

203 音響透過損失測定における試料サイズの影響に関する研究

Effect of panel size on sound transmission loss

○正 真田 明 (岡山工技センター) 正 章 忠 (岡山工技センター)
正 柄川 尚慶 (岡山工技センター)

Akira SANADA, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture, 5301 haga Okayama, 701-1296.
Zhong ZHANG, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture
Naoyoshi EGAWA, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture

The purpose of this study is to measure sound transmission loss (TL) of sound insulation materials practically with small size samples. When TL of sound insulation material is measured with small size sample, it contains effect of panel size. Some studies about the effect of panel size have been done, experimentally or analytically. But, the effect of panel size has not been revealed clearly yet. This paper describes the results that oblique incident TL of rectangular panel simply supported in an infinite baffle was calculated. We investigate the effects of sample size, in two factors of nonresonance transmission and resonance transmission. And we compare the calculated results and the experimental results.

Key Words: Acoustic power, Sound transmission loss, Sound intensity method, Power transfer matrix, Resonance transmission, Nonresonance transmission

1. 緒 言

材料の音響透過損失を評価する場合、一般にJIS A1416で規定されている測定方法(残響室-残響室法)が用いられる。材料の音響透過損失の測定結果は試料サイズなどに大きく影響を受けることが知られており⁽¹⁾、このことから、規格では試料サイズや取り付け条件などの影響を低減するため、試料面積を10m²と大きくとるように指示されている。しかし、試料の準備や測定に手間がかかることから、遮音材料の研究、開発段階ではより小さいサイズの試料によって効率的に材料の透過損失を評価したいという要望がある。

そこで、本研究では遮音材料の開発段階での実用的な評価を主眼におき、小面積試料を用いて材料の音響透過損失の評価を行うことを目的とする。そのため、小面積試料で音響透過損失を評価する場合の影響や問題点について調べる。これまでにも、透過損失に与える試料サイズの影響について実験によって検討した研究⁽¹⁾や特定材料の透過損失を計算によって求め、試料サイズの影響について言及した研究^{(2)~(5)}などが報告されている。しかしながら、必ずしも計算結果と実験結果との整合性が十分にとれているとは言えず、試料サイズの影響について一般的な結論を得るに至っていない。

本研究では、単純支持された矩形平板に平面音波が入射した場合の透過音の計算を行い、透過損失に与える試料サイズの影響を共振成分、非共振成分に分けて求めた。この結果から、試料サイズの影響の現れにくい条件を明らかにした。また、小面積試料を用いて透過損失を測定し、計算結果との比較を行った。

2. 試料サイズの影響の解析

2.1 音響加振時の振動計算 バフル板に埋め込まれ、周辺を単純支持した試料サイズ $a \times b$ の矩形平板に、図1に示

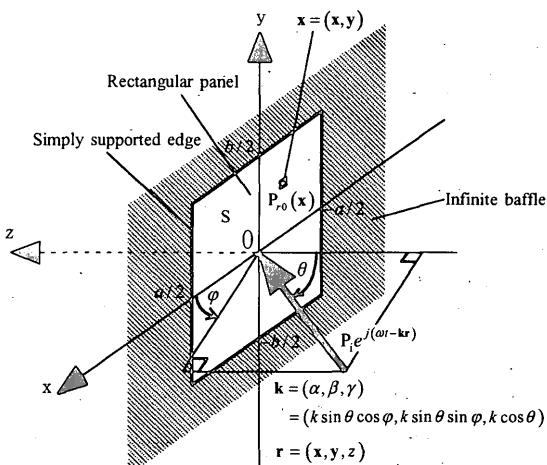


Fig.1 Calculation model of sound transmission.

すように、角度(θ, ϕ)で平面波が入射した場合について考える。ここで、 ω を角周波数、 \mathbf{k} を波数ベクトル、 \mathbf{r} を位置ベクトルとすると、入射する平面波の音圧は、 $P_i e^{j(\omega t - kr)}$ と記述でき、 $z=0$ の面の任意点 \mathbf{x} は、入射波によって、

$$p_{i0}(\mathbf{x}) = 2 \cdot P_{i0}(\mathbf{x}) e^{j\omega t} \quad (1)$$

ただし、 $P_{i0}(\mathbf{x}) = P_i \cdot e^{-j(\alpha x + \beta y)}$

$$\alpha = k \sin \theta \cdot \cos \phi, \beta = k \sin \theta \cdot \sin \phi$$

k : 波数($=\omega/C$)、 C : 音速

の力で加振される。このとき、平板の運動方程式は、変位を $w(\mathbf{x}, t)$ とし、平板の振動によって $z=+0$ 面に $P_{r0}(\mathbf{x})e^{j\omega t}$ の音圧が生じるとすると次式で表される。

$$D\nabla^4 w(x,t) + \rho_s h \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 2P_{i0}(x)e^{j\omega t} - 2P_{r0}(x)e^{-j\omega t} \quad (2)$$

