

加圧下での音源解析のための音響透過壁の調査

平田真人*・立木是*・War War Min Swe***

奥村哲也**・小山敦弘**・林秀千人**

Characteristics of transparent wall with pressurized condition

by

Makoto HIRATA*, Sunao TACHIKI*, War War Min Swe***
Tetsuya OKUMURA**, Atsuhiko KOYAMA**, Hidechito HAYASHI**

The characteristics of the transparent wall is researched in pressurized condition with theoretical and experimental methods. It is cleared the influences of the wall structure and the material of film for the transmittance. Transmittance is decreased with the thick layer wall. It is influenced very large with the size of the film and the pressure. The film characteristics, the density and Young modulus, hardly vary the frequency characteristics of the transmittance, but change the vibration mode of the film and vary the transmittance. The film of low density and low Young modulus makes the large transmittance.

Key words: *Transparent wall, Pressurized condition, Transmittance, Frequency, Density, Young modulus*

1. はじめに

音響透過壁とは、フィルムにより空気の流れに壁として働き、フィルム自体が振動することで、音波は通す性質を有する壁である。その性質を利用することで、騒音低減などを目的に研究が進められてきた^{(1),(2)}。

音響透過壁を用いて、音を問題とならないところへ逃がすことで、目的の場所への音を低減する方法が提案され、OA機器の低騒音化や、天井埋め込み型換気扇に適用して、室内への放射音を低減した報告もある^{(1),(2)}。また、音の透過特性を利用して、新幹線車両の電動部の騒音源を調べる研究もなされている⁽³⁾。

一方で、音響透過壁を機械の内部から発生する騒音の音源特性の解明に用いる場合は、壁内部が加圧された状態となることがあり、音の透過特性の加圧条件による影響を明確にする必要がある⁽⁴⁾。

本研究では加圧条件下において、音響透過壁を用い

て透過した音を計測・解析して音の特性を調査することを目的として、加圧条件下における音響透過壁の透過特性に及ぼす膜構成や膜の素材の影響を実験と理論により解析した。

2. 記号

c	: 音速	[m/s]
D	: 膜直径	[m]
E	: ヤング率	[MPa]
f	: 周波数	[Hz]
h	: 膜厚み	[μm]
k	: 波数 ($k = 2\pi/\lambda$)	[1/m]
P_m	: 加圧圧力	[Pa]
p	: 音圧変動	[Pa]
R	: 変形膜の曲率半径	[m]
r	: 半径方向	[m]

平成 29 年 12 月 20 日受理

* 大学院工学研究科総合工学専攻 (Department of Advanced Engineering)

** システム科学部門 (Division of System Science)

*** Mandalay Technological University

- T : 単位長さあたりの張力 [N/m]
 t : 時間 [s]
 u : 粒子速度 [m/s]
 x : 音の伝播方向の座標 [m]
 Z_w : インピーダンス [Pa s/m³]
 λ : 音波の波長 [m]
 ω : 角周波数 [rad/s]
 ω_n : 固有角周波数 [rad/s]
 τ : 透過率 [-]
 ρ : 空気密度 [kg/m³]
 ρ_m : 面密度 [g/m²]
 δ : 膜の振動の変位 [m]
 ε : ひずみ [-]
 ν : ポアソン比 [-]
 φ : 膜変形の中心角度 [rad]

添え字

- i : 入射
 r : 反射
 t : 透過

3. 実験装置及び方法

3.1 音響透過壁

図1は音響透過壁の概略図である。音響透過壁の構造は、一般に、布と金網とフィルムからできている。この組合せが、音の透過特性に及ぼす影響を調べた。流れは通過せず音を透過させるために、気密性があり振動しやすいフィルムを使用する。さらに、形状を保持するために金網を使用する。フィルムと金網が密着しないように、フィルムと金網の間に材として目の粗い布を挟み込む。さらに、内側の流れの乱れを防ぐ目的で、布と金網を追加する場合もある。本透過壁は内圧が加わった状態の使用を想定しているため、上記の組合せでは透過壁の端では、流れがもれる懸念がある。そこで、図1のように接着剤により漏れを防いでいる。表1には、音響透過壁を構成する要素の組合せを示す。複雑な透過壁から、要素を減じてフィルムのみの場合まで、5種類の組合せについて、音響透過特性を調べた。複雑な透過壁は、内側から布、金網、布、フィルム、布、さらに一番外側に金網、の構成となっている。一方、一番単純な場合として、フィルムのみも行なった。

