

残響室法吸音率の測定精度に関する研究(Ⅰ)
第3回協同比較試験と音場拡散条件の検討

牧田康雄 (NHK 放送科学基礎研究所) *

子安 勝 (小林理学研究所)

永田 穂 (NHK 総合技術研究所)

木村 翔 (日本大学理工学部)

(昭和43年7月22日 受理)

Investigations into the Precision of Measurement of Sound Absorption
Coefficients in a Reverberation Room (I)

-The 3rd Round Robin Test and the Investigations on the Diffusivity of Sound Field-

Yasuo MAKITA (NHK Broadcasting Science Research Laboratories)

Masaru KOYASU (Kobayashi Institute of Physical Research)

Minoru NAGATA (NHK Technical Research Laboratories)

Sho KIMURA (Faculty of Science and Technology Nihon University)

(Received July 22, 1968)

Precision measurement of the reverberant sound absorption coefficient has always been drawing attentions in the history of architectural acoustics. In Europe and North America, the round robin tests were carried out repeatedly to standardize the method of measurement. Results of these investigations were collected in the ISO Recommendations or ASTM Standards. However, it seems that some essential problems remain unsolved, such as diffusivity in the reverberation room, edge effect of test materials and so on.

In Japan, the 3rd round robin test was carried out from 1965 to 1966 by the cooperation of 13 research laboratories. Details of reverberation rooms used for this round robin are shown in table 1. Glasswool board (50 mm thick, 25 kg/m^3) was used as test materials. Test areas and the number of suspended diffusing plates were varied in nearly the same manner as in the European round robin (1959). Other specifications of measurement conformed to the ISO Recommendation R 354. Test results are illustrated in Fig.1 ~ Fig.7. Deviations of measured absorption coefficient have been pursued for these two years.

In general, measurement of sound absorption coefficient in a reverberation room assumes a diffuse sound field in the room. Diffusivity in a room is connected with the room volume, room shape, various diffusers put in the room, area of test materials and so on. Among these factors, the room volume would have influence mainly upon the diffusivity in the low frequency region. Test materials used in this investigation have relatively small absorption

* 現在,九州芸術工科大学

残響室法吸音率の測定精度に関する研究(1)

coefficient in low frequencies and it would be inadequate to discuss the requisite volume of reverberation room only through this investigation. Thus, the primary object of this research was to obtain the diffuse conditions in the middle and high frequency region.

In the European round robin test, the diffuse condition in a room was specified by the ratio of the total area of suspended diffuse plates to the floor area of the room. However, this specification does not determine uniquely the sound field for different shapes or volumes of rooms. It would be desirable to introduce the index of diffusivity which can be measured directly in the room. Various methods and quantities have been proposed, such as fine structures of decay curves, directional distribution of sound energy, cross correlation in the sound field and so on.

Through preliminary investigations, elevational diffusivity or ratio of horizontal to vertical mean energy during decay process was adopted for the evaluation of the sound field. So far as measurement of the absorption coefficient is concerned, it was concluded that the diffusivity in the reverberation room is sufficient, if the ratio of horizontal to vertical mean energy during decay process is less than 3.0 (Fig. 14).

From the measurement of this ratio, the sound fields of all the rooms shown in Table 1 (except 13) could be regarded as of the same order of diffusivity, when the total area of suspended diffusing plates in each room attains about 80 percent of the floor area of the room.

Important factors in the disagreement of the absorption coefficients in the 3rd round robin test would have to be sought in other items.

1. まえがき

残響室法吸音率の正確な測定は、建築音響の分野における重要な問題の一つであり、その測定方法には絶えず検討と改善が加えられて現在に至っている。しかし、残響室内音場の拡散性などについての基本的な問題のなかに、完全には解明されていない点が残されているために、本質的な意味での測定方法の確立には至っていない。これは具体的には同一材料の残響室法吸音率の測定値が測定機関によってかなりちがう場合があるという形であらわれている。

この測定方法に直接あるいは間接に関係する問題については、これまで各方面で非常に多くの研究が行なわれてきた。その一つとして、欧米では同一材料の持回り試験 (round robin test) が古くから繰り返して行われており^{1),2)}、これらの研究成果は最近の ISO 推奨規格 (R-354) あるいは ASTM 規格のなかにとり入れられている。ただこうした規格化が必ずしも測定方法の問題の解決を意味するものではなく、後述す

るように規格そのものにまだ多くの問題点が含まれている。

一方わが国でも測定方法の規格化が各方面から要求されるようになり、1965年に日本工業規格 (JIS) のための原案作成が日本音響材料協会に委託された。ここで組織された原案作成委員会は、その基本的な方針としてまず ISO 規格に含まれる問題点を抽出し、その検討の結果に基づいて、ISO 規格を一步前進した方向で JIS 原案を作成することにした。

ここでわが国としては第3回の協同比較試験が計画され、1965年から1966年にかけて13の試験研究機関が参加して実施された。この結果や ISO 推奨規格などを参考にして、厳密性に関してその時点で可能な範囲の規格原案が作成され、これは JIS A 1409 - 1967 「残響室法吸音率の測定方法」として制定公布された。

このように一応測定方法の規格化は終わったが、この第3回協同比較試験では、まだ異なる残響室で測定した同一材料の残響室法吸音率測定値の不一致の程度は

かなり大きく、その原因を本質的に解明するためには、さらに系統的な研究を必要とすることが明らかになり、協同研究が続けられた。

この研究では、まず残響室内音場の拡散性の影響を検討するために、拡散度測定尺度の開発研究を行い、これを用いて協同比較試験に参加した各残響室の音場条件をしらべた。ついで残響時間測定器や記録読みとり者の相違などの要因が、吸音率測定値に与える影響を明らかにするための研究を行った。

本論文においては、はじめに第3回協同比較試験の概要をまとめたのべ、つぎにここで提起された吸音率測定精度についての問題のうち、残響室内の音場条件の影響とこれに関連して拡散度測定尺度の開発とその適用について行なった研究の結果を示した。

