



音響材料と背後構造：壁などの背後構造が吸音・遮音におよぼす影響（解説）

阪上，公博

(Citation)

日本音響学会誌, 74(8):448-455

(Issue Date)

2018-08-01

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2018 一般社団法人 日本音響学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005552>





音響材料と背後構造

——壁などの背後構造が吸音・遮音におよぼす影響——*

阪上 公博 (神戸大学大学院工学研究科)**

43.55.Ev, Rg

1. はじめに

音響材料を使う上で注意を要するポイントの一つに、材料の背後の構造をどのようにするかという問題があります。このような材料の背後に設けられる何等かの構造を、一般に(特に建築音響分野では)背後構造と呼んでいます。例えば吸音材料の場合、材料を直接室内の壁面に張り付けるのではなく、材料と壁面の間に空気層を設けたり、あるいは材料を支持するなどの理由で設けられる構造なども含めて、材料の背後に設けられる構造全般を指します。多くの場合、背後構造が材料自体の特性に変化を及ぼすことが多く、単に吸音材料のみでなく、背後構造がどうなっているかを考慮することが必要になります。

建築環境工学の授業で習った方も多いと思いますが、間仕切壁など遮音材料の場合、単一の壁であればその音響的挙動は比較的単純で、遮音性能もそれほど高くありません。しかし、内装仕上げを伴う場合や、2重壁にした場合には複雑な音響特性になりますが、遮音性能は飛躍的に向上します。例を挙げると、単一の壁では「質量則」、すなわち壁の単位面積当たりの重量が2倍になっても、遮音性能(音響透過損失)は6dBしか向上しません。これは、壁の厚さを2倍にしても、遮音性能が6dBしか向上しないということです。しかし、同じ壁をもう1枚、空気層を挟んで設置して2重壁にすれば、音響透過損失は単純に考えれば理想的には2倍になる可能性があります(図-1)。これも、音が入射する側の材料から見れば、2枚目の壁と空気層は広い意味で「背後構造」と呼べるでしょう。このように考えると、壁の遮音性能がその背後にどのような構造を伴うかによって、材

料単体の場合とは異なったものになることは一般的に広く見られることが分かります。

以上のように、音響材料は背後の状態すなわち背後構造しだい、吸音・遮音特性が変化することに注目する必要があります。従って、各種音響材料を使用する場合、その背後構造を検討することは、その材料の性能をより発揮させることにつながり、重要なポイントと言えます。

本稿では、吸音材料と遮音材料に分けて、どのように背後構造がそれらの特性に影響するかを、分かり易い例を挙げて概説します。更に吸音性能や遮音性能を向上するためにどのような背後構造の工夫がなされているかを、研究事例を挙げて紹介したいと思います。

2. 分かり易い例：多孔質吸音材と背後空気層

具体的な分かり易い例として、各種吸音材の背後に、空気層を設けた場合についてその影響を説明しましょう。この場合、背後の空気層が「背後構造」ということになります。

図-2は典型的な吸音体の構造と、その吸音特性の概略を示したものです。いずれにおいても、図に示すように背後に何等かの構造、すなわち空気層や背後壁が設けられる場合があります。

いま、多孔質吸音材を例に挙げると、これを室内壁面に直接貼り付ける場合もありますが、それではよほど厚くしない限り、低音域での吸音が得られません。従って、なるべく低音域での吸音率も高めになるようにして広帯域の吸音を得ようとする場合は、背後に空気層を設けるのが普通です。このように設置する場合、背後の空気層及び壁が、吸音材の背後構造ということになります。

図中に示すとおり、同じ厚さの多孔質吸音材であっても、背後に空気層を設けることで吸音帯域を低域に広げることができます。一般に多孔質吸音材は、音波の粒子速度が大きい場所に設置する

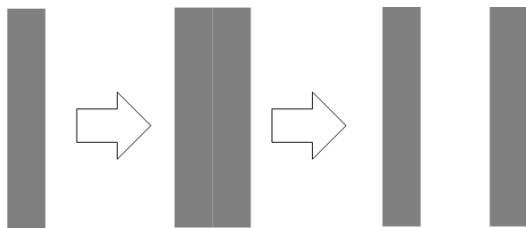
* Acoustical materials and backing structure.

