

軽量間仕切り壁のしゃ音性状

—三重壁の性質—

田原靖彦
久保田喜一郎

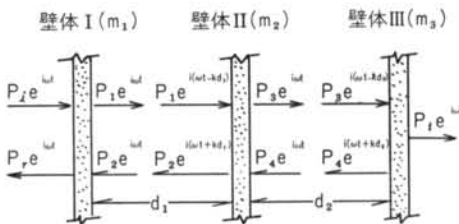
§ 1. はじめに

壁体構成の中で中空パネルまたは二重壁と呼ばれる複合壁構造は、同等の重量の単層壁に比して、高度のしゃ音性能が期待できるものとして好んで用いられており、理論解析もある程度なされているが¹⁾、三重以上の多重壁に関しては実測例も少なく、不明確な点が多い。

二重壁の場合、ある特定の周波数で共鳴透過がおりその周波数付近の透過損失が著しく低下する傾向があるため、共鳴周波数の推定が壁体設計上の最大のポイントとなっている。

三重以上の多重壁は同等重量の二重壁を上回るしゃ音性能が期待できると同時に、二重壁でみられる共鳴周波数が複数となり、弱点となる周波数領域が広域化する可能性を持っている。

現在、二重壁の共鳴周波数は、平面波が垂直に入射す



図一 中空三重壁のしゃ音理論

ただし、 m_1, m_2, m_3 : 各壁体の面密度
 d_1, d_2 : 中空層の厚さ、 $k = \omega/C$
 ω : 角周波数、 C : 空気中の音速

る仮定から波動的に解析された式、壁体を質量とパネからなる振動系とみなして解析された式等、いずれも空間を一次的に扱った近似式で算定されているが、ランダム入射音に対する実測結果ともよい対応を示している。こうした事実から、三重壁の共鳴周波数を求める実用式も、一次的な扱い方によって誘導されることが推定できる。

本稿では、多重壁のしゃ音性状が共鳴透過現象にかなりの部分支配される点に着目し、一次的な扱い方によって三重壁の透過損失の理論解を誘導するとともに、実測値との対応を考察し、軽量間仕切りとしての三重壁の可能性を検討している。

§ 2. 透過損失の理論解

2.1 中空三重壁

理論解の誘導にあたって次のような仮定を導入する。

- (1) 平面波が垂直に入射する
- (2) 一樣な面密度をもった壁体を平行に配置する
- (3) 各壁体は全面同位相で振動する
- (4) 各種の抵抗減衰力は無視する

これらの仮定により、入射音圧 $P_i e^{i\omega t}$ に対する各壁体の両側の音圧は、図一1のようにあらわすことができる。

各壁体に対して両側の圧力差による運動方程式と粒子速度の連続条件を適用して整理すれば(1)式を得る。注1)

注1) たとえば壁体IIの場合、次式が成立する。

$$(P_1 e^{-ikd_1} + P_2 e^{ikd_1}) e^{i\omega t} - (P_3 + P_4) e^{i\omega t} = Z_{W2} \cdot v_2 \quad (Z_{W2} = i\omega m_2 : \text{壁のインピーダンス})$$

$$v_2 = \frac{(P_1 e^{-ikd_1} - P_2 e^{ikd_1}) e^{i\omega t}}{\rho C} = \frac{(P_3 - P_4) e^{i\omega t}}{\rho C} \quad (\rho : \text{空気の密度})$$

壁体I, IIIについても同様である。

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{1}{8} \left[(2 + A_1 i)(2 + A_2 i)(2 + A_3 i) + A_1 A_3 (2 - A_2 i) e^{-2ik(d_1 + d_2)} \right. \\ \left. + A_2 A_3 (2 + A_1 i) e^{-2ikd_2} + A_1 A_2 (2 + A_3 i) e^{-2ikd_1} \right] \quad \dots(1)$$

ただし, $A_J = \omega m_J / \rho C$ ($J=1, 2, 3$), ρ : 空気の密度

したがって, 中空三重壁の透過損失は(2)式であらわされる.

$$TL_{III A} = 10 \log_{10} \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2 = 10 \log_{10} \left[1 + \left\{ \frac{\omega(m_1 + m_2 + m_3)}{2\rho C} \right\}^2 \cdot \frac{f(\omega)_{III}}{(1 + \beta + \gamma)^2} \right] \quad \dots(2)$$

$$f(\omega)_{III} = (1 + \beta + \gamma)^2 - 4 \left\{ \gamma \sin^2 k(\overline{d_1 + d_2}) + \beta \sin^2 k \overline{d_1} + \beta \gamma \sin^2 k \overline{d_2} \right\} \\ - A_1 \left\{ \beta(1 + \beta) \sin 2k \overline{d_1} + \beta \gamma (\beta + \gamma) \sin 2k \overline{d_2} + \gamma(1 + 2\beta + \gamma) \sin 2k(\overline{d_1 + d_2}) \right\} \\ + A_1^2 \left\{ \gamma(\gamma + 2\beta + 2\beta\gamma + \beta^2) \sin^2 k(\overline{d_1 + d_2}) - \beta^2 \gamma \sin^2 k(\overline{d_1 - d_2}) \right. \\ \left. - \beta(2\gamma^2 - \beta) \sin^2 k \overline{d_1} - \beta \gamma (2 - \beta \gamma) \sin^2 k \overline{d_2} \right\} \\ - A_1^3 \beta \gamma \left\{ \gamma(1 + \beta) \sin 2k \overline{d_1} \cdot \sin^2 k \overline{d_2} + (\beta + \gamma) \sin 2k \overline{d_2} \cdot \sin^2 k \overline{d_1} \right\} \\ + A_1^4 (\beta \gamma \sin k \overline{d_1} \cdot \sin k \overline{d_2})^2$$