フィルムの素材による影響を調べるために、2種類のフィルムについて、音響透過壁の特性を調べた。PVDCはポリ塩化ビニリデンで市販のフィルムである。もう1つは著者らが作ったポリウレタン(PUR)のフィルムである。それぞれ厚みは11 μ mと12.5 μ mで、面密度が18.7 g/m²、7.5 g/m²でポリウレタンの法が半分以下の

面密度ある。これらのフィルムの機械的性質については、図2による引っ張り試験により調べた。それぞれ長さ270.5 mm、幅53.4 mmのフィルムに重りを掛けて伸びを計測し、降伏点までの弾性変形からヤング率を求めた。図3は引っ張り試験の結果を示している。市販のポリ塩化ビニリデン(PVDC)の場合が、同じ伸びに対して大きな応力を示している。弾性変形の部分について、傾きからヤング率を求めた。表2に示すように、市販のポリ塩化ビニリデンは、ポリウレタンよりヤング率が3倍ほど大きい。

3.2 音響透過率計測装置

図4に本研究で使用した実験装置を示す。実験では、音響透過壁の透過率を測定するために、スピーカーからホワイトノイズを発生させた。音は直径90 mm、長さ500 mm、厚さ10 mmのアクリル管の中を伝播して音響透

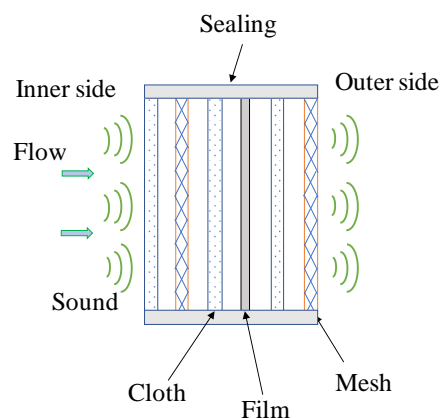


Fig.1 Schematics of transparent wall

Table 1 Structure of transparent wall

Inner side	< - >	Outer side	Symbol
[Cloth][Mesh][Cloth][FILM][Cloth][Mesh]			CMCFCM
[Cloth][FILM][Cloth][Mesh]			CFCM
[FILM][Cloth][Mesh]			FCM
[FILM][Cloth]			FC
[FILM]			F

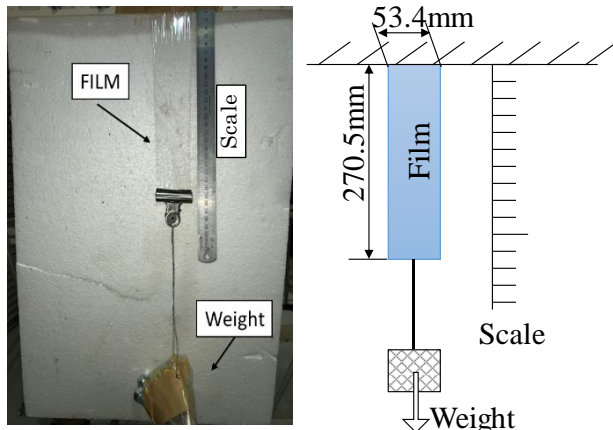
Table 2 Material of film

	PVDC*	PUR**
Thickness h	11 μ m	12.5 μ m
Area density ρ_m	18.7 g/m ²	7.5 g/m ²
Young's modulus E	390 MPa	120 MPa

