二重壁内部気体の音響特性が透過損失へ及ぼす影響*

武藤大輔^{*1}, 高野靖^{*1}Effect of Acoustic Characteristics of Gases on Transmission Loss
of the Double-wall StructureDaisuke MUTO^{*2} and Yasushi TAKANO^{*2} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-0034 Japan

The dependence of transmission loss (TL) of a double-wall structure on the characteristics of the gases between the walls was investigated. The relationship between acoustic impedance, acoustic velocity, and TL was calculated by using the transfer matrix method. The results indicated that characteristics of the internal gases have two effects on TL . One is a change in the double-wall effect, and the other is a change in the reflection coefficient. Gases that have slower acoustic velocities or lower acoustic impedance than air increase the double-wall effect. Gases that have faster acoustic velocities increase the reflection coefficient. The calculated results for TL with air, helium, and carbon dioxide agreed well with experimental measurements. Finally, The rating of sound insulation (Rw) defined by JIS A1419-1 (ISO-717) was introduced, and the relationship between Rw and the characteristics of the gases between walls was investigated. The results indicate that gas with a low molecular weight and large ratio of specific heat is more effective to increase the TL .

Key Words: Sound Insulation, Sound Transmission Loss, Transfer Matrix

1. 緒 論

製品の静音化には構造各部の遮音性を高めることが必要であり、それには、単層である構造を二重にし(二重壁)、更に二重壁の間に吸音材を詰める方法(吸音二重壁)が一般的である。しかしながら十分な遮音性を得るためには、吸音材の質量と設置スペースが必要となり、製品の軽量化や小型化などと競合するため、むやみに吸音材を多用することは有効ではない。また、窓などのように透光性を確保するために内部に吸音材を封入できない構造もある。

そこで、上記課題を解決する手段として、筆者らは中空二重壁内部の気体に注目し、空気以外の気体を封入することで遮音性を向上できないか検討した。

一般に、壁の遮音性は、同じ質量であれば、単層よりも二重にしたほうがよい。同じ面密度をもった単相壁と中空二重壁について、遮音性能の一般的な尺度である透過損失を比較した結果を図1に示す。図のように二重壁では内部の空気層が両側の板をつなぐバネの

役割を果たすため低周波では共振して透過損失が低下する。一方でこの共振周波数よりも高い周波数では、二重壁のほうが同じ面密度の単相壁よりも大きな透過損失を得ることができる。この現象は「二重壁効果」と呼ばれ、さまざまな製品において遮音構造の透過損失を向上させる手段として利用されている。本研究はこの中空二重壁の二重壁効果が壁間内部の気体によってどのように変化するかを解明し、遮音性を確保する上で最も効果的な気体を選定するものである。

Fig. 1 Double-wall effect (results of calculation)

* 原稿受付 2008年3月25日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所 機械研究所(〒312-0034 日立市堀口832-2)。

E-mail: daisuke.muto.fd@hitachi.com

2. 伝達マトリックス法を用いた遮音計算

2.1 二重壁の垂直入射透過損失 本研究では、遮音性能の尺度として音響工学分野で一般に用いられる透過損失を用いることとする。二重壁や気体の減衰を無視した場合、一枚の面密度が m でヤング率が E である二枚の板に、密度が ρ で音速が c である気体を厚さ d で封入した二重壁構造の垂直入射透過損失 $TL_{(\theta=0)}$ は下記のように表される。

$$TL_{(\theta=0)} = 10 \log_{10} \left\{ 1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \times \left[\cos(kd) - \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) \sin(kd) \right] \right\} \quad (1)$$

ここで ω は角周波数で、周波数を f として $\omega = 2\pi f$ 、 k は波数で、 $k = \omega/c$ である。この式は周波数が以下で示される共振周波数のときに透過損失が 0 となることを意味している。

$$f_{rm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho c^2}{md}} \quad (2)$$