** Kimihiro Sakagami (Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe, 657-8501) e-mail: saka@kobe-u.ac.jp

方が、吸音効果が高くなります。そのため、厚さが大きいほど低音域で粒子速度の大きいところをカバーできるため、低域の吸音率が上昇するわけです。しかし、現実的には厚さには限界があるため、厚さを増やす代わりに背後に空気層を設けることで、低音域で粒子速度の高くなる部位に多孔質材料を配置できるようにして、吸音材自体の厚さを増やさずに広帯域化を可能とするものです。

この例では、背後構造は空気層と剛壁のみという簡単な構成でしたが、これに更に何等かの工夫を加え、より吸音性能の向上を図る試みもこれまでに多数研究されています。

一方、板振動型吸音体の場合は、図のように



透過損失 20dBの
単一壁

厚さを2倍にすると質量則によれば26dB

2重壁にすると20+20で40dBになる可能性がある

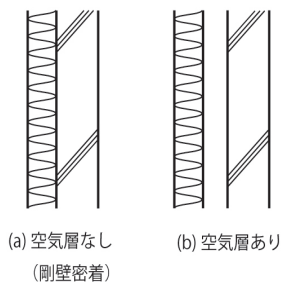
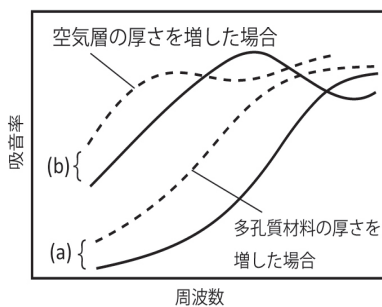
図-1 単層壁を、2重壁にした場合の音響透過損失に対する効果の概念図

背後に空気層及び剛壁を有する形でなければ吸音しません。板振動型吸音体は、板の質量と、背後空気層のバネによる共振を利用したものであるため、この場合は背後構造が吸音体自体を構成するうえで欠かせない要素なのです。このように、ある材料と何等かの背後構造を組み合わせた結果、初めて吸音体として機能するものもあります。この場合も、背後構造を単純な空気層から、多孔質吸音材を挿入した吸音層にするなど、背後構造を変えることで、吸音率のピークを高くするなど、吸音性能を向上させる工夫が見られます。

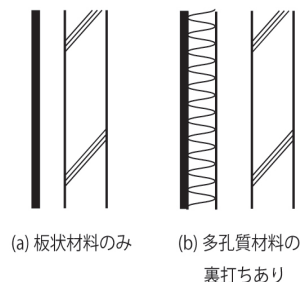
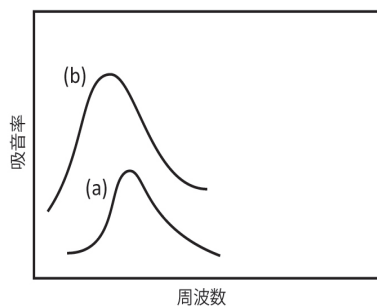
共鳴型吸音については、典型的な単一のヘルムホルツ型共鳴器の場合は別として、一般的には有孔板と背後空気層で構成されることが多く、この場合も背後空気層は共鳴機構の一部として機能しています。いわば、表面材である有孔板に対して背後空気層は背後構造と見なすことができます。この背後構造に、多孔質吸音層を挿入するなどして、背後構造を工夫することで、吸音特性の改善や調整が可能になる点も、他の吸音体と同様です。

このように、吸音材料の場合は、背後構造をどのような構成とするかによって、吸音性能の向上や、吸音特性の調整などがある程度可能となります。従って、材料自体の吸音性能を向上する研究

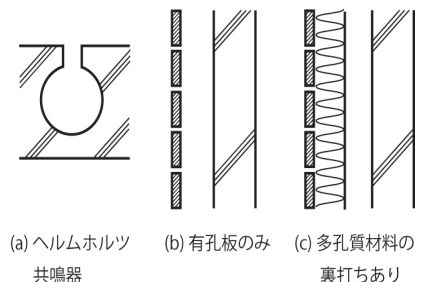
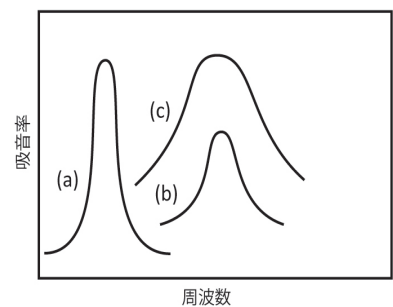
A. 多孔質型吸音



B. 板振動型吸音



C. 共鳴器型吸音



: 多孔質材料
 : 剛壁
 : 空気層
 : 板状材料
 : 有孔板

図-2 各種吸音材料の吸音特性と、おのおのに対する背後構造の影響の概念図

と共に、この背後構造を効果的なものとするのが、吸音体の開発研究における重要なポイントの一つということになります。

3. 吸音体の背後構造のいろいろ

前章で例を挙げたように、吸音体の場合には材料の背後構造によって大きく吸音特性が変化したり、その工夫によって吸音性能の改善や調整が可能となるものが多くあります。前章では、単に背後構造を設ける、あるいはそこに多孔質吸音層を挿入するなど、単純な形態のものに限定して背後構造の影響を説明しました。こうした単純なもののほかに、これまで様々な背後構造が提案され、目的に応じてその効果が利用されてきました。ここでは、それらの中から典型的なもの、また新しいものをいくつか選んで、その効果や作用を概説します。