2. 第3回協同比較試験とその結果

2.1 実験計画

(a) 残響室: 協同比較試験に使用された残響室は、

12試験研究機関の13残響室で、その概要は Table 1 に示す通りである。その容積は 74~513 m³ の広い範囲にわたっているが、ほぼその 2/3 は120~200 m³ の範囲に含まれている。また1残響室 (Table 1の12) をのぞいた他の12残響室の室形は不整形になっている。これは ISO R-354 を制定したときの基礎資料となった欧米の持回り試験での残響室の構成とかなり異なった点であり、この研究のなかでの残響室条件の一つの特徴になっている。

(b) 拡散手段: 残響室内音場の拡散度を調整するために、ヨーロッパの持回り試験と同様に、各残響室で拡散板を使用した。拡散板の材料および1枚の寸法を Table 1 に示す。拡散板によって室内音場の拡散度を調整する場合、本来は直接拡散度を測定して各室ごとに拡散板の使用量や設置条件を決定することが望ましいが、ここではまずはじめにヨーロッパの持回り試験と同様に、床面積に対する拡散板面積の割合によって音場を規定することにし、Table 2 に示す4条件をえ

Table 1 Details of the Reverberation Rooms used for this Investigation.

Laboratories	Volume (m ³)	Surface Area (m ²)	Floor Area (m ²)	Interior Finish	Materials and unit size of Diffusing plate
1. Kobayashi Inst. of Phys. Res. (No. 1)	513	382	73.0	Polished concrete	Hard fibre board (0.91m×1.82m)
2. Toyo Univ.	279	253	49.2	Ceramic tile	Hard fibre board (0.91×1.82)
3. Building Res. Inst.	248	228	43.7	Polished concrete	Hard fibre board (0.91×1.82)
4. Inst. of Sci. and Tech. Univ. of Tokyo	195	193	38.0	Mosaic tile	Asbestos joint sheet (1.2×2.4)
5. Nihon Univ.	169	183	33.8	Mosaic tile	Hard fibre board (0.91×1.82)
6. Takenaka Tech. Res. Lab.	164	182	31.9	Floor and Wall: Ceramic tile	Plastic sheet (0.91×1.82)
7. NHK Tech. Res. Lab.	157	188	37.5	Celing: Mortar Mortar Painted	Plastic sheet (0.91×1.82)
8. Yokohama National Univ.	144	162	28.5	Mortar	Hard fibre board (0.91×1.82)
9. Kajima Inst. of Const. Tech.	140	173	33.0	Wall and Celing: Mortar	Asbestos joint sheet (1.2×1.2)
10. Nippon Asbestos Co.	138	161	25.2	Floor: Mosaic tile Mortar	Asbestos joint sheet (1.2×1.2)
11. Kobe Univ.	130	152	22.8	Concrete painted	Hard fibre board (0.91×1.82)
12. Kobayashi Inst. of Phys. Res. (No.2)	120	148	24.0	Polished concrete	Hard fibre board (0.91×1.82)
13. Tokyo Inst. of Technology	74	111	21.8	Mortar painted	Hard fibre board (0.91×1.82)

残響室法吸音率の測定精度に関する研究 (1)

Table 2 Diffusing Conditions of Reverberation Room for the 3rd Round Robin Test.

Condition	$\frac{(\text{Total area of one side of diffusers})}{(\text{Floor area of room})} \times 100\%$
a	120
b	80
c	40
d	0

Table 3 Area of Test Materials

Condition	Area (m ²)	Length × Width (m)	(Perimeter length) / (Area)
15	5.00	2.73 × 1.83	1.83
2	6.70	3.66 × 1.83	1.66
3-I	9.99	5.46 × 1.83	1.47
3-II	9.99	3.66 × 2.73	1.29
4	13.40	3.66 × 3.66	1.10

らんだ。

(c) 試験材料の種類と面積：ヨーロッパの持回り試験で使われた Sillan (厚さ 50 mm) は低音域の吸音率が小さいので、残響室音場の拡散状態と密接な関係のある室容積の問題を検討するための比較試験材料という意味では必ずしも適切ではない。ただ材料の入手、各残響室での設置状態の安定性やヨーロッパの試験結果との相互比較などのために、ここでは Sillan と同様な傾向の吸音特性をもった材料を使用することにし、厚さ 50 mm、かさ密度 25 kg/m³ のグラスウールボードを選定した。

試料の面積および形状については、ISO 規格やわが国での従来の寸法規格、周辺効果に関するといわれる面積周長比などの条件を検討して、Table 3 に示す 5 条件をえらんだ。

(d) 測定項目：この協同比較試験において取りあげた測定項目をまとめると次のようになる。

(i) 室の拡散条件および試料面積の変化に対応する残響室法吸音率の測定

(ii) 上記の各条件について室内音場の拡散度の測定

(iii) 試験材料の垂直音響インピーダンスからの統計入射吸音率の算出

このうち (i), (ii) の項目について試験条件のすべての組み合わせを考えると、非常に膨大な実験にな

Table 4 Division of Test Scheme.

Diffusing condition / Area condition	a	b	c	d
15	, (A) (A,D)			
2	, (A) , (A,D)	(A,D) (A)	(A,D) (A)	(A,D) (A)
3-I	, (A) (A,D)			
3-II	, (A) (A,D)	(A)	(A)	(A)
4	, (A) (A,D)			

Group : Room 2, 4, 6, 12
: 9, 10, 11, 12
: 1, 3, 5, 7
: 8

(A): Measurement of Absorption Coefficient
(D): Measurement of Diffusivity

る。そこで Table 1 の 13 残響室を四つのグループに分け、少なくとも 1 条件は相互に共通するようにして全測定項目を分担することにした。その分担表を Table 4 に示す。

(e) 残響室法吸音率測定方法の規定：試験条件をできるだけ一定にするために、詳細な測定要項を作成した。測定方法は基本的には ISO 規格に準じて定められたが、いくつかの点が補足あるいは修正された。主要な項目をまとめると次のようになる。

(i) 試料は残響室の床面中央部に取り付け、その側面を L 形鋼による枠組でふさぐ。L 形鋼と床との間にすきまができる場合には、油粘土などでふさぐ。

(ii) 音源には 1/3 オクターブ帯域雑音を用いる。一部の機関で震音との比較検討を行なう。

(iii) 受信系に 1/3 オクターブ帯域フィルターを使用する。

(iv) 減衰曲線の記録には高速度レベル記録器を用い、記録速度は測定する残響時間 T(s) に対して 250/T(dB/s) 以上にとり、紙送り速度は減衰曲線の勾配が 30° ~ 60° の範囲に入るように選ぶ。