* polyvinylidene chloride

** polyurethane

加圧下での音源解析のための音響透過壁の調査



(a) Photograph (b) Schematic of test
Fig.2 Tensile test

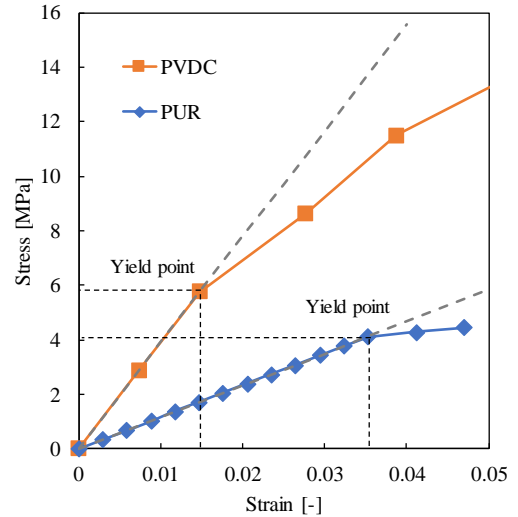


Fig3. Stress-strain diagram

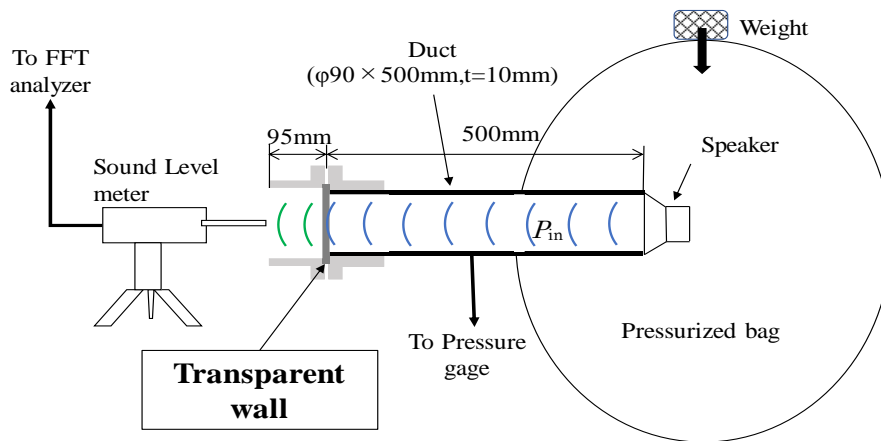


Fig. 4 Experimental apparatus of transparent wall at pressurized condition

過壁に到達し、そこで一部は反射し、一部は透過する。透過した音は、膜から95mmにある精密騒音計により計測し、その出力をFFTにて周波数解析を行なった。音響透過壁は周囲を空気が漏れないように固定されている。膜を含めて音源側を加圧する方法として、音源とアクリル管全体およびスピーカーをまとめて加圧用のバッグに密封して、バッグに重りをかけた。これにより、加圧時においても、ブローなどを使用することがないため、目的外の騒音の発生および振動を抑えることができた。圧力の調節は、この重りの質量を変更することにより設定した。

実験では加圧圧力として、大気圧状態の0 Paから、100 Pa, 200 Pa, 300 Pa, 400 Pa, 500 Paまで変化させた。透過係数の計測は、オクターブごとにまとめて解析を行なった。

4. 音響透過壁の透過率解析

4.1 音の透過特性

解析は、音響透過壁を透過する音の特性について解析を行なった。図5に概略を示す。透過壁に入射する音を平面波として、壁が入射音波の波長に比べて十分に薄く、壁での減衰や位相の変化を無視できるとする。壁では入射した音波は反射や透過を起こす。入射する音波の方向を x 方向にとると、それぞれの音圧は次式で表される。

$$\begin{aligned} p_i &= |p_i| \exp(j(\omega t - kx)) \\ p_r &= |p_r| \exp(j(\omega t + kx)) \\ p_t &= |p_t| \exp(j(\omega t - kx)) \end{aligned} \quad (1)$$

また、それぞれの音波に対する粒子速度は次式となる。

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{j}{\rho\omega} \frac{\partial p_i}{\partial x} = \frac{k}{\rho\omega} |p_i| \exp(j(\omega t - kx)) \\ u_r &= \frac{j}{\rho\omega} \frac{\partial p_r}{\partial x} = -\frac{k}{\rho\omega} |p_r| \exp(j(\omega t + kx)) \\ u_t &= \frac{j}{\rho\omega} \frac{\partial p_t}{\partial x} = \frac{k}{\rho\omega} |p_t| \exp(j(\omega t - kx)) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $|p_i|$, $|p_r|$, $|p_t|$ はそれぞれ、入射波、壁での反射波、透過波の音圧の振幅である。壁においては、音の境界条件から次の関係が成り立つ。

- (1) 壁および壁の両側で、粒子速度は連続である。
 - (2) 壁量側の圧力差により、壁の運動が定まる。
- これらの関係を式(1)、(2)を用いて表すと、
(1)より、壁 ($x=0$)では

$$u_i + u_r = u_t \Rightarrow |p_i| - |p_r| = |p_t| \quad (3)$$

また、壁の振動の変位を δ と置くと、(2)式より、壁の振動は次のようになる。

$$\begin{aligned} Z_w \cdot |\delta| \exp(j\omega t) &= (p_i + p_r) - p_t \\ \therefore Z_w \cdot |\delta| &= (|p_i| + |p_r|) - |p_t| \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、壁のインピーダンスを Z_w とする。音の透過率 τ は入射波のエネルギーに対する透過波のエネルギーで与えられるので、次式となる。

$$\tau = \frac{p_t \cdot u_t}{p_i \cdot u_i} = \left(\frac{|p_t|}{|p_i|} \right)^2 = \frac{1}{\left| 1 + \frac{Z_w}{2\rho c} \right|^2} \quad (5)$$

