

# 音響材料\*

子安 勝\*\*  
(千葉工業大学)

## 1. はじめに

音響材料という言葉で意味するものは、その適用分野によって内容に大きな違いがあり、例えば電気音響機器では、スピーカやマイクロホンの振動板、永久磁石なども音響材料として取り扱われる。

本稿では、主として騒音制御の目的で機械、車両、建築等の分野で使われている材料を指すものとする。このように適用範囲を限定しても、音響材料はその機能や適用対象などによっていくつかの種類に区別される。とくに直接に制御対象になるのが、音・振動のいずれかによって、材料の構成や使い方には大きな違いがある。騒音制御用の音響材料を、適用対象や主要な機能によって分類して表-1に示す。ただ実際には1つの材料が2つ以上の機能をもったものもある。表の各材料のうちで、防振・制御材料は本号の別項で解説されるので、ここでは主として庶音材料と吸音材料を中心にして、その現況を解説するとともに、今後の動向について展望する。

表-1 適応性・機能からみた音響材料の区分

対象 機能	音	振 動 (固体音を含む)
エネルギー吸収	吸音材料	制御材料
エネルギー反射	庶音材料	防振材料

## 2. 庶音材料・構造

### 2.1 性能評価量

#### (1) 音響透過損失

庶音材料・構造の音響性能は、次式で定義される音響透過損失によって表示される。

$$R = 10 \log (I_t / I_i) \text{ dB}$$

ここで、 $I_t$ 及び $I_i$ は材料に対する入射音と透過音の強さである。

音響透過損失は、基本的に実験室で測定される量であり、建築用材料についての音響透過損失の測定方法は、日本工業規格JIS A 1416 や国際規格ISO 140-1

及びISO 140-3で標準化されている。

建築以外の用途に使われる場合には、材料の寸法や音の入射条件などが違うために、同じ材料でも音響透過損失の値は必ずしも同じにはならないことがある。ただこうした場合の標準的な測定方法については、一般的な規定が難しいので、上記の規格を準用することが普通であるが、時には大きな違いを生ずることがあるので、データを使用するときには、後でのべるように注意が必要である。

#### (2) 音圧レベル差

実際使用状態での庶音効果を表示するためには、次式で与えられる音圧レベル差が使われることが多い。

$$D = L_1 - L_2 \text{ (dB)}$$

ここで $L_1$ 及び $L_2$ は両側の空間を代表する音圧レベルであるが、代表値の取り方については、それぞれの空間の状態に応じて明確に規定することが必要である。例えば両側が同程度の大きさの室の場合には、それぞれの室内の平均音圧レベルをとるのが普通であり、この場合には $D$ は室間平均音圧レベル差となる。

#### (3) 挿入損失

実際使用状態での庶音効果の表示方法として、前項の音圧レベル差のほかに、次式で与えられる挿入損失が使われる。

$$D_{IL} = L_B - L_A \text{ (dB)}$$

ここで、 $L_B$ は特定の受音点における庶音材料がないときの音圧レベル、 $L_A$ は音源との間に庶音材料があるときの同じ受音点での音圧レベルである。

#### (4) 評価量の形式

前項までに示した庶音性能の各評価量は、基本的にはオクターブまたは1/3オクターブバンドごとの値による周波数特性の形で表示される。周波数範囲は、原則として125~4,000Hz(オクターブバンド)または100~5,000Hz(1/3オクターブバンド)である。ただ最近では、用途によってこれより広い周波数範囲(とくに低周波数)に対する庶音性能のデータが要求されることが多い。この場合には、測定精度に問題が残されており、今後の大きな課題であると考えられる。

実用的な庶音性能の評価量としては、各種の単一数値量が使われ、あるいは提案されている。我が国では

\* Acoustic Materials

\*\* Masaru Koyasu (Chiba Institute of Technology)

表 - 1 庶音材料の主要な適用場所

適用対象	適用部位
建築物	外周壁, 界壁, 間仕切壁, 機械室壁
機械・装置	エンクロージャ, 配管
車両など	車体, 機体, 隔壁

JIS A 1419 に規定されている  $D$  値が使われてきた。これに対して ISO 717-1 では  $R_w$  値とスペクトル適応項が, また ASTM では STC が評価量として規定されている。このように各種の単一数値評価量が存在するのは, それぞれの国における法規制などの歴史的背景に由来するためであって, 真の意味での国際整合化は容易ではない<sup>1)</sup>。今後心理音響の面からの研究を含めた検討が必要であると考えられる。

