料回転速度を固定した試料回転速度を 4 水準とし、1 回転中の同期加算回数に応じて M 系列信号長を変化させた (Table 5.2)。

Table 5.2 Conditions of impulse response measurement (rev. = 1).

Signal length [s]	Revolution speed [s/rev]					
0.68	-	-	41	82	164	328
1.37	-	41	82	164	328	-
2.73	-	82	164	328	-	-
5.46	82	-	328	-	-	-
Angular step [deg]	24	12	6	3	1.5	0.75
Averaging number	15	30	60	120	240	480

### 5.3.2 結果と考察

#### ■ Type H の場合

試料回転速度 41, 82, 164 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. 5.11 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から低下している。回転速度 41 秒/回転の場合、信号長 0.68 秒では既にやや低下が生じており、82 秒/回転では信号長 1.37 秒以上で、164 秒/回転では信号長 2.73 秒以上で、328 秒/回転では信号長 5.46 秒以上で低下が見られる。なお、各試料回転速度における T4（試料有・回転有）の残響減衰曲線を Fig. 5.12-14 に示す。回転速度が速くなると SN 比が低下し、残響時間を過大評価することが確認された。

Fig. 5.15 には、試料回転速度 82 秒/回転における T2（試料有・回転無）と T4（試料有・回転有）の残響減衰曲線を示す。T2 の場合に対し、T4 の残響減衰曲線は、試料を回転することにより、同期加算回数が多くなるに従って低下することが確認された。

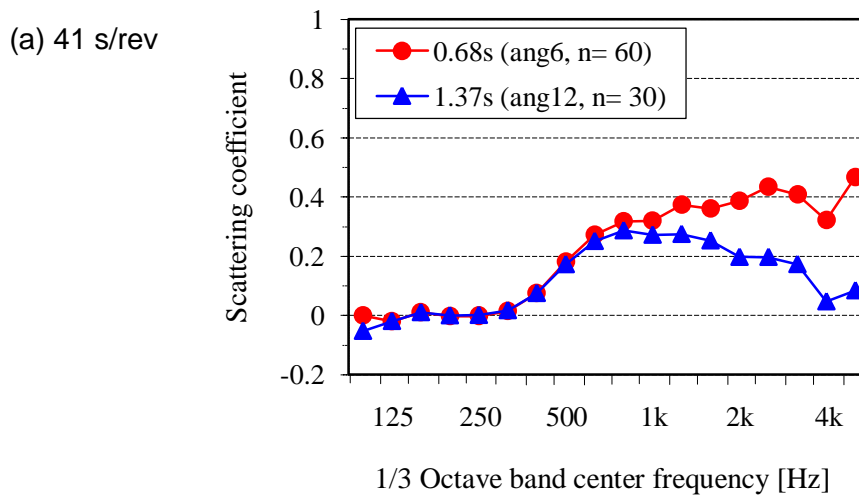
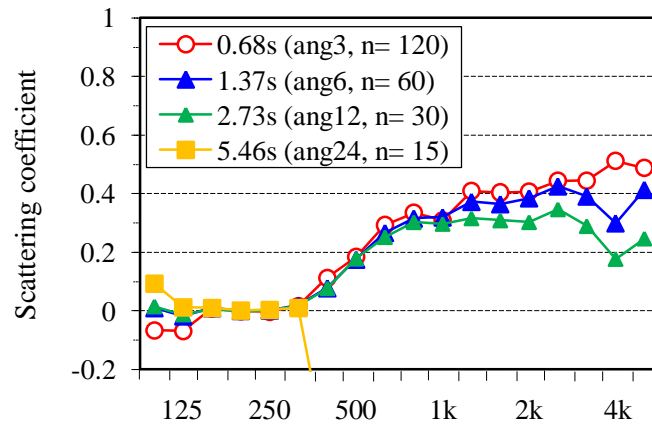
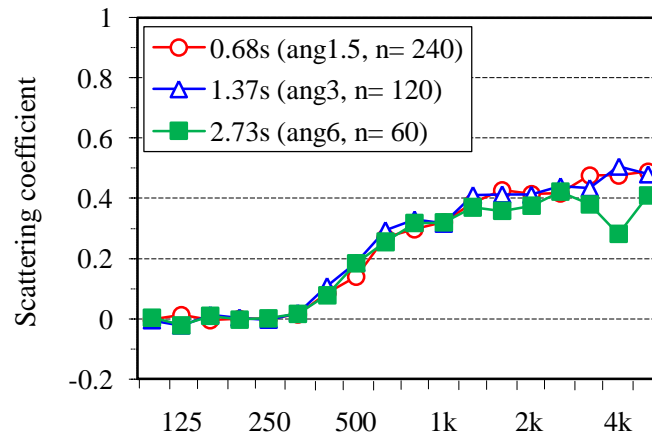


Fig. 5.11.1 Scattering coefficients measured for Type H with fixed revolution speed.

(b) 82 s/rev



(c) 164 s/rev



(d) 328 s/rev

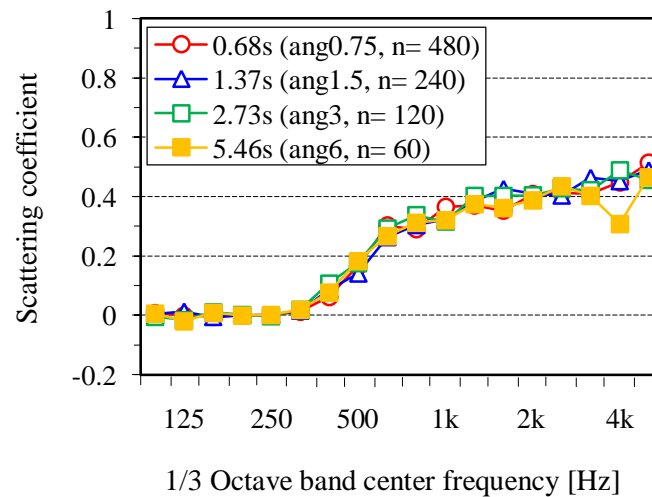


Fig. 5.11.2 Scattering coefficients measured for Type H with fixed revolution speed.

<Revolution speed: 41 s/rev>

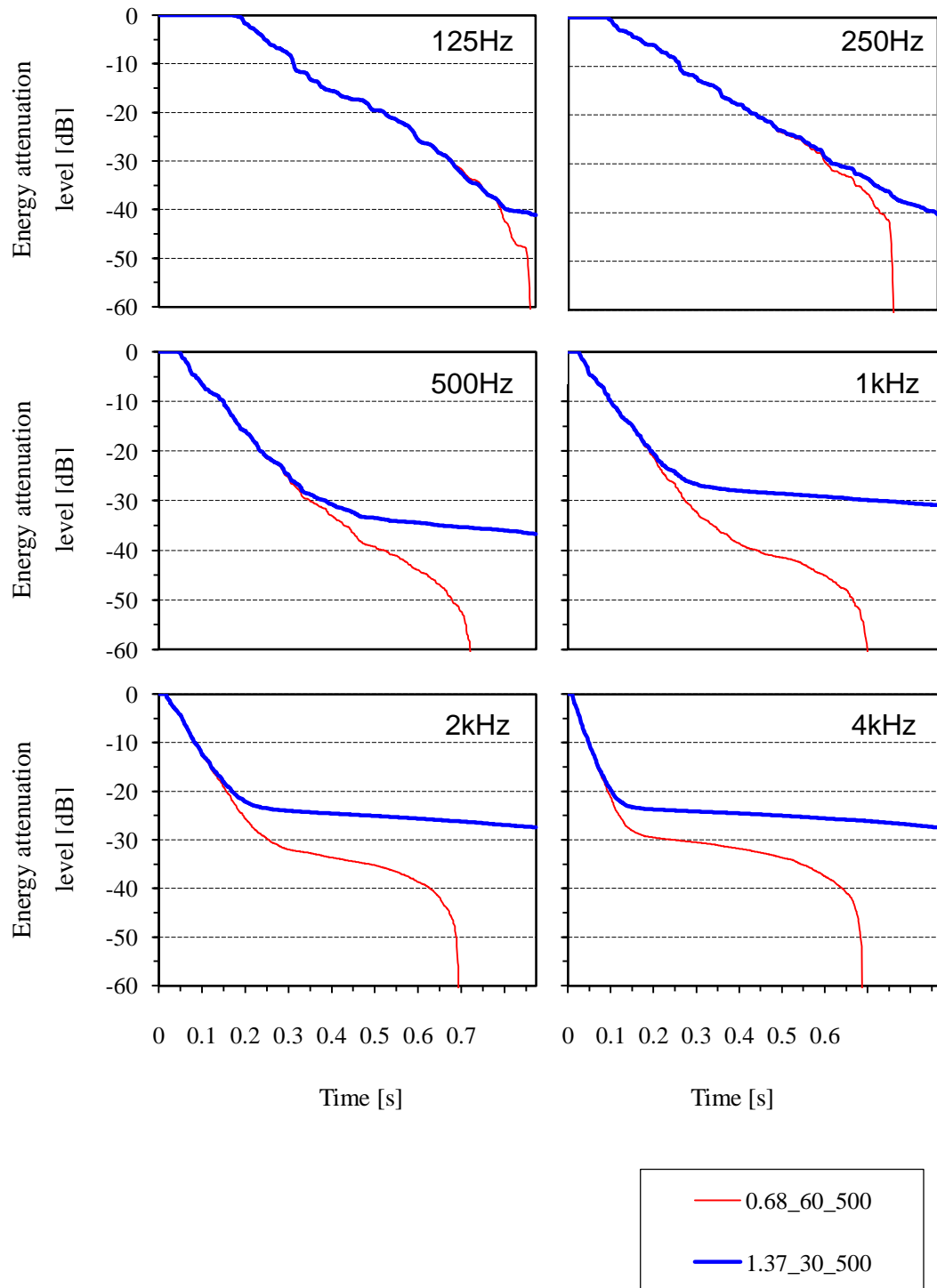


Fig. 5.12 Energy attenuation decay curves for Type H (revolution speed: 41 s/rev).

&lt;Revolution speed: 82 s/rev&gt;

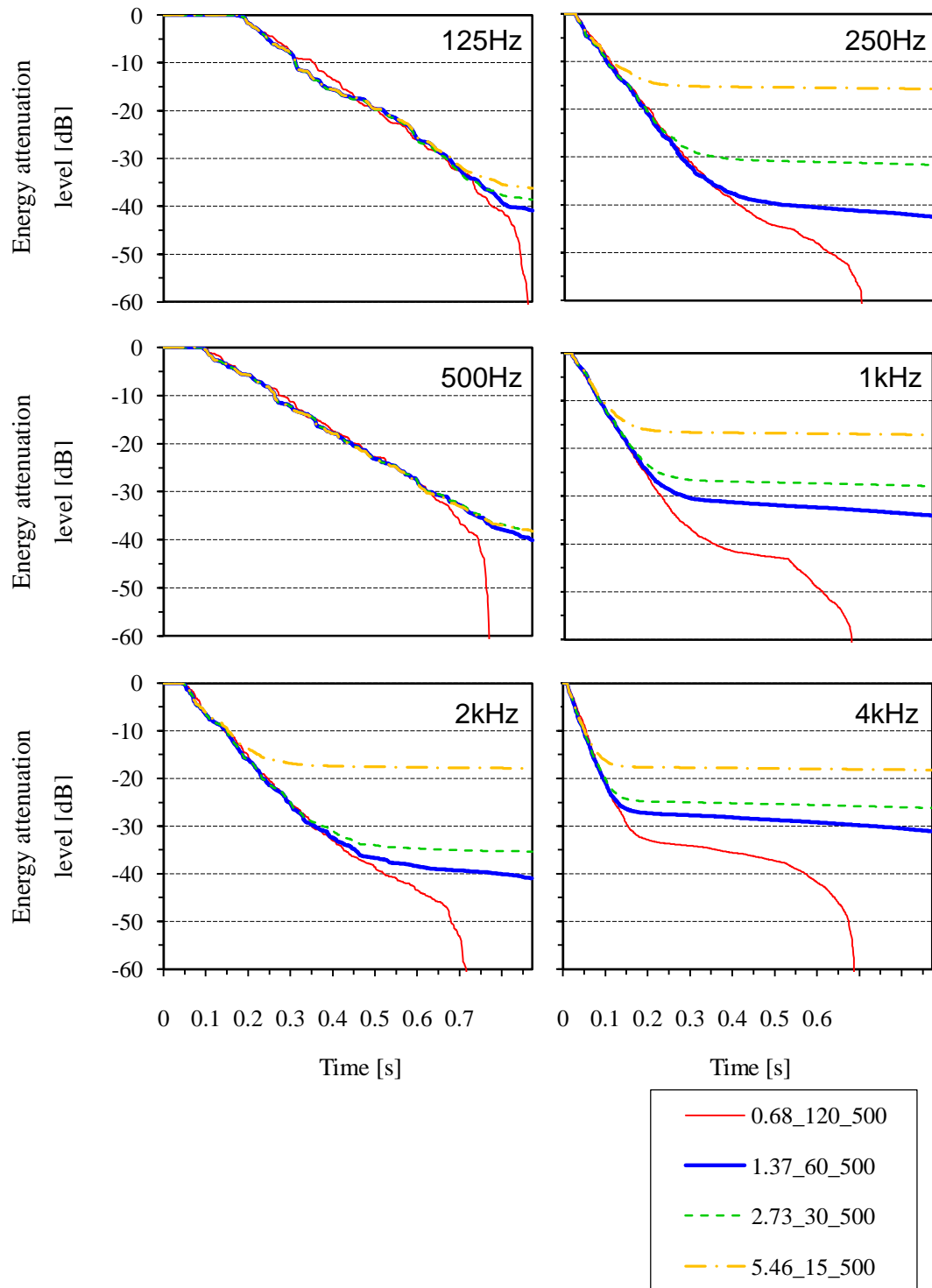


Fig. 5.13 Energy attenuation decay curves for Type H (revolution speed: 82 s/rev).

<Revolution speed: 164 s/rev>

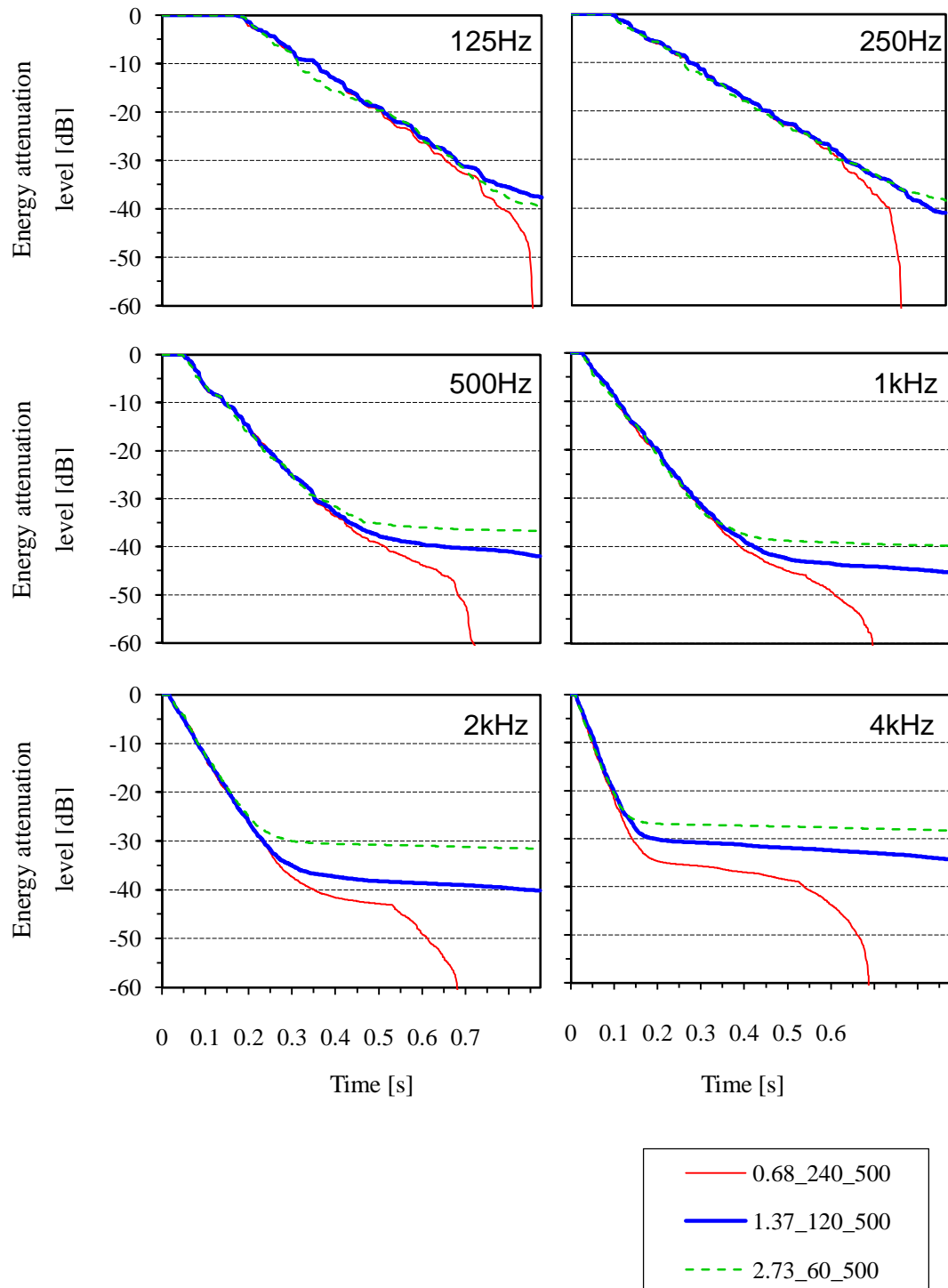


Fig. 5.14 Energy attenuation decay curves for Type H (revolution speed: 164 s/rev).



&lt;Revolution speed: 328 s/rev&gt;

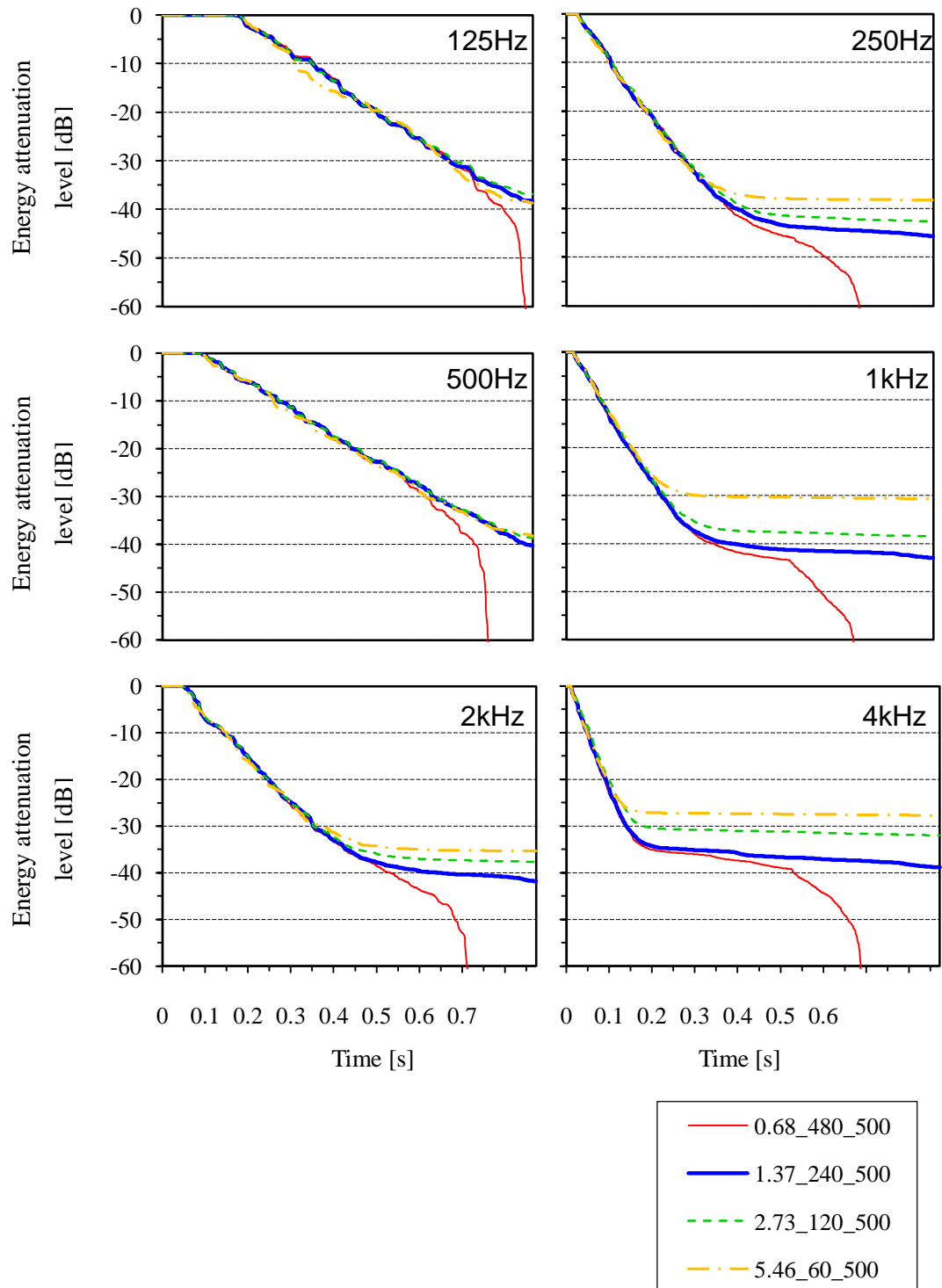


Fig. 5.15 Energy attenuation decay curves for Type H (revolution speed: 328 s/rev).

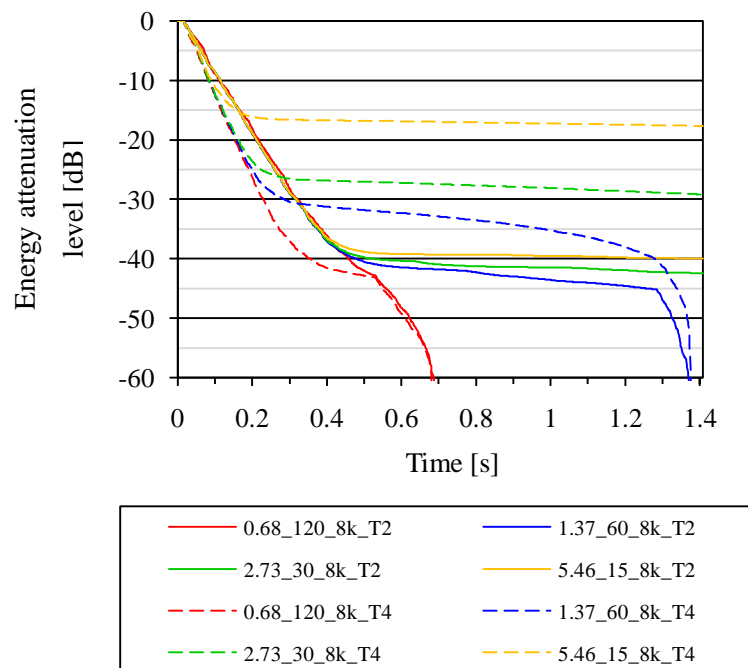


Fig. 5.15 Comparison of the energy decay curves for Type H (T2&T4. Revolution speed: 82 s/rev)

## ■ Type R (1次元矩形波周期構造) の場合

試料回転速度 41, 82, 164, 328 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. 5.16 に示す。その結果、Type H の場合と同一であることが確認された。

(a) 41 s/rev

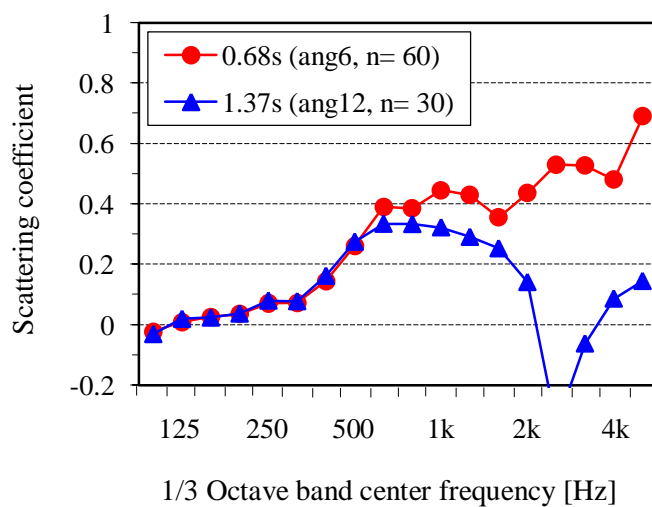


Fig. 5.16.1 Scattering coefficients measured for Type R with fixed signal lengths.

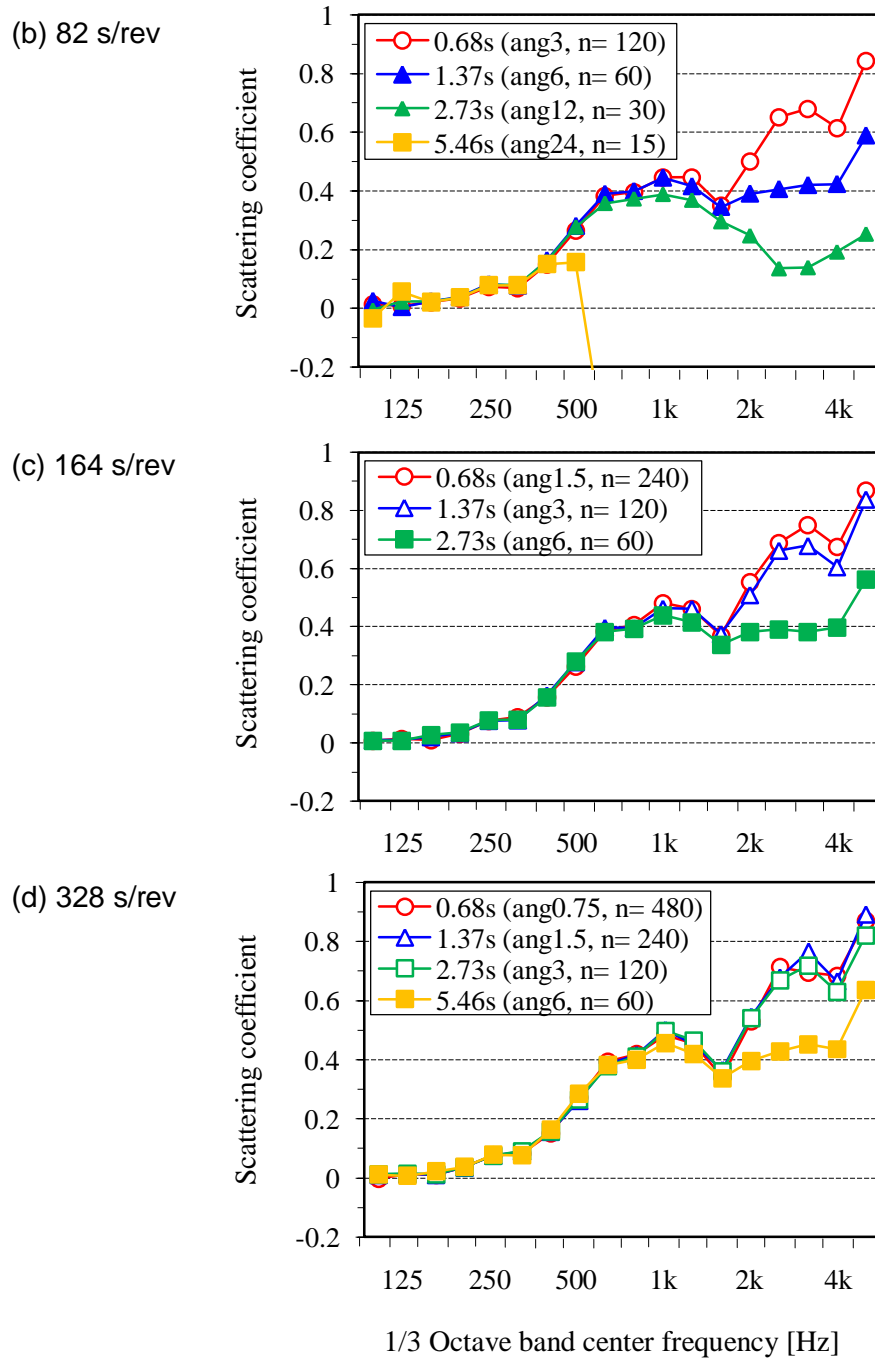


Fig. 5.16.2 Scattering coefficients measured for Type R with fixed signal lengths.

## 5.4 測定間隔による影響

### 5.4.1 測定条件

測定試料は前節の検討で用いたものと同一とし (Fig. 5.1)、縮尺 1/4 で行った。インパルス応答測定では、測定間隔を 4 水準とし、1 回転中の同期加算回数に応じて M 系列信号長や試料回転速度を変化させた (Table 5.3)。

Table 5.3 Conditions of impulse response measurement (rev. = 1).

Signal length [s]	Revolution speed [s/rev]					
0.68	-	-	41	82	164	-
1.37	-	41	82	164	328	-
2.73	-	82	164	328	-	-
5.46	-	-	328	-	-	-
Angular step [deg]	24	12	6	3	1.5	0.75
Averaging number	15	30	60	120	240	480

### 5.4.2 結果と考察

#### ■ Type H の場合

測定間隔（回転角度）12, 6, 3, 1.5 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. 5.17 に示す。測定間隔 12 度の場合を除くと、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 4k Hz のみ若干の低下が生じている。なお、Fig. 5.18-21 には、各測定間隔における T4（試料有・回転有）の残響減衰曲線を、Fig. 5.22 には、測定間隔 6 度における T2（試料有・回転無）と T4（試料有・回転有）の残響減衰曲線を示す。

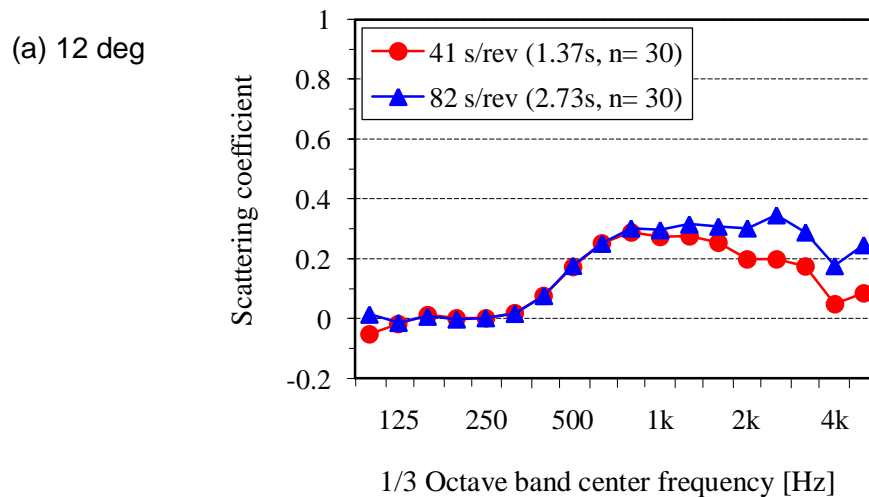


Fig. 5.17.1 Scattering coefficients measured for Type H with fixed angular step.

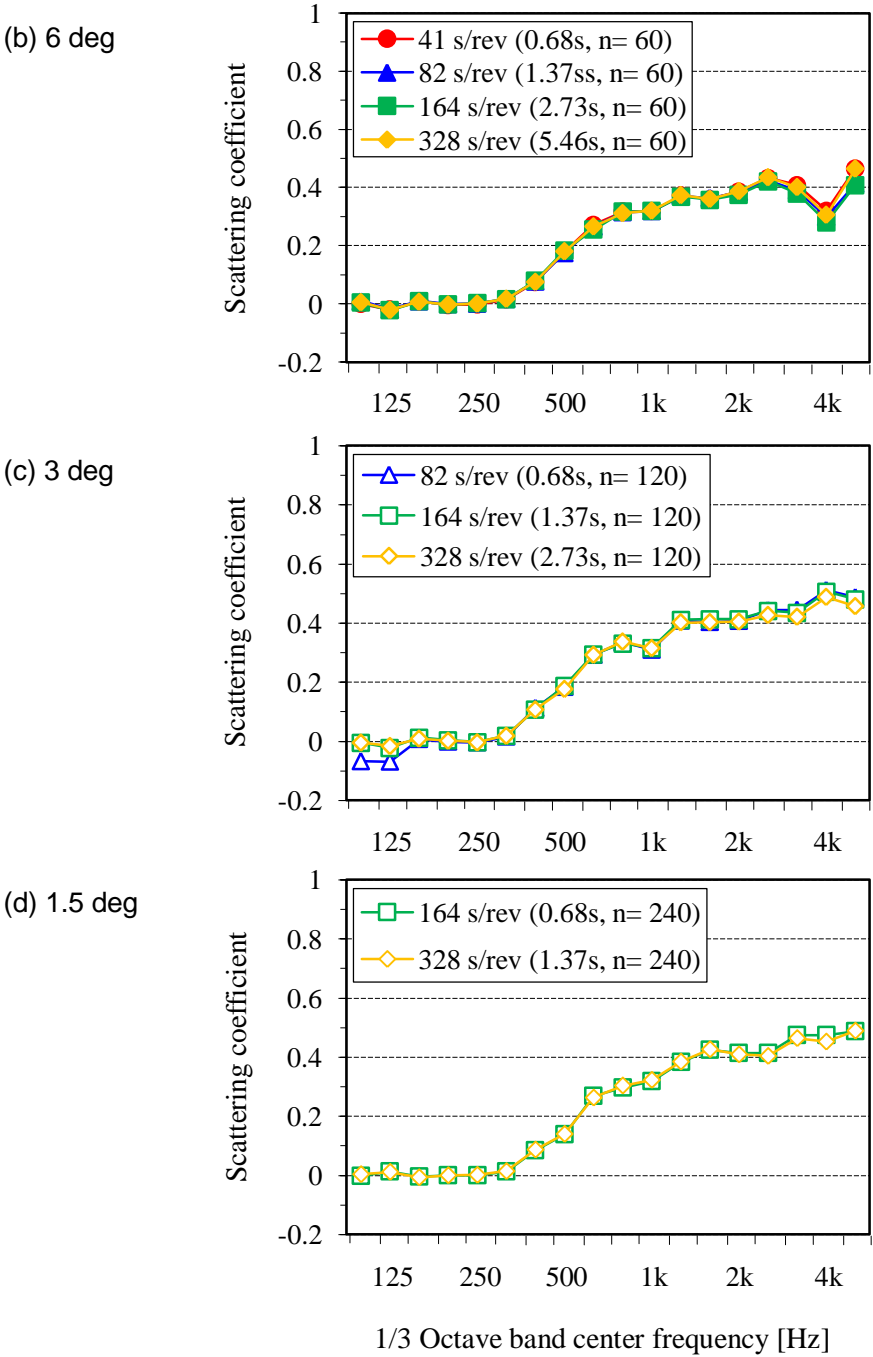


Fig. 5.17.2 Scattering coefficients measured for Type H with fixed angular step.

