

吸音の基礎事項

Fundamentals on Sound Absorption and Sound Absorbing Materials

子安 勝 (Masaru Koyasu)

音響工学研究所 (Acoustical Engineering Laboratory)

まえがき

吸音材料は、室内音響や騒音などの面からの音環境の調整を始めとして、音の世界における非常に広い範囲で利用されている。本郷では、この吸音材料を特集テーマとして、主要な用途に対する吸音材料の使い方や新しい吸音材料の現況などについて、解説されることになっている。

本文では、この特集への入門として、吸音及び吸音材料の基礎事項を解説する。

1. 吸音材料の性能表示方法

吸音材料の性能表示には、これまで各種の量が使われている。これらの量は、その意味や測定方法の難易さなどに特徴があり、目的に応じて使い分けられる。

1.1 吸音率

(1) 定義

実用面で、最も一般的に使われているのは吸音率である。これは図1に示すように、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。

$$\text{吸音率} \quad \alpha = 1 - \frac{I_r}{I_i} = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad \dots\dots(1)$$

この式から、完全反射面では $I_r = I_i$ であるため $\alpha = 0$ となり、一方完全吸音面 ($I_r = 0$) では $\alpha = 1$ となる。そして一般の材料では、吸音率は0～1の範囲にあって、その値が大きいほど吸音効果が大きいことを示す。

吸音率は、材料自身の性質のほか、次に各条件にも関係する。

材料背面の条件 (背後空気層など)

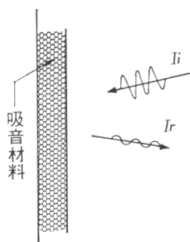


図1 吸音率の定義

材料の施工条件 (下地構造の取付け方法)

入射音の周波数と入射角度

そのため、吸音率に対しては、これらの条件を明確にしておくことが重要である。

(2) 入射条件からみた吸音率の種類

図2に示す種類の代表的な入射条件に対応して、それぞれ次のように規定されている。

垂直入射吸音率 材料に平面音波が垂直に入射するときの吸音率を示すもので、記号 α_0 または α_n で表わされる。原理的に測定精度は高いが、音の入射条件が特殊であり、試料の支持条件も限定されているので、現在では主として多孔質材料の製品の品質管理や研究開発に応用されることが多い。特別な用途として、無響室などに使われる吸音くさびの性能表示には、垂直入射吸音率 (または音圧反射率) が使われている。

斜入射吸音率 材料面の法線に対して入射角度 θ で平面音波があたるときの吸音率で、記号 α_θ で表わす。この吸音率は実用面での応用に多くの可能性をもっているが、測定方法が標準化されるまでに至っていないので、実際の吸音材料についてのデータは、ほとんど得られていない。

ランダム入射吸音率 材料面に対して、すべての方向から等しい確率で音が入射するときの吸音率である。実際の吸音材料の使用状態での音の入射条件が、いつもこのようになっているとは限らないが、材料の吸音性能を各周波数ごとに一つの値で代表させるためには、さきの垂直入射吸音率や斜入射吸音率よりも一般性がある。また大きな室では、ほぼランダム入射に近い状態が実現されることが多いと考えられるので、実用面で最も重要な吸音性能の表示量になっている。

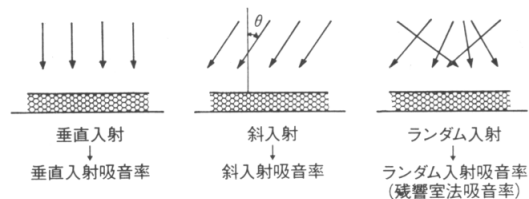


図2 音の入射条件と吸音率の種類

実験的にランダム入射吸音率を求める方法として使われているのが、よく知られている残響室法であるが、この方法には測定の原理や技術上にいくつかの問題があるために、残響室法で求めた吸音率は必ずしもランダム入射吸音率と一致しない。そのため、この場合の吸音率を特に残響室法吸音率とよんで区別している。いずれにしても、残響室法吸音率は実用的に最も重要な量で、普通に吸音率のデータというときには、特にことわらない限りこれを指すものとしてよい。