したがって、壁での音の透過率は、空気中の音波に対する膜の振動のインピーダンスにより決まる。また音の透過係数 Q_s は次式となる。

$$\tau = Q_s^2 \quad (6)$$

4.2 内圧による音響透過壁の変形

音響透過壁は振動する薄い膜から構成されており、この膜は内部が加圧される状況では、変形が考えられる。図5のように、内圧によって膜が膨らむ変形をする場合に、膜にかかる圧力 P_{in} と単位長さあたりの張力

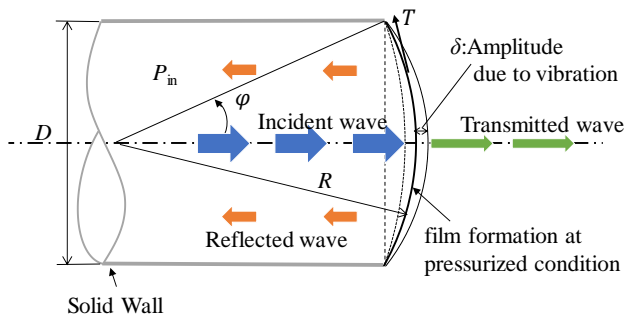


Fig. 5 Vibration model of pressurized film

T (以下張力と呼ぶ)との関係は次式の関係が成り立つ。ここで R は変形した膜の曲率半径である。膜の張力は、はじめに膜を均一に張るときに生じる初期張力 T_0 と内部の加圧により増加する張力 ΔT の和となる。

$$\frac{P_{in} R}{2} = T \quad (7)$$

$$T = \Delta T + T_0 \quad (8)$$

内部の加圧による変形の際、膜はひずみ ε を生じて、張力との関係は、膜理論により次式になる。

$$\Delta T = m \cdot \varepsilon \cdot (1 + \nu) \quad (9)$$

ただし、 $m = \frac{E \cdot h}{1 - \nu^2}$ である。また E は膜のヤング率、 h は膜の厚み、 ν は膜のポアソン比である。また、ひずみの幾何学的関係が次式で表させる。

$$D\varepsilon = 2R\varphi - D, \quad \frac{D}{2} = R \sin \varphi \quad (10)$$

ここで、 φ は膜変形の中心角である。以上の関係から、膜変形の中心角 φ は次式で得られる。

$$\begin{aligned} \varphi = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\beta + \sqrt{\frac{1}{4}\beta^2 + \frac{1}{27}\alpha^3}} \\ + \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\beta - \sqrt{\frac{1}{4}\beta^2 + \frac{1}{27}\alpha^3}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{6T_0}{m(1+\nu) - T_0}, \quad \beta = -\frac{3P_{in}D}{2\{m(1+\nu) - T_0\}}$$

ここで、

である。以上から、膜の単位長さあたりの張力 T は(12)式となる。

$$T = \frac{P_{in} D}{4 \sin \varphi} \quad (12)$$

以上から、内部が加圧された状態での膜の張力を得ることができる。

4.3 膜の振動特性

音響透過壁を薄い膜と仮定して、膜理論により膜の振動を表す。図5に加圧下における膜の振動の様子を模式的に示す。直径 D の円筒に固定された膜が、内部圧力 P により変形した状態で、圧力左から伝播してきた入力波により振動をする。この振動に伴って、左へ反射する音波と膜を通り抜ける透過音波が発生する。これらの音波の特性については4.1節の(1)、(2)の関係が成り立っている。ここでは、そのような音波による膜の振動特性を解析する。

膜には、内圧等により、引っ張られるために張力 T が発生する。この膜に対して音圧 p_w の平面波が加わると、周方向には振動の分布がないとして、膜の振動 $\delta(t, r)$ は、次式で表される。

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho_m} \left(\frac{\partial^2 \delta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \delta}{\partial r} \right) + \frac{p_w}{\rho_m} \quad (13)$$

ここで ρ_m は膜の面密度を表す。また、 p_w は膜の前後の音波の圧力変動であり、4.1 節の (2) の条件より、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} p_w &= (p_i + p_r) - p_t \\ &= \left(|p_i| + |p_r| \right) - |p_t| \exp(j\omega t) \end{aligned} \quad (14)$$

膜の振動を変数分離により求める。時間および半径の関数として、次式を与える

$$\delta(t, r) = f(t) \cdot g(r) \quad (15)$$

これを、式 (13) に代入することで、時間および半径に関する常微分方程式が得られる。

$$f'' g = \frac{T}{\rho_m} \left(fg'' + \frac{1}{r} fg' \right) + \frac{p_w}{\rho_m} \quad (16)$$