この現象は、先述のように内部の気体が両側の板をつなぐバネの役割を果たす時の共振現象である。一方周波数がこの共振周波数よりも高くなると二重壁効果が現れる。したがって二重壁効果を積極的に得るためには、式(2)より ρc^2 が極力小さい気体を封入して共振周波数を低周波側に移すのが有効であることが分かる。共振周波数が低くなるのは、両面板の質量 m に対して内部気体のインピーダンス ρc を小さくすることによりバネとしての効果を柔らかくすること、音速 c を小さくすることで層の厚さ d に対する波長 $\lambda = c/f$ が小さくなることによるためであると説明できる。

一方、様々な角度で音波が入射する乱入射問題や気体の音速の変化についても考える場合には音波の屈折や全反射も考慮する必要がある。これらの現象も考慮できる透過損失算出方法として以下に示す伝達マトリックス法があり、本研究でもこれを用いることとした。

2.2 伝達マトリックス法 伝達マトリックス法は多層積層構造の透過損失計算手法として広く用いられている手法であり、有限要素法などで必要なメッシュ作成が不要で、且つ計算が速いため単純積層構造の遮音性把握には非常に有効である。

伝達マトリックス法では、図2に示すような積層構造において、音波が入射したときに、ある層 i における音波の入射側の音圧 p_i 、および気体粒子速度 v_i が、透過側(入射側の反対側)のそれら p_{i-1} と v_{i-1} の線形結合で以下のように表されると考える。

Fig.2 Example of sound transmission model using transfer matrix method

$$\begin{pmatrix} p_i \\ v_i \end{pmatrix} = T_{i,\theta_i} \begin{pmatrix} p_{i-1} \\ v_{i-1} \end{pmatrix} = \left(\prod_i T_{i,\theta_i} \right) \begin{pmatrix} p_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで i は透過側から数えた層番号、 T_{i,θ_i} は層 i を角度 θ_i で伝搬するときの伝達マトリックス、 p_0 、 v_0 は透過側終端での音圧と気体粒子速度である。

各層を伝播する音波の伝搬角度 θ は、層 i の音速を c_i として以下に示す Snell の法則に従う。

$$\sin \theta_i / c_i = \text{const.} \quad (4)$$

この式は音速の遅い気体から音速の速い気体に音波が入射するとき、入射角度が臨界角 $\theta_{c,i} = \sin^{-1}(c_i/c_{i-1})$ よりも大きな場合には全反射が発生することを示している。計算では式(4)によって各層の伝播角度を逐次計算する際に、いずれかの層において臨界角よりも大きな入射角で音波が入射する場合には全反射が起こると判定して、後述する音響透過率 τ_θ を $\tau_\theta = 0$ としている。

伝達マトリックス T_{i,θ_i} は層の構造によって異なる。気体や液体、多孔質材など吸音材料の伝達マトリックスは以下のように表される。

$$T_{i,\theta_i} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_i l_i) & W_i \sinh(\gamma_i l_i) \\ (1/W_i) \sinh(\gamma_i l_i) & \cosh(\gamma_i l_i) \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 W_i は層 i の特性音響インピーダンス、 γ_i は複素伝搬定数、 l_i は層の厚さを表す。なお、層が空気などのような気体の場合、 W_i と γ_i は気体の音速 c_i と密度 ρ_i を用いて、 $W_i = c_i \rho_i$ 、 $\gamma_i = j(2\pi f \cos \theta_i)/c_i$ と表される。ただし、 j は虚数単位、 f は周波数である。

同様に板の伝達マトリックスは以下のように表される。

$$T_{i,\theta_i} = \begin{pmatrix} 1 & Z_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 Z_i は板の機械インピーダンスであり、板の曲波のコインシデンス周波数を $f_{c,i}$ として、

$$f_{c,i} = \frac{c_{i+1}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_i l_i}{(1+j\eta_i)(E i l_i^3/12)}} \quad (7)$$

$$Z_i = \frac{2r_{x,i}}{\cos \theta_{i+1}} + j2\pi f \rho_i t_i \left(1 - \frac{f^2}{f_{c,i}^2} \sin^4 \theta_{i+1} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

