

多孔質吸音材を充填した二重壁の音響透過損失について

黒 木 荘 一 郎
(受理 昭和 58 年 5 月 31 日)

STUDY OF SOUND TRANSMISSION LOSS OF DOUBLE LAYER WALLS WITH SOUND ABSORBENT MATERIAL IN THE CAVITY

Soichiro KUROKI

Many calculating methods of the sound transmission loss of double layer wall have been developed since A. LONDON presented the wave equation of double layer walls. But none of them can predict sufficiently the sound transmission loss in the case of random incidence.

In this paper an equivalent distributed constant circuit was introduced to double layer walls, and the sound absorbent material in the cavity was strictly simulated using the equivalent circuit. It was verified that experimental results agreed with theoretical values satisfactorily.

1. 緒 言

一般建築物の壁体の構成方式として、単層壁及び二重壁が広く用いられている。居住空間の遮音対策として、侵入してくる騒音を最小限にとどめるためには、壁体の遮音性能をたかめることが一つの重要な方策となる。二重壁の中空層に多孔質吸音材（グラスウール、岩綿等）を充填すると、その遮音性能はかなり上昇することが知られている。また、断熱性能の観点からも有利になり、壁体の構造として重要な方式と言え、数多く採用されている。したがって遮音設計段階で構成壁体の遮音性能を定量的に把握しておくことが必要となってくる。

単層壁に関しては、コインシデンス限界周波数までの透過損失値を質量則によって、かなりの精度で推定することができる。一方、二重壁については、未解決の要素を数多く含んでおり、透過損失を定量的に把握することは困難である。A. LONDON の波動方程式による理論解¹⁾を中心として、いろいろな算出方法が提案されているが、未だ充分とは言えない現状にある。また、理論における仮定条件は理想条件であって、実験条件としては実現しにくいという側面もある。

本報告では、二重壁の解析に回路論的考察法を導入

した。多孔質吸音材を集中定数として把えることも可能であるが、複素表現として対応できる分布定数の形をとることによって、吸音材の特性をより自然に表わすことができる。また、回路論的に取扱うことによって、表面材の寸法や支持条件という現実的な条件をインピーダンスとして組み込むことも可能な柔軟性を有している。

2. これまでの二重壁透過損失評価法

2.1 LONDON による理論解¹⁾

A. LONDON は波動方程式を解くことによって、理論解を得ている。図 1 に示すように、無限に広がった薄い、音響インピーダンス Z_1 , Z_2 を持つ 2 つの壁が間隔 d で組み合わせられた二重壁に、平面波が入射角 θ で入射する場合、入射音圧と透過音圧の比は次式で表現される。

$$\frac{P_t}{P_i} = 1 + A(Z_1 + Z_2) + A^2 Z_1 Z_2 (1 - e^{-2jB}) \quad \text{--- (1)}$$

ここで $A = \cos\theta / 2\rho c$, $B = kd \cos\theta$ とする。したがって透過率 τ_0 は

$$\frac{1}{\tau_0} = \left| \frac{P_i}{P_t} \right|^2 = 1 + \omega^2 2Z_1 Z_2 C^2 \omega \sin B - (Z_1 + Z_2) \frac{C \cos B + \omega^2 (Z_1 - Z_2)^2 C^2 \sin^2 B}{\dots} \quad (2)$$

となる。ここで $C = \cos \theta / 2j\omega\rho c$ である。この理論では壁を空気を含まない剛壁と仮定しており、 $Z = j\omega m$ となる。実際の音場では壁に対してあらゆる方向から音波が入射してくるので(2)式の積分範囲 $0 \sim \pi/2$ を考慮すると乱入射透過率 τ は次式のようになる。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{1}{\tau_0} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta} \quad \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

したがって透過損失は式(4)で与えられる。

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (dB) \quad (4)$$

(3)式を解析的に積分することは困難であるので、電子計算機による数値積分を行っている。図2に計算結果を示す。

一方、一重壁の乱入射透過損失は質量則より次式で示される。

$$TL_s = TL_{s0} - 10 \log(0.23 TL_{s0}) \quad (dB) \quad (5)$$

$$TL_{s0} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right] \quad (dB) \quad (6)$$

ここで TL_{s0} は垂直入射透過損失である。二重壁において各壁が独立して遮音すると仮定すると透過損失は式(7)のようになる。

$$TL = TL_{s1} + TL_{s2} \quad (dB) \quad (7)$$

また、各壁の合成質量 ($m = m_1 + m_2$) を(5)(6)式に代入した場合(すなわち $d=0$ の一重壁に相当する)の計算結果も図2に示している。ここで式(3)による理論値は最も小さく、合成質量による理論値より下まわつ

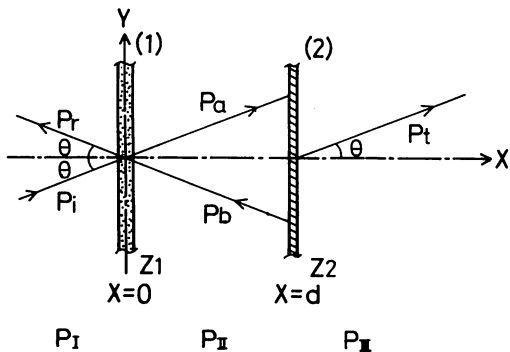
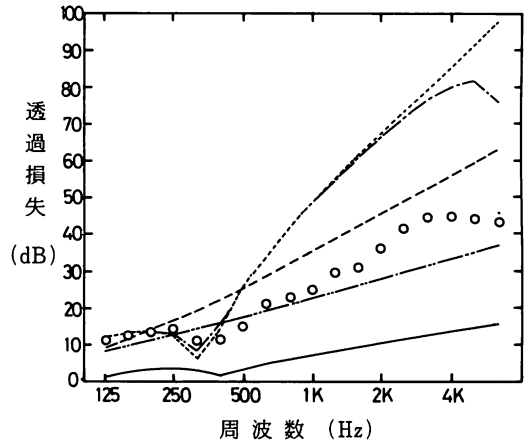