(v) 受信点は残響室内に 3 点をえらぶ。そのいずれも室内面から 1 m 以上離れ、拡散板からもできるだけ離れるように定める。

(vi) 各受音点において、1周波数ごとにそれぞれ10回の減衰曲線の記録を行なう。

(vii) 減衰曲線の定常レベルより5dB下から暗騒音レベルの5dB上までの減衰部分が30dB以上あることを確かめ、この部分にあてはめて引いた直線から残響時間を読みとる。直線減衰部分が30dBにみたない場合には、読みとり値にこれを記入しておく。

(viii) 測定を中心周波数は100~5000Hzの間に

1/3 オクターブ間隔にえらぶ。

(ix) 吸音率の算出には次式を用いる。

$$\alpha = \frac{0.161V}{S} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (1)$$

V : 容積 (m³) S : 試料面積 (m²)

T₁ : 試料のあるときの残響時間 (s)

T₂ : 試料のないときの残響時間 (s)

2.2 協同比較試験の結果と検討

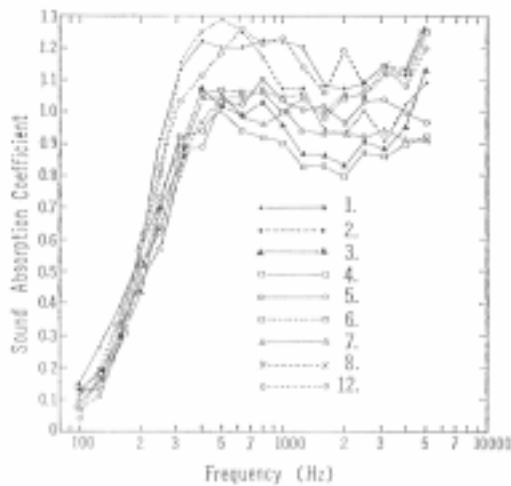


Fig. 1 Results of the 3rd round robin test
Area condition: 1.5
Diffusing Condition: a

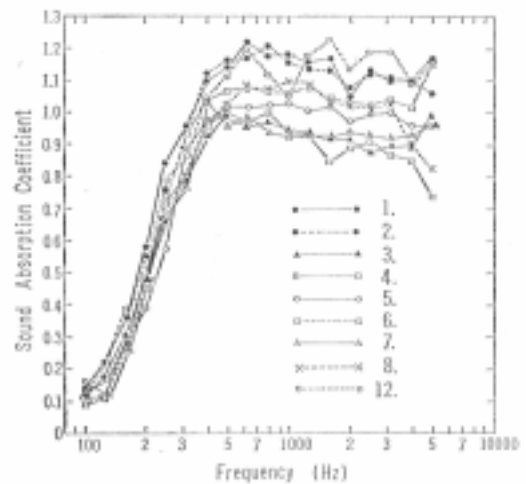


Fig. 3 Results of the 3rd round robin test
Area Condition: 3-I
Diffusing Condition: a

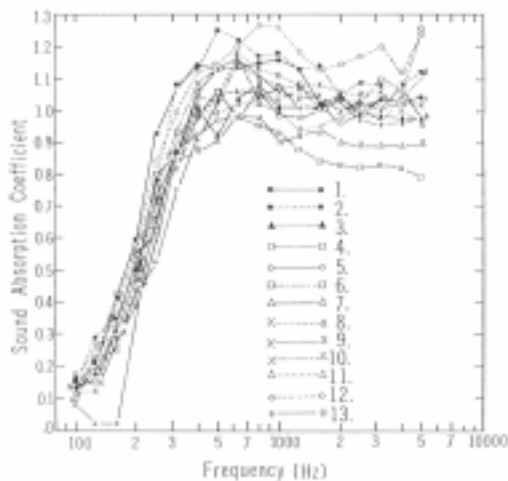


Fig. 2 Results of the 3rd round robin test
Area Condition: 2
Diffusing Condition: a

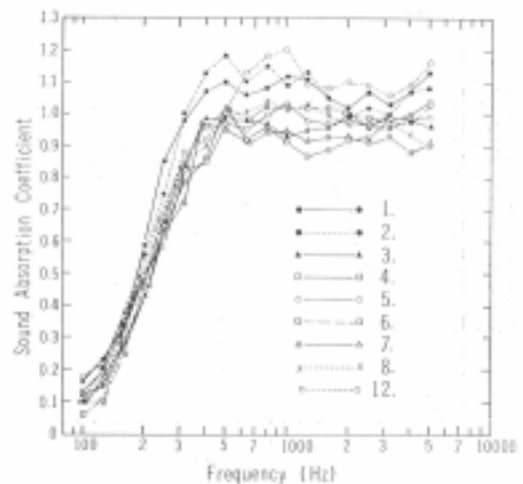


Fig. 4 Results of the 3rd round robin test
Area Condition: 3-II
Diffusing Condition: a

残響室法吸音率の測定精度に関する研究(1)

ここでは残響室法吸音率の比較試験結果についてのべる。まず拡散条件 a について、各試料面積ごとの吸音率測定結果を Fig. 1 ~ Fig. 5 に示した。これを見ると各残響室で測定された吸音率の不一致の程度はかなり大きく、最もちがりの小さい試料条件 (3-II) でも、中高音域において $\pm 10\%$ 、あるいはそれ以上になっている。

拡散条件 b, c の場合については、測定を分担した

機関の数が少ないが、吸音率の分散は条件 a の場合とほぼ同程度であった。

これに対して、拡散板をまったく使用しない条件 d の場合の測定結果の例を Fig. 6, 7 に示した。拡散条件 a, b での測定結果を比較してみると、拡散板の使用によって各残響室間の吸音率測定の分散が小さくなることは十分に認められた。特に音域別残響室 (Ta 高