(3) 吸音率周波数特性の表示方法

吸音率のデータは、各周波数ごとの吸音率の値が表または図で示される。

以前には、吸音性能の簡単な表示方法として、特定の周波数（例えば 500Hz）における吸音率の値で代表させたり、いくつかの周波数に対する吸音率の算術平均値で示したりすることがあった。ただ最近のように吸音材料の種類が多くなると、吸音率の周波数特性も多岐にわたっており、一つの数値で材料の吸音効果を的確に表示することはむずかしい。しかし一面では、こうした簡単な表示方法の有用性も認められており、現在 ISO で国際規格作成の作業が始められている。

1.2 ノーマル音響インピーダンス

(1) 定義

吸音材料のノーマル音響インピーダンスは、材料表面における音圧と表面に垂直な粒子速度成分の比として定義される。図 3 に示すように吸音材料に角度 θ で音が入射するとき、材料表面における入射音及び反射音の音圧を p_i, p_r とすれば、ノーマル音響インピーダンス Z_n は次式で与えられる。

$$Z_n = \frac{\rho c}{\cos \theta} \cdot \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は空気密度、 c は空気中の音速度である。 ρc は空気の固有音響抵抗と呼ばれる量であり、通常の状態ではほぼ $420 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ となる。

式(2)から、完全反射面 ($p_i = p_r$) では Z_n は無限大、完全吸音面 ($p_r = 0$) では $Z_n = \rho c / \cos \theta$ となる。一般の材料では、反射にあたって音圧の絶対値だけでなく位相も変化するので、 Z_n は複素量となる。そこで、 r_n, x_n を実数値としてノーマル音響インピーダンスを次式

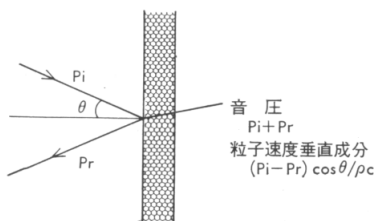


図3 ノーマル音響インピーダンスの定義

のように表すことが多い。

$$Z_n = \rho c (r_n + jx_n) \quad \dots\dots (3)$$

そして電気回路で使われている用語にならって、 r_n を音響抵抗、 x_n を音響リアクタンスと呼んでいる。

ノーマル音響インピーダンスは吸音率ほど直観的な量ではないが、音が材料面で反射するときの音圧絶対値と位相の変化を表わし、吸音機構の解析や吸音特性の調整に利用されているほかに、室内音場の波動論による解析における境界条件の基本量として使われる。

(2) 吸音率との関係

式(2)を書換えると、音圧反射率 r として次式の関係がえられる。

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_n \cos \theta - \rho c}{Z_n \cos \theta + \rho c} \quad \dots\dots (4)$$

これから入射角度 θ に対する吸音率 α_θ は、

$$\alpha_\theta = 1 - |r|^2 = 1 - \left| \frac{Z_n \cos \theta - \rho c}{Z_n \cos \theta + \rho c} \right|^2 \quad \dots\dots (5)$$

で表される。ノーマル音響インピーダンス Z_n として、式(3)で与えられる r_n と x_n とを使えば、式(5)は次のようになる。

$$\alpha_\theta = \frac{4r_n \cos \theta}{(r_n \cos \theta + 1)^2 + x_n^2 \cos^2 \theta} \quad \dots\dots (6)$$