図1 二重壁の構造



- ; 等価回路, (10)式による
- · - · ; 垂直入射, (9)式による
- ; 質量則の和, (7)式による
- · - · ; 合成質量
- ; 乱入射, (3)式による
- ; 実測値, 文献9による

図2 中空二重壁(4mm合板, 中空層25mm)の透過損失比較

ている。二重壁においては低周波領域での共鳴透過周波数 f_{rma} が次式で与えられる。

$$f_{rma} = \frac{1}{2\pi \cos \theta} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \cdot \frac{\rho c^2}{d}} \quad (Hz) \quad (8)$$

したがって、式(3)の積分を行うと、あらゆる θ に対して必ずその f_{rma} が存在し、高周波領域までこの共鳴による透過損失の低下が生じる。また、この理論では、壁を無限大、かつ音場を完全拡散として仮定している。しかし、実際の残響室法測定においては、壁は有限であり、また完全拡散音場を実現することは困難である。さらに、残響室開口部に対する試料の取付条件により式(3)の積分範囲が制限を受けることになり、実測値は、中高周波数領域において、理論値ほど低下しないと考えられる。

2.2 BRÜEL による理論解²⁾

BRÜEL は二重壁の理論解を次のように与えている。

$$D = \left| \frac{P_{1t}}{P_{2u}} \right|^2 = 20 \log \left\{ \left(1 + \frac{j\omega m}{\rho c} \right) \cos kd + j \left[1 + \frac{j\omega m}{\rho c} - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega m}{\rho c} \right)^2 \right] \sin kd \right\} \text{ (dB)} \quad (9)$$

これは〔 〕内の絶対値を求めると、LONDON による式(2)で $\theta=0$ とした場合（垂直入射）と一致する。

2.3 集中定数回路による理論解

図1の遮音機構の等価回路を図3に示す。透過損失 TL_e は次式として表現できる。

$$TL_e = 10 \log \frac{\left\{ \frac{\rho c^2(m_1 + m_2)}{d} - \omega^2 m_1 m_2 + (\rho c)^2 \right\}^2}{\left(\frac{2\rho^2 c^3}{\omega d} \right)^2} + \frac{\left\{ \omega \rho c(m_1 + m_2) - \frac{2\rho^2 c^3}{\omega d} \right\}^2}{a} \text{ (dB)} \quad (10)$$

式(10)の分子を最小にする周波数として、共振周波数が表わされる。計算結果は図2に示すように、LONDON による垂直入射 ($\theta=0$) にほぼ近似している。

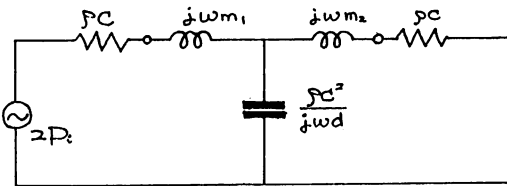


図3 二重壁の等価回路

3. 分布定数回路の導入

2で述べたように、これまでの理論では中空層内部による損失を正當に評価しているとは言えない。これは実際の残響室測定における壁の有限性に起因している。したがって、これらの要因を理論に反映させる必要がでてくる。そこで分布定数回路を導入することによって、中空層の内部損失に対応する理論的考察を行った。

3.1 一般理論

図4は分布定数回路による一般二重壁の遮音機構の等価回路である。2-P（4端子回路）のA, B, C, DはFマトリックスの縦続接続後の4定数である。ここで中空層媒質の伝搬定数 γ と特性音響インピーダンス W は一般に複素量で表わされるので、その媒質の損失を考慮することに対応する。ここでFマト

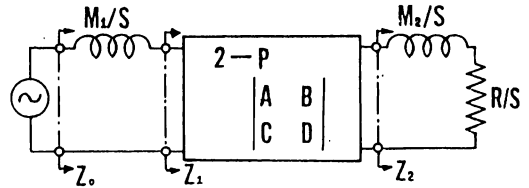


図4 二重壁の等価回路

リックスの4定数は以下のとおりとなる。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & W \sinh(\gamma d) \\ \frac{\sinh(\gamma d)}{W} & W \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \quad (11)$$

受音側の壁体と空気のインピーダンス $Z_2 (= j\omega M_2/S + R/S)$ より、中空層部分を含めたインピーダンス Z_1 は

$$Z_1 = \frac{AZ_2 + B}{CZ_2 + D} \quad (12)$$

となる。したがって、壁全体のインピーダンス Z_0 は音源側表面材のもつインピーダンスを $Z_{m1} (= j\omega M_1/S)$ とおくと

$$Z_0 = Z_{m1} + Z_1 \quad (13)$$

となり、これより透過損失は式(14)として示される。

$$TL = 10 \log \left\{ 1 / \left(1 - \left| \frac{R/S - Z_0}{R/S + Z_0} \right|^2 \right) \right\} \text{ (dB)} \quad (14)$$

ただし $R = \rho c$ は空気の特性インピーダンスである。

3.2 下地材による板の剛性を考慮した補正

後述するように残響室法透過損失測定において、表面材は間柱等の下地材によって分割されている。表面材が下地材のつくる各グリッドに単純支持されていると仮定すると、そのステイフネスによるコンプライアンスは各表面材の質量によるイナータンスに直列に接続したものとなる。したがって等価回路は図5に示すようになる。また、ステイフネスは次式となる³⁾。

$$ST = \pi^4 \frac{E t^3}{12(1 - \sigma^2)} \left(\frac{\ell^2 + n^2}{a^2 + b^2} \right) \quad (15)$$