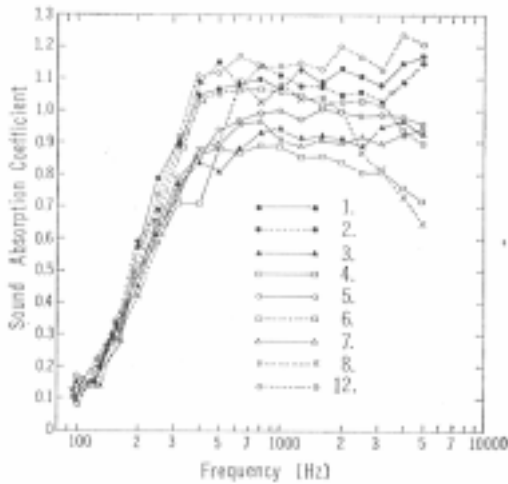


Fig. 5 Results of the 3rd round robin test
Area Condition: 4
Diffusing Condition: a

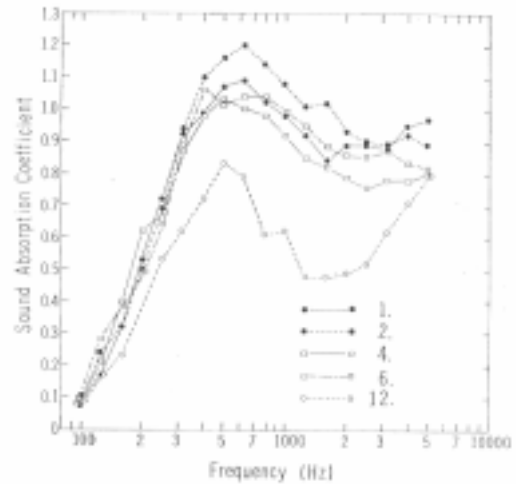


Fig. 7 Results of the 3rd round robin test
Area Condition: 3-II
Diffusing Condition: d

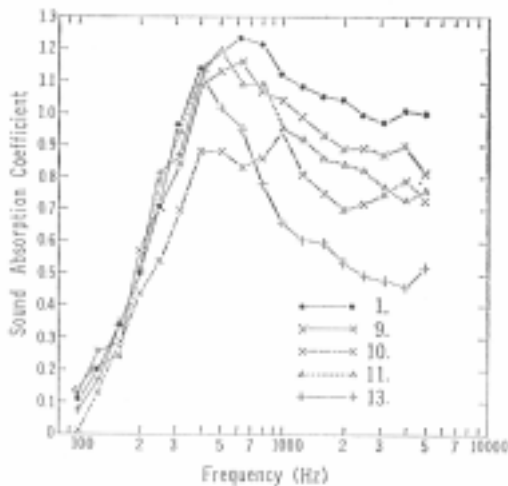


Fig. 6 Results of the 3rd round robin test
Area Condition: 2
Diffusing Condition: d

音域吸音率の変化は非常に大きい。

拡散条件 a, b, c での比較試験結果をみると、大きめの吸音率を与える機関と小さい吸音率を与える機関がほぼきまっているように見える。しかし、この結果からは残響室容積、試料面積あるいは拡散板面積の室床面積に対する割合などと吸音率のちがりの傾向との関係を明確につかむことはできなかった。

したがって、吸音率の測定精度については、まず各残響室内の音場の拡散度をより直接的な方法で比較し、また残響時間測定方法のなかに含まれる吸音率測定値のばらつきに対する要因についての検討を進めることが必要であると考えられた。

3. 音場の拡散条件の検討

残響室法吸音率の測定において、残響室音場の拡大条件は、最も基本的な測定条件の一つと考えられる。

しかし、この拡散条件については、これまで、ヨーロッパにおける持回り試験にみられるように、拡散板の設置枚数¹⁾、あるいは、測定吸音率と統計入射吸音率との比較⁴⁾などの間接的な尺度でしかとらえられていない。音場の拡散性には、単に拡散板の設置条件だけではなく、室容積、室形、試料面積およびその配置、音源の指向性、位置など、種々の条件が関与すると考えられる。したがって上記のような間接的な尺度ではなく、これら諸条件と音場の拡散性については、吸音率測定値との関係を明らかにすることができる物理量を設定し、これを媒介にすることによって、はじめて測定諸条件と、吸音率測定値との関係が明らかにできるものと考えられる。このような意図のもとに、音場の拡散性を表わす物理量および、その測定方法を検討し、この量を用いて残響室音場の検討を行なった。その概要をここに述べる。

3.1 残響室音場の拡散性の測定方法についての基礎的な検討

音場の拡散性の測定方法については、これまでに種々の方法が発表されている。すなわち、

- (i) 室内のエネルギーの指向性分布に着目する方法⁵⁾
 - (ii) 室内音圧の位置相関に着目する方法⁶⁾
 - (iii) 音圧の空間分布、あるいは周波数レスポンスの分布形に着目する方法⁷⁾
 - (iv) 残響は計の微細構造に着目する方法⁸⁾
- などである。

これらの方法について、吸音率測定用の残響室音場への適用性を検討した結果、(ii)、(iii)の方法は拡散状態が完全拡散状態からずれた場合の測定量に対し、音場状態の解釈に困難な点がある、(iv)の方法は直線的な残響減衰波形が拡散音場の必要条件ではあるが十分条件ではない点に問題がある、(i)の方法は、低音域の測定が一般に困難であるが、今回対象としている周波数範囲が中高音域であること、音場の拡散性を試料への入射条件に直接関係した形でとらえられること、すでに、特定の残響室についてではあるが、試料面上の指向性分布と吸音率測定値との関係について実験的な検討が試みられていることなどの理由から、(i)の方法を基盤に拡散性の測定方法の検討を行なった。

3.1.1 試料面上における指向性分布の観測

指向性分布の指数化、測定上の問題点などについての示唆を得るため、室容積 157 m³ の残響室において、50mm 厚のグラスウールを床に集中配置し、拡散板の設置枚数を変えて拡散状態を変化し、定常状態および残響過程における指向性分布を観測した。測定には、中心周波数 3150Hz、1/3 オクターブ帯域の雑音を用い、測定位置は試料の中心軸上 1.3m の点とした。指向性マイクロホンとしては、直径 75cm のパラボラ形集音器を使用した。この集音器の 3150Hz における指向特性の半値幅は約 10° である。指向性分布を表わすハリネズミの観測結果 (側面図) を Fig. 8 お