ただし, $\beta = m_2/m_1$, $\gamma = m_3/m_1$

二重壁の透過損失は $m_3 = 0$, $d_1 = d$ として(3)式であらわされる.

$$TL_{II A} = 10 \log_{10} \left[1 + \left\{ \frac{\omega(m_1 + m_2)}{2\rho C} \right\}^2 \cdot f(\omega)_{II} \right] \quad \dots(3)$$

$$f(\omega)_{II} = \left[\cos k \overline{d} - \left\{ \frac{m_1 m_2 \omega}{\rho C(m_1 + m_2)} \right\} \sin k \overline{d} \right]^2 + \left\{ \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right\}^2 \sin^2 k \overline{d}$$

低音域では kd_1 , kd_2 , kd の値が微小となり, 次の近似式が成立する.

$$\sin(Nkd_1 + Lkd_2) \doteq Nkd_1 + Lkd_2 \quad [N, L=0, 1, 2] \\ \sin k \overline{d} \doteq kd, \quad \cos k \overline{d} \doteq 1 \quad \dots(4)$$

さらに実用的範囲として(5)式を仮定すれば, (2), (3)式における~~~~~の部分を実用上無視でき, (2), (3)式はそれぞれ(6), (7)式で近似される.

$$\left. \begin{aligned} m_J/d_1 \geq 30 \quad (\text{MKS 単位}) \quad [I=1, 2 \quad J=1, 2, 3] \\ 0.1 \leq m_2/m_1 \leq 10, \quad 0.1 \leq m_3/m_2 \leq 10, \quad 0.1 \leq m_1/m_3 \leq 10 \end{aligned} \right\} \quad \dots(5)$$

$$TL_{III A} \doteq 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\omega M}{2\rho C} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{Ar1}} \right)^2 \right\}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{Ar2}} \right)^2 \right\}^2 \right] \quad \dots(6)$$

$$\omega_{Ar1} = \sqrt{\frac{\rho C^2}{MD}} R_1, \quad \omega_{Ar2} = \sqrt{\frac{\rho C^2}{MD}} R_2$$

$$M = m_1 + m_2 + m_3, \quad D = d_1 + d_2, \quad \alpha = d_2/d_1$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 \Big\} &= \frac{(1 + \alpha)(1 + \beta + \gamma)}{2\alpha\beta\gamma} \left[(\beta + \gamma) + \alpha\gamma(1 + \beta) \mp \sqrt{[(\beta + \gamma) - \alpha\gamma(1 + \beta)]^2 + 4\alpha\gamma^2} \right] \\ R_2 \Big\} & \end{aligned} \right\}$$

$$TL_{II A} \doteq 10 \log_{10} \left[1 + \left\{ \frac{\omega(m_1 + m_2)}{2\rho C} \right\}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{Ar}} \right)^2 \right\}^2 \right] \quad \dots(7)$$

$$\omega_{Ar} = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)\rho C^2}{m_1 m_2 d}}$$

2.2 弾性三重壁

次に, 中空壁の中空部分が弾性材に置き代った壁体について考える. 中空壁の場合と同様の仮定をおこなえば, 弾性三重壁のしゃ音機構は図-2のようにモデル化できよう. $P_i e^{i\omega t}$, $P_r e^{i\omega t}$, $P_t e^{i\omega t}$ はそれぞれ入射波, 反射波, 透過波の音圧をあらわしている.

一般に, 強制力が作用する場合の系の振動は, 強制力と同一の振動数を有する特別解と, 強制力がなく自由振動する場合の一般解の一次結合として表現される. 図-2のモデルでは, 系から音波としてエネルギーを放出するから, 自由振動成分は減衰振動となる. したがって, 音波が入射してから十分に長い時間を経て定常状態に達してしまえば自

由振動成分を無視することができ、図-2のような反射波、透過波の表現が可能となる。

このとき、力のつりあいと振動速度の連続条件から、 x_1, x_2, x_3 を各壁体の振動変位として次の関係を得る。

[壁体 I]

$$(P_t + P_r)e^{i\omega t} + K_1(x_2 - x_1) = m_1 \cdot \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad \dots (8)$$

$$\frac{(P_t - P_r)e^{i\omega t}}{\rho C} = \frac{dx_1}{dt} \quad \dots (9)$$

[壁体 II]

$$K_1(x_1 - x_2) + K_2(x_3 - x_2) = m_2 \cdot \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad \dots (10)$$