この式を解くことにより、一般解から、膜の固有周波数が得られ、 p_w による強制振動解により、膜の振動モードを得る。一般解は、以下から変数分離で得る。

$$f'' g = \frac{T}{\rho_m} \left(fg'' + \frac{1}{r} fg' \right) \quad (17)$$

$$\frac{f''}{f} \frac{\rho_m}{T} = \frac{g'' + \frac{1}{r} g'}{g} = -A^2 = \text{一定} \quad (18)$$

時間に関する解 f は次式から得られる。

$$f'' + A^2 \frac{T}{\rho_m} f = 0 \quad (19)$$

ここで、固有角周波数を $\omega_n = \sqrt{\frac{T}{\rho_m}} \cdot A$ と置いて、次の解を得る。

$$f(t) = a \cdot \exp(j\omega_n t) \quad (20)$$

一方、半径方向は、(18)式 から次式となり、ベッセルの微分方程式となる。

$$g'' + \frac{g'}{r} + A^2 g = 0 \quad (21)$$

この式の解は 0 次のベッセル関数で与えられる。

$$g(r) = J_0(A \cdot r) \quad (22)$$

従って、一般解は次式となる。

$$\delta_n(t, r) = a \cdot \exp(j\omega_n t) \cdot J_0(A \cdot r) \quad (23)$$

また固有角周波数は、式 (23) において、 $r=D/2$ の膜縁で固定の条件から式 (24) となる

$$\omega_n = \frac{u_{0m}}{D/2} \sqrt{\frac{T}{\rho_m}} \quad (24)$$

ここで u_{0m} はベッセル関数の各次数モードを表す定数で、一次、二次、三次に対して、2.408, 5.5207, 8.654 となっている。

音波による膜の強制振動の解は、(15)式による音波の特性から、変数分離法により、 $g(r)$ に関する次式の条件を得る。

$$g'' + \frac{1}{r} g' + \frac{\rho_m \omega^2}{T} g + \frac{|p_w|}{r} = 0 \quad (25)$$

ここで $h(r) = g(r) + \frac{|p_w|}{\rho_m \omega^2}$ とおくと 次式となる。

$$h'' + \frac{h'}{r} + \frac{\rho_m \omega^2}{T} h = 0 \quad (26)$$

この式は (21) 式と同等であるので、解は 0 次のベッセル関数で与えられる。

$$h(r) = J_0 \left(\sqrt{\frac{\rho_m}{T}} \omega \cdot r \right) \quad (27)$$

$$\therefore g(r) = J_0 \left(\sqrt{\frac{\rho_m}{T}} \omega \cdot r \right) - \frac{|p_w|}{\rho_m \omega^2}$$

ここで、膜の縁 $r=R$ で固定される条件より (28) 式が成り立つ。

$$\delta(t, r) = e^{j\omega t} \frac{|p_w|}{\rho_m \omega^2} \left(\frac{J_0(q' r)}{J_0\left(q' \frac{D}{2}\right)} - 1 \right) \quad (28)$$

ここで、 $q' = \sqrt{\frac{\rho_m}{T}} \omega$ である。

以上から、膜のインピーダンスは(4)式を参考にして、次の式となる。

$$Z_w = \frac{p_w}{u_w} = \frac{|p_w| e^{j\omega t}}{\frac{\partial \delta}{\partial t}} = \frac{j \rho_m \omega}{1 - J_0(q' r) / J_0\left(q' \frac{D}{2}\right)} \quad (29)$$

最大振動が $r=0$ で得られるので $J_0(0) = 1$ から

$$Z_w = \frac{j \rho_m \omega}{1 - 1 / J_0\left(q' \frac{D}{2}\right)} \quad (30)$$

また、式(5)に(30)式のインピーダンスを代入して、音響透過率を得る。

5. 結果および考察

5.1 解析結果

図6は張力の各パラメータによる影響を示している。内部圧力、膜厚み、膜直径のいずれにおいても、増加するにつれて、増加している。内部圧力(黒実線)と直径(赤実線)は、パラメータ範囲ではほぼ直線的に増加している。一方、厚み(青実線)については、厚くなるにつれて張力の増加が緩やかになる傾向にある。式(12)において、内圧、直径が陽に表れており、その影響が大きく、中心角 φ における内圧と直径の影響が大きいことを示している。厚みについては、中心角の中で α 、 β ともに m の中にあり、その影響が表れている。

図7は固有周波数の各パラメータによる影響を示している。図中の黒実線は内圧力が $0 \sim 500$ Pa 変化したときの固有周波数の変化であるが、内圧が増加するにつれて緩やかに固有周波数が増加している。また、厚みも、圧力と同様に増加傾向にある。一方、直径は、増加するとともに、固有周波数は大きく低下する傾向にある。式(24)において、張力の中に内圧と厚みの影響が表れるのに対して、直径はそのほかに直接、反比例の形で影響をしていることが、他の2つとは逆の傾向を示すものとなっている。