ただし、

D:曲げ剛性($D=E(1+i\eta)h^3/12/(1-\nu^2)$), ρ_s :材料の密度
h:平板厚さ, E:ヤング率, η :損失係数, ν :ポアソン比

平板の任意点 x における速度 $v(x)$ をモード展開式として表すと、

$$v(x) = \sum_{i=1}^{\infty} v_i \cdot \varphi_i(x) \quad (3)$$

ただし、 v_i : i 次モード速度、 φ_i : i 次固有関数

N 個までのモードを考慮すると、

$$v(x) = \varphi^T(x) \cdot v = [\varphi_1(x) \ \varphi_2(x) \ \cdots \ \varphi_N(x)] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

調和加振される場合の振動速度と変位の関係、及び式(4)を用いると、式(2)は、

$$\frac{D}{j\omega} \nabla^4 \varphi^T \cdot v + j\omega \rho_s h \varphi^T \cdot v = 2P_{i0}(x) - 2P_{r0}(x) \quad (5)$$

となる。式(5)の左から $\varphi(x)$ をかけて試料面の領域 S で積分し、モードの直交性を用いて整理すると、左辺の i モードについては、

$$\text{左辺} = \frac{1}{j\omega} K_i \cdot v_i + j\omega M_i \cdot v_i \quad (6)$$

$$\text{ただし、 } K_i = \int_S D \varphi_i(x) \cdot \nabla^4 \varphi_i(x) dx$$

$$M_i = \int_S \rho_s h \varphi_i(x)^2 dx$$

右辺については、

$$\text{右辺} = 2F_{i0} - 2F_{r0} \quad (7)$$

$$\text{ただし } F_{i0} = \int_S \varphi(x) \cdot P_{i0}(x) \cdot dx = [F_1 \ F_2 \ \cdots \ F_N]^T \quad (8)$$

$$F_{r0} = \int_S \varphi(x) \cdot P_{r0}(x) \cdot dx \quad (9)$$

となる。ここで、平板の振動によって平板上の任意点 x_i に生じる音圧は次式によって記述される。

$$P_{r0}(x_i) = \frac{j\omega\rho}{2\pi} \int_S v(x_2) \frac{e^{-jkr}}{r} dx_2 \quad (10)$$

ただし、 $r = |x_i - x_2|$

ρ :空気密度

式(4)と式(10)を式(9)に代入すると、

$$F_{r0} = \frac{j\omega\rho}{2\pi} \int_S \int_S \varphi(x_1) \cdot \varphi^T(x_2) \frac{e^{-jkr}}{r} dx_2 dx_1 \cdot v \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \cdots & f_{NN} \end{bmatrix} \cdot v \quad (12)$$

となる。したがって、 i モードについて、

$$\frac{1}{j\omega} K_i \cdot v_i + j\omega M_i \cdot v_i = F_i + \sum_{k=1}^N f_{ik} v_k \quad (13)$$

となり、 $1 \sim N$ 次モードまでの N 個の式による連立方程式を解くことにより、 v_i を求めることができる。

2.2 透過音響パワー 透過する音響パワーは、平板の $z=+0$ 面における音響インテンシティを積分することによって次式で表すことができる。

$$W_t = \frac{1}{2} \int_S \operatorname{Re}(P_{r0}^*(x) \cdot v(x)) dx \quad (14)$$

式(10)を式(14)代入し、式(4)を用いると

$$W_t = v^H \cdot A \cdot v$$

ただし、

$$A = \frac{\omega\rho}{4\pi} \int_S \int_S \varphi^*(x_2) \frac{\sin(kr)}{r} \varphi^T(x_1) dx_2 dx_1 \quad (16)$$

ただし、 v^H は v のエルミート行列である。 A はパワーマトリックスを表す⁽⁶⁾。 A の i 行 j 列成分を a_{ij} とすると、

$$W_t = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot v_i^* \cdot v_j$$

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}$$

が得られる。式(17)から、透過音響パワーは単独のモードに起因する放射パワー w_{ij} ($i=j$) と 2 つのモードの連成に起因する放射パワー w_{ij} ($i \neq j$) の両方があることがわかる。

ここで、平板の境界条件を単純支持とすると、固有関数は、(a)奇数・奇数次モード、(b)偶数・奇数次モード、(c)奇数・偶数次モード、(d)偶数・偶数次モードの 4 種類となり次式で記述できる。

(a)奇数・奇数次モード

$$\varphi_{o/o_i}(x) = \cos(m_i\pi/a \cdot x) \cdot \cos(n_i\pi/b \cdot y) \quad (18)$$

ただし、 m_i :奇数、 n_i :奇数

(b)偶数・奇数次モード

$$\varphi_{e/o_i}(x) = \sin(m_i\pi/a \cdot x) \cdot \cos(n_i\pi/b \cdot y) \quad (19)$$

ただし、 m_i :偶数、 n_i :奇数

(c)奇数・偶数次モード

$$\varphi_{o/e_i}(x) = \cos(m_i\pi/a \cdot x) \cdot \sin(n_i\pi/b \cdot y) \quad (20)$$