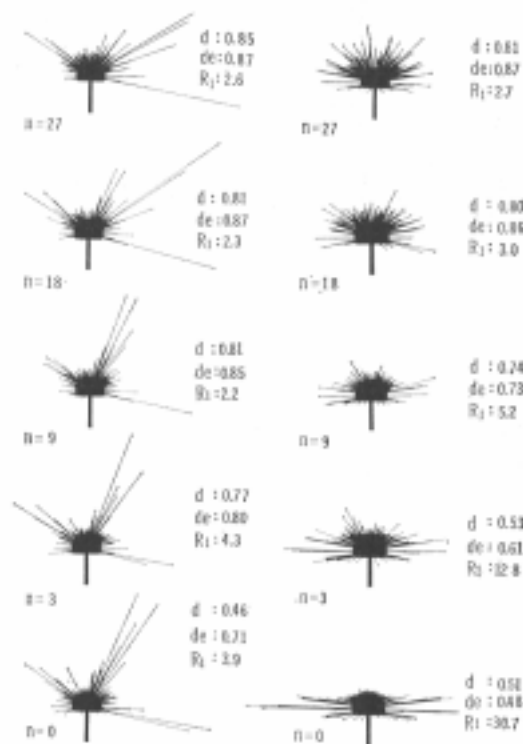


Fig. 8 Directional distribution of sound in a reverberation room measured in stationary (Left) and transitional (Right) state with various numbers of diffusing plates.
 n : number of diffusing plate
 d : directional diffusivity
 de : elevational diffusivity of the averages for each elevation angle energy
 R₁ : ratio of horizontal to vertical mean energy

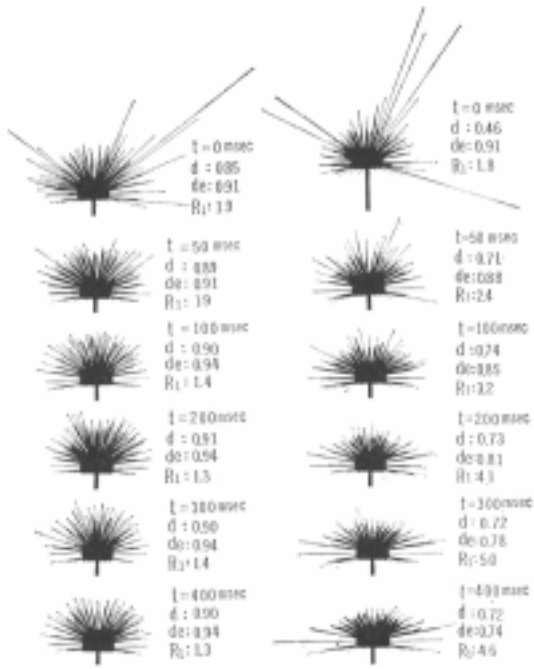


Fig. 9 Directional distribution of sound in a reverberation room measured in various transitional time after source is stopped.
t : transitional time after source is stopped
number of diffusing plates : (Left) 27, (Right) 0

よび Fig. 9 に示す。

Fig. 8 は床全面 (37.5 m²) に試料を設置した状態で 91×182 cm の拡散板の設置枚数をそれぞれ 0, 3, 9, 18, 27 枚に変えたときの定常状態および音源切断後 200 msec 後のハリネズミを, Fig. 9 は 9.9 m² の試料を床に集中は位置し拡散板の設置枚数 0 および 27 の状態で, 音源切断後それぞれ, 0, 50, 100, 200, 300, 400 msec の時点で観測したときのハリネズミを示したものである。

指向性分布の特徴をまとめると, 定常状態での指向性分布には, 音源からの直接音, 拡散板からの一次反射音と考えられる特定方向からの大きなエネルギーの流れが表われており, 拡散板設置による拡散状態の変化が認めにくい。これに対し, 残響過程における指向性分布では, 特定方向からの強い反射音はなく, 拡散板設置枚数を増すとともに, ハリネズミの形は, 試料面に平行した偏平な形から, 理想的な拡散状態を表わす半球形に近づいていくことがわかる。したがっ

て, この観測結果から, 下記のような結論をみちびくことができる。

(i) 指向性分布の観測は残響過程で行なう必要がある。

(ii) 指向性分布の指数化については, 各方向別のエネルギーの大きさの変動に着目するより, ハリネズミ全体としての形の偏平さに着目した指数を考えるのが妥当である。

3.1.2. 指向性分布の指数化

ハリネズミの形の特徴を表わす指数として, つぎの三つの指数を定義した。

$$(i) \text{ 仰角拡散度: } d_e = 1 - m_e / m_{e0} \quad (2)$$

ここで, $m_e = \Delta M_e / M_e$, $M_e = \sum_{i=1}^{n_e} A_{ei} / n_e$, $\Delta M_e = \sum_{i=1}^{n_e} |A_{ei} - M_e| / n_e$, n_e は仰角の数, A_{ei} は仰角 i , 方向の音の強さの平均値, すなわち,

$A_{ei} = \sum_{j=1}^{n_i} I_{ij} / p_i$, I_{ij} は仰角 i , 方位角 j 方向の音の強さ, p_i は仰角 i での方位角の数, m_{e0} は無響室において, m_e と同じ操作で求めた値, Fig. 8, 9 のハリネズミにおいて, $n_e = 10 (i = -10^\circ, 0 \sim 90^\circ)$,

$$p_{-10^\circ} = 35, p_{0^\circ} = 36, p_{10^\circ} = 35, p_{20^\circ} = 34, p_{30^\circ} = 31, \\ p_{40^\circ} = 28, p_{50^\circ} = 23, p_{60^\circ} = 18, p_{70^\circ} = 12, p_{80^\circ} = 6, \\ p_{90^\circ} = 1.$$

$$(ii) \text{ 垂直・水平エネルギー比: } R = \bar{E}_H / \bar{E}_V \quad (3)$$

\bar{E}_V , \bar{E}_H はそれぞれ垂直方向, 水平方向から入射する音の強さの平均値である。 \bar{E}_V , \bar{E}_H の算出には, つぎに示すように二通りの方法を用いて, R_1 , R_2 の二つの量を取りあげた。