## 2.2 適用場所と適応性能

庶音材料は, 騒音制御を目的として最も広く使われる材料であり, その適用場所も非常に広範囲にわたっている。主要な適用場所を表 - 2 に示す。

庶音材料としては, その用途に応じて要求される庶音性能をもつことが必要なことは当然であるが, そのほかに適用場所によって機械的な強度, 耐火・耐熱性, 耐水・耐油性, 保温性など各種の性能や, 施工の容易さなどが要求されることになる。

これは, 実際の庶音材料の選定においては非常に重要な事項であるが, 本文では庶音性能を中心に各種材料の基本的な特性や今後の課題などをまとめておくことにする。

## 2.3 庶音材料の基本特性

### (1) 気密性の保持

庶音材料・構造の最も重要な前提条件となるのは, その材料が完全な気密性をもっていることである。

現在でも庶音材料と吸音材料とを誤って使用したために, 期待した騒音低減効果が得られないという問題が無くなっていないが, その原因の多くは庶音の第一条件としての気密性が確保できていないことにある。

ここで通気性としては, 多孔質材料のように全面的に通気性をもっている場合のほかに, ボード, パネルなどの接合部にできる隙間なども対象になる。本節で庶音材料の基本特性を考える段階では, まずこうした通気性はまったく無視できる状態を取り扱うものとする。

### (2) 質量則とコインシデンス効果

庶音についての基本的な原則は, 質量則とコインシデンス効果である。これは周知のことなので, 一般的な庶音特性への導入として簡単にふれておく。質量則は, 均質一体の機密材料の音響透過損失がその単位面積当りの質量(面密度)と入射音の周波数及びその入射条件によって規定されるとするものである。面密度

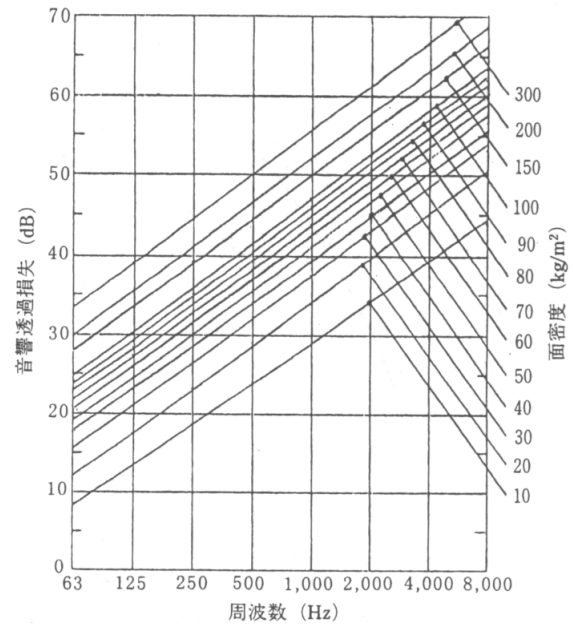


図 - 1 質量則による音響透過損失計算値

$m(\text{kg}/\text{m}^2)$  の材料に周波数  $f(\text{Hz})$  の音がランダム入射するときの音響透過損失  $R(\text{dB})$  は, 次式で与えられる。

$$R = 20 \log_{10} \frac{2\pi f m}{2\rho c} - 10 \log_{10} \left[ \log_e \left\{ 1 + \left( \frac{2\pi f m}{2\rho c} \right)^2 \right\} \right]$$

面密度  $m$  をパラメータとしたときの音響透過損失の計算値の図 - 1 に示す。

実際に多くの材料では, その剛性によって材料に曲げ波が発生し, その進行速度と特定の斜方向からの入射音の材料面上での進行速度とが一致すると, 音の完全透過がおこるので, ランダム入射条件では所定の周波数範囲で質量則で予測される値に対して音響透過損失の目立った低下がおこることになる。この現象をコインシデンス効果とよび, その最低周波数(コインシデンス限界周波数)  $f_c(\text{Hz})$  は, 次式で与えられる。

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho_m(1-\sigma^2)}{E}} \quad \text{Hz}$$

