

Study on perforated plate-porous material sound absorption system with wide band absorption characteristics

小口, 恵司

<https://doi.org/10.15017/458551>

出版情報 : Kyushu Institute of Design, 2002, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

第1章 はじめに

ここでは、建築物内部に使用されている吸音構造の概要を整理して本研究の背景と目的を明確にし、本論文の構成の概要を示す。

1.1 研究の目的

建築内部に用いられる吸音構造は、その吸音特性を支配している主要な吸音機構から、板(膜)状材料、多孔質材料、共鳴器構造体、吸音体の4つに大別される[1]。

第1番目の板状材料は、現代の建築の内装仕上げ材料としてごく普通に採用されている。板に音が入射して振動するとき、内部摩擦によりエネルギーの一部が熱に変換されることで吸音現象が生じる。板の密度、硬さ、下地材の間隔で決まる共振周波数は通常低音域にあり、この帯域の吸音率が他の周波数に比べて大きい、その値は高々0.2程度である。板状材料は壁面や天井の仕上げ材として広く用いられ、結果として低音域を吸音する構造として知られている。

第2番目の多孔質材料の代表はグラスウールやロックウールである。通気性のある多孔質材料中の細隙を音が伝搬する間に、空気の粘性による熱エネルギーへの変換や熱伝導による熱損失で吸音が生じる。躯体に直貼りした場合でも中・高音域でほぼ1.0に近い吸音率を示し、背後に空気層を設けることで吸音域を低音域に広げることができる。吸音効率の高い材料ではあるが、構造的に弱いので、人や物が届かない壁上部や天井の仕上げ材として単独に用いられる他は、開口率の大きい仕上げ材の裏打ち材として用いられることが多い。

本研究で着目した孔あき板吸音構造やスリット吸音構造は第3番目の共鳴器構造体に分類される。音が入射して孔やスリットの気柱が振動するとき、孔やスリットの壁面の抵抗やグラスウールなどの裏打ち材の抵抗で熱エネルギーへの変換が生じて吸音される。ホール・音楽練習室などの音響空間の吸音仕上げ構造として古くから使用されている。

第4番目の吸音体は主に多孔質材料を積層・成形したもので、内装仕上げというよりは塊として単独で使用される。無響室の吸音楔や録音スタジオの吸音トラップがその代表である。

以上、吸音構造をその吸音機構で分類して述べたが、概要を Table 1 にまとめておく。

これらの吸音構造は騒音制御や室内音響設計の様々な場面において用いられるが、工場や設備機械室など騒音源が収容される室に施される吸音は、作業環境の改善や室境界に入射する音のエネルギーを低減させる騒音制御を目的とする。吸音率の周波数特性や吸音仕上げ面の見栄えにはそれ程こだわらないので、グラスクロス包みグラスウールボードや木繊維をセメントなどのバインダーで固めた木毛セメント板を壁面・天井・屋根に直貼りした吸音構造が一般に使用される。

一方、オフィス・通路・ロビー・ホワイエなどの天井に吸音性仕上げ材を用いるのはその空間の残響過多を抑える室内音響的な目的からである。さらに、ホール・シネマ・録音スタジオ・音楽練習室など音響空間の室内音響設計では、目標とする残響時間を実現し、またエコーや音の集中などの音響障害を防ぐために、壁面や天井のほとんどまたは部分に吸音仕上げが用いられる[2]。前者の残響過多抑制を目的とする場合、やはり吸音率の周波数特性にはそれ程こだわらないものの建築としての仕上げは必要となるので、ロックウール吸音板や、孔あき板またはルーバー仕上げ+グラスクロス包みグラスウールなどが用いられることが多い。一方、後者の残響設計や音響障害の防止・除去を目的とする場合には、吸音構造の吸音率の周波数特性をある程度正確に知って、設計・施工で用いる必要がある。この場合、音響設計で使い易いのは広帯域をできるだけ均一に効率よく吸音する構造である。“広帯域をできるだけ均一に”というのは使用する吸音構造の種類が少なく済むということであり、“効率よく”というのは使用する面積が少なく済むという意味である。この残響設計や音響障害の防止・除去の目的でよく採用される吸音構造が、Table1の③共鳴器構造体の1つである孔あき板の背後にグラスウールやロックウールなどの多孔質材料を裏打ちした構造（以下、孔あき板吸音構造と呼ぶ）である。孔あき板吸音構造は、多孔質材料背後の剛壁との間に空気層を設けることで、比較的広い周波数帯域にわたって大きな吸音率を得ることができる。他には、孔あき板の代わりにルーバーやスリットを表面仕上げとして用いる構造がある。