&lt;Angular step: 12 deg&gt;

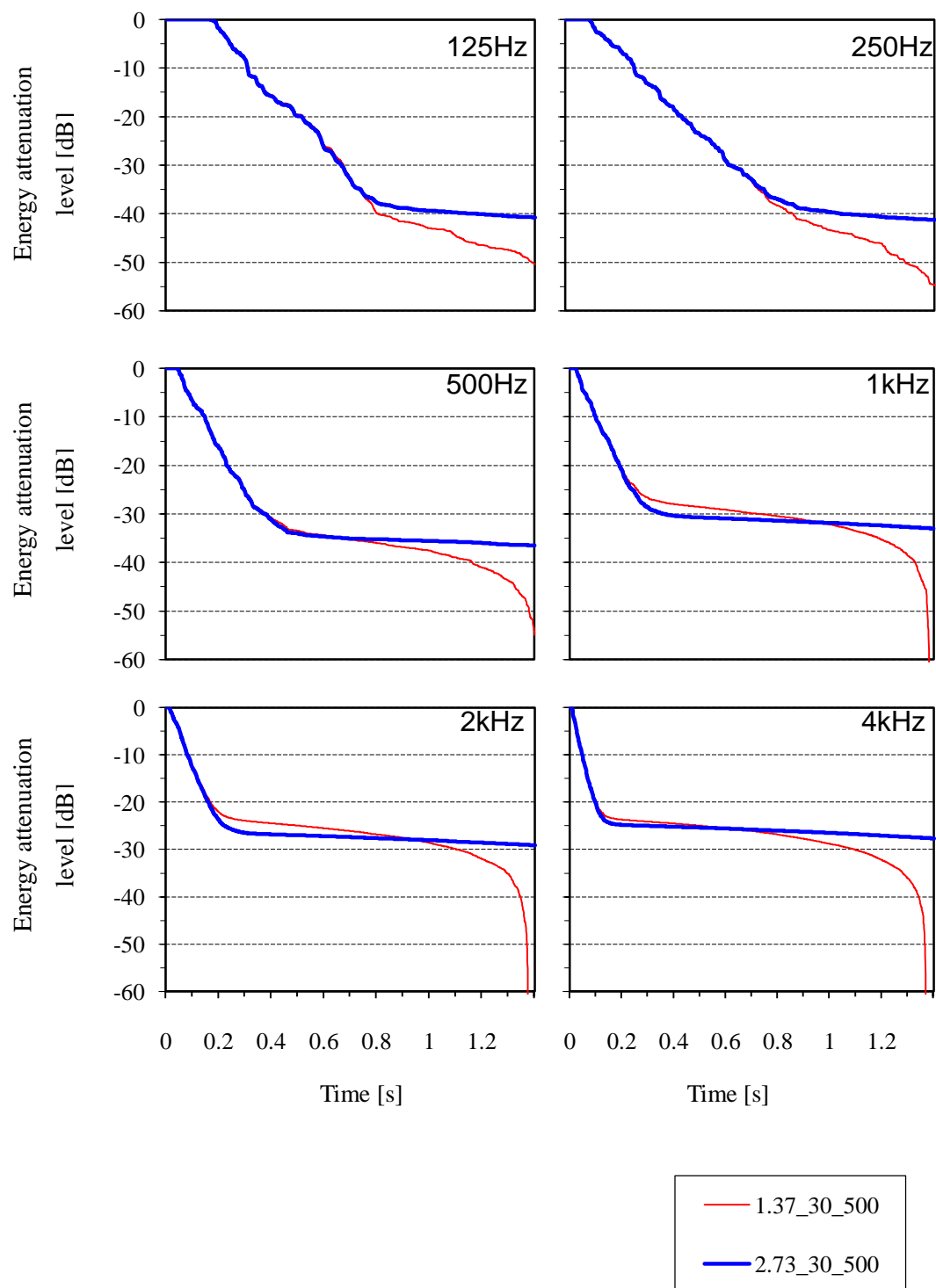


Fig. 5.18 Energy attenuation decay curves for Type H (angular step: 12 deg)

<Angular step: 6 deg>

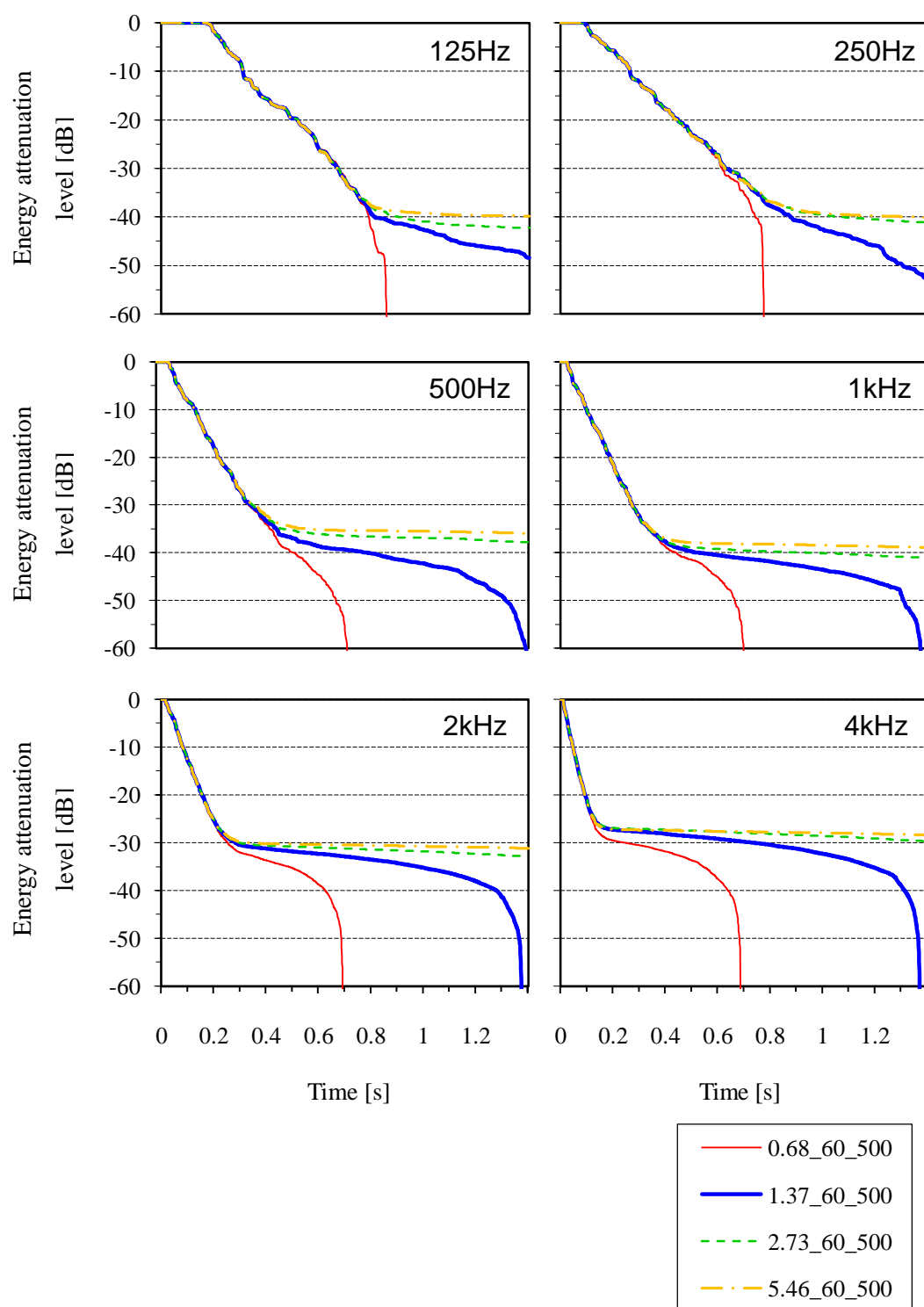


Fig. 5.19 Energy attenuation decay curves for Type H (angular step: 6 deg)



&lt;Angular step: 3 deg&gt;

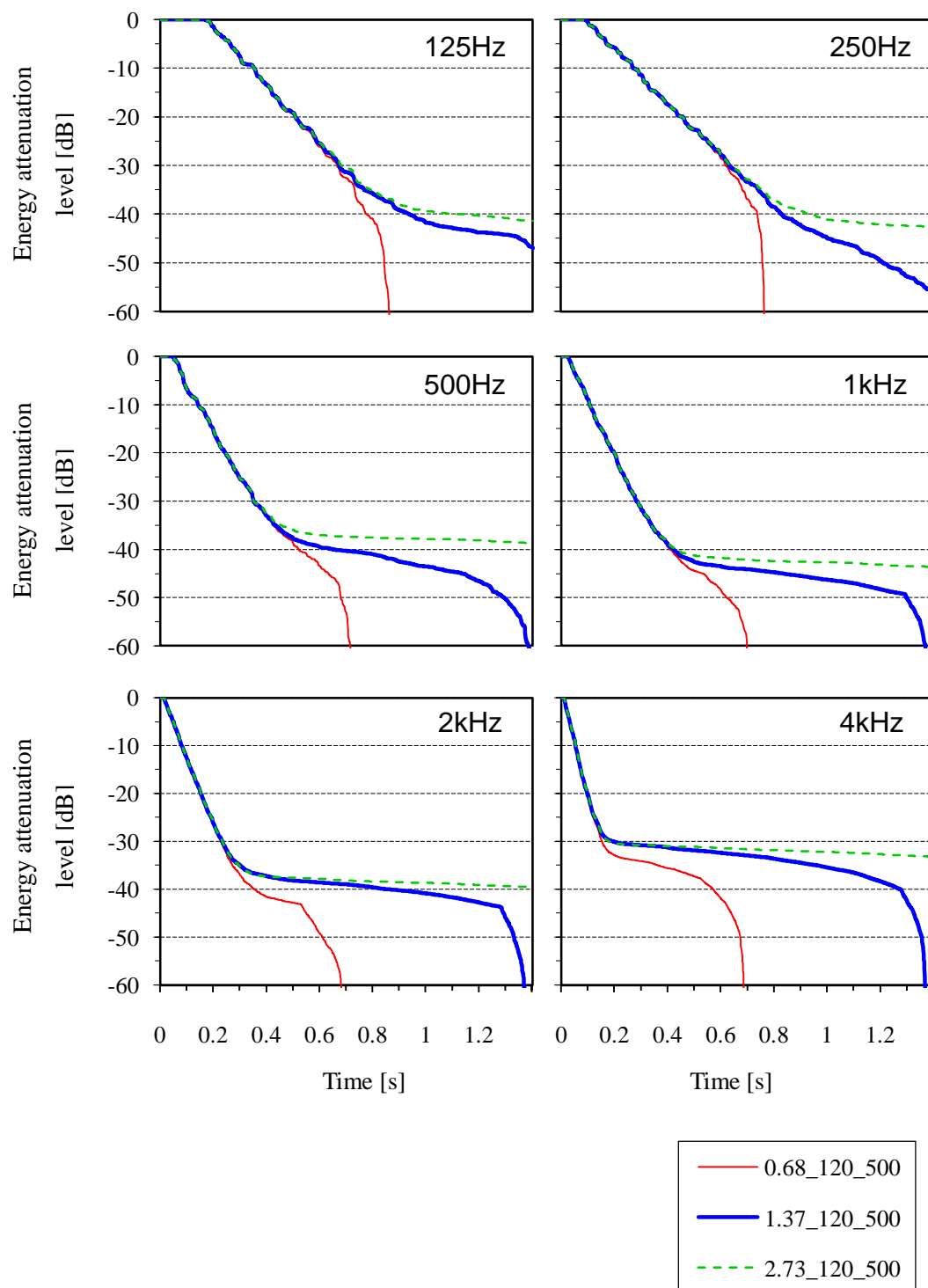


Fig. 5.20 Energy attenuation decay curves for Type H (angular step: 3 deg)

<Angular step: 1.5 deg>

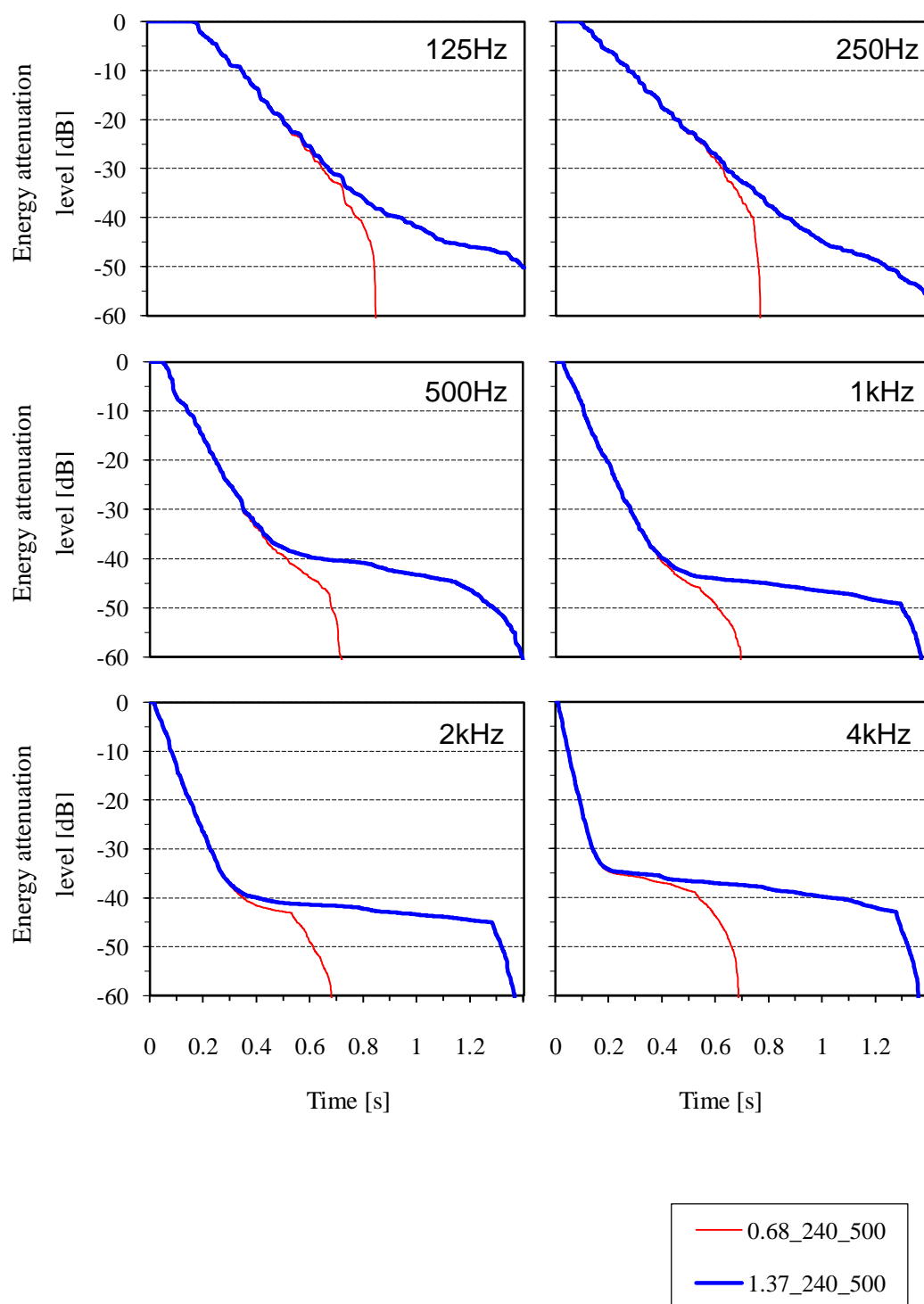


Fig. 5.21 Energy attenuation decay curves for Type H (angular step: 1.5 deg)

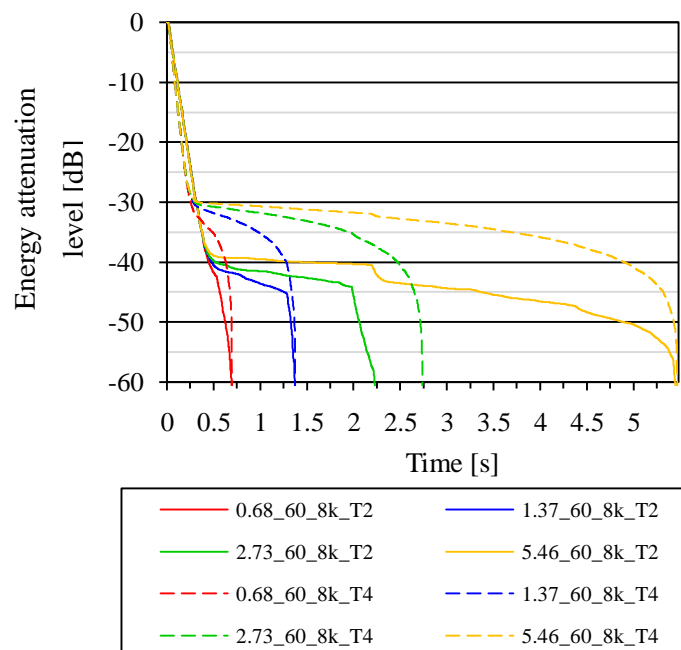


Fig. 5.22 Comparison of the energy decay curves for Type H (T2&T4, Angular step: 6deg).

## ■ Type R (1次元矩形波周期構造) の場合

測定間隔 12, 6, 3, 1.5 度においての乱反射率の測定結果を Fig. 5.23 に示す。その結果、Type H の場合と同一であることが確認された。

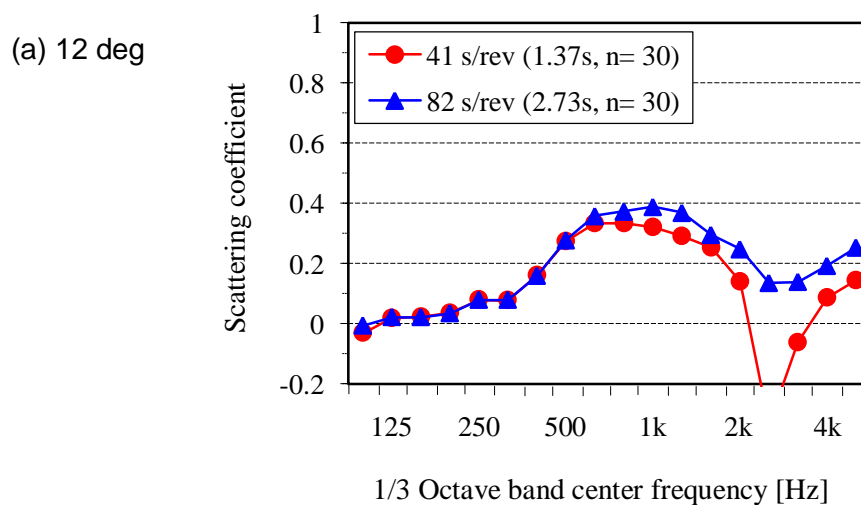


Fig. 5.23.1 Scattering coefficients measured for Type R with fixed angular step.

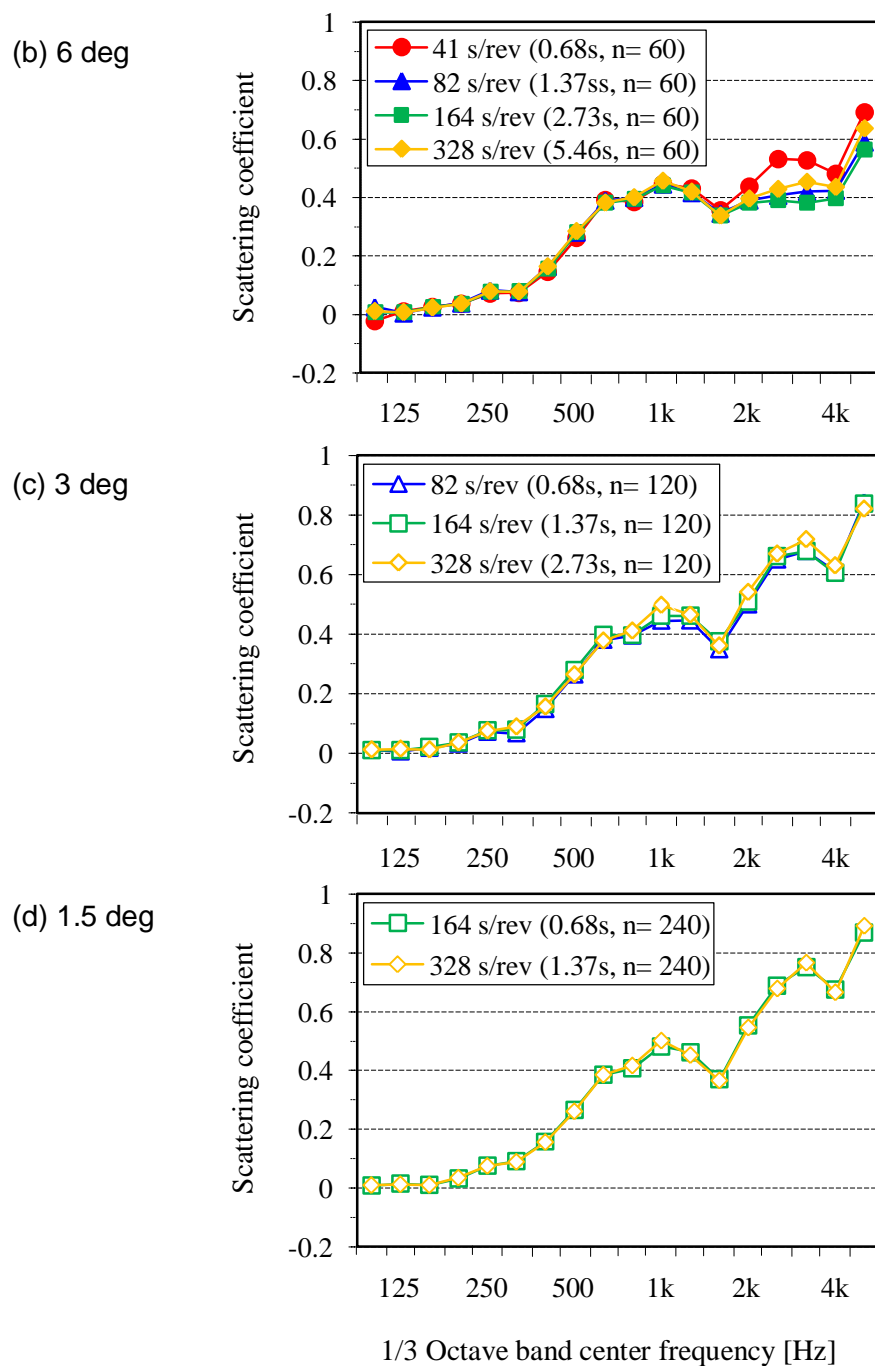


Fig. 5.23.2 Scattering coefficients measured for Type R with fixed angular step.

## 5.5 まとめ

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した。乱反射率の残響室測定法において、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。



## 第 6 章

# 総括

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して行われた。本研究によって得られた成果を総括する。

第 1 章では、研究の背景および目的について述べた。室内音響空間における拡散の重要性、現在の拡散体の設計状況、幾何音響シミュレーションへの拡散の導入による有用性について述べた上、乱反射率の測定法や既往関連研究について概観した後に、本研究の目的と位置づけを示した。

第 2 章では、乱反射率の測定法について考察した。測定法の基礎となる測定原理から、ISO17497-1 に規定されている残響室法について具体的に述べた。また、既往研究を挙げながら測定法の留意点について述べた。

第 3 章では、模型残響室における縮尺およびインパルス応答測定に関する乱反射率の基礎的な実験を行い、測定条件の違いによる測定結果の差異を把握した。

第 4 章では、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との対応を検討した。その結果、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ることで抑制できることが示された。

第 5 章では、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した。その結果、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。



## 付録

### インパルス応答測定データ

A：信号長固定による結果

B：回転速度固定による結果

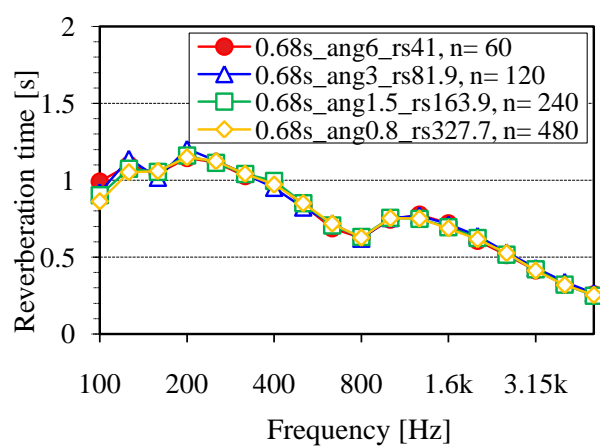
C：測定間隔固定による結果

# A1 半球の場合

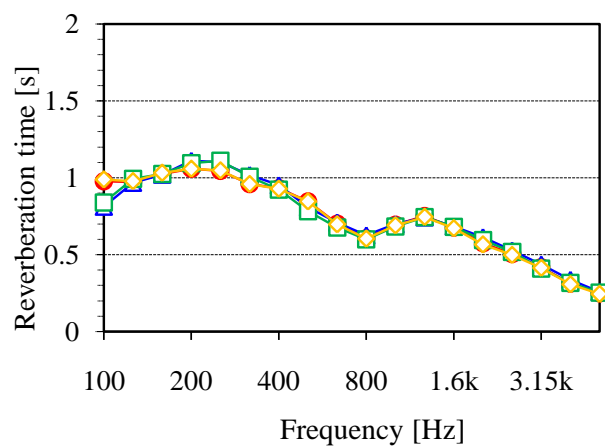


Signal length= **0.68** [s], Scale 1/4,  $T$  15 (-5 dB ~ -20 dB)

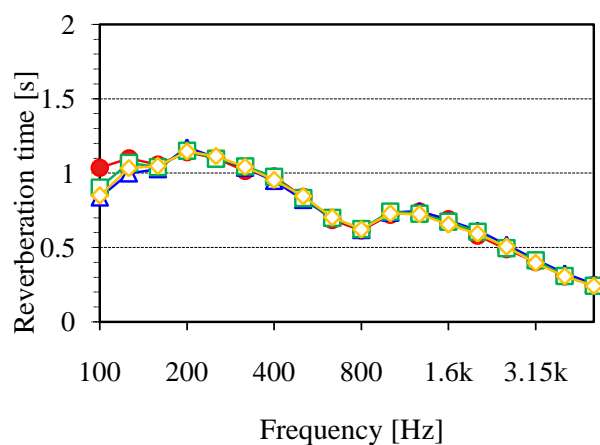
$T$  1



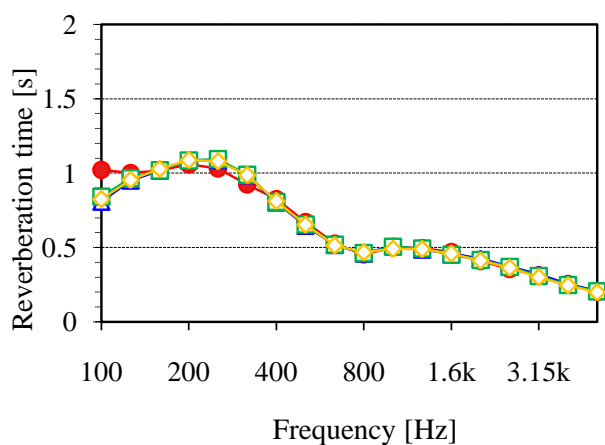
$T$  2

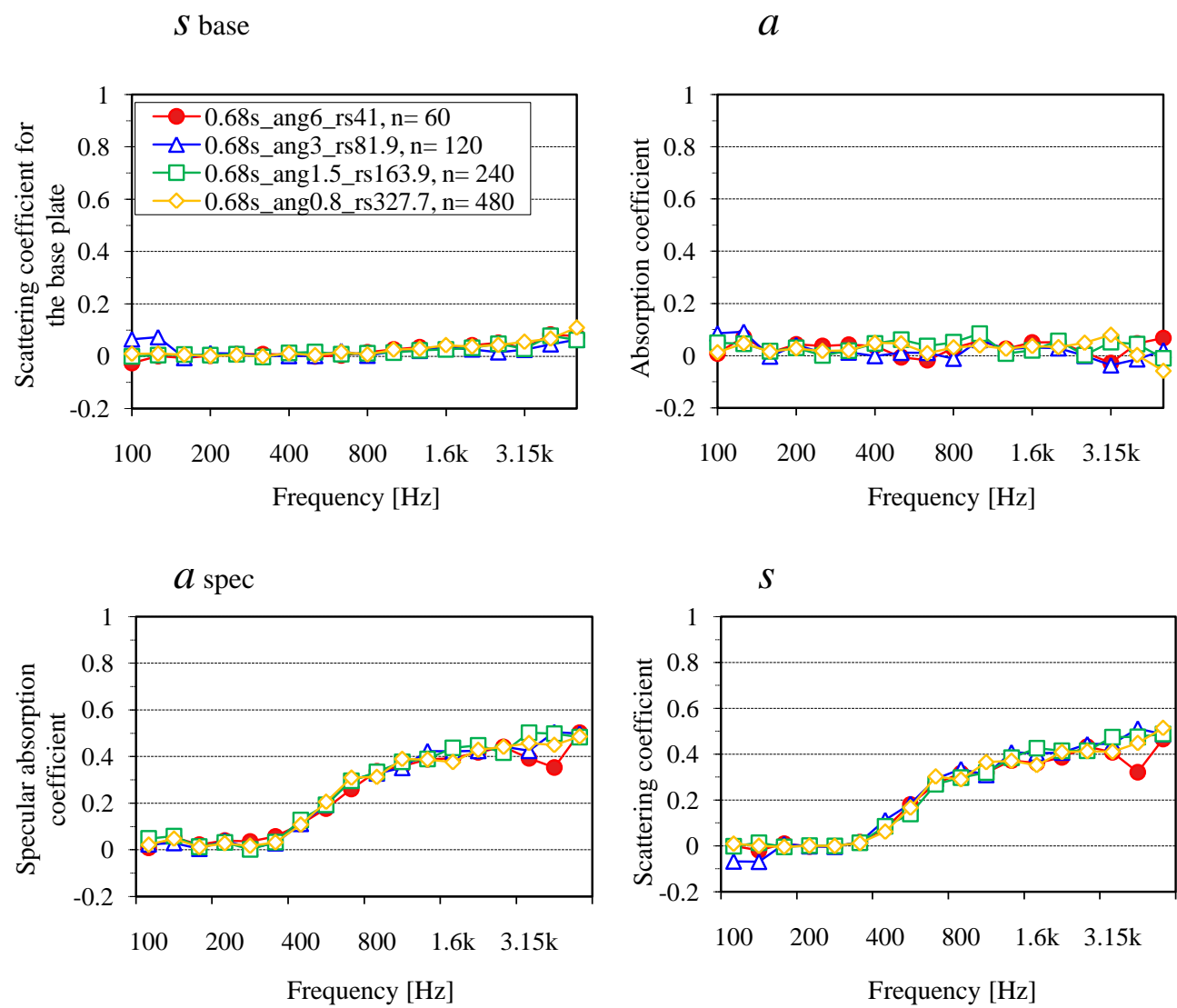


$T$  3



$T$  4

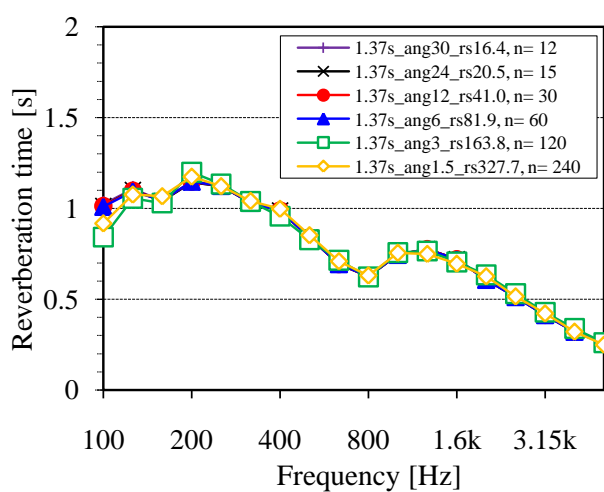




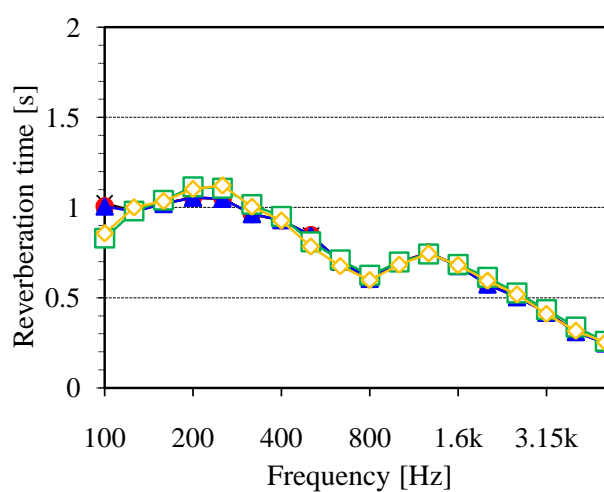


Signal length= **1.37** [s], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)

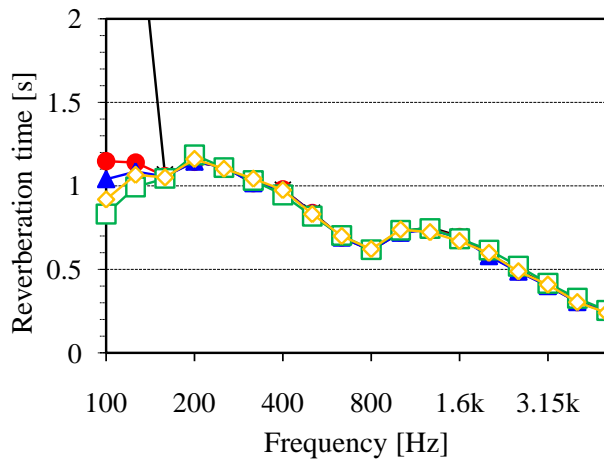
$T_1$



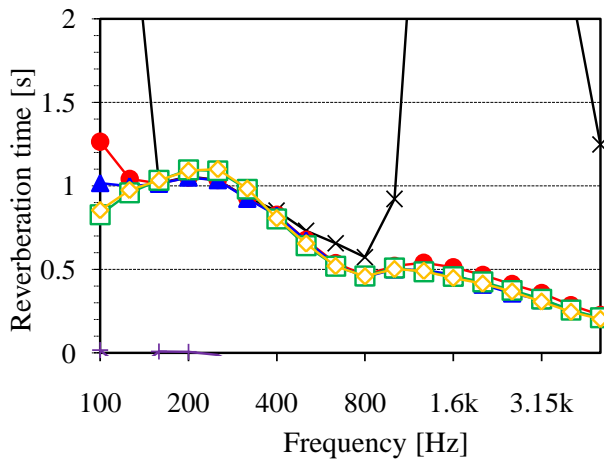
$T_2$

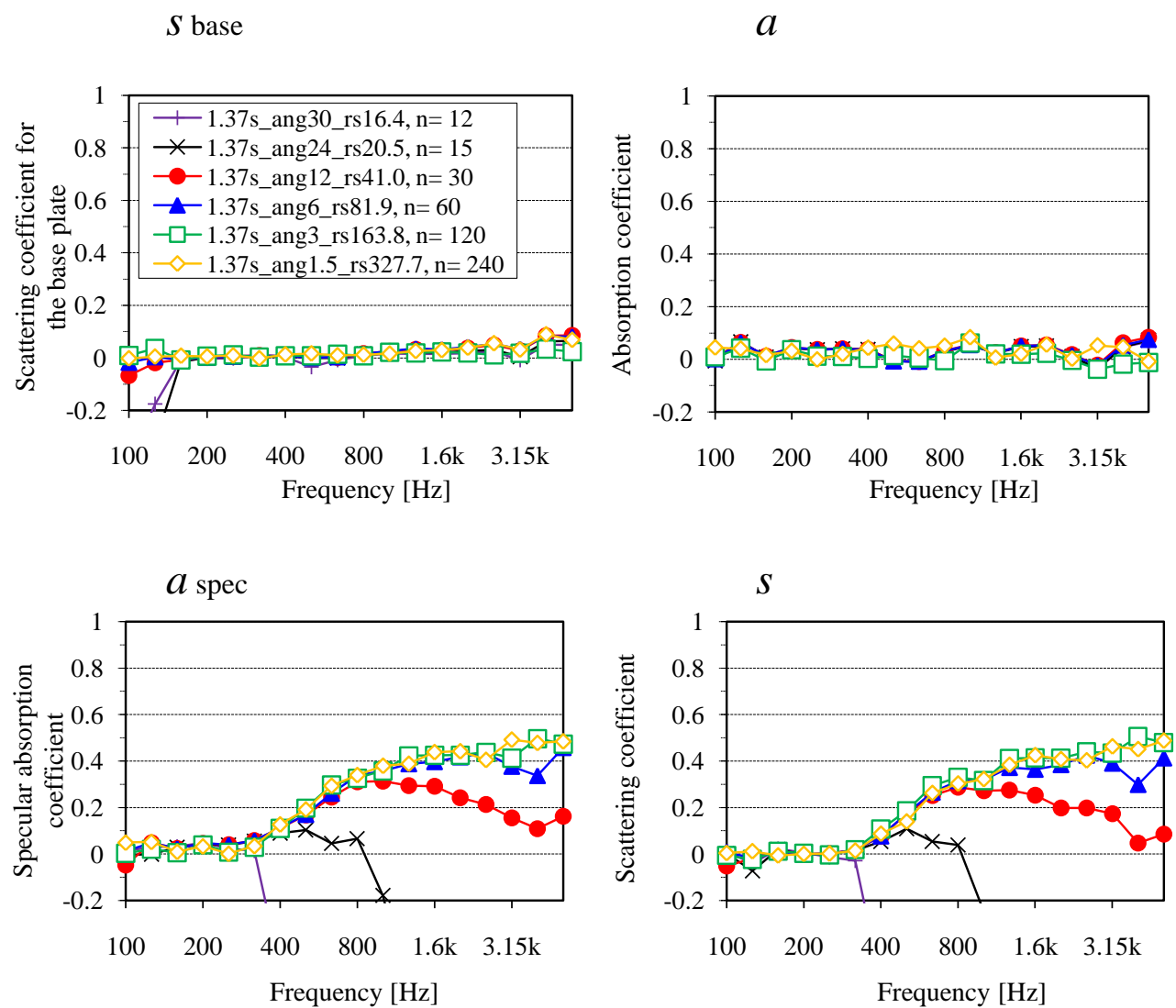


$T_3$



$T_4$



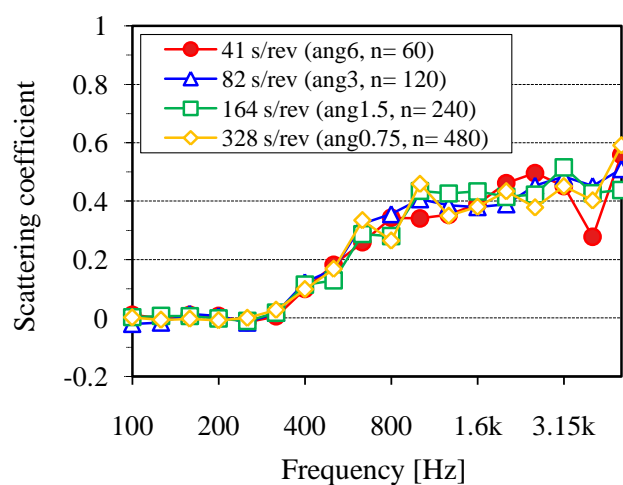


## 乱反射率の比較

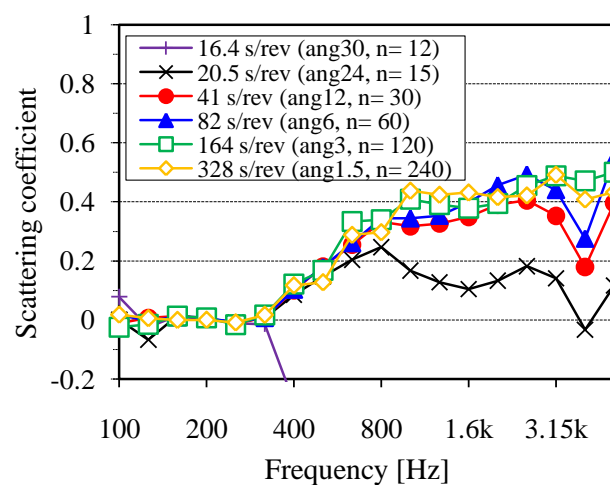


Signal length fixed, Scale 1/4,  $T_{10}$  (-5 dB ~ -15 dB)