ただし、 m_i :奇数、 n_i :偶数

(d)偶数・偶数次モード

$$\varphi_{e/e_i}(x) = \sin(m_i\pi/a \cdot x) \cdot \sin(n_i\pi/b \cdot y) \quad (21)$$

ただし、 m_i :偶数、 n_i :偶数

放射効率 σ の定義から、透過パワーは、

$$W_t = \sigma \frac{\rho C}{8} ab \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad (22)$$

と記述できる。ここでは、 w_{ij} ごとの放射効率を考え、

$$W_t = \frac{\rho C}{8} ab \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} v_i^* v_j \quad (23)$$

と拡張して考える。式(17)と式(23)を比較すると、

$$\sigma_{ij} = \frac{8}{\rho C ab} a_{ij} \quad (24)$$

となる。

ここでは計算対象を簡単のため、一辺の長さが a の正方形板とした。奇数・奇数次モードについて行った放射効率の計算結果の一部を図 2 に示す。横軸は、 $k \cdot a$ (波数 \times 試料サイズ) であり、 a を固定して考えると周波数に相当する。

図 2 からわかるように、 $i=j$ の放射効率は、常に正で周波数が高くなるに従って増大し、1 に収束する。これに対

して $i \neq j$ の放射効率は、正負のどちらの値をとる場合もあり、周波数が高くなると 0 に収束する。

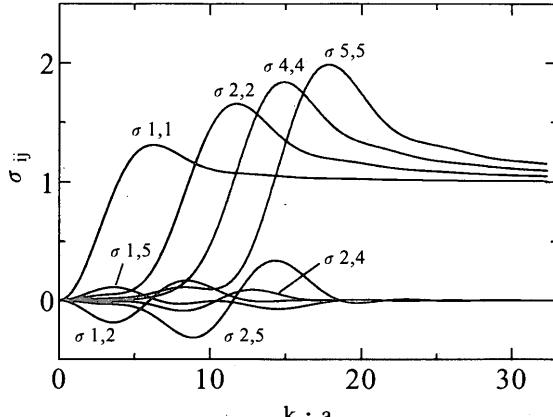


Fig.2 Radiation efficiency of a square panel ($a \times a$)

4 種類の振動モードの種類間での放射効率は式(16)より常に 0 となるため、全透過音響パワーは、

$$W_t = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{o/o} W_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{e/o} W_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{o/e} W_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{e/e} W_{ij} \quad (25)$$

となる。ただし、 $\sigma_{o/o} W_{ij}$ は、奇数・奇数次モードの i 次と j 次による放射音響パワーを表しており、他も同様である。つまり、同じ種類の 2 つのモードによる音のみ放射される。

2.3 音響透過損失 式(13)において、平板の面密度が十分に大きく音の反作用力を無視できる場合、右辺第 2 項が消えて、

$$\nu_i = j\omega \frac{2F_i}{M_i \{ \omega_i^2 (1+j\eta_i) - \omega^2 \}} \quad (26)$$

ただし、 $\omega_i = \sqrt{K_i/M_i}$

となる。ここで、 F_i は式(1)、(8)より、各モード種類ごとに、

$$\sigma_{o/o} F_i = \frac{4P_i ab}{m_i n_i \pi^2} \sin(m_i \pi/2) \cdot \sin(n_i \pi/2) \cdot R_{o/o} \quad (27)$$

$$\text{ただし、} R_{o/o} = \frac{\cos(\alpha a/2)}{1 - (\alpha a/m_i \pi)^2} \frac{\cos(\beta b/2)}{1 - (\beta b/n_i \pi)^2}$$

$$\sigma_{e/o} F_i = \frac{4P_i ab}{m_i n_i \pi^2} \cos(m_i \pi/2) \cdot \sin(n_i \pi/2) \cdot R_{e/o} \quad (28)$$

$$\text{ただし、} R_{e/o} = \frac{\sin(\alpha a/2)}{1 - (\alpha a/m_i \pi)^2} \frac{\cos(\beta b/2)}{1 - (\beta b/n_i \pi)^2}$$

$$\sigma_{o/e} F_i = \frac{4P_i ab}{m_i n_i \pi^2} \sin(m_i \pi/2) \cdot \cos(n_i \pi/2) \cdot R_{o/e} \quad (29)$$

$$\text{ただし、} R_{o/e} = \frac{\cos(\alpha a/2)}{1 - (\alpha a/m_i \pi)^2} \frac{\sin(\beta b/2)}{1 - (\beta b/n_i \pi)^2}$$

$$\sigma_{e/e} F_i = \frac{4P_i ab}{m_i n_i \pi^2} \cos(m_i \pi/2) \cdot \cos(n_i \pi/2) \cdot R_{e/e} \quad (30)$$

$$\text{ただし、} R_{e/e} = \frac{\sin(\alpha a/2)}{1 - (\alpha a/m_i \pi)^2} \frac{\sin(\beta b/2)}{1 - (\beta b/n_i \pi)^2}$$