ただし、 E はヤング率 (N/m^2)、 t は表面材の厚さ (m)、 σ はポアソン比、 $\ell \cdot n$ はモード ($\ell = n = 1$ を考慮している)、 $a \cdot b$ は各グリッド寸法 (m) である。

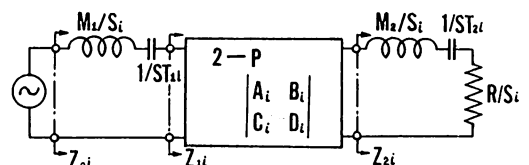


図5 板の剛性を考慮した等価回路

各グリッドにおいて、音圧が共通で体積速度が和となる関係から、壁全体のインピーダンス Z は、各グリッドのインピーダンス Z_{oi} の並列和となる。

$$Z = 1 / \left\{ \sum_{i=1}^N (1/Z_{oi}) \right\} \quad \text{————— (10)}$$

ただし、 N はグリッド数である。したがって、透過損失は式(10)より、式(14)と同様に求められる。

3.3 多孔質吸音材の等価回路

建築材料として一般に使用される多孔質吸音材は、ガラス繊維の骨格素材と、その間隙を占める空気との不規則な混合体で、解析には以下の仮定を設ける。1) 多孔質吸音材の円形毛細管モデル化、2) 有限試料、3) 多孔質吸音材の支持条件は無視できる。

多孔質吸音材内の音の伝搬は、運動及び連続の条件より、次式で示される³⁾。

$$\rho^* \frac{\partial V}{\partial t} + \text{grad} P = 0 \quad \text{————— (17)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + x^* \text{div} V = 0 \quad \text{————— (18)}$$

ここで、 P ：音圧、 v ：粒子速度、 ρ^* ：複素実効密度、 x^* ：複素実効体積弾性率である。 $\rho^* \cdot x^*$ は共に、粘性損失を伴う為、複素量で周波数の関数となるが、Scott, Beranek らの資料を整理すると次の近似式が得られる⁴⁾。

$$\rho^* \doteq \rho \left(1 - j \frac{\omega_m}{\omega} \right) \quad \text{————— (19)}$$

$$x^* \doteq x \frac{1 + j\omega/\omega_c}{r_c + j\omega/\omega_c} \quad \text{————— (20)}$$

ただし、 ρ ：多孔質吸音材の実効密度、 x ：実効体積弾性率、 r_c ：定容・定圧比熱比（空気では1.40）で、次式のように定義される。

$$\rho = m \rho_0 / \sigma \quad \text{————— (21)}$$

$$x = x_0 / \sigma \quad \text{————— (22)}$$

ここで、 m ：質量係数（円形毛細管理論では、低音域で $m=4/3$ 、高音域で $m=1$ となる。荒井⁴⁾は $m=1.5$ で実測値に近いとしている）、 σ ：ポロシティ（多孔度、一般に0.9~1.0）、 ρ_0 ：空気の密度（常温で 1.205 kg/m^3 ）、 x_0 ：空気の断熱的体積弾性率（ $\doteq 1.42 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ）である。 ρ^* が複素量となるのは多孔質吸音材中の空気粘性に起因し、 r を実効抵抗とすれば

$$j\omega\rho^* = r + j\omega\rho \quad \text{————— (23)}$$

となる。式(19)と比較すると $\omega_m = r/\rho$ となり、無損失系では $\omega_m = 0$ である。 $\omega \ll \omega_m$ ならば抵抗として、

$\omega \gg \omega_m$ ならば質量として働くから ω_m は“転移角周波数”である。 ρ 、 r は周波数の関数で、 ρ は低音域で、 r は高音域でやや増加する傾向がある。しかし、低音域では抵抗が、高音域では質量が効いてくるので、 ρ 、 r の近似値として、 $\rho_{\omega \rightarrow \infty}$ 、 $r_{\omega \rightarrow 0}$ を採っても差支えないであろう。 $r_0 = r_{\omega \rightarrow 0}$ を“流れ抵抗”という。

x^* が複素量になるのは、熱伝導に伴うエネルギー吸収に起因し、 $\omega \ll \omega_c$ では等温変化、 $\omega \gg \omega_c$ では断熱変化となり、 $\omega \doteq \omega_c$ で損失が最大となる。ここでは、等温変化 ($\omega_c \rightarrow \infty$)、断熱変化 ($\omega_c \rightarrow 0$) それぞれを仮定して計算を行っている。

次にこれらを一次元の等価回路で近似し、正弦平面波入射を仮定すると式(19)、(20)より次のようになる。

$$\frac{dP}{dx} + j\omega\rho^*V = 0 \quad \text{————— (24)}$$

$$\frac{dV}{dx} + j \frac{\omega}{x^*} P = 0 \quad \text{————— (25)}$$

媒質の境界面では、音圧 P 、体積速度 U が連続となることにより、変数を P 、 U とし、音響定数が媒質内の位置 x に依らない均一系と仮定すると次のようになる⁵⁾。

$$P_1 = P_2 \cosh(\gamma d) + Z_{\omega} U_2 \sinh(\gamma d) \quad \text{————— (26)}$$

$$U_1 = (1/Z_{\omega}) P_2 \sinh(\gamma d) + U_2 \cosh(\gamma d) \quad \text{————— (27)}$$