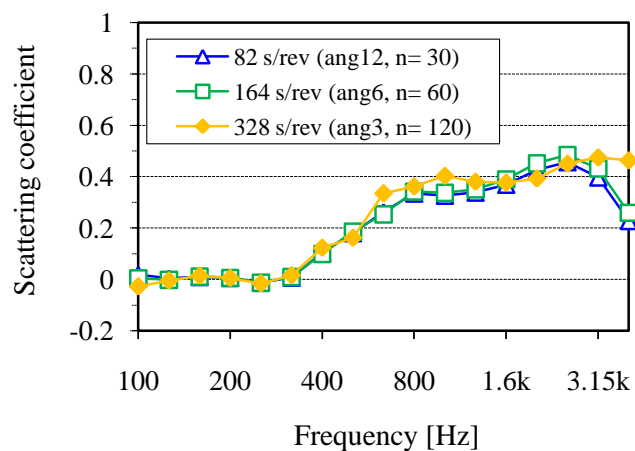
0.68s



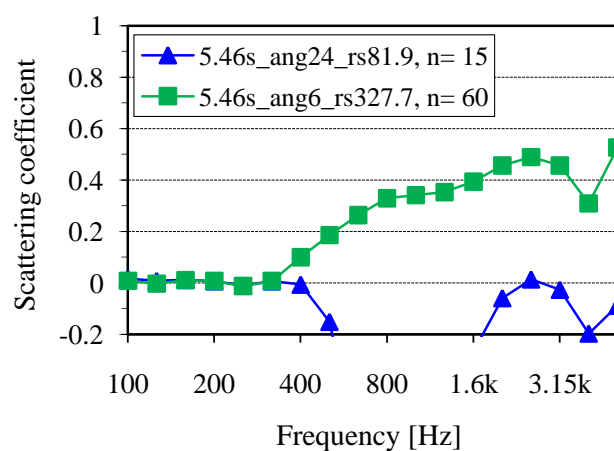
1.37s



2.73s



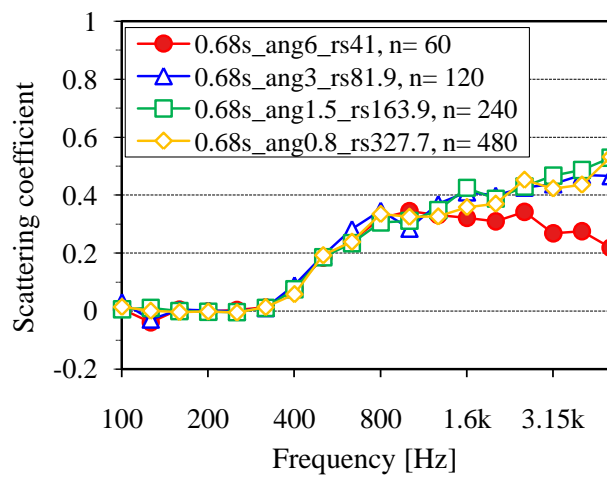
5.46s



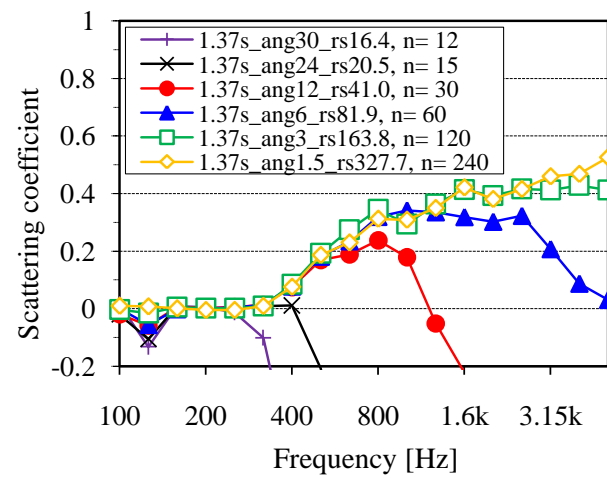


**Signal length fixed, Scale 1/4,  $T_{20}$  (-5 dB ~ -25 dB)**

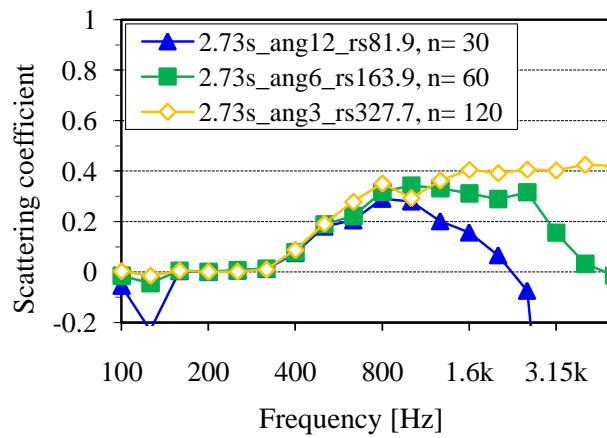
**0.68s**



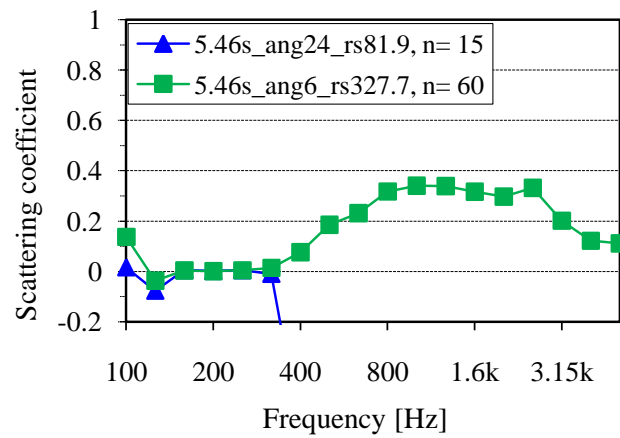
**1.37s**



**2.73s**



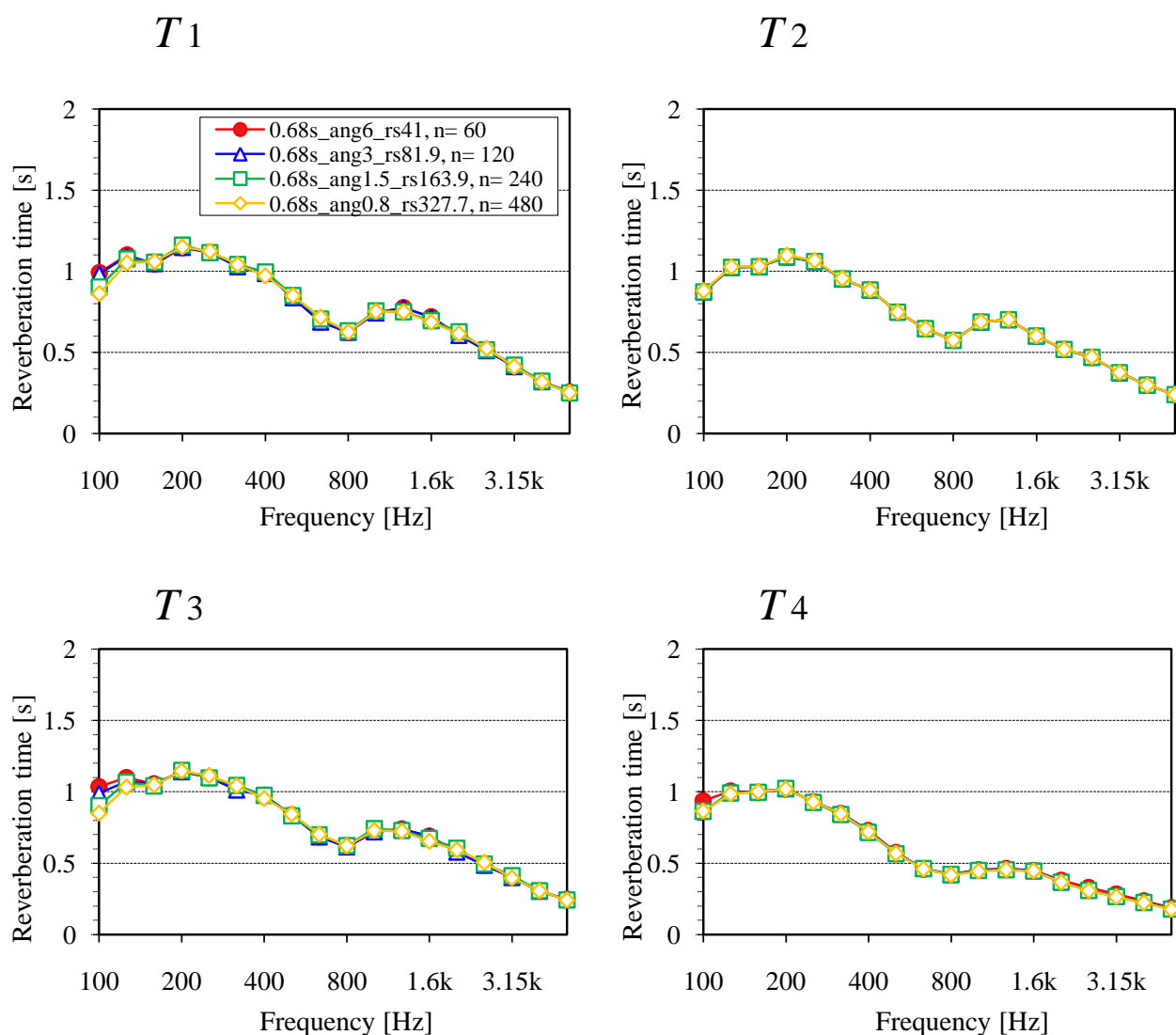
**5.46s**



## A2 1次元周期構造の場合



Signal length= **0.68** [s], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)

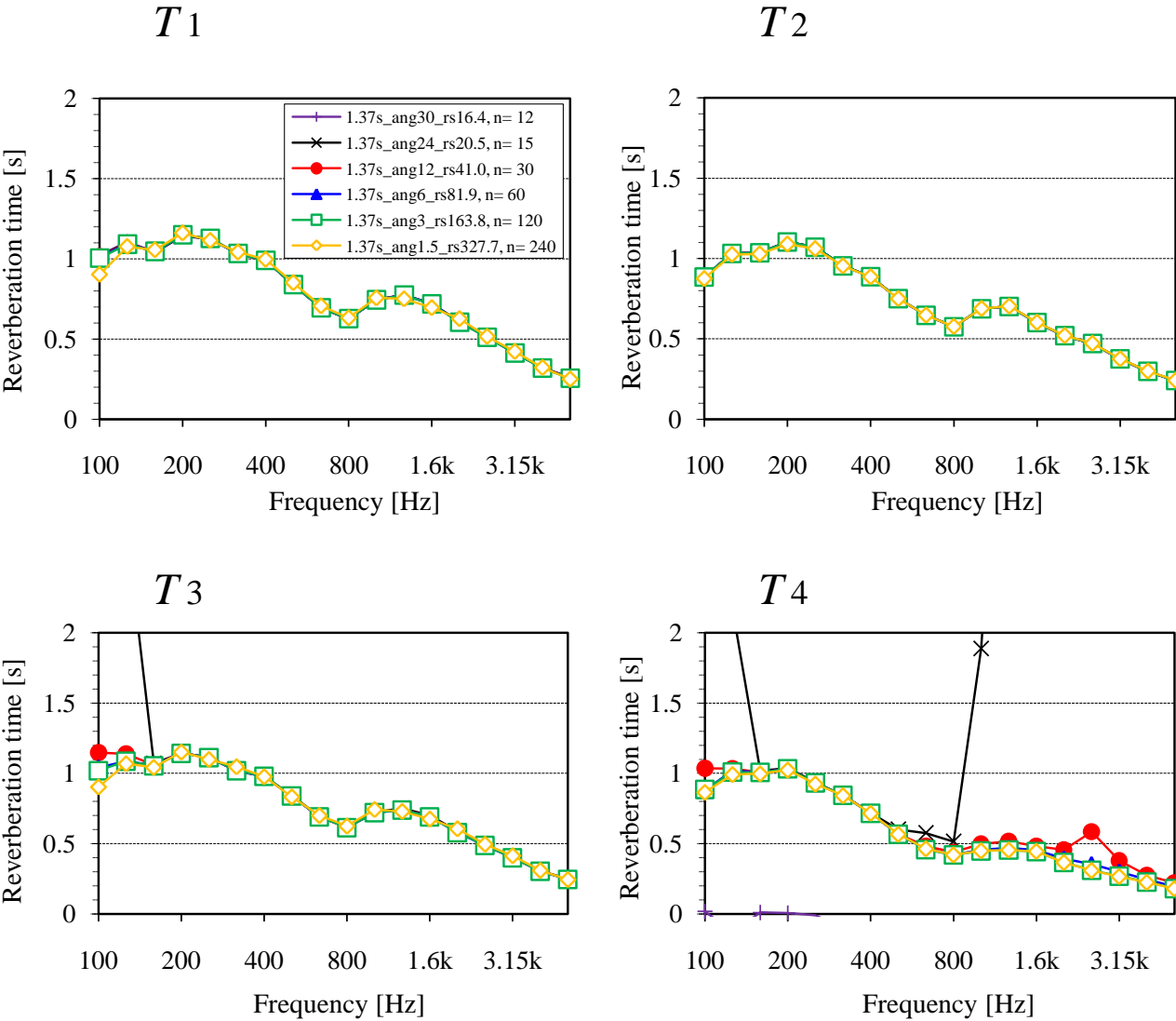


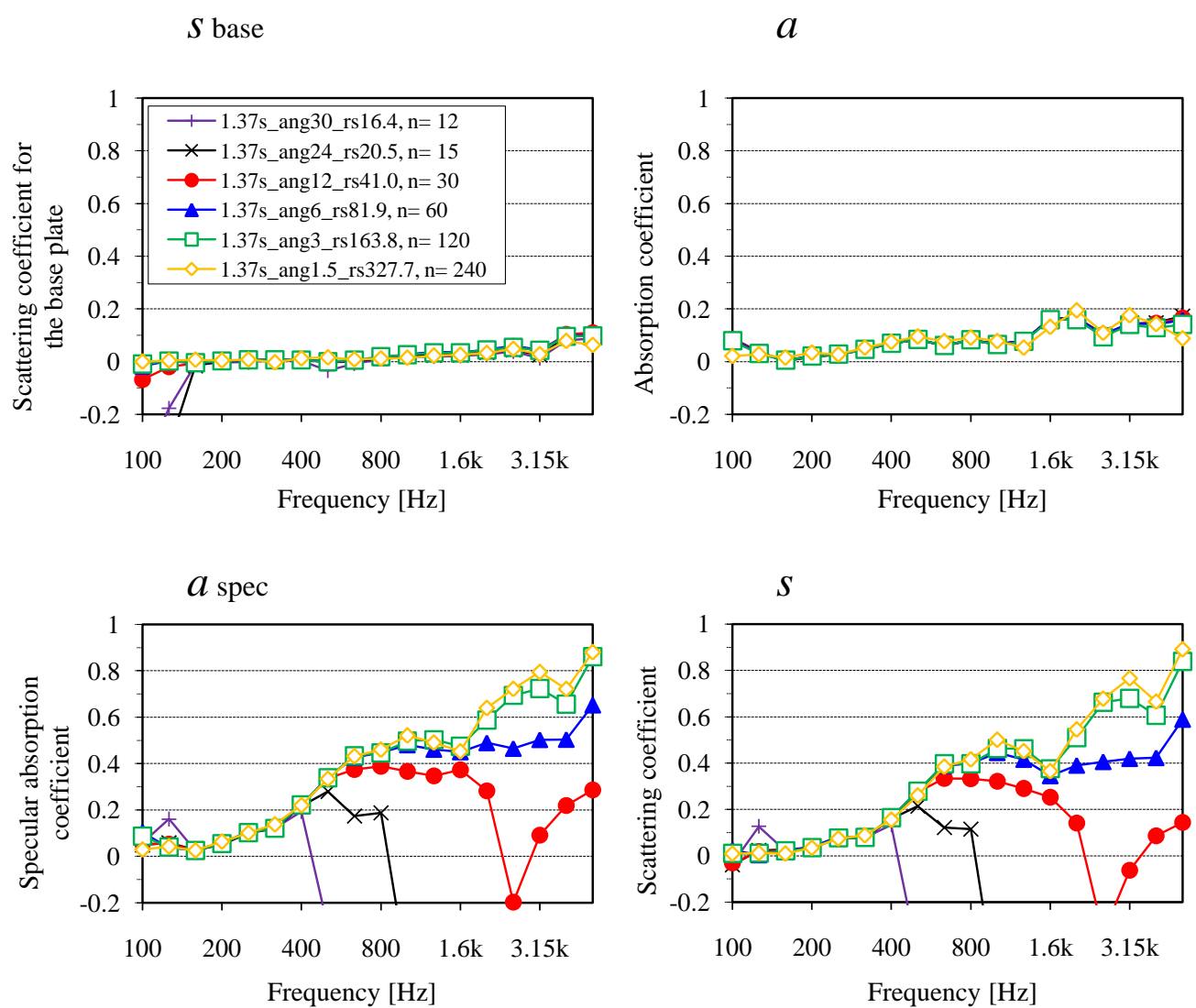






Signal length= **1.37** [s], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB~-20 dB)

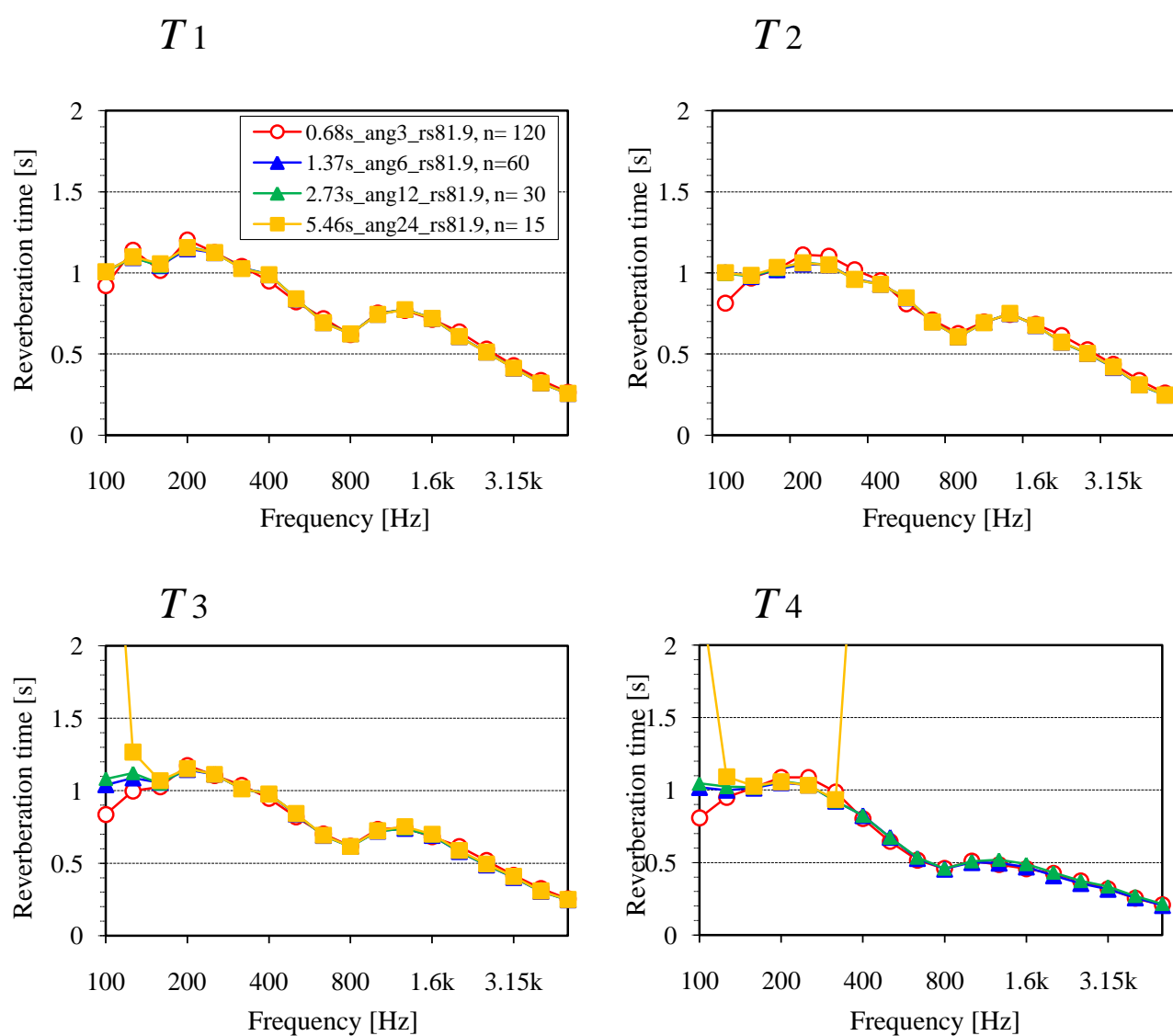


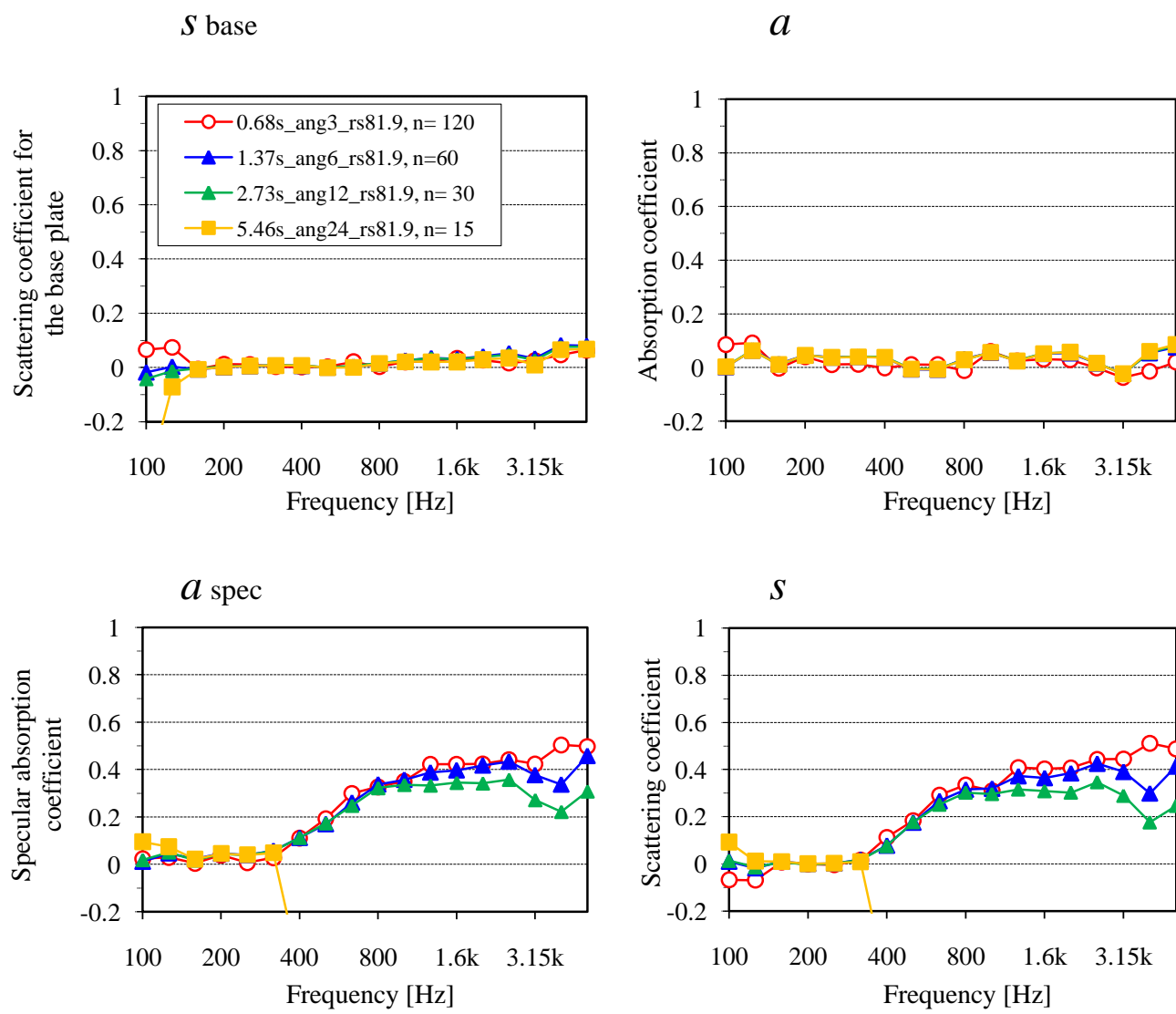


## B1 半球の場合



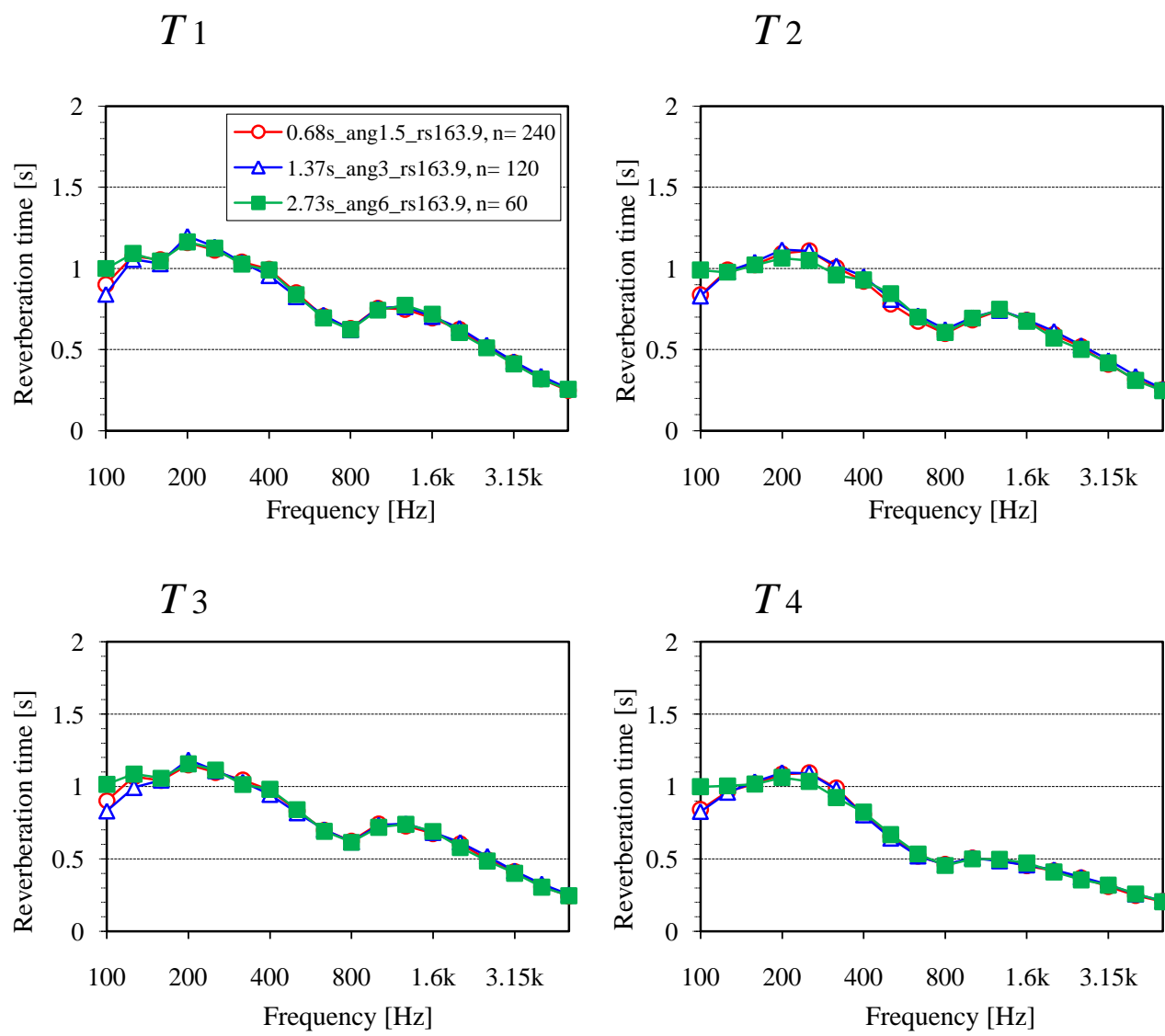
Revolution speed= **82** [s/rev], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB~-20 dB)

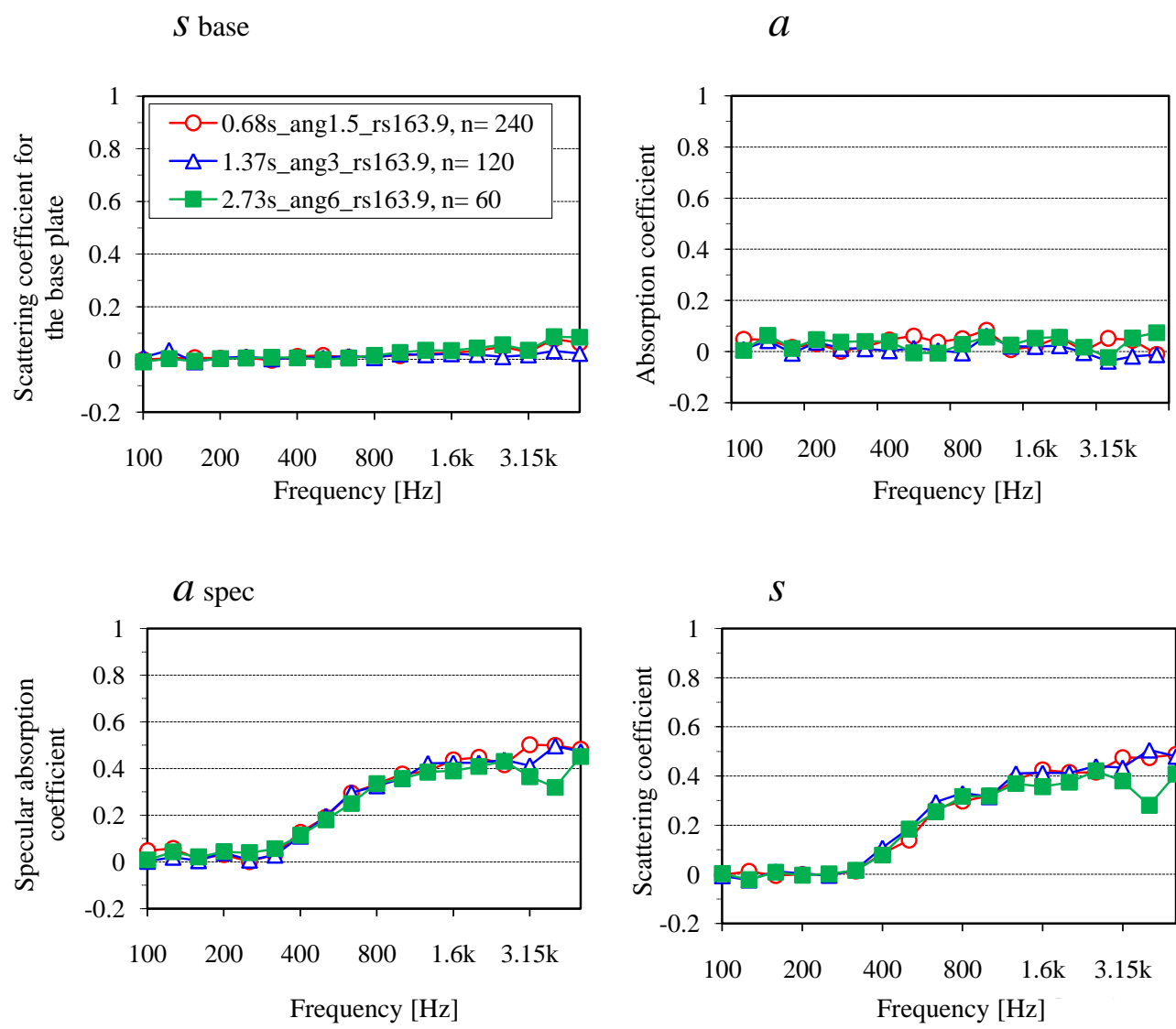






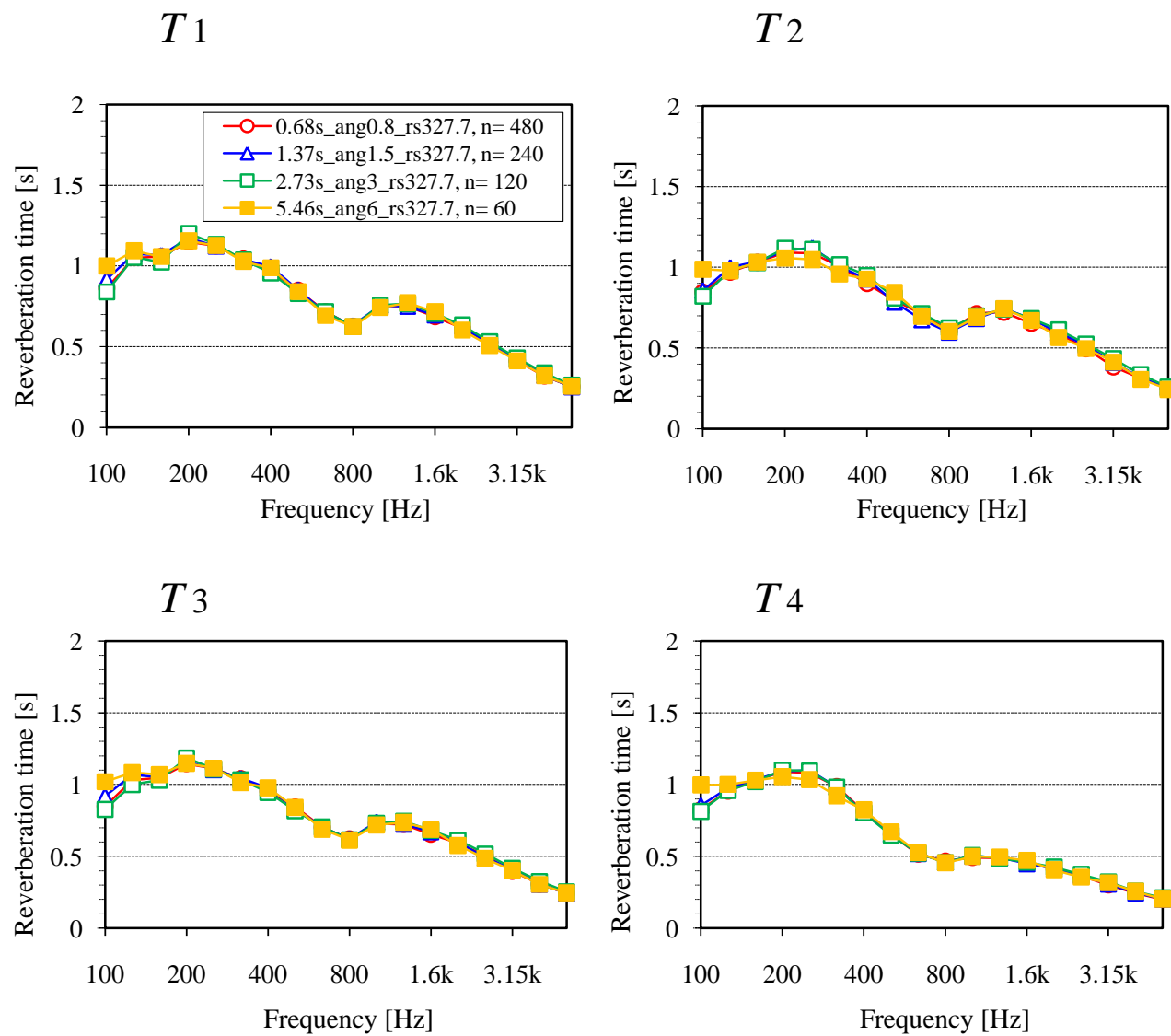
Revolution speed= **164** [s/rev], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)