となる。共振周波数は、

$$\omega_i = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho_s h}} \left\{ \left(\frac{m_i}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_i}{b} \right)^2 \right\} \quad (31)$$

となる。したがって、モード速度と放射効率から w_{ij} を求めると、例えば奇数・奇数次モードについては、

$$\begin{aligned} \sigma_{o/o} w_{ij} &= \frac{\rho C}{2} ab \left(\frac{P_i}{\rho_s h} \right)^2 \frac{1}{\omega^2} \frac{256}{\pi^4} \frac{1}{m_i n_i m_j n_j} \cdot \sigma_{o/o} R_{o/o} R_{o/o} \\ &\times \frac{\sin \frac{m_i \pi}{2} \cdot \sin \frac{n_i \pi}{2} \cdot \sin \frac{m_j \pi}{2} \cdot \sin \frac{n_j \pi}{2}}{\{(\omega_i/\omega)^2 (1-j\eta_i)-1\} \{(\omega_j/\omega)^2 (1+j\eta_j)-1\}} \end{aligned} \quad (32)$$

ただし、 $\sigma_{o/o}$ ：奇数・奇数次モードの i 次と j 次のモードによる放射効率

となる。他の $\sigma_{e/o} w_{ij}$ 、 $\sigma_{e/e} w_{ij}$ についても同様である。

入射音響パワー W_0 は、 $P_{10}/(2\rho C) \cdot ab \cos \theta$ なので、透過損失は、

$$TL(\theta, \phi) = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau(\theta, \phi)} = 10 \cdot \log \frac{W_0(\theta)}{W_t(\theta, \phi)} \quad (33)$$

$$= 20 \cdot \log \left(\frac{\rho_s h \cdot \omega}{2\rho C} \cos(\theta) \right) + \Delta TL \quad (34)$$

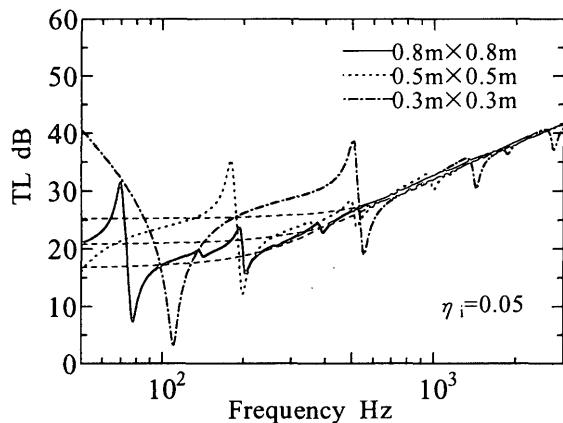
ただし、

$$\begin{aligned} \Delta TL &= -10 \cdot \log \frac{64}{\pi^4} \cos \theta \\ &\left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{o/o} R_{o/o} R_{o/o}}{m_i n_i m_j n_j} \frac{\sin \frac{m_i \pi}{2} \sin \frac{n_i \pi}{2} \sin \frac{m_j \pi}{2} \sin \frac{n_j \pi}{2}}{\left\{ \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 (1-j\eta_i)-1 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_j}{\omega} \right)^2 (1+j\eta_j)-1 \right\}} \right. \\ &+ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{e/o} R_{e/o} R_{e/o}}{m_i n_i m_j n_j} \frac{\cos \frac{m_i \pi}{2} \sin \frac{n_i \pi}{2} \cos \frac{m_j \pi}{2} \sin \frac{n_j \pi}{2}}{\left\{ \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 (1-j\eta_i)-1 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_j}{\omega} \right)^2 (1+j\eta_j)-1 \right\}} \\ &+ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{o/e} R_{o/e} R_{o/e}}{m_i n_i m_j n_j} \frac{\sin \frac{m_i \pi}{2} \cos \frac{n_i \pi}{2} \sin \frac{m_j \pi}{2} \cos \frac{n_j \pi}{2}}{\left\{ \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 (1-j\eta_i)-1 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_j}{\omega} \right)^2 (1+j\eta_j)-1 \right\}} \\ &+ \left. \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{e/e} R_{e/e} R_{e/e}}{m_i n_i m_j n_j} \frac{\cos \frac{m_i \pi}{2} \cos \frac{n_i \pi}{2} \cos \frac{m_j \pi}{2} \cos \frac{n_j \pi}{2}}{\left\{ \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 (1-j\eta_i)-1 \right\} \left\{ \left(\frac{\omega_j}{\omega} \right)^2 (1+j\eta_j)-1 \right\}} \right] \end{aligned} \quad (35)$$

ここで、 $\tau(\theta, \phi)$ は透過率である。

式(34)において、第 1 項は斜入射の場合の質量則を表している。 ΔTL は試料が有限であるための質量則からの上昇量を表している。

ここで、Al 板 ($h=2mm$) について、垂直に音が入射した場合の透過損失の計算結果を図 3 に示す。計算は試料サイズが $0.3m \times 0.3m$ 、 $0.5m \times 0.5m$ 、 $0.8m \times 0.8m$ の 3 つの場合について行った。破線は同サイズのピストン板と仮定したときの透過損失である。低周波数領域では、共振、反共振の影響が大きく現れ、試料サイズが波長より小さくなることにより放射効率が低下し、透過損失は上昇していることがわかる。反共振が生じるのはモード間の連成による負の音響パワーによるが、高周波数になると、モード間の連成による放射効率が小さくなり、反共振現象は生じにくい。試料サイズを小さくしてゆくと、低周波数では、試料サイズ

Fig.3 Calculated transmission loss of Al panel ($h=2\text{mm}$).