ここで,  $E, \rho_m, \sigma, h$  は, それぞれ材料のヤング率 ( $\text{N}/\text{m}^2$ ), 密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), ポアソン比, 厚さ ( $\text{m}$ ) であり,  $c$  は空気中の音速度 ( $\text{m}/\text{s}$ ) である。実際にコインシデンス効果による音響透過損失の低下量は, 材料の内部損失や寸法などに関係する。

### (3) 中空二重構造

前項の質量則によって高庶音性能をうるためには, 極端に大きな重量が必要になる。これを避ける方法として, 中間に空気層をもった二重構造が使われてい

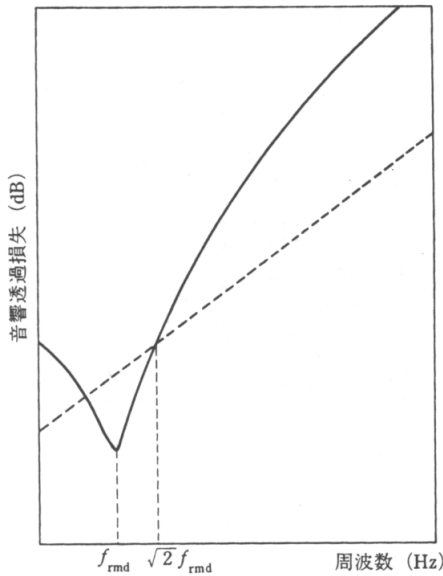


図 - 2 中空二重構造の音響透過損失模式図

る。この場合、両面の材料が中間の空気層だけにつながっているとされたときの音響透過損失特性の傾向を模式的に示すと図 - 2 のようになる。この図には、両面材料の面密度の和について、質量則で与えられる音響透過損失の値が点線で記入してある。

低周波数域で中空二重構造の音響透過損失が質量則による値以下になるのは、低域共鳴透過とよばれる現象であって、その周波数  $f_{rmd}$  は、次式で与えられる。

$$f_{rmd} = 59.4 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \cdot \frac{1}{d}} \quad \text{Hz}$$

ここで  $m_1$  と  $m_2$  は、両面材料の面密度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) で、 $d$  は両面材料の間隔(空気層の厚さ)(m)である。

この図に示されるように、中空二重構造が有効になるのは  $\sqrt{2} f_{rmd}$  以上の周波数である。

## 2.4 庶音特性の実際と改善の方向

### (1) 一般事項

庶音材料の音響透過損失特性は、原理的には前節の各項に示される規定に従うことになる。ただ実際には、理論の基礎になっている仮定などが厳密には成り立たないので、現実の特性にはかなり大幅な変化がおこることになる。この場合の特性の変化は、音響透過損失の上昇と低下の両方向に起こりうる。これを解析することは、庶音性能の改善、高性能庶音材料開発の方向を見いだすのに大いに参考になることが多い。

こうした観点から、ここでは各種庶音材料の特性の実際を整理するとともに、それをベースにして庶音性能を改善するための基本的な方向、その具体例などを示すことにする。

### (2) 質量則からの偏り

前節で示したように、均質一帯の気密材料については、質量則で音響透過損失の近似値を推定することができる。ただ実際の材料については、質量則の前提になっている仮定が厳密には成り立たないので、音響透過損失特性は質量則からの偏りを示すことが多い。

とくに重要なことは、材料の寸法の影響である。質量則は無限大寸法の材料を仮定して導かれている。一方各種材料の音響透過損失データは、JIS A 1416 または ISO 140-1, 140-3 に規定される方法で測定されたものが多い。これらの規格は、その表題または適用範囲に「建築材料の・・・」と明示されており、供試材料の面積は原則として  $10\text{m}^2$  程度で、短辺寸法は  $2.3\text{m}$  以上とすることが規定されている。これは通常に加減測定周波数(100Hz)までは、近似的に無限大寸法とみなされるものであって、建築物における庶音設計などに使用するデータとして利用できる。

ただ庶音材料の一般的な用途としては、建築用以外に機械・車両用などがあり、これらの分野における騒音対策のなかで重要な役割をするものである。この場合、庶音材料の形状・寸法は千差万別であるが、建築物の壁寸法に比べて小さいことが多いために、その音響透過損失特性は質量則による予測値とは異なり、さきの測定方法規格によって求められた値とも異なることになる。