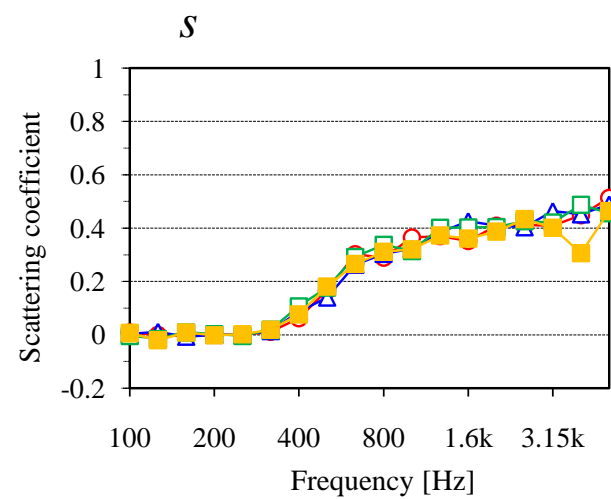
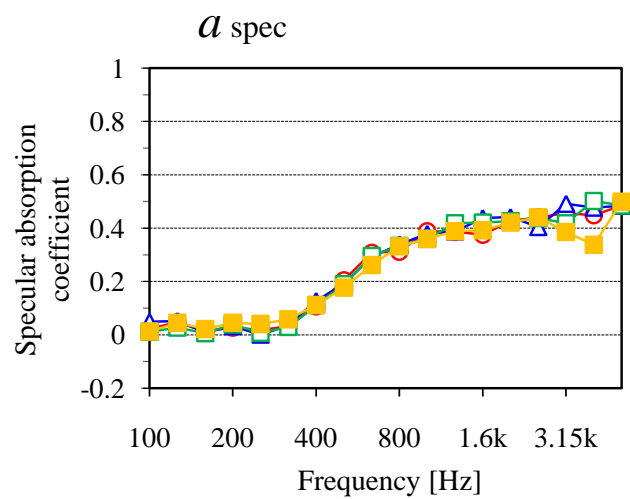
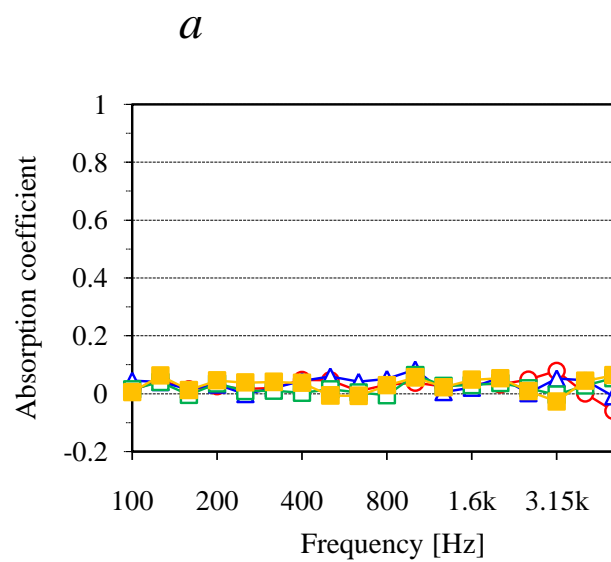
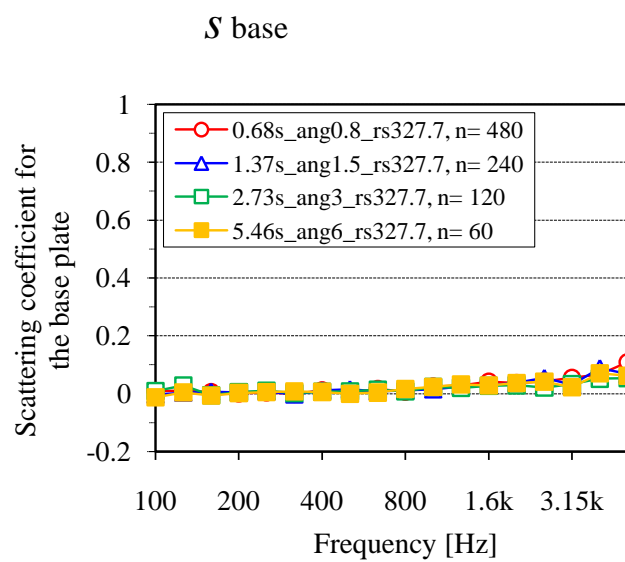




Revolution speed= **328** [s/rev], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)





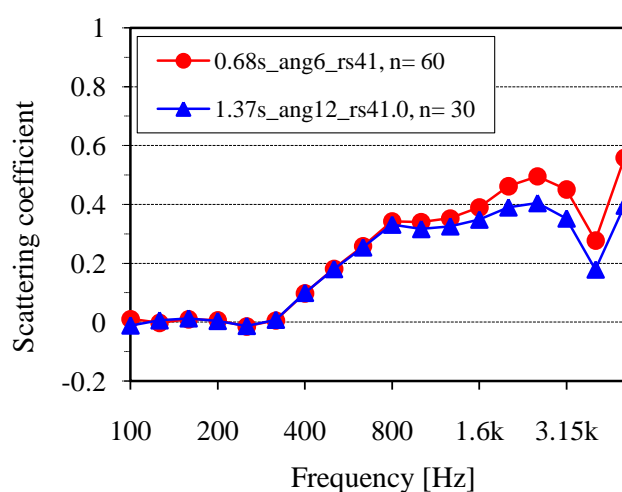


## 乱反射率の比較

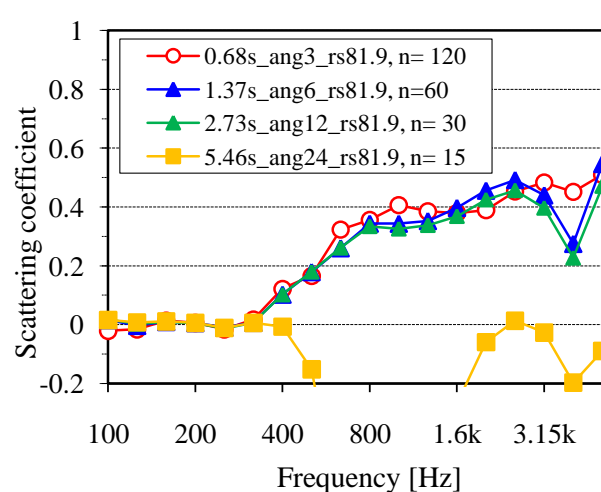


Revolution speed fixed, Scale 1/4,  $T_{10}$  (-5 dB ~ -15 dB)

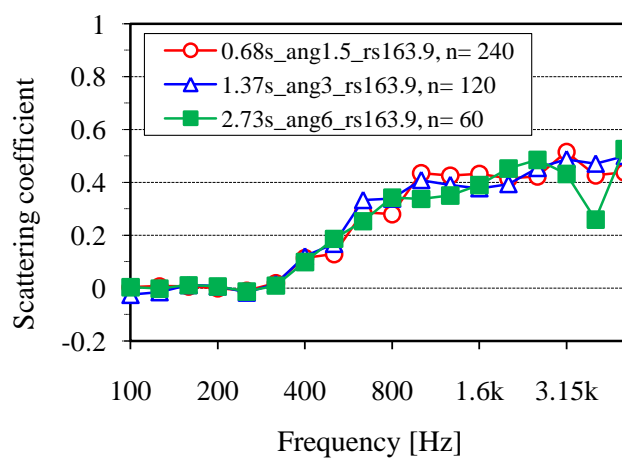
42 s/rev



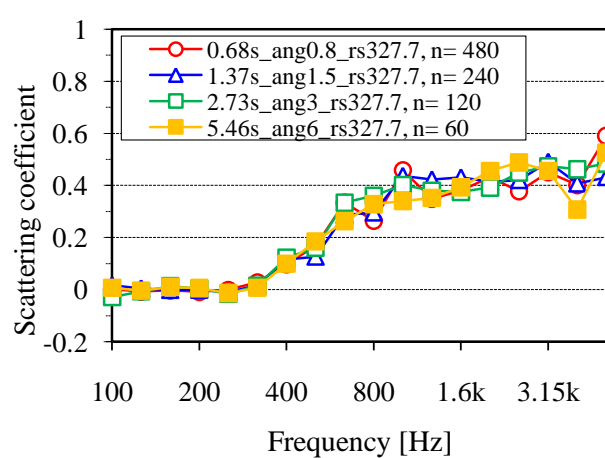
82 s/rev



164 s/rev



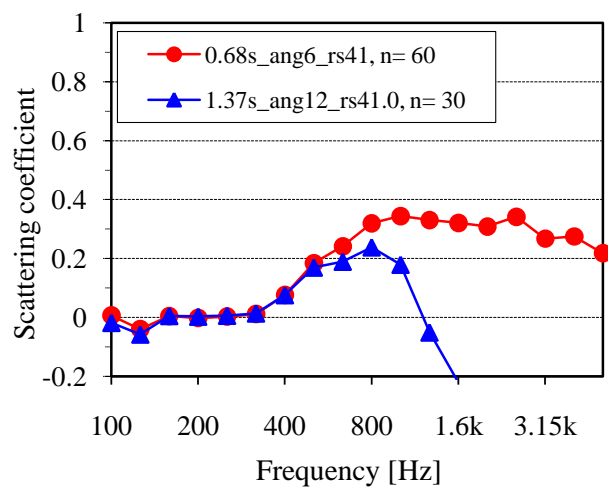
328 s/rev



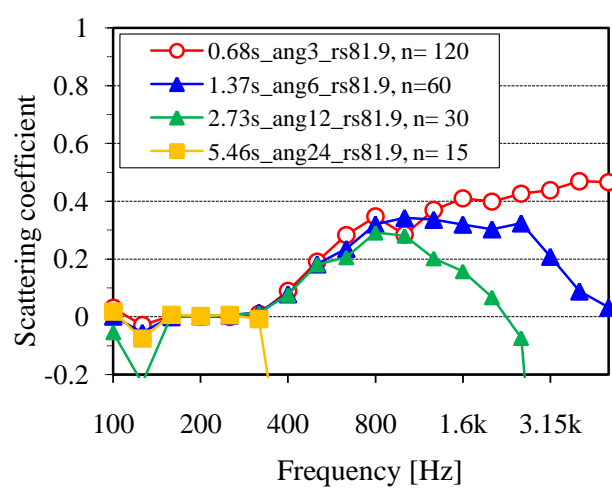


**Revolution speed fixed, Scale 1/4,  $T$  20 (-5 dB ~ -25 dB)**

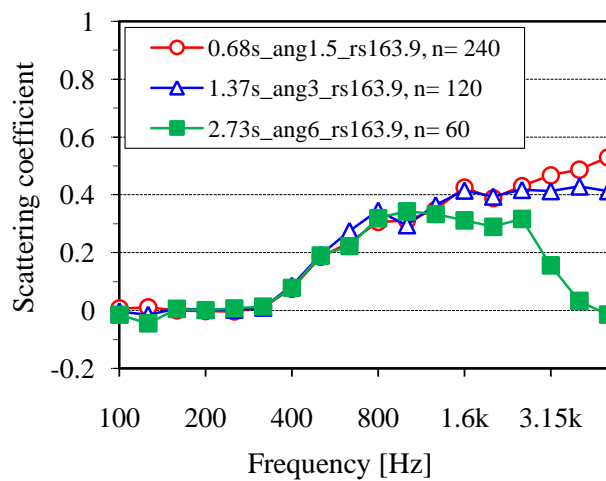
42 s/rev



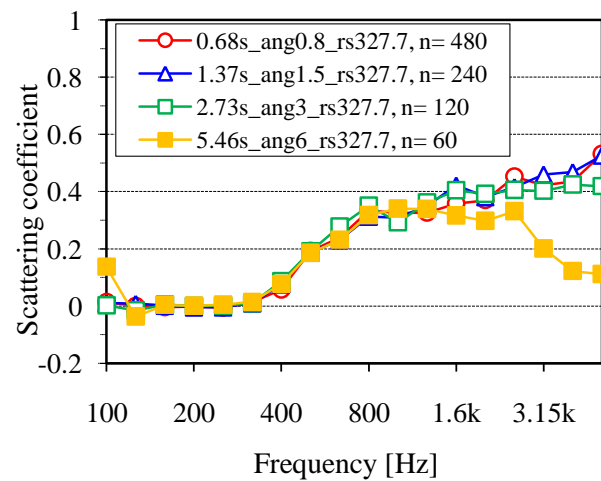
82 s/rev



164 s/rev



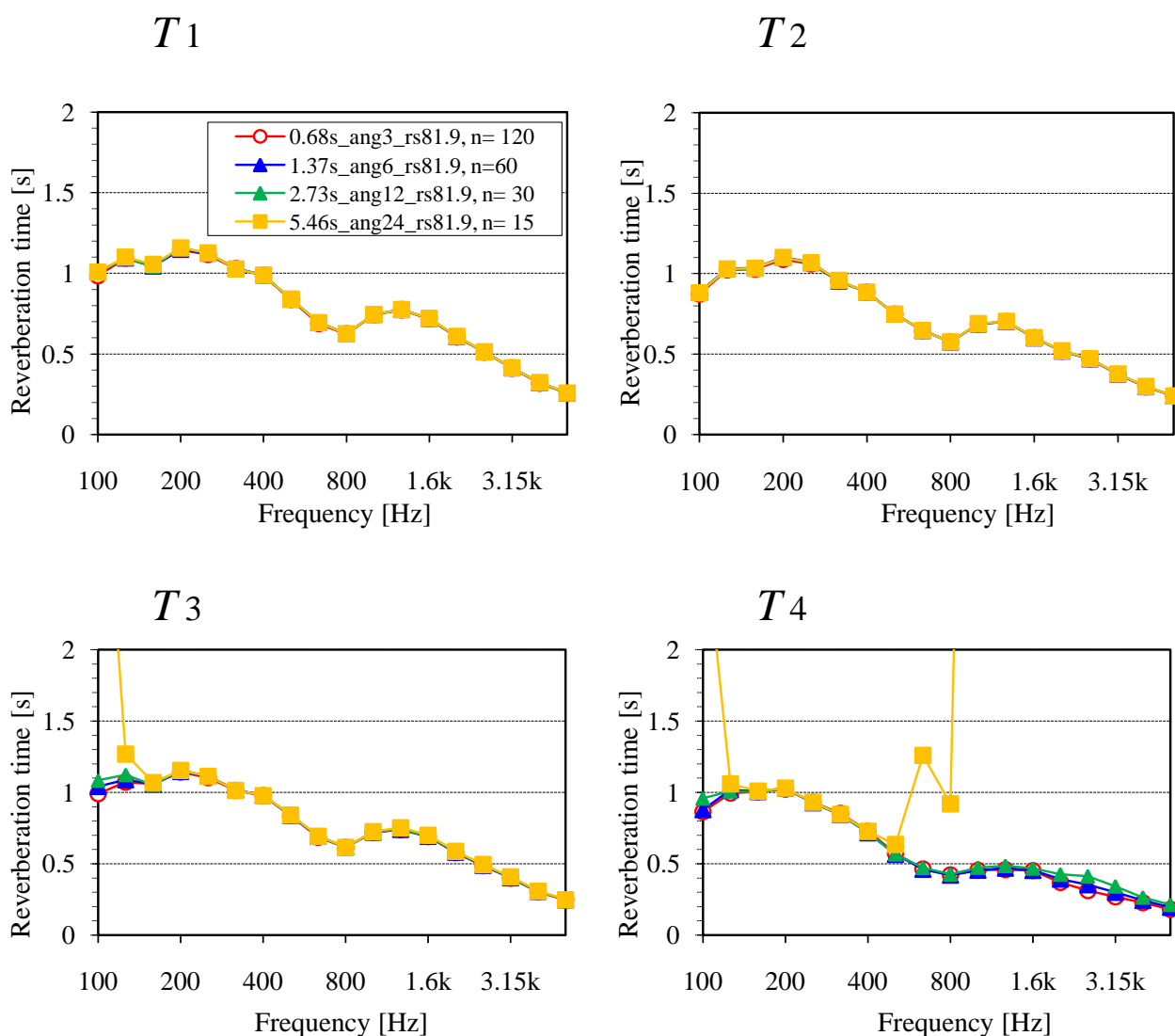
328 s/rev

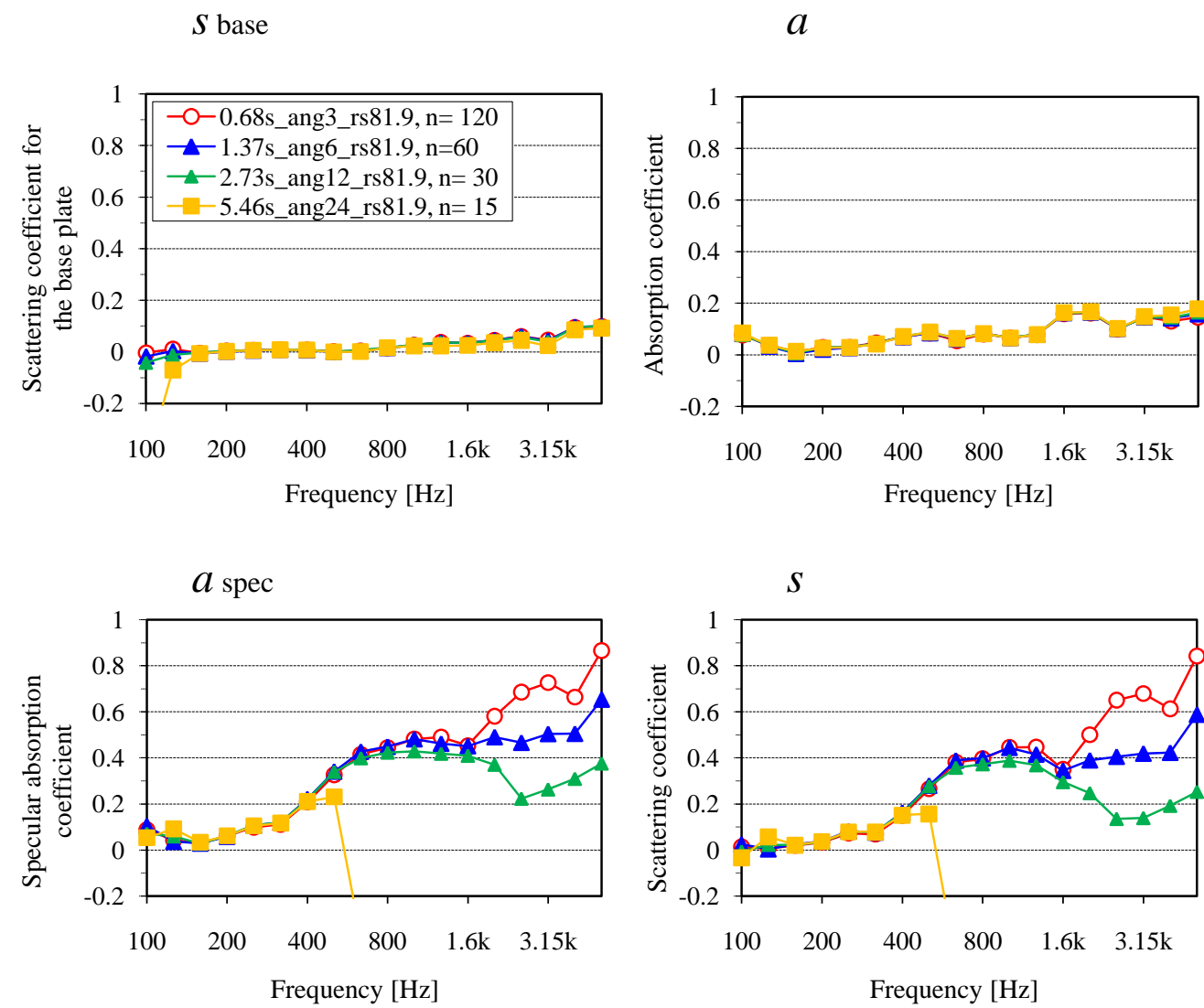


## B2 1次元周期構造の場合



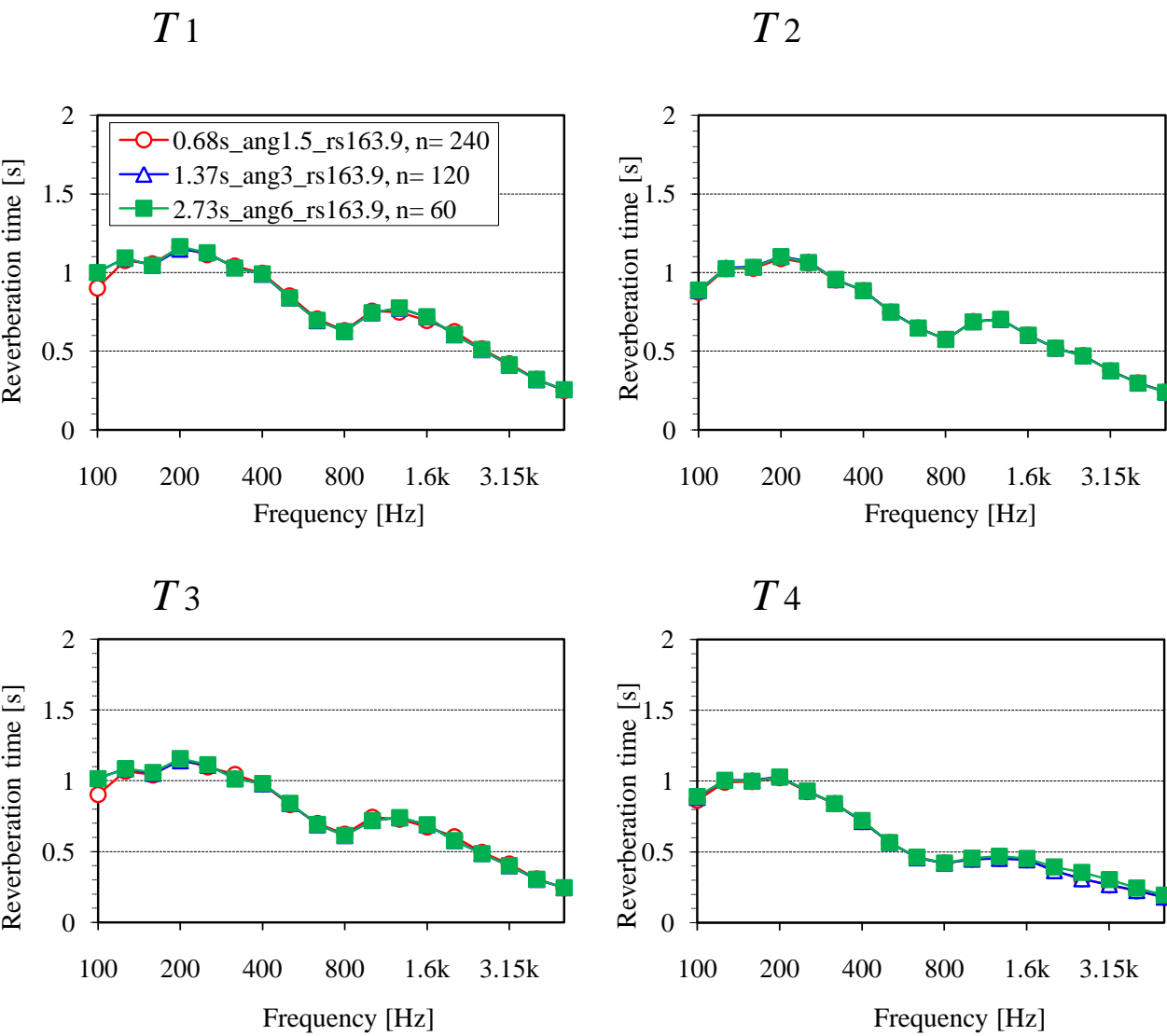
Revolution speed= **82** [s], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)

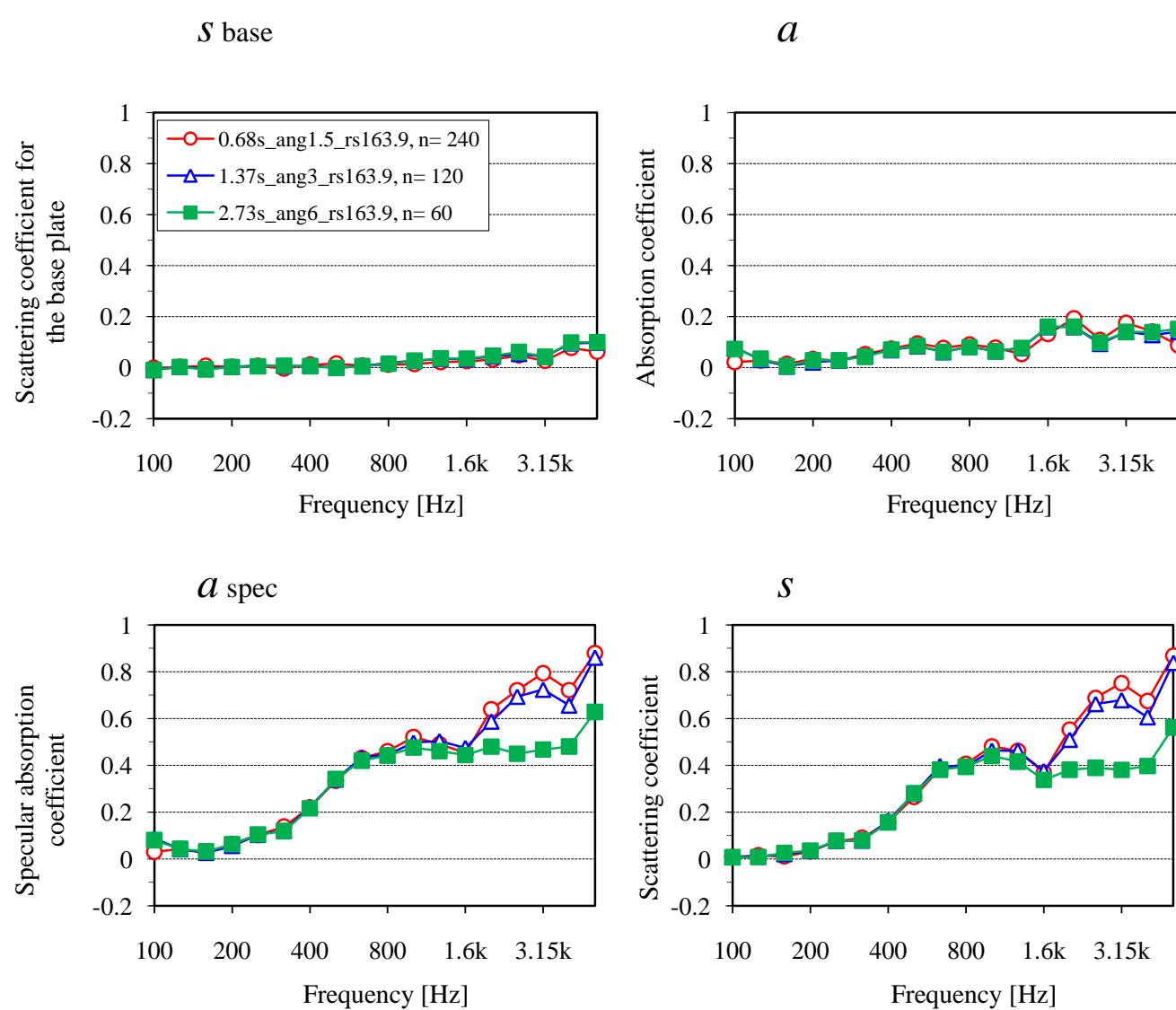






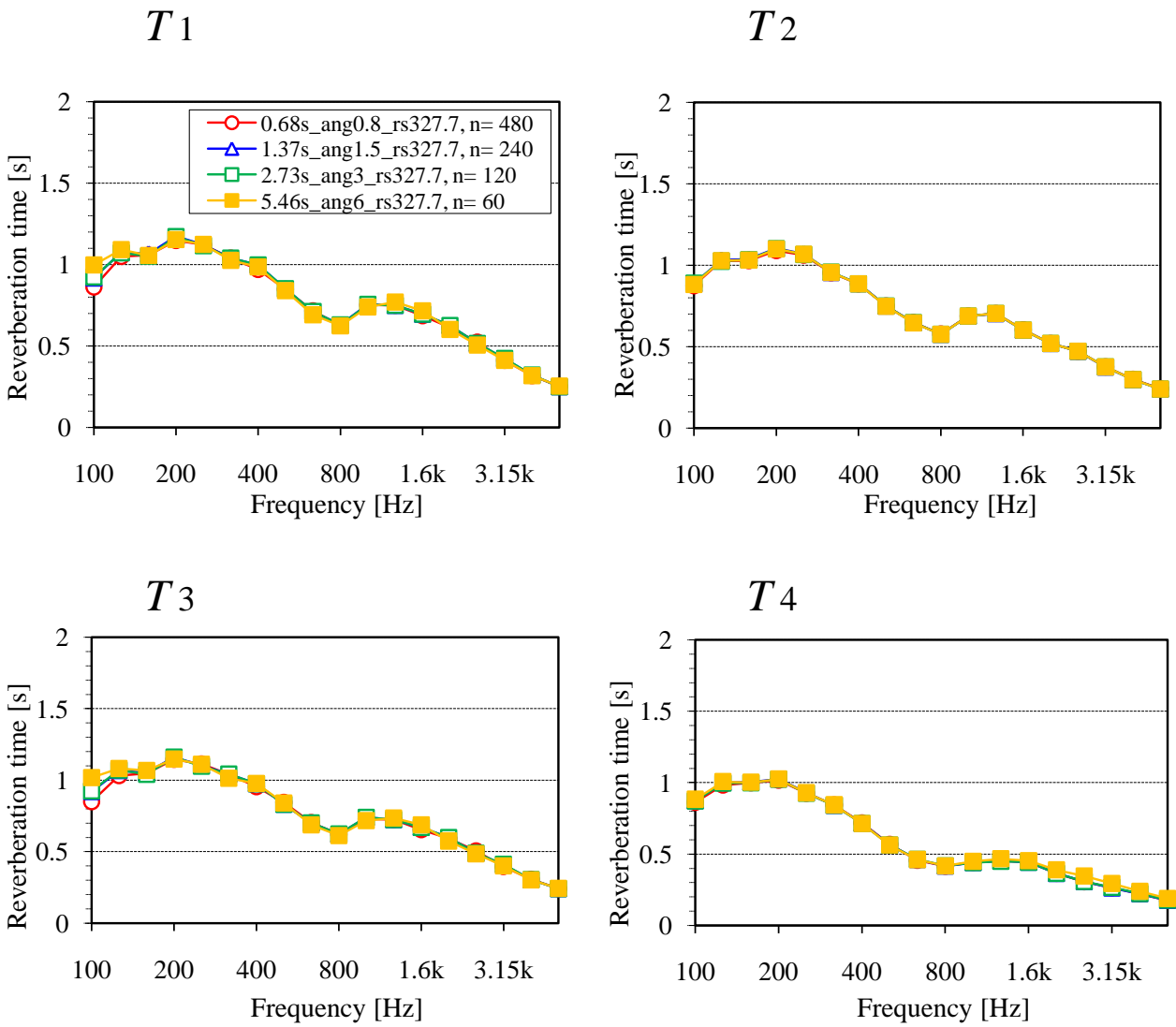
Revolution speed= **164** [s], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)