の影響のため透過損失が上昇するが、 $\lambda << 2a$ の高周波数領域では、共振周波数の近傍以外では、ほぼ質量則に沿っている。

入射側が拡散音場の場合、透過損失は、入射角について積分することで次式によって計算することができる。

$$TL_{random} = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \tau(\theta, \phi) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\phi \cdot d\theta}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\phi \cdot d\theta} \quad (36)$$

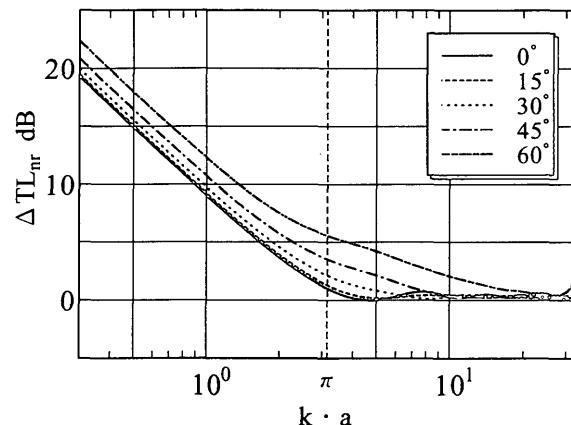
2.4 試料サイズの影響 有限板の透過音は共振成分と非共振成分に分けることができる。ここではより詳しく試料サイズの影響を調べるために、 ΔTL における共振成分と非共振成分の影響について検討を行う。

共振周波数の近傍でない角周波数 ω において、 ω 以下の周波数に q 次までのモードの共振周波数が含まれているとすると、 $\omega_q \ll \omega$ として高次のモードの影響を無視できる。このときの ΔTL を ΔTL_{nr} とすると、

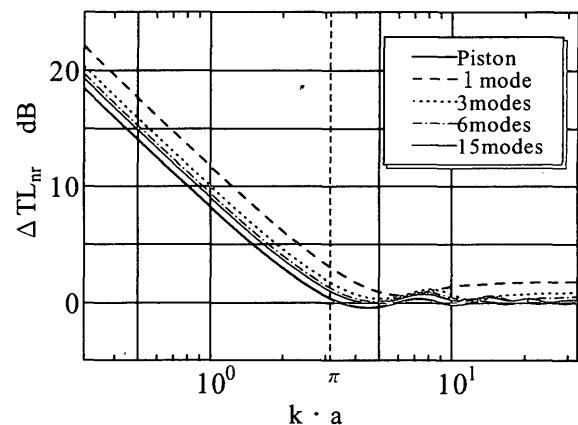
$$\Delta TL_{nr} = -10 \cdot \log \frac{64}{\pi^4} \cos\theta \left[\sum_{i=1}^{q_a} \sum_{j=1}^{q_b} \sigma_{o/oij} \cdot R_{o/oj} \cdot R_{o/oj} \frac{\sin \frac{m_i \pi}{2} \sin \frac{n_j \pi}{2} \sin \frac{m_i \pi}{2} \sin \frac{n_j \pi}{2}}{m_i n_i m_j n_j} \right. \\ + \sum_{i=1}^{q_c} \sum_{j=1}^{q_d} \sigma_{e/eij} \cdot R_{e/ei} \cdot R_{e/ej} \frac{\cos \frac{m_i \pi}{2} \sin \frac{n_j \pi}{2} \cos \frac{m_i \pi}{2} \sin \frac{n_j \pi}{2}}{m_i n_i m_j n_j} \\ + \sum_{i=1}^{q_e} \sum_{j=1}^{q_f} \sigma_{o/eij} \cdot R_{o/ei} \cdot R_{o/ej} \frac{\sin \frac{m_i \pi}{2} \cos \frac{n_j \pi}{2} \sin \frac{m_i \pi}{2} \cos \frac{n_j \pi}{2}}{m_i n_i m_j n_j} \\ \left. + \sum_{i=1}^{q_g} \sum_{j=1}^{q_h} \sigma_{e/elij} \cdot R_{e/el} \cdot R_{e/elj} \frac{\cos \frac{m_i \pi}{2} \cos \frac{n_j \pi}{2} \cos \frac{m_i \pi}{2} \cos \frac{n_j \pi}{2}}{m_i n_i m_j n_j} \right] \quad (37)$$

