

遮音・吸音材料の理論と複合材料

子 安 勝 *

1. まえがき

遮音材料, 吸音材料, 防振材料およびダンピング材料(制振材料という言葉も使われる)は, 騒音や振動の防止に広く使われている。吸音材料の場合には, そのほかに室内の一般的な音響調整すなわち言葉や音楽の聴取環境の改善にも使われることがある。

防音防止におけるこれらの材料の主要な機能をまとめて表1に示した。ここにみられるように, 材料の機能には大きなちがいがあるので, これらの材料を使った騒音防止を的確に行なうためには, 各材料の音響的な機能や特性を規定する要因などを正確に理解しておくことが重要な条件となる。とくに最近では, 材料の複合によって

性能の向上をはかることが多くなっているが, 音響特性については複合材料が常に性能の向上につながるとは限らないので, こうした材料の開発設計や選定を行なうためには材料のもっている音響的な機能についての基礎的な知識が欠くことのできない条件になる。

本文では, 遮音材料と吸音材料について, それぞれ遮音機構および吸音機構の基礎を示すとともに, 複合材料にともなう主要な問題点について解説する。

2. 遮音材料

2.1 遮音材料の性能表示量

(1) 透過率¹⁾

遮音材料の性能を考えるときの基本になる量であって, 次式で定義される。

* 小林理学研究所(185 国分寺市東元町 3-20-41)

表1 騒音防止に使われる各種材料の機能と役割

機能 \ 対象	騒音	振動 (固体伝搬音)
エネルギー反射	遮音材料	防振材料
エネルギー吸収	吸音材料	ダンピング材料

$$\tau = \frac{I_i}{I_r} \quad (1)$$

ここで I_i は材料に入射する音の強さ, I_r は材料の反対側から放射される音の強さである。

(2) 透過損失 R

実用的には透過率がそのまま使われることはなく, 次式で定義される透過損失で性能を表示するのが普通である。

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_r} \quad (2)$$

透過損失の値は dB 単位で示される。そしてこの値は入射音と反対側からの放射音とのそれぞれの音圧レベルの差を示すもので, 透過損失の値が大きいほど遮音性能がすぐれていることを意味している。

2.2 遮音機構の基礎

一般に遮音に対して有効な働きをするのは気密性をもった材料である。そのために, ここでは気密材料の範囲に限って遮音機構の基本的な法則をまとめておく。

(1) 質量法則 mass law

この法則は, 材料の遮音効果に対してその質量のみが関係するとして透過損失特性を与える理論式を導くものである¹⁾。いま均質で厚さの小さな材料に入射角 θ で平面進行音波が入射するときを考える。このとき材料の運動方程式および両側の空気についての連続式は

$$p_i + p_r - p_t = \frac{Z}{S} u_0 \quad (3)$$

$$u_i \cos \theta - u_r \cos \theta = u_t \cos \theta = u_0 \quad (4)$$

となる。ここで p_i, p_r, p_t はそれぞれ入射音, 反射音, 透過音の音圧であり, u_i, u_r, u_t は入射音, 反射音および透過音の粒子速度である。また Z は材料の機械インピーダンス, S はその面積, u_0 は面に垂直な材料の振動速度である。

(3), (4) 式および $p = \rho c u$ の関係 (ρ, c はそれぞれ空気の密度および音速) から, θ 方向からの入射平面音波に対する透過損失 R_θ は次式であらわされる。

$$R_\theta = 10 \log_{10} \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{(Z/S) \cos \theta}{2\rho c} \right|^2 \quad (5)$$

いま材料の剛性や内部損失などに起因する抵抗を無視すれば, $Z/S = i\omega m$ (ω は音の角周波数, m は面密度である) となり, (5) 式は次のように書くことができる。

$$R_\theta = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2\rho c} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

実用的には, すべての方向からランダムに音が入射するときの透過損失が使われる。すなわち

$$R = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} R_\theta \cos \theta \sin \theta d\theta} = 20 \log_{10} \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) - 10 \log_{10} \left\{ \log_e \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