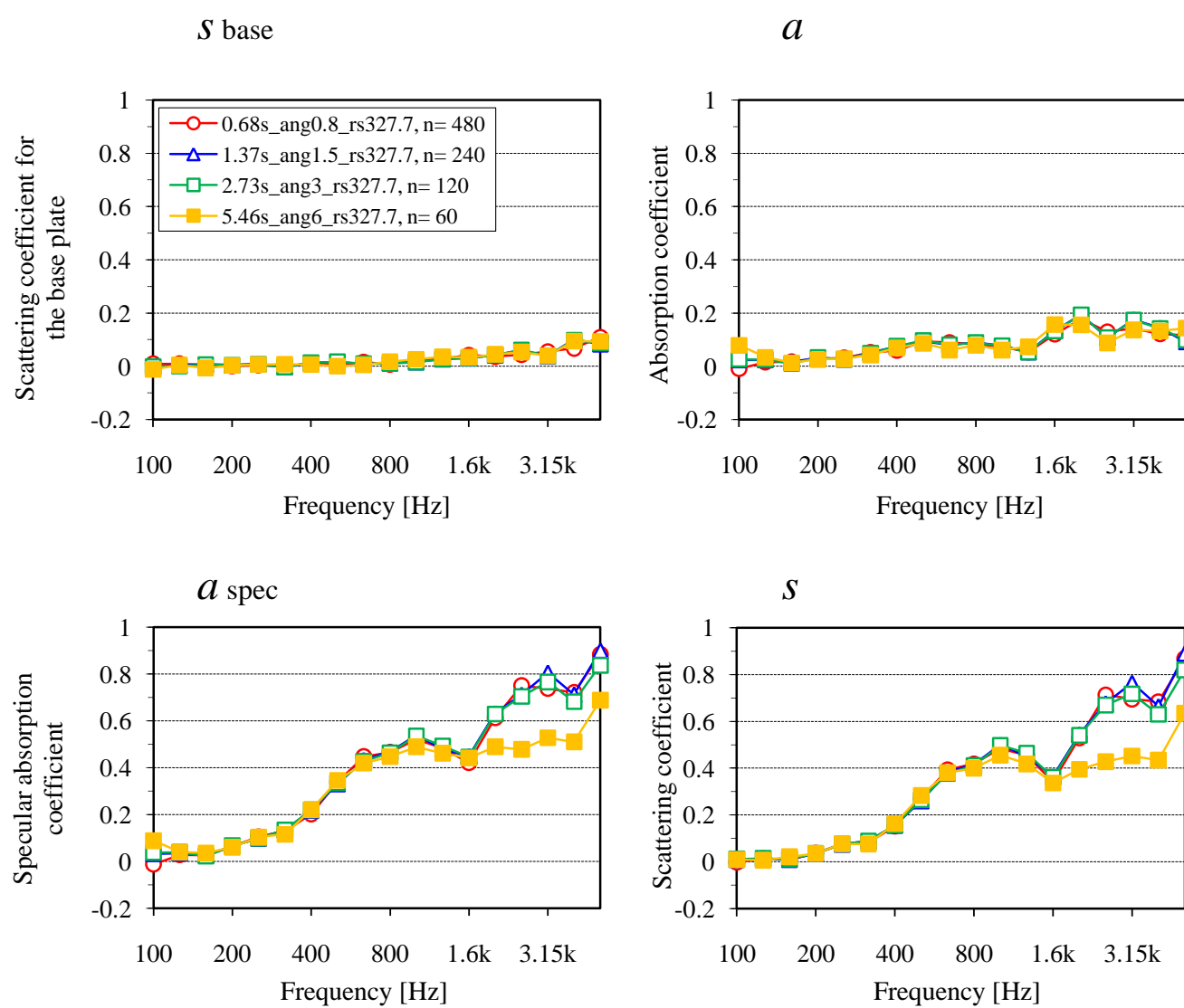




Revolution speed= **328** [s], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)



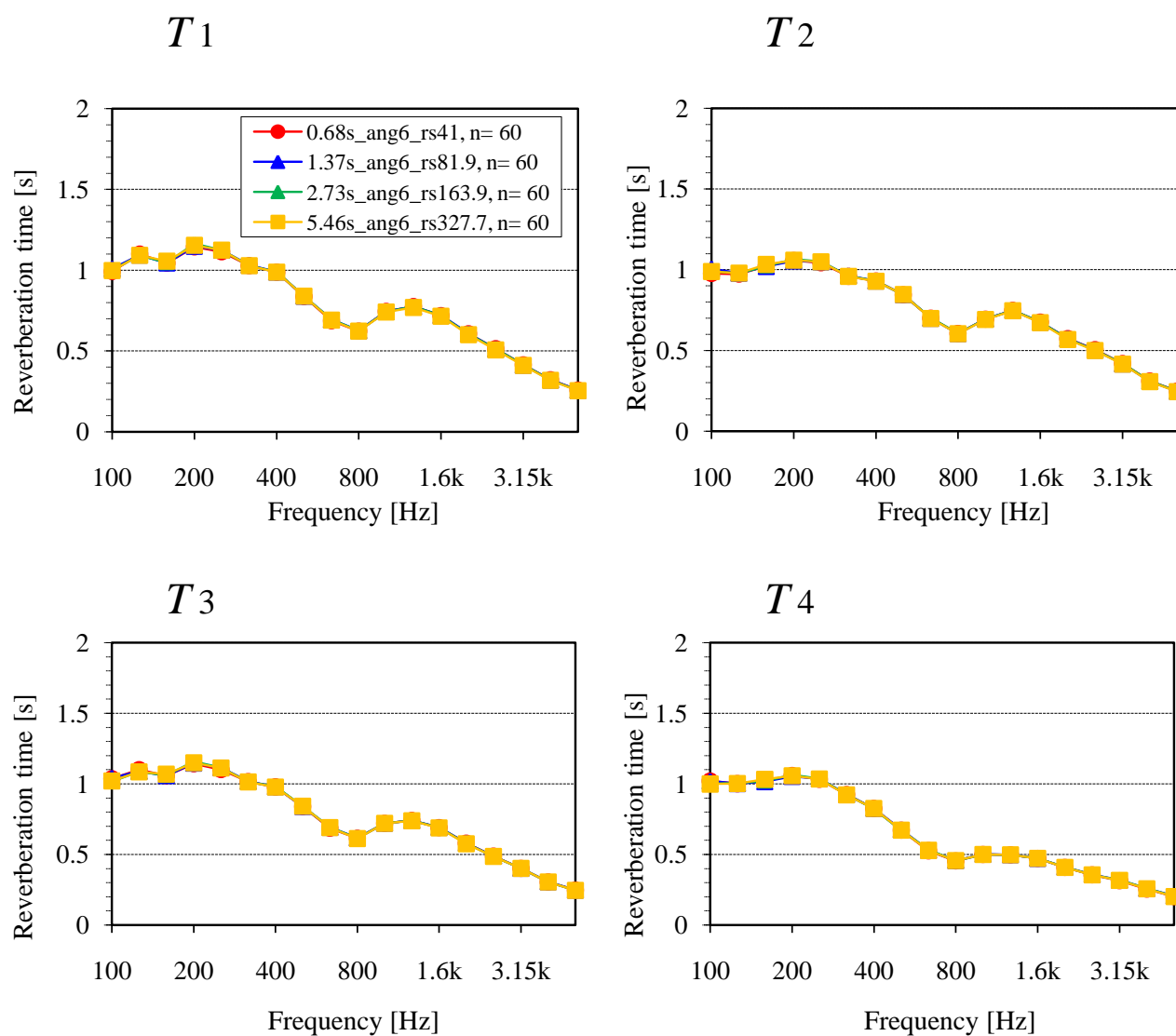


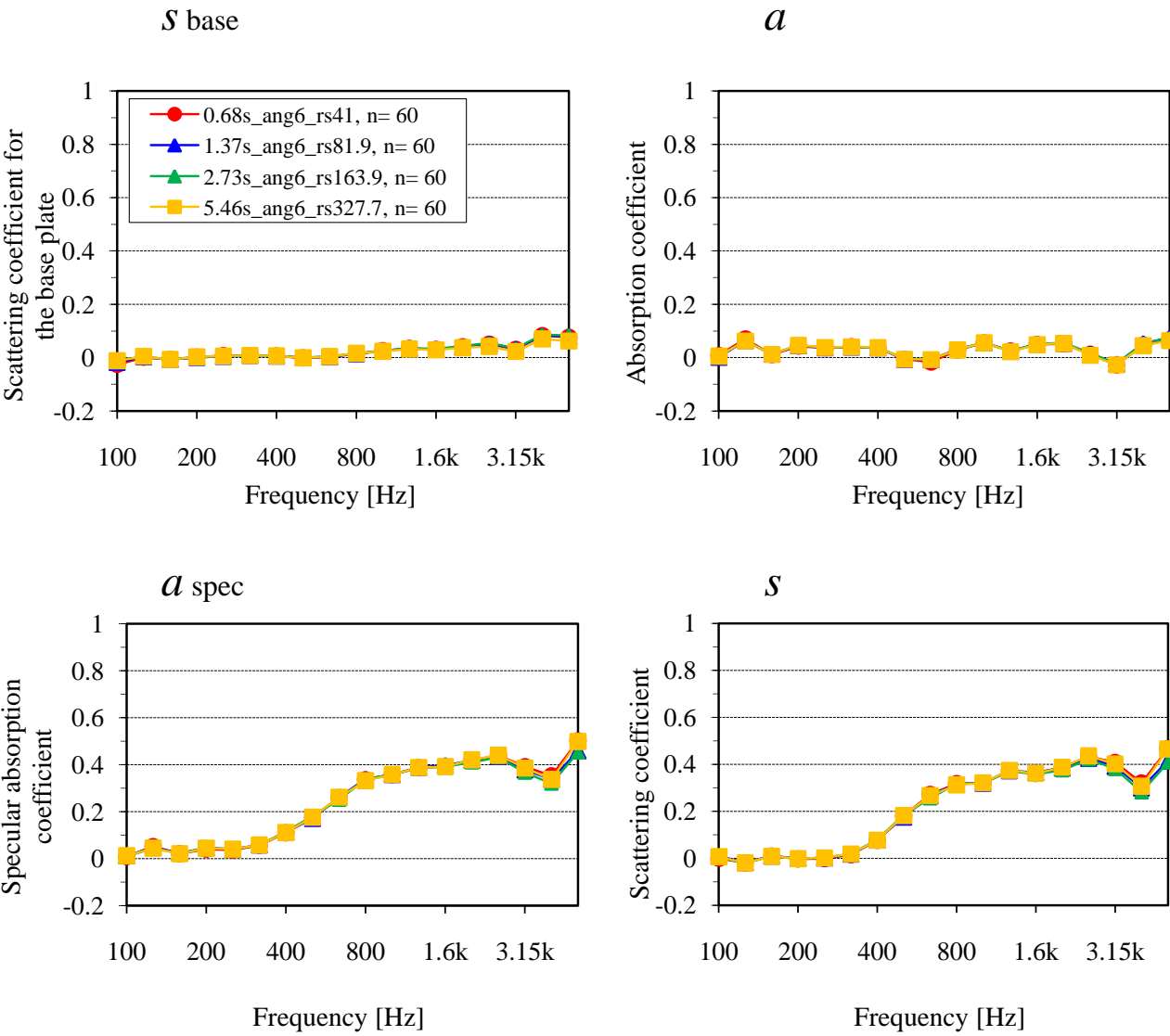


## C1 半球の場合



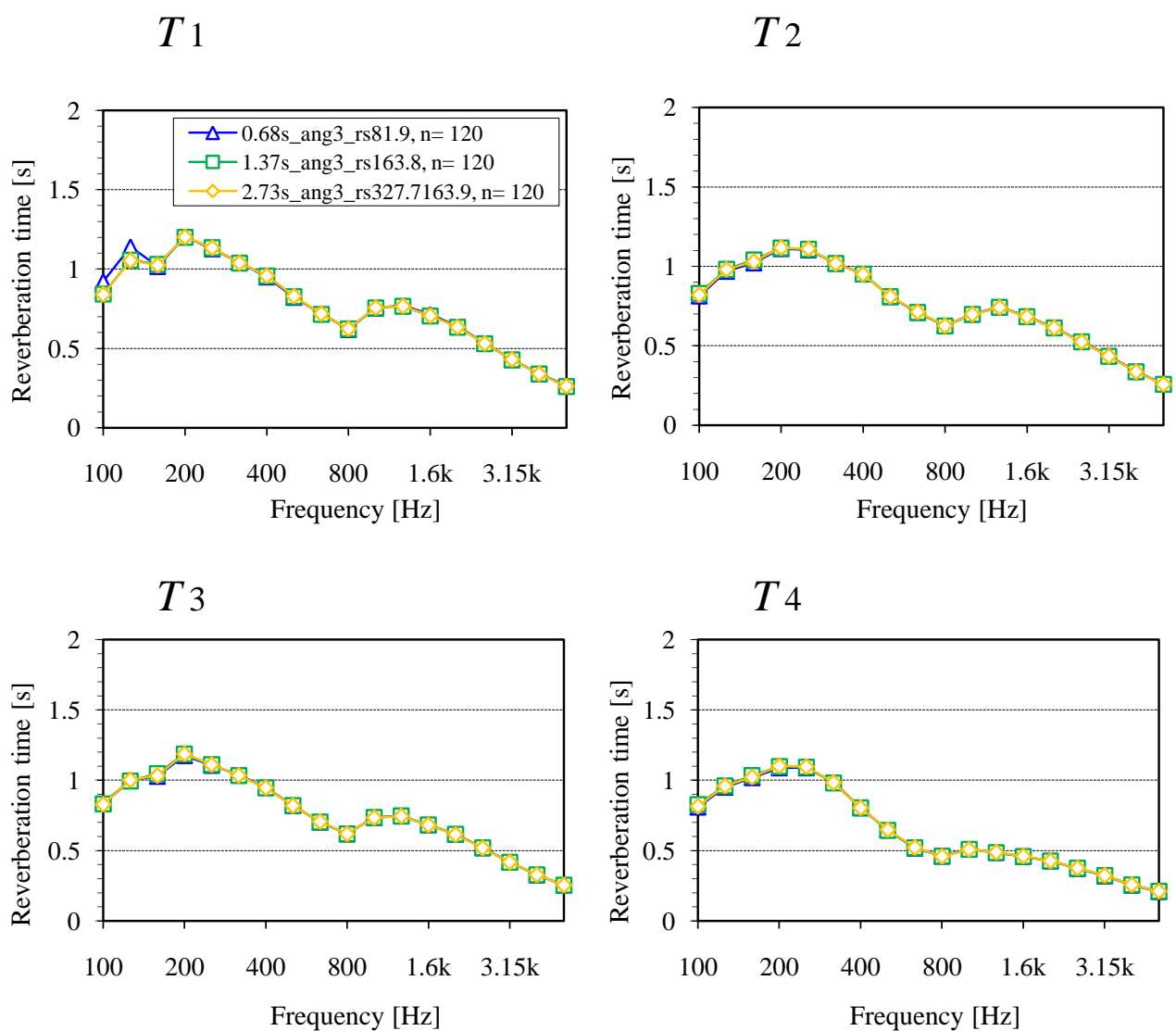
Angular step= 6 [deg], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)

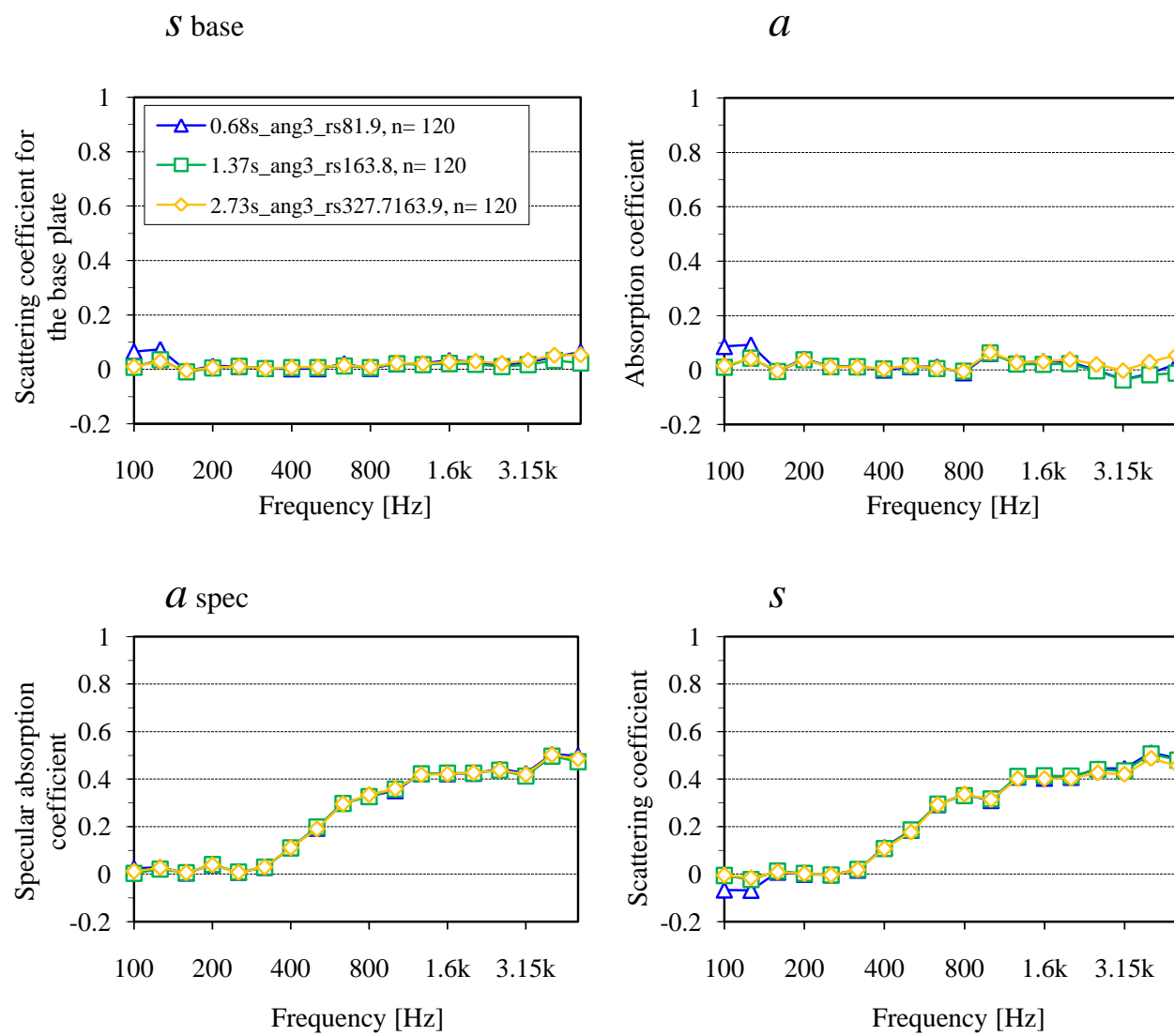






Angular step= **3** [deg], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)



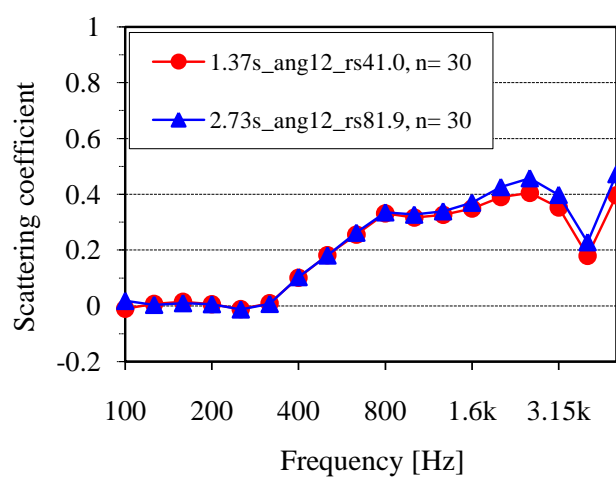


## 乱反射率の比較

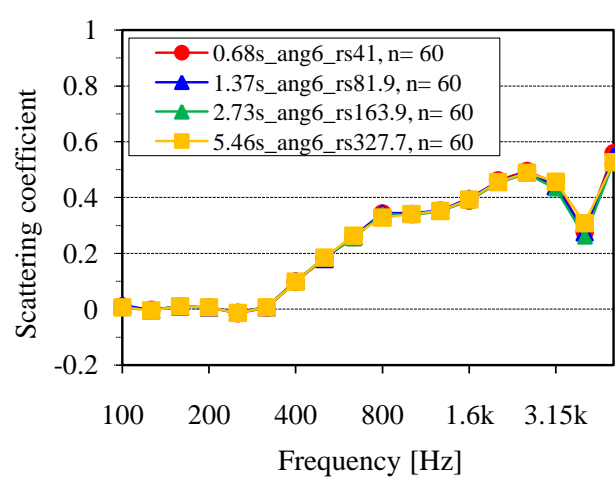


Angular step fixed, Scale 1/4,  $T$  10 (-5 dB ~ -15 dB)

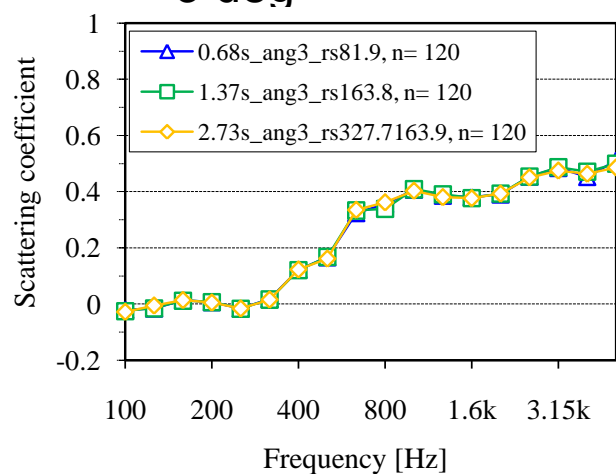
12 deg



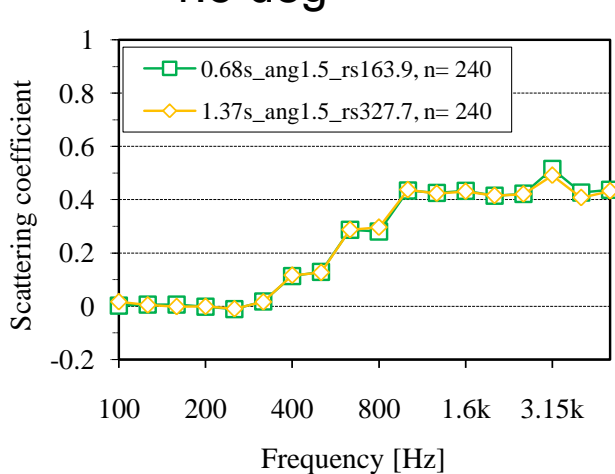
6 deg



3 deg



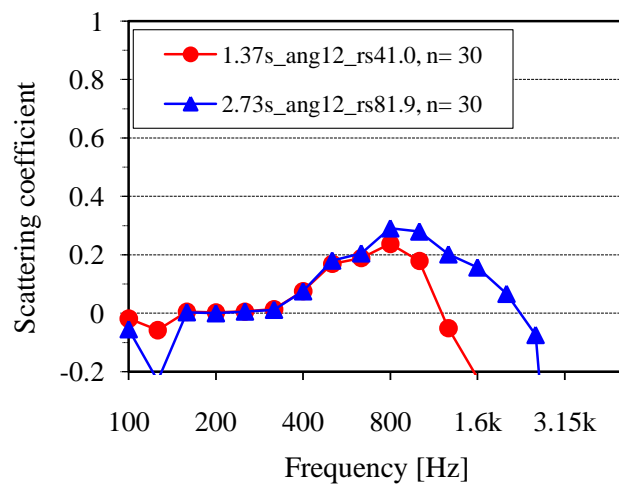
1.5 deg



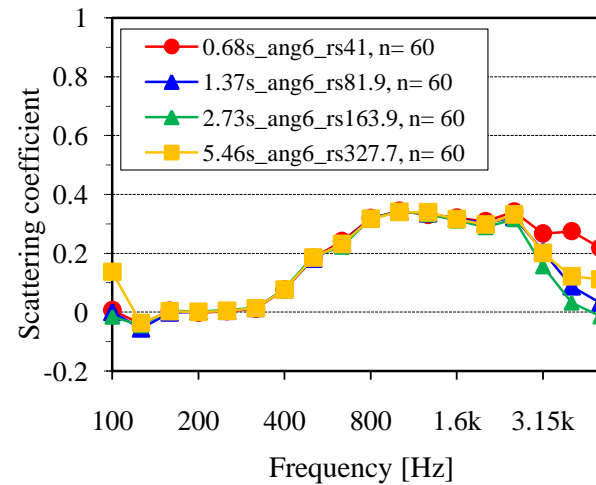


**Angular step fixed, Scale 1/4,  $T\ 20$  (-5 dB ~ -25 dB)**

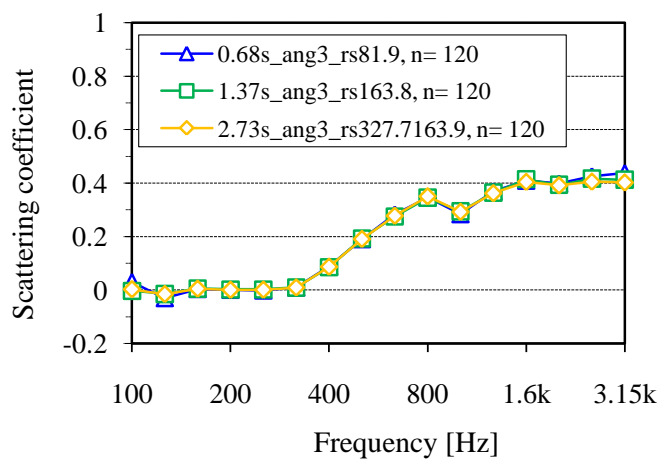
12 deg



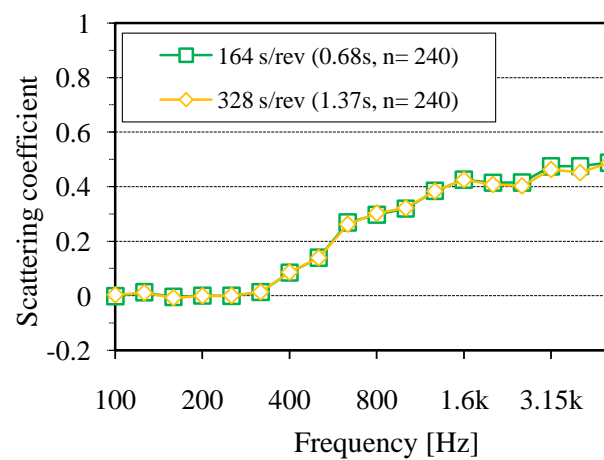
6 deg



3 deg



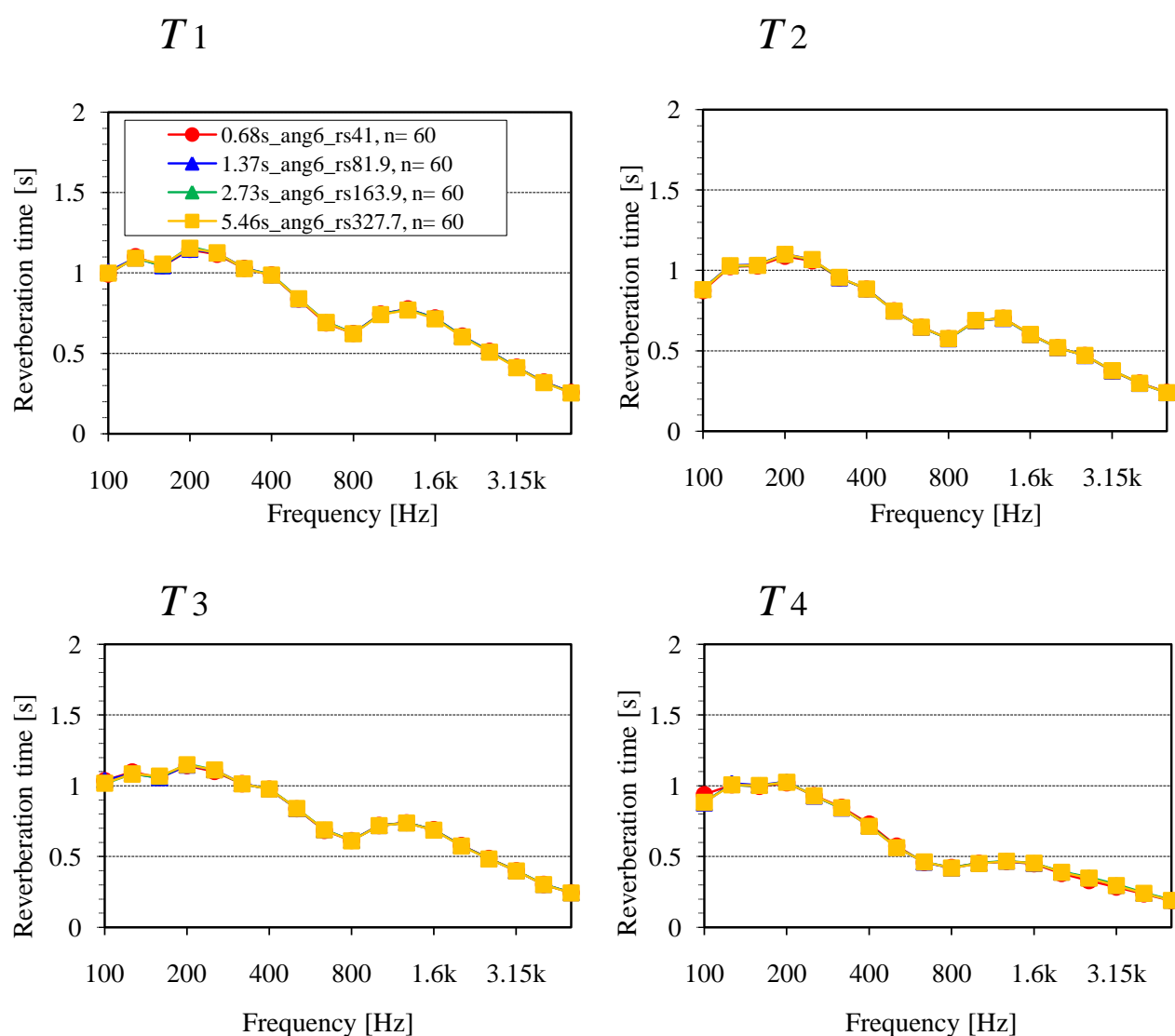
1.5 deg



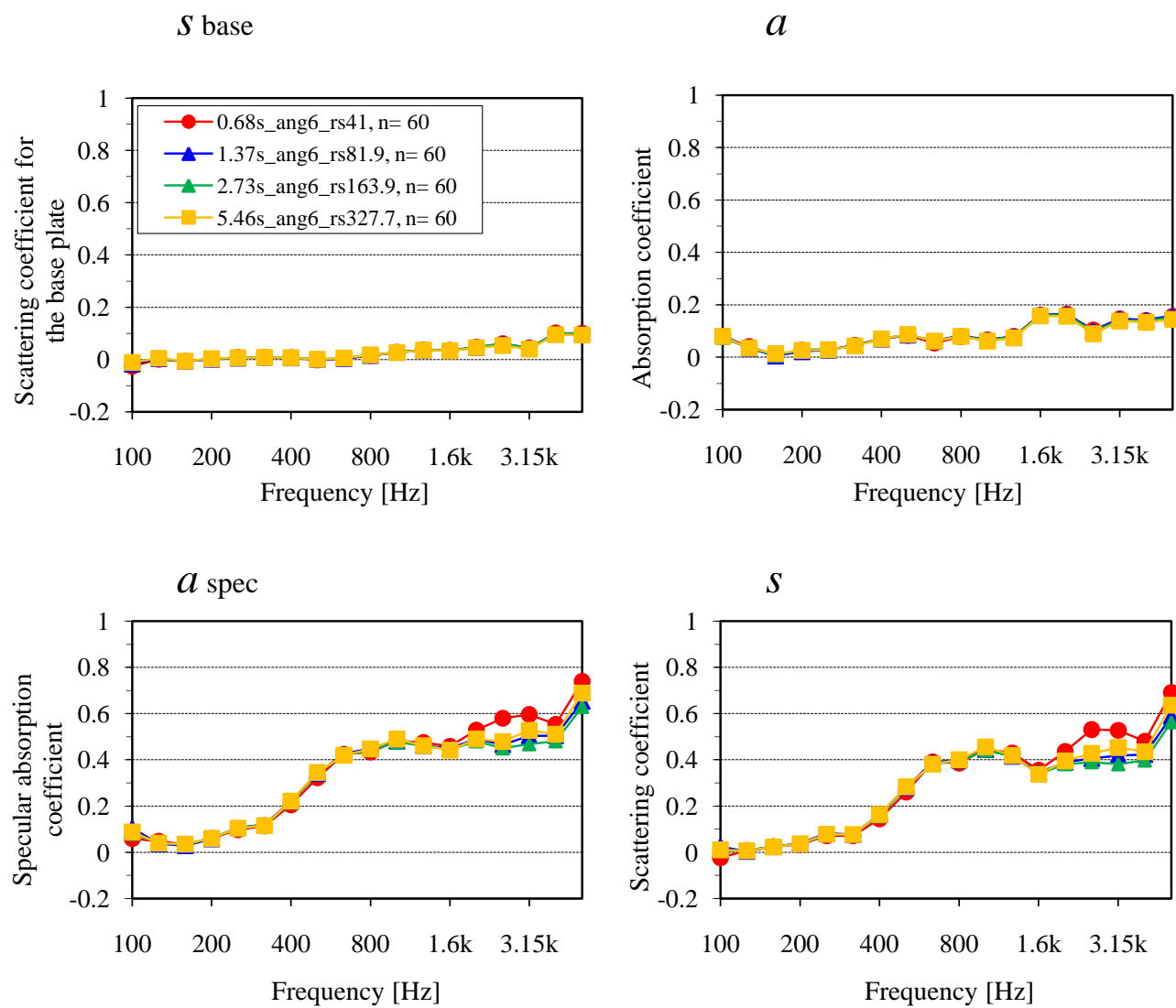
## C2 1次元周期構造の場合



Angular step= 6 [deg], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB~-20 dB)