図8は音響透過率の周波数による変化を、各パラメ

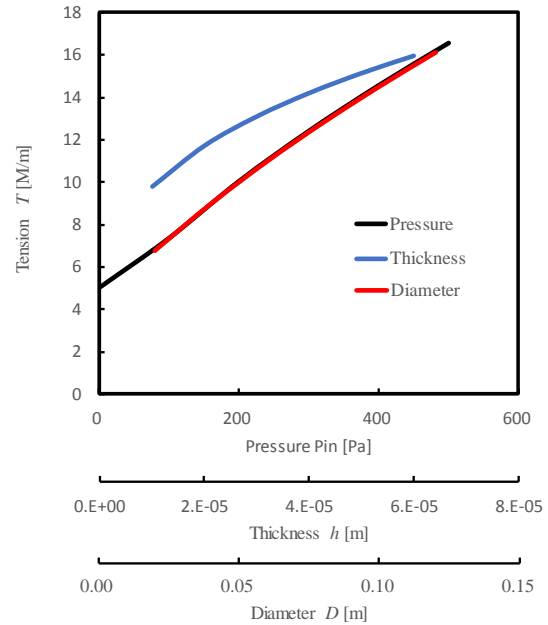


Fig. 6 variation of film tension with characteristic parameters

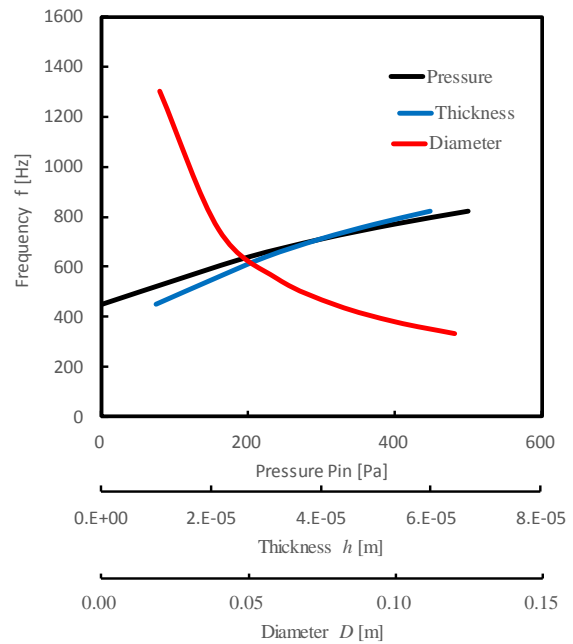


Fig. 7 Variation of natural frequency with characteristic parameters

ータに対して示している。図8(a)は内部圧力に対して示したものである。膜を直径5cmのPVDCを対象に、三次のモードの振動と仮定した。膜の特性は、いずれの内圧に対しても、低周波数で透過率が低く、周波数の増加とともに増加している。また、内圧が増加するにつれて透過率が低い周波数が、高周波数に広がる。特に、内圧が小さい場合が、圧力による音響透過率の変

化が大きい。図 8(b)はフィルム厚みによる影響を示している。フィルム厚みが増加するにつれて、わずかではあるが透過係数の低い周波数が高周波数側に移っている。ただ、図 8(a)の内圧の影響に比べて小さい。図 8(c)はヤング率による影響である。膜素材の違いが、ヤング率の違いとして現れるが、この影響もあまり大きくない。ただ、ヤング率が大きくなるにつれて、音響透過率の小さい値が若干高周波数側へ移動している。図(d)は直径による影響を示している。直径が増加するにつれて、音響透過率の周波数分布が大きく変化している様子がわかる。直径が小さくなるにつれて、音響透過率が低い周波数が高周波数に広がっており、小さい音響透過壁では、性能が著しく落ちることがわかる。

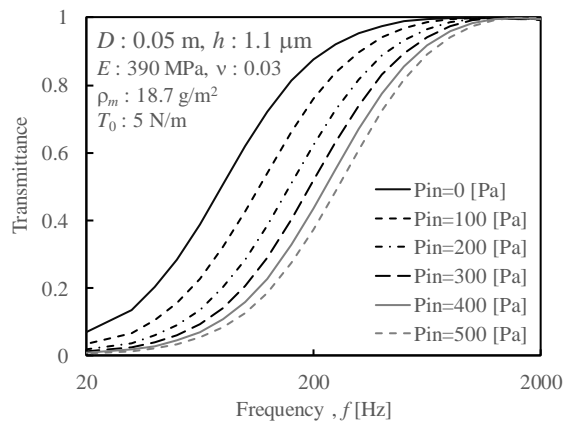
図 9 は振動モードによる透過率の影響を示している。一次や二次のモードでは、透過率が低い周波数は、低周波数領域へ大きく移動している。したがって、実際に発生する振動のモードを制御し、より低次のモードで振動が起るようにすることは重要である。