面密度 m のいくつかの値に対して, (7) 式で計算した透過損失を図1に示す。周波数あるいは面密度が2倍になるときに透過損失はほぼ 5dB の割合で増加する。

実際の材料について, 透過損失の実測値を質量法則と比較した結果を図2に示した²⁾。(7) 式からわかるように透過損失は周波数と面密度との積 mf の関数になるので, 図2は横軸に mf をとって整理したものである。この場合には, 質量法則(7) 式は1本の曲線で与えられる。この図に示されるように, 質量法則は透過損失の実測値をかなりよく近似するものである。

(2) コインシデンス効果 coincidence effect

さきの図2において mf の値が $10^4 \sim 10^5$ の範囲では, 透過損失の実測値は質量法則よりもかなり小さくなっている。これは材料の曲げ振動と入射音との関係でおこるものであって, コインシデンス効果とよばれている³⁾。

すなわち, 実際の材料には質量法則を考えるとときに無視した剛性があるために, これに音があたることによって曲げ波が発生し, その位相が斜方向から入射する音の材料面上での位相に一致すると音は完全に透過する。この現象は材料の曲げ剛性のほかに, 音の入射角度と周波数とに関係する。ランダムに音が入射するときには, 周波数ごとに特定の入射角度で完全透過がおこるので, 結果的にはある周波数領域で透過損失が質量法則による値以下になる。この現象のおこる最低周波数をコインシデンス限界周波数 f_c とよんでおり, 均質といった材料の場合には次式で与えられる。

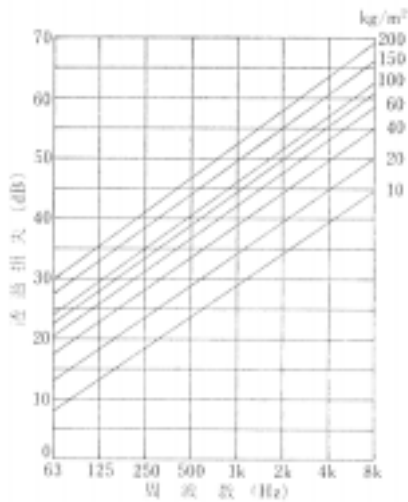


図1 質量法則による透過損失の理論値（右上の数値は面密度）

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12\rho_m}{E}} \quad (\text{Hz}) \quad (8)$$

ここで c は空気中の音速度, ρ_m, t, E は材料の密度, 厚さおよびヤング率である。代表的ないくつかの材料について, 厚さ 1mm の場合の f_c の計算値を表 2 に示した。

均質一体材料の透過損失は, 質量法則とコインシデンス効果とによってほぼ完全に推定することができる。この範囲で透過損失を大きくするためには, 面密度を大きくしてさらにコインシデンス効果がおこりにくくすればよい。コインシデンスによる透過損失の低下をおこさないようにするためには, 曲げ剛性を小さくしてコインシデンス限界周波数ができるだけ高周波数になるようにするのが原則である。そのほかに, コインシデンスの影響

表 2 各種材料の厚さ 1cm のときのコインシデンス限界周波数 f_{ci}

材	料	f_{ci} (Hz)
鋼	板	1,230
アルミニウム	板	1,230
鉛	板	5,380
ガラス	板	1,210
石綿セメント	板 (F)	2,280
鉄筋コンクリート		2,120
合	板	1,980

を除去するためには, ダンピング処理を行ったり, 材料の表面に多孔質吸音材料を貼ったりする方法がある。

2.3 複合構造の遮音機構

質量法則によって遮音構造の設計, 選定を行なうことは, もっとも確実な結果を期待することのできる方法である。ただこの場合には, 図 1 からわかるように質量を 2 倍にしたときの透過損失の増加は 5dB 程度であって, 大きな遮音効果をうるためには非常に大きな質量になることが避けられない。

これに対して, 比較的軽量で大きな透過損失をうるためには, 二重構造などの複合構造が有効であるといわれている。ただこの場合には遮音の機構が複雑になるので, 断面構造だけから遮音性能を推定することはむずかしい。ここでは複合構造の遮音特性についての基本的な事項と要因とを示しておく。