さて、吸音構造を吸音率の周波数特性で全帯域吸音構造、中高音域吸音構造、高音域吸音構造、中音域吸音構造、低音域吸音構造の5つに分類してみると、どの範疇にも孔あき板吸音構造が含まれている[2]。孔あき板吸音構造は、表面仕上げ材の厚さが比較的厚い(数 mm~10 数 mm のボード材料)場合、孔の空気を質量とし、背後空気層をバ

ネとするヘルムホルツレゾネータが並んだ構造とみなすことができ、その吸音特性は共鳴周波数を中心とした山型の特性を示す[3-4]。共鳴周波数付近では孔付近での摩擦損失により、表面仕上げ材の背後に多孔質材料が無くてもある程度の吸音率(共鳴周波数付近で最大で0.5程度)を示すが、多孔質材料を挿入するとさらに抵抗が増して1.0に近い吸音率を示す。一方表面仕上げ材の厚さが薄い(2~3mmの金属板)場合は、孔部分での抵抗は比較的小さく、20%を越えて開孔率を増やして行くと多孔質材料+背後空気層のみ、すなわち孔あき板が無い場合の吸音特性に近づいて行く[4]。孔あき板の板厚、開孔率や背後空気層の厚さを変えることで、上記のどこかの分類に入る孔あき板吸音構造が実現されるのである。数年前の調査では、様々な機関から公表されている吸音率データ1,100件のうち、約350件が孔あき板吸音構造である[5]。このように吸音特性のデータも豊富なので、孔あき板吸音構造はホール他の音響空間で必ずといってよい程幅広く使われている。

様々な吸音特性が実現できる孔あき板吸音構造のうち、広帯域を吸音する構造は開孔率20%以上の孔あき板+多孔質材料(一般的にはグラスウールやロックウール)+背後空気層厚さ300mm以上の構成である。その吸音機構は、孔あき板と大きな背後空気層の組み合わせによるヘルムホルツレゾネータ型の中低音域の吸音域と、背後空気層の数次の気柱共鳴による中・高音域の吸音域が組み合わされたものである[3-4]。既に1940年代後半以降、Bolt, Ingard[6-8], Zwicker and Kosten[9], 子安[10]などにより、孔あき板吸音構造の吸音機構と設計方法に関する研究が行われており、上記の吸音機構についての説明がなされている。ただし、これらの研究においては、1つの孔のインピーダンスを孔あき板の開孔率で重み付けしたものを孔あき板の表面からみたインピーダンスとして、吸音特性の計算を行っている。一般の孔あき板は孔が等間隔で並んだ周期構造であるが、このインピーダンスモデルには周期構造による波動現象が考慮されていない。また、実測値との比較検討も少ないまま今日まできており、このモデルが設計実務の分野で吸音構造の設計に用いられることはほとんどない。設計では、様々な機関で測定された残響室法吸音率を用いて残響計算が行われているのが実情である[1]。

ところで、孔あき板は構造的に弱いグラスウールやロックウールなど一般的な多孔質材料の保護や意匠的な仕上げの役割も有している。これらの表面仕上げ材は意匠的な仕上げとは言っても、近くでは孔の奥が見え、また遠目には無孔部分とコントラストが付くために、意匠的にできるだけ均質に仕上げたいと望む建築家には嫌われることも多い。既存のボード状材料(1800mm×900mm またはその半分のサイズ)に後から穿孔するために、ボードの周縁部分に、ある幅の無孔部分が残ってしまうのも嫌われる原因である。代替の吸音構造として、表面仕上げの背後が見えにくいコペンハーゲン・リブ、面的に見えかつ耐久性に優れた焼結アルミ板・アルミ繊維板や吸音セラミックなどが挙げられる。また手の届かない範囲であれば化粧クロスを巻いたグラスウールボードが使われることもある(特にシネマ)。コペンハーゲン・リブは、奥行き方向にクランクしている形状であるために奥までは見えにくいのであるが、あまり開口率を大きく取れないので広帯域の吸音特性を得ることが難しく、現在はあまり使われていない。デンマークの放送局で使われたのでこの名前が付いている。焼結アルミ板・アルミ繊維板や吸音セラミックは孔あき板に比べて高価なので、建築内装材としてはどうしても使用面積が限られてしまう。いずれにしても、広帯域にわたって一様に効率よい吸音特性を示す構造の選択肢はまだまだ少ないのが現状である。