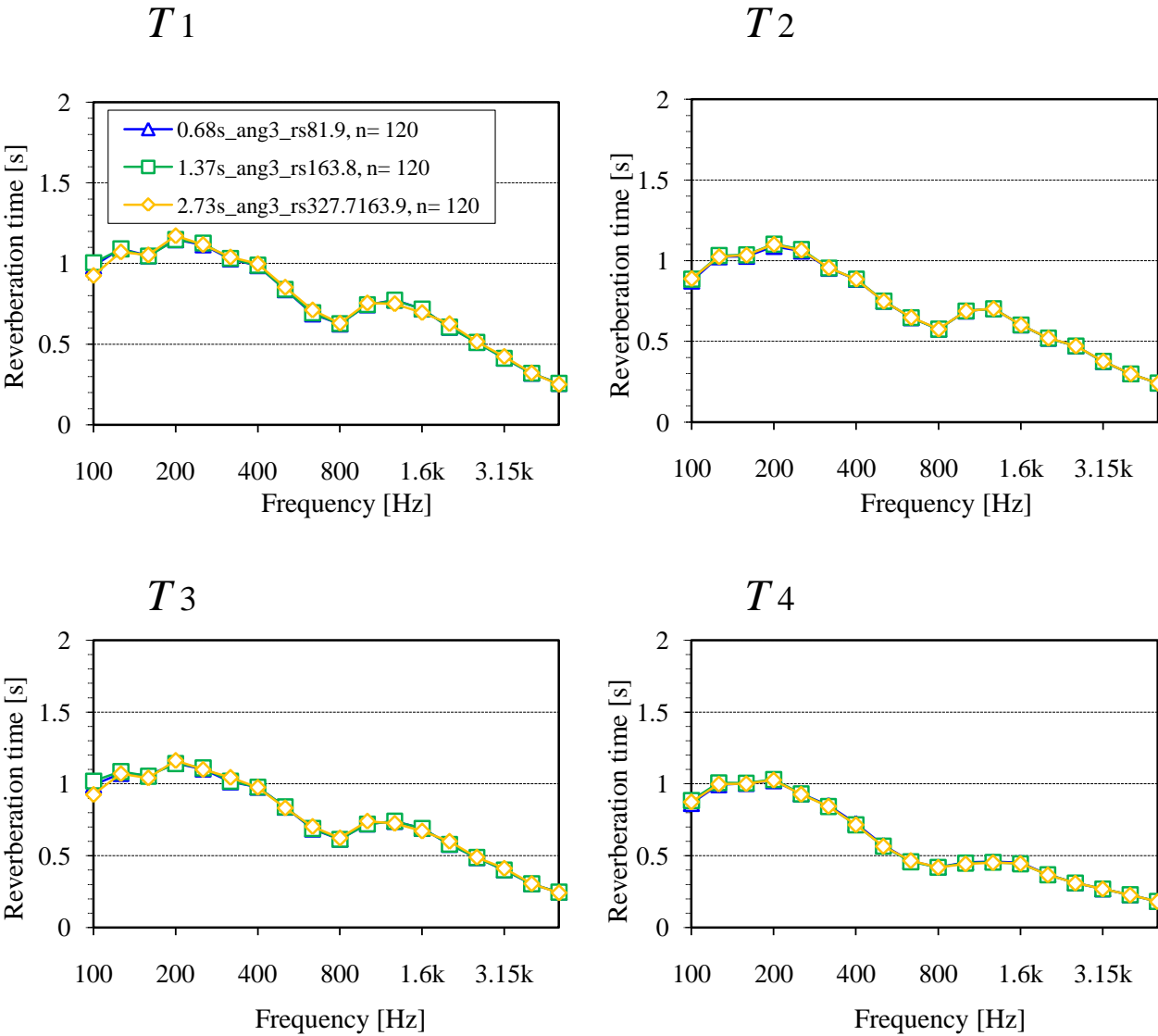


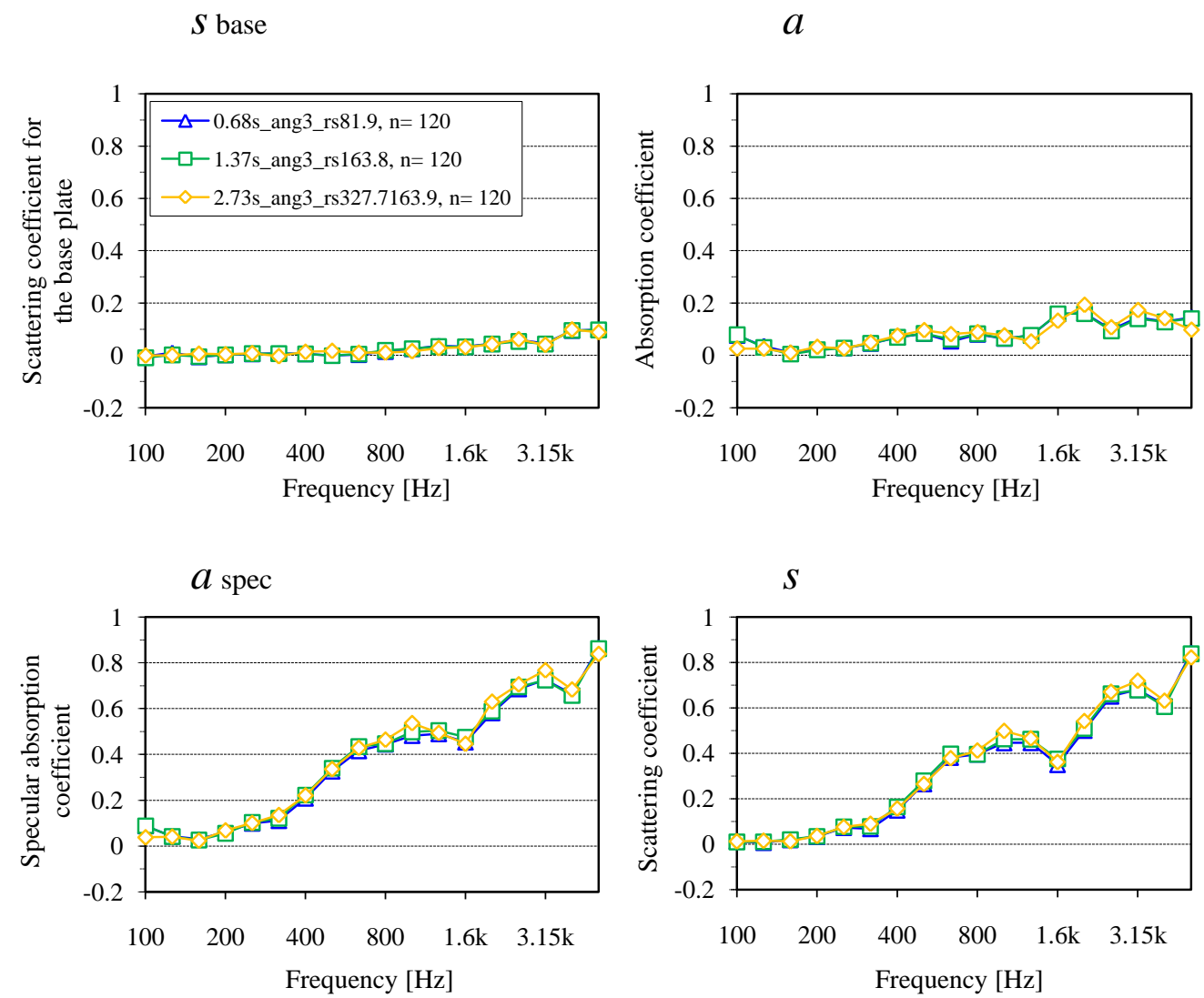






Angular step= **3** [deg], Scale 1/4,  $T_{15}$  (-5 dB ~ -20 dB)







## 参考文献

- [1] 子安 勝: 残響室法吸音率測定方法のJIS, 日本音響学会誌, Vol.5, 1967.
- [2] M. R. Schroeder: Diffuse sound reflection by maximum length sequences, *J. Acoust. Soc. Am.*, 57, 149–150, 1975.
- [3] ISO 266: Acoustics-preferred frequencies for measurements, 1975.
- [4] ISO 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors-, 1993.
- [5] B. I. Dalenbäck, M. Kleiner, P. Svensson: A macroscopic view of diffuse reflection, *J.Audio. Eng. Soc.*, 42, 793–807, 1994.
- [6] E. Mommertz, S. Müller: Measuring impulse responses with digitally preemphasized pseudo random noise derived from maximum length sequences, *Applied Acoustics*, 44, 195–214, 1995.
- [7] M. Vorländer, M. Kob: Practical aspects of MLS measurements in building acoustics. *Applied Acoustics*, 52, 239–258, 1997.
- [8] ISO 3382: Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997.
- [9] F. Kawakami, T. Sakai: Deep-well approach for canceling the edge effect in random incident absorption measurement, *J. Acoust. Soc. Jpn*, 19, 327–328, 1998.
- [10] P. D' Antonio, T. Cox: Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 2: Prediction, Measurement and Characterization, *Journal of AES*, 46, 1075–1091, 1998.
- [11] ISO 10534-1, 2: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes -Part 1: Method using standing wave ratio, Part 2: Transfer function method, 1996/1998.
- [12] A. Farina: A new method for measuring the scattering coefficient and the diffusion coefficient of panels. *Acta Acustica united with Acustica*, 86, 928–942, 2000.
- [13] Y.W. Lam. Surface diffusion. *Applied Acoustics*, 60, 111–112, 2000.
- [14] A. Farina. L. Tronchin: Comparison between measurements of the scattering and diffusion coefficients

- [15] P. D'Antonio, T. J. Cox: Diffusor application in rooms, *Applied Acoustics*, 60, 113–142, 2000.
- [16] M. Vorländer, E. Mommertz: Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients, *Applied Acoustics*, 60, 187–199, 2000.
- [17] T. J. Hargreaves, T. J. Cox, Y. W. Lam, P. D'Antonio: Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free field measures, *J. Acoust. Soc. Am.*, 108, 1710–1720, 2000.
- [18] E. Mommertz: Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces, *Applied Acoustics*, 60, 201–203, 2000.
- [19] 前川純一, 森本政之, 阪上公博: 建築・環境音響学 (第2 版) 共立出版, 2000.
- [20] H. Kuttruff: Room acoustics, 4th edition. E. & F. N. Spon, 2000.
- [21] E. Mommertz: Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique, *Applied Acoustics* 46, 251–263, 1995.
- [22] Haan C.H.1, Kwon K.W: A method of evaluating surface diffusivity of rooms - I: computer modeling and field measurement, *Applied Acoustics*, 62, 1313–1327, 2001.
- [23] AES-4id-2001: AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterization and measurement of surface scattering uniformity, *J. Audio Eng. Soc.*, 49, 149–165, 2001.
- [24] J. J. Embrechts, D. Archambeau, G. B. Stan: Determination of the scattering coefficient of random rough diffusing surfaces for room acoustics application, *Acta Acustica united with Acustica*, 87, 482–494, 2001.
- [25] M. H. A. Gomes, M. Vorländer, S. N. Y. Gerges: Investigations on the ISO measurement method for scattering coefficient in the reverberation room. *Proc. ICA*, Rome, Paper 6C.11.01.L, 2001.
- [26] Prediction of sound field in rooms: Theory, application and recent development, *AIJ*, 2001.
- [27] M. H. A. Gomes, M. Vorländer, S. N. Y. Gerges: Aspects of the sample geometry in the measurement of the random incidence scattering coefficient. *Proc. Forum Acusticum*, Sevilla, 2002.
- [28] De Geetere, G. Vermeir: Investigations on real-scale experiments for the measurement of the ISO scattering coefficient in the reverberation room, *Proc. Forum Acusticum*, Sevilla, CD-ROM, paper RBA-06-004-IP, 2002.

- 
- [29] J. H. Rindel: Scattering in room acoustics and the related activities in ISO and AES, Proc. ICA, Rome, Paper 6KN1.02, 2001.
- [30] G. B. Stan, J. J. Embrechts, D. Archambeau: Comparison of different impulse response measurement techniques, *J. Audio Eng. Soc.* 50, 249–262, 2002.
- [31] J. J. Embrechts: Practical aspects of the ISO procedure for measuring the scattering coefficient in a real-scale experiment, *Proc. Forum Acusticum*, Sevilla, RBA–06– 001–IP, 2002.
- [32] M. H. A. Gomes, M. Vorländer, S. N. Y. Gerges: Aspects of the sample geometry in the measurement of the random incidence scattering coefficient, *Proc. Forum Acusticum*, Sevilla, 2002.
- [33] L. De Geetere, G. Vermeir: Investigations on real-scale experiments for the measurement of the ISO scattering coefficient in the reverberation room. *Proc. Forum Acusticum*, Sevilla, 2002.
- [34] User’s Manual of CATT-Acoustic v8.0, Sweden, 2002.
- [35] Dirac room acoustics software version 3.1. Brüel & Kjær, Denmark, 2003.
- [36] Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture, 2nd ed., Springer, 2003.
- [37] ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003.
- [38] ISO 17497-1: Acoustics-sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurements of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2004.
- [39] ISO/CD 17497-2: Acoustics-sound-scattering properties of surfaces - Part 2: Measurements of the directional diffusion coefficient in a free field.
- [40] T. J. Cox, P. D’Antonio: Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application, Spon Press, 2004.
- [41] T. J. Cox: Acoustic diffusers: the good, the bad and the ugly. *Proc. IoA(UK)* 26 (Reproduced Sound), 2004.
- [42] T. J. Cox., Peter D’Antonio: Surface characterization for room acoustic modelling and design, *Proc. International Symposium on Room Acoustics: Design and Science (RADS)*, 2004.
- [43] J. Y. Jeon, S. C. Lee, M. Vorländer: Development of scattering surfaces for concert halls,

- Applied Acoustics* 5, 2004.
- [44] M. Vorländer, J. J. Embrechts, L. De Geetere, G. Vermeir, M. H. D. Gomes: Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients, , *Acta Acustica united with Acustica* 90, 858–67, 2004.
- [45] Vorländer *et al.*: Measurement of random incidence scattering coefficients, *Acta Acustica united with Acustica*, 90, 2004.
- [46] Toyoda, *et al.*: Effects of room shape and diffusing treatment on the measurement of sound absorption coefficient in a reverberation room, *Acoust. Sci. & Tech.* vol. 25, No.4.2004.
- [47] Tetsuya Sakuma, Yoshiyuki Kosaka: Comparison Between Scattering Coefficients Determined By Specimen Rotation And By Directivity Correlation, *ICA Kyoto*, 2004.
- [48] Jin Yong Jeon, Jong Kwan Ryu, Shin-ichi Sato and Yong Hee Kim: Subjective and objective evaluation of the scattered sound in a 1:10 scale model hall, *Forum Acusticum*, 2005.
- [49] T. J. Cox and P. D'Antonio, Thirty years since “Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences”: Where are we now?, *Forum Acusticum*, Budapest, 2005.
- [50] 尾本章：幾何音響学の考え方，特集：されど幾何音響シミュレーション，音響技術 No. 129, pp. 2-7, 2005.
- [51] 坂本真一：幾何音響学の考え方，特集：されど幾何音響シミュレーション，音響技術 No. 129, pp. 35-39, 2005.
- [52] 佐久間哲哉：壁面の拡散性の解析および評価法，日本音響学会誌, Vol.61, pp. 39-44, 2005.
- [53] Jean-Jacques Embrechts: Calculation of the random-incidence scattering coefficients of a sine-shaped surface, *Acta Acustica united with Acustica*, Volume, 92, 593–603, 2006.
- [54] T. J. Cox, B.-I. L. Dalenbäck, P. D' Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz: A tutorial on cattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces, *Acta Acustica united with Acustica*, 92, 1–15, 2006.
- [55] T. J. Cox, Mark R. Avis, Lejun Xiao. Maximum length sequence and Bessel diffusers using active technologies. *J. Sound Vibration*, 289 807–829, 2006.
- [56] Xiangyang Zeng, Claus Lynge Christensen, Jens Holger Rindel: Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. *Applied Acoustics* 67



771–786, 2006.

- [57] 佐久間哲哉: 壁面の乱反射率測定法に関する理論的考察, 音講論(秋), pp. 1067-1068, 2007.
- [58] 佐久間哲哉: 1.3 壁面形状の拡散性解析, 音響技術No.137, 14-19, 2007.
- [59] Young-Ji Choi, Dae-Up Jeong: Some Issues in Measurement of the Random-Incidence Scattering Coefficients in a Reverberation Room, *Acta Acustica united with Acustica*, Volume 94, 769–73, 2008.
- [60] T Sakuma, Y Kosaka: Relationship between the scattering coefficients determined with coherent averaging and with directivity correlation, *Acta Acustica united with Acustica*, 95, 669-677, 2009.
- [61] <http://www.musikverein.at/startseite.asp/>
- [62] <http://en.wikipedia.org/wiki/Concertgebouw/>
- [63] [http://en.wikipedia.org/wiki/Boston\\_Symphony\\_Hall/](http://en.wikipedia.org/wiki/Boston_Symphony_Hall/)
- [64] RPG Diffuser Systems, Inc.: <http://www.rpginc.com/>
- [65] インパルス測定システム, AEIRM : <http://www.noe.co.jp/product/pdt2/ot/ot02.html/>
- [66] 室内音響指標分析システム, AERAP: <http://www.noe.co.jp/product/pdt3/ot/ot03.html/>
- [67] ターンテーブル, TT-1000 : <http://www.noe.co.jp/product/pdt1/m/m01.html/>
- [68] 木よう大工: <http://www.mokuyoudaiku.com/>



# 謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 佐久間研究室 修士課程在学中に行った研究をまとめたものです。指導教官である佐久間哲哉准教授には、研究生として来日してから2年半の間、研究の進め方から修士論文の作成に至るまで、大変熱心に時には優しく時には厳しくご指導していただきました。特に研究の基礎となる物事の考え方に対する姿勢は大変勉強になりました。ここに心より感謝申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻准教授 黄光偉准教授には本研究の副指導教官をご担当いただきまして、幅広い視野のもと適切で貴重なご助言を下さいました。深く感謝申し上げます。

共同研究者として多大な協力を頂いた佐久間研究室 博士課程の土屋裕造氏には、測定から分析まで研究のすべてにわたって度重なるご指導の上適切なアドバイスを賜りました。ここに心より感謝申し上げます。

佐久間研究室 特任研究員の安田洋介氏には細かい内容まで何度も相談に乗っていただきました。心より感謝申し上げます。

日東紡音響エンジニアリングの松尾浩義氏には測定機材であるターンテーブルに関する問い合わせに何度も親身に対応してくださり、またご提供まで頂きました。深く感謝申し上げます。

初めての日本生活でも暖かい人々に出会い、楽しい日々を過ごすことができました。佐久間研究室の先輩である太刀岡勇氣さん、江川健一さんには、生活の様々な面から研究に至るまで大変お世話になりました。また、いつも元気で明るい上猶優美さん、萬木智子さん、三浦啓祐さんとは忘れられない面白い思い出を数多く作ることができました。誠に有り難うございました。

佐久間研究室の後輩である江田和司君、孫媛媛さん、永井優花さん、安達光平君、杉原慎一郎君、三上雄一郎君、村田義明君にもお世話になりました。特に永井優花さん、三上雄一郎君にはデータの整理をお手伝い頂きました。どうも有り難うございました。

韓国人との貴重な出会いもありました。来日してから今まで大きな助けとなってくださった安昭炫さん、人生においての先輩として様々な形で筆者を支えてくださった崔宰赫さん、金容徹さん、李孝珍さんに心から感謝します。

最後になりますが、いつも筆者を暖かく見守ってくれる家族や坂西朋子さんに感謝したいと思います。

2009年7月31日



# 発表論文一覧

- 修士論文梗概

- 本研究に関係する発表論文

- [1] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉: 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定, ー縮尺および測定システムに関する基礎的検討ー, 日本音響学会研究発表会講演論文集(春), pp.1137-1138, 2008. 3.
- [2] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉: 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定 その1 ー周期形状の効果ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp.369-370, 2008.9.
- [3] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉: 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その1ー基準円盤への枠の設置に関してー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp.309-310, 2009. 8.
- [4] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉: 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その2 ー測定条件および試料寸法に関してー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp. 311-312, 2009. 8.
- [5] 李孝振, 土屋裕造, 佐久間哲哉: 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 その3ー試料回転速度の影響ー, 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋), pp. -, 2009. 9.

- 本研究以外の発表論文

- [1] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉: 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定 その2 ー吸音材を含む壁面の場合ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 1), pp.371-372, 2008. 9.
- [2] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉: 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 その2 ー各種周期構造の拡散性ー, 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋), pp.1179-1180, 2008. 9.
- [3] 土屋裕造, 李孝振, 江田和司, 佐久間哲哉: 壁面の音響拡散が室内に与える音響効果 ー縮尺模型実験による検討ー, 日本音響学会研究発表会講演論文集(春), pp.1093-1094, 2009. 3.



# 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。

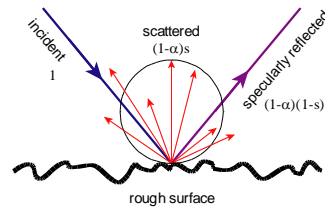


Fig. 1 Scattering on rough surface.

### 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、 $E_{\text{total}}$  は全反射エネルギー、 $E_{\text{spec}}$  は鏡面反射エネルギー、 $\alpha$  は試料表面の吸音率、 $\alpha_{\text{spec}}$  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 $\alpha$ よりも大きい見かけの吸音率 $\alpha_{\text{spec}}$ 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。

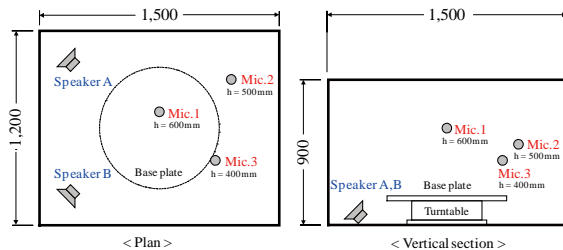


Fig. 2 The specifications of the reverberation room (unit: mm).

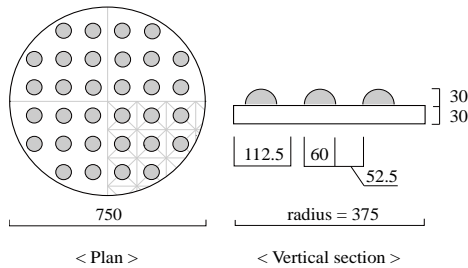


Fig. 3 Test sample (hemisphere, scale 1/4, unit: mm).

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)

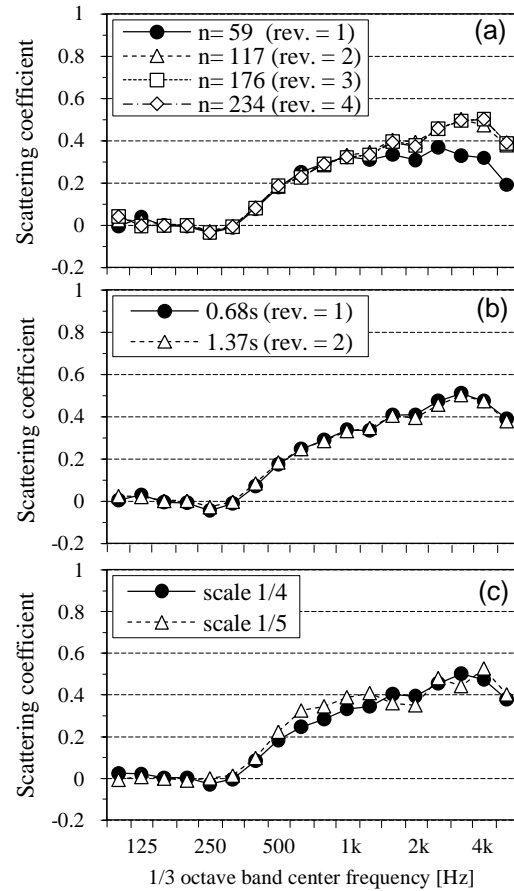


Fig. 4 Scattering coefficients measured in different setups (n = averages number, rev= revolution)

#### 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  $103.6\text{m}^3$ 、 $202.5\text{m}^3$ 、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

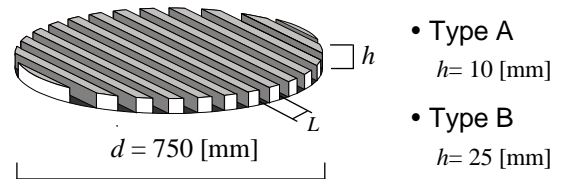


Fig. 5 1D rectangular shape, 15 periods ( $L= 50\text{ [mm]}$ ).

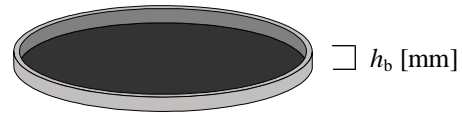


Fig. 6 Base plate with rigid border ( $h_b$ : height of border).

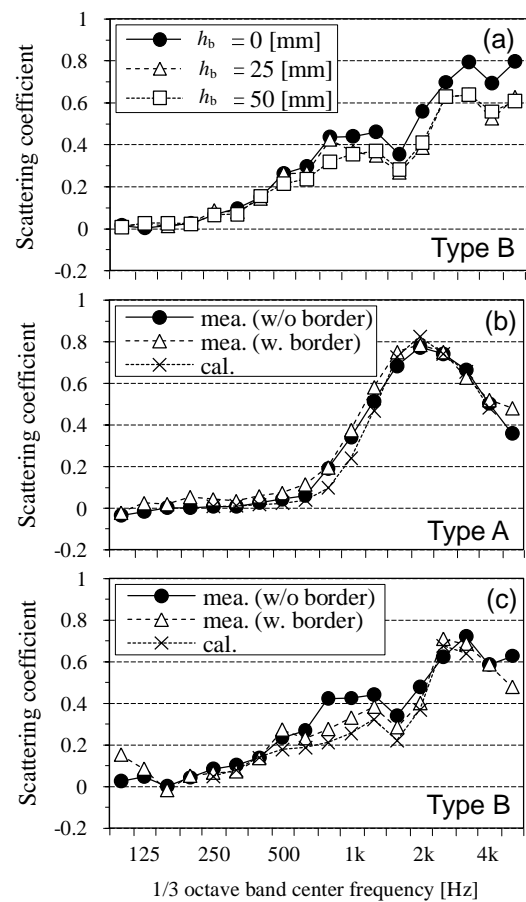


Fig. 7 Scattering coefficients measured in different setups.

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]				
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

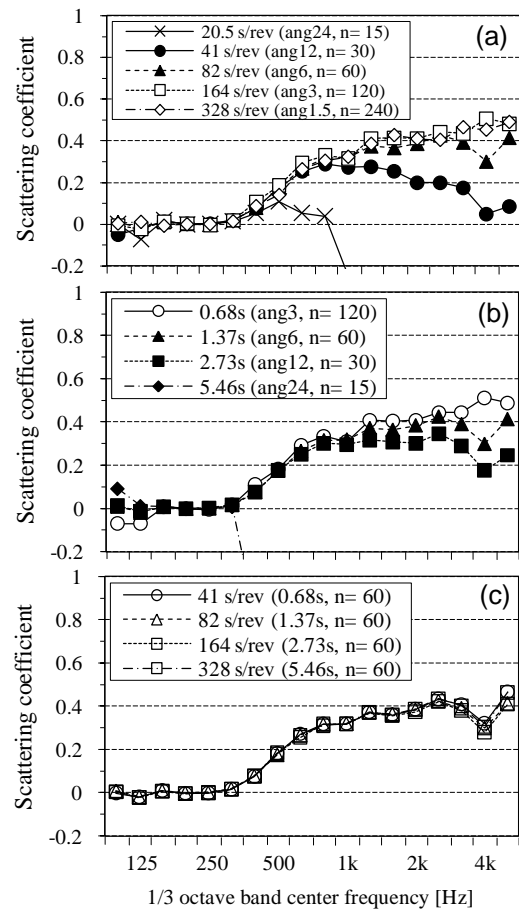


Fig. 8 Scattering coefficients measured in different setups. (n= averages number, rev= revolution)

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.

# 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 —縮尺および測定システムに関する基礎的検討—\*

○土屋裕造（東大・新領域／戸田建設技研）、李孝振、佐久間哲哉（東大・新領域）

## 1 はじめに

壁面の音響拡散は、室全体の形状、部材の配置や吸音特性と共に、室内音響特性に大きな影響を及ぼすが、拡散性能指標の一つとして乱反射率(scattering coefficient)が ISO 17497-1<sup>[1]</sup>で定義され、今後音響設計のためのデータ整備が望まれる。既往研究で乱反射率の数値解析が可能となった<sup>[2][3]</sup>が、実測例は少ない。そこで本報では、ISO で規格化されたランダム入射乱反射率の残響室法に基づいて、縮尺および測定システムに関する乱反射率の差異などの基礎的な実験を行ったので、その概要を報告する。

## 2 ランダム入射乱反射率の測定原理

乱反射率 は全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外の反射エネルギーの割合であり、次式で表される。

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

$\alpha$  : 試料の吸音率

$\alpha_{spec}$  : 試料の鏡面反射成分のみを反射エネルギーとみなした場合の吸音率

上記 2 種類のランダム入射吸音率は残響室法吸音率測定原理に従って次式により求められる。

$$\alpha = 55.3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (2)$$

$$\alpha_{spec} = 55.3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (3)$$

$V$  : 室容積、 $S$  : 室表面積、 $c$  : 音速、 $m$  : 空気吸収係数

ただし、鏡面反射成分は円形の拡散体試料を回転させながらインパルス応答を同期加算して抽出するため、表 1 に示す 4 条件における残響時間測定が必要となる。

Table 1 残響時間測定のための 4 条件

残響時間	試料	ターンテーブル
$T_1$	なし	静止
$T_2$	あり	静止
$T_3$	なし	回転
$T_4$	あり	回転

## 3 縮尺模型による測定の概要

測定は図 1 の縮尺模型残響室、図 2 の測定システムを用い、ISO 17497-1<sup>[1]</sup>に準拠して行った。模型残響室は 10mm 厚の亚克力板からなる直方体室（内寸 1,200 × 1,500 × 900mmH）であり、室内の拡散性を高めるため、曲面状のプラスチック製拡散板 10 枚を吊り下げて設置した。

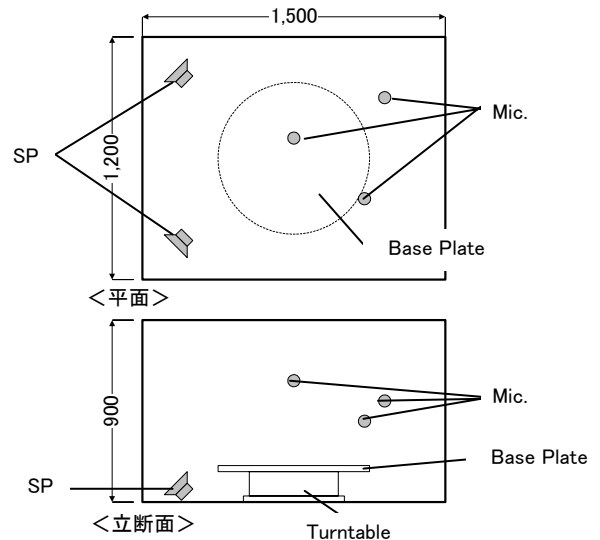


Fig. 1 模型残響室

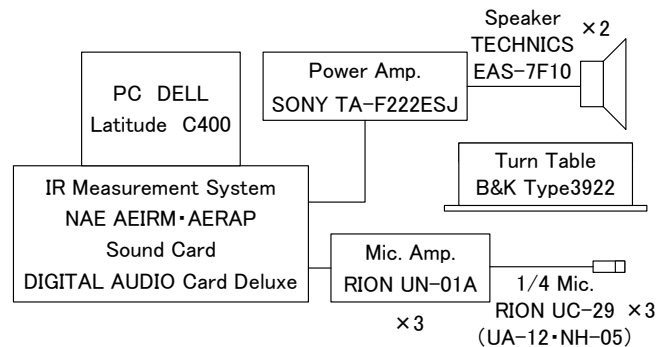


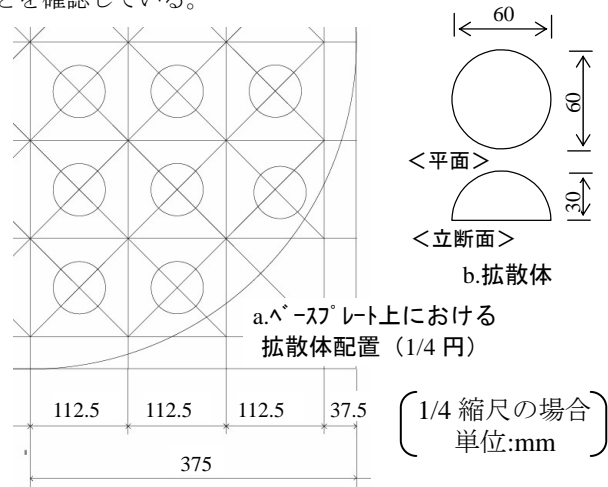
Fig. 2 測定ブロックダイアグラム

実寸直径 3m の 1/4 および 1/5 縮尺で作成した木製円盤をターンテーブルに取り付けて基準平板とし、その上に半球 32 個を配置して拡散体試料を作成した。半球の寸法と配列は各縮尺で相似則を保っている（図 3）。

測定経路はスピーカ 2 箇所、マイクロホン 3 箇所の計 6 通りとし、M 系列法によるインパルス応答測定を通して残響時間を同定した。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調べるため、表 2 に示す 5

\* Scale model measurement of the random-incidence scattering coefficients in a reverberation room - Fundamental study on the reduced scale and the measuring system -, by TSUCHIYA, Yuzo ( Univ. of Tokyo / Toda Corp.), LEE, Hyojin and SAKUMA, Tetsuya ( Univ. of Tokyo).

条件を設定した。ここでターンテーブルは1回転 80 秒に固定されている。縮尺模型では超高音域における空気吸収の影響が大きい、今回の実験では外乱要因とならないことを確認している。



縮尺	1 / 4	1 / 5
材料	カバ集成材ウレタンクリア塗装	
ベースプレート	750 φ x 厚 30mm	600 φ x 厚 30mm
拡散体	60 φ 半球 x32 個	48 φ 半球 x32 個

Fig. 3 測定した拡散体とその配置

Table 2 同期加算回数・測定間隔・回転数の関係

条件	同期加算回数	測定間隔 (回転角度)	回転数
1	117	0.683 s (3.072 deg)	0.998(約 1 回)
2	59	1.365 s (6.144 deg)	1.007(約 1 回)
3	117	1.365 s (6.144 deg)	1.997(約 2 回)
4	176	1.365 s (6.144 deg)	3.004(約 3 回)
5	234	1.365 s (6.144 deg)	3.994(約 4 回)

## 4 測定結果および考察

### 4.1 同期加算回数の影響

1/4 縮尺・測定間隔 1.365 秒において同期加算回数を変化させた場合(条件 2 ~ 5)の乱反射率測定結果を図 4 に示す(以降、周波数は実物換算)。同期加算回数が 117, 176, 234 回ではほぼ一致する値を示したが、59 回では中音域までは一致するものの高音域の値が小さくなっている。ここでの測定間隔は回転角 6.144deg に相当し、ISO の規定範囲 3 ~ 6deg を若干上回っているため、加算回数の少ない 59 回では影響が現れたものと考えられる。

### 4.2 測定間隔の影響

1/4 縮尺・同期加算回数 117 回において測定間隔を変化させた場合(条件 1, 3)の乱反射率測定結果を図 5 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 ISO の規定範囲であれば結果に影響しないことが確認された。特に測定間隔が 0.683 秒の場合は低音域で残響時間

を下回るが、その影響もみられない。

### 4.3 縮尺の影響

条件 3 における 1/4 縮尺と 1/5 縮尺の乱反射率測定結果を図 6 に示す。中音域で若干の乖離が生じているものの、全体的に両者は対応をみせている。中音域の乖離については、残響室内の音場の拡散性、壁面吸音率や空気吸収の周波数特性などが原因として考えられる。

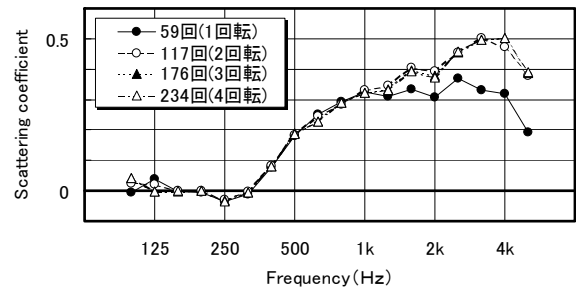


Fig.4 同期加算回数の比較 (1/4 縮尺・測定間隔 1.365 秒)

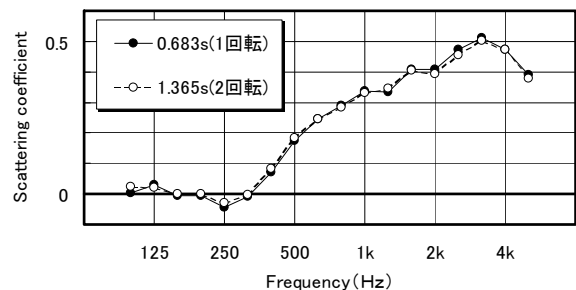


Fig.5 測定間隔の比較 (1/4 縮尺・同期加算回数 117 回)

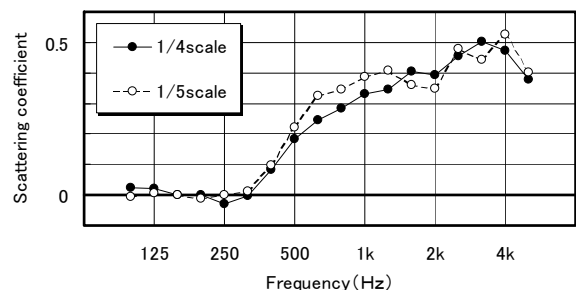


Fig.6 縮尺の違いによる比較 (条件 3)

## 5 おわりに

今回、縮尺および測定システムに関する乱反射率の基礎的な実験を行い、測定条件の違いによる測定結果の差異を把握した。今後は、様々な形状による乱反射率の数値計算を行い、実測との比較を行う予定である。

### 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, 2007.9.
- [3] 小坂, 佐久間: 周期構造壁面における拡散係数と指向拡散度との比較, 音講論(春), pp855-856, 2005.