(1) 中空二重構造

比較的厚さの小さい 2 枚の均質材料が, 空気層を介して平行に設けられたものであって, 複合材料のうちではもっとも簡単な構成である。この場合でも下地構造による結合の影響を含めた解析はむずかしいので, ふつうには空気結合のみを考えた取扱いが行なわれている。両面

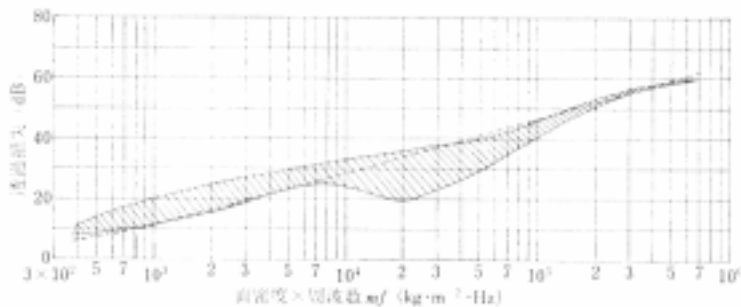


図 2 各種均質材料の透過損失データを mf で整理したもの（点線は質量法則値）

の材料が等しく、その剛性や抵抗が無視できる場合について、ランダム入射に対する透過損失の理論式は次式で与えられている⁴⁾。

$$R = 10 \log \left[2 \int_0^{\pi/2} \left\{ 1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \cos^2 \theta \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\cos \phi - \frac{\omega m}{2\rho c} \cos \theta \sin \theta \right)^2 \right\} \cos \theta \sin \theta d\theta \right] \quad (9)$$

ここで m は表面材料の面密度、 $\phi = kd \cos \theta$ 、 k は波長定数、 d は空気層の厚さである。

この透過損失特性の特徴を理解するために、さらに簡単な垂直入射 ($\theta=0$) の場合についての計算例を図3に示す。まず第一に注目されるのは、 $R=0$ となる周波数が存在することである。これは両面材料の質量と空気層の弾性によって構成される系の共鳴によるものであって、その周波数は次式で求められる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho c^2}{md}} \quad (10)$$

f_r 以上の周波数で透過損失の値は急激に大きくなり、 $\sqrt{2}f_r$ で両面材料を密着させたときの質量法則曲線と交わり、これ以上の周波数では質量法則を大きく上まわることになる。すなわち、複合構造が遮音性能の面ではほんとうに意味があるのは $\sqrt{2}f_r$ 以上の周波数であって、対象となる音の周波数領域に対して f_r がじゅうぶんに小さくなるように断面構成を選定することが、中空二重構造としてもっとも重要な点になる。

(2) 一般複合構造

実用的な複合構造の構成としては、基本的に二つの形式が考えられる。その一つは前項の中空二重構造におけ

る空気層の部分に多孔質吸音材料を充したものであり、他の一つは異種材料を積層した形式である。複合材料の遮音特性は、このような構造形式によって大幅に違ったものになる。

多孔質吸音材料充 二重構造は、現場施工の形式をとることが多く、純粋な意味での複合材料とはいえない。この場合の遮音特性は原則的には中空のときと同様であって、吸音材料充の効果はまず共鳴周波数 f_r 付近で透過損失が低下するのをふせぐことにある。 f_r 以上の周波数域でも、多孔質材料は透過損失を大きくするのに役立つはずであるが、実際には間柱などの下地による結合の度合によって、透過損失はかなり変わるものである。

積層構造 (サンドイッチ構造) は遮音パネルとして工場生産されているものが多い。この構造では、中間層を構成する材料が下地構成材料として、パネルを所定の厚さに保持するための機能ももつようになっているものも少なくない。

積層構造の透過損失には、中間層の剛性の程度が大きな影響をもっている。代表的な遮音特性の例を図4,5に示す。中間層材料の剛性が比較的小さいときには、透過損失特性は中空二重構造に近いものになるが、空気に比較すれば弾性率は大きいので、図4の例のように透過損失の低下周波数 f_r が中高音域にあらわれることが多い。剛性の大きな材料を中間層にすると、その特性は均質な材料に近くなって全体として質量法則によって近似されるものになる。