となる。ただし、 $q_a, q_b, q_c, q_d, q_e, q_f, q_g, q_h$ は、それぞれ奇数・奇数次モード、偶数・奇数次モード、奇数・偶数次モード、偶数・偶数次モードについての ω までに含まれる共振周波数の数である。式(37)は試料サイズと含まれるモードの数によって決まり、共振周波数近傍以外のベースの透過損失を決める非共振成分と考えることができる。

入射角度による影響について検討するため、入射角度を変えた場合の ΔTL_{nr} を計算した。結果を図4に示す。計算は、すべての種類のモードについて15次までを考慮している。縦軸は ΔTL_{nr} 、横軸は $k \cdot a$ である。図4から入射角度が垂直に近い場合、低周波数では放射効率の低下により透過損失は上昇するが、 $k \cdot a = \pi$ 以上の領域で試料サイズの影響による透過損失の上昇は0に近いことがわかる。入射角度が大きくなるにしたがって、 $k \cdot a = \pi$ 付近で透過損失が上昇し、斜め入射の場合、音が透過し難くなることがわかる。

Fig.4 The factors of nonresonance transmission in ΔTL at some incident angles.

透過損失を測定する場合、音源室として残響室が用いられる。斜入射成分の影響が大きい場合、このことから有限板では、透過損失が上昇することが考えられる。しかしながら、実際の残響室では大角度で入射する音響パワーは少ないことがわかっており⁽⁷⁾、これまで我々の行った実験からも薄い平板において $k \cdot a = \pi$ 付近の周波数での透過損失の上昇はみられないことから、大角度での斜入射成分の影響は小さいと考えられる。そこで、この後は垂直入射成分により代表して考えることとする。

Fig.5 The factors of nonresonance transmission in ΔTL with some modes.

含まれるモードの数による影響をみるために、 ω までに含まれるモードの数を変えて ΔTL_{nr} の計算を行った。結果を図5に示す。縦軸は ΔTL_{nr} 、横軸は $k \cdot a$ である。また、ピストン板と仮定した場合の ΔTL の計算も行った。図示

のように、モード数が多いほど ΔTL_{nr} の上昇量が抑えられ、ピストン板の場合に近接する。 $k \cdot a = \pi$ までに 1 次モードまでしか含まれていない場合、 $k \cdot a = \pi$ において 3dB 程度、3 次までのモードが含まれる場合は 2dB 程度上昇する。 $k \cdot a = 4.5$ 以上では、3 次モード以上が含まれていれば 1dB 以下の上昇に抑えられる。

次に共振の影響について考察を行う。ここで、非共振成分による透過パワーを W_{nr} とすると、共振成分による透過パワーは $W_r - W_{nr}$ と考えてよい。そこで、

$$R = (W_r - W_{nr}) / W_{nr} \quad (38)$$

とすると、

$$\Delta TL = \Delta TL_{nr} + \Delta TL_{re} \quad (39)$$

$$\text{ただし, } \Delta TL_{re} = -10 \cdot \log(R+1)$$

となる。つまり、 ΔTL_{re} が共振成分による透過損失の上昇量を表す。また ΔTL_{re} は試料サイズ、共振周波数、損失係数の関数となる。垂直入射の場合について、この ΔTL_{re} の計算を行った。共振周波数は 1 次の共振周波数 f_1 を $k_1 \cdot a = 2\pi f_1 \cdot a / C = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6$ となるように変え、高次の共振周波数は式(31)から決定した。損失係数が 0.05 の場合の結果を図 6 に示す。

図 6 から、 $k \cdot a = 2\pi$ 以上の領域では共振によって透過損失の低下は生じるが、反共振による透過損失の上昇の影響は小さく、問題とならないことがわかった。ただし、 $k \cdot a = \pi$ 付近では、損失係数が小さい場合、反共振の影響が生じる可能性があり、この付近に共振がある場合注意が必要である。 $k \cdot a = 2\pi$ 以上の領域では、 $k_1 \cdot a = 0.4$ と 1 次の共振周波数が低い場合、高次のモードは放射効率が低いため共振の影響は出にくく、共振周波数近傍以外では質量則によく沿っている。この場合、 $k \cdot a = 2\pi$ 以上の領域では、音を放射するモードの数が多く、無限板の場合に近くなっているものと考えられる。1 次の共振周波数が高い場合、高い周波数領域においても、音を放射するモード数が少ないと、共振の影響が大きく出てしまう。また、有限板においてのコインシデンスの現象はモードの放射効率が高い周波数に共振が生じる現象と考えることができるが、共振周波数が高い場合、コインシデンスの影響のある領域でモード周波数の密度が低く、このため特定の振動モードの影響が高周波数においても現れるものと考えられる。

ここで、垂直入射の場合について、試料サイズの影響が現

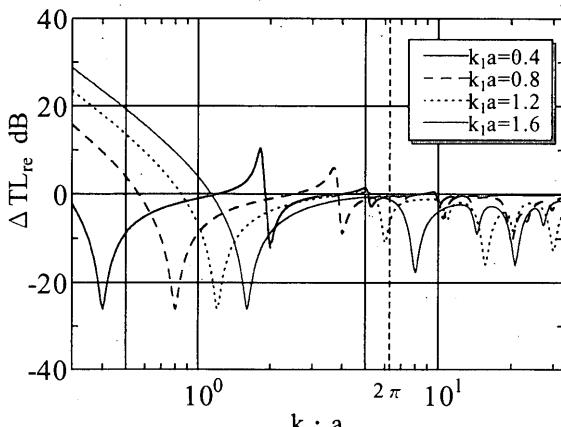


Fig.6 The factor of resonance transmission in ΔTL ($\eta=0.05$).