ここで添字1は $x=x_1$ 、添字2は $x=x_2=x_1+d$ における値を示す。 Z_{ω} 、 γ はそれぞれ特性音響インピーダンス及び伝搬定数であり、次式となる。

$$Z_{\omega} = \sqrt{\rho^* x^*} / S \quad \text{————— (28)}$$

$$\gamma = j\omega \sqrt{\rho^* / x^*} \quad \text{————— (29)}$$

式(19)、(20)を考慮すると

$$Z_{\omega} = \sqrt{\frac{(1 - j\omega_m/\omega)(1 + j\omega/\omega_c)}{r_c + j\omega/\omega_c}} \cdot \frac{\rho c}{S} \quad \text{————— (30)}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{(1 - j\omega_m/\omega)(r_c + j\omega/\omega_c)}{1 + j\omega/\omega_c}} \cdot \frac{j\omega}{c} \quad \text{————— (31)}$$

となる。ここで、式(26)、(27)は損失のある伝送線路（分布定数回路）の式と相似である。これを集中定数回路で構成すると、折線近似により、T形またはπ形単位回路の縦続接続として近似的等価回路を導く。

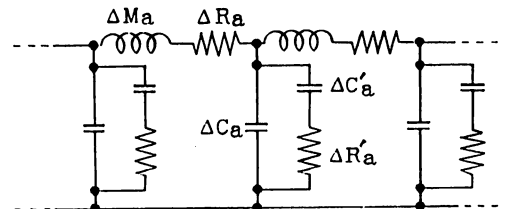


図6 吸音材の等価回路

音響管内の多孔質吸音材に平面波が入射する場合、入射方向の厚さの1分割長を $\Delta\ell$ 、試料面積を S とすれば、直列素子は抵抗分を含むインダクタンス、並列素子は誘電体吸収のあるキャパシタンスとしてシミュレートされる。(図6参照)各素子は次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_a &= \rho \Delta \ell / S, \Delta R_a = \omega_m \Delta M_a = r \Delta \ell / S \\ \Delta C_a &= S \Delta \ell / \chi, \Delta C_a' = (r-1) \Delta C_a \\ \Delta R_a' &= 1 / (\omega \Delta C_a') \end{aligned} \right\} (32)$$

ここで単位回路はT形または π 形となり、多孔質吸音材全体の回路はこの縦続接続の形として取扱ひ、2-PのFマトリックスでまとめられる。したがって、単位回路のFマトリックスを (F_i) とすると、多孔質吸音材全体のFマトリックス(F)は、その分割数が n の場合、次式のように縦続接続することにより求められる。

$$(F) = (F_1) \cdot (F_2) \cdots (F_i) \cdots (F_n) \quad (33)$$

多孔質吸音材全体のインピーダンスはこのFマトリックスとその性質により容易に求めることができる。

4. 実験的考察

4.1 透過損失測定

透過損失の測定は鹿児島大学建築学科音響実験室の透過損失測定施設でJIS A1416(残響室-残響室法)に準拠して実施した。音源室容積は207 m³、受音室容積は101 m³、試料取付け開口部面積は約7 m²である。下地は木材(木口寸法60×60 mm)により図7のように開口部に取付けている。下地の一部分を切り取ることにより、パターン1からパターン3までの3種類の下地形態としている。中空層の厚さを、9 mm合板を釘打ちによって張り足し、60~96 mmまで変化させた。表面材は900×1800 mm板を釘打ち(15 cm間隔)によって取付けた。周辺枠部分は油粘土ですき間が生じないようにふさいでいる。表1に使用材料の物性値を掲げておく。

4.2 パラメータの算出

表 1 使用材料の物性値

表面材					芯材		
名称	板厚 t (mm)	面密度 M (kg/m ²)	ヤング率 E (10 ¹⁰ N/m ²)	ポアソン比 σ	名称	密度 ρ (kg/m ³)	単位面積 流れ抵抗 r (Ns/m ⁴)
合板	3	1.40 ~1.50	0.5	0	グラスウール	16.0	2500
塩ビ板	2	2.78	0.35	0.28			