$$R_1 = \bar{E}_{H1} / \bar{E}_{V1} \quad (4)$$

ここで, \bar{E}_{V1} は仰角 $70^\circ \sim 90^\circ$ 間から入射する音の強さの平均値, \bar{E}_{H1} は仰角 $-10^\circ \sim 0^\circ$ 間から入射する音の強さの平均値, すなわち,

$$\bar{E}_{V1} = \left[\sum_{j=1}^{p_{70^\circ}} I_{70^\circ j} + \sum_{k=1}^{p_{80^\circ}} I_{80^\circ k} + \sum_{l=1}^{p_{90^\circ}} I_{90^\circ l} \right] / [p_{70^\circ} + p_{80^\circ} + p_{90^\circ}]$$

$$\bar{E}_{H1} = \left[\sum_{j=1}^{p_{-10^\circ}} I_{-10^\circ j} + \sum_{k=1}^{p_{0^\circ}} I_{0^\circ k} \right] / (p_{-10^\circ} + p_{0^\circ})$$

$$R_2 = \bar{E}_{H2} / \bar{E}_{V2} \quad (5)$$

ここで, \bar{E}_{V2} は仰角 90° から入射する音の強さ, \bar{E}_{H2} は仰角 0° 方向, 方位角 30° おきの値から求め音との強さの平均値, すなわち,

$$\bar{E}_{V2} = I_{90^\circ}$$

$$\bar{E}_{H2} = (I_{0^\circ, 0^\circ} + I_{0^\circ, 30^\circ} + I_{0^\circ, 60^\circ} + \dots + I_{0^\circ, 240^\circ} + I_{0^\circ, 270^\circ}) / 12$$

R_2 は R_1 の測定を簡易化した指数である。

Fig. 8, Fig. 9 の各ハリネズミについて、上記の仰角拡散度 d_e 、垂直水平エネルギー比 R_1 を算出し、従来用いられている指向拡散度 d^0 と比較して Fig. 8, 9 に示した。ここに新しく定義した指数は各方向別のエネルギーの大きさの変動を表す指向拡散度よりも、拡散状態の変化に対するハリネズミの形の变化の特色をより明確に表わしていることがわかる。

3.1.3 観測時刻の検討

残響過程における妥当な観測時刻を知るために、室容積それぞれ $157, 99\text{m}^3$ の二つの残響室において、拡散板の使用枚数を変え、音源切断後の種々の経過時刻において、試料中心軸上 1.3m の点の垂直・水平エネルギー比 R_2 を測定した。試料は $3.66 \times 2.73\text{m}$ 、 50mm 厚のグラスウールボールである。結果を Fig. 10 に示す。これを要約すると、

(i) 拡散板を多く使用した音場では、 R_2 の観測時刻による変化は小さい。拡散板を使用しない音場では、 R_2 は観測時刻によって変化するが、その変化の状態は、音源切断時刻に近いほど大きく、経過時間とともに一定となる傾向にある。

(ii) 拡散状態の変化を表すには、音源切断後、一定時刻経過後以降が望ましい。とくに、定常状態の測定値 (Fig. 10 の $t=0$ の値) は拡散状態の変化に

対して敏感ではない。

以上の結果と、残響波形から残響時間 T を読みとるときの減衰波形の中心が、音源切断後、ほぼ $T/3$ 位であることを考慮すれば、この時刻をもって、指向性分布の観測時刻とするのが妥当と考えられる。

3.1.4 観測場所の検討

指向性分布は、当然、測定場所により異なることが考えられるが、吸音材を集中配置した残響室の拡散性の測定においては、観測点を試料中心軸上に選ぶのが妥当であろう。これを確認する目的で拡散状態の極端に異なる二つの音場において、試料中心軸上の種々の点および中心軸からはずれた数点において、垂直水平エネルギー比 R_2 を測定した。残響室、試料およびその設置条件は、 $3 \cdot 1 \cdot 3$ の場合と同じである。

測定結果を Fig. 11 に示す。結果を要約すると、

(i) 拡散板を床面積の 80% 程度使用した音場では、垂直・水平エネルギー比は、試料中心軸上、および、水平方向とも場所によってほとんど変化しない。

(ii) 拡散板を全く使用しない音場では、垂直・水平エネルギー比は試料面に近いほど大きくなる傾向にある。しかし、この場合も試料面から軸上 1m 以上はなれば、中心軸上の高さによる変化は小さくなる。また高さ 1.3m の観測結果からみられるように、観測点が中心軸から多少はずれても、垂直・水平エネルギー比は変わらないと考えられる。

以上の観測結果と集音器の取扱いなどを考慮すれば、観測点は試料中心軸上 $1.0 \sim 1.5\text{m}$ 位が妥当と考

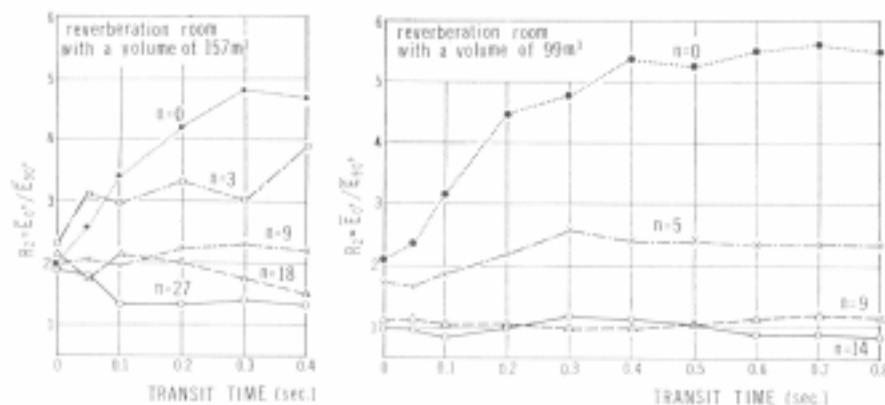


Fig. 10 Variation of the ratio of horizontal to vertical mean energy $\bar{E}_{0^\circ} / \bar{E}_{90^\circ}$ with the time transitted after source is stopped.
 n : number of diffusing plates
 frequency : 3150 Hz