この場合の音響透過損失を規定する要因となるのは、質量のほかに曲げ剛性があげられる。このため対象周波数範囲内に曲げ振動の共振による音響透過損失の低下があらわれる。図-3に模式的に示すように、理論的に共振周波数以下ではスチフネス制御の領域になるが、信頼できる実測データは非常に少ない。今後材料の形状・寸法、周辺の支持条件などを明確に規定し

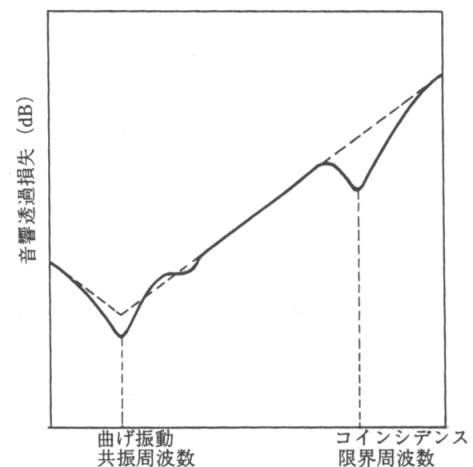


図 - 3 質量則からの偏りを示す模式図

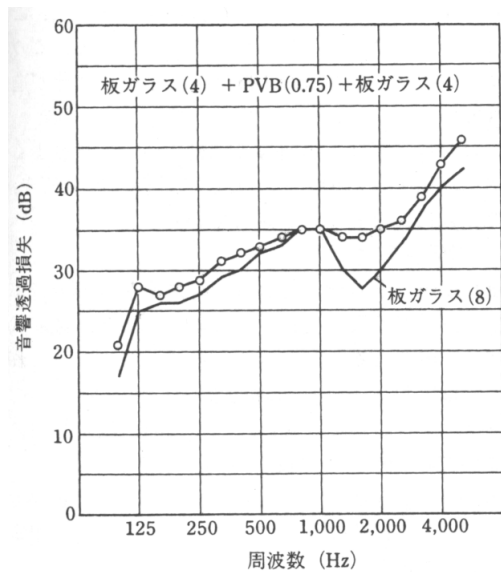


図-4 合わせガラスの音響透過損失特性の例 - 同じ厚さの普通板ガラスとの比較 -

実測データの整備が重要な課題であると判断される。

### (3) コインシデンス項かの影響低減

コインシデンス限界周波数付近における音響透過損失の低下を防止するために、古くから各種の試みが行われている。その中心になるのは、コインシデンス周波数の異なる材料を組み合わせ(貼り合せ)たり、粘弾性体の適用による材料の内部損失を増加させる方法などである。

図-4に、普通の板ガラスと粘弾性フィルムを挟んだ合わせガラスの音響透過損失特性の比較を示す。

### (4) 二重構造の特性改善

中空二重構造が庶音構造として有効なのは、図-2の原理的な特性にみられるように $\sqrt{2}f_{\text{mid}}$ 以上の周波数である。そのため、この周波数が必要とする周波数範囲の下限以下になるような構成を選ぶことが、まず第一の前提条件になる。具体的には、表面材料の面密度と空気層の厚さの選定ということになる。

実際の中空二重構造の音響透過損失は、さきの図-2に示される基本特性とはかなり異なったものであることが多い。これは、図-2が中空二重構造を極端に単純化しているために、そこで無視されているいくつかの要因が、庶音性能の低下を生じているためである。

そのなかでとくに重要なのは、二重構造を構成するための下地構造の影響である。図-2の特性は、両面材料が中間の空気だけでつながっているとして導かれたものであるが、実際には下地構造を通した振動結合が加わるために、最終的な音響透過損失特性にその影

響が現れることになる。このため、二重構造の庶音性能の改善に対しては、振動結合をできるだけ弱めるような下地構造と施工方法を適用することが重要である。建築基準法に規定される界壁庶音構造として個別指定された構造には、乾式二重構造が多数を占めているが、最近の指定構造にはその構成にさまざまな工夫をした構造が多い。これらの断面構造、庶音性能などの詳細は、日本建築センターから発行されている「防火・耐火構造・材料等便覧」<sup>2)</sup>に紹介されているので、これを参照されたい。