特に垂直入射 ($\theta = 0$) の場合には、式(6)は更に簡単になって次のように書くことができる。

$$\alpha_0 = \frac{4r_n}{(r_n + 1)^2 + x_n^2} \quad \dots\dots (7)$$

x_n をパラメータとして、 r_n と垂直入射吸音率 α_0 との関係の計算結果を図 4 に示した。

実用的にも最も重要なランダム入射吸音率 α は、 α_θ から次式で計算される。

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

一般の吸音材料では、ノーマル音響インピーダンスが音の入射角度によって変化するので、上式でランダム入射吸音率を求めるのは簡単ではない。普通には、ノーマル音響インピーダンスが音の入射角度に無関係に一定である(局所作用性)として、ランダム入射吸音率を算出することが多い。この局所作用性は、例えば毛細管を面に垂直方向に並べたモデルでは厳密に成立つものであるが、普通の多孔質吸音材料でも近似的に満足するものとして、ランダム入射吸音率の計算に使われている。

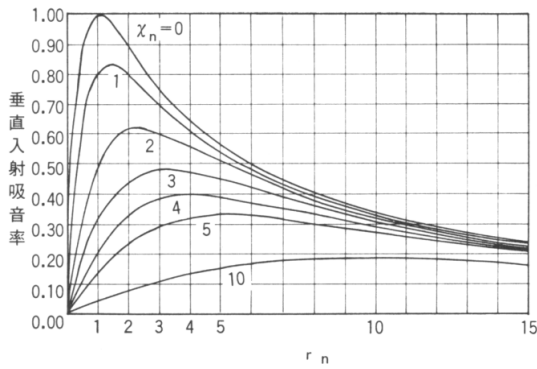


図4 ノーマル音響インピーダンス $Z_n = r c(r_n + j x_n)$ と垂直入射吸音率との関係

1.3 単位面積流れ抵抗

(1) 定義

多孔質吸音材料の単位面積流れ抵抗 R は、材料の表面に垂直方向に一定の空気流を通したときの流速と、材料両面間の圧力差 ΔP とから、次式で定義される。

$$R = \frac{\Delta P}{V} (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^3) \quad \dots\dots (9)$$

単位面積流れ抵抗は、布や紙などの通気性を示すのに使われる通気抵抗と原理的に同じものである。ただ音は流速が非常に小さい状態に相当するので、流速が0に近づいた場合の極限值として定義される。

(2) 吸音率との関係

多孔質吸音材料の代表例として、グラスウールについての単位面積流れ抵抗と垂直入射吸音率との関係を図5に示した。この例のように、各周波数ごとの垂直入射吸音率は単位面積流れ抵抗と非常に相関をもっている。しかも単位面積流れ抵抗の測定は、吸音率の場合よりも簡単であるために、多孔質材料の吸音性能の表示量として非常に有効である。

従来多孔質材料の品質使用の一つとして、密度が使わ

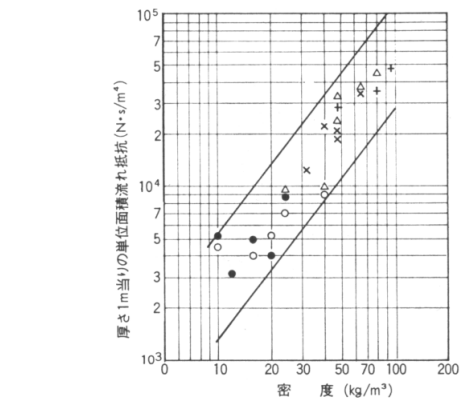
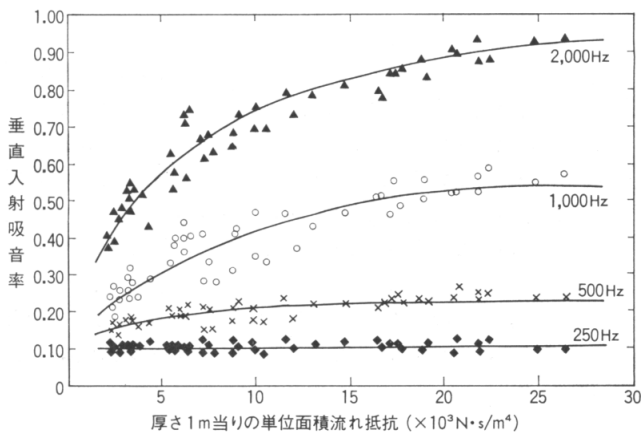