3.1 ハニカム構造

古くから知られている背後構造の一つにハニカム構造があります。これは、図-3のように背後空気層を細かく仕切るものです。ここでは、ハニカム (honeycomb) と呼んでいます。文献によってはパーティション (partition) などと表現されている場合もあります。最も古くから利用されたのは、通気性の膜材料 (多孔質材料に近い特性を示す) の背後にハニカム構造を挿入し、その背後空気層を細分化した例で、図-4に示すようにこれによって吸音性能が向上することが知られています。

ハニカム構造の効果については、次のように解釈することができます。いま平面波が斜めに入射する場合を考えると、ハニカム構造がない場合は、通気性膜を透過した音波は入射角と同じ角度で進行し背後壁で反射し、背後空気層内に定在波音場が形成されることになります。従って、膜のように通過する音波の粒子速度に比例して吸音効果を発揮する材料の場合、入射波の粒子速度の垂直方向成分が斜め入射の場合には減少するため、音響抵抗としての作用が低下することになります。一般的に通気性材料の場合は垂直入射の場合に最も吸音率が高く、入射角が大きくなるにつれて低下する傾向があります。従って、斜めに入射する場合には吸音効果が低くなる傾向があります。

そこへ背後にハニカム構造を設ける (空気層を仕切る) と、背後空気層内の音波の進行方向が、およそ垂直方向に制御されることになり、斜めか

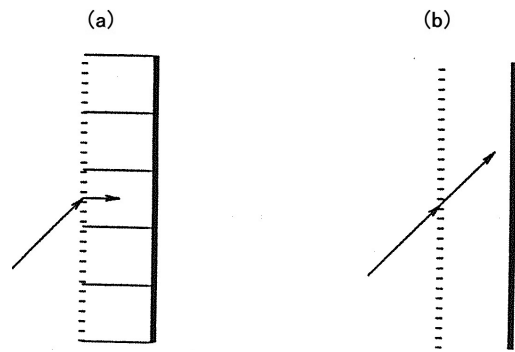


図-3 通気性膜の背後にハニカムを付加した吸音構造 (a) と、ハニカムのない場合 (b)

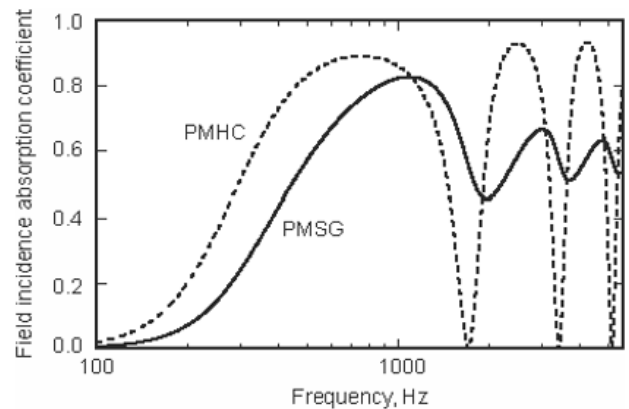


図-4 背後にハニカムを付加した通気性膜の吸音特性を点線、ハニカムなしの場合を実線で示す (いずれも理論値、拡散入射)
膜の面密度 0.2 kg/m^2 、流れ抵抗 $\rho c (=415 \text{ Pa s/m})$ 、ハニカム厚さ 100 mm 。

らの入射に対しても垂直入射に近い状況が生じることになります。いわば、吸音体として局所作用性 (吸音体内部で音波が垂直に伝搬する仮定) が近似的に成立する状況になります。その結果、拡散入射においても平均的に吸音率が高くなることが広く知られています。

この手法は、通気性材料に限らず、グラスウールなど一般的な多孔質吸音材料にも応用されてきたもので、古くから知られた用法です。通気性膜の背後にハニカムを使用する場合については、文献 [1] にその場合の吸音率予測法なども含めて詳述されています。一方、厚みのある多孔質吸音材料に使用する場合についても、文献 [1] などに事例の紹介が見られます。一例として、筆者らが測定した実測例を図-5に挙げておきます。背後構造にハニカムを使うことで、吸音率の大幅な上昇が見られます。