正会員 李 孝振\*  
同 土屋 裕造\*\*  
同 佐久間 哲哉\*\*\*

音響拡散 乱反射率 残響室法  
縮尺模型 周期構造 数値解析

## 1. はじめに

室内音響特性に大きな影響を及ぼす壁面の音響拡散に関して、拡散性指標の一つとして乱反射率(Scattering coefficient)がISO17497-1[1]で定義されている。筆者らはISOで規格化されたランダム入射乱反射率の残響室法に基づき、縮尺および測定システムに関する乱反射率の基礎的な実験を行った[2]。本報では引き続き、1次元周期構造の乱反射率を測定し、その特性を数値解析[3]と比較して検証した。

## 2. 縮尺模型による測定の概要

測定方法は別報[2]に示す通りである。実験は、1/4 縮尺、同期加算回数 117 回、測定間隔 1.365 秒で行った。測定試料の形状パターンをTable 1、概略図をFig. 1 に示す。断面形状が三角波・矩形波の凹凸の高低差を変化させた15周期の1次元周期構造4種類を、MDF(木粉成形材)表面ウレタンクリア塗装仕上げで円盤状(直径 750mm)に作成した。ここで、Type T の  $h/d = 30\%$  およびType R の  $h/d = 20, 50\%$  は数値解析が行われている[3]。

## 3. 実験結果

Type T における  $h/d = 30, 50\%$  の吸音率および乱反射率の実験結果を比較して Fig. 2 に示す(周波数は実物換算。以下、同)。吸音率は全周波数帯域に渡ってほぼ一致しているが、乱反射率は差がみられ、400 Hz より低い周波数ではほぼ0の値を示すものの、500 ~ 2k Hz の範囲では、 $h/d = 50\%$  が30%と比べて0.1 ~ 0.2 大きい結果となった。

Type R における  $h/d = 20, 50\%$  の吸音率および乱反射率の実験結果を比較して Fig. 3 に示す。 $h/d = 20\%$  の乱反射率は2.5k Hz でピークを持つ。一方、 $h/d = 50\%$  は、凹部の形状における空気振動あるいは多重回折的作用による吸音現象が顕著になり、全周波数帯域で0.1 ~ 0.3 と比較的大きく、中音域と高音域で2つのピークを持つが、乱反射率も1.6k Hz で一度落ち込み、それより高い周波数で再び値が大きくなる傾向を示している。 $h/d = 50\%$  は20%と比べて、250 ~ 800 Hz で0.1 ~ 0.4 と比較的大きな値を示しているが、1.25k ~ 2.5k Hz では逆転して0.1 ~ 0.4 小さくなっている。

Table 1. Measurement patterns of the periodical shapes

Type	Shape	$h/d$	$h$ (mm)
Type T	Triangular wave	30%	15
		50%	25
Type R	Rectangular wave	20%	10
		50%	25

$h$  : Unevenness pitch difference  $d$  : Period (= 50mm)

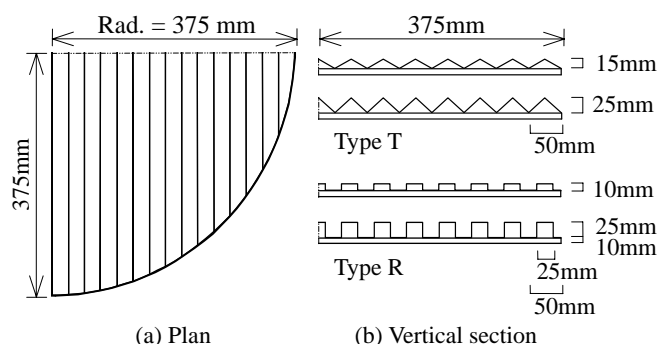


Fig. 1 The diagrammatical view of the measurement patterns

## 4. 数値解析との比較

Fig. 4, 5 に Type T・Type R それぞれの形状における実測および数値解析の乱反射率を比較して示す。Type T の  $h/d = 30\%$ 、Type R の  $h/d = 20\%$  は、2.5k ~ 4k Hz で若干の乖離がみられるものの、よい対応を示している。Type R の  $h/d = 50\%$  は、周波数特性の形状は近似しているが、実測の方が値は大きい。これは試料の形状に関わる吸音現象に、材料の吸音の影響しているためと考えられる。

## 5. まとめ

1次元周期構造形状を実測した乱反射率は、高低差の大きい矩形波形状で、数値解析と特性は近似しているものの値に乖離を生じた。以上の結果を踏まえ、乱反射率と形状に関する吸音現象との関係を検証していきたい。

## 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] 土屋,李,佐久間: 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 - 縮尺および測定システムに関する基礎的検討 - ,音講論(春), pp.1137-1138, 2008.3

[3] 佐久間: 1.3 壁面形状の拡散性解析 , 音響技術 No.137, pp.14-19, 2007.9

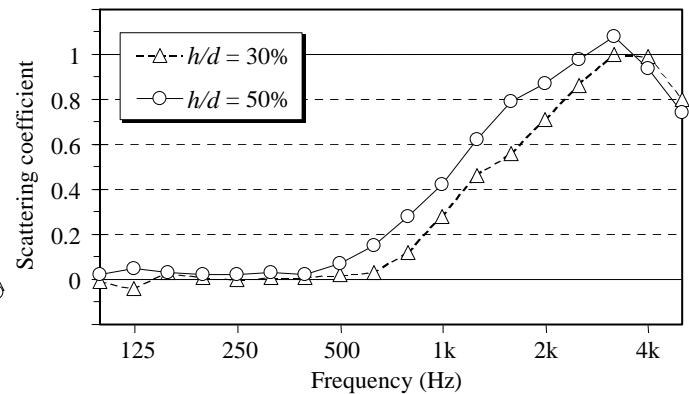
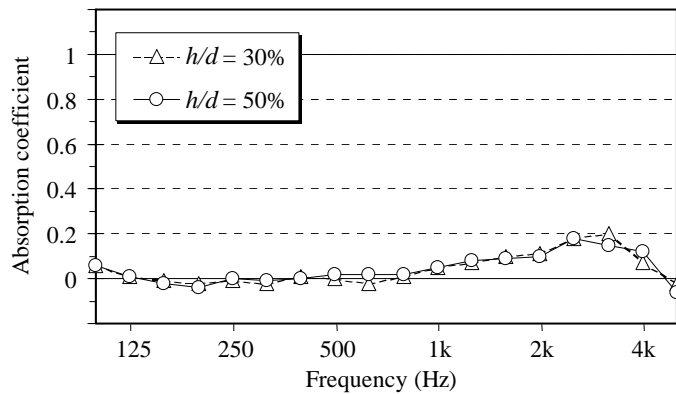


Fig. 2 Absorption coefficients and Scattering coefficients measured for Type T with  $h/d = 30, 50\%$

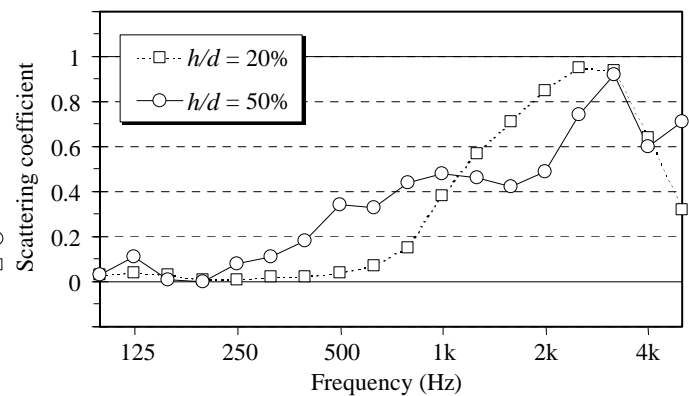
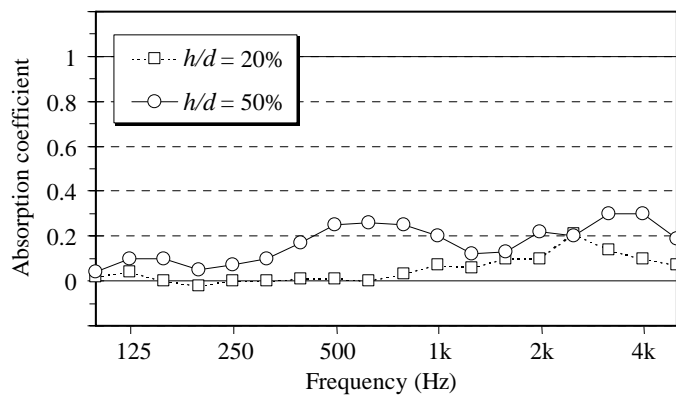


Fig. 3 Absorption coefficients and Scattering coefficients measured for Type R with  $h/d = 20, 50\%$

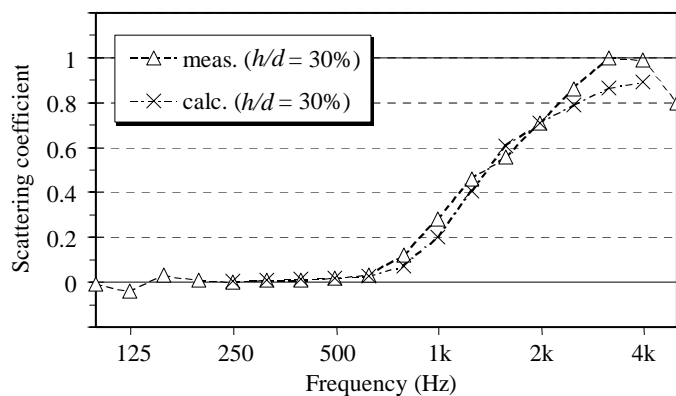


Fig. 4 Comparison of the result with random-incidence scattering coefficient calculated for Type T with  $h/d = 30\%$

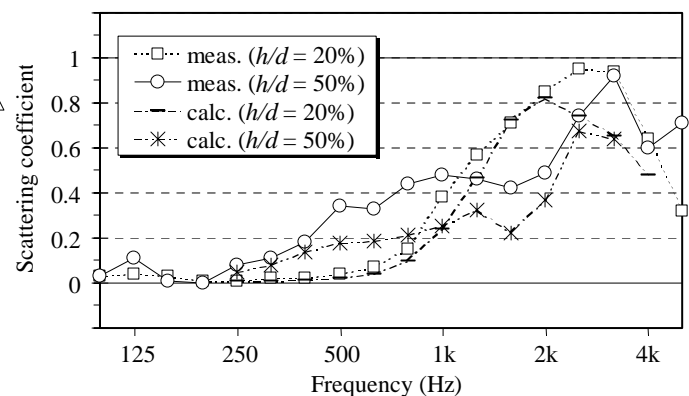


Fig. 5 Comparison of the result with random-incidence scattering coefficients calculated for Type R with  $h/d = 20, 50\%$

\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 修士課程  
 \*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 博士課程 / 戸田建設株式会社  
 \*\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授 博(工)

\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo  
 \*\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo / Technical Research Institute, Toda Corp.  
 \*\*\* Assoc. Prof., Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

# 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その1 ー基準円盤への枠の設置に関してー

正会員 ○土屋 裕造\*  
同 李 孝振\*\*  
同 佐久間 哲哉\*\*\*

音響拡散 乱反射率 残響室法  
縮尺模型 基準円盤

## 1. はじめに

筆者等は壁面の音響拡散について研究を行っている。既報[1]～[3]では、ISO17497-1[4]の測定原理に従って、ランダム入射乱反射率の測定方法を検討し、数値解析との対応、各種1次元周期構造の乱反射率について報告した。本報では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、既報[2]で乖離がみられた数値解析との対応、吸音材を含む1次元周期構造について知見を得たので報告する。

## 2. 縮尺模型による測定の概要

測定方法は既報[1]に示すとおりで、本実験は1/4縮尺で行った。使用試料である矩形1次元周期構造の種類をFig. 1に示す。拡散体を構成する材料はタモ集成材ウレタンクリア塗装、吸音材はスポンジ10mmである。基準円盤の断面をFig. 2に示す。既報[1]～[3]で使用した基準円盤は枠のないもので、今回新たに作成した枠あり基準円盤は、既報の基準円盤直径 $d = 750 \phi$ の周囲に厚25mm、円盤の内表面から高さ50mmの枠を取り付けた形状である。高さはISO[4]の試料高さ $d/16 = 47.5 \text{ mm}$ 以内という規定値の最大に近似した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 数値解析との対応

矩形1次元周期構造Type A, Bの基準円盤枠なし・ありによる実測と数値解析の乱反射率をFig. 3, 4に示す。1/4縮尺で $h = 10 \text{ mm}$ のType Aでは、枠なし・あり、数値解析共により対応を示し(Fig. 3)、 $h = 25 \text{ mm}$ のType Bでは、枠なしの測定値が数値解析と比べて500 Hz(実物換算)以上で乖離がみられ値が大きくなったが、枠ありの測定値は数値解析に近似する値を示した(Fig. 4)。1次元周期

構造拡散体の基準円盤枠なしが枠ありより値が大きくなる理由は、拡散体の表面以外に側方による音の散乱も散乱成分として乱反射率の測定値に含まれるためと考えられる。Type Aの枠なし・ありにおける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10mm程度では側方の散乱の影響が小さいためと考えられる。

### 3.2 吸音材を含む場合

吸音材を配置したType C, Dの吸音率・乱反射率をFig. 5, 6に示す。JIS A 1409[5]の残響室法吸音率測定では試料に枠を付けることが規定されているが、ISO[4]の測定では枠付が規定されておらず、吸音率は、基準円盤が枠なしの場合試料側方の吸音も測定値に反映され、枠なし・ありの比較では枠なしの方が大きな値となる。Type C, Dの吸音率は枠ありで0.6程度以下となった。Type Dの乱反射率は500 Hz(実物換算)で1を大きく超える値となったが、この理由として、測定で算出される鏡面反射以外の見かけ上の吸音率には試料の吸音率も含まれるものの、試料の吸音率と鏡面反射以外の見かけ上の吸音率が共に大きすぎて乱反射率を正確に抽出できていないためと推察される。Type C, Dの枠あり基準円盤による乱反射率測定値は吸音材のないType A, Bと比較して妥当であり、本測定システムでは吸音率が0.6程度以下で乱反射率が算出できていると考えられる。なお、ISO[4]の規定による試料の吸音率許容値は0.5以下である。

## 4. おわりに

今回の測定結果から、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、側方の影響により過大に測定されていた吸音率・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。なお、拡散体の高低差が小さい、またはキューブ・半球配置など円盤内で完結するような構成の拡散体で、ISO[4]の規定内であれば、枠なしの基準円盤による測定でも適用できるものと考えられる。

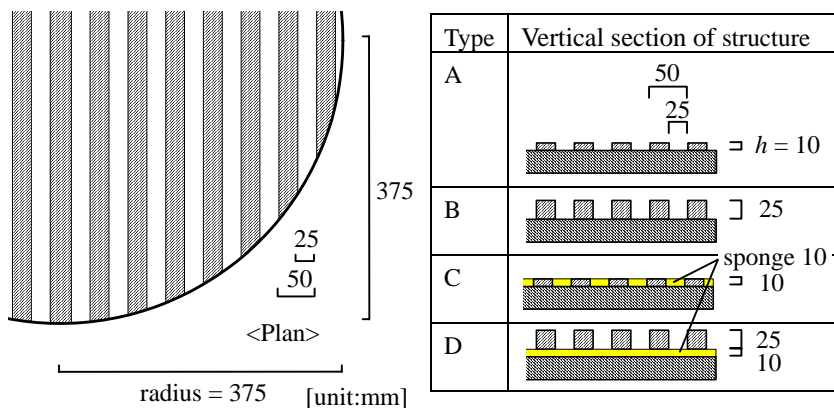


Fig. 1 Diagrammatical view of the measurement types (1/4 scale)

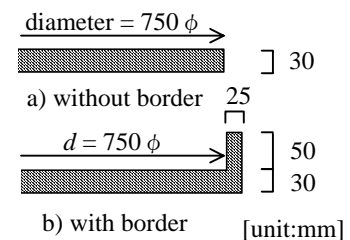


Fig. 2 Vertical section of base plate (1/4 scale)



## 謝辞

本研究は科研費（No.21360275）の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 土屋,李,佐久間, 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定—縮尺および測定システムに関する基礎的検討—,音講論(春), pp.1137-1138, 2008.3
- [2] 土屋,李,佐久間, 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定その1・その2, AIJ 大会学術講演梗概集 D-1,

pp.369-372, 2008. 9

- [3] 土屋,李,佐久間, 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定その2—各種周期構造の拡散性—,音講論(秋), pp.1179-1180, 2008.9
- [4] ISO 17497-1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.
- [5] JIS A 1409:1998(ISO354), 残響室法吸音率の測定方法

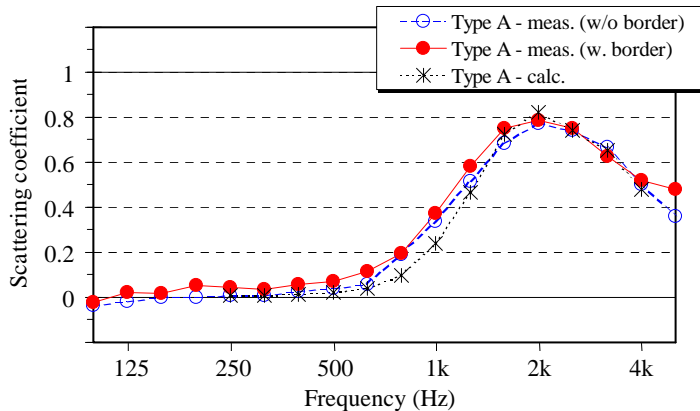


Fig. 3 Scattering coefficients measured and calculated Type A (real scale)

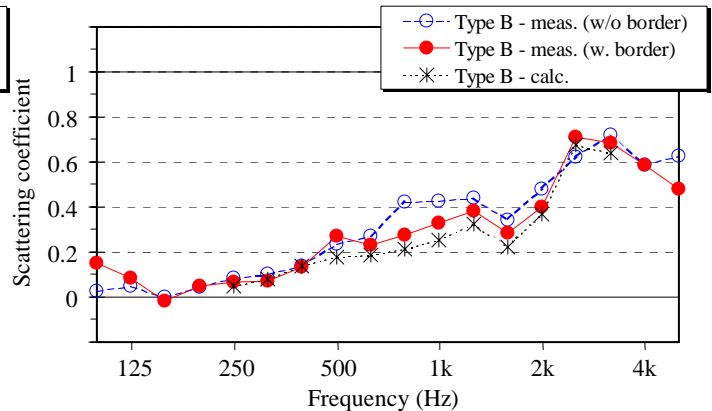


Fig. 4 Scattering coefficients measured and calculated Type B (real scale)

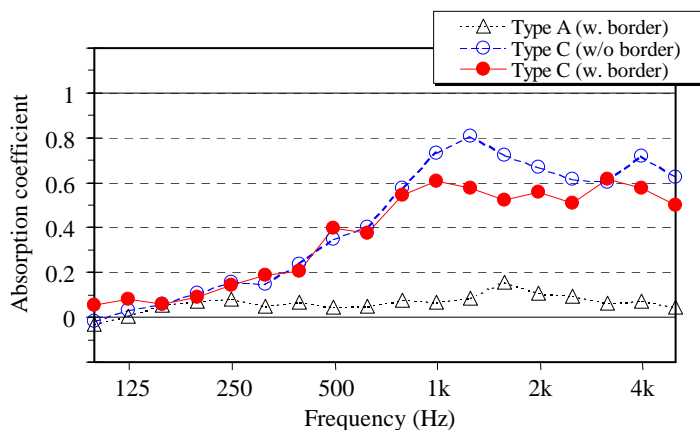


Fig. 5 Absorption and scattering coefficients measured Type A and C (real scale)

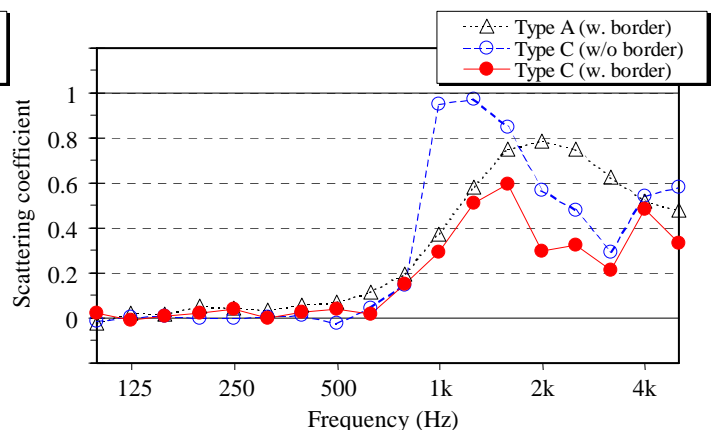


Fig. 6 Absorption and scattering coefficients measured Type B and D (real scale)

\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 博士課程／戸田建設㈱技術研究所

\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 修士課程

\*\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授 博(工)

\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo / Technical Research Institute, Toda Corp.

\*\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo

\*\*\* Assoc. Prof., Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.



## 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その2 －測定条件および試料寸法に関して－

正会員      ○李 孝振\*  
同            土屋 祐造\*\*  
同            佐久間 哲哉\*\*\*

音響拡散                  乱反射率                  残響室法  
縮尺模型                  インパルス応答          拡散体

### 1. はじめに

筆者等は壁面の音響拡散について研究を行っている。本報では前報[1]に引き続き、ISO17497-1 に規格化されたランダム入射乱反射率の測定方法について、測定条件および試料寸法に関する検討を行う。

### 2. 縮尺模型測定の概要

測定方法は別報[2]の通りであり、本実験では 1/4 および 1/5 縮尺を想定し、表 3 の基準円盤上に木製半球を格子状に均等配置した拡散体試料[2]を設置した。インパルス応答測定にはM系列信号を用い、特記のない限り残響時間は T20 を求めた。ターンテーブルは 1 回転 80 秒に固定されている。

### 3. 測定結果および考察

#### 3.1. 同期加算回数の影響

1/4 縮尺・信号長 0.68 秒として、表 1 の通り同期加算回数を 1 回転付近で変化させた場合の乱反射率測定結果を図 1 (a) に示す（以降、周波数は実物換算）。1 回転に対して約  $\pm 6$  度の範囲では全周波数帯域にわたり乱反射率の測定値に影響は現れないことが確認された。

#### 3.2. 信号長の影響

1/4 縮尺において表 2 の通り信号長・回転数を変化させた場合の乱反射率測定結果を図 1 (b)に示す。1 回転の場合、信号長が長くなると測定値が高音域で低下しているが、回転数（同期加算回数）が増加するとその低下が解消されている。信号長が長くなると SN 比が低下し、残響時間を過大評価したことが原因と考えられる。なお、図 1 (b-1)と同条件で残響時間 T10 より求めた乱反射率を図 1 (c)に、また信号長 2.73 秒の場合に残響時間 T10, T15 により求めた乱反射率を図 1 (d)に示す。

#### 3.3. 試料寸法の影響

信号長 1.37 秒・同期加算回数 117 回（2 回転）として、表 3 の通り 1/4・1/5 縮尺において基準円盤および拡散体試料の寸法を変化させた場合の乱反射率測定結果を図 2 に示す。1/5 縮尺において実物換算寸法を 3.75m とした場合は測定値に殆ど変化は見られないが、1/4 縮尺において 2.4m とした場合は若干値が大きくなる傾向にあり、面積効果が生じたものと考えられる。

Table 1 Measurement conditions for different revolutions

	Revolution num.	Signal length (angle)	Averages num.
(a)	approx. 1 (0.981)	0.68 s (3.07 deg)	115
	approx. 1 (0.990)		116
	approx. 1 (0.998)		117
	approx. 1 (1.007)		118
	approx. 1 (1.015)		119
	approx. 1 (1.024)		120

Table 2 Measurement conditions for different signal lengths

	Revolution num.	Signal length (angle)	Averages num.
(b-1)	approx. 1 (0.998)	0.68 s (3.07 deg)	117
	approx. 1 (1.007)	1.37 s (6.14 deg)	59
	approx. 1 (0.990)	2.73 s (12.29 deg)	29
(b-2)	approx. 2 (1.996)	0.68 s (3.07 deg)	234
	approx. 2 (1.996)	1.37 s (6.14 deg)	117
	approx. 2 (2.014)	2.73 s (12.29 deg)	59
(b-3)	approx. 3 (2.995)	0.68 s (3.07 deg)	351
	approx. 3 (3.003)	1.37 s (6.14 deg)	176
	approx. 3 (3.003)	2.73 s (12.29 deg)	88

Table 3 Conditions for different diameters of base plates

Scale	Diameter of base plate (): real scale	Diameter of hemisphere (): piece
1/5	600 mm ( 3 m )	48 mm ( 32 pieces )
	750 mm ( 3.75 m )	48 mm ( 52 pieces )
1/4	600 mm ( 2.4 m )	60 mm ( 24 pieces )
	750 mm ( 3 m )	60 mm ( 32 pieces )

### 4. まとめ

乱反射率の残響室測定法において測定条件および試料寸法に関して以下の知見を得た。

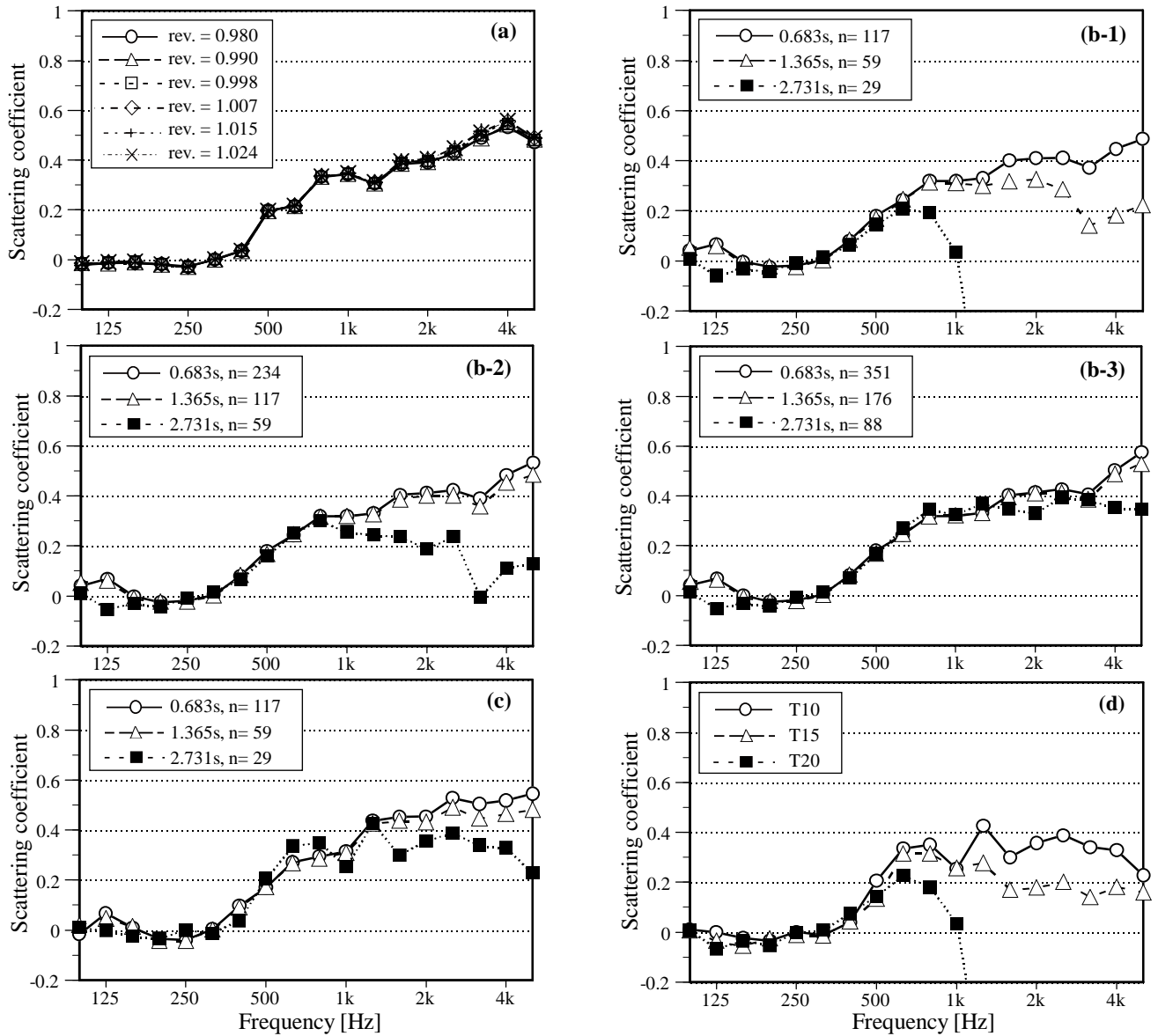
- ・ 1 回転に対して約  $\pm 6$  度の範囲で影響は殆どない。
- ・ M系列信号長が長い場合、SN 比が低下して残響時間を過大評価し、乱反射率を過小評価する可能性がある。
- ・ 試料寸法が 3m 以下の場合、面積効果により乱反射率を過大評価する可能性がある。

#### 謝辞

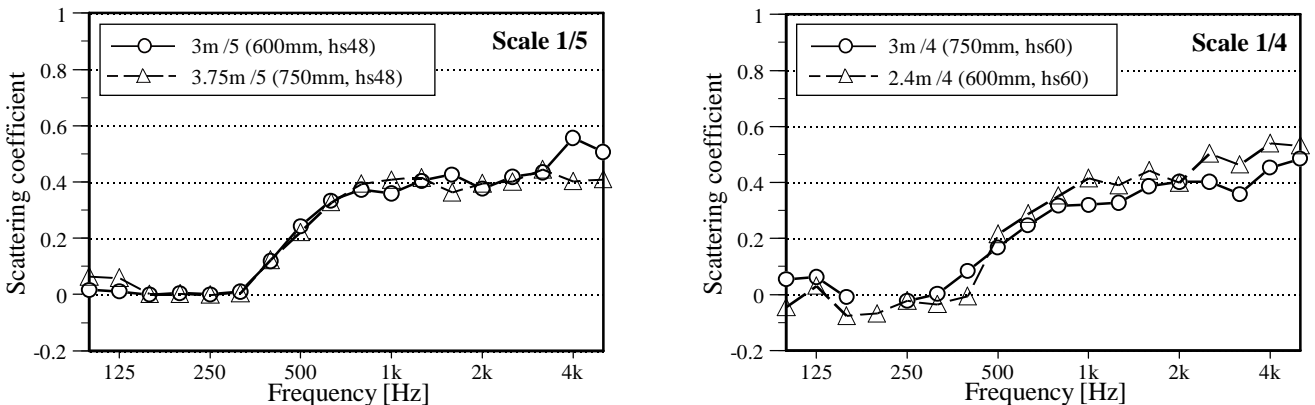
本研究は科研費（No.21360275）の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] 土屋他, AIJ 大会梗概集 D-1, 2009.8  
[2] 土屋他, ASJ 春季研究発表会, pp.1137-1138, 2008, 3



**Fig.1** Scattering coefficients measured in a variety of setups: (a) revolution approx. 1, signal length 0.683s, (b-1, 2, 3) different signal lengths and numbers of averaging, (c) T10, and (d) different reverberation times, signal length=2.731s, n= 29.



**Fig.2** Scattering coefficients of different diameters of circular plates (signal length= 1.365 s, number of averaging= 117)

\*東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 修士課程

\*\*東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 博士課程

／戸田建設㈱技術研究所

\*\*\*東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授  
博(工)

\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo

\*\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo /  
Technical Research Institute, Toda Corp.

\*\*\* Assoc. Prof., Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci.,  
Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

# 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 その3－試料回転速度の影響－\*

○李孝振（東大・新領域）、

土屋裕造（東大・新領域／戸田建設技術）、佐久間哲哉（東大・新領域）

## 1 はじめに

壁面の拡散性に関わる一物理指標として乱反射率（Scattering coefficient）が ISO17497-1 [1]にて規定されている。その測定法としては、残響室において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試料回転法が提案されているが、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。本報では、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。

## 2 縮尺模型測定の概要

測定方法は既報[2]に示すとおりで、本実験は縮尺 1/4 で行った。測定試料は Fig. 1 に示すように、基準円盤上に木製半球 32 個を格子状に均等配置して作成した。インパルス応答測定では、M 系列信号長を 3 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 1）。なお、残響時間の同定には T15 を用いた。

## 3 測定結果および考察

### 3.1 検討 A（信号長固定）

信号長 0.68, 1.37, 2.73 秒において、回転速

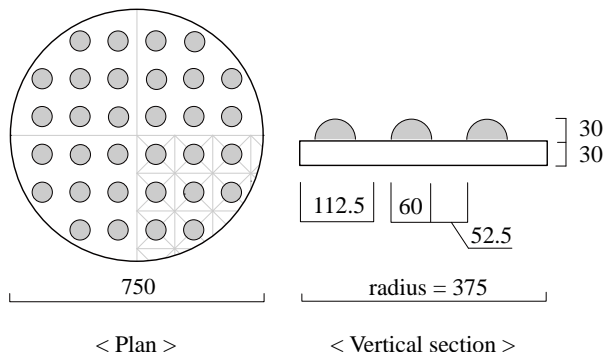


Fig. 1 Test sample. (scale 1/4, unit: mm)

度を変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 2 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から低下する傾向が見られる。信号長 0.68 秒の場合、回転速度 41 秒/回転で若干の低下が見られるのに対して、信号長 1.37 秒では 82 秒/回転以下で、信号長 2.73 秒では 164 秒/回転以下で低下が生じている。従って、信号長が長い程、回転速度を遅く設定する必要がある。

### 3.2 検討 B（回転速度固定）

回転速度 41, 82, 164 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. 3 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から低下している。回転速度 41 秒/回転の場合、信号長 0.68 秒では既にやや低下が生じており、82 秒/回転では信号長 1.37 秒以上で、164 秒/回転では信号長 2.73 秒以上で低下が見られる。

### 3.3 検討 C（測定間隔固定）

測定間隔（回転角度）12, 6, 3 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. 4 に示す。測定間隔 12 度の場合を除くと、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 4k Hz のみ若干の低下が生じている。

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

Signal length [s]	Revolution speed [s/rev]					
	-	-	41	82	164	328
0.68	-	-	41	82	164	328
1.37	20.5	41	82	164	328	-
2.73	-	82	164	328	-	-
Angular step [deg]	24	12	6	3	1.5	0.75
Averaging number	15	30	60	120	240	480

\* Scale model measurement of the random-incidence scattering coefficients in a reverberation room Part 2 - Effect of revolution speed -, by LEE, Hyojin (Univ. of Tokyo), TSUCHIYA, Yuzo (Univ. of Tokyo / Toda Corp.) and SAKUMA, Tetsuya (Univ. of Tokyo).

#### 4 おわりに

乱反射率の残響室測定法において、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。

**謝辞** 本研究は科研費 (No.21360275) の助成を受けたものである。また、測定機材 (ターンテーブル TT-1000) をご提供頂いた日東紡音響エンジニアリングの方に感謝の意を表する。

#### 参考文献

- [1] ISO 17497-1:2004: Acoustic -sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.
- [2] 土屋, 李, 佐久間, 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定—縮尺および測定システムに関する基礎的な検討—, 音講論(春), pp.1137-1138, 2008.3.

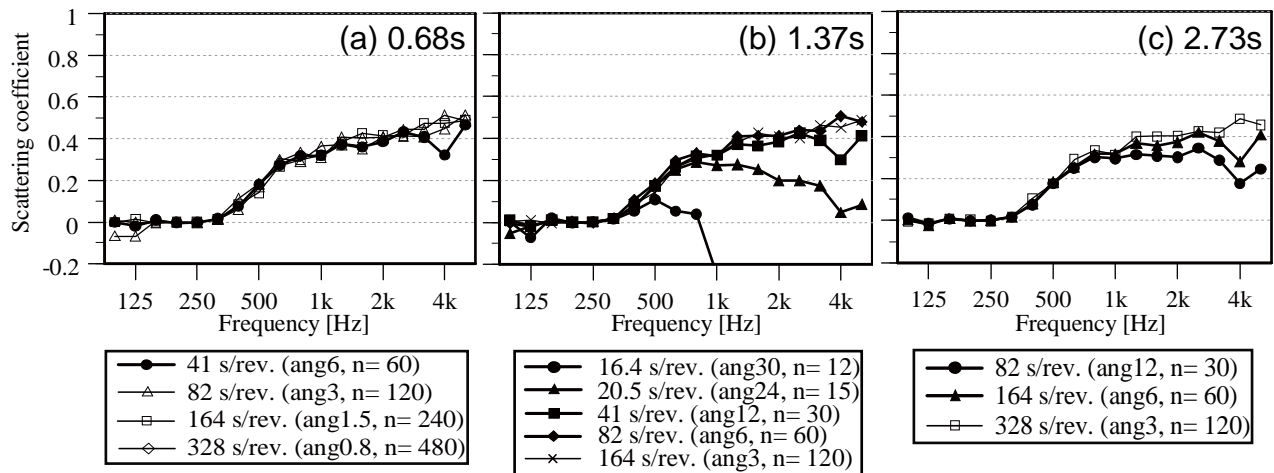


Fig. 2 Scattering coefficients measured with fixed signal lengths.