そこで、本研究では吸音構造の中でも広帯域吸音構造の選択肢を広げる意味で、孔あき板の前面に目隠し板を配置した Fig.1-1 に示すような正面から孔の見えにくい立体的な構造に着目する。孔あき板をベースとしたのは、開孔率や背後空気層の厚さを変えることで様々な吸音特性が実現できること、孔あき板吸音構造本来のヘルムホルツ型の共鳴による吸音域のほかに、背後空気層の気柱共鳴による吸音域が複合されて吸音特性の広帯域化が図れること、である。また、目隠し板については、孔を見えにくくするスクリーン効果のほかに、目隠し板を並べてできるスリットの共鳴による新たな吸音域が、吸音特性の広帯域化に寄与することを想定している。

本研究では、まず、応用範囲の広さを考えて同構造に限らず任意形状の周期吸音構造の吸音特性を数値的に解析する手法の検討を行う。つぎに、この手法を用いて目隠し板が孔あき板吸音構造の吸音特性に与える影響について数値解析を行う。続いて、これらの検討結果から得られた知見を基に、広帯域にわたって一様に効率よく吸音する実用に適した広帯域孔あき板吸音構造の検討を行う。

Table1 Typical Absorptive Structure and it's Feature

吸音構造分類	吸音機構	実例	特徴	用途
①板(膜)状材料	板(膜)に音が入射して振動するとき、内部摩擦により熱エネルギーに変わる。	一般ボード系材料	低音域を吸音	吸音構造として積極的に用いるというよりは現象として低音域を吸音する構造として認識されている。
		テント膜		
②多孔質材	通気性のある多孔質材料中の細隙を音が伝搬する間に、空気の粘性による熱エネルギーへの変換や、熱伝導による熱損失が生じる	グラスウール ロックウール 木毛セメント板	中・高音域を吸音。 背後空気層を設けることで、低音域まで吸音域を拡張できる	工場・設備機械室・舞台フライトラワー(人・物が届かない部位)の吸音
		ロックウール化粧吸音板	①の板状材料の性質も合わせ持つ	通路・オフィス(天井)
③共鳴器構造体	音が入射して“くひれ”部分の気柱が振動するとき、くびれ壁面や裏打ち材(通常は多孔質材料)の抵抗により熱エネルギーに変わる	孔あき板吸音構造 スリット吸音構造 (単一共鳴器)	共鳴周波数を中心に選択的な吸音域を示す。 裏打ち材背後に空気層を設けることで、低音域・高音域まで吸音域を拡張できる。	ホール・スタジオ・音楽練習室 AVルーム
		吸音楔 吸音トラップ 吸音筒	設置部位により吸音特性が変わる	無響室 スタジオ AVルーム