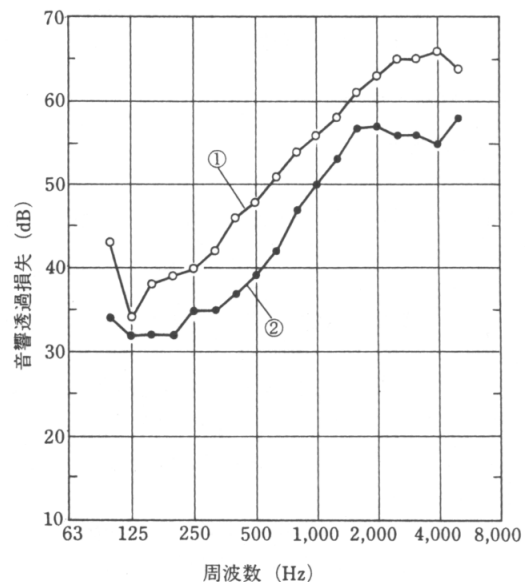
### (5) サンドイッチパネル

前項の二重構造に含まれるものとして、サンドイッチパネルがある。これには、芯材と表面材を貼り合わせたパネルやフラッシュパネルなど非常に多くの種類があり、簡単な間仕切りや機械のエンクロージャなどに広く使われている。

この種のサンドイッチパネルは、形式は二重(複合)構造であるが、一般に両面の結合が強いので庶音性能の面では二重構造の特徴をもっていないものが多い。実際には質量則で予測される程度の音響透過損失をもつか、とくに軽量・高剛性パネルでは質量則による値を下回るのが普通である。

サンドイッチパネルの構成から見て、その庶音性能改善は簡単ではなく、今後新しい考え方の導入などが必要であると考えられる。

### (6) GL工法壁の庶音性能改善



RC壁(厚さ200mm)  
RC壁(厚さ200mm) + 石こうボード(厚さ12.5mm)  
(GL工法)

図-5 GL工法壁の庶音特性例

現在集合住宅・ホテルなどのRCあるいはPC構造の壁について、ボード壁内装を行うときにGL工法が使われることが多い。これは施工性、工事費などの面で、現場では非常に歓迎される工法であるが、図-5の例に示すように低音性能に大きな難点があり、しばしばクレームの対象になっている。

そのため、この工法の本格的な普及に対しては、低音性能の大幅な改善が要件になると考えられる。これまでに基礎的あるいは実用的な面から各種の研究開発が行われており、多くのデータも発表されている<sup>3)</sup>。ただ施工面での利点を損なわないで、低音性能の改善を実現することは簡単ではなく、今後の重要な課題である。

## 2.5 今後の展望

前節に示したように、低音材料については性能改善のために多くの課題が残されており、騒音防止技術の根幹として重要な位置を占めている。とくに従来低音材料の問題は、測定方法を含めて建築用が中心になってきたが、他の分野に適用する場合については、その使用条件に対応した形で性能改善のための技術開発が必要であると考えられる。そして、ここでは本誌の別稿で解説されている防振・制振材料の活躍が重要になると判断される。

また新しい騒音防止技術として注目されているアクティブ制御を、低音性能の改善に適用する試みも行われている<sup>4)</sup>。本格的な実用化は今後の問題であるが、中空二重構造の低域共鳴透過など低音材料・構造で弱点になりやすい低周波数に対してとくに有効であることから、これからの発展が期待されるテーマである。

## 3. 吸音材料・構造

### 3.1 性能評価量

#### (1) 吸音率

吸音材料・構造の音響性能は、次式で定義される吸音率によって表示される。

$$\alpha = 1 - (I_r / I_i)$$

ここで、 $I_i$  及び  $I_r$  は材料に対する入射音と反射音の強さである。

吸音率は、材料の種類・使用条件のほかに、音の入射条件に関係する。現在次の3種類の吸音率が使われており、対応する測定方法が規定されている。

#### a) 垂直入射吸音率

平面音波が材料に垂直に入射するときの吸音率で、通常は円形または正方形断面の管を使って測定される。測定方法は、JIS A 1405 及び ISO 10534-1 に規定されている。ここに規定されている測定方法は、定在波比法とよばれており、古くから使われている。これに対して、最近の信号処理技術を利用して、管の2

点に固定したマイクロホンによって伝達関数を測定し、これから吸音率を算出する方法が開発されている。この方法については、現在 ISO 10534-2 として標準化が進められている。