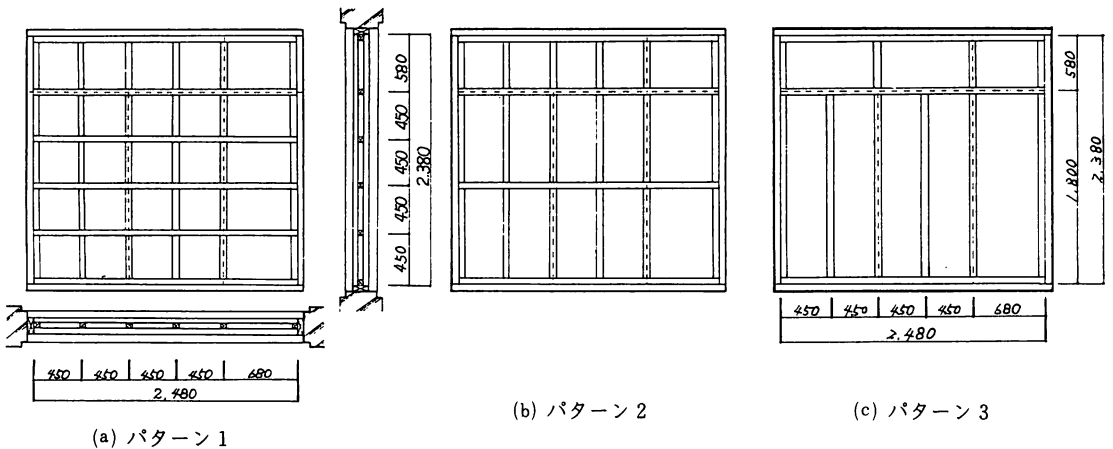


図7 下地構造形態

3.3で述べたように、多孔質吸音材を中空層部に充填した二重壁の場合、中空層媒質の伝搬定数と特性音響インピーダンスが基本量となり、近似等価回路に基づき、各パラメータは式(32)のごとく示された。ここで本測定で使用した多孔質吸音材の物性値を入れると各素子の値は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta M_a &= \rho \Delta \ell / S = (m \rho_0 / \sigma) \Delta \ell / S = 1.5 \rho_0 \Delta \ell / S \\
 &\quad (m = 1.5, \sigma = 1) \\
 \Delta R_a &= r \Delta \ell / S = (2500 \times \ell) \Delta \ell / S \\
 &\quad (r = 2500) \\
 \Delta C_a &= S \Delta \ell / \kappa = S \Delta \ell / (\kappa_0 / \sigma) = S \Delta \ell / 1.42 \times 10^5 \\
 &\quad (\sigma = 1, \kappa_0 = 1.42 \times 10^5) \\
 \Delta C_a' &= (r_c - 1) \Delta C_a = 0.4 \Delta C_a \\
 &\quad (r_c = 1.4) \\
 \Delta R_a' &= 1 / (\omega \cdot \Delta C_a) = 0 \quad (\text{等温: } \omega_c = \infty) \\
 &\quad = \infty \quad (\text{断熱: } \omega_c = 0)
 \end{aligned} \right\} (34)$$

これらの値を、T形またはπ形の単位回路として、各素子のインピーダンスを求めると次式のように示される。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{T形} \quad & \left\{ \begin{aligned}
 ZT_a &= (j\omega \Delta M_a + \Delta R_a) / 2 \\
 ZT_b &= 1 / \left(\frac{1}{\frac{1}{j\omega \Delta C_a'} + \Delta R_a'} + j\omega \Delta C_a \right) \\
 ZT_c &= ZT_a
 \end{aligned} \right. \\
 \pi形 \quad & \left\{ \begin{aligned}
 ZP_a &= ZT_a \times 2 \\
 ZT_b &= ZT_b / 2 \\
 ZT_c &= ZP_b
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right\} (35)$$

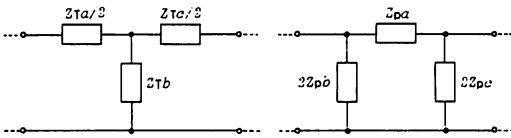


図8 単位回路

これらのインピーダンスを用い、各单位回路のFマトリックスの4定数をそれぞれ、FT_a, FT_b, FT_c, FT_d, FP_a, FP_b, FP_c, FP_dとすると次式となる。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{T形} \quad & \left\{ \begin{aligned}
 FT_a &= 1 + ZT_a / ZT_b \\
 FT_b &= ZT_a + ZT_c + ZT_a \cdot ZT_c / ZT_b \\
 FT_c &= 1 / ZT_b \\
 FT_d &= 1 + ZT_a / ZT_b
 \end{aligned} \right. \\
 \pi形 \quad & \left\{ \begin{aligned}
 FP_a &= 1 + ZP_a / ZP_c \\
 FP_b &= ZP_b \\
 FP_c &= (ZP_a + ZP_b + ZP_c) / (ZP_b \times ZP_c) \\
 FP_d &= 1 + ZP_a / ZP_b
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right\} (36)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{π形} \quad & \left\{ \begin{aligned}
 FP_a &= 1 + ZP_a / ZP_c \\
 FP_b &= ZP_b \\
 FP_c &= (ZP_a + ZP_b + ZP_c) / (ZP_b \times ZP_c) \\
 FP_d &= 1 + ZP_a / ZP_b
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right\}$$

したがって、多孔質吸音材全体のFマトリックスの4定数は、これらの素子をn個(n=10:分割数)縦続接続したものになる。

4.3 測定結果及び考察

図9～図16は、多孔質吸音材としてグラスウールを中空層に充填した、間柱等の下地材を有する二重壁(抵抗材サンドイッチパネル)の残響室法透過損失実測値と本報告による理論計算値を図示したものである。図9～図12は下地構造形態パターン1であり、図13～16は同じくパターン2を示している。(図7参照)

i) 図9は下地形態パターン1における3mm厚合板の等質材二重壁について示している。中空層厚は60mmで、図10は中空層厚を85mmに増やしている。中空層の厚さによる実測値の変化は、中低音域において、厚さが増加すると実測値も上昇している。これは他の実測値についても同様の傾向を示す。理論値はこの傾向をよく説明しており、実測値にも比較的良好一致を示している。しかし、250Hz以下の低音域では理論値は実測値よりもかなり低い値になっている。透過損失値が極小値を示す低周波共鳴周波数 f_{rma} は一致しており、中空層が厚くなると f_{rma} が低周波数側へ移動することは本理論によって説明できる。

高音域における共鳴周波数 f_{rd} は中空層の厚さ d によって決まり、媒質の種類に関係なく次式のように示される。

$$f_{rd} = \frac{n c}{2d} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (37)$$

理論値はこの f_{rd} の影響による透過損失の低下が現われているが、実測値においては顕著に現われていない。これは1/3オクターブ帯域幅について測定を行っていることに起因する。したがって理論値を帯域幅で平均すると全般的傾向は比較的一致すると言える。この場合、多孔質吸音材の抵抗によって共鳴現象が現れにくくなっていることも考えられ、媒質による影響として今後の課題としたい。

さらに高音域において、中空層が厚くなると、式(37)に示すごとく、 f_{rd} は低周波数側に移ってくる。したがって透過損失値も低下する恐れがあり、理論値は実測値の低下をよく表わしている。