れににくい条件を考えてみる。非共振成分の影響を考えると測定する周波数までに 3 つ以上のモードの共振周波数が含まれていれば、 $k \cdot a = \pi$ 以上の領域で 2dB までの上昇に抑えることができる。これには 3 次のモードの共振周波数が 1 次のモードの 5 倍であることから、 $k_1 \cdot a < \pi / 5$ を満たせばよい。このとき、共振成分の影響は、 $k \cdot a = 2\pi$ までの領域について注意が必要であるが、1 次の共振周波数が低いため、自動的に現れにくく条件となっている。このことから、逆に、この条件を満たすために必要な試料サイズを求める

$$a > \frac{10\pi}{C} \sqrt{\frac{D}{\rho_s h}} \quad (40)$$

となる。

3. 実験結果

3.1 測定方法 解析結果の検証を行うため、音響透過損失の測定を行い、解析結果との比較を行った。図 7 に測定システムの概要を示す。測定はインテンシティ法を用いた。無響室と残響室の隔壁に設けた開口部 ($0.8m \times 0.8m$) に試料を設置した。残響室（容積: $251.3m^3$ ）を音源室として、スピーカーからホワイトノイズを発生させ、残響室内の 5 点の平均音圧を求めた。無響室を受音室とし、インテンシティプローブにより透過音響パワーを測定した。インテンシティの測定面は、試料を取り囲む box 状に 5 面に設定した。また、測定面を $50mm$ 角のメッシュに分割し、各メッシュごとにプローブを走査して、透過音響インテンシティを測定した。測定は $1/3$ オクターブで行い、周波数範囲は $5kHz$ までとした。試料の取り付けは、遮音壁の開口部周辺にゴムシートを取り付け、試料をその上に粘土で固定した。開口部は辺長 a の正方形で、寸法は $a \times a (m^2)$ として、それぞれ $0.8 \times 0.8, 0.5 \times 0.5, 0.3 \times 0.3$ の 3 種類である。試料サイズが 0.8×0.8 よりも小さい場合、開口部に $6mm$ の鋼板などによって壁構造を作り、小さい試料が取り付けることができるようとした。試料の寸法は取り付けのため開口部よりやや大きいが、ここでは、開口部の寸法で表すことにする。

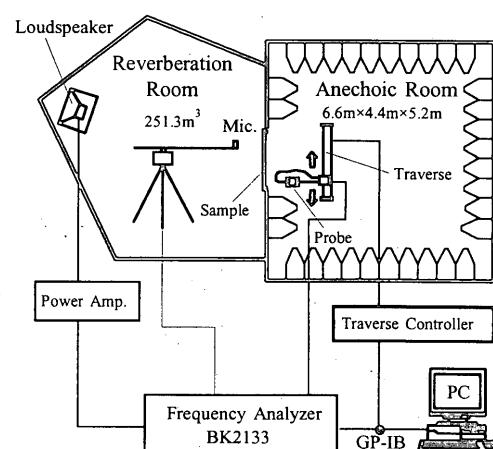


Fig.7 Experimental set-up for measurement of the transmissibility loss with intensity method.

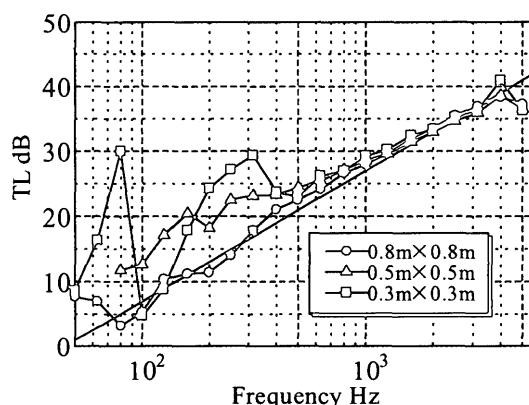
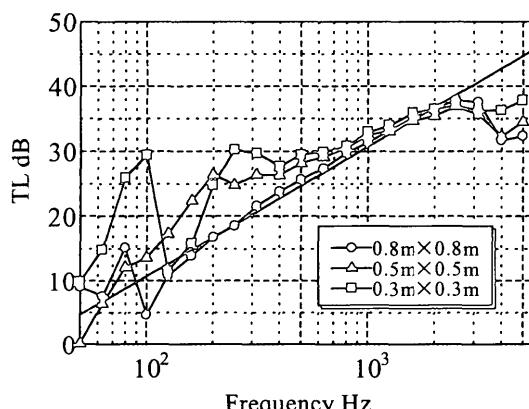
3.2 測定結果 厚さが 2mm と 3mm の Al 板について、測定した結果をそれぞれ図 8、図 9 に示す。また、各試料について 1 次の共振周波数を実測した結果と $k_1 \cdot a$ の値を表 1 に示す。

Table 1 Resonant frequency of first mode of the Al panel.