図 10 は上述の特性パラメータの変化率に対する音響

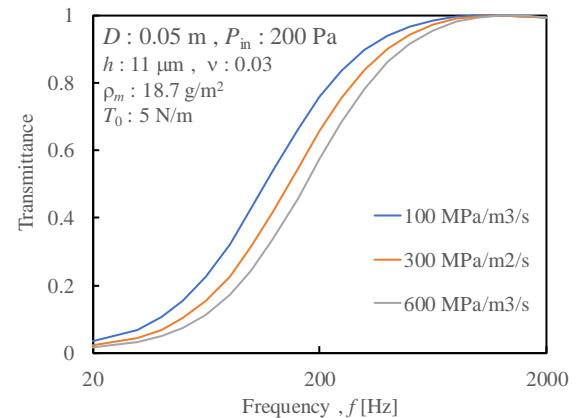
透過率の変化への影響を示したものである。200Hz において各パラメータの変化率（パラメータ変化量を平均のパラメータ値で無次元化）による透過率の変化を示す。圧力、厚み、ヤング率の順に変化率が小さくなっており、圧力の影響がほかのものに比べ、2 倍程度も影響していることがわかる。一方で、膜の直径は他のいずれの場合より非常に大きく、圧力の 2 倍以上にもなっている。以上から、音響透過壁を設計する場合は、膜の大きさに大きく左右されるとともに、内部圧力も踏まえて行なうことが重要である。

5.2 実験結果

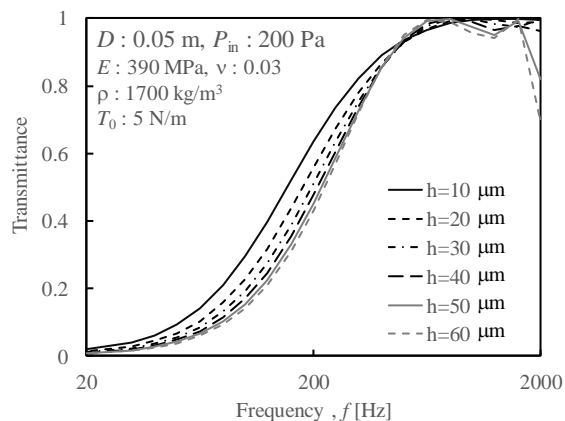
図 11 は内圧が 200Pa について、実験結果との比較をしたものである。PVDC フィルムと PUR の比較から、PUR フィルムの方が、透過率の低下が少なく、より低周波数まで高い透過率を保っていることがわかる。実験では、400Hz 付近にダクト共鳴が起っているものの、計算結果が比較的よく合っていることがわかる。上述のように、両フィルムにおいては、面密度およびヤング率が異なるものの、透過係数を大きく左右するほど



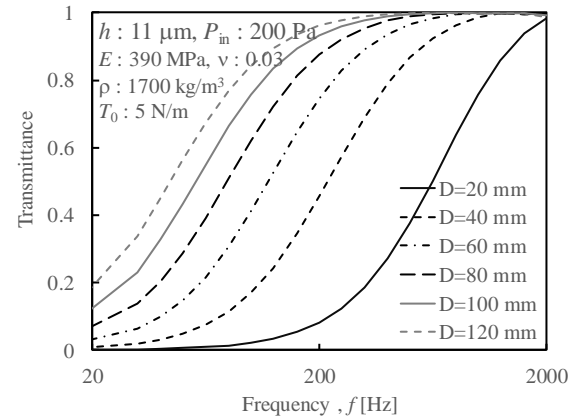
(a) Variation with inner pressure



(c) Variation with Young modulus



(b) Variation with film thickness



(d) Variation with diameter

Fig. 8 Variation of frequency characteristics of transmittance with characteristic parameters