図6 グラスウールの密度と単位面積流れ抵抗との関係

図5 グラスウール（厚さ25mm）の流れ抵抗と垂直入射吸音率

れてきた。グラスウールの各種製品について、密度と単位面積流れ抵抗との関係を図6に示す。同一密度であっても単位面積流れ抵抗には相当のばらつきがある。これは繊維径、配列や接着剤の状態などのちがいによるもので、吸音品質の規定に対して密度では不十分であることを示している。このため、JIS A 6306（グラスウール吸音材）で単位面積流れ抵抗が品質規定に使われており、今後さらに各種多孔質材料の品質規定や製品管理などに活用されることが望まれる。

2. 吸音性能の測定方法

本章に示した各種吸音性能については、異なった試験機関などで測定されたデータの相互比較を行うことができるようにするために、測定方法の標準化・規格化が行われたり、その制定作業が進められている。現段階における対応 JIS 規格及び ISO 規格（国際規格）の一覧を表1に示した。

ここでは、各規格の特徴や特にデータを見るときの参考事項、今後の規格動向などを簡単に解説しておく。残響室法吸音率 実用的に最も広く使われている測定

表1 吸音性能測定方法規格一覧

規格種類 性能項目	日本工業規格	国際規格
残響室法吸音率	JIS A 1409	ISO 354
垂直入射吸音率	JIS A 1405	ISO 10534 ¹⁾
ノーマル音響インピーダンス		
単位面積流れ抵抗	JIS A 6306（グラスウール吸音材） 6. 試験方法に規定	ISO 9053 ²⁾

注 1) 現在DP（規格案）の段階
2) 近く公布予定

方法であるが、測定の原理からいって誤差が大きくなる
ことが避けられない。特に下記の事項に留意することが
必要である。

残響室の形状・寸法がちがうことによって、吸音
率の値に差異を生ずることがある。

算出された吸音率の値が1.0を超えることがあ
る。この場合、試験機関によって(1)0.1以下になる
ように補正して表示する、(2)1.0を超えたものをす
べて1.0として表示する、(3)算出値をそのまま表示
するなどの方法がとられているので、データをみる
ときに注意が必要である。

垂直入射吸音率 測定精度が高いことが特長になっ
ているが、規格化されている管内法では、使用する音響管
の長さや断面寸法(直径など)によって、測定周波数の
上下限が規定されることに注意しなければならない。また
断面寸法が限定されているので、通常は多孔質吸音率材
料の測定に対して適用される。

ノーマル音響インピーダンス わが国ではほとんど
実用されていないが、室内音場・ダクト音場の解析、吸音
機構の解析などに対して基本的に重要な役割をもってい
る。またランダム入射吸音率の算出にも利用される。

垂直入射吸音率とともに、現在では音響管内の定在波
音場を移動マイクロホンで測定する方法が標準化されて
いるが、ISO では次の段階として、2個以上の固定マ
イクロホンを使った音響管内の伝達関数法などの規格化
が進められている。

単位面積流れ抵抗 定義通りの測定方法が基本である
が、微小圧力・流速の測定の困難さが精度を規定する要
因になっているために、ISO ではこれとともに 2Hz
の交流圧力法も規定されている。

