

薄膜閉空間を用いた軽量な遮音材のメカニズム検討

Mechanism of Light Weight Sound Insulation Material Using Thin-film Cells

栗原 育美¹
Ikumi KURIHARA

近藤 隆¹
Takashi KONDO

山口 誉夫²
Takao YAMAGUCHI

要 旨

車両の軽量化を目的に、静粛性向上のために用いられる遮音材の軽量化がすすめられている。遮音材の構造として、中間層に多孔質材を挿入した二重壁構造が用いられることが多い。先行研究では、多孔質材の代わりに薄膜閉空間を用いることで、同様の遮音性能を保ちながら軽量化できることが報告されている。しかしながら、薄膜閉空間による遮音メカニズムは明らかになっていない。そこで本研究では、薄膜閉空間を透過する音波の伝搬速度（みかけ音速）に着目し、なぜ薄膜閉空間が多孔質材と同様の遮音性能を有するのかを検討した。また、適切な遮音性能を得るため、遮音性能とみかけ音速の関係を定式化し、薄膜閉空間の内部構造から見かけ音速を導出する手法を構築した。以上のメカニズム検討により、薄膜閉空間を用いた軽量遮音材の性能設計をするための知見を得た。

ABSTRACT

Weight reduction of the sound insulation material used to enhance cabin quietness is being advanced for the purpose of reducing vehicle weight. Sound insulation material with a structure of double walls with an intermediate layer of porous material between them is frequently used. There are reports from previous research that the use of thin-film cells instead of porous material can maintain similar sound insulation performance while enabling weight reduction. However, since the mechanism of sound insulation by thin-film cells is not clearly understood, in the present research, the question of why thin-film cells possess the same sound insulation performance as porous material was examined, with a focus on the propagation speed of sound waves transmitted through thin-film cells (apparent sound speed). The relationship between sound insulation performance and apparent sound speed was also formulated as an equation in order to obtain adequate sound insulation performance, and a method of deriving the apparent sound speed from the internal structure of the thin-film cells was devised. By means of the above examination of the mechanism, findings were obtained to enable performance design of lightweight sound insulation material using thin-film cells.

1. まえがき

自動車の環境負荷低減に対する要望はさらなる高まりを見せている。環境負荷を低減する手法の一つとして、燃費性能を向上させるための、車体軽量化が進んでいる。それとともに、電動車が普及するにつれ、お客様からは静粛性の要求がより高まっている。

静粛性を向上させる手法の一つとして防音材の適用があげられる。防音材の性能指標には主に、振動をどれくらい抑えられるかを示す制振性能、音波のエネルギーをどれくらい吸収できるかを示す吸音性能、音波の透過をどれくらい遮られるかを示す遮音性能がある⁽¹⁾。遮音構造には、一

重壁、中間層が空気の中空二重壁、二重壁に通気タイプ多孔質材を挿入した多孔質材挿入二重壁などがある。

自動車のフロアの一般的な遮音構造の例を Fig. 1 に示す。自動車の鋼材パネルに対して、遮音性能向上のために、

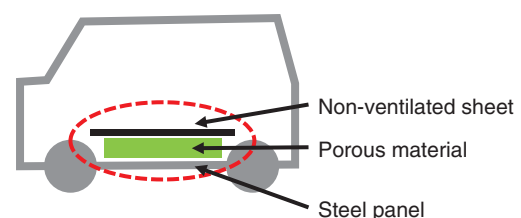


Fig. 1 Sound insulation structure of car

¹ 先進技術研究所

² 群馬大学, 博士(工学)

多孔質材と非通気材シートを用いた多孔質材挿入二重壁構造が多く採用されている。遮音性能をさらに向上させるには、鋼材パネルの板厚を増やす方法、多孔質材の厚みを増やす方法、非通気材シートの面質量を増やす方法などがあげられ、一般的に軽量化と遮音性能は相反の関係にある。

先行研究では、多孔質材挿入二重壁に対し、中間層に薄膜閉空間を挿入した薄膜閉空間挿入二重壁構造を用いることで、従来と比較して軽量ながら同様の遮音性能を有することが報告されている⁽²⁾。薄膜閉空間の例を Fig. 2 に示す。薄膜閉空間は空気を内包した円筒状の薄膜セルが並んだものである。

先行研究においては、空気を内包する非通気性薄膜を用いた薄膜閉空間挿入二重壁が、なぜ多孔質材同様の遮音性能を有するのかが明らかになっていない。

多孔質材挿入二重壁の遮音性能は Biot モデル⁽³⁾を用いて予測することができる。Biot モデルは入射音波が多孔質材の空隙部を通る空気伝播音、骨格部を伝わる固体伝播音、およびそれらの相互作用を考慮した音響特性モデルである。Biot モデルのパラメータには流れ抵抗、音響エネルギー損失に関連した粘性特性長、音響エネルギーの熱変換量に関連した熱性特性長、材料の減衰、ヤング率などがある。遮音性能のメカニズムはこれらを用いて説明されることがある。しかしながら、薄膜と空気から構成される薄膜閉空間は多孔質材とは異なり不均質な材料であるため、Biot モデルを用いたメカニズムの説明は容易ではない。

一方、中空二重壁の中間層に空気よりも音速が小さい気体を用いることで遮音性能が向上することが知られている⁽⁴⁾。また、多孔質材は音が通過する空隙部の迷路長が長いこと、見かけ上の音速が空気中の音速より小さくなる⁽⁵⁾、これが多孔質材挿入二重壁の遮音性能が良い要因の一つだといわれている⁽⁶⁾。このように遮音性能のメカニズムの一因に中間層の見かけ音速が関連していることが推察される。

