

小型残響室を用いての透過損失の測定

(昭和62年 6月30日 原稿受付)

開発土木工学科	吉	田	勇
開発土木工学科	渡	辺	義則
ショーボンド建設	荒	瀬	規靖
日本電信電話会社	伊	藤	寿博
神鋼鋼線工業	田	川	英樹

Examination of Transmission Loss Using a Small Sized Reverberation Room

by Isamu YOSHIDA
Yoshinori WATANABE
Noriyasu ARASE
Toshihiro ITO
Hideki TAGAWA

Abstract

A small sized reverberation room, which is one fifth scale model of the sixth and seventh reverberation room in Kobayashi Institute of Physical Research, was made in order to examine various properties of acoustic materials, such as, transmission loss and coincidence effect. The room was made of stainless steel 1.2mm thick, and the outer side was covered with a lead sheet 0.5mm thick.

Subsequently several validation studies were done. First of all, whether or no fundamental properties on sound insulation, such as, mass law and coincidence effect, can be simulated in the small sized reverberation room was confirmed experimentally. Then transmission loss estimated from the measured values of the simulated model was compared with transmission loss obtained from the full scale reverberation room. As a result, sufficient results were obtained.

1. まえがき

近年、急速なモータリゼーションに伴い騒音、振動、大気汚染をはじめとする交通公害が多発し問題となっている。なかでも騒音公害は、我々の生活に身近なものであり、重要な問題である。騒音公害を防止する一つの方法は、吸音性または遮音性に優れた防音材料を開発し、道路、鉄道をはじめとする騒音発生箇所防音構造物と

して設置することである。

防音材料を開発するためには、まず、その材料の特性を知る必要がある。防音材料の特性は、吸音率、透過損失によって表されるが、これらの諸量は JIS 規格にもづく残響室法¹⁾によって測定されるのが一般的である。しかし、JIS 規格の残響室を用いて測定しようとするとき、100m³以上の残響室容積を必要とするために、これを製作し設置することは経済的負担が大きく、容易なことでは

はない。

そこで、本研究では小林理学研究所に設置されている JIS 規格残響室の 1/5 縮尺の小型残響室を作製するとともに、数種類の単板材料の透過損失の測定を行って小型残響室の性能の検討を行った。

2. 測定方法

2.1 測定システム

本研究で製作した小型残響室は、小林理学研究所に設置されている第 6 残響室、第 7 残響室の 1/5 縮尺模型である。本研究では、JIS A 1416「実験室における音響透過損失測定方法」に準拠している¹⁾。JIS A 1416の 1/

5 縮尺に相当する規格と本研究の場合を比較して表-1 に示す。また、信号発生器、増幅器をはじめとする音源装置、およびマイクロホン、精密騒音計などからなる計測装置等の実験装置を図-1 に示す。

材料の透過損失を測定する場合には、まず、試料を音源側と受信側の残響室の開口部に密着させる。音源には信号発生器を用いて白色雑音を発生させ、それをイコライザで調整して遮音の大きい高周波数域の音圧レベルを上げるようにする。その信号を増幅器で増幅した後にスピーカへ導いて音を発生させる。次に、音源側残響室で発生した音、並びに試料透過後に受信側残響室で発生した音をそれぞれのコンデンサマイクロホンで受音し、精

表-1 JIS A 1416の 1/5 縮尺に相当する規格との比較

	JIS A 1416の 1/5 縮尺に相当する規格	本研究
残響室容積	0.8m ³ 以上	1.608m ³
残響室形状	6面ないし8面体、対角線の長さの比は1~2の間(全ての面が平行でない)	7面体、対角線の長さの比は1~2の間(全ての面が平行でない)
音源	帯域雑音発生器または発音発振器と電力増幅器及びスピーカ	白色雑音発生器と電力増幅器及びスピーカ
開口部	原則として0.4m ² 、一辺が0.5m以上0.8m以下の長方形	0.59m×0.73m=0.4307m ²
中心測定周波数	0.63~20 (kHz) 1/3 オクターブ間隔	0.63~20 (kHz) 1/3 オクターブ間隔
測定点	音源、試料面、壁面、床面などから20cm以上離れた所	音源、試料面、壁面、床面などから20cm以上離れた所
測定点数	630~800 (Hz) 5箇所以上 1~2 (kHz) 4箇所以上 2.5 (kHz) 以上 3箇所以上	0.63~20 (kHz) 5箇所
残響室の吸音力	受信側残響室の吸音力を測定する	音源側小型残響室の吸音力を測定する