[壁体 III]

$$K_2(x_2 - x_3) - P_t e^{i\omega t} = m_3 \cdot \frac{d^2 x_3}{dt^2} \quad \dots (11)$$

$$\frac{P_t e^{i\omega t}}{\rho C} = \frac{dx_3}{dt} \quad \dots (12)$$

$x_1 = B_1 e^{i\omega t}, x_2 = B_2 e^{i\omega t}, x_3 = B_3 e^{i\omega t}$ (B_1, B_2, B_3 : 複素定数) とおいて整理し、さらに実用的範囲として(5)式を仮定すれば、透過損失の近似解として(13)または(13')式を得る。

$$TL_{III B} = 10 \log_{10} \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2 \doteq 10 \log_{10} \{1 + g(\omega)\} \quad \dots (13)$$

$$g(\omega) = \left(\frac{\omega}{2K_1 K_2 \rho C} \right)^2 [\omega^4 m_1 m_2 m_3 - \omega^2 \{K_1 m_3 (m_1 + m_2) + K_2 m_1 (m_2 + m_3)\} + K_1 K_2 (m_1 + m_2 + m_3)]^2$$

$$TL_{III B} \doteq 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left\{ \frac{\omega(m_1 + m_2 + m_3)}{2\rho C} \right\}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{Br1}} \right)^2 \right\}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{Br2}} \right)^2 \right\}^2 \right\} \quad \dots (13')$$

$$\frac{\omega_{Br1}^2}{\omega_{Br2}^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{(m_1 + m_2)K_1}{m_1 m_2} + \frac{(m_2 + m_3)K_2}{m_2 m_3} \mp \sqrt{\left\{ \frac{(m_1 + m_2)K_1}{m_1 m_2} - \frac{(m_2 + m_3)K_2}{m_2 m_3} \right\}^2 + \frac{4K_1 K_2}{m_2^2}} \right]$$

ただし、 $K_J (= E_J/d_J)$: 芯材の単位面積あたりのバネ定数

E_J : 芯材のヤング率, d_J : 芯材の厚さ [$J=1, 2$]

(13)式と(13')式は表現方法が異なるだけで内容は全く等しい。

バネ定数 K の芯材を介して面密度 m_1, m_2 の壁体がある二重壁の透過損失は、三重壁と同様の方法により(14)式であらわされる。

$$TL_{II B} \doteq 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left\{ \frac{\omega(m_1 + m_2)}{2\rho C} \right\}^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{Br}} \right)^2 \right\}^2 \right\} \quad \dots (14)$$

$$\omega_{Br} = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)K}{m_1 m_2}}$$

2.3 理論式の考察

(13')式の $\omega_{Br1}, \omega_{Br2}$ は図-3(b)の固有振動数、(14)式の ω_{Br} は図-3(a)の固有振動数とそれぞれ一致することは容易に確かめることができる。これは一般の多重壁が、質量とバネからなる振動系におきかえた場合の固有振動数において共鳴透過をおこすことを示唆するものである。

(13)式は K_1, K_2 のいずれかを無限大とすれば(14)式と同形となって二重壁をあらわし、両者を無限大とすれば質量則を示す。また(13')式は $K_1 = \rho C^2/d_1, K_2 = \rho C^2/d_2$ とおけば(6)式と全く一致する。したがって、(13)または(13')式は

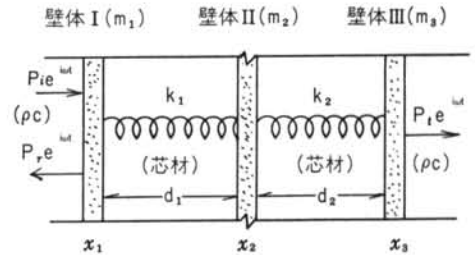


図-2 弾性三重壁のしゃ音理論
ただし、 K_1, K_2 : 芯材の単位面積バネ定数
 x_1, x_2, x_3 : 各壁体の振動変位

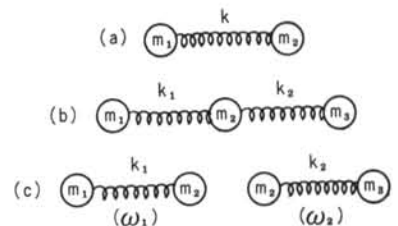


図-3 二、三重壁の振動モデル

特別な場合として質量則，二重壁の透過損失，中空三重壁の透過損失等を含んだ，弾性三重壁の透過損失に関する一般式といふことができる。

図一3(b)の振動系を(c)のような2つの系に分解し，それぞれの固有振動数を w_1 ， w_2 とすれば， w_{Br_1} ， w_{Br_2} は次のようにあらわすことができる。

$$\frac{w_{Br_1}^2}{w_{Br_2}^2} = \frac{1}{2} \left\{ w_1^2 + w_2^2 \pm \sqrt{(w_1^2 - w_2^2)^2 + \frac{4K_1 K_2}{m_2^2}} \right\} \quad \dots (5)$$

したがって， w_{Br_1} は w_1 と w_2 の小なる方より小さく， w_{Br_2} は w_1 と w_2 の大なる方より大きい。

中空三重壁の場合には，第2共鳴角周波数 w_{Ar_2} をできるだけ低くとることが壁体設計上の一つの目標となりうる。一方， $M \times D$ （総面密度と総中空層厚の積）を一定とすることは経済性一定の条件とみなしうるので， $M \times D$ 一定のもとで w_{Ar_2} の最小値を求めてみよう。(6)式によれば， $M \times D$ 一定における w_{Ar_2} の最小値は R_2 が最小の場合に得られる。電算機を用いて調べた結果， R_2 の最小値は16であり， $\beta = \gamma = 1$ ， $\beta = 2$ のとき得られる。したがって