そこで、本研究では薄膜閉空間内を透過する音波の伝播速度（見かけ音速）に着目し、薄膜閉空間挿入二重壁が多孔質材挿入二重壁と同様の遮音性能を有するメカニズム検討



Fig. 2 Thin-film cells

をおこなった。本検討によって簡便な手法で性能予測ができれば、初期の性能設計段階に仕様を検討するための指針となる。

2. 音速と遮音性能の関係

2.1. 遮音材の比較

一重壁、中空二重壁、多孔質材挿入二重壁の構造を Fig. 3 に、それらを残響室を用いて実測した遮音性能を Fig. 4 に示す。遮音性能は透過損失 (Transmission loss) として表され、この値が大きいほど遮音性能は高い。中空二重壁の場合、中間層が建築用二重窓のように 100 mm 以上と厚い場合は一重壁に対し遮音性能は向上するが、自動車に採用されるように 10 mm 程度と薄い場合は逆に低下する。一方で、薄い中間層に多孔質材を挿入すると遮音性能が向上することが知られている。まず、この二重壁構造のメカニズムについて説明する。

2.2. 中空二重壁の見かけ音速と遮音性能

中空二重壁に入射角 θ_i 、音速 C_i で入射する平面波は、中間層 n 内で屈折角 $\theta_n (= \theta_i)$ 、音速 $C_n (= C_i)$ となるが、式 (1) より入射角が大きいほど音速は見かけ上大きくなり $C_{n-\theta_n}$ となる。この現象は、中間層の材質によらず発生する。

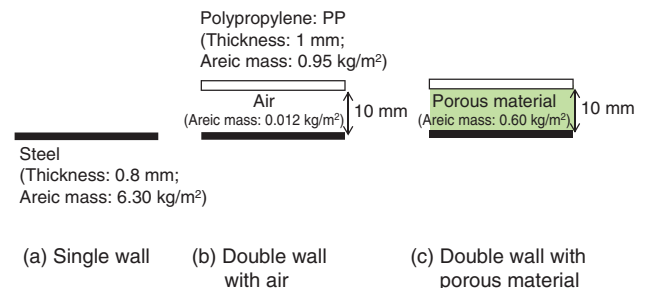


Fig. 3 Structure of sound insulation

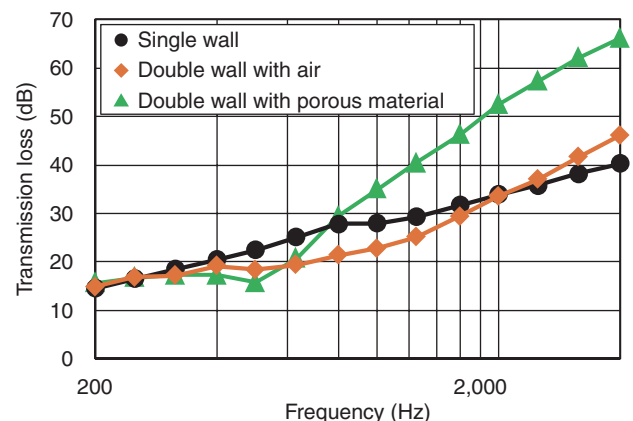


Fig. 4 Transmission loss

$$C_{n-\theta n} = \frac{C_n}{\cos \theta_n} \quad (1)$$

例えば, Fig. 5(a) に入射角 0° , 音速 $C_i 340$ m/s で入射する平面波を, Fig. 5(b) に入射角 45° , 音速 $C_i 340$ m/s で入射する平面波を示す. (a) の場合, 平面波は同時に中間層下面へ到達するため, 中間層の音速はそのまま 340 m/s である. (b) の場合, 斜め入射する平面波の一部が早く中間層下面に到達するため, 垂直方向の音速 $C_{n-\theta n}$ は見かけ上大きくなり, 式 (1) より 481 m/s となる.

中空二重壁では, 壁の面質量をマス, 中間層をバネとする共振が発生し, その周波数 f は式 (2) で表される.

$$f = \frac{1}{2\pi \cos \theta_n} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2) \rho C_n^2}{m_1 m_2 l}} \quad (2)$$

ρ : 中間層の密度 (kg/m^3)

C_n : 中間層の音速 (m/s)

m_1, m_2 : 二重壁それぞれの面質量 (kg/m^2)

l : 二重壁間距離 (m)

θ_n : 中間層の屈折角 ($^\circ$)

例えば, Fig. 3 (b) に示す中空二重壁を, 伝達マトリクス法により算出した, 入射角違いによる遮音性能の変化と, 入射角がランダムの場合の遮音性能を Fig. 6 に示す. 入射角が単一の場合, 二重壁間距離が一定であるため共振周波数は一つであり, その周波数より高い周波数領域で遮音性能は高くなる. 入射角が大きくなるほど式 (1) より見かけ音速は大きくなるため, 式 (2) に従って共振周波数は高くなり, 遮音性能は低くなる. 残響室を用いた遮音性能の計測方法では入射角がランダムとなるため, 共振周波数は入射角 0° から 90° のあらゆる値をとり, その結果 Fig. 6 に示す計算値のように遮音性能は低くなる.

2.3. 多孔質材挿入二重壁の見かけ音速と遮音性能

多孔質材は迷路長が長いため, 平面波が多孔質材を通過するには時間がかかり, 音速は見かけ上小さくなる⁽⁵⁾. これを距離による見かけ音速 C_{di} とする.