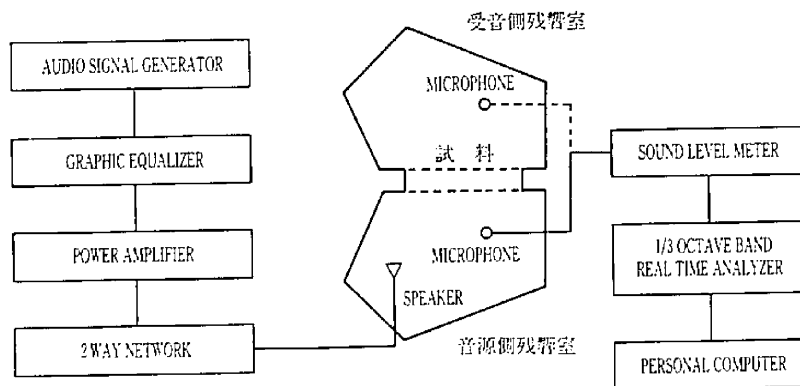


図-1 実験装置

精密音計、1/3オクターブバンド実時間分析器を通してパーソナルコンピュータへ導いて、測定点における平均的な音圧レベルを算出する。そして更に、信号発生器のスイッチを切って、音源側残響室の残響音の減衰性状を平均的な音圧レベル算出時と同様にパーソナルコンピュータで解析し、その測定点における吸音力を算出する。

音圧レベルの測定と吸音力の測定は、図-2に示すように音源側残響室の床から210mm、410mm、610mmのそれぞれ5点で行い、また、受音側残響室でも試料透過後の音圧レベルの測定を開口部をはさんで対称な位置(5点)で行う。

2.2 小型残響室の諸元

本研究で作製した小型残響室の諸元を表-2に、側面図、平面図を図-2に示す。図-2では一つの残響室しか表していないが、音源側残響室と受音側残響室は開口部をはさんで対称形となっている。

2.3 解析方法

2.3.1 平均音圧レベルの算出

音源側残響室、受音側残響室の音圧レベルはコンデン

表-2 小型残響室の諸元

小型残響室(音源側、受音側)	
容積	1.608m ³
表面積	8.2m ²
形状	7面体
壁面材料	1.2mm厚ステンレス板に0.5mm厚鉛シートを貼ったもの
開口部面積	0.59m×0.73m=0.4307m ²

サマイクロホンによって受音したのち、精密音計から1/3オクターブバンド実時間分析器に時定数0.03秒、サンプリング時間間隔0.02秒で128個記録される。この128個の音圧レベルを次式に代入してその測定点における平均的な音圧レベルを算出する(この場合には、n=128)。

$$L = 10 \log_{10} \frac{P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2}{nP_0^2} \quad \text{①}$$

L : 平均的な音圧レベル (dB)

P_i : 音圧レベルの実効値, P_i = P₀10^{(L_i-20)/20}

P₀ : 基準音圧 (0.0002 μbar)

L_i : 音圧レベル測定値 (dB)

n : データ個数

このような平均的な音圧レベルの測定を図-2に示すような5点で音源側と受音側の残響室について行い、最後にこれらの値を式①に代入して音源側と受音側の残響室の平均音圧レベルを求める(この場合にはn=5)。またこの時、両残響室の5点の平均的な音圧レベルの標準偏差を周波数毎に求め、JIS規格と照らし合わせて標準偏差の大きいものは再度測定する。