$$w_{Ar_2}(\min) = \sqrt{\frac{16\rho C^2}{MD}} \quad \dots (6)$$

一方，中空層厚 D ，壁体総面密度 M の中空二重壁では， $M \times D$ 一定のとき w_{Ar} の最小値は $m_1 = m_2$ のとき得られ，

$$w_{Ar}(\min) = \sqrt{\frac{4\rho C^2}{MD}} \quad \dots (7)$$

したがって，

$$\frac{w_{Ar_2}(\min)}{w_{Ar}(\min)} = 2 \quad \dots (8)$$

これは，中空三重壁の共鳴周波数が，等しい経済性をもつ中空二重壁の共鳴周波数より1オクターブ高くなることを意味している。

§ 3. シャ音性能の実測値

3.1 はじめに

壁体の透過損失は一般に，2～10 m²程度の資料を実際の使用状態に応じて施工して測定されている。この方法では実際の壁体のシャ音性能が測定できる利点はあるが，二，三重壁の場合は測定値の中に壁周辺の枠や間柱を介する固体伝搬成分の影響をかなりの部分含むため，本稿における理論式との対応をみる際には問題がある。

これに対して，比較的小きな資料を間柱を用いず周辺の枠のみで支持し，さらに枠を取り付け面に完全に固定すれば，固体伝搬成分の影響をかなり軽減できる。また小資料を用いた測定では資料の着脱が容易なため，測定に要する時間を大幅に短縮できる利点を持っている。

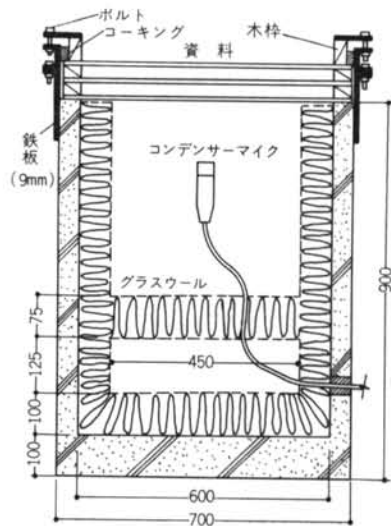
本節ではまず最初に，小資料を用いたシャ音性能の測定方法，測定結果等について報告し，次に，一般の方法で測定された三重壁に関する数例の実測結果を紹介している。

3.2 小資料を用いたシャ音性能の測定

3.2.1 測定装置

壁体のシャ音性能を測定するため図一4に示す装置を

製作した。装置は50mm厚のコンクリートで作られており，内部はかさ密度40kg/m³のグラスウールで吸音処理されている。資料は装置の開口部(600mm×600mm)に装着され，上から開口部と同じ内法寸法の木枠で締めつけられる。この装置を室容積約80m³のコンクリート造の部