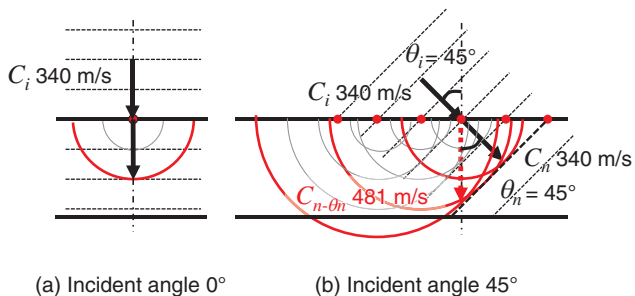


Fig. 5 Sound speeds depending on incident angles

この場合, 入射角 θ_i , 音速 C_i で入射する平面波は, 多孔質材内では式 (3) で示すスネルの法則により, 屈折角 θ_{di} で伝搬する平面波となる^{(6), (7)}.

$$\frac{\sin \theta_i}{C_i} = \frac{\sin \theta_{di}}{C_{di}} \quad (3)$$

入射角 θ_i , 音速 C_i で入射し, 距離による見かけ音速 C_{di} で多孔質材を通過する平面波を Fig. 7 に示す.

屈折した平面波による見かけ音速 $C_{di-\theta_{di}}$ は, 式 (1) より, ここでは式 (4) で表されるように大きくなる.

$$C_{di-\theta_{di}} = \frac{C_{di}}{\cos \theta_{di}} \quad (4)$$

入射角がランダムの場合でも, 中間層の見かけ音速が小さい場合は屈折角が 0° に近づくため, 遮音性能は Fig. 6 に示す入射角 0° に近い高い値を有する.

つまり中間層の見かけ音速が小さいほど遮音性能は高くなる.

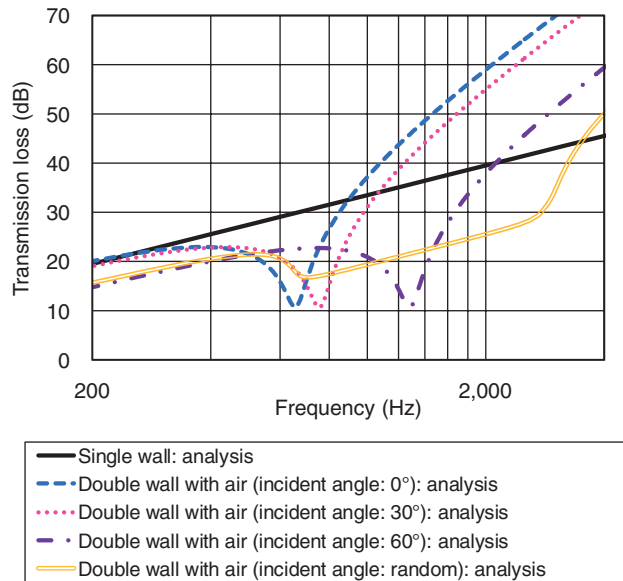


Fig. 6 Incident angles and transmission loss

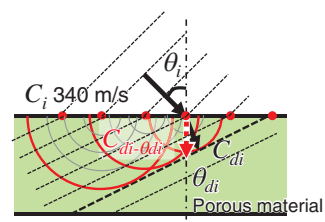


Fig. 7 Refraction angles depending on porous material

3. 薄膜閉空間の見かけ音速減少のメカニズム

3.1. 薄膜閉空間の見かけ音速

先行研究より薄膜閉空間挿入二重壁と多孔質材挿入二重壁の遮音性能は同様であった。そこで薄膜閉空間も多孔質材同様に見かけ音速が小さいと推察される。

そこで、両者の見かけ音速を音響インピーダンス管 ϕ 100 mm を用いた垂直入射吸音率測定 (ISO 10534-2) から算出した。サンプルは厚さ 100 mm で測定した。算出した見かけ音速を Fig. 8 に示す。薄膜閉空間はほとんどが空気であるにも関わらず、見かけ音速は空気の 340 m/s より小さく、多孔質材と同様の 200 m/s 程度であった。

3.2. 薄膜透過による音波の時間遅れ

薄膜閉空間の見かけ音速が小さい要因は、音波が薄膜を透過する際に、時間遅れが生じるためと考え、音波の時間遅れの算出をおこなった。計測手法の概念図を Fig. 9 に示す。音源と音圧計測点間に薄膜を配置しない場合を Fig. 9 (a) に、薄膜を配置する場合を Fig. 9 (b) に示す。計測点に音圧が伝搬するまでの時間を測定し、薄膜有無の時間差を音波の時間遅れとして算出した。

薄膜により生じた音波の時間遅れと薄膜枚数の関係を Fig. 10 に示す。薄膜の枚数が増加するほど、より音波に時間遅れが生じることがわかった。薄膜 1 枚あたりの時間遅れは Fig. 10 中の一次近似曲線から 0.032 ms とした。