垂直入射吸音率は、小面積の試料について精度よく吸音率を算出できるので、主として材料の開発研究、製品の品質管理などに利用されている。

#### b) 斜入射吸音率

平面音波が特定の斜方向から入射するときの吸音率である。最近屋外用吸音材料に関する研究、性能試験などに使用されることが多くなっている。ただこれについては、測定方法に原理的なむずかしさがあり、まだ標準化が行われていない。このため、測定方法自体についての研究が行われている段階であるので、データをみるときは、この点に留意することが必要である。データの比較のためには、少なくとも同じ測定方法によることが望ましい。

#### c) ランダム入射吸音率(残響室法吸音率)

材料にすべての方向からランダムに平面音波が入射するときの吸音率で、室の残響時間や音圧分布などの実用計算方法では、原則としてこの吸音率を使うことになっている。

ランダム入射吸音率は、前項の斜入射吸音率測定値の角度平均として求めることができるが、実用的には、その近似値とみなされる残響室法吸音率の測定値を使用することが普通になっている。残響室法吸音率の測定方法については、古くから JIS A 1409 及び ISO 354 で標準化されているが、音場の拡散性や試料の周縁効果など、測定方法の基本的な部分に課題が残されているために、高い測定精度を期待することはできない。残響室法吸音率のデータを使用するときには、これに注意することが必要である。

#### (2) ノーマル音響インピーダンス

吸音率と並んで吸音材料の性能表示量として使われる量で、材料表面での音圧と粒子速度垂直成分の比として定義される複素量である。物理的には、反射音の振幅だけでなく位相情報も与えるので、吸音機構の解析に対しては吸音率よりも有用である。

ノーマル音響インピーダンスの測定は、基本的には垂直入射吸音率の測定装置をそのまま使用して行うことができる。さきの ISO 10534-1 及び ISO 10534-2 には、ノーマル音響インピーダンスの測定方法も規定されている。

なお、吸音材料について局所作用性(表面に平行に吸音材料内部での音の伝搬のない性質)が成り立つと仮定すれば、ノーマル音響インピーダンスからランダム入射吸音率を算出することができる。ISO 10534 に

は、参考として次の計算式が与えられている。

$$\alpha_{st} = 8 \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \left[ 1 - \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \cdot \log_e (1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{1}{z''} \frac{z'^2 - z''^2}{z'^2 + z''^2} \cdot \arctan \frac{z''}{z' + 1} \right]$$

ここで、 $z'$  及び  $z''$  はノーマル音響インピーダンスの実数部及び虚数部である。

### (3) 評価量の形式

吸音性能の評価量は、基本的にはオクターブまたは1/3オクターブバンドごとの値による周波数特性の形で表示される。周波数範囲は、原則として 125 ~ 4,000Hz (オクターブバンド) または 100 ~ 5,000Hz (1/3オクターブバンド) である。ただ最近では、用途によってこれより広い周波数範囲(とくに低周波数)に対する吸音性能のデータが要求されることがある。この場合には、測定精度に問題が残されており、今後の大きな課題であると考えられる。

実用的には、単一数値評価量が使われることがある。我が国では、JIS A 6301 (吸音材料) で多孔質吸音材料の性能表示量として、4周波数(250, 500, 1,000 及び 4,000Hz)の吸音率の算術平均値(小数第2位を2捨3入)が規定されている。一方 ISO 11654 では、床音性能の場合と同様に基準曲線にあてはめる方法が規定されることになっている。いずれにして材料の範囲や用途が限定されることに注意しなければならない。

### 3.2 適用場所と適用性能

吸音材料は、直接に騒音制御を目的として使用されるほかに、各種の質の響きの調整にも使われるなど、その適用場所は非常に広範囲にわたっている。主要な適用場所を表 - 3 に示す。

吸音材料としては、その用途に応じて要求される吸音性能をもつことが必要なのは当然であるが、そのほかに適用場所によって機械的強度、耐火・耐熱性、耐水・耐油性、光反射性などの各種性能や、意匠、施工の容易さなどが要求されることになる。

本文では、吸音特性を中心にして各種材料の基本的

表 - 3 吸音材料の主要な適用場所

適用対象	適用部位
建築物	室内装(天井・壁・床)、床音壁構成部材、消音装置・ダクト内貼
機械・装置	エンクロージャ・配管などの内貼、ラギング材料、消音器、床音構造構成部材
車両など	内貼、床音構造構成部材

