

積層防音材料の吸遮音特性の数値予測に関する研究  
Study on numerical prediction of absorption/insulation characteristics of layered materials

学籍番号 47-106741  
氏名 井上 尚久 (INOUE, Naohisa)  
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1. はじめに

**1.1 研究の背景** 近年様々な分野での音響設計に応えるため、非通気膜や板材、複数の多孔質材料を積層した複層構造の防音材料 (Fig.1) が開発され、実用化されている。単層構造は設計上の限界があるため、今後もこのような複層構造の設計が新型材料開発の大きな部分を占めると考えられる。

この材料の開発初期では音響管を用いた実測や伝達マトリックス法による理論予測が行われている。

音響管計測は小さいサンプルを用いて短時間で計測が行えることから、材料の開発段階では非常に有効な実験・実測手法であるが、測定試料が弾性を持つ場合には、側壁での支持条件により測定結果が大きく変化することが報告されている。しかし、現行のJISなどでは弾性材料への適用は不可とするものの明確な基準が存在しない。

一方、理論予測は材料を取り扱いやすくモデル化したものであり、試料の有限性の考慮や、内部での物理量の把握などを行うことは難しいため、吸遮音メカニズムに関する知見は未だ少ないと言える。

**1.2 本研究の目的** 以上背景を踏まえ、本論文の目的を以下に示す。

1) 単層・複層材料の音響管計測において支持条件がその測定値にいかなる影響を及ぼすかを把握すること

2) 数値解析を用いた可視化を通し、積層防音材料の吸遮音メカニズムを明らかにすること

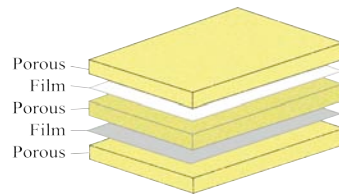


Fig.1 Example of the layered materials.

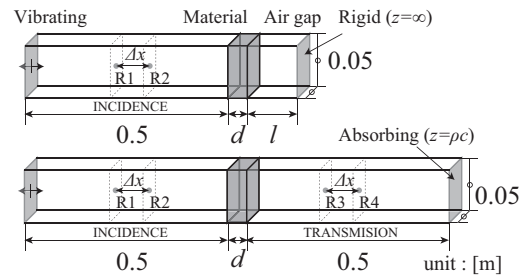


Fig.2 Numerical models of the impedance tubes. above for absorption, below for transmission.

2. 数値解析手法

**2.1 解析手法** 本論文において想定する音響管問題を Fig.2 に示す。側壁でスリップ支持されるものは伝達マトリックス法 (TMM)<sup>[1]</sup>、固定支持されるものは有限要素法 (FEM)<sup>[2]</sup> により計算し、それぞれ点線、実線でプロットすることとした。

**2.2 指標の算出法** 垂直入射吸音率  $\alpha_n$ 、透過損失  $R_n$  は Fig.2 中の 4 点 R1 ~ R4 での複素音圧  $p_1 \sim p_4$  から 4 マイクロフォン法に基づき下式により算出した。  $k$  は空気中での波数である。

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{p_2 - p_1 e^{jk\Delta x}}{p_1 e^{-jk\Delta x} - p_2} \right|^2$$

$$\tau_n = \left| \frac{p_3 e^{jk\Delta x} - p_4}{p_1 e^{jk\Delta x} - p_2} \right|^2$$

$$R_n = 10 \log_{10}(1/\tau_n)$$

### 3. 単層多孔質材の吸遮音解析

検討に用いた多孔質材物性値をTab.1に示す

Tab.1 Default property of the GW96K

Shear modulus: $N$	100,000 [N/m <sup>2</sup> ]
Bulk density: $\rho_1$	96 [kg/m <sup>3</sup> ]
Poisson's ratio: $\nu$	0
Loss factor: $\eta$	0.25
Flow Resistivity: $\sigma$	55,000 [Ns/m <sup>4</sup> ]
Porosity: $\phi$	0.96
Tortuosity: $\alpha_\infty$	1.07
Viscous Length: $\Lambda$	50 [ $\mu$ m]
Thermal Length: $\Lambda'$	100 [ $\mu$ m]