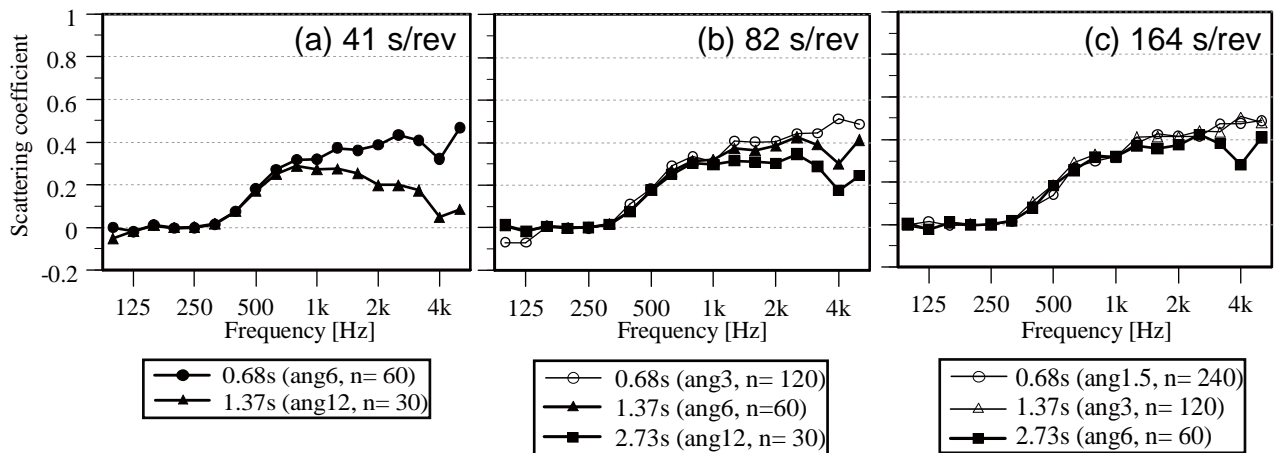


Fig. 3 Scattering coefficients measured with fixed revolution speed.

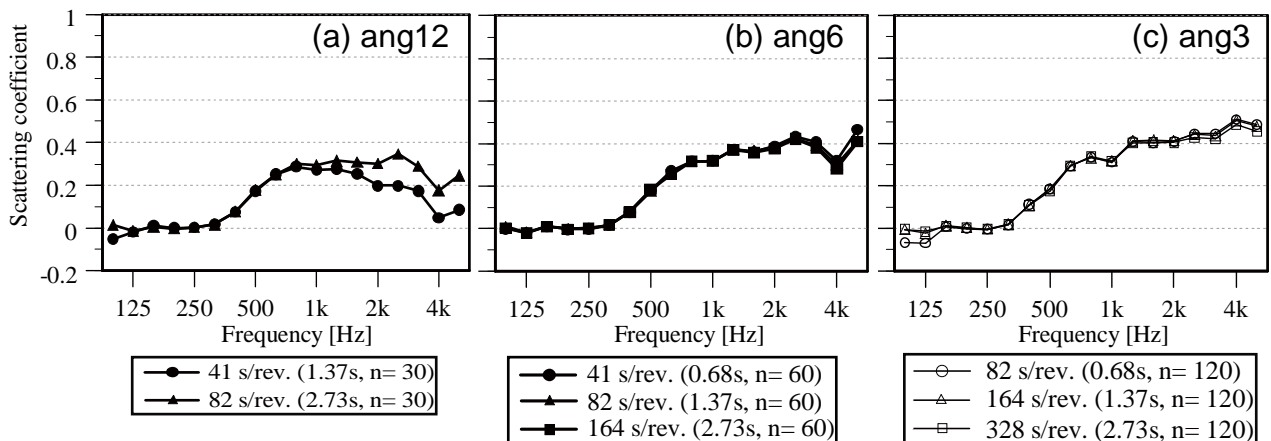


Fig. 4 Scattering coefficients measured with fixed angular step.

正会員 土屋 裕造\*  
同 李 孝振\*\*  
同 佐久間 哲哉\*\*\*

音響拡散 乱反射率 残響室法  
縮尺模型 周期構造 吸音材

1. はじめに

筆者等は、壁面の音響拡散について研究を行っている。本報では前報[1]に引き続き、ISO18497-1[2]によるランダム入射乱反射率の測定原理に従って、吸音材を含む1次元周期構造拡散体試料の測定を行い、乱反射率における拡散体と吸音材との関係について知見を得たので報告する。

2. 縮尺模型による測定試料の概要

測定方法は前報[1]、別報[3]に示す通りである。本実験は1/4縮尺で行った。使用した吸音材および構成する材料の種類をTable 1、吸音材の配置パターンをTable 2、その組合せに寄る測定試料の概略図をFig. 1に示す。条件C-Oは、前報[1]で使用した周期50mm凹凸高低差25mmの矩形波1次元周期構造である。

3. 実験結果および考察

Fig. 2に、試料A（ベロア調シート）を円盤に貼付した場合（条件A- ～ ）の吸音率および乱反射率を示す（周波数は実物換算。以下、同）。吸音率は、中・高音域において吸音材の面積により違いがみられたが、乱反射率はいずれの条件においても平板の特性、すなわち、各

周波数帯域共殆ど0の値を示した。  
Fig. 3に、試料B（スポンジ10mm）を円盤に設置した場合（条件B- ～ ）の吸音率および乱反射率を示すが、条件B- , B- では、2k Hzより高い周波数の乱反射率が算出できていない。これは試料の2k Hz以上の吸音率が0.8以上と大きく、鏡面反射を反射性分とした場合の見かけ上の吸音率との差を正確に抽出できないためと考えられる。  
Fig. 4に、矩形波拡散試料の凹部にスポンジを設置した試料Cの場合（条件C- ～ , O）の吸音率および乱反射率を示す。Fig. 2の場合と同様、吸音率に違いはみられるが、乱反射率は各条件で近似している。試料A, Cの実験結果から、乱反射率は、吸音材の有無は関係なく形状が影響しているものと考えられる。

Table 1 Sound absorption materials (Material with absorption)

Sample	Sound absorption material (Material with absorption)	Thickness (mm)	Wide (mm)
A	Velour-like sheet	0.5	25
B	Sponge	10	25
C	Wood rectangular wave with sample B in the reentrant	25	25

Table 2 Placement pattern of sample

Placement pattern	Interval of absorption material
	All area
	25mm
	75mm
	125mm
	175mm
O	(none)

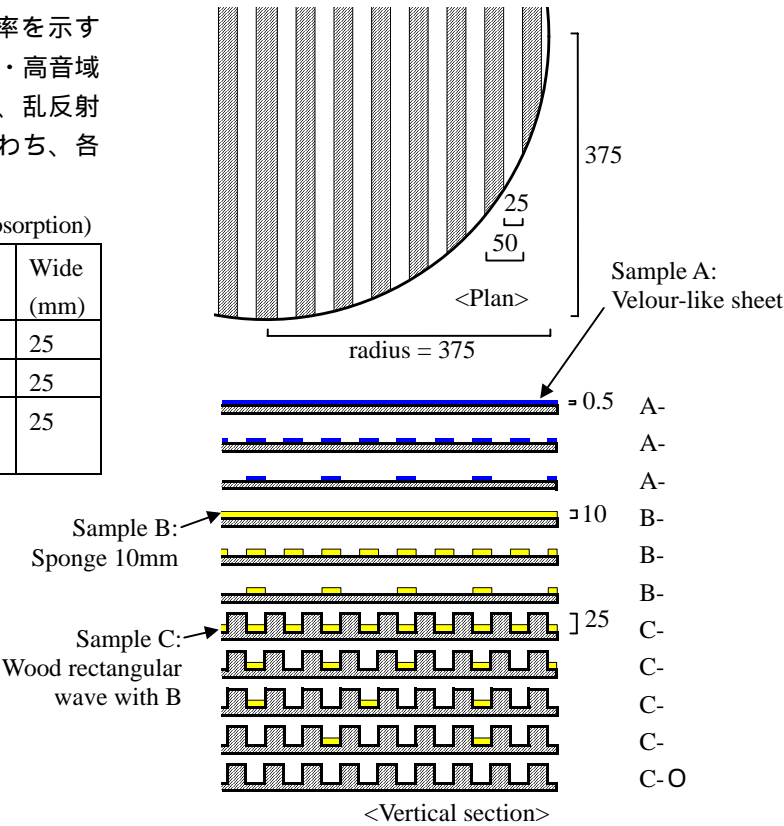


Fig. 1 The diagrammatical view of the measurement patterns

#### 4. まとめ

今回の実験により、材料の吸音率が大きい試料の乱反射率は、ランダム入射残響室法では抽出が困難であることがわかった。また、乱反射率は拡散壁面における吸音材の影響は殆どなく、形状に依存する可能性が示唆された。今回は矩形波 1 次元周期構造において検討を行ったが、今後は他の形状においても検証を行う予定である。

#### 参考文献

[1] 李,土屋,佐久間: 周期構造壁面のランダム入射乱反射率

の測定その 1 1 次元周期構造の効果, AIJ 大会学術講演梗概集 D-1, 2008. 9

[2] 土屋,李,佐久間: 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 - 縮尺および測定システムに関する基礎的検討 -, 音講論(春), pp.1137-1138, 2008.3

[3] ISO 17497-1:2004: Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.

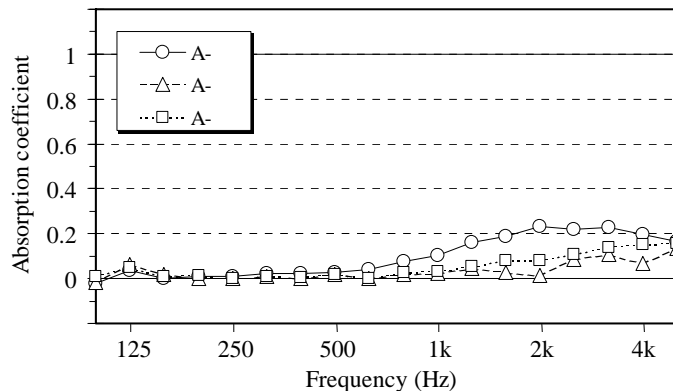


Fig. 2 Absorption coefficients and scattering coefficients measured for velour-like sheet (pattern A- ~ )

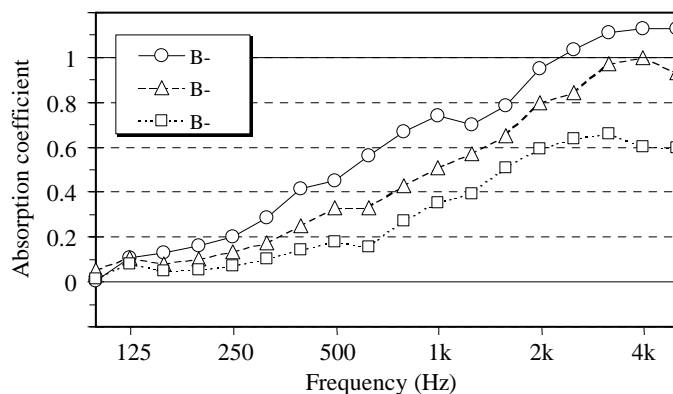
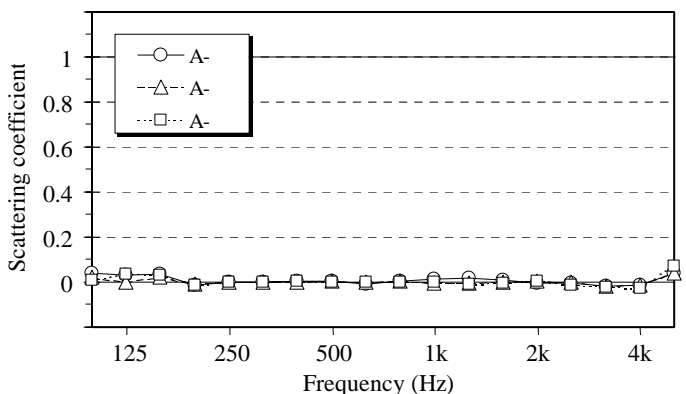


Fig. 3 Absorption coefficients and scattering coefficients measured for sponge 10mm (pattern B- ~ )

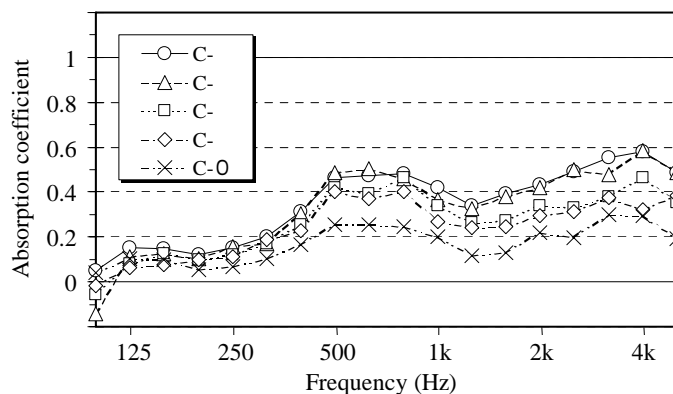
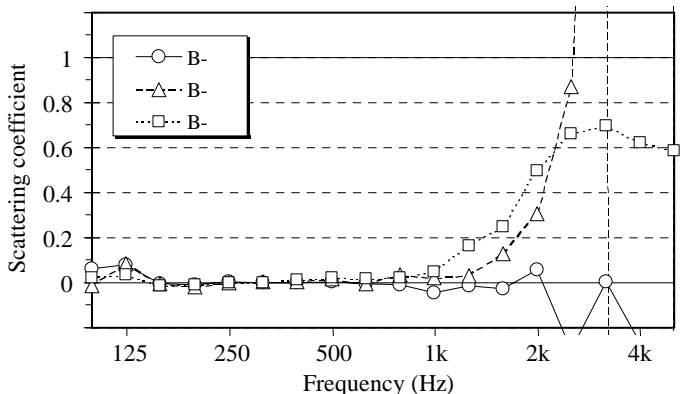
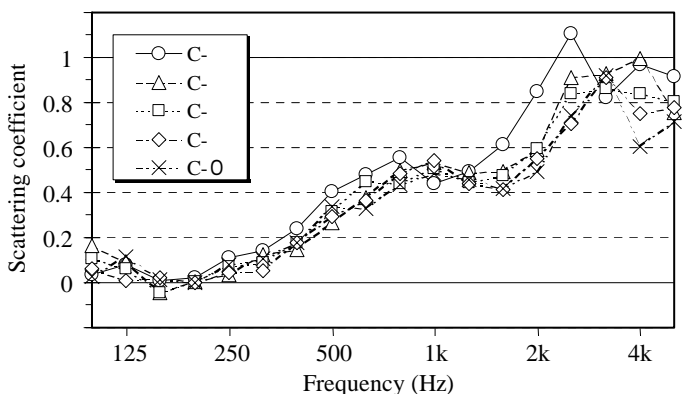


Fig. 4 Absorption coefficients and scattering coefficients measured for Wood Rectangular wave with sponge 10mm (pattern C- ~ , O)



\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 博士課程 / 戸田建設(株)技術研究所

\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 修士課程

\*\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 准教授 博(工)

\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo / Technical Research Institute, Toda Corp.

\*\* Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo

\*\*\* Assoc. Prof., Inst. of Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.



模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定  
その2－各種周期構造の拡散性－\*

○土屋裕造（東大・新領域／戸田建設技研）、李孝振、佐久間哲哉（東大・新領域）

1 はじめに

筆者等は、壁面の音響拡散について研究を行っている。既報[1,2]では、ISO18497-1[3]のランダム入射乱反射率の測定原理に従い、測定システムの精度確認、1次元周期構造壁面の数値解析との対応および吸音材の乱反射率への影響について知見を得た。本報では1次元リブ周期構造の高さ、周期、断面形状ならびに空気層が乱反射率に及ぼす影響について実測により検討を行った。

2 縮尺模型による測定試料の概要

測定概要は既報[1,2]に示す通りである。本実験は1/4縮尺で行った。測定試料の形状寸法・配列をTable 1、概略図をFig. 1に示す。本実験の拡散試料はベースプレートに直接設置した。試料材質はタモ集成材、表面ウレタンクリア塗装仕上げで円形（直径750mm）に作成した。

3 測定結果および考察

3.1 リブ高さの影響

角柱高さが異なる場合の乱反射率をFig. 2に示す（周波数は実物換算。以下、同）。 $h = 25, 35, 45\text{mm}$ の乱反射率では、 $h = 10\text{mm}$ ではみられない特定周波数の落ち込みを持つが、この落ち込みは角柱高さが半波長付近の周波数で生じて

Table 1 Specification of samples [unit: mm]

Type	Shape	$h$	$t$	AS	$d$
1	rectangular $w = 25$	10	10	0	50
2		25	25		
3		35	35		
4		45	45		
5		25	25		
6					100
7		35		10	50
8		45		20	
9	circular $\phi = 25$	25	25	0	50
10		35		10	
11		45		20	

$h$ : height of structure     $t$ : thickness of ribs    AS: air space     $d$ : period

おり、高さが大きくなるにつれて落ち込む周波数が下がる傾向にある。

3.2 リブ周期の影響

$h = 25\text{mm}$ の角柱において、リブ周期が異なる場合の乱反射率をFig. 3に示す。 $d = 100\text{mm}$ と同じリブ周期を50mm移動した場合とを比較すると乱反射率はほぼ一致した。このことからISO[3]の測定原理では、同じ周期構造であればどこを切り出しても乱反射率は一致することが本実験から示唆された。 $d = 50\text{mm}$ と $d = 100\text{mm}$ との比較では乱反射率は近似し、400Hzから1.6kHzにかけては最大で0.14程度 $d = 100\text{mm}$ のほうが乱反射率が高い結果となった。

3.3 断面形状の影響

円柱の乱反射率をFig. 4に示す。同周期で $h =$

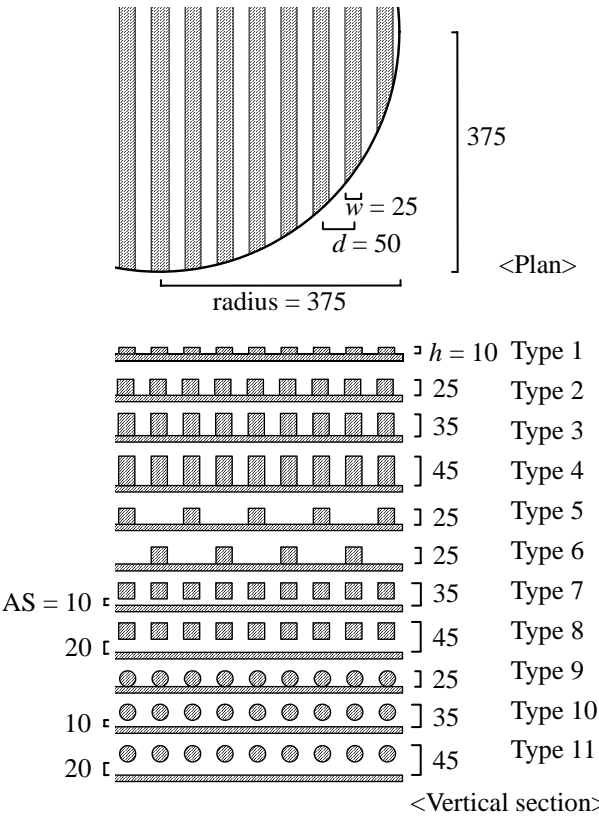


Fig. 1 The diagrammatical view of the measurement types

\* Scale model measurement of the random-incidence scattering coefficients in a reverberation room Part2 - Scattering characteristics of a variety of periodical structures -, by TSUCHIYA, Yuzo ( Univ. of Tokyo / Toda Corp.), LEE, Hyojin and SAKUMA, Tetsuya ( Univ. of Tokyo).

25mm の角柱と比較すると乱反射率はよく対応している。同寸法・同周期の角柱と円柱との比較では、乱反射率がほぼ同等の値となるものと考えられる。

### 3.4 空気層の影響

角柱と円柱において空気層を持つ場合の乱反射率を Fig. 5、Fig. 6 に示す。共に特定周波数の落ち込みがみられず、なだらかな右上がりの周波数特性となった。角柱のベースプレートからの表面高さが同じ場合の空気層ありなしを比較すると、2.5k Hz 以上の周波数帯域でほぼ一致した。波長と拡散体幅の関係にもよるが、高音域では拡散体の厚みは関係なく表面形状とその周期が乱反射率に影響するものと考えられる。

## 4 おわりに

今回測定した各種 1 次元リブ周期構造における乱反射率の性状により、リブ幅と同じ間隔周期の場合周期を倍にしても乱反射率に対する影響は小さく、また、同寸法・同周期の角柱と円柱のリブ周期構造では乱反射率の値がほぼ一致する可能性が示された。今後は、乱反射率の判明した拡散構造が室の壁面に設置され

た場合の、乱反射率と室内音響特性の関係について検証する予定である。

### 参考文献

- [1] 土屋,李,佐久間: 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定—縮尺および測定システムに関する基礎的検討—,音講論(春), pp.1137-1138, 2008.3
- [2] 土屋,李,佐久間: 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定, AIJ 大会学術講演梗概集 D-1, 2008. 9
- [3] ISO 17497-1:2004: Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.

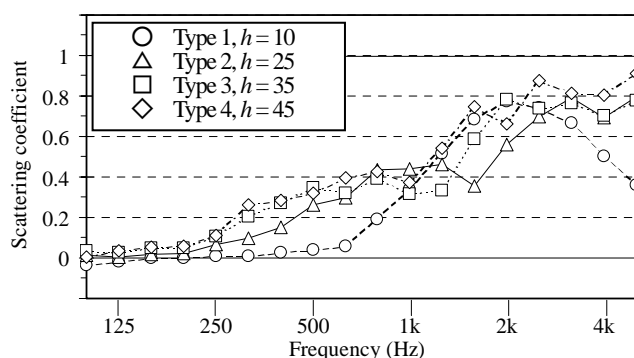


Fig. 2 Scattering coefficients measured for rectangular shape by difference of height ( $d=50$ )

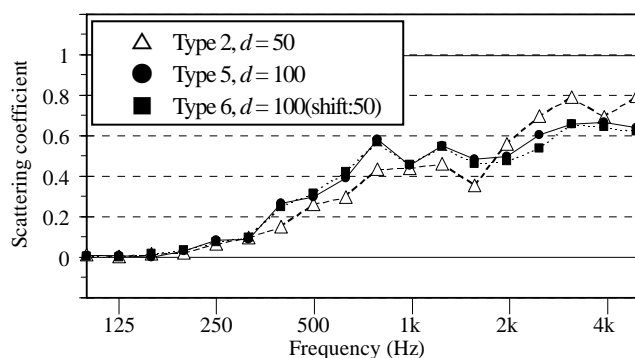


Fig. 3 Scattering coefficients measured for rectangular shape by difference at period ( $h=25$ )

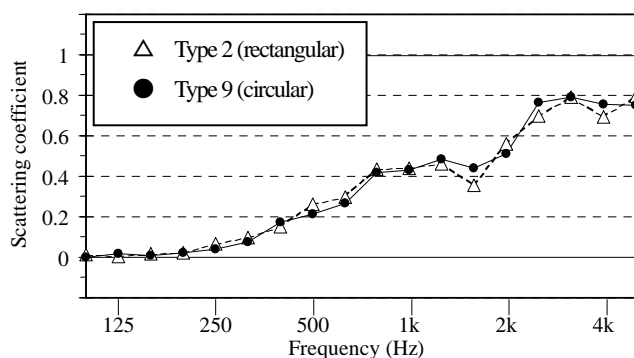


Fig. 4 Scattering coefficients measured for rectangular and circular shapes ( $d=50$ )

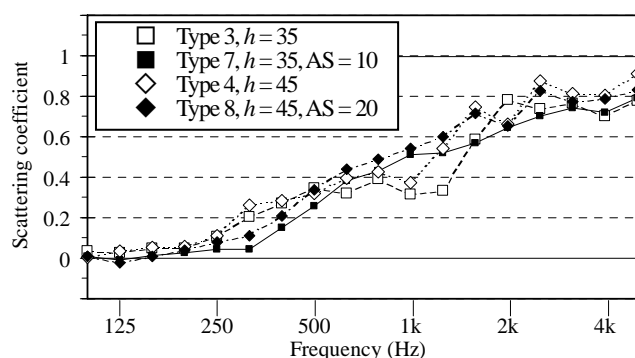


Fig. 5 Scattering coefficients measured for rectangular shape with air space ( $d=50$ )

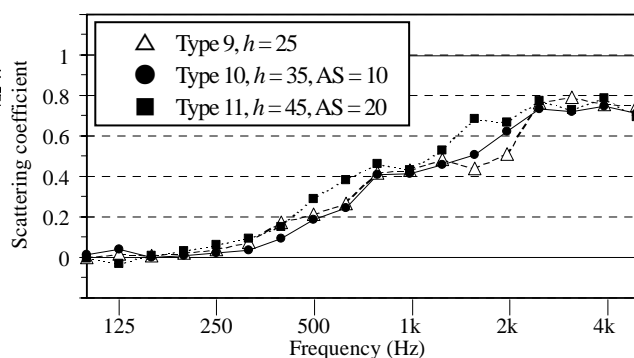


Fig. 6 Scattering coefficients measured for circular shape with air space ( $d=50$ )



# 壁面の音響拡散が室内に与える音響効果 —縮尺模型実験による検討—\*

○土屋裕造（東大・新領域／戸田建設技研），  
李孝振，江田和司，佐久間哲哉（東大・新領域）

## 1 はじめに

筆者等は、壁面の音響拡散について研究を行っている。音響拡散の一物理指標である乱反射率の数値解析・測定が整備され[1,2]、音響拡散の一特性を定量的に把握することが可能となった。しかしながら乱反射率には音の入射に対する反射の方向情報が含まれず、角柱の1次元周期構造（以下、リブ構造と記す）においては音響拡散に方向性が発生し、リブ列の方向によっては室内音響特性に変化が生じるものと考えられる。

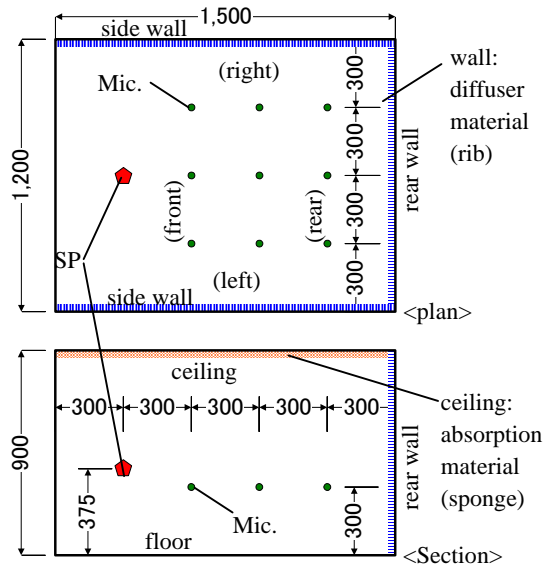


Fig. 1 Diagrammatical view of the model reverberation room

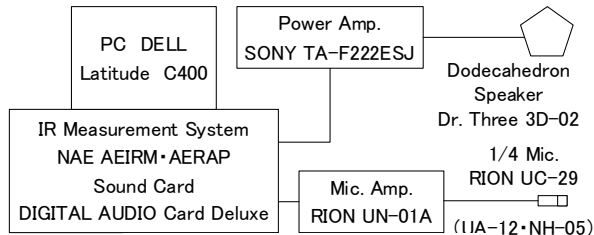


Fig. 2 Measurement block diagram

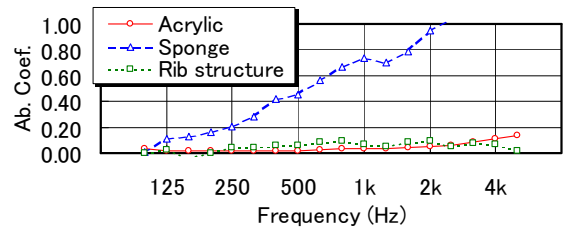
Table 1 Material of parts

Part	Material
The model reverberation room wall surface	Acrylic 10mm
Absorption material	Sponge 10mm
Rib structure	TAMO laminated lumber, surface urethane clear painting finish

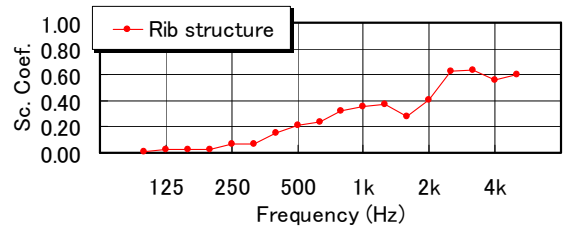
そこで本報では、リブ構造の乱反射率特性の観点から、直方体小空間を設定した室内音響模型実験によってリブ構造の配置や設置方向における室内音響特性の差異を検証した。

## 2 測定概要

模型実験は東大新領域実験室にある模型残響室を用い、壁面・天井にリブ構造・吸音材を設置してインパルス応答を測定した。本実験は1/4縮尺で行い、各物理指標をインパルス応答から実物換算で求めた。模型残



a) Absorption coefficients



b) Scattering coefficients of the rib structure

Fig. 3 Absorption and scattering coefficients of materials

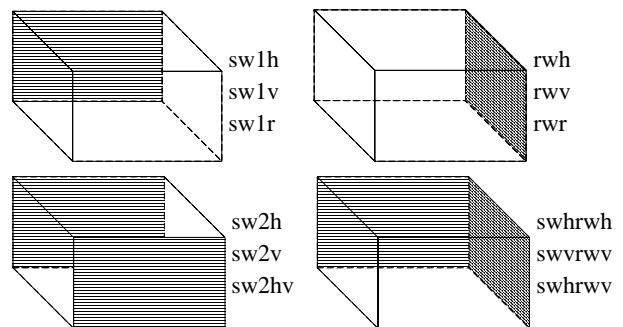


Fig. 4 Diagrammatical views of the rib placement

Explanatory notes,

Absorption: (no note); nothing, Ca; sponge on the ceiling

sw: side wall, rw: rear wall,

Rib direction (For the floor): h; horizontal,

v; vertical, r; random (300 x 300 alternation)

\* The room acoustics effects produced by scattering properties of wall surfaces – the examination by the scale model, by TSUCHIYA, Yuzo, (The Univ. of Tokyo / Toda Corp.) LEE, Hyojin, EDA Kazushi, and SAKUMA, Tetsuya (The Univ. of Tokyo).

響室概略図と音源・受音点位置を Fig. 1、測定器ブロックダイアグラムを Fig. 2、部位材質を Table 1、材料の吸音率・乱反射率を Fig. 3、配置条件概略図を Fig. 4 に示す。

## 3 測定結果

### 3.1 残響時間

天井吸音の有無における側壁 1 面にリブ構造を設置した場合の残響時間の比較を、Eyring-Knudsen の残響式による結果と併せて Fig. 5 に示す。天井吸音がない場合は、模型実験が Eyring-Knudsen の計算式による結果とよく対応しており、拡散音場に近い音場であることが窺える。吸音材がある場合では、特に 1~2k Hz で乖離がみられる。リブ構造の 1.6k Hz に落ち込みがある乱反射率周波数特性と対応関係があるものと考えられる。リブ列の方向に着目すると、床面に対し平行（横方向、以下、リブ h）が床面に対し垂直（縦方向、以下、リブ v）より残響時間が短い。これは音の散乱割合がリブ列方向に対して垂直な方向に大きく、リブ h ではリブ v より天井の吸音材に対する音エネルギーの到来確率が高くなるためと考えられる。1.6k Hz で残響時間の差が小さくなるのは、リブ構造の乱反射率周波数特性の落ち込みと対応しておりリブ列方向による散乱の差が小さいためと考えられる。リブ列方向を 300 角（模型大）を縦横交互配置（以下、リブ r）とした場合、リブ h より残響時間が短くなった。これは、交互配置によりリブのエッジ部分が露出され散乱が大きくなったことに起因しているものと考えられる。

天井が吸音で壁 2 面のリブ構造設置の違いにおける残響時間の比較を Fig. 6 に示す。リブ列の方向に関しては Fig. 5 と同様の結果である。側壁 2 面リブ構造とする方が側壁 1 面+後壁より全体に残響時間が長く、前後壁による往復反射の影響を受けているものと考えられる。2 面を片面ずつリブ h とリブ v にした場合の残響時間は 2 面共リブ h と 2 面共リブ v の中間にくる。このことにより、今回の規模形状における残響時間は、初期反射で散乱した音の方向による吸音面到達の多少に影響されているものと推察される。

### 3.2 $C_{80}$

天井が吸音で壁 2 面のリブ構造配置の違いにおける 2k Hz の  $C_{80}$  の分析結果を Fig. 7 に示す。概ね Fig. 6 の残響時間の変化と対応し、2 面リブ h、片面ずつリブ h、v、2 面リブ v の順で大きい。一方、両面共リブ h と片面ずつリブ h、v とでは  $C_{80}$  に明確な差が表れていない。これも前後壁による音の往復反射に起因するものと考えられるが、音響拡散と残響時間以外の物理特性について今後の更なる検証が必要である。

## 4 まとめ

直方体小空間におけるリブ構造の設置位置・リブ列方向における拡散特性の室内音響特性に対する影響を検証した。その結果、吸音面がある場合では残響時間が壁面拡散の乱反射率特性に対応した特性となること、リブ列方向に対して垂直方向の散乱効果が大きく、吸音面に対し平行なリブ列が残響時間低減に効果があることが示唆された。

### 参考文献

- [1] 佐久間, 1.3 壁面形状の拡散性解析, 音響技術 No.137, pp.14-19, 2007.9
- [2] 土屋他, 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定, 音講論(春), pp.1137-1138, 2008.3

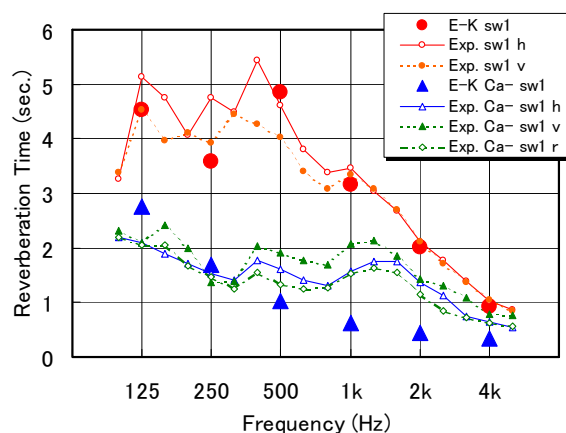


Fig. 5 Comparison of the reverberation time (rib structure on the 1 side wall, Real dimensions conversion)

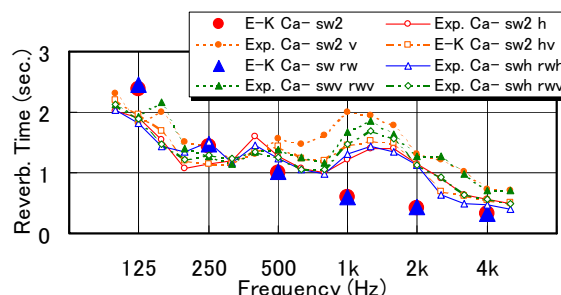


Fig. 6 Comparison of the reverberation time (Sponge on the ceiling and rib structure on the 2 walls, Real dimensions conversion)

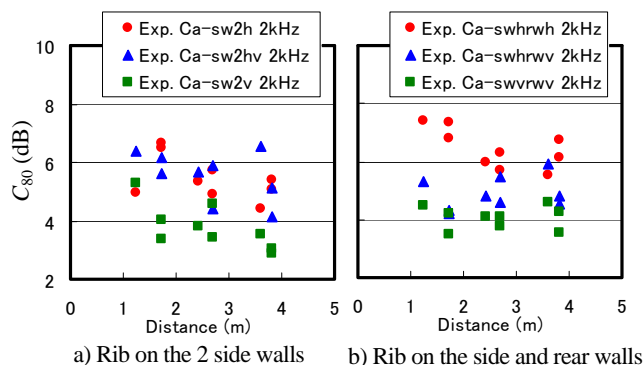


Fig. 7  $C_{80}$  (2k Hz) Sponge on the ceiling and rib structure on the 2 walls)