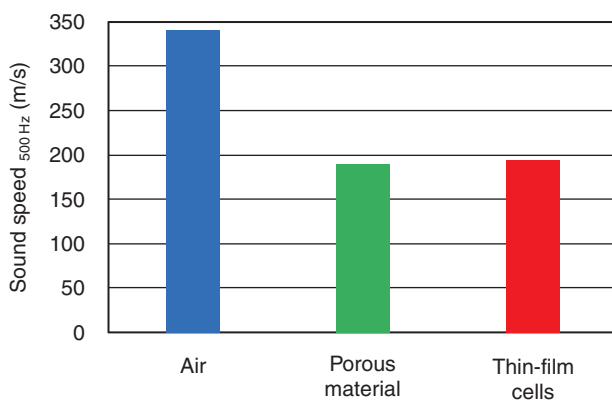


Fig. 8 Sound speed

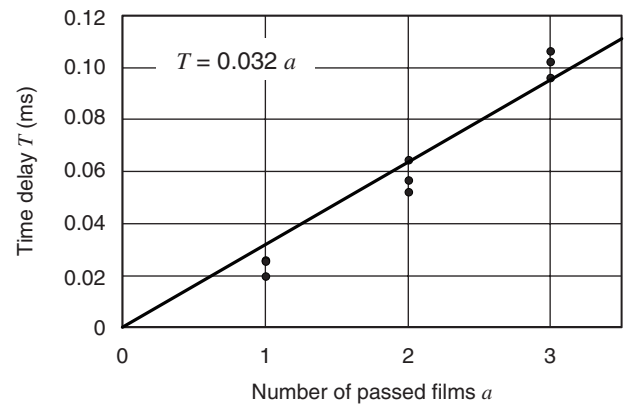


Fig. 10 Time delay of sound by number of thin films

3.3. 薄膜配置による見かけ音速の減少

薄膜透過によって音波の時間遅れが生じることから、中間層に薄膜を複数枚配置すれば、見かけ音速はより小さくなると考えられる。

Fig. 11(a) に中空二重壁へ斜め入射する平面波を示す。入射角が大きいほど見かけ音速 $C_{n-\theta n}$ は大きくなり遮音性能は低下する。一方、Fig. 11(b) に薄膜が面内方向に配置された二重壁へ斜め入射する平面波を示す。入射角が大きいほど薄膜透過枚数が増えるため、音波の時間遅れが生じ、中間層の音速は見かけ上小さくなる。これを時間遅れによる見かけ音速 C_{de} とすると、見かけ音速は $C_{de-\theta de}$ で表され、(a) の $C_{n-\theta n}$ より小さくなり、(a) よりも遮音性能は高くなると考えられる。

以上の検討から、薄膜閉空間挿入二重壁が多孔質材と同様の遮音性能を有するメカニズムは、薄膜透過による

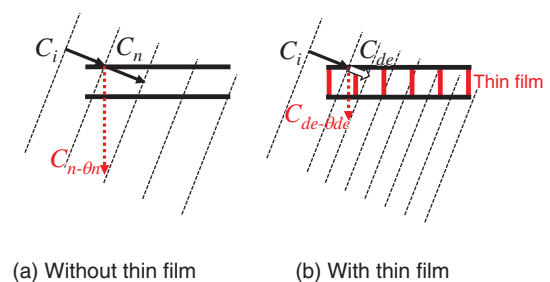


Fig. 11 Oblique incidence

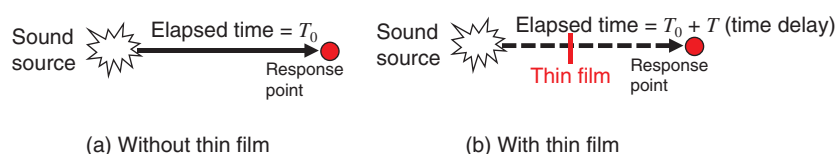


Fig. 9 Measurement of time

音波の時間遅れによって見かけ音速が小さくなるためと
考えた。

4. 検証方法

メカニズムの仮説を直接検証するには、薄膜を用いた中間層の見かけ音速を求める必要があるが、入射角がランダムの場合、中間層の見かけ音速を直接計測することは容易ではない。そこで、まず薄膜を用いた構造と見かけ音速の関係の定式化をおこなった。次に、見かけ音速と遮音性能の関係を定式化し、多孔質材挿入二重壁の遮音性能と同様となる見かけ音速の算出をおこなった。最後に、多孔質材挿入二重壁の遮音性能と同様な見かけ音速をねらった構造を作成した。作成した構造の遮音性能を実測することで、薄膜透過による音波の時間遅れにより遮音性能が向上しているという仮説の妥当性を検証した。

4.1. 薄膜を用いた構造による見かけ音速の定式化

まず、薄膜を用いた構造と見かけ音速の関係の定式化をおこなう。Fig. 12 に薄膜配置の模式図を示す。薄膜構造の高さを二重壁間距離にあわせた l m、薄膜間隔を y m とする。薄膜の枚数は面直方向に b 枚 (Fig. 12 では 2 枚) とする。

薄膜構造に入射角 θ_i 、音速 C_i で入射する平面波は、薄膜構造内で屈折角 $\theta_n (= \theta_i)$ となり、薄膜構造を通過する距離 l' は式 (5)、その際にかかる時間 T' は式 (6) で表される。

$$l' = \frac{l}{\cos \theta_n} \quad (5)$$

l : 薄膜構造の高さ (m)

θ_i : 入射角 ($^\circ$)

$$T' = \frac{l'}{C_i} + at \quad (6)$$

a : 薄膜透過枚数

t : 薄膜 1 枚あたりの時間遅れ (=0.032 ms)