以上は、通気性膜あるいは多孔質吸音材料の背後構造としてハニカムを使用した場合ですが、他

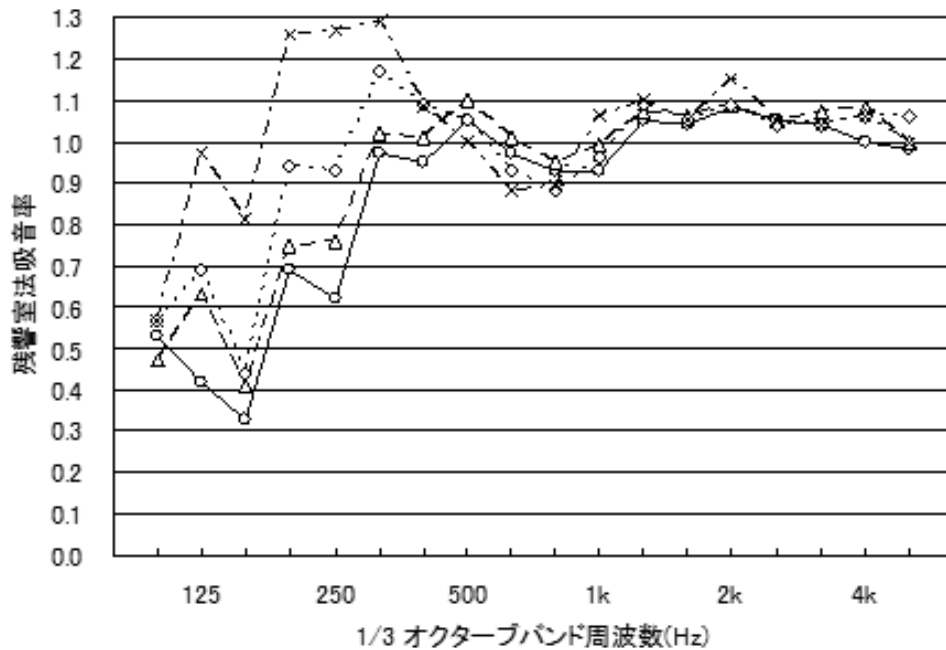


図-5 グラスウールの背後にハニカムを付加した場合の残響室法吸音率測定結果
グラスウール (32k) 厚さ 25 mm, 背後層全体の厚さは 200 mm。実線：□, ハニカムなし, △: ハニカム厚さ 50 mm を背後に付加, ○: ハニカム厚さ 100 mm を背後に付加, ×: ハニカム厚さ 200 mm を付加 (背後層全体をハニカムで充填)。

の吸音機構を持つ吸音材に応用される場合もあります。例としては、有孔板の背後に使用したのもも知られています。有孔板の場合は、孔と背後の空気によって共鳴器が構成され、孔の持つ摩擦抵抗によって吸音するわけですが、このときハニカムによって上述と同様の作用が生じ、吸音効果が高くなるというものです。この、背後構造としてハニカムを用いた有孔板は、ダクトの消音器に用いる例が古くから知られています。

同じ有孔板でも、更に孔が小さい (直径 1 mm 以下) の微細穿孔板 (Microperforated Panel: MPP) の場合には、筆者らが理論及び実験によって詳細な検討を行っています [2]。結果の一例を、図-6 に挙げておきます。ハニカムを背後構造に用いることで、吸音ピークの値が上昇していることが見て取れます。この場合も、ハニカムがもたらす作用は基本的には上述と同じと考えてよいと思われます。局所作用的になることで、入射角の大きい音波に対しても、通常の MPP 吸音体よりも高い吸音性を示すため、より少ない面積で効果的な吸音処理が可能となる場合があります。背後にハニカム構造を設けた MPP 吸音体と、それを残響時間の長い会議室に実装した例を、図-7 に挙げておきます。これによって、目的とする周波数帯域で残響時間を約 1/2 に低減することに成功しています [3]。

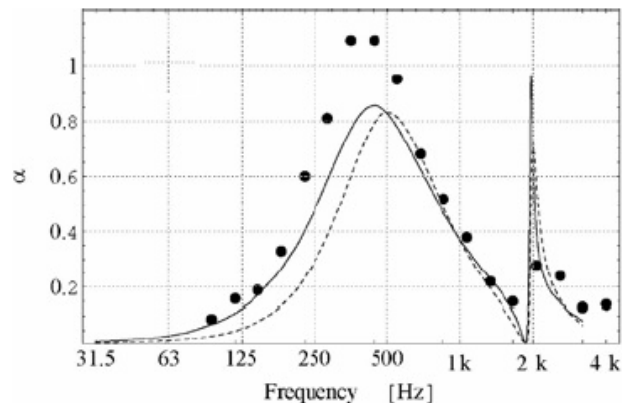


図-6 MPP の背後にハニカムを付加した場合の吸音特性 [2]
MPP は厚さ 1.0 mm, 孔径 0.5 mm, 開孔率 1.23%。背後ハニカム厚さ 75 mm。●: 残響室法吸音率実測値, 実線: 波動理論による計算値 (拡散入射), 点線: 等価電気回路理論による計算値 (拡散入射)。

ただし、板振動型吸音体に対しては、あまり効果はなく、条件によっては吸音性能が低下する場合があります。従って、基本的には通気性材料 (多孔質吸音層や有孔板も含む) の場合に使用するのが適切で効果的と考えたほうがよいでしょう。

3.2 アレイ型ハニカム構造

ハニカム構造の効果を更に高める工夫が、最近の研究で行われています。厚さの異なるハニカムを並列配置して背後構造とするもので、通気性膜の背後構造として利用した場合について、理論解



図-7 背後ハニカムを有する MPP 吸音体を会議室に実装した例
(上) 作業中の状況, (下) 設置完了状態 [3]。

析と実験的検討の事例が報告されています [5]。

この場合、ハニカム自体の効果に加えて、深さが異なる、すなわち背後構造の厚さが異なるため、部分によってインピーダンスが異なるものが並列配置されることになります。従って、いわゆる「エッジ効果」あるいは「過剰吸音」と呼ばれる現象が生じます。これは、インピーダンスの異なる二つの面が隣接する場合、その境界線上で不連続が生じるため、粒子速度が増大して著しい吸音を生じるというものです。