と表される。ここで、 c_{i+1} は板の入射側の気体の音速、 ρ_i は板の密度、 t_i は厚さ、 E_i はヤング率、 η_i は粘性減衰率、 f は周波数を表す。 $r_{x,i}$ は音響抵抗⁽¹⁾とよばれ、表裏両面の圧力差により加振される板に働く抵抗力を決定する量で、詳細は後述する。

透過損失計算では透過側終端条件は、空気のパワーインピーダンスを Z_0 として、下記のように表される。

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1/Z_0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の条件の下で、上記の式(3)から(6)を逐次的に解くことにより、入射側の音圧 p_N と気体粒子速度 v_N が得られ、それを下記の式(10)により入射面への入射音圧 p_i と入射面から反射する反射音圧 p_r に分解する。

$$\begin{pmatrix} p_i \\ p_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1/Z_0 & -1/Z_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p_N \\ v_N \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (10)$$

これにより、任意の周波数 f における入射角 θ の単一角入射音響透過損失 τ_θ が下記のように計算される。

$$\tau_\theta = \frac{|p_0|^2}{|p_i|^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 3 Calculation model on this study

Fig. 4 Calculated TL of double-wall filled with air (without acoustic resistance)

最後に得られた τ_θ を入射角に関して半球積分することで、乱入射音圧伝達率 τ (無次元)、および乱入射透過損失 TL [dB]を下記のように得る。

$$\tau = \frac{\int \tau_\theta \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int \sin \theta \cos \theta d\theta}, \quad TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

2・3 二重壁効果と音響抵抗値

図3に本研究で用いた計算モデルを示す。計算モデルは25 mm 隔てて配置した厚さ3 mm でアクリル板の間に試験気体を封じた構造となっている。

図4に、式(8)における板の音響抵抗 $r_{x,i}$ を0とし、内部に空気を封入した場合の単一角入射透過損失を破線で、これらを式(12)により入射角に関して半球積分した乱入射透過損失を実線で示す。また、図5には同様に $r_{x,i}=0$ とした場合の空気封入アクリル中空二重壁と、これと同じ面密度を有するアクリル単層壁の乱入射透過損失の比較を示す。

図4に示すとおり、板の音響抵抗 $r_{x,i}$ を0とした場合では中空二重壁の単一角入射透過損失は入射角によって決まる周波数で必ず共振が発生して、共振周波数において透過損失が0となる。この共振周波数は入射角が0°のときに最も小さく(以降「最低共振周波数」と呼ぶ)、入射角が大きくなるにつれて共振周波数も大きくなり、入射角90°のときに共振周波数は理論上無限大となる。つまり最低共振周波数よりも高い周波数では必ず透過損失が0となる入射角が存在することとなり、そのため、図5に示すように、式(12)にて入射角について半球積分した乱入射透過損失は同じ面密度の単層壁よりも透過損失が小さくなって、実際の現象と異なる結果を導く。

音響抵抗 $r_{x,i}$ はこの問題を解決するため、London⁽¹⁾によって導入された値で、両面の圧力差により

Fig. 5 Calculated TL of single-wall and double-wall filled with air (without acoustic resistance)