2.3.2 吸音力の算出

音源側残響室において、信号発生器のスイッチを切りスピーカからの音を止めることによって図-3に示すような残響音の減衰の様子を音源側残響室で作出す。そして、この図より残響時間を求めて吸音力を算出する。つまり、図-3で、残響音の音圧レベルが最高レベルより5dB下がった時点から、さらに、25dB減衰するまでの、時間と音圧レベルの関係を直線と見なし、この範囲で回帰分析を行う。この直線の傾きをαとすると、残響時間Tは式②で求められる。

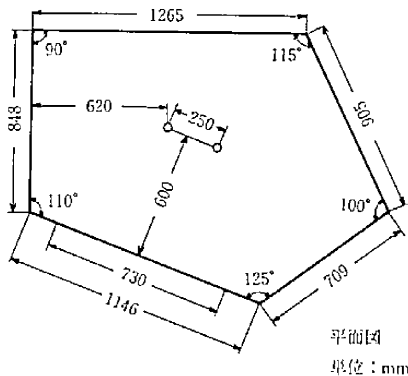
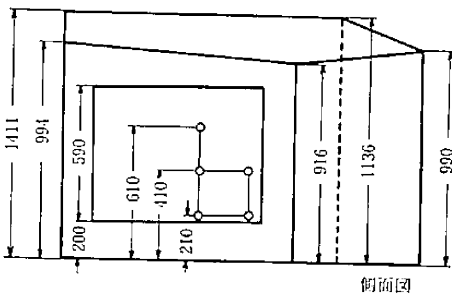


図-2 小型残響室の寸法図と受音点位置

$$T = -60/a \quad (2)$$

残響時間 T が求められると、吸音力 A は式③で算出される²⁾。

$$A = \frac{55.3V}{C} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

T : 音源側残響室残響時間 (s)

V : 音源側残響室容積 (m³)

C : 空気中の音速, $C = 331.5 + 0.6t$ (m/s)

t : 空気の温度 (°C)

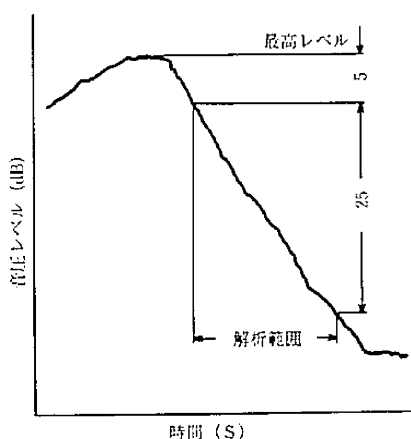


図-3 残響音の減衰の様子

2.3.3 透過損失の算出

式①②③で平均音圧レベルおよび吸音力が算出されたらこれらの値を式④に代入して透過損失 TL ²⁾ を求める。

$$TL = D + 10 \log_{10} (S/A) \quad (4)$$

S : 試料面積 (m²)

A : 音源側残響室の吸音力 (m²)

D : 空間音圧レベル差, $D = L_1 - L_2$ (dB)

L_1 : 音源側残響室音圧レベル (dB)

L_2 : 受音側残響室音圧レベル (dB)

3. 透過損失の測定

3.1 質量則及びコインシデンス限界周波数の理論値と測定値との比較

一般に均質材料で構成された単板の透過損失 TL は式⑤で求めることができる (質量則)²⁾。

$$TL = 18 \log_{10} (f \cdot M) - 44 \quad (5)$$

f : 周波数 (Hz)

M : 面密度 (kg/m²)

また、単板には剛性の影響により特定の周波数で質量則の値より透過損失が低下する現象 (コインシデンス効果) がある³⁾。この周波数は式⑥で表される。

$$f_c = \frac{C_0}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\sigma^2)}{E}} \quad (6)$$

f_c : コインシデンス限界周波数 (Hz)

C_0 : 音速 (m/s)

h : 試料の厚さ (m)

ρ : 試料の密度 (kg/m³)

σ : 試料のポアソン比

E : 試料のヤング率 (N/m²)

式⑤⑥により、ある程度の透過損失の値は理論的に予測可能となる。しかし、コインシデンス効果による質量則からの透過損失低下量についての予測は困難なので実験的な検討にたよるしかない。