背後空気層の厚さの異なる吸音体を並列配置するアイデアは、以前から見られたものであり、MPP の場合については理論解析による検討例があります [6, 7]。これは、背後空気層の厚さの異なる吸音体はそれぞれ吸音する周波数帯域が異なるため、並列配置によって広い周波数をカバーすると共に、過剰吸音によってより高い吸音性能を得ようとするものです (図-8)。それに対し、ハニカムを併用することで、その効果を更に向上しようとするもので、広帯域にわたって高い吸音性が得られることが実験的にも示されています。

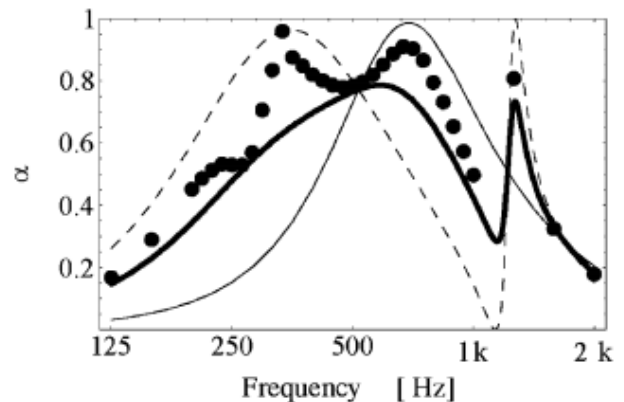
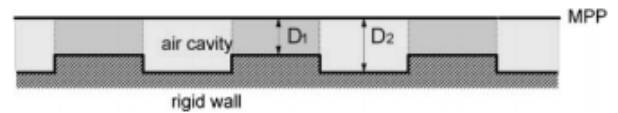


図-8 背後空気層厚の異なる MPP 吸音体を並列配置してアレイ構造とした場合 (上) とその吸音特性 (理論値) の一例 (下)
板厚, 孔径ともに 0.4 mm, 開孔率 0.75%。背後空気層厚は $D_1 = 50$ mm, $D_2 = 150$ mm。実線は背後層 50 mm, 破線は 150 mm の吸音特性, ● はこれらを各々幅 0.5 m ずつ並べてアレイとして組み合わせた場合の吸音特性計算値 [6]。

3.3 複数の吸音機構の併用

背後構造の工夫としては、アイデア次第で更にいろいろなものが考えられます。近年は、背後構造に他の吸音機構を組み込むことで、複数の吸音機構を併用して、より広帯域で高い吸音を得ようとする試みも多数あります。図-2 に示すように、板振動型や共鳴器型の場合は、しばしば背後に多孔質吸音層を挿入します。これによって、背後層内の音の伝搬に減衰を加え、吸音体全体のエネルギー損失を大きくするわけですが、これも背後構造に多孔質型という別の吸音機構を併用しているとも考えることもできます。図-9 は、MPP 吸音体の背後に多孔質材料を挿入した場合の理論計算例ですが、多孔質材料の効果によって吸音帯域が広帯域化している様子が見られます [8]。

このように、多孔質材料を背後構造に挿入して併用することは一般的ですが、同じように音響抵抗を有する通気性膜を挿入する効果も検討されています [9]。また、背後構造に共鳴器を導入する試みなども知られています [10]。

4. 遮音材料の背後構造

遮音構造では、音響現象としては透過が問題と

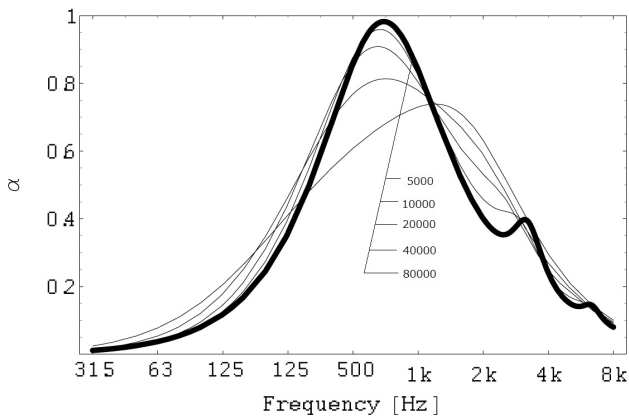


図-9 背後に多孔質吸音層を挿入した MPP 吸音体の吸音特性の一例（理論値）[8]