3. 吸音材料の種類と吸音機構の基礎

3.1 吸音材料の分類

現在、一般に使用されている吸音材料には非常に多く
の種類がある。これらの吸音材料は、次のように分類し
て取扱われることが多い。

- 多孔質材料
- 成形吸音板
- 柔軟材料
- 膜状材料
- 板状材料
- あなあき板材料
- 特殊吸音構造

このうちで ~ の分類は、直接には材料の外観によっ
てたものであるが、大部分の場合、外観上の特徴が吸音機
構に結びついていると考えてよいので、各材料の吸音特

性の特徴を理解するのに便利である。

本章では、上記の各種類のなかの主要な品質につい
て、材料の構成・吸音機構・基本的な吸音特性など、吸
音材料の基礎事項を解説する。

3.2 多孔質材料

(1) 種類

古くから吸音材料の主力製品になっており、市場にあ
る吸音材料にはこの種類に属するものが多い。

実際の製品としては、グラスウールやロックウールな
どの無機質繊維が中心になっている。これらの繊維質材
料では、その内部に複雑に連結された多数の小さなす
まがあって、これが吸音機構に対して本質的な役割をし
ている。文字通りの多孔質材料としては、ポリウレタン
などの発砲体やスポンジなどがある。ただこれらの材料
では、気泡の状態に独立気泡と連続気泡との2種類があ
る。ここでいう多孔質吸音材料に含まれるのは連続気泡
材料であって、独立気泡材料は構造的には多孔質である
が、吸音機構から見ればここには入らない。

(2) 吸音機構

多孔質材料に音があたると、その空気振動(圧力変
動)が直接に材料内部のすきまや気泡部分の空気に伝わ
る。ここで繊維や気泡の面での空気の粘性摩擦を生じ、
音のエネルギーの一部が熱エネルギーに変換され、吸音
作用を生ずることになる。なお材料の構成によっては、
繊維や気泡の膜自体も振動し、副次的に吸音作用を示す
こともある。

多孔質材料の吸音機構の解析に対しては、これを表面
に垂直な毛細管の集合としてモデル化し、毛細管中の空
気の粘性に対応した単位面積流れ抵抗を使った理論が基
本になっている。ただこの近似理論は、実際の多孔質材
料を単純化しすぎているということで、さらに多くの修
正理論が作られている。

(3) 基本的な吸音特性

多孔質材料の吸音特性に関係する品質使用として、実
用的には厚さと密度、それに補助的に繊維径やセル寸法
が使われているが、基本的には厚さと単位面積流れ抵抗
が重要である。

材料の厚さと吸音特性 同一種類の多孔質材料につい
て、剛壁密着の条件での厚さと吸音特性との関係を示す
例を図7に示した。多孔質材料の吸音率は周波数の増加
とともに大きくなり、ある周波数でほぼ一定値に達す
る。そして、厚さの増加に伴って中低音域の吸音率が
大きくなり、吸音材料として有効な周波数領域が広がっ
ている。この材料の厚さは、同一品種の多孔質材料の範囲
で吸音特性を規定する最も重要な条件になる。

使用条件と吸音特性 材料の厚さ、密度を一定にした

表2 多孔質材料の吸音特性を変えないための表面仕上げ方法

材 料	条件, 使用上の注意
メタルラス, エクスパンドメタル, 網	特になし
通気性の大きい織物 (サラungkロス, ヘシアungkロス, グラスungkロスなど)	接着剤, 塗料などで布目をふさがぬこと (全面のり貼り, 和紙裏打ちなどを避ける)
薄膜 (ポリエチレン, ビニルフィルムなど)	厚さ 0.05mm 程度以下, 張力をかけないで貼ること
あなあき金属板	開口率 > 0.20, なるべく小さいあなあ径
リブ構造	リブ幅数 cm 程度以下, リブ中心間隔はリブ幅の倍以上

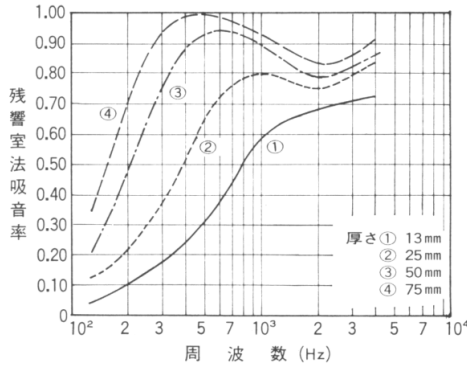


図7 多孔質材料の厚さと吸音特性との関係 (グラスウール, 剛壁密着)