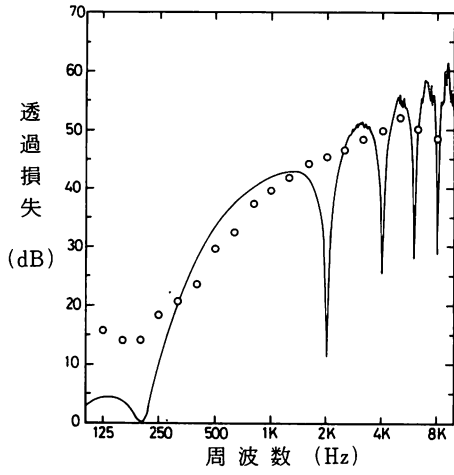


図9 合板+グラスウール(厚60mm)+合板(パターン1)

—; 理論値, ○; 実測値

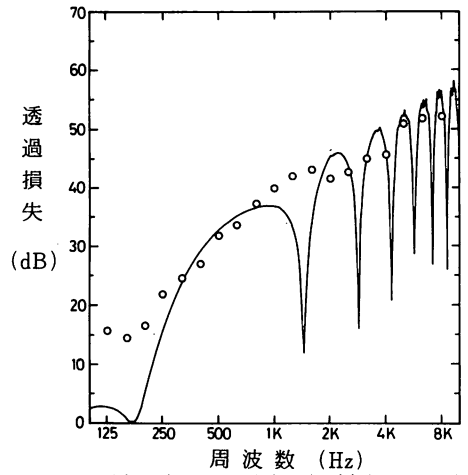


図10 合板+グラスウール(厚85mm)+合板(パターン1)

—; 理論値, ○; 実測値

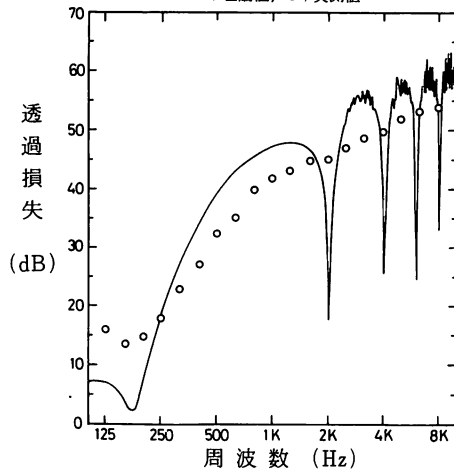


図11 塩ビ板+グラスウール(厚60mm)+合板(パターン1)

—; 理論値, ○; 実測値

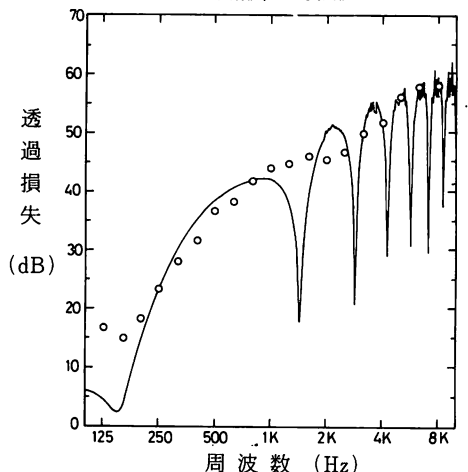


図12 塩ビ板+グラスウール(厚85mm)+合板(パターン1)

—; 理論値, ○; 実測値

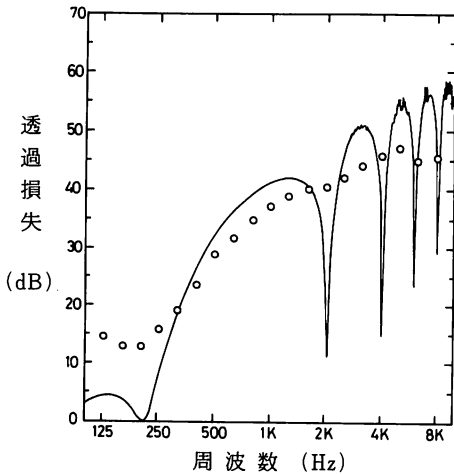


図13 合板+グラスウール(厚60mm)+合板(パターン2)

—; 理論値, ○; 実測値

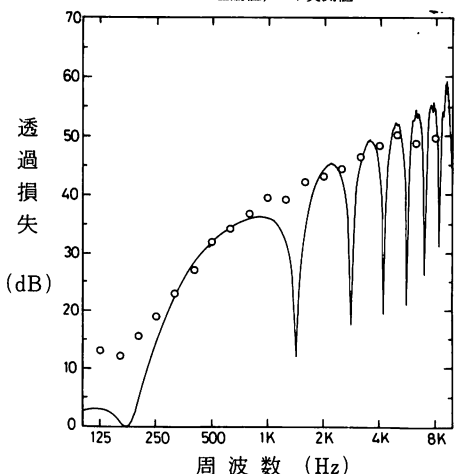


図14 合板+グラスウール(厚85mm)+合板(パターン2)