残響室法吸音率の測定精度に関する研究 (1)

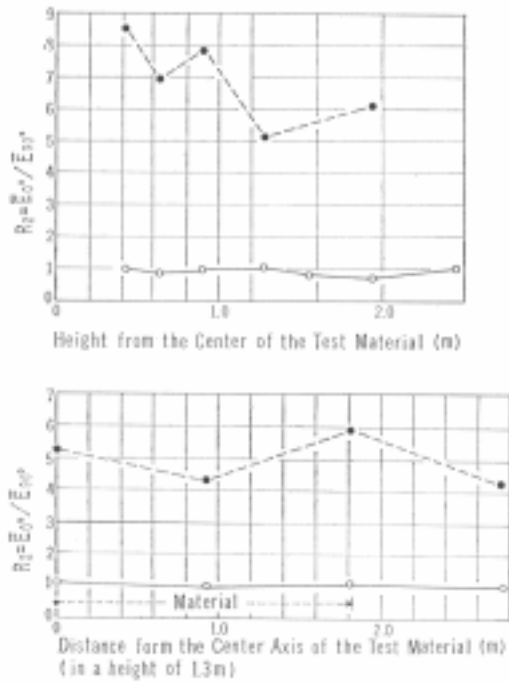


Fig. 11 Ratio of horizontal to vertical mean energy \bar{E}_0 / \bar{E}_{90} measured in various positions in a reverberation room.
 - - - - Reverberation room with a volume of 99m^3 , number of diffusing plates: 0
 ○ — ○ Reverberation room with a volume of 157m^3 , number of diffusing plates: 18

えられる。

3.1.5 種々の音場での測定結果 - 残響室法吸音率との関連

3.1.2 で定義した指数が残響室の拡散性の速度として適当かどうかを検討するために、二つの残響室において拡散板の設置枚数、音源指向性を変えて種々の拡散状態の音場を実現し、仰角拡散度 d_e 、垂直・水平エネルギー比 R_1 および R_2 を測定し、その音場で測定した残響室法吸音率 α と対比した。この場合、 d_e および R_1 は一方方向について各3回の残響波形から、 R_2 については垂直方向は各12回、水平方向は各3回の残響波形からその方向の平均エネルギーを求め、各指数を算出した。Table 5 に対象とした音場の構成の詳細を、Fig. 12 ~ 14 に測定結果を示す。

これらの結果から明らかのように、残響過程の指向性分布から抽出したこれらの指数は、いずれも残響室法吸音率測定値とほぼ一義的な関係にある。すなわちこの残響室においては、

$$\begin{aligned} \alpha &= -0.76 + 1.97 d_e \\ \alpha &= 1.08 - 0.75 \log_{10} R_1 \\ \alpha &= 1.17 - 0.59 \log_{10} R_2 \end{aligned} \quad (6)$$

これらの指数のうち、 R_2 は測定が簡便で、しかも、吸音率測定値に影響する音場の拡散性の変化を最もよく表わしているといえる。

Fig. 12 ~ 14 から統計入射吸音率に対して $\pm 10\%$ 以

Table 5

field condition	volume of reverberation room	number of diffusers	source
a	157m^3	27 (120%)	5 cm speaker at the room corner
b		18 (80%)	"
c		9 (40%)	"
d		3 (13%)	"
e		0 (0%)	"
f		0 (0%)	"
g	99m^3	14 (120%)	directional speaker at the wall
h		9 (80%)	5 cm speaker at the room corner
i		5 (40%)	"
j		0 (0%)	"

(): $\frac{\text{total area of diffusers}}{\text{floor area}} \times 100(\%)$

test material : 5 cm thick glass fiber board (3.66×2.73 m) placed on the floor.

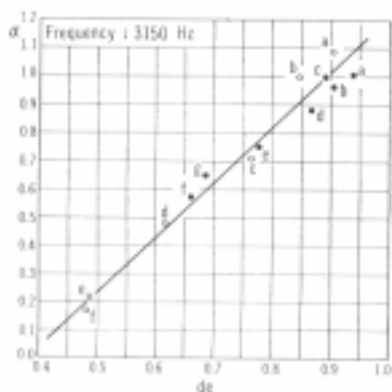


Fig. 12 Relation between the elevational diffusivity of the averages for each elevation angle energy d_e and the measured absorption coefficient α .
a ~ g : field conditions (Table 5)

Fig. 12 ~ Fig. 14

- Area of test materials : 37.5m² placed on the whole floor.
- Area of test materials : 10.0m² placed on the center of the floor.

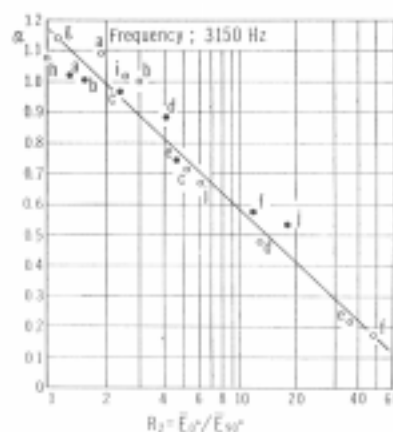


Fig. 14 Relation between the ratio of horizontal to vertical mean energy R_2 and the measured absorption coefficient α .
a ~ j : field conditions (Table 5)

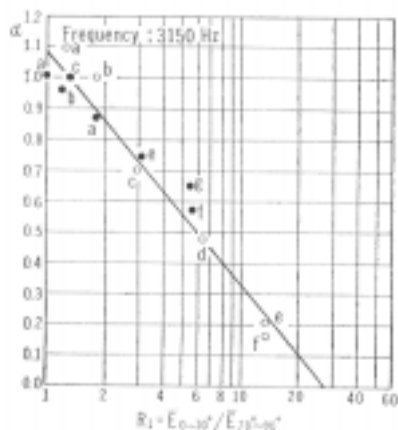


Fig. 13 Relation between the ratio of horizontal to vertical mean energy R_1 and the measured absorption coefficient α .
a ~ g : field conditions (Table 5)