面外方向に駆動される板に対して、振動速度に比例して発生する抵抗力を表現している。なお、音響抵抗の実験的同定方法は太田⁽²⁾⁽³⁾により提案されており、本研究でもこの手法に従って中空二重アクリル板の透過損失実験結果から同定した。同定したアクリル板の音響抵抗を図6に、これを用いて計算した空気封入二重壁の単一角入射、および乱入射透過損失を図7に示す。図7と音響抵抗を無視した図4を比較すると分かるように、単一角入射透過損失の共振による透過損失の低下が音響抵抗の付加により抑制され、特に入射角が大きい場合において透過損失が向上している。これによって乱入射透過損失は共振による低下が認められる200~700 Hzよりも高い帯域では周波数の増加に伴って急激に透過損失が向上する。冒頭に示した図1は音響抵抗を考慮した場合の空気封入中空二重壁と、これと同じ面密度を有するアクリル単層壁の乱入射透過損失の比較を示したものであるが、図1と図5を比較すると音響抵抗値の導入で、二重壁効果を模擬することができることがわかる。なお、図5の単層壁透過損失の6 kHzにおける低下はコインシデンス効果に

よるものである。

3. 内部気体の音速と音響インピーダンスの影響

2・1節で説明したように、垂直入射の場合の二重壁効果を促進するためには最低共振周波数を低くするのがよく、そのためには音響インピーダンスと音速を小さくするのがよい。本章では乱入射で反射・屈折を考慮した場合においても同様の知見が得られるかどうかを確認することを目的として、気体封入中空二重壁の透過損失変化について、封入した内部気体の音響インピーダンスおよび音速による影響を伝達マトリクス法を用いた計算により考察する。なお、気体の音響インピーダンスに関する指標として気体の音響インピーダンスを空気の音響インピーダンスで除した比を I 、音速に関する指標として気体の音速を空気の音速で除した音速比を M とする。

3・1 音響インピーダンス変化による影響 図8に音速は空気と同じで、音響インピーダンスのみを変化させた場合の乱入射透過損失を示す。音速が空気と同じであるため、屈折や全反射は発生せず、2・1節で

Fig. 6 Acoustic resistance for acrylic board

Fig. 7 Calculated TL of double-wall filled with air (with acoustic resistance)

(a) $I \leq 1$

(b) $I \geq 1$

Fig. 8 Calculated TL of double-wall filled with imaginary gas with acoustic impedance ratios I (random incidence with acoustic resistance)

述べた音響インピーダンス変化のみで説明できる。

図に示すとおり、音響インピーダンスを小さくすることにより、最低共振周波数が低域に移動し、空気よりもより低い周波数から二重壁効果を促進させ、高周波において高い透過損失を得ることができる。

3・2 音速変化による影響 音速が一樣でない媒質中の乱入射騒音伝播問題においては反射や屈折を考慮する必要がある。本節では音速が空気に比べて速い場合と、空気に比べて遅い場合のそれぞれについて分けて考慮する。

3・2・1 音速が遅い場合 図9に音響インピーダンスは空気と同じで、音速のみが空気に対して0.75倍 ($M=0.75$) である仮想気体を封入した場合の単一角入射透過損失(破線)と乱入射透過損失(実線)を示す。なお、図9(a)は音響抵抗を考慮した場合であるが、各単一角入射における共振周波数を分かりやすくするために音響抵抗を無視した場合の結果を図9(b)に併記する。以降共振周波数とは音響抵抗を無視した場合のものを呼ぶこととする。空気封入(図7)の場合

(a) With acoustic resistance

(b) Without acoustic resistance

Fig. 9 Calculated TL of double-wall filled with imaginary gas with acoustic velocity ratios $M=0.75$

に200~700 Hzにあった乱入射透過損失の低下帯域が、 $M=0.75$ の場合[図9(a)]では150~300 Hzとなっており、より低域に遷移し、また帯域が狭くなることがわかる。これは、二つの要因がある。

一つは、2・1節で述べたように、音速の低下によって内部気体を伝播する音波の波長が短くなるため、これにより、垂直入射時に気体厚さと波長の比で決まる最低共振周波数が低下することである。

もう一つは、空気よりも音速の遅い気体に音波が入射するときに屈折して内部気体を伝播する音の伝搬角が小さくなるために、どんなに大きな角度で入射した場合であっても内部気体中ではその伝搬角がある範囲に限定されるためである。これによって入射角の増加と共に高くなる共振周波数は、限られた帯域内に限定される。