ここで薄膜透過枚数 a は式 (7) で表される。

$$a = \frac{l \tan \theta_n}{y} + b \quad (7)$$

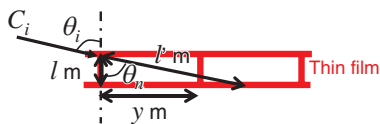


Fig. 12 Film arrangement

よって薄膜構造を通過する音波の時間遅れによる見かけ音速 C_{de} は式 (8) で表される。

$$C_{de} = \frac{l'}{T'} \quad (8)$$

入射角が大きいほど音速は見かけ上大きくなるので、式 (1) より見かけ音速 $C_{de-\theta de}$ は式 (9) となる。

$$C_{de-\theta de} = \frac{C_{de}}{\cos \theta_n} \quad (9)$$

入射角がランダムの場合の平均音速 $\overline{C_{de-\theta de}}$ は式 (10) で表される。

$$\overline{C_{de-\theta de}} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} C_{de-\theta de} d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta} \quad (10)$$

本研究では現実の場に近い条件とされる音場入射を用いた入射角 0° から 78° ⁽⁸⁾ を 1° 刻みで平均化をおこない見かけ音速を求めた。

以上より薄膜構造の高さ l と、面内方向の薄膜配置間隔 y をパラメータとして見かけ音速を求めることができる。

4.2. 見かけ音速と遮音性能の関係の定式化

ねらいの遮音性能となる見かけ音速を求めるため、見かけ音速と遮音性能の関係の定式化をおこなう。

定式化する構造を Fig. 13(a) に示す。二重壁に中間層が挿入された全 3 層構造の音速、屈折、遮音性能の関係の定式化をおこなう。中間層は実際は一樣とは限らないが、ここでは一樣とみなした。

中間層を全 m 層ある中の n 番目の層として一般化し、平面波が進行するとする。一般化した構造を Fig. 13(b) に示す。

4.2.1. 中間層の伝達マトリクス

多孔質材や気体のような通気性のある層を平面波が進行する際、粒子速度に依存した抵抗が働く。その際、平面波の振幅、位相が変化する。平面波を仮定し、 n 番目の層の媒質内の断面 n (入射側) における音圧 p_n 、粒子速度 v_n 、断面 $n-1$ における音圧 p_{n-1} 、粒子速度 v_{n-1} の関係はそれぞれ式 (11) から式 (14) となる。

$$p_n = p_{i,n} + p_{r,n} \quad (11)$$

$$v_n = \frac{p_{i,n} - p_{r,n}}{W_{s,n}} \quad (12)$$

$$p_{n-1} = p'_{i,n} + p'_{r,n} \quad (13)$$

$$v_{n-1} = \frac{p'_{i,n} - p'_{r,n}}{W_{s,n}} \quad (14)$$

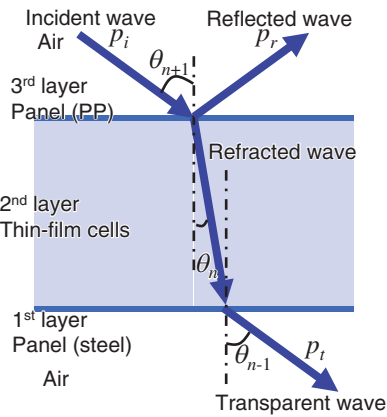
$p_{i,n}$: 断面 n における進行波の音圧 (Pa)
 $p_{r,n}$: 断面 n における後退波の音圧 (Pa)
 $p'_{i,n}$: 断面 $n-1$ における進行波の音圧 (Pa)
 $p'_{r,n}$: 断面 $n-1$ における後退波の音圧 (Pa)
 $W_{x,n}$: n 層の媒質内を x 方向に平面波が伝搬するとき
 の複素特性インピーダンス

$p_{i,n}$, $p'_{i,n}$, $p_{r,n}$, $p'_{r,n}$ は距離減衰より式 (15) で表せる.

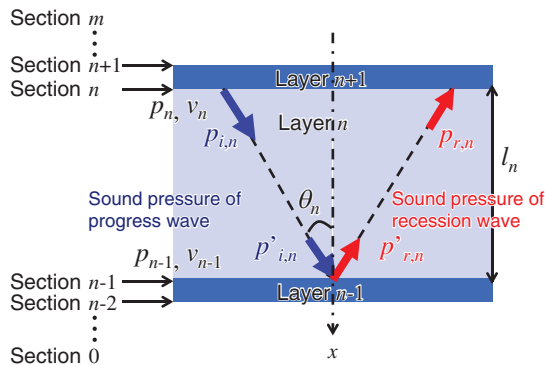
$$\begin{aligned}
 p_{i,n} &= p'_{i,n} e^{jk_{x,n}l_n} \\
 p'_{i,n} &= p_{i,n} [\cos(k_{x,n}l_n) - j\sin(k_{x,n}l_n)] \\
 p_{r,n} &= p'_{r,n} e^{-jk_{x,n}l_n} \\
 p'_{r,n} &= p_{r,n} [\cos(k_{x,n}l_n) + j\sin(k_{x,n}l_n)]
 \end{aligned} \quad (15)$$

$k_{x,n}$: 波数
 l_n : n 層の厚み (m)

式 (11) から式 (15) を整理すると, 断面 n , 断面 $n-1$ における音圧, 粒子速度の関係は式 (16) で表せる. ここで $T_{n,n-1}$ は伝達マトリクスである.