—; 理論値, ○; 実測値

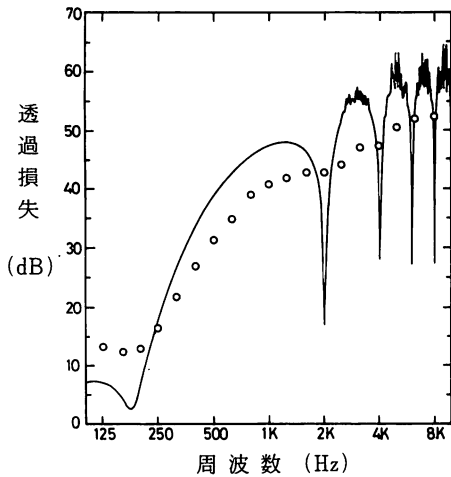


図15 塩ビ板+グラスウール(厚60mm)+合板(パターン2)
—:理論値, ○:実測値

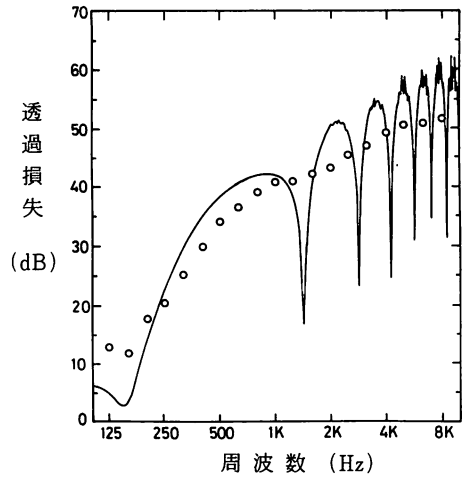


図16 塩ビ板+グラスウール(厚85mm)+合板(パターン2)
—:理論値, ○:実測値

ii) 図 11~12 は音源側の表面材を塩化ビニール板とした異質材二重壁の結果を示している。本理論による、低音域の共鳴透過周波数 f_{rmd} における、透過損失計算値は、等質材の場合 $TL=0\text{dB}$ となるが、異質材の場合零まで低下しない。これは異質材を使用することの有利性を示している。表 1 に示すように、塩化ビニール板は合板に比較して面密度が大きくなっている。面密度が増加すると透過損失値は平行移動的に上昇する。理論値も実測値と同様な変化が現われており、特に中空層厚 85 mm において顕著に現われている。理論値は実測値に良く一致していると言える。

iii) 図 13~16 は下地形態をパターン 2 (図 7 参照) とした場合の結果を示している。下地形態による補正は 3.2 で述べている。すなわち、表面材の剛性によるスティフネスのコンプライアンスは、表面材の質量によるイナータンスに直列に加わってくる。また式(15)のスティフネスの定義より、表面材の寸法が大きくなるほど、スティフネスは小さくなり、結局、単位面積当りのインピーダンスは小さくなる。したがってパターン 1 に比較してパターン 2 の場合、透過損失は低下する。理論値による低下量は実測値の低下量ほど顕著には現われていない。これは試料全面積に対して、下地材の占める面積の割合が、パターン 1 において 18%、パターン 2 において 13.6% とかなりの割合を示しており、試料全体の剛性を考慮する必要があると考えられる。

5. 結 語

(1) 本報告では、多孔質吸音材を充填した二重壁に対し、等価回路を導き解析を行った。特に、多孔質吸音材のシミュレートとして、一次元の回路論的評価を行っている。二重壁全体としては、分布定数回路による評価法を導入することにより、一般理論として二重壁の透過損失評価法を与えている。したがって、表面材のインピーダンス及び中空層の損失を回路定数の中に組み入れることによって合理的に評価できるという特徴をもっている。

(2) 本理論を下地材を有する吸音性二重壁に適用し、実測結果に対して、かなりの精度で説明できることを確認した。

(3) 本報告では、多孔質吸音材のシミュレートに重点を置いたが、一次元解析であるために、表面材の内部損失や中空層媒質内の振動モードの解析として限界がある。特に、中空層が空気の場合、有限壁で問題となってくる。したがって、多次元解析による本理論の展開が必要となる。

(4) 下地材により分割された二重壁は、表面材の剛性や中空層内の振動モードにより、透過損失値が変化する。今回、板の剛性を考慮した補正を導入したが充分とは言えず、今後の問題として残っている。

謝 辞

本研究の計算は大迫勝彦氏に負う所が多い、また実

験及びデータ整理は卒業生高吉邦治君、竹内弘明君、矢ヶ部博君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) A. LONDON : TRANSMISSION OF REVERBERANT SOUND THROUGH DOUBLE WALLS, J.A.S.A. (1950) 22 (2)
- 2) P.V.BRÜEL : SOUND INSULATION and ROOM ACOUSTICS, Chapman and Hall, London, (1951)
- 3) L.L.BERANEK : ACOUSTICS, McGraw-Hill Book Company (1954)
- 4) 荒井昌昭：多孔質吸音材のシミュレーションについて、日本音響学会誌 (1963) 19 (1)
- 5) 川上正光：基礎電気回路 I, コロナ社 (1960)
- 6) C. Zwicker & C. W. Kosten : Sound Absorbing Materials, Elsevier Publishing Company (1949)
- 7) 子安勝：吸音材料, 技報堂, 昭和 51 年
- 8) 久我新一：建築用遮音材料, 技術書院, 昭和 49 年
- 9) 騒音対策ハンドブック;日本音響材料協会編, 技報堂, 昭和 41 年
- 10) 久我新一：サンドイッチパネルの遮音性ならびに遮音構造のシミュレーションについて (建築部材の遮音性の研究・第 4 報), 日本建築学会論文報告集, 第 128 号, 昭和 41 年 10 月

付録 I サンドイッチパネルの使用材料の特性値 (測定：鹿児島大学)