このようにして、積層構造の透過損失を質量法則以上にするためには、材料の構成などについて多くの研究が

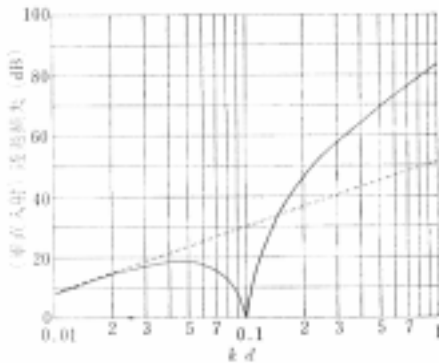


図3 中空二重構造の透過損失理論値 (久我)
 k : 波長定数, d : 空気層厚さ (点線は全体面密度に対する質量法則値)

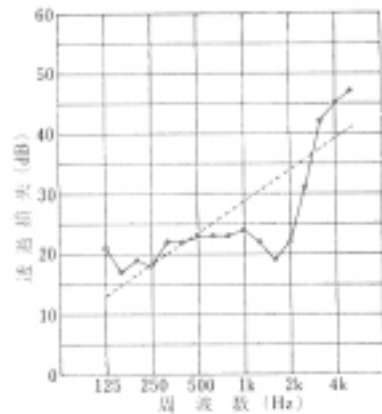


図4 弾性材料充 積層構造の透過損失の例 (点線は質量法則値)

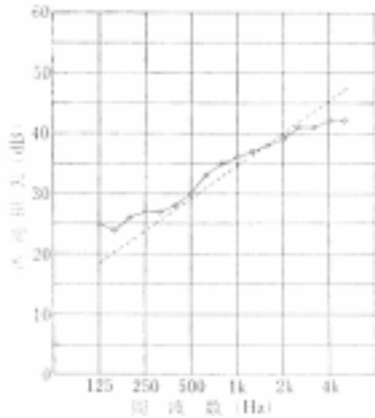


図5 剛性材料充 積層構造の透過損失の例 (点線は質量法則値)

必要である。基本的にはこの場合の遮音機構を解析した理論から出発して材料の開発設計を行なうのが本来の方法であるが、実際には実験を併用して理論の不備を補充しながら開発を進めるようにしなければならない。

3. 吸音材料

3.1 吸音材料の性能表示量

(1) 吸音率

実用面でもっとも一般的に使われている量で、材料に入射する音の強さを I_i , それからの反射音の強さを I_r としたとき次式で定義される。

$$\alpha = 1 - \frac{I_r}{I_i} = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad (11)$$

吸音率は音の入射条件に関係する。ふつうにはランダム入射条件に対応すると考えられる残響室法吸音率が、実用的にもっとも重要な量として使われている。

(2) ノーマル音響インピーダンス

吸音材料の表面における音圧と、表面に垂直な音の粒子速度成分との比として定義される。一般にノーマル音響インピーダンス z_n は複素量になり、次式のようにあらわすことが多い。

$$z_n = \rho c (r_n + ix_n) \quad (12)$$

ここで ρ は空気中の密度, c は空気中の音速度である。

このとき入射角度 θ に対する吸音率は、次式であらわされる。

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{z_n \cos \theta - \rho c}{z_n \cos \theta + \rho c} \right|^2$$

$$= \frac{4r_n \cos \theta}{(r_n \cos \theta + 1)^2 + x_n^2 \cos^2 \theta} \quad (13)$$

またランダム入射吸音率は、次式で計算される。

$$\alpha = 8 \int_0^{\pi/2} \frac{r_n \cos^2 \theta \sin \theta}{(r_n \cos \theta + 1)^2 + x_n^2 \cos^2 \theta} d\theta \quad (14)$$

このようにノーマル音響インピーダンスは吸音率に対応し、また他方では材料の基本的な物性量と関連させることができるので、材料の吸音機構を解析したり新しい材料の開発設計をするのに有効な量である。