本研究で用いた試料の仕様³⁾と式⑥より計算された f_c の値を表-3に示す。

図-4は、2.0, 4.0, 8.0mm厚のアクリルガラスの

表-3 試料の仕様と f_c 値

試料	厚さ (mm)	面密度 (kg/m ²)	ヤング率 (N/m ²)	f_c 値 (kHz)
アクリルガラス	2.0	2.4	6×10^9	14.2
	4.0	4.8	6×10^9	7.1
	8.0	9.6	6×10^9	3.5
ラワン合板	2.5	1.5	6×10^9	8.1
板ガラス	2.0	5.0	7×10^{10}	6.0

透過損失測定結果である。この図は同一材料で、試料の厚さのみが異なる場合の測定例である。コインシデンス効果の現れていない周波数域では質量則と測定値は比較的良くあっている。コインシデンス限界周波数 f_c の計算値を图中に矢印で示すがこれらも、それぞれ測定結果と比較的良くあっている。

図-5は、2.5mm厚ラワン合板、図-6は2.0mm厚板ガラスの透過損失測定結果である。質量則、コインシデンス限界周波数ともに計算値と比較的良くあっている。但し、低い周波数域では測定値が質量則の値よりも高くなる傾向にある。

3.2 実物大残響室における測定値との比較

本研究に使用した小型残響室は、小林理学研究所の第

6残響室、第7残響室を1/5に縮尺したものである。一般に、縮尺比1/nの小型残響室の実験周波数は、実物残響室の実験周波数のn倍となる⁴⁾。

従って、式⑤から求められる透過損失値 TL について実物大測定値と1/n縮尺測定値を一致させるには、面密度M(具体的手段としては試料の厚さ)を1/nとすれば良い。また、式⑥によって算出されるコインシデンス限界周波数 f_c については、1/n縮尺測定値での f_c 値が実物大測定値のn倍となることが必要となるが、この場合についても実験材料として実物の1/nの厚さのものを用いれば、この式は自動的に成立する。

図-7に、本小型残響室で測定した2.5mm厚ラワン合板と小林理学研究所の実物大残響室で測定された12.0mm厚ラワン合板の透過損失⁵⁾を示す。低い周波数域でやや実物大測定値が高くなっているものの、両者は比較的良くあっていると見える。同じく、図-8は、本小

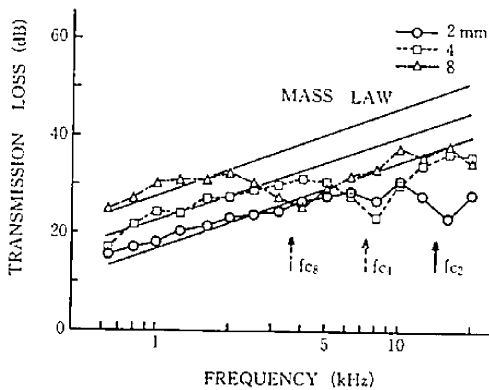


図-4 アクリルガラスの透過損失測定値 (f_c はコインシデンス限界周波数)

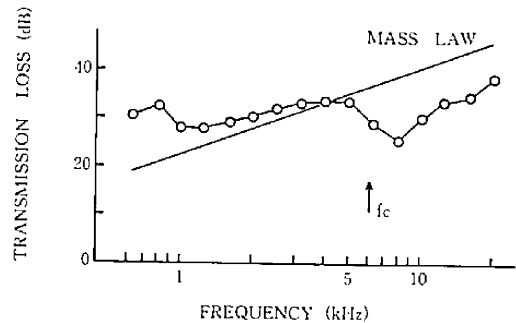


図-6 板ガラス(2.0mm)の透過損失測定値 (f_c はコインシデンス限界周波数)