図一4 測定装置

屋に入れ、資料着脱時の音圧レベルを測定し、その差で資料のしゃ音性能を表現した。

音源には1/3オクターブバンドノイズを用いた。

予備実験の結果、装置内の吸音状態は良好であり125 Hz以上の周波数において測定可能であることが確認された。

3.2.2 測定結果

測定結果を図-5～図-8に示した。また表-1に資料の構成、測定条件をまとめて示した。

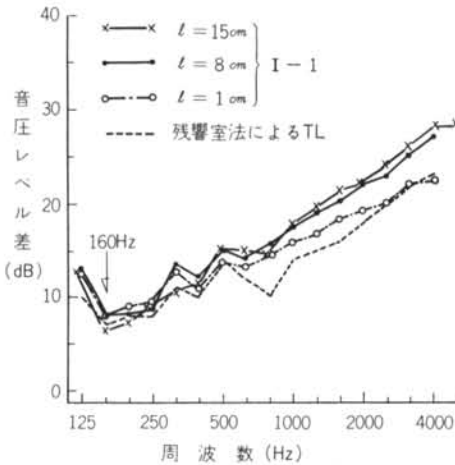


図-5 3mm合板の測定値

受音点は資料の中心軸上およびその近傍の3点とし、3点の平均値を求めた。

なお、中空二、三重壁の場合には、中空部の木枠間における定在波を防止するため、中空部の周辺を40mmグラスウールで吸音処理してある。

3.2.3 測定結果の考察

A. 単板について

図-5は3mm合板について、マイクと受音点の距離(l)を変化させて測定した結果である。図-5によ

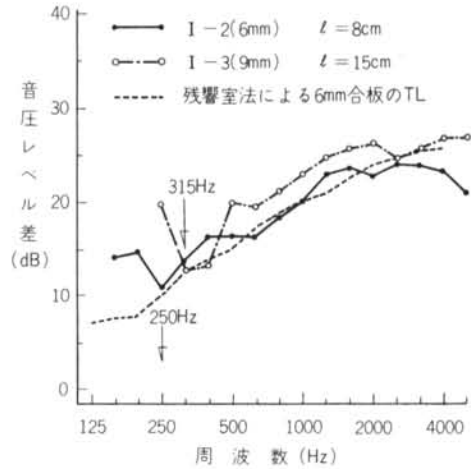


図-6 6, 9mm合板の測定値

図番号	資料記号	壁体構成 (mm)	面密度 (kg/m ²)	l (cm)	備考
図-5	I-1	単板, 3	1.6	1, 8, 15	$f_0 \approx 102$ (Hz)
図-6	I-2	単板, 6	2.7	8	$f_0 \approx 205$ (Hz)
図-6	I-3	単板, 9	4.9	15	$f_0 \approx 306$ (Hz)
図-7,9	II-A	中空 6-(50)-6	3.0-(中空)-3.0	15	$f_r \approx 220$ (Hz)
図-7,10	II-S	スチロフォーム 6-(50)-6	3.0-(0.72)-3.0	15	$f_r \approx 660$ (Hz)
図-7	II-G	グラスウール 6-(50)-6	3.0-(2.0)-3.0	15	
図-8,9	III-A	中空 中空 3-(25)-6-(25)-3	1.5-(中空)-3.0-(中空)-1.5	15	$f_{r1} \approx 310$ (Hz) $f_{r2} \approx 440$ (Hz)
図-8,10	III-S	スチロフォーム スチロフォーム 3-(25)-6-(25)-3	1.5-(0.36)-3.0-(0.36)-1.5	15	$f_{r1} \approx 940$ (Hz) $f_{r2} \approx 1300$ (Hz)
図-8	III-G	グラスウール グラスウール 3-(25)-6-(25)-3	1.5-(1.0)-3.0-(1.0)-1.5	15	

注) 壁体はすべてラワン合板。 l :マイクと資料の距離。 f_0 :板の基本振動数(周辺固定, $E=6.2 \times 10^9$ N/m²とした計算値)。 f_r, f_{r1}, f_{r2} :二、三重壁の共鳴周波数(スチロフォームについては $E=1.3 \times 10^6$ N/m²として計算)、スチロフォームと合板は接着剤で接着されている。

表-1 壁体構成と測定条件の一覧表

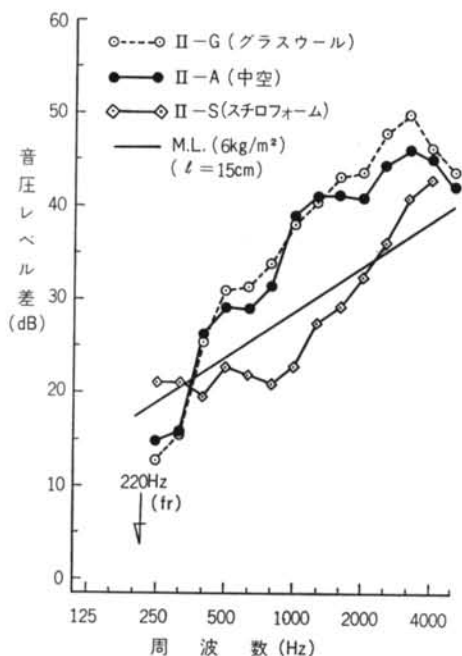


図-7 二重壁の測定値

ば、3種の l について全く共通した傾向が得られているが、音圧レベル差の値は異なっている。したがって、資料相互のしゃ音性能を比較検討する場合は、 l を一定値とすることが必要であることがわかる。

図-5、図-6によれば3mm、6mm、9mm合板の測定値が、それぞれ160Hz、250Hz、315Hz付近を境とし、これより低周波の領域ではしゃ音性能が上昇する傾向を示しているが、これはスチフネス制御によるものと考えられ、板の基本振動数がそれぞれ、160Hz、250Hz、315Hz付近にあることが推定される。

一方、3mm、6mm、9mm合板に対する周辺固定における基本板振動数の計算値は、それぞれ102Hz、205Hz、306Hzであり、かなりよい対応を示している。

B. 二重壁について

図-7は二重壁の測定結果を示したものである。中空壁の共鳴周波数(f_{r2})注2)は計算値(220Hz)よりわずかに高域に移動している。

スチロフォーム壁では共鳴周波数が中音域にあるため、しゃ音性能の大幅な低下がみられる。

グラスウール壁は中空壁に比較し、全周波数にわたってわずかにしゃ音性能が高い傾向にある。

中空壁の中、高音域にみられる周波数特性は6mm単板

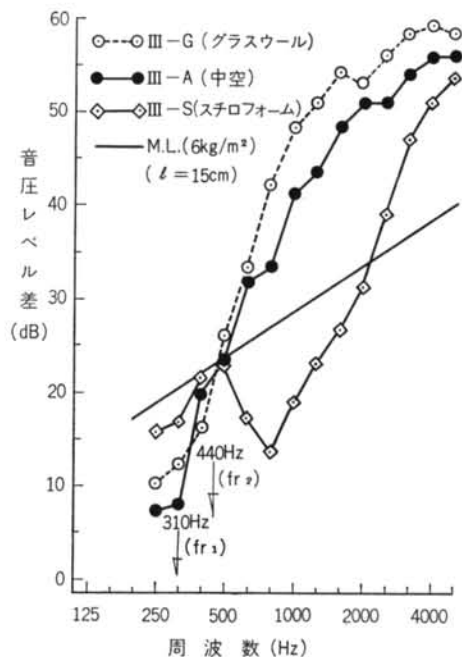


図-8 三重壁の測定値

(図-6)の場合と一致しており、単板の性質がそのままあらわれていると考えることができる。

C. 三重壁について

三重壁の測定結果を図-8に示した。中空壁の第1共鳴周波数($f_{r1} \approx 310\text{Hz}$)では明らかなしゃ音性能の低下が認められるが、第2共鳴周波数($f_{r2} \approx 440\text{Hz}$)では目立った低下は認められない。