(a) Three-layer structure



(b) General structure

Fig. 13 Model structure

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} p_n \\ v_n \end{Bmatrix} &= T_{n,n-1} \begin{Bmatrix} p_{n-1} \\ v_{n-1} \end{Bmatrix} \\
 T_{n,n-1} &= \begin{bmatrix} \cos(k_{x,n}l_n) & jW_{x,n}\sin(k_{x,n}l_n) \\ \frac{j}{W_{x,n}}\sin(k_{x,n}l_n) & \cos(k_{x,n}l_n) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $l_n \ll \lambda_{x,n}$ のとき, $k_{x,n}l_n = 2\pi \frac{l_n}{\lambda_{x,n}}$ は微小なので式 (17) のように近似できる.

$$\cos(k_{x,n}l_n) \cong 1, \sin(k_{x,n}l_n) \cong k_{x,n}l_n = \frac{\omega l_n}{C_{x,n}} \quad (17)$$

よって

$$T_{n,n-1} \cong \begin{bmatrix} 1 & jW_{x,n}k_{x,n}l_n \\ \frac{j}{W_{x,n}}k_{x,n}l_n & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$k_x = \frac{\omega}{C_{x,n}}, W_{x,n} = \rho_n C_{x,n}$$

$C_{x,n}$: n 層内の x 方向の音速 (m/s)

よって

$$T_{n,n-1} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega\rho_n l_n \\ \frac{j\omega l_n}{\rho_n C_{x,n}^2} & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$C_{x,n} = C_n \cos\theta_n$, n 層の体積弾性率 $\rho_n C_{x,n}^2 = E_n$ より,

$$T_{n,n-1} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega\rho_n l_n \\ \frac{j\omega l_n}{E_n \cos^2\theta_n} & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$E_n = \frac{l_n}{K_n}$ より

$$T_{n,n-1} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega\rho_n l_n \\ \frac{j\omega}{K_n \cos^2\theta_n} & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

ρ_n : n 層の密度 (kg/m^3)

K_n : n 層のバネ定数 (N/m)

θ_n : n 層の平面波の角度 ($^\circ$)

n 層のバネ定数 K_n は FEM により求める^{(2), (9)}.

式 (21) の n 層の平面波の角度 θ_n は, スネルの法則式 (3)' より境界面での音速の違いから求められる.

$$\frac{\sin\theta_{n+1}}{C_{n+1}} = \frac{\sin\theta_n}{C_n} \quad (3)'$$

θ_{n+1} : $n+1$ 層の平面波の角度 ($^\circ$)

C_{n+1} : $n+1$ 層内の音速 (m/s)

C_n : n 層内の音速 (m/s)

今回式 (3)' を式 (21) に組み込んだモデルを構築することで、中間層の音速を考慮可能とした。

4.2.2. 壁板の伝達マトリクス

壁板の伝達マトリクス $T_{n,n-1}$ は、平面波を仮定し、 n 番目の層の単位面積当たりの機械インピーダンス $Z_{k,n}$ により式 (22) で表される⁽⁴⁾。

$$T_{n,n-1} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{k,n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで機械インピーダンス $Z_{k,n}$ は式 (23) で表される。

$$Z_{k,n} = \gamma_{k,n} + j2\pi f \bar{m}_n \left[1 - \left(\frac{f}{f_{c,n}} \right)^2 \sin^2 \theta_{n+1} \right] \quad (23)$$

$$f_{c,n} = \frac{C_{n+1}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{m}_n}{B_n (1 + j\eta_n)}}$$

$\gamma_{k,n}$: 壁板の単位面積当たりの粘性減衰定数

$\bar{m}_n$: 壁板の面質量 (kg/m^2)

$f_{c,n}$: n 層の壁板のコインシデンス限界周波数 (Hz)

B_n : 壁板の単位面積当たりの曲げ剛性 (Nm^2)

η_n : 壁板の損失係数

4.2.3. 積層全体の伝達マトリクス

全 m 層の積層体全体の伝達マトリクスは、各層の伝達マトリクスの積である式 (24) で表される。

$$T_{m,0} = T_{m,m-1} \cdot T_{m-1,m-2} \cdots T_{n+1,n} \cdot T_{n,n-1} \cdot T_{n-1,n-2} \cdots T_{1,0} \quad (24)$$

薄膜閉空間挿入二重壁の場合は Fig. 13(a) のように鉄板層、薄膜閉空間層、PP 板層の全 3 層であるので、三つの伝達マトリクスの積で表される。

4.2.4. 積層全体の遮音性能

全 m 層の積層全体の断面 m (入射側)、断面 0 における音圧、粒子速度の関係は式 (25) で表される。

$$\begin{cases} P_m \\ v_m \end{cases} = T_{m,0} \begin{cases} P_0 \\ v_0 \end{cases} \quad (25)$$

$$T_{m,0} = \begin{bmatrix} T_{m,0}^{(1,1)} & T_{m,0}^{(1,2)} \\ T_{m,0}^{(2,1)} & T_{m,0}^{(2,2)} \end{bmatrix}$$

以上から、透過率 τ は式 (26) で表せる。

$$\frac{P_m}{P_0} = T_{m,0}^{(1,1)} + \frac{T_{m,0}^{(1,2)}}{z_0} = \frac{1}{\tau(\theta)} \quad (26)$$

入射角 θ_i での透過損失 $TL(\theta)$ は式 (27) で表せる。

$$TL(\theta) = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{\tau(\theta)} \right] \quad (27)$$