MPP は板厚、孔径 0.3mm、開孔率 0.8%。背後層厚さは 50mm。パラメータは多孔質吸音材の流れ抵抗 (Pas/m^2)。太線は多孔質なしの場合。

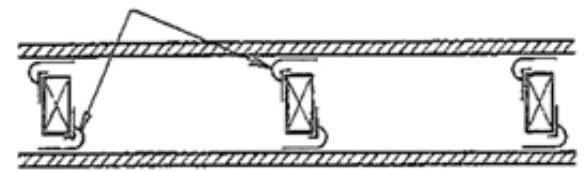
なりますので、遮音構造全体の背後の空間、例えば隣室などまで含めて考えることになるため、「背後」という言葉の指す部分が分かりにくくなります。従って、吸音体に比べてどの部分を背後構造と呼ぶか不明確な点もあります。しかし本稿では、冒頭の例で述べたように、音波が直接入射する材料より背後にあって、音響的效果を持つ部分を広い意味での「背後構造」と考えて説明することになります。

このように考えると、一般的に用いられている 2 重壁などは、2 枚の壁の間にある中空層と透過側の壁をまとめて背後構造と呼ぶことになります。冒頭の例では、2 重にすることで単純には音響透過損失が 2 倍になる可能性があり、大幅な遮音性能の改善につながることをご紹介しましたが、現実にはなかなかそのようにはなりません。従って、背後構造にどのような工夫をするかで、同じ 2 重壁でも遮音性能が変化します。

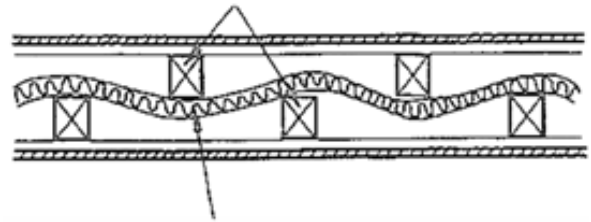
4.1 遮音低下の一般的な対策例

2 重壁で生じる典型的な問題には、2 枚の壁の間での音響的な共鳴現象による遮音性能の低下と、間柱など壁を支持する部材を振動が伝搬することによって生じるサウンドブリッジと呼ばれる現象による遮音性能の低下があります。前者に対しては何等かの吸音機構を背後構造に取り入れることで対応するのが通常で、一般的には 2 枚の壁の間に多孔質吸音層（グラスウールなど）を挿入する方法がよく採用されます。後者には 2 重壁の間柱を構造的に工夫することで対応します。入射側の

弾性クリップや防振ゴムなどにより
壁からの振動伝達を防ぐ



間柱を独立させる



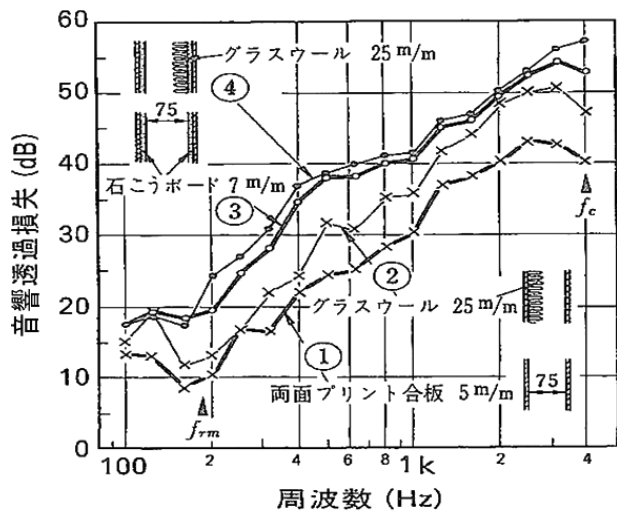
吸音材を挿入することで空気層の共鳴を抑制

図-10 2 重壁における背後構造の工夫の例

壁の振動が、支持材を通して 2 枚目に伝わらないために、1 枚目と 2 枚目の支持材を独立させる独立間柱や、間柱と各々の壁の取り付け部に弾性を持ったクリップや防振ゴムなどを挿入することで、壁の振動が間柱に伝わりにくくする方法があります。これによって、壁から支持材を通した構造体の振動伝達を押さえ、全体としての遮音性能を向上するのが狙いです [11]。これらの一例を図-10 に図示します。

さて、同じ共鳴現象と言っても、2 重壁の遮音性能でしばしば大きな問題となるのは、共鳴透過と呼ばれる現象です。これは、2 枚の壁の質量と、中空層（空気層の場合）の空気ばねによって構成された振動系の共振周波数において、共鳴のために壁が大きな振動を生じ、音響透過損失が著しく低下するものです。壁の質量や中空層の厚さにもよりますが、一般的には低音域に発生し、遮音上の大きな問題となります。

この対策にも、中空層に多孔質吸音材を挿入するなど、背後構造で吸音処理を行って対処するのが一般的ですが（図-11）、状況によってはこれができない場合もあります。例えば、最も典型的な事例としては、2 重窓の場合があげられます。2 重窓でも同様に共鳴透過が生じますが、多孔質吸音材を挿入してしまうと、外が見えなくなるので、当然のことながら窓としての用をなさなくなります。従って、窓枠の内面に何等かの形で低音を吸音する仕組みを取り入れ、背後構造として低音域において音響エネルギーを吸収する仕組みを作る