スチロフォーム、グラスウールの影響に関しては二重壁の場合と同様の傾向を示している。

なお、図-7、図-8の質量則は $l=15\text{cm}$ における、この測定系としての“音圧レベル差の質量則”を意味し、3mm合板の測定値をランダム入射質量則に従って面密度 6kg/m^2 に換算したものである。

D. 二重壁と三重壁の比較

図-9、図-10は中空、スチロフォーム壁について二重壁と三重壁の比較をおこない、あわせて理論値との対応をみたものである。この場合、実測値はランダム入射音に対する音圧レベル差であり、理論値は垂直入射音に対する透過損失値であるから物理的な意味が若干異なる。そこで図-9、図-10では、実測値をいったん“音圧レベル差の質量則”を基準とした値に換算し、その値を質量則の理論値に対してプロットしている。すなわち、質量則に対する相対値という立場から理論値と実測値の対応をみたものである。

なお、スチロフォームのヤング率は製品によってかな

注2) $f = \frac{w}{2\pi}$ f : 周波数 (Hz)
 w : 角周波数 (ラジアン/秒)

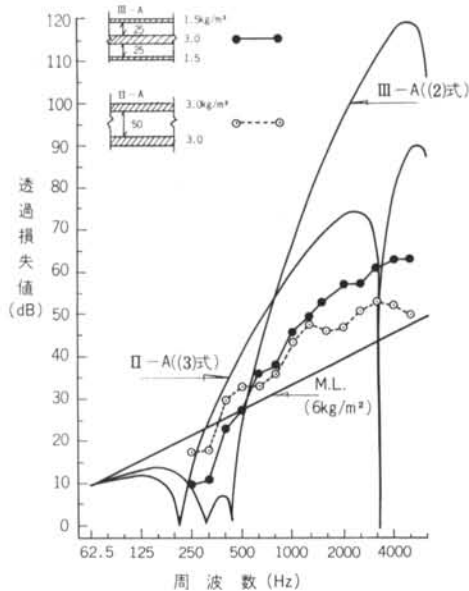


図-9 中空二、三重壁の理論値と実測値

りばらつきがあり、正しい値の推定が困難であるため、今回は実測値の共鳴周波数に基づいて $1.3 \times 10^6 (N/m^2)$ を仮定し、計算に用いている。

(i) 中空壁について

二重壁の f_r が計算値より高域に移動しているため、 f_r と三重壁の f_{r1} がほぼ等しい周波数 (310Hz) となっている。

f_{r1} (三重壁) におけるしゃ音性能は f_r (二重壁) より低く、高音域では逆に三重壁のしゃ音性能が高く、全体として実測値の傾向は理論値の傾向と一致している。

理論値と実測値はその絶対値においてかなりの開きがあるが、質量則と一致する周波数、二重壁と三重壁のしゃ音性能が一致する同波数等に関してはかなりよい対応を示している。

(ii) スチロフォーム壁について

この場合も中空壁と同様、 f_r (二重壁) と f_{r1} (三重壁) がほぼ等しいこと、 f_{r1} におけるしゃ音性能が f_r の場合より低く、共鳴周波数より十分高音域では三重壁のしゃ音性能が高いこと等が見いだされる。

3.3 一般の方法による三重壁の実測値

図-11は、プラスチックボード二、三重壁の測定値である。資料は $2.8m \times 2.8m$ で、間柱 (木造) のピッチは $455mm$ である。周囲の枠と間柱で形成される空間の四周は $75mm$