測定 番号	表 面 材										芯 材			気温 (℃)	試料 面積 (m^2) (下地)	
	音 源 側					受 音 側					名称	D (mm)	ρ (kg/m^3)			r (NS/m^3)
	名称	t (mm)	M (kg/m^2)	E ($10^{10}N/m^2$)	σ	名称	t (mm)	M (kg/m^2)	E ($10^{10}N/m^2$)	σ						
KA-01	合板	3	1.50	0.50	0.00	合板	3	1.50	0.50	0.00	G. W	60	16.0	2500.0	29.6	5.90 (PN.1)
KA-02	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	67	同上	同上	32.9	同上
KA-03	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	76	〃	〃	30.8	〃
KA-04	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	85	〃	〃	28.8	〃
KA-05	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	96	〃	〃	28.6	〃
KA-06	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	105	〃	〃	29.5	〃
KA-07	塩ビ板	2	2.78	0.35	0.28	〃	〃	〃	〃	〃	〃	60	〃	〃	31.6	〃
KA-08	同上	同上	同上	同上	同上	〃	〃	〃	〃	〃	〃	67	〃	〃	32.3	〃
KA-09	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	76	〃	〃	30.4	〃
KA-10	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	85	〃	〃	29.9	〃
KA-11	合板	3	1.38	0.50	0.00	〃	〃	1.38	〃	〃	〃	60	〃	〃	32.4	5.90 (PN.2)
KA-12	同上	同上	同上	同上	同上	〃	〃	同上	〃	〃	〃	67	〃	〃	29.8	同上
KA-13	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	76	〃	〃	30.1	〃
KA-14	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	85	〃	〃	27.0	〃
KA-15	塩ビ板	2	2.78	0.35	0.28	合板	3	1.38	0.50	0.00	G. W	60	16.0	2500.0	30.9	5.90 (PN.2)
KA-16	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	67	同上	同上	30.7	同上
KA-17	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	76	〃	〃	29.8	〃
KA-18	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	85	〃	〃	28.2	〃

注) G. W. : グラスウール E : ヤング率 M : 面密度 t : 板厚 σ : ポアソン比 D : G. W.厚 ρ : 密度 r : 単位面積流れ抵抗

(測定：鹿児島大学)

付録Ⅱ サンドイッチパネルの透過損失測定値

測定番号	F(Hz)																		
	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
KA-01	15.7	14.0	14.2	18.5	20.8	23.7	29.6	32.5	37.4	39.7	41.8	44.3	45.5	46.7	48.5	49.9	52.2	50.2	48.6
KA-02	14.4	15.2	14.4	18.5	21.6	24.6	29.4	32.6	37.3	39.6	41.4	43.6	43.4	44.8	46.3	47.4	50.4	50.5	48.8
KA-03	15.3	14.6	16.3	22.3	23.9	26.6	31.7	34.4	38.6	40.5	43.1	44.5	43.9	44.6	47.0	48.6	52.8	54.0	52.8
KA-04	15.7	14.4	16.5	21.9	24.6	27.0	31.8	33.6	37.3	39.9	42.0	43.2	41.6	42.7	45.0	45.7	50.9	51.8	52.2
KA-05	14.3	13.9	18.4	23.2	25.5	28.2	33.3	35.1	38.8	40.1	42.8	44.0	43.1	44.6	46.7	48.2	53.2	54.2	54.0
KA-06	14.0	13.3	16.5	21.2	25.2	26.8	31.8	33.8	37.3	38.4	41.6	44.8	44.8	46.2	48.9	51.2	55.9	57.5	56.4
KA-07	16.0	13.5	14.8	18.0	22.9	27.1	32.5	35.1	39.9	41.8	43.1	44.9	45.1	47.0	48.7	49.7	51.9	53.2	53.8
KA-08	14.9	13.6	15.7	19.4	24.7	27.7	32.1	34.7	39.2	41.2	43.5	44.3	44.8	46.1	47.7	49.4	52.0	53.9	54.1
KA-09	15.6	13.9	18.2	22.8	27.4	30.5	35.0	37.2	40.9	42.8	44.4	45.9	44.5	45.6	46.9	49.2	53.2	55.3	56.2
KA-10	16.7	14.9	18.2	23.3	28.0	31.6	36.7	38.2	41.2	44.0	44.7	46.0	45.4	46.7	49.8	51.7	56.0	57.7	57.9
KA-11	14.6	13.0	12.9	15.9	19.2	23.5	28.9	31.7	34.9	37.2	39.0	40.2	40.6	42.2	44.2	45.9	47.2	45.0	45.6
KA-12	13.1	11.3	13.7	16.0	20.5	24.7	30.0	33.2	36.5	38.9	40.2	41.9	43.0	44.4	46.8	48.3	48.9	46.1	46.6
KA-13	13.2	11.8	12.9	16.2	22.1	25.1	29.9	33.9	36.1	39.0	40.6	42.1	42.4	44.1	46.4	48.3	50.6	49.2	49.5
KA-14	13.1	12.1	15.5	18.9	22.9	26.9	31.8	34.2	36.8	39.4	39.1	42.1	43.0	44.3	46.4	48.3	50.1	48.6	49.5
KA-15	13.2	12.3	12.9	16.4	21.7	26.8	31.2	34.7	38.9	40.7	41.7	42.7	42.7	44.0	46.9	47.2	50.4	51.9	52.3
KA-16	13.1	11.6	14.9	17.8	23.3	28.3	32.1	35.3	38.7	41.5	42.2	42.6	42.6	44.2	46.8	48.4	50.4	52.4	53.1
KA-17	13.2	11.7	16.1	19.1	23.9	28.8	33.8	36.5	39.5	41.8	42.6	43.7	44.6	46.1	47.9	50.2	52.4	53.4	53.9
KA-18	12.8	11.7	17.6	20.3	24.9	29.7	34.0	36.4	39.0	40.8	40.9	42.1	43.2	45.4	47.0	49.2	50.5	50.8	51.6