内の吸音率を得るためには、仰角拡散度 d_e で 0.85 以上、垂直・水平エネルギー比 R_1 で 2 以下、 R_2 で 3 以下の音場にすればよいことがわかる。

3.2 適用例とその結果

3.2.1 拡散板の必要枚数の検討

厚さ 50 mm のグラスウール 10 m² を床に集中配置した室容積 157m³、99m³ の二残響室において、91×182 cm の拡散板の設置枚数を変え、3150Hz において、垂直・水平エネルギー比 R_2 を観測した。その結果を Fig. 15 に示す。これによれば、拡散板の使用面積の総和が床面積の 60% 以上であれば、 R_2 は 2 以下となり、十分な拡散音場が実現できることがわかる。

3.2.2 協同比較試験に参加した各測定機関の残響室音場の拡散性の検討

Table 1 の 11 と 13 を除く 11 の残響室について、

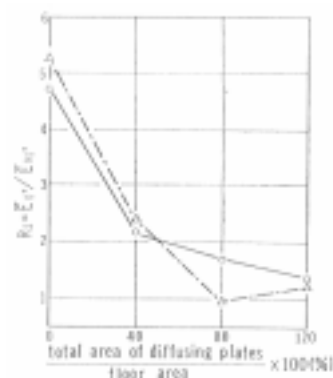


Fig. 15 Variation of the ratio of horizontal to vertical mean energy $R_2 = \bar{E}_0 / \bar{E}_{90}$ with the numbers of diffusing plates.

- Reverberation Room with a volume of 157m³
- Reverberation Room with a volume of 99m³

垂直・水平エネルギー比 R_2 を測定した。試料は厚さ 50 mm, かさ密度 25 kg/m^3 のグラスボード $3.66\text{m} \times 2.73\text{m}$ で, これを床に集中配置した状態である。また, 拡散板の試料率はいずれも床面積の 80%

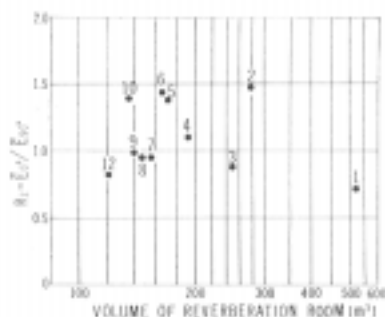


Fig. 16 Ratio of horizontal to vertical mean energy $R_2 = \bar{E}_{0h} / \bar{E}_{0v}$, measured in different reverberation room.
1 ~ 12 : Reference number of the reverberation room shown in Table 1.

である。 R_2 の測定結果を残響室容積と対比して Fig. 16 に示す。これによれば, 各残響室の R_2 の値はすべて $0.7 \sim 1.5$ の間にあり, 室容積が 120m^3 から 513m^3 の広い範囲にわたっているにもかかわらず, 少なくとも高音域の音場の拡散性については, 各残響室の間に本質的な差異のないことを示している。

4. むすび

以上のような実験およびその検討結果から, 次のようなことがいえる。

(i) 残響室法吸音測定に関する ISO 推奨規格 R-354, あるいはこれを基盤に設定した測定基準による吸音率測定値の偏差はまだ大きく, 実用上十分とは言えない。

(ii) 残響室音場の高音域における拡散性は, 試料中心軸上残響過程における指向性分布から抽出した仰角拡散度, あるいは垂直・水平エネルギー比で規定することができる。統計入射吸音率に対して $\pm 10\%$ 以内の測定値を得るためには, 仰角拡散度で 0.85 以上, 垂直水平エネルギー比 (R_2) で 3 以下の音場を実現する必要がある。

(iii) 少なくとも, 高音域に関する限り, 吸音率がほぼ 1.0 に近い吸音材約 10m^2 を床に集中配置してある室容積 120m^3 以上の残響室では, 拡散板をその片

側面積の総和が床面積の 80% になるように室内にランダムに吊せば, 残響室法吸音率測定値に影響するような拡散状態の差は表われない。

(iv) 第 3 回の協同比較試験測定結果に見られる吸音率測定値の変動は, 少なくとも高音域に関する限り, 角測定機関残響室の拡散性の差異に起因するものではなく, 他の要因によるものと考えられる。

以上の結論から, 残響室法吸音率測定精度を向上するためには, さらに他の要因について検討を行なう必要があることが明らかとなった。

また, 残響室音場の拡散性については, 他の周波数領域についても検討を進めなければならない。とくに残響室容積, 形状などの規定は, 低音域の拡散性から検討すべき事項と考えられる。低音域の音場の拡散性の測定については, 別の方法に着目しなければならないが, この場合も残響過程に着目すべきであるという観点は, 今回の検討結果から明らかとなった重要な事項の一つと考えられる。

(謝辞) 強度比較試験に参加された石井聖光氏 (東大生研), 久我新一氏 (建研), 前川純一氏 (神戸大), 松井昌幸氏 (東工大), 長友宗重氏 (鹿島技研), 樋田直人氏 (竹中技研), 後藤滋氏 (横浜国大), 安岡正人氏 (東洋大), 久保田喜八郎氏 (清水技研), 広沢徳三郎氏 (日本アスベスト) ほかの各研究機関各位, および拡散性の研究の推進に協力された日大大学院松本親男君に謝意を表します。また, 比較試験に際し, 試料, 拡散板材料などを提供された日本音響材料協会の関係各位に対し感謝の意を表します。

文 献

- 1) C.W.Kosten: Acustica, 10 (1960) 400
- 2) T.D.Northwood: Technical Note No. 309, NRC of Canada (1960)
- 3) 子安勝: 日本音響学会誌, 23 (1967) 325
- 4) E.Meyer, H.Kuttruff: Nachr. Akad. Wiss. Gottingen IIa (1958) 99
- 5) M.J.Jusofie: Acustica. 13 (1963) 280
- 6) H.Kuttruff: Acustica, 13 (1963) 120
- 7) 服部昭三: 電気試験所研究報告, 第 669 号
- 8) E.Meyer, H.Kuttruff, H.D.Gruschka: Acustica, 13 (1963) 187
- 9) R.Thiele: Acustica, 3 (1953) 291