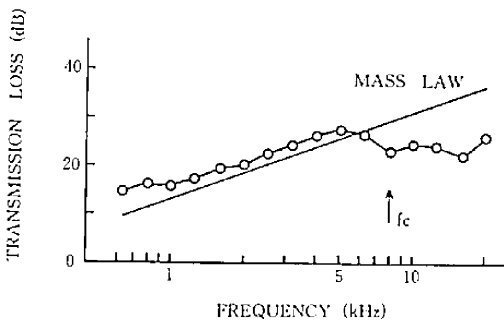


図-5 ラワン合板(2.5mm)の透過損失測定値 (f_c はコインシデンス限界周波数)

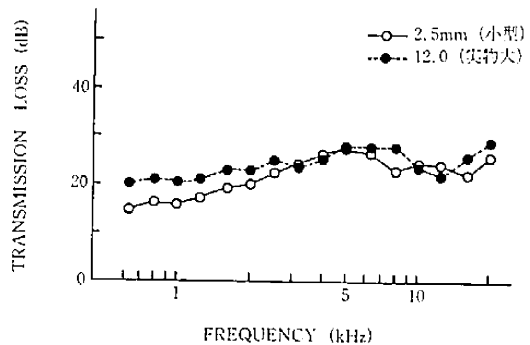


図-7 小型と実物大の残響室でのラワン合板の透過損失測定値の比較

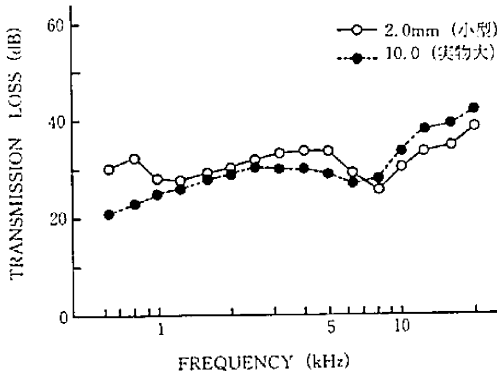


図-8 小型と実物大の残響室での板ガラスの透過損失測定値の比較

型残響室で測定した2.0mm厚板ガラスと小林理学研究所の実物大残響室で測定された10.0mm厚板ガラスの透過損失⁵⁾を示している。低周波数域で本実験値が高くなっているがそのほかは比較的良くあっている。

4. 透過損失測定可能範囲

本小型残響室の透過損失測定可能範囲は、音源側残響室から試料を透過する音による受音側残響室の音圧レベル及び小型残響室外から小型残響室の外壁(1.2mm厚ステンレスに0.5mm厚鉛シートを貼付)を透過する音による受音側残響室の音圧レベルから求められる。

まず、音源側残響室から試料を透過してきた音は受音側残響室では式⑦のようになる⁵⁾。

$$L_2 = L_1 - TL_c + 10 \log_{10} (S_c / \alpha S) \quad \text{⑦}$$

- L_2 : 受音側小型残響室音圧レベル (dB)
- L_1 : 音源側小型残響室音圧レベル (dB)
- TL_c : 試料の透過損失 (dB)
- αS : 受音側小型残響室の吸音力 (m^2)
- S_c : 試料面積 (m^2)

次に、小型残響室外から残響室の外壁を透過して受音側小型残響室へ入ってくる音による受音側小型残響室の音圧レベルは式⑧のようになる⁵⁾。

$$L_4 = L_3 - TL_b + 10 \log_{10} (S_b / \alpha S) + 6 \quad \text{⑧}$$

- L_4 : 受音側小型残響室音圧レベル (dB)
- L_3 : 小型残響室外音圧レベル (dB)
- TL_b : 小型残響室の外壁の透過損失 (dB)
- αS : 受音側小型残響室の吸音力 (m^2)
- S_b : 受音側小型残響室の表面積 (m^2)