- ①はプリント合板5mm, 空気層75mmのみ,
 ②はそれにグラスウール25mmを挿入
 ③は石膏ボード7mm, 空気層75mmのみ,
 ④はそれにグラスウール25mmを挿入

図-11 2重壁の音響透過損失に対する背後構造(吸音層)の影響

低音域(200 Hz 付近)にみられる低下が共鳴透過である。

ことが求められます。

理論解析によって検討した事例では、2枚の窓ガラスの間の窓枠(2重窓の内側の空気層の枠部分)に、共鳴透過周波数において十分な吸音を与えれば、共鳴透過を防止できることが示されています[12]。しかし、一般的に低音域で生じる共鳴透過に対して、有効な吸音材料ということになると、多孔質吸音材では不十分な場合も多く[13]、共鳴器型であるヘルムホルツ共鳴器を利用する例が見られます[14, 15]。

これらの研究では、2重窓及び2重壁について、窓枠の内側、あるいは2枚の壁の間に設けられる間柱にヘルムホルツ共鳴器を組み込んで、その共鳴周波数を共鳴透過周波数に合わせて設計することで、顕著な効果が表れることが明らかにされています。

4.2 その他の遮音性能向上策

2重壁に対しても、吸音体の背後構造として紹介したハニカムを活用した例があります。もともと、薄い材料を補強して剛性を高める目的で中空層にハニカムを挿入する事例はしばしばみられるのですが、2重壁の場合も吸音体の場合と同様に、ハニカムによって背後層内の音波の伝搬が拘束され、2枚目の壁に対して垂直入射に近い条件が生じるため、遮音性能が向上することが研究事例か

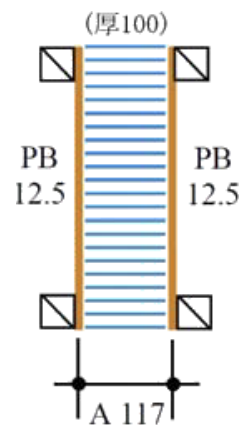


図-12 ハニカムを挿入した2重壁(乾式中空2重壁)
 プラスタボード12mm×2枚を100mm厚の中空層を設けて2重壁とし、ハニカムを充填した場合[16]。

ら明らかにされています[16]。

図-11のように、中空2重壁の中空層にハニカムを挿入した場合について、理論解析及び実験が行われ、その効果についての検証が行われています。図-12に示すように、理論計算ではハニカムの効果によって中音域から高音域にかけて著しい音響透過損失の上昇が見られ、遮音性能の改善が示されています。実験結果では、中音域ではグラスウールを挿入したものに匹敵する性能改善が見られていますが、一定以上の周波数(この例では250 Hz以上)では徐々に低下し、グラスウールに及ばなくなります。しかし、何も挿入しない(空気層のみ)2重壁に比べると遮音性能の改善には寄与していることが分かります。

このように、ハニカム自体は音を減衰させる音響抵抗をほとんど持ちませんが、これによって中空層内の音波の伝搬を制御することにより、2重壁の遮音性能を向上させることができます。実際の建築物においては、多孔質材料を挿入することが好ましくない場合もあるため、そのような場合でもハニカムを挿入することで、ある程度の遮音性能の改善ができることは、注目に値するものと言えるでしょう。

5. おわりに

本稿では、吸音材や遮音材の「背後構造」について、建築音響分野以外の方にも分かり易い例を挙げて説明してきました。音波が直接入射する材料より背後にあって、全体としての吸音・遮音構造の音響特性に寄与するものを、「背後構造」とし

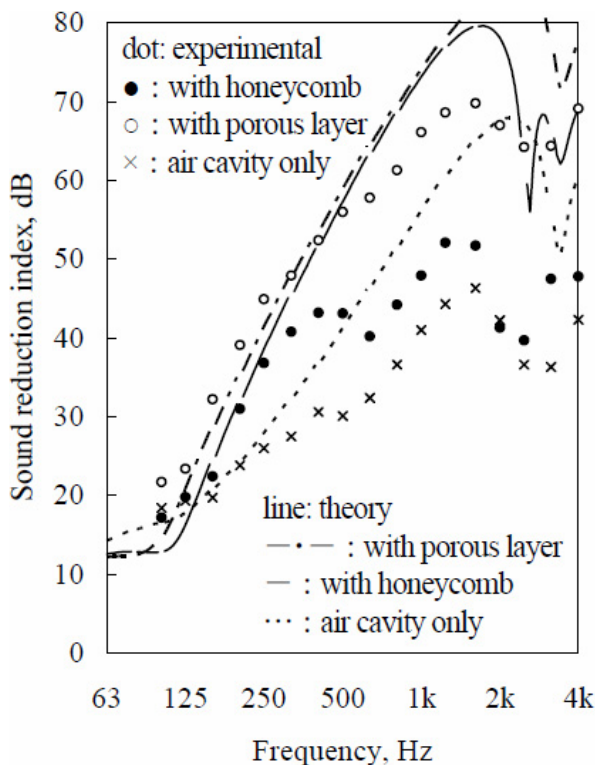


図-13 理論計算結果と実験結果 [16]