**3.1 吸音特性について** 後壁密着条件で、多孔質材の厚みを変化させた場合、背後空気層を変化させた場合、流れ抵抗を変化させた場合の解析結果をFig.3(a),(b),(c)に示す。

多孔質材厚み、流れ抵抗が大きい場合(a,c), TMMとFEMの解析結果が大きく乖離することから、固定支持条件の影響が大きくなっていると言える。

背後に空気層を含む場合(b), 緩支持条件においては低周波数域にピークが現れている。これは多孔質材をマス、背後空気層をバネとした一自由度共振系が形成されることにより生じる。

一方、固定支持条件においては、いずれの空気層厚においても先ほどの低周波数域

のピークは無くなり、500Hz付近にピークを生じている。これは多孔質材を側壁で固定することにより一自由度共振系が生じ難くなり、剪断共振が現れたと解釈出来る。

**3.2 遮音特性について** 単層多孔質材の厚みを変化させた場合、流れ抵抗を変化させた場合の解析結果をFig.4に示す。

通常非通気な弾性材料と異なり、透過損失が質量則に従わないことが分かる。

固定支持条件においては特に材料が厚い場合、低周波数域で透過損失が上昇する傾向が見られる。これは側壁で緩支持条件の場合、材料全体が一体として動くことで、質量則に近い値を示していたと考えられるが、固定支持されることで、このような振動は生じ難くなり、流体の不連続性により反射が生じ、透過損失が上昇したと考えられる。その後透過損失にディップが見られるが、先ほどの吸音率と同様に剪断モードによる共振が生じていると考えられる。高周波数域における遮音は多孔質材内部での減衰によるものであるため、固体の支持条件の影響は少ないと言える。

流れ抵抗の増加により、透過損失は全体的に上昇する傾向にある。これは先にも述べた不連続性による反射が大きくなるため

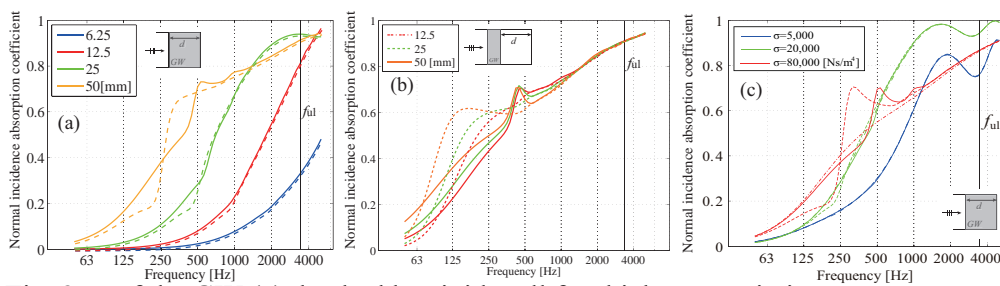


Fig. 3  $\alpha_n$  of the GW (a) backed by rigid wall for thickness variation, (b) for backed air gap variation, (c) backed by rigid wall for flow resistivity variation

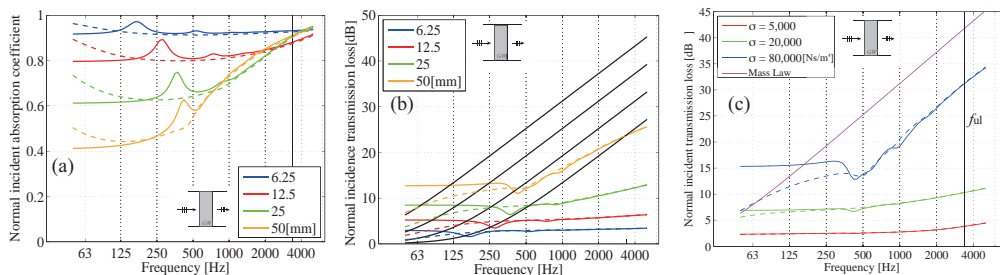


Fig. 4 Calculation result of the GW (a)  $\alpha_n$  seen from incident side for thickness variation, (b)  $R_n$  for thickness variation, (c)  $R_t$  for flow resistivity variation.