Sample	Size $a \times a$	f_1 (Hz)	$k_1 \cdot a$ (=2 $\pi f_1/C \cdot a$)
2mm Al Panel	0.8m × 0.8m	17.4	0.26
	0.5m × 0.5m	42.5	0.39
	0.3m × 0.3m	98.7	0.55
3mm Al Panel	0.8m × 0.8m	21.5	0.32
	0.5m × 0.5m	54.0	0.50
	0.3m × 0.3m	134.0	0.74

ここで、 $k \cdot a = \pi$ となる周波数は $a=0.8$ のとき 213Hz, $a=0.5$ で 340Hz, $a=0.3$ で 567Hz となるため、1/3Oct.の場合、帯域を考えて $a \cdot k > \pi$ となるのは、中心周波数が $a=0.8$ で 250Hz, $a=0.5$ で 400Hz, $a=0.3$ で 630Hz のバンド以上となる。

透過損失の測定結果をみると、2mm の Al 板では、各試料サイズの結果は $k \cdot a > \pi$ の領域でほぼ質量則に沿っており、

Fig.8 TL measurement of Al plate ($h=2\text{mm}$)Fig.9 TL measurement of Al plate ($h=3\text{mm}$)

一致している。2mm の Al 板の場合、すべてのサイズの試料において $k_1 \cdot a < \pi/5$ となっており、 $a \cdot k > \pi$ において非共振成分、共振成分とともに影響は小さいという解析結果と一致している。3mm の Al 板では、 $k \cdot a > \pi$ の領域で共振の影響は現れていないが、 $k \cdot a = \pi$ の周波数付近で $a=0.3\text{m}, 0.5\text{m}$ の結果に 2dB 程度の上昇が見られる。特に $k_1 \cdot a > \pi/5$ の $a=0.3$ の場合は、低周波数での上昇が大きいことがわかる。これは、非共振成分の影響と考えられる。

アルミ板のように内部損失の小さい材料においても共振、反共振の影響が $k \cdot a > \pi$ の領域において現れにくいことから、同種の材料については、共振成分の影響は小さいと考えられる。非共振成分の影響については、 $k_1 \cdot a$ が $\pi/5$ と比較して大きくなると $k \cdot a = \pi$ 付近で透過損失が上昇することが確かめられた。このことから、 $k_1 \cdot a < \pi/5$ となるように、試料サイズ a を選ぶ必要があることがわかった。

4. 結 言

矩形単純支持平板に平面音波が入射した場合の透過損失を計算し、試料サイズが透過損失に与える影響を非共振成分と共振成分に分けて検討を行った。また、実験との比較を行った。得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 非共振成分による透過損失の上昇量は、測定周波数までに含まれる低次のモードの共振周波数の数によって決まる。垂直入射の場合、 $k \cdot a = \pi$ の周波数までにモードが 3 つ以上含まれていれば、 $k \cdot a = \pi$ で 2dB 程度の上昇に抑えられる。また、斜入射の場合、試料サイズの影響のため、透過損失が上昇する。
- 2) 共振成分の影響は、 $k \cdot a = 2\pi$ 以上の領域では、反共振の影響は小さく問題とならない。 $k \cdot a = \pi$ 付近では、反共振の影響が生じる可能性があり、この付近に共振がある場合注意が必要である。
- 3) 試料サイズの影響の現れにくい条件を明らかにした。測定する材料が式(40)を満たしていれば、非共振成分、共振成分の影響とともに、 $k \cdot a = \pi$ 以上の周波数で小さいことを示した。この計算結果は実験とよく一致している。

実際の測定では、必要な周波数領域にあわせて、 $a > \lambda/2$ ($k \cdot a > \pi$) となるサイズの試料を用意し、次に 1 次の共振周波数を測定して、 $k_1 \cdot a < \pi/5$ を満たしているか確認を行えばよい。満たしていないければ、満たすように試料サイズを大きくすることによって評価が可能となると考えられる。

文 献

- (1) R.W.Guy, A.De Mey and P.Sauer, Applied Acoustics, 18(1985), 81-98
- (2) E.C.Sewell, J.Sound Vib., 12-1(1970), 21-32
- (3) 川井, 日本音響学会誌, 29-4(1973), 186-198
- (4) 田中, 日本音響学会誌, 31-7(1975), 441-448
- (5) D.Takahashi, J.Acoust.Soc.Am. 98-5(1995), 2598-2606
- (6) 田中, Scott D.SNYDER, 菊島, 黒田, 機論(C編), 59-566 (1993), 3078-3085
- (7) 永田 穂, 建築音響, コロナ社(1988), p.90