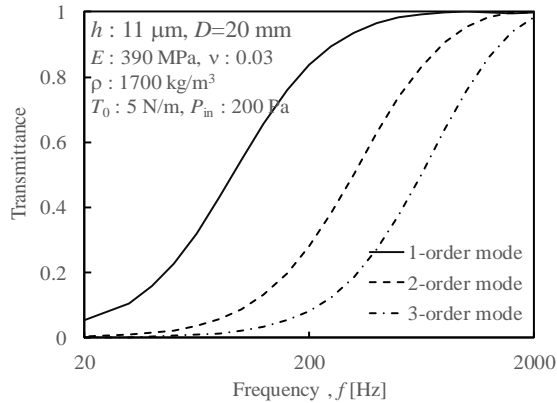


Fig. 9 Relation between transmittance and vibration mode

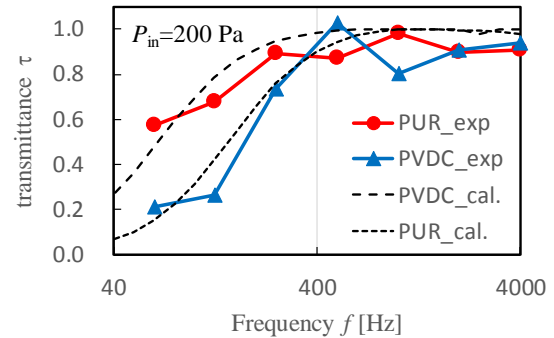


Fig. 11 Comparison of experiment with calculation

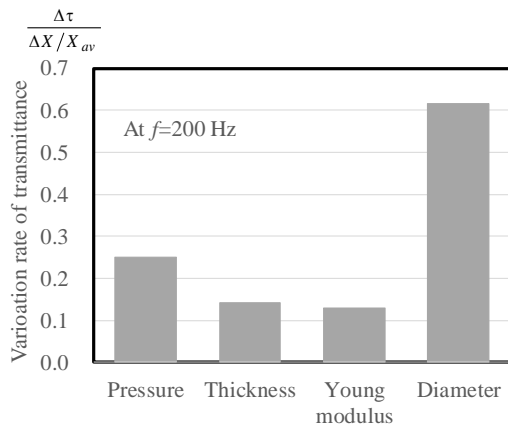


Fig. 10 Variation rate of transmittance with parameters

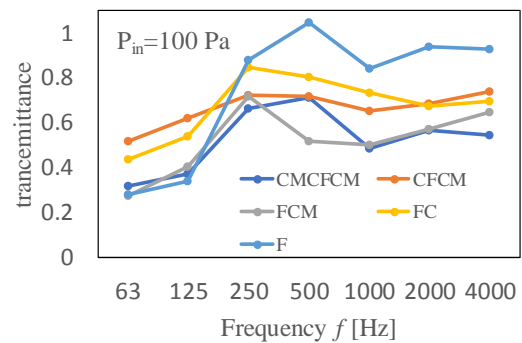


Fig. 12 Variation of transmittance with wall structure

の違いは見られない。このことから、透過率の違いは、振動モードの違いが大きいと見られる。図中の破線はそれぞれ PVDC の 5 次モードと PUR の三次モードの理論を示している。このことから、PUR フィルムは面密度が小さく、ヤング率も低いために、膜全体が低いモードで振動をしやすいことがわかる。

図 12 は、透過壁の材質の組合せによる音響透過率の違いについて、実験により調べたものである。フィルムに布や金網などが増加するにつれて、透過率が減少している。フィルムの場合のみ、非常に高い透過率を示すものの、布をつけることで低下が著しい。また、理論のとおり、低周波数での透過率の低下はいずれも見られる。

以上のことから、音響透過率を大きく保つために、膜の振動モードを踏まえた、軽量でヤング率が低い膜が適しており、それに適した膜の開発が望まれる。

6. まとめ

音源探査を行うために使用する音響透過壁について調査したところ以下の結果を得た。

1. 音響透過壁を加圧すると音の透過率は低下する。特に低周波数での音の透過率は低い。

2. 音響透過壁を膜と仮定し、音響透過壁の透過率を解析した。その結果、膜の音響透過の特性を、解析により、およそ把握することが可能となった。

3. 音響透過率に及ぼす影響としては、内圧とともに透過壁の大きさが大きく影響することがわかった。

参考文献

- 1) 松田知倫 他, 音響透過壁を用いた騒音低減に関する研究, 第19回環境工学総合シンポジウム, 31-34(2009)
- 2) 西村 ほか, 空気圧を利用した遮音量可変型計量遮音構造の開発(第1報:基礎試験), 日本機械学会論文集78-789, pp949-953(2012.5)
- 3) 西村, 後藤ほか, 高速車両車内音低減に関する研究(その1:音源探査と空力騒音模型試験), 日本機械学会講演論文集No045-1, pp150-151(2004.3)
- 4) 立木是 他, チューブラファンの騒音特性(音響透過壁による音源解析), 第70期総会講演会日本機械学会九州支部, 77-78(2017)