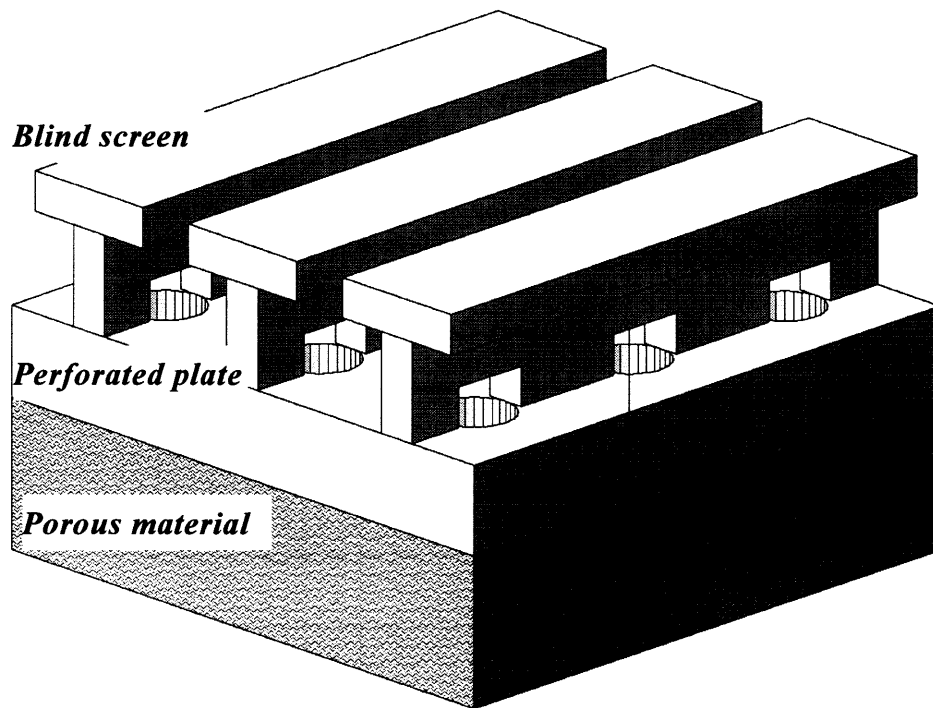


Fig.1-1 Perforated plate absorption system with blind screen

1.2 論文の構成

2章では、孔あき板吸音構造の吸音特性計算に用いるモード展開法と境界要素法の結合解法[11]について述べる。文献[11]は1次元周期吸音構造を想定して定式化されているので、ここでは2次元周期吸音構造に適用するための拡張を行っている。まず、結合解法の流れの概略を示す。つぎに、モード展開法と境界要素法のそれぞれを適用する領域とその定式化を概説した後、両者の結合の方法、および周期条件とインピーダンス境界条件の扱いについて述べる。最後に解析結果から吸音率を求める過程を示す。

3章では、上記の結合解法の妥当性の検討を行う。検討にあたっては、吸音率の周波数特性が数値計算結果で十分説明されているか、すなわち吸音率の極大値の位置が周波数軸上で一致するかに重点を置いている。まず、具体的な目隠し板を有する孔あき板吸音構造の解析モデルを説明し、上記の結合解法を用いた数値解析を行う。この数値計算結果と垂直入射吸音率の実測値を比較して、要素分割の細かさや数値積分の必要な Gauss 積分点の数の検討を行う。つぎに数種類の目隠し板を有する孔あき板吸音構造を製作し、垂直入射吸音率と残響室法吸音率の実測を行う。数値解析計算とこれら実測値を比較することにより、同解析手法の妥当性の検討を行う。その結果、表面仕上げ構造に接して背後に多孔質材料がある場合の目隠し板を有する孔あき板吸音構造の吸音率は、散乱理論に基づくモード展開法と境界要素法の結合解法により、おおまかな予測計算が可能と判断された。

4章では、ホール・スタジオや音楽練習室などの音響空間で、比較的広帯域を吸音する吸音構造として一般的に用いられている開口率10%~20%台のボード系孔あき板吸音構造を対象として、前面に配置する目隠し板の大きさと間隔を変えた場合の吸音率の数値計算を行い、目隠し板が孔あき板吸音構造の吸音特性に与える影響、特にベースとなる孔あき板吸音構造の吸音特性をできるだけ損なわない目隠し板の条件について検討を行う。その結果、目隠し板のスリット開口率を孔あき板の開孔率の2倍以上にとると共鳴周波数の低域へのシフト量が1/3オクターブ以内に納まり、音響設計では通常1/1オクターブ毎に残響計算が行われることから、実務上中音域においては目隠し板の無い単純な孔あき板吸音構造とほぼ同等の吸音特性を有していることを見なして良いことを確認した。また、孔あき板の前面に目隠し板を置くと、孔あき板吸音構造の吸音域の他に、目隠し板のスリット共鳴と考えられる吸音域が高音域に現れることが明

らかとなった。また、この章で目隠し板を有する場合の孔の見え方についても触れる。視線作図では斜め方向からは孔の見える角度があることが確認されたが、残響室法吸音率実測用に製作した大判の試料の孔あき板の孔は、一般室内照明の下では目隠し板奥が薄暗い状態なのでほとんど目立たないことを述べる。

5章では、4章の結果を踏まえて、より広帯域を吸音する孔あき板吸音構造について若干検討を行う。まず、共鳴周波数の異なる周期開口を組み合わせることによる広帯域吸音特性を有する孔あき板吸音構造の実現可能性を数値計算により検討する。その結果、2種類の孔を市松状に開けた孔あき板を用いた吸音構造は、中音域の広い範囲で大きな吸音率を示ことが明らかとなった。さらに、目隠し板を並べることでスリット共鳴による高音域の吸音が付加され、全体として広い周波数範囲で高い吸音率を示す孔あき板吸音構造が得られた。最後に、このような広帯域吸音特性が実際に得られるかどうか確認の吸音率測定を行った。計算結果は実測値をほぼトレースしていることから、計算で得られた吸音域が実際に生じていることを確認した。

6章では、解析手法、目隠し板の吸音特性に与える影響、および広帯域吸音特性を有する孔あき板吸音構造に分けて、これまでの研究成果についてまとめている。また、今後の課題として、孔あき板の孔周辺や目隠し板が構成するスリット周辺での摩擦や熱伝導による吸音のモデル化と実用面での有用性、有限の大きさの吸音構造の解析方法、孔の大きさや配置がランダムな孔あき板吸音構造への展開、および本研究で示された広帯域吸音特性を有する孔あき板吸音構造の実用化への希望、について述べた。