3.2 吸音機構の基礎

吸音材料には非常に多くの種類があるが、吸音機構としては最終的には音のエネルギーを熱エネルギーに変換して減衰させるものになっている。ただ実際には音から熱への変換に関する要素が材料によって異なり、これが吸音率の周波数特性などにも関係している。

現在実用されている吸音材料は、その主要な吸音機構からみると表3の2種類に大別される。ここではそれぞれについて概要を示す。

(1) 粘性による音の減衰 - 1. 多孔質材料

グラスウール、ロックウールなど多孔質材料をはじめとして、吸音材料のなかでは空気中の粘性を主要な吸音機構にしているものが大部分を占めている。

この場合には、多孔質材料を表面に垂直毛細管の集合としてモデル化して取り扱うことができる。まず1本の円形毛細管(半径 a)の中に、一方方向の微小空気流があるとき単位長さあたりの流れ抵抗(圧力差と流速との比) R_f は次式で与えられる。

$$R_f = 8\mu / a^2 \quad (15)$$

ここで μ は空気中の粘性係数である。

いま毛細管中の空気は、自由空間と同じ密度で流れ抵抗に相当する摩擦をうけるとすると、その中の伝搬する音の音圧 p と粒子速度 u_f について、次の関係が成り立つ。

表3 吸音機構による材料の区分

主要な吸音機構	材 料
粘性による減衰	繊維集合体 多孔質材料(連続気泡) あなあき板
内部損失による減衰	板 材 料 膜 材 料 柔軟材料

$$\text{運動方程式} \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = (i\omega\rho + R_i)u_i \quad (16)$$

$$\text{連続の式} \quad -\frac{\partial u_i}{\partial x} = \frac{i\omega}{K}p \quad (17)$$

ここで ω は音の角周波数, ρ, K は空気の密度, 体積弾性率である。いま毛細管の長さを半無限, すなわち材料の厚さが非常に大きいとして, 上の2式から求められる波動方程式を解き, 材料表面でのノーマル音響インピーダンス W と複素波長定数 k^* とが, それぞれ次式のように与えられる。

$$W = \frac{\rho c}{\sigma} \sqrt{1 - i \frac{R_i}{\omega\rho}} \quad (18)$$

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K} \sqrt{1 - i \frac{R_i}{\omega\rho}}} = k \sqrt{1 - i \frac{R_i}{\omega\rho}} \quad (19)$$

ここで σ は材料の全表面のうちで, 毛細管の孔の部分の占める面積の比 (多孔度) である。

実際に材料の厚さ l が有限で, その背面の音響インピーダンスが z_{n1} であるときに, 材料表面におけるノーマル音響インピーダンス z_n は次式で与えられる。

$$z_n = W \frac{z_{n1} \cos(k^*l) + W \sin(k^*l)}{z_{n1} \sin(k^*l) + W \cos(k^*l)} \quad (20)$$

とくに材料の特性を考える基本的な条件として, 材料背面が直接剛壁に接するときには, $z_{n1} \rightarrow \infty$ として

$$z_n = W \cot(k^*l) \quad (21)$$

となる。

このようにして, 材料のノーマル音響インピーダンスが与えられれば, さきの式(14)で吸音率を算出することができる。実際の吸音材料を毛細管の集合で近似するのは, 単純化しすぎるということから, 新しい因子を導入した修正理論もつくられている。いずれにしても, 多孔質材料においては, 粘性に対応する流れ抵抗が重要な役割をすることは確実である。図6は厚さ一定のグラスウール製品について, 流れ抵抗と周波数ごとの吸音率との関係を示したもので, 両者の相関は非常に大きい。

多孔質材料の吸音特性は, 流れ抵抗と厚さによって規定されるものであって, その代表的な傾向を図7に示した。

(2) 粘性による音の減衰 2. あなあき板材料

貫通孔をもった板の背面に空気層をおいた構造 (空気層の部分に多孔質材料を充 することが多い) が吸音用に使われることが多い。この場合には, あなの部分における空気の運動による粘性損失が吸音作用の中心になる。実際の構造についての典型的な吸音特性の例を図8