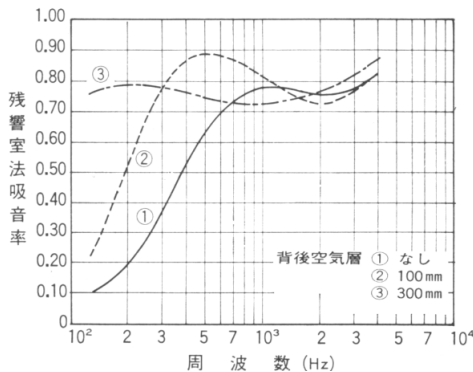


図8 多孔質材料の背後空気層との吸音特性との関係 (グラスウール, 厚さ25mm)

多孔質材料で, その背後空気層の厚さを変えたときの吸音特性の例を図8に示す。このように背後空気層の厚さを増すことによって, 低音域までの広い周波数範囲にわたる吸音率を大きくすることができる。

実際に多孔質材料を使用するときには, 強度・意匠・保守など各種の条件から, 表面処理・仕上げをすることが多い。この場合, 多孔質材料自体の吸音特性を確保するためには, 表2に示す範囲の表面仕上げ方法のなかから適応するものを選定すればよい。

3.3 板状材料・膜状材料

(1) 種類

各種建築用ボード類・金属板などは積極的に吸音用として一般に使われる材料ではないが, 使用場所によってはその吸音特性のデータを必要とする場合がある。またビニルレザーなど通気性の小さい膜状材料を, 多孔質材料の表面仕上げとして使用することがある。

ここで板と膜との区分は, 材料自身の剛性の程度によって行われる。

(2) 吸音機構

板状材料をその背後に空気層をおいて貼った構造は,

板を質量とし, 下地材料を含んだ板自身の剛性と背後の空気の弾性をバネとした共振系を構成し, 共振周波数をもっている。この共振周波数と同じ周波数の音があたると, 板はよく振動し, 板及び下地材やその接合部などにおける摩擦損失によって, 振動(音)エネルギーが熱エネルギーに変換されて吸音作用を生ずることになる。

膜状材料の場合にも, 共振系としての機構は同じであるが, 膜を貼るときの張力の有無・程度によって共振周波数が大きく変わることになる。

(3) 基本的な吸音特性

通常の建築用ボード類を数～数10cmの空気層をおいて貼った場合には, 共振周波数は100～200Hzとなり, 低音域の吸音材料となる。このため, 板状材料はホールなどで低音域の残響調整用吸音材料として使われることが多い。

膜状材料の場合には, 共振周波数は背後空気層のほかに, それを貼るときの張力の程度にも関係し, 普通には200～1,000Hz程度の周波数範囲に吸音率のピークがあらわれる。このため, 吸音材料としては特にその施工条件に注意することが必要である。

3.4 あなあき板材料

(1) 種類

合板・石膏ボードなど建築用ボード類に貫通孔をあけたものである。材質やあなすっぽうに多くの種類があるが, 吸音材料としては材質はほとんど関係ないとしてよい。そのほかに, アルミニウム板・鉄板など厚さ1mm程度の金属板に貫通孔をあけた製品がある。この種のあなあき板材料は, ボード類と区別して取り扱う必要がある。

(2) 吸音機構

あなあき板材料を吸音構造として使用するためには, 必ずその背後に空気層をおいた構成とすることが必要である。さらに普通には, あなあき板の背後にグラスウール・ロックウールなどの多孔質材料を挿入した構造が基

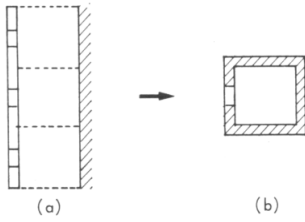


図9
あなあき板吸音構造の
吸音機構の考え方

本になる。

こうしたあなあき板構造の基本的な吸音機構については、図9(a)に示すように、仮想的な隔壁によって空気層が1個ずつのあなに対応する部分に仕切られているとして、同図(b)の空洞とあなとからなる系(ヘルムホルツ共鳴器)が並んだものとして取り扱うことができる。すなわちこの構造は、共鳴器型吸音構造の一種であり、その共鳴周波数は次式で与えられる。