これら、「内部気体の厚さに対する波長の比の増加による最低共振周波数の低下」と、「屈折によって伝搬角が小さくなることによる共振帯域の狭小化」の二つの効果により、音速の遅い気体を封入した中空二重壁の共振による透過損失低下周波帯域は、空気を封入した場合に比べて、その周波数範囲を狭めながらより低周波側へ移動する。結果、音速の遅い気体は空気よりもより低い周波数から二重壁効果を促進させ、高周波において高い透過損失を得ることができる。

図10に内部音速の低下による乱入射透過損失の変化を示すが、上記現象をよく表していることが分かる。

3・2・2 音速が速い場合 図11に音響インピーダンスは空気と同じで、音速のみが空気に対して1.5倍 ($M=1.5$) である仮想気体を封入した場合の単一角入射透過損失(破線)と乱入射透過損失(実線)を示す。図9同様に共振周波数を分かりやすくする為、図11(a)

Fig. 10 Calculated TL of double-wall filled with imaginary gas with acoustic velocity ratios M (random incidence with acoustic resistance)

(a) With acoustic resistance

(b) Without acoustic resistance

Fig. 11 Calculated TL of double-wall filled with imaginary gas with acoustic velocity ratios $M=1.5$

には音響抵抗を考慮した場合、図 11(b)には音響抵抗を無視した場合の結果を示す。

図 11(a)と図 7 との比較から、音速が遅い気体を封入した場合では音速が遅い気体とは逆に、乱入射透過損失の低下帯域が高域に遷移し、しかもその帯域幅が広がることが分かる。これは三つの要因がある。

一つは先ほどの音速の遅い媒質とは逆に、音速の増加によって内部気体を伝播する音波の波長が長くなり、これにより垂直入射時に気体厚さと波長の比で決まる最低共振周波数が高くなることである。

二つ目も先ほど同様に屈折の効果であるが、音速が早い気体の場合には、さらに全反射の効果も含まれる。先述のように、音速が遅い気体から音速の速い気体に音波が入射するときには、臨界角よりも大きな入射角で入射した音波は全反射するため、式(12)の乱入射透過損失は周波数によらず全体域で増加する効果がある。 $M=1.5$ の場合、空気との臨界角は 41.8° である。

一方で、全反射には副作用が発生する。先述のよう

Fig. 12 Calculated TL of double-wall filled with imaginary gas with acoustic velocity ratios M (random incidence with acoustic resistance)

に共振周波数は入射角 0° の時に最も小さく、入射角の増加と共に大きくなるが、音速が速い場合は臨界角で入射したときに理論上の共振周波数は無限大となる。つまり音速の遅い気体の場合にあった透過損失低減帯域の狭小効果が、音速が速い気体では発生せず、逆に最低共振周波数よりも高い周波数では共振帯域の拡散が発生する。

これら「気体厚さと波長の比で決まる最低共振周波数の上昇」と、「全反射」、「共振帯域の拡散」三つの効果により、音速の速い気体を封入した中空二重壁の透過損失は、低域では全反射により高い透過損失が得られるものの、高域では共振がこれを打ち消す。

図 12 は内部音速の増加による乱入射透過損失の変化を示すが、上記現象をよく表し、内部気体の音速を早くしても低周波でのみ透過損失が増加し、高周波ではあまり変化しないことがわかる。

3・3 二重壁効果と全反射効果 前節までで議論した音響インピーダンスと音速の透過損失増大効果をまとめると、下記の二つの効果に分類されることが分かる。

・二重壁効果の促進

音響インピーダンスまたは音速の小さい気体を封入することにより、共振周波数が低下して更に共振帯域が狭小化、二重壁効果をより低周波領域より発揮することで高周波において透過損失増大