また、残響室を設置した場所はとても静かなところであり、小型残響室外の音圧レベルは、音源側小型残響室内で音を発生させているときに小型残響室外壁を透過してくる音がほとんどである。それゆえに、小型残響室外音圧レベルは式⑨で示される。

$$L_3 = L_1 - TL_b \quad \text{⑨}$$

式⑦⑧⑨より式⑩が導かれる。

$$L_2 - L_4 = -TL_c + 2 TL_b + 10 \log_{10} (S_c / S_b) - 6 \quad \text{⑩}$$

音源側小型残響室から試料を透過して受音側小型残響室へ入った音圧レベル L_2 と、受音側小型残響室外から残響室外壁を通過してくる受音側小型残響室音圧レベル L_4 の差が10dB以上あれば受音側小型残響室音圧レベルは試料を透過してきた音が大勢を占めると考えて、式⑩から式⑪が導かれる。

$$TL_c \leq 2 TL_b - 18.5 \quad \text{⑪}$$

式⑪より、小型残響室外壁の透過損失 TL_b を測定すればこの小型残響室の透過損失測定可能範囲がわかる。

図-9に、小型残響室外壁の透過損失から求めた試料の透過損失測定可能範囲と実物大残響室で測定された軽

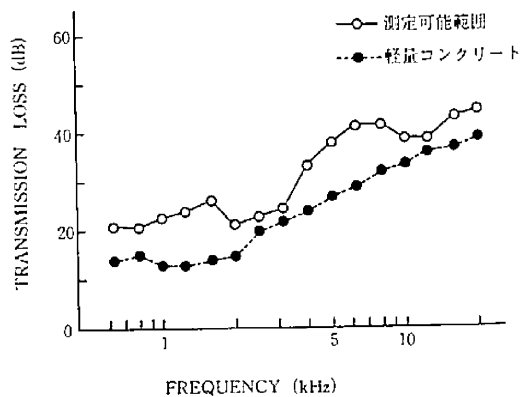


図-9 透過損失測定可能範囲

量コンクリート100mm厚（面密度124kg/m²）の透過損失値²⁾を1/5縮尺に換算して（すなわち周波数だけを5倍にして）示す。このように、図-9の実線以下の透過損失を持つ試料ならば、本小型残響室で測定可能である。更に、コインシデンス効果の影響を無視して、この他の測定可能な材料をあげると次のようになる。図-9と式⑤より、本小型残響室で測定できる最大面密度は、測定周波数域で透過損失値の落込みの大きい2.0kHzであり、その値は、27.5kg/m²（実物換算137.5kg/m²）となる。この値を基にして、本小型残響室で透過損失が測定できる一般的な材料の最大厚さは、普通コンクリート（比重2.3）で12.0mm厚、軽量コンクリート（比重1.24）で22.2mm厚、板ガラス（比重2.5）で11.0mm厚、鋼鉄（比重7.9）で3.5mm厚である。なお、これらを実物換算にするとそれぞれ60.0mm、111.0mm、55.0mm、17.5mm厚である。

5. まとめ

本研究では、実物大残響室の1/5の縮尺である小型残響室を作製するとともに、数種類の単板材料の透過損失の測定を行った。そして、この値と質量則及びコインシデンス限界周波数の計算値とを比較すること、また、実物大残響室で測定された透過損失値とを対比することにより、本小型残響室の性能を検討した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 各種単板材料の質量則及びコインシデンス限界周波数の計算値と測定値は比較的良くあっている。但し、低い周波数域では両者の間に多少の差がみられる。

(2) 実物大残響室での透過損失の測定値と本研究で作製した小型残響室のそれは比較的良くあっているが、周波数が低くなるにしたがい差が開く傾向にある。

(3) 小型残響室の外壁の透過損失を測定することによって測定可能範囲を示した。例えば、100mm厚の軽量コンクリート程度（実物大）の透過損失を持つ材料ならば本小型残響室で測定できる。

これらの結果から、本研究で作製した小型残響室は一般的にいわれている性能（質量則、コインシデンス効果）をほぼ満足しているといえるが、低周波数域での測定値については、今後さらに検討していく必要があると思われる。

参考文献

- 1) 日本音響材料協会：建築音響関係JIS解説，pp.15～18，1979.
- 2) 日本音響材料協会：建築技術者のための遮音・吸音材料.
- 3) 日本音響材料協会：建築音響シリーズ〈材料編〉2，遮音材料，技報堂，1978.
- 4) 石井聖光，橋秀樹：遮音に関する模型実験，音響技術，No. 6, 1974.
- 5) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック，技報堂，1973.