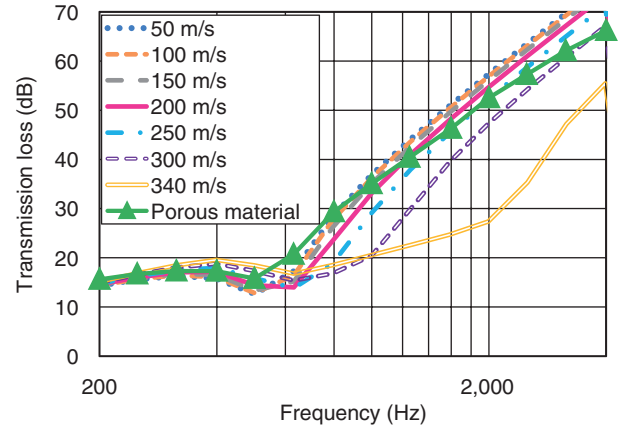


Fig. 14 Sound speed and transmission loss

入射角がランダムの場合、入射角 0 から $\pi/2$ で透過率の平均 $\bar{\tau}$ は半球積分⁽⁴⁾を用いて式 (28) で表せる。ここでの入射も、音場入射を用いた入射角 0° から 78° を用い、平均透過率を算出した。

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\pi/2} 2\pi \tau \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} 2\pi \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (28)$$

以上から透過損失 TL は式 (29) で表される。

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\bar{\tau}} \right) \quad (29)$$

中間層のバネ定数を $9,400 \text{ N/mm}$ とし、式 (29) を用いて計算した見かけ音速と遮音性能の関係性および多孔質材挿入二重壁の遮音性能の実測値を Fig. 14 に示す。見かけ音速が 200 m/s 程度となると、本研究に用いた多孔質材挿入二重壁の遮音性能と同様の値になることが確認できた。

5. 検証結果と考察

5.1. 薄膜を用いた構造による検証

検証に用いた構造を Fig. 15 に示す。厚さ 0.1 mm のポリエチレンを主材料とする薄膜を用い、 $\phi 30 \text{ mm}$ 、高さ 10 mm の空気を内包した円筒状のセルを 4 mm 間隔で並べた

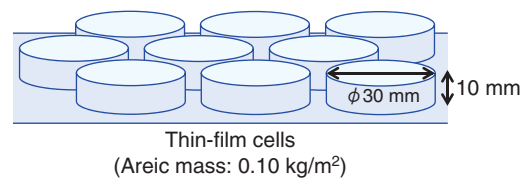


Fig. 15 Designed thin-film cells

構造を作成した。この構造を Fig. 12 の模式図にあてはめ、薄膜間隔は 17 mm として、式 (10) を用いてこの構造の見かけ音速を算出すると、216 m/s と見積られる。また、面質量は従来の多孔質材挿入二重壁よりも 33% (0.5 kg/m^2) 軽量であった。

多孔質材挿入二重壁の実測した遮音性能と、見かけ音速 216 m/s と見積った薄膜閉空間挿入二重壁の実測した遮音性能、定式による見かけ音速 216 m/s の場合の遮音性能を Fig. 16 に示す。

Fig. 16 より、多孔質材挿入二重壁の遮音性能と、作成した薄膜閉空間挿入二重壁構造の遮音性能、定式による遮音性能はほぼ同様の結果となった。

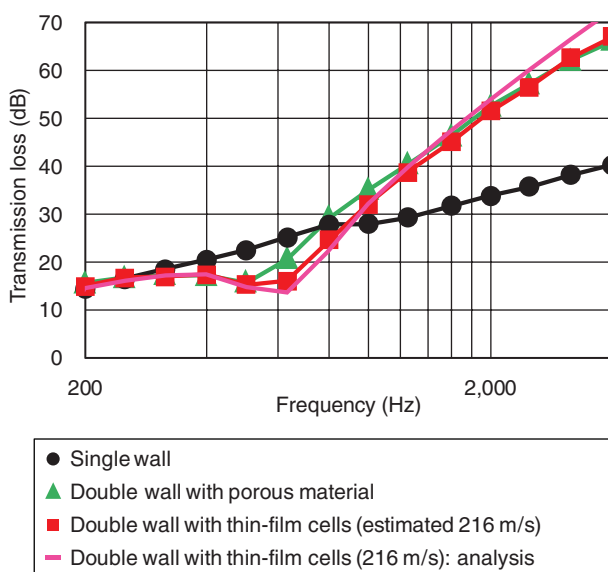
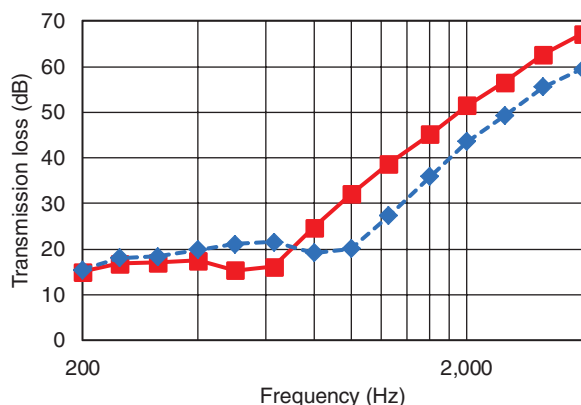
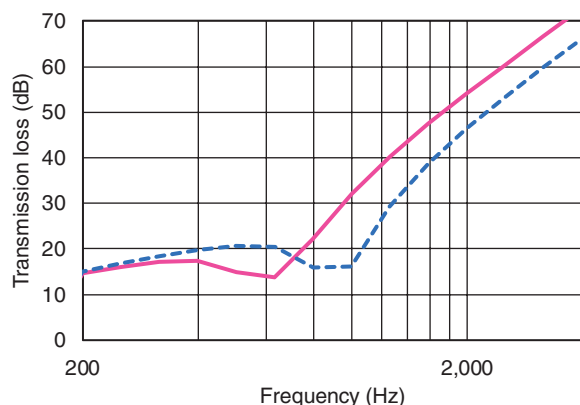