な特性や今後の課題などをまとめておくことにする。

### 3.3 吸音材料の種類と吸音特性

現在実用されている吸音材料は、その材質、形状などからみて多くの種類に区分される。そしてこれらの外観的な特徴は、吸音特性の特徴に対応することが多いので、こうした区分に従って吸音材料を整理することが普通である。

吸音材料の主要製品について、従来は種類ごとに日本工業規格で標準化が行われてきたが、1994年に行われた改正で1つの規格に統合され、JIS A 6301 (吸音材料) として制定された。この新規格では、参考として吸音材料の特性が記述されている。ここでは、この規格本体での規定の有無に関係なく、一般に使われている吸音材料が表 - 4 のように区分して示されている。

一方、これらの吸音材料は吸音率周波数特性にみられる主要な吸音領域によって表 - 5 のように区分され、それぞれに対して表 - 4 の材料区分がほぼ対応することになる。もちろん、吸音特性の詳細は個別の材料に依存するだけでなく、使用条件によって大幅に変化する。例えば、表 - 4 の膜材料やあなあき板材料は、その背後に空気層を置いて吸音構造を構成することによって、はじめて吸音材料として機能することになる。こうした意味から、吸音材料の選定・使用にあたっては、使用条件を含めた吸音特性の詳細なデータをベースにすることが重要である。

### 3.4 今後の展望

前節に示すように、既存の吸音材料は非常に多くの種類があり、その吸音特性もさまざまである。そして、少なくとも吸音性能だけからいえば、現在実用されている材料以上に優れた吸音材料が開発される可能性はほとんどないといっても差しつかえない。

ただ吸音材料として要求されるのは吸音性能だけではないので、用途によっては吸音性能は従来の製品と同程度であっても、それ以外の性能で新しい材

表 - 4 材質・形状による吸音材料の区分 (JIS A 6301 (吸音材料) 参考表)

区分	材 料 の 例
多孔質材料	ロックウール、グラスウール、軟質ウレタンフォーム
多孔質板材料	ロックウール化繊吸音板、吸音用インシュレーションファイバーボード、木毛セメント板
膜材料	ビニールシート、帆布カンバス、ポリエチレンシート
あなあき板材料	あなあきせっこうボード、あなあきスレートボード、あなあきハードファイバーボード、あなあき金属板
板材料	合板、ハードファイバーボード、せっこうボード、スレートボード、プラスチック板、金属板
その他	カーテン、敷物、椅子、つり下げ吸音体

注) 下線を付けた材料は、JIS A 6301 に規定された材料である。

表 - 5 吸音率周波数特性からみた吸音材料の区分

料の開発が必要になることも考えられる。例えば騒音制御の目的で使用される場合には、その使用環境に応じて耐候性、耐熱性、耐気流性などが、材料選定の主要因になることが少なくない。またオーディトリウムなど室内の音響調整に対しては、強度、意匠など材料の表面性状が重要な性能要件になる。こうした面からみると、新しい発想による吸音材料開発が期待される。

また主として騒音制御への適用から出発したアクティブ制御技術が、アクティブ音場制御(ASFC)として各種音場制御への適用が試みられているが、その中には広い意味での吸音材料の機能をもつものもあり、新しい吸音材料として今後の発展が期待される。とくに在来の吸音材料では困難な低周波数域の吸音材

料として、1つの可能性をもつものと考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 子安勝：諸外国の音響性能評価値 / 評価値に関する研究動向，音響技術，No.68，(Dec.1989)，11～16.
- 2) 日本建築センター：防火・耐火構造・材料等便覧．
- 3) 中川 清：せっこうボード直貼り工法壁の庶音改善について，音響技術，No.38，(1982年5月)，67～70.  
大島 敏，平野興彦，千葉 隆：石膏ボード系新素材を用いたGL工法の庶音欠損改善について，騒音制御，Vol.13，No.2，(1989)，55～62.
- 4) 渡辺直樹，矢島吉紀，伊勢史郎，矢野博夫，橘 秀樹：窓からの透過音に対するアクティブ制御の適用，日本建築学会大会学術光線梗要集，(1995年8月)．