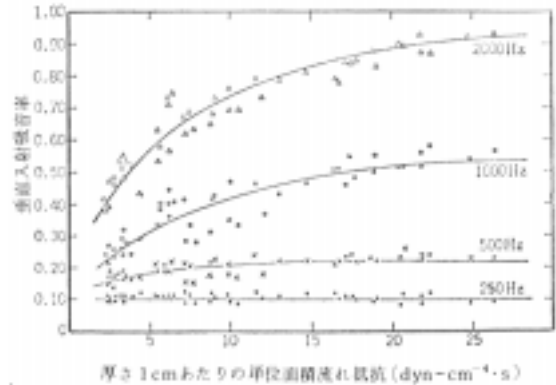


図6 流れ抵抗と吸音率との関係 (グラスウール 厚さ 25 mm の場合)

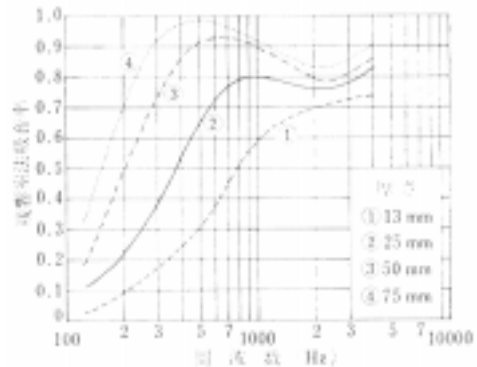


図7 多孔質材料の吸音特性の傾向

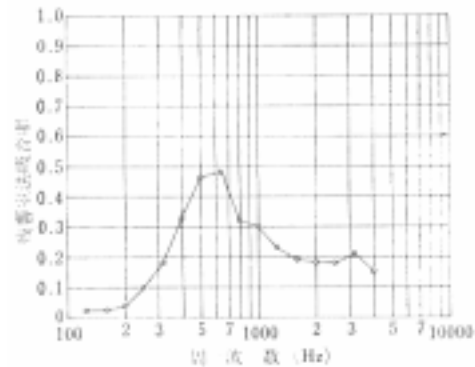


図8 あなあき板材料の吸音特性の例

に示した。吸音率は特定の周波数で極大値をとり, これを中心にした山形の吸音特性になっている。

これは, あなの部分の空気が質量, 背後空気層がばね

となって構成される系の共鳴がこの周波数で起こり、あな部分の空気の運動速度が最大値をとるためであって、共鳴周波数は次式で与えられる。

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{(t+0.8d)L}} \quad (22)$$

ここで t, d は板の厚さとあなの直径, p はあな面積率であり, L は背後空気層の厚さである。すなわち、この場合の吸音特性に対しては、あなあき板の諸寸法と使用条件とが重要な意味をもつことになる。

(3) 内部損失による音の減衰

板や膜状材料, 独立気泡弾性材料などでは、粘性による音の減衰はおこらない。これらの材料(板や膜の場合には背後に空気層のある条件)では、音があたったときに振動する。このとき材料の内部損失などに対して振動を持続させるためには、外からエネルギーを供給することが必要であって、これが音の吸収としてあらわれる。

この種の吸音機構については、現在定量的な解析はむずかしい。ただこれらの材料の吸音作用は材料の振動速度振幅に関係し、振動振幅が極大となる周波数(共振周波数)において吸音率がピーク値を示す。そのために、実際の吸音特性に対しては、材料の諸要因と共振周波数との関係が重要である。もっとも簡単な条件として、板や膜自身の剛性を無視して、その質量だけを考えると、共鳴周波数は次式で与えられる。

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{ML}} \quad (23)$$

ここで M は板あるいは膜の単位面積質量, L は空気層の厚さ, ρ は空気の密度, c は空気中の音速度である。実際には板や膜の曲げ剛性が関係することが多いが、これには板や膜自身の弾性や寸法のほかに支持条件も影響するので、正確な解析的表示を与えることはむずかしい。