・全反射効果の促進

音速の大きな気体を封入することにより、全反射を促進、低周波において透過損失増大

4. 実在気体の透過損失増大効果

前章で示した封入気体の音響インピーダンスと音速による中空二重壁の透過損失変化について、実在気体

である空気、他、比較的取り扱いが容易な二酸化炭素、ヘリウムの場合を例により、実際にも同様な効果が発現するか確認を行う。実験に先立ち、まず計算結果を算出して、それぞれが音響インピーダンスと音速のどちらに起因するものかを判定する。その後、実験結果と比較して計算結果の妥当性を検証する。

4・1 計算での音響インピーダンスと音速の効果

図13に試験気体として、空気、二酸化炭素、ヘリウムを封入した場合の中空二重壁全体の乱入射透過損失について、伝達マトリクス法により計算した結果を示す。図のように二重壁内部に二酸化炭素やヘリウムを封止することにより、空気を封入した場合に比べて明確に透過損失が増大するという計算結果が得られた。特にヘリウムでは、ほぼ全体域にわたって空気に比べて10 dB近くも透過損失が増大する効果が見込まれる。

これらの実在気体の透過損失増大効果が音響インピーダンスと音速いずれに起因するものであるかを判定するため、音響インピーダンス若しくは音速の一方のみが二酸化炭素やヘリウムと等しい仮想気体を設定して計算結果の考察を行った。表1に考察のために設定した実在気体、仮想気体の音響インピーダンスと音速を、図14に表1の諸元で計算した乱入射透過損失の計算結果を示す。図14(a)は二酸化炭素について、図14(b)はヘリウムについてまとめたものである。

図14(a)から、二酸化炭素の透過損失は、Gas Bとほぼ全帯域に渡って合致していることが分かる。Gas Bは音響インピーダンスが空気と同じで音速のみを二酸化炭素と同程度に遅くした仮想気体であるから、二酸化炭素の透過損失増大は主として二酸化炭素の音速が空気よりも遅いことに起因するものであるのがわかる。

また同様にして、ヘリウムについても考察すること

Fig. 13 Calculated TL of double-wall filled with real gases (results of calculation)

ができる。図14(b)から、ヘリウムの透過損失は低域ではGas Dとほぼ合致し、高周波ではGas C、およびGas Dの空気に対する透過損失増加量の和にほぼ等しいことが分かる。Gas Dは音響インピーダンスが空気と同じで音速のみをヘリウムと同程度まで遅くさせた仮想気体であることから低域では主として音速が大きくなった影響であり、高域では音速の増大と音響インピーダンスの低下両方の影響であると説明でき

Table 1 Density and acoustic velocity of internal gases for TL calculation

Gas	Acoustic Impedance [kg/m ² ·s]	Acoustic Velocity [m/s]
Carbon dioxide	514.8	260
Gas A	514.8	340
Gas B	416.5	260
Helium	173.1	970
Gas C	173.1	340
Gas D	416.5	970
Air	416.5	340

(a) Carbon dioxide

(b) Helium

Fig. 14 Effect of density and acoustic velocity (results of calculation)

る。これらの知見は前章の知見と合致する。

4・2 実験結果および計算との比較 前節で明らかになった二酸化炭素とヘリウムの透過損失増大効果について、図15に示す残響室無響室を用いた透過損失測定実験により検証した。残響室と無響室の間に挿入する試験体の詳細を図16に示す。試験体は図のように25 mmの間隔を隔てて配置した厚さ3 mmの二枚の亚克力板の間にアルミ風船を配置し、このアルミ風船の内部に空気、二酸化炭素、ヘリウムをそれぞれ充填した。なお、残響室・無響室の容積は共に約15 m³の直方体で、供試体の寸法は縦横共に約1 mである。

図17に実験結果と計算結果の比較を示す。残響室の大きさに起因すると考えられる音響モードの影響から500～630 Hzにおいて実験と計算の差が大きい。それぞれの気体の相対的な透過損失増大効果は、計算で得られた知見を実験で説明できる結果となっている。なお、事前に空気封入アルミ風船を詰めた場合と、単純な空気層の場合の透過損失実験結果を比較し、ほぼ同じであることを確認しており、このことから、アルミ風船の影響は小さいものと考えている。