である。一方高周波数域では減衰が大きくなるため、透過損失が大きくなると説明される。

#### 4. 複層材料の吸遮音解析

**4.1 膜付き多孔質材の吸音特性について** Tab.2に示す3つの条件での計算結果をFig.5に示す。但し、膜は無張力、面密度0.04[kg/m<sup>2</sup>]、多孔質材はGW96Kとした。

Case.(a)では単層多孔質材の場合と比べ、低周波数域に吸音率のピークが現れている。これらは多孔質材固体の圧縮による共振であると考えられる。膜に通気性が無いことで、入射音波は全て多孔質材の固体相への外力として与えられる。それにより、固体としての特性が大きく、内部流体の減衰による高周波数での高い吸音率が現れなくなっていると考えられる。

最後に音響管計測において、側壁固定支持条件の場合、材料厚が大きいほど固体共

振のピークは高周波数域へシフトする傾向が見られる。

次にCase(b), (c)でも同様に低周波数域でピークを生じる。これは、単層多孔質材の場合にも見られた一自由度共振系によるものであると考えられる。しかし、ピーク値をとる周波数は同じ材料厚の場合でも、膜が入射面にある場合(b)の方が低い周波数で現れている。これは背面が空気と連続になる時、空気層はみかけの背後層の厚さよりも大きくなり実効的なバネ係数の値が大きくなっていると推察される。

一方、背面に膜がある場合(c)、共振周波数は以下の式で決まると考えられる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1 d l}}$$

$\rho_0, c_0$ は空気密度,音速[m/s]であり、背後層厚 50, 25, 12.5, 6.25mmの時それぞれ計算すると 122, 173, 245, 346Hzとなる。背後層が比較的厚い場合にはこれらの周波数は一致するが薄くなると乖離する傾向がある。

	Memb	GW	Memb	Air	Side sprt.
(a)	O	6.25~50	—	—	Slip/Fix
(b)	O	50	—	6.25~50	Slip
(c)	—	50	O	6.25~50	Slip

unit: [mm]

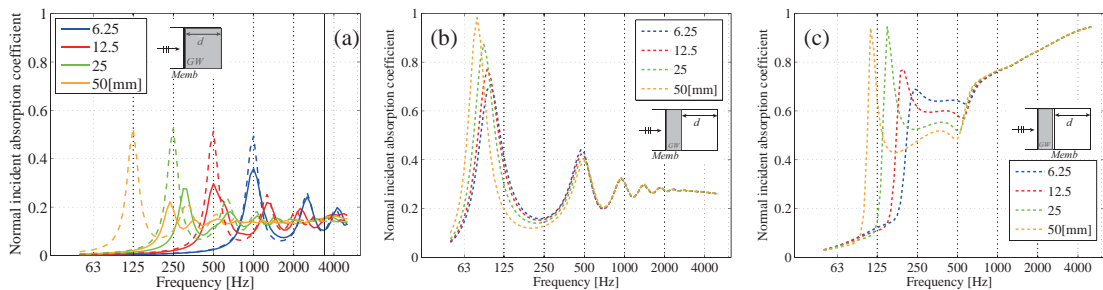


Fig. 5  $\alpha_n$  of the GW : Tab.2 condition Left: (a) Middle : (b) Right (c)

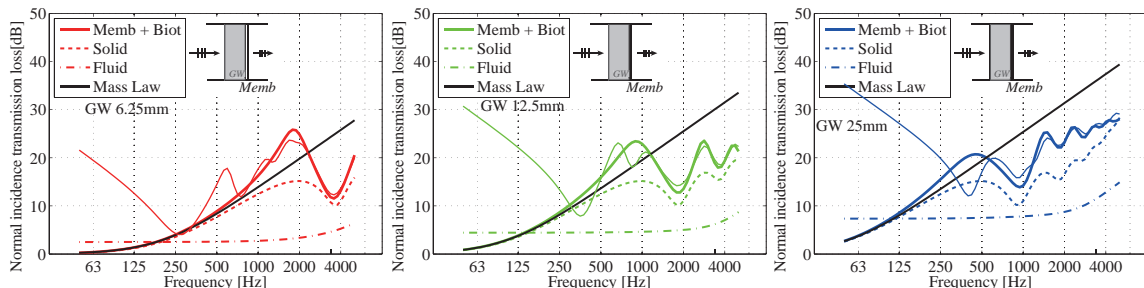


Fig. 6 Comparison of  $R_n$  of the GW with membrane on the incident side among equivalent fluid + membrane(chain line), elastic material with same mass as GW + membrane(dot line), Biot model + membrane(color solid line:Thin- FEM, Fat -TMM) and Mass law(black line).