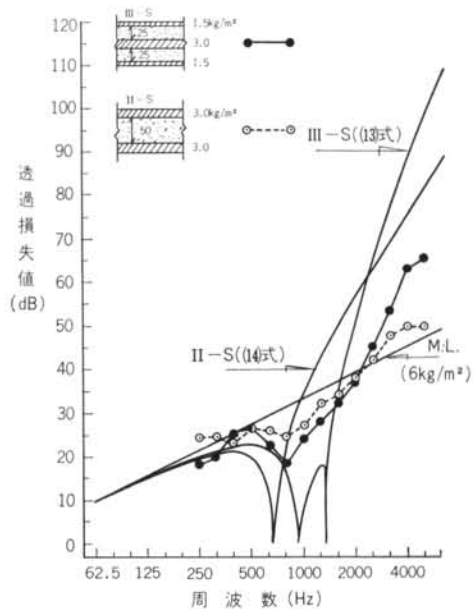


図-10 スチロフォーム二、三重壁の理論値と実測値

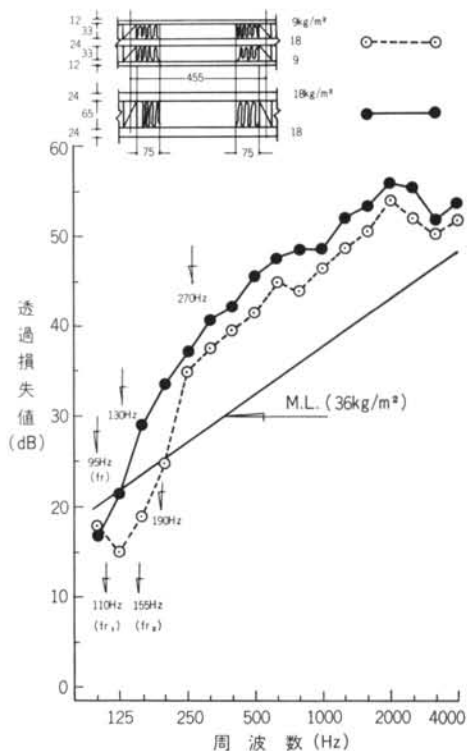


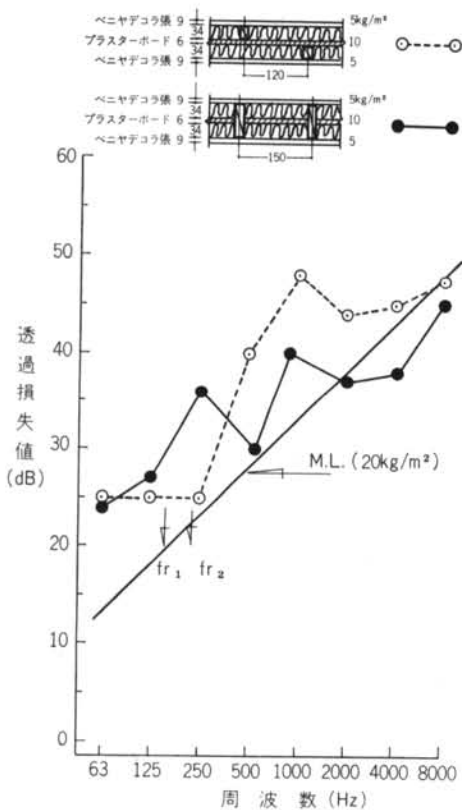
図-11 プラスチックボード二、三重壁の実測値

グラスウールで吸音処理されている。

三重壁の共鳴周波数の計算値は $f_{r1} \approx 110\text{Hz}$, $f_{r2} \approx 155\text{Hz}$ Hz であり、したがって 125Hz 付近にみられる実測値の谷は明らかに共鳴透過の影響とみることができる。また、質量則と一致する周波数の計算値は190Hz であり、実測値とよく対応している。

二重壁の共鳴周波数の計算値は $f_r \approx 95\text{Hz}$, 質量則と一致する周波数の計算値は130Hz であり、いずれも実測値とよく対応している。

二重壁と三重壁の透過損失が同等となる周波数の計算値は270Hz で実測値の傾向と一致しているが、それより高周波領域における三重壁の透過損失の上昇が小さく、この点が理論式および小資料による測定値の傾向と異なっている。これはおそらく、周囲の枠や間柱を介する固体伝搬成分の影響と考えられる。三重壁の場合には間柱と中間のプラスターボードが一体となって振動し、中間の壁がしゃ音上ほとんど寄与しない伝搬経路が存在すると考えられ、これが高音域における三重壁の透過損失を低下させている最大の原因と推定される。



図一12 間柱の配置方法による影響
注) 建築音響ハンドブック p.396 (竹中技研測定)

図一12は固体伝搬成分の影響が間柱の配置方法でどのように変化するかをみたものである。間柱ピッチが短いため、共通間柱の場合は三重壁としての性質がほとんどみられないが、千鳥状の間柱配置では計算値に対応した共鳴透過現象がみられ、三重壁としての性質をあらわしている。

図一13, 14の場合も計算値に対応した共鳴透過現象がみられ、全周波数にわたって図一11の場合と同様の傾向を示している。

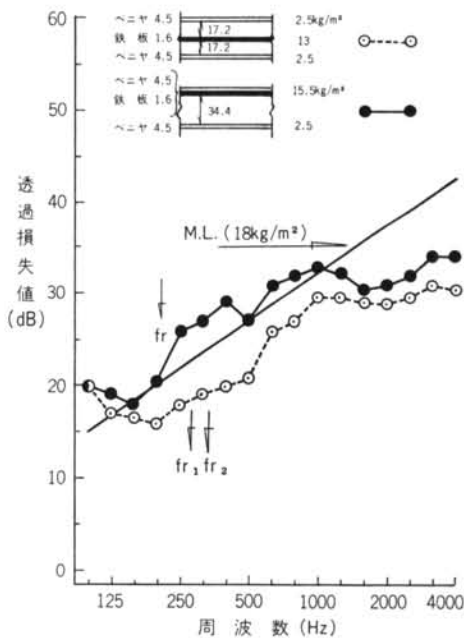
§ 4. 一般の多重壁について

一般の多重壁のしゃ音性能について共鳴周波数の立場から考察してみよう。

二、三重壁の透過損失に関する理論解から、 N 重壁の共鳴周波数は図一15に示した振動系の固有振動数に一致することが類推される。このとき系の固有振動数(Hz)は

$$f_{r(\nu)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4K}{m}} \sin \frac{\pi\nu}{2N} \quad (\nu=1, 2, \dots, N-1) \quad (9)$$

で与えられる²⁾。これから、等しい面密度 (m) をもった壁体が等間隔 (d) に配置された中空 N 重壁の共鳴周波数は次式で推定される。



図一13 ベニヤと鉄板による二、三重壁の実測値
注) 騒音対策ハンドブック p.532 (建研測定)