3.3 吸音材料としての複合材料

現在吸音材料として複合構造を考えるのは、主として次の二つの意味をもっている。

(1) 吸音特性の調整を目的とした複合材料

吸音材料の使用目的のなかで、音の聴取環境の調整を行なうときには、各周波数ごとに吸音率が所定の値をもつことが必要になる場合がある。吸音特性の面からみた複合材料の必要性は、主としてこうした用途に対応したのものになる。

実際には前節表3に示した各材料の吸音特性に応じて

使用面積を調整し、全体として所要の吸音特性になるようにすることが多い。1種類の材料で任意の吸音特性をもつようにすることができれば便利であって、こうした複合構造の開発が望まれる。

(2) 吸音特性以外の機能条件を目的とした複合材料

ここで機能条件としては強度, 意匠, 施工性などのほかに、耐熱(防火), 耐水, 耐紫外線などいくつかのものがあげられ、騒音防止に使用するとき問題になることが多い。

現在このような使用条件に対しては、ふつうの吸音材料の組合せ構造が使われることが多く、とくにあなあき板と多孔質材料の組合せが中心になっている。この場合に複合構造としての吸音特性には、最終的に表面を構成する材料の性能が重要な役割をする。その例を図9に示す。実際に従来の吸音材料で使用条件の要求を完全に満たすことのできない場合が生ずるのは、こうした問題のときであって、複合吸音材料の開発の中心はここに向けられることが望ましい。

4. む す び

以上遮音材料および吸音材料の2種類について、それぞれの特性の基礎的な事項を整理するとともに、複合材料としての可能性, 問題点などを示した。

ここにみられるように、複合材料といっても吸音材料や遮音材料の場合には、少なくともこれまでではかなり巨視的な意味での複合ということが中心になってきたといえることができる。これは基本的には、可聴周波数の音の波長が材料の寸法(とくに厚さ)と同程度かまたはそれ

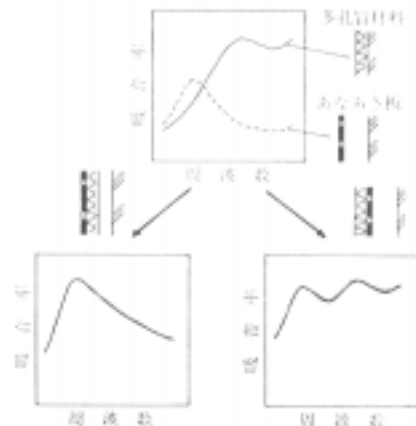


図9 あなあき板と多孔質材料との複合構造の吸音特性

以上であることによっている。ここで述べた遮音や吸音の機構が物性的にみてかなり巨視的な現象を主にしているのも、結局はこれに起因しているということが出来る。

ただ今後これらの材料の適用範囲がひろがることは、じゅうぶんに期待されることであり、その場合により本質的な意味での材料の複合ということが望まれるのは問題の一つにダンピング材料がある。ダンピング材料が海外で開発されてからはもちろん、わが国で生産使用されるようになってからすでにかなりの期間を経ているが、現状では必ずしもじゅうぶんに特徴を活かした使われ方がされているとは限らない。こうしたダンピング材料を含めた複合材料ということが、今後の重要な課題である

とあってよいであろう。

参 考 文 献

遮音材料 吸音材料についての詳細やデータなどに関しては、下記の著書が参考になる。

- 久我新一：建築用遮音材料，技術書院，東京（1974）.
子安 勝：建築用吸音材料，技術書院，東京（1972）.
子安 勝：吸音材料，技報堂，東京（1976）.

なお本文では、次の各論文を引用した。

- 1) A. London: *J. Res. N.B.S.*, 42 (1949), 605.
- 2) 子安 勝，中村俊一：日本音響学会誌，16(1960)，265.
- 3) L. Cremer: *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*，S. Hirzel Verlag, Leipzig (1950), p. 150.
- 4) A. London: *J. Acoust. Soc. Am.*, 22 (1950), 270.