**4.2 膜付き多孔質材の遮音特性について** 膜を背面に接着し、多孔質材の厚みを変化させた場合の結果をFig.6に示す。

低周波数域においては質量則に従うような透過損失の値を示し、その後次第に透過損失を超えある周波数でピークをとっている。この周波数においては空気と面する多孔質材の変位が、固体と流体で逆位相で振動していることが有限要素法を用いた可視化により確認された。また、この時固体は材料厚が1/4波長となる時の共振に近い変位分布の状態であった。縦波に対する共振周波数の式

$$f_r = \frac{1}{4d} \sqrt{\frac{2N(1-\nu)}{\rho_1(1-2\nu)}}$$

を用いると、GW96Kが25, 12.5, 6.25mm厚の場合それぞれ 456, 912, 1826Hzとなり、計算結果におけるピーク値をとる周波数と概ね対応することが確認された。材料厚が(2n-1)/4波長となる時の共振は一般の表裏面自由端の非通気弾性体では生じない(Fig.6点線)。このような現象が起きる原因は、先にふれた固体と流体の逆相振動に加え、膜面における膜の振動変位、多孔質材の固体変位、流体変位の3つが等しいという境界条件がによるものであると考えられる。

側壁固定支持条件の場合、低周波数域で大きな透過損失を示している。これは一般に剛性制御と呼ばれ、材料の剛性により値が決まる値である。単層多孔質材料の場合にはこの剛性制御の影響は見られなかった

が、非通気な膜材が積層されることで、固体振動を招きやすくなり、このような現象が現れたと考えられる。

**4.3 膜と多孔質材が接着されない場合** 多孔質材と膜との間に1mmの隙間を設け吸音率はTab.2(b)の条件、透過損失は背面に膜を設定しGW厚みを変え計算を行った(Fig.7)。

膜が接着されない場合、低周波数域では吸音率、透過損失共に膜の無い状態とほぼ同様の値を示している。膜材が接着されないことで、膜と多孔質材固体相が振動絶縁されるため、多孔質材の固体振動が生じ難くなるためと考えられる。一方、特に吸音率においては高周波数域ではピークが見られるが、これは膜をマス、背後層をバネとした一自由度共振系による影響である。

従って、全項までに述べたような積層材としての現象を利用する際には、膜の接着は非常に重要であると言える。

## 5. まとめ

単層多孔質材の音響管計測において、垂直入射吸音率、透過損失測定の場合について支持条件が与える影響に関して知見を得た。また、非通気膜を有する積層多孔質材料についてその吸遮音メカニズムについて知見を得、音響管計測においてこれらの評価を行うためには側壁での支持条件が非常に重要であることが示された。

今後、より現実に即した解析が必要であり、実測との対応関係を明らかにした上で、設計支援ツールとしての実用化が望まれる。

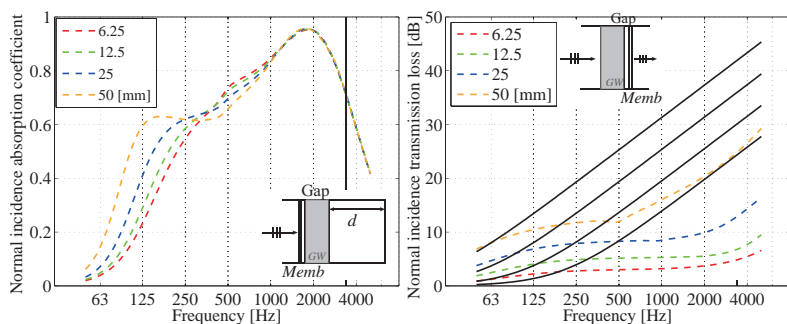


Fig. 7 Effect of gap between membrane and porous material. Calculation is done by varying thickness of the GW. Left :  $\alpha_n$  of backed by rigid wall, Right :  $R_n$

## 参考文献

- [1] J.F. Allard and N. Atalla, "Propagation of Sound in porous media" WILEY, 2009
- [2] R. Panneton et al, J. Acoust. Soc. Am., 101, 3287-3297, 1997.