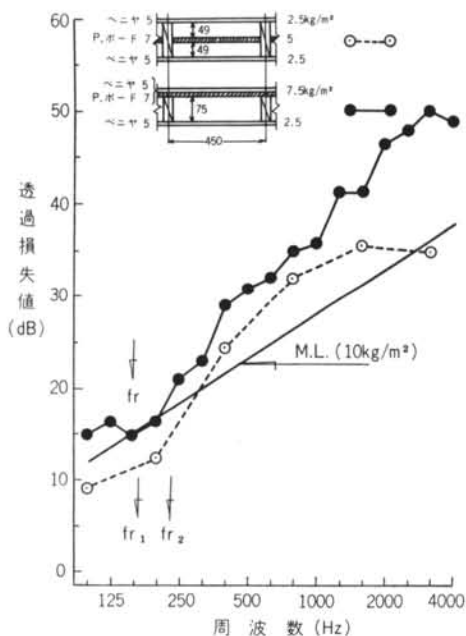


図-14 ベニヤとプラスターボードによる二、三重壁の実測値
注) 建築音響(前川著) p.114

$$f_{r(\nu)} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{N(N-1)\rho C^2}{MD}} \sin \frac{\pi \nu}{2N}$$

($\nu=1, 2, \dots, N-1$) ……(20)

ただし、 $M=N \times m$ 、 $D=(N-1) \times d$

ここで最も高周波の共鳴周波数 $f_{r(N-1)}$ に着目すれば、 $M \times D$ 一定のとき $f_{r(N-1)}$ は N の増大に伴って限りなく増大する。しかも最も低周波の共鳴周波数 $f_{r(1)}$ はすべて $0.32\sqrt{\rho C^2/MD}$ ($N=2$)と $0.5\sqrt{\rho C^2/MD}$ ($N \rightarrow \infty$)の間に分布し、 N のいかんにかかわらず、ほぼ一定値をとるから、多重化すればするほど共鳴透過領域が拡大することになる。したがって四重以上の多重壁は三重壁のもつ欠点がさらに拡張されると推定できる。

一般の軽量間仕切りの $M \times D$ の値は高々5 kg/m程度である。このとき中空二重壁の共鳴周波数は55 Hzであり、しゃ音上重要な100 Hz以上の領域で質量則を上回るしゃ音性能が期待できる。これに対して $M \times D=5$ kg/mの中空三重壁では100 Hz以上の領域で共鳴透過がおり、低音域におけるしゃ音低下を防ぐことは困難である。したがって共鳴点におけるしゃ音低下を防止する特別な方法を講じないかぎり、三重以上の壁体を軽量間仕



図-15 N重壁の振動モデル

切りとして用いることは不利であると結論される。

§ 5. まとめ

多重壁の解析には多くの問題点があり、理論的にも実験的にもさらに検討を進めていかなければならないが、本稿における考察から次のことが言い得る。

- 1) ここで考察した中空三重壁の実測値はバンドノイズを音源に用いているため、2つの共鳴周波数を分離して観測することはできないが、共鳴周波数の理論値と実測値の間には明らかな対応関係が認められた。さらに、質量則と一致する周波数、二重壁の値と一致する周波数等についても理論値と実測値はかなりよい対応を示し、(6)式の実用性が確認された。
- 2) 弾性三重壁に関する理論式の実用性を確認するためには弾性材のヤング率を正確に知る必要があり、その点検討の余地を残しているが、理論式によって弾性壁特有の中、高音域におけるしゃ音性能の低下を説明することができる。
- 3) 中空三重壁の $M \times D$ (総面密度×総中空層厚)を一定とした場合、第2共鳴周波数(f_{r2})を最も低くする条件は $d_1=d_2$ 、 $m_1=m_3=m_2/2$ であり、同様の場合二重壁の共鳴周波数(f_r)を最も低くする条件は $m_1=m_2$ である。このとき $f_{r2}=2f_r$ である。
- 4) 小資料の実測値によれば、三重壁のしゃ音性能は低音域で二重壁の値を下回り、高音域では上回って理論と一致した傾向を示している。これに対して一般の壁体では、三重壁の方が固体伝搬成分の影響をうけやすく、全周波数にわたって二重壁を下回るしゃ音性能を示す傾向がある。
- 5) 共鳴周波数の立場から言えば、三重以上の壁体を軽量間仕切りとして用いることは不利である。

§ 6. おわりに

二重壁を含めて、多重壁の透過損失値を正しく推定する方法は現在まだ確立されていない。これは、多重壁の透過損失値が板材の質量と中間層の弾性のみならず、中間層のダンピング、周囲の枠や間柱を介する固体伝搬成分等に大きく影響され、さらに板材の振動姿態、内部損失等の要素と関連してきわめて複雑なメカニズムによって決定されていることによる。

これらの要素の中で、中間層のダンピング効果は透過

損失値に大きな影響を与えていることが推定され、これを実用的な形で理論式の中に入れることが今後の第一課題と考えられる。

しゃ音機構に関する図-2のような考え方によれば、

中間層にバネと並列に存在するダンピングの影響を式化することが可能であり、現在、この方法で誘導された理論式と実測値の対応を検討中である。

<参考文献>

- 1) 久我新一：“建築部材のしゃ音性の研究 第3報, 第4報” 建築学会論文報告集 第116号(40年10月), 第128号(41年10月)
- 2) Morse and Ingard: “Theoretical Acoustics” Chap. 3
- 3) 佐藤, 子安: “小試料を使ったしゃ音特性の一測定法” 小林理研報告, 第11巻(1961)
- 4) 戸田盛和: “振動論” 培風館
- 5) 前川純一: “建築音響” 共立出版
- 6) “建築音響ハンドブック” 日本音響材料協会
- 7) “騒音対策ハンドブック” 日本音響材料協会