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(t + \delta)L}} \quad \dots\dots (10)$$

ここで、 c は空気中の音速度、 P は開口率、 t は板厚、 L は空気層、 $\delta = 0.8d$ (d : あなを円穴としたときの直径) である。

この吸音構造に共鳴周波数と同じ周波数の音があたると、あなの部分の空気は激しく振動し、粘性損失によって音のエネルギーの一部が熱エネルギーに変換され、吸音作用を生ずる。特にあなあき板の背後に多孔質材料があると、それによる粘性損失が大きくなり、吸音率が大きくなる。

(3) 基本的な吸音特性

厚さ数 mm 程度のあなあき板を使った吸音構造について、その吸音特性の例を図10に示す。この場合には、共鳴周波数を中心にした山形の吸音特性をもち、あなあき板の背後に入れる多孔質材料(下地材料)の種類によって吸音率の値が変化する。なお、前項の吸音機構から明らかのように、多孔質材料はあなあき板の直後におくことが必要であり、あなあき板から離れるに従って吸音率は低下する(図11の例参照)。

あなあき金属板の場合にも、基本的な吸音機構は同様であるが、通常にあなあき金属板の仕様では、4,000Hz程度以下の周波数範囲における吸音特性は、背後の多孔質材料の性能とほぼ同じになる(表2参照)。

あとがき

吸音及び吸音材料の基礎事項につして解説した。現在実用されている吸音材料における吸音の機構にはいくつかの種類があり、今後開発される可能性のある吸音材料も、吸音機構の面からはほとんどこの範囲に入るといってよいであろう。ただし今後の吸音材料に重要になるの

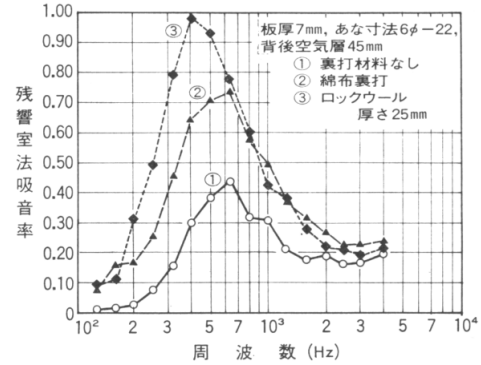


図10 あなあき板吸音構造の吸音特性の例

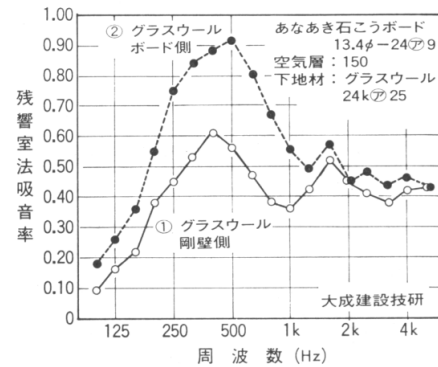


図11 あなあき板吸音構造の吸音特性に対する下地材料の位置の影響

は、吸音性能意外に使用場所の条件に応じて必要となる性能(例えば耐候性、耐水性、耐熱性、強度など)であって、材料の選定や開発の重点もここにおかれることが多くなっている。

なお最近話題になっているアクティブ・コントロールの手法は、広い意味で吸音材料ということができる。この方法は本稿で述べた吸音とは全く異なった原理によるもので、対象とする音と同じ周波数で逆位相の音をスピーカから放射して、対象音を消去する方法である。今後の実用化が期待される。

〔参考文献〕

- 1) 子安 勝:「吸音材料」(技報堂出版, 1976)
- 2) 日本音響材料協会編:「騒音振動対策ハンドブック」(技報堂出版, 1982)
- 3) 日本音響学会編:「建築音響」(コロナ社, 1988)
- 4) 橋 秀樹: 吸音と遮音(その1), 音響技術No.63 (1988)