Fig. 16 Transmission loss in designed thin-film cells



Design	
■	ϕ : 30 mm; l : 10 mm (estimated 216 m/s)
◆	ϕ : 30 mm; l : 5 mm (estimated 153 m/s)

(a) Experimental



Design		Spring constant (N/mm)
—	ϕ : 30 mm; l : 10 mm (216 m/s)	9,400
- - -	ϕ : 30 mm; l : 5 mm (153 m/s)	24,000

(b) Analysis

Fig. 17 Transmission loss of double wall with different design of thin-film cells

さらに、異なる構造の性能予測が可能であるか確認するため、 ϕ 30 mm、高さ 5 mm の空気を内包した円筒状のセルを 4 mm 間隔で並べた構造を作成した。この構造の見かけ音速を算出すると、153 m/s と見積られる。高さ 10 mm および 5 mm の薄膜閉空間挿入二重壁の実測した遮音性能を Fig. 17 (a) に示す。また、それらを定式によって算出した見かけ音速での遮音性能を Fig. 17 (b) に示す。高さ 5 mm の構造は高さ 10 mm の構造よりもバネ定数が大きくなるため、共振周波数は高くなる。

Fig. 17 (a), (b) より、作成した薄膜閉空間挿入二重壁の構造の実測した遮音性能と、定式による遮音性能は同様の傾向が得られた。

5.2. 考察

本研究では中間層の見かけ音速に着目し、薄膜閉空間挿入二重壁のメカニズム検討をおこなった。その結果、薄膜透過による音波の時間遅れからの見かけ音速の減少より算出した遮音性能が、実験結果に近い値をとることが確認できた。薄膜閉空間が多孔質材と同様の遮音性能となるのは、薄膜透過による音波の時間遅れによって見かけ音速が小さくなり、多孔質材同様の見かけ音速になるためという仮説が妥当であると判断した。

薄膜閉空間挿入二重壁の詳細なメカニズムは、薄膜と内部の空気との相互作用や、薄膜壁面の反射、薄膜が発する波の干渉、薄膜の材料違いなど、複雑な事象から成り立っていると考えられ、十分にそのメカニズムを把握できたわけではない。しかしながら、本検証結果より中間層の見かけ音速と遮音性能の相関は高いと判断できることから、薄膜を用いた構造の性能設計に有益な知見であると考えられる。

6. まとめ

薄膜閉空間挿入二重壁の遮音メカニズムについて検討をおこなった。

- (1) 薄膜閉空間挿入二重壁において、薄膜間隔と高さから見かけ音速を導出する手法を構築した。
- (2) 薄膜を用いた構造は、平面波が斜めから入射するほど薄膜の透過枚数が増えるため、見かけ音速が小さくなる。
- (3) 薄膜透過による音波の時間遅れからの見かけ音速の減少より算出した遮音性能が、実験結果に近い値をとる。

本研究により、薄膜閉空間挿入二重壁による遮音性能の定量的な評価ができるようになった。詳細なメカニズム解明には、薄膜と内部の空気との相互作用や、薄膜壁面の反射、薄膜が発する波の干渉などの検証が必要であるが、本手法は、薄膜閉空間を用いた軽量な遮音材の性能設計に関する知見となる。

参考文献

- (1) 子安勝: 遮音・吸音材料の理論と複合材料, 日本複合材料学会誌, Vol. 2, No. 4, p. 145-152, (1976)
- (2) 佐藤脩, 山口誉夫, 坪井祐真, 近藤隆, 野口好洋, 栗原育美: 薄膜閉空間構造を内包した高性能二重壁の音響透過損失, 計算力学講演会講演論文集, 259, (2018)
- (3) 見坐地一人: Biot パラメータの音響特性に対する感度解析, ニチアス技術時報, Vol. 4, No. 375, p. 1-6, (2016)
- (4) 武藤大輔, 高野靖: 二重壁内部気体の音響特性が透過損失へ及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (C 編), 74 巻, 746 号, p. 2495-2503, (2008)
- (5) 加藤大輔: 多孔質材料内伝搬音の予測モデルー Kato モデルにおける適用範囲の拡張ー, 日本音響学会誌, Vol. 64, No. 6, p. 339-347, (2008)
- (6) 山口誉夫: 多孔質材などの減衰を有する媒質内での波動伝搬, 日本音響学会誌 62 巻, 1 号, p. 62-70, (2005)
- (7) 岩瀬昭雄: 軽量 2 重壁へのグラスウール挿入効果に関する考察ーグラスウール中の屈折現象の解明とコインシデンス効果への影響についてー, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, p. 57-60, (2012)
- (8) 水野聖也, 穆瑞林, 豊田政弘, 高橋大式: 室内壁面への音響エネルギーの入射角度分布の測定, 日本建築学会近畿支部研究発表会, Vol. 51, p. 65-68, (2011)
- (9) 下河辺裕司, 山口誉夫, 佐藤脩, 近藤隆, 野口好洋, 栗原育美, 坪井祐真: 薄膜閉空間構造を内包した高性能二重壁の遮音性能解析, Dynamics and Design Conference 2019 講演論文集, 340, (2019)

■ 著 者 ■



栗原 育 美



近 藤 隆



山 口 誉 夫