Fig. 15 Experimental set up with coupled room used for measurement

Fig. 16 Structure of specimen

5. 最適気体の選定

5・1 重みつき透過損失 一般に透過損失は周波数依存性を持つ。そのため、遮音による騒音低減量は対象となる音源の周波数特性によって変化し、透過損失だけでその良し悪しについて議論することはできない。JIS A 1419-1(ISO-717)によって定義された重みつき透過損失 R_w は、このような困難を解決するため導入されたもので、基準となる透過損失を(100 Hz, 33 dB), (400 Hz, 51 dB), (1 250 Hz, 56 dB), (3 150, 56 dB)を順に結ぶ点で定められる周波数特性として、これを評価したい透過損失の周波数特性と比較することにより、遮音性能に関して周波数に依存しない単一数值評価量を提供するものである。詳細な算出手順は該当 JIS を参照されたい。なお、 R_w は整数で表され、その値が大きいくほど遮音性が良好であることを意味する。図13に示した、空気、二酸化炭素、ヘリウムをそれぞれ封入したときの透過損失計算結果をもとに重み

Fig. 17 Effect of internal gases between walls (comparison of measured and calculated)

Fig. 18 Relations between W , c and R_w (results of calculation)

Fig. 19 Relations between $\bar{M}$, κ and Rw (results of calculation)

つき透過損失を算出した結果、空気と二酸化炭素の場合で $Rw=29$ 、ヘリウムの場合で $Rw=41$ となった。図 18 に音響インピーダンス W と音速 c に対する重みつき透過損失 Rw の変化を示す (κ に関しては後述する)。

3.3 節で示したとおり、音響インピーダンスまたは音速が小さい場合は二重壁効果が促進されることによって、音速が大きい場合は全反射が促進されることによって、それぞれ重みつき透過損失 Rw が向上することが説明できる。

5.2 分子量・比熱比と重みつき透過損失 図 18 により、二重壁内部気体の音響パラメータが重みつき透過損失へ与える影響について体系的に把握することができる。しかし、実際の気体における音響パラメータは独立ではなく、気体の分子量と比熱比によって決まる。理想気体の場合、常温 298.15 K・大気圧 1 atm における気体の密度 ρ と音速 c は気体の平均分子量を $\bar{M}$ 、比熱比を κ として、以下のように表される。

$$\rho = \frac{\bar{M} [\text{g/mol}]}{1 \times 22.4 [\text{l/mol} \cdot \text{atm}]} = \frac{\bar{M}}{22.4} [\text{kg/m}^3] \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$c = \sqrt{\kappa R \times 298.15}, \quad R = \frac{\mathcal{R}}{\bar{M} / 1000} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで $\mathcal{R}$ は一般気体定数で、 $\mathcal{R}=8.31447 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ である。なお、熱力学で一般的に知られる Mayer の関係式から $1.0 \leq \kappa \leq 1.66$ である。上記の関係を用いて、図 18 に比熱比 κ の等値線を追記する。図のように音響インピーダンスまたは音速が小さい場合に発生する二重壁効果促進による透過損失増大領域のピークは、 $\kappa=1.0$ の線よりも左下にあることから、二重壁効果の促進による透過損失向上は、常温大気圧中の気

体においては難しいことが分かる。

図 19 に、図 18 について平均分子量 $\bar{M}$ と比熱比 κ の観点から纏め直したものを示す。図から透過損失の向上には、水素やヘリウムのように平均分子量が小さく、比熱比が大きい気体を封入して全反射効果を促進するのがよいことが分かる。

6. 結 論

二重壁内部気体の音響特性が透過損失へ及ぼす影響について検討した結果下記の結論を得た。

(1) 伝達マトリクス法を用いた計算の結果、