実線：ハニカム入り 2 重壁，一点鎖線：グラスウールを充填，点線：空気層のみ，それぞれの理論計算結果。●：ハニカム入り，○：グラスウール，×：空気層のみ，それぞれの実験値。

て扱い，その工夫によって同じ材料でも音響特性，音響性能が大きく変化することを理解できるようまとめました。

近年は様々な新しい材料が開発され，材料自体の選択肢も幅広くなっています。その一方で，従来から利用されてきた一般的な材料の背後構造を工夫することで，より高い音響的性能を得られるように，また目的に応じた吸音・遮音構造にする研究も，多数発表されています。

吸音や遮音は，音響材料としては重要かつ基本的な性能ではありますが，背後構造の工夫は，いわばその使い方や応用とも言えます。使い方次第で，より高い性能が得られるということもできます。こうした背後構造の工夫について，多くの方が新しいアイデアを得るきっかけとなれば幸いです。

なお，「やさしい解説」としての趣旨から，それぞれの背後構造の作用について，理論や原理的な解説は最小限としてイメージがつかめるよう執筆しました。より理論や原理について興味のある読者は，参考文献をご参照下さい。

文 献

- [1] K. U. Ingard, *Notes on Sound Absorption Technology* (INCE, Poughkeepsie, N.Y., 1994).
- [2] K. Sakagami, I. Yamashita, M. Yairi and M. Morimoto, "Sound absorption characteristics of a honeycomb-backed microperforated panel absorber: Revised theory and experimental validation," *Noise Control Eng. J.*, **58**, 157–162 (2010).
- [3] 阪上公博，矢入幹記，奥園 健，羽入敏樹，星 和磨，原田慎史，高橋誠治，上田泰孝，「背後ハニカム構造を有する MPP 吸音体の実装実験，」音響技術，No.178，58–62 (2017)。
- [4] M. Toyoda, K. Sakagami, D. Takahashi and M. Morimoto, "Effect of a honeycomb on the sound absorption characteristics of panel-type absorbers," *Appl. Acoust.*, **72**, 943–948 (2011).
- [5] K. Uenishi, T. Okuzono and K. Sakagami, "Finite element analysis of absorption characteristics of permeable membrane absorbers array," *Acoust. Sci. & Tech.*, **38**, 322–325 (2017).
- [6] K. Sakagami, Y. Nagayama, M. Morimoto and M. Yairi, "Pilot study on wideband sound absorber obtained by combination of two different microperforated panel (MPP) absorbers," *Acoust. Sci. & Tech.*, **30**, 154–156 (2009).
- [7] M. Yairi, K. Sakagami, K. Takebayashi and M. Morimoto, "Excess sound absorption at normal incidence by two microperforated panel absorbers with different impedance," *Acoust. Sci. & Tech.*, **32**, 194–200 (2011).
- [8] K. Sakagami, S. Kobatake, K. Kano, M. Morimoto and M. Yairi, "Sound absorption characteristics of a single microperforated panel absorber backed by a porous absorbent layer," *Acoust. Aust.*, **39**, 95–100 (2011).
- [9] K. Sakagami, Y. Fukutani and M. Morimoto, "A theoretical study on the effect of a permeable membrane in the air cavity of a double-leaf microperforated panel space sound absorber," *Appl. Acoust.*, **75**, 104–109 (2014).
- [10] X-D. Zhao, Y-J. Yu and Y-J. Wu, "Improving low-frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plate combined with Helmholtz resonators," **114**, 92–98 (2016).
- [11] 前川純一，森本政之，阪上公博，建築・環境音響学，第 3 版（共立出版，東京，2011）。
- [12] T. Shimizu, T. Hiraoka, M. Toyoda, D. Takahashi and Y. Kawai, "Analysis and experiments of sound transmission through double window panels," *Acoust. Sci. & Tech.*, **29**, 397–398 (2008).
- [13] 塚本陽平，富川義弘，毎川英利，河本裕介，阪上公博，「多孔質吸音材を付加した二重窓の音響透過特性に関する実験的検討，」音響学会建築音響研資 AA2018-01 (2018)。
- [14] S. Sugie, J. Yoshimura and T. Iwase, "Effect of inserting a Helmholtz resonator on sound insulation in a double-leaf partition cavity," *Acoust. Sci. & Tech.*, **30**, 317–326 (2009).
- [15] S. Nakanishi, "Structures of resonators in a cavity for improving a sound insulation of a thin double-leaf panel," *Proc. ICA 2013*, Montreal, 2aAAb7 (2013).
- [16] 矢入幹記，豊田恵美，杉江 聡，峯村敦雄，「乾式間仕切壁の中空層の構造が遮音性能におよぼす影響，」音響学会建築音響研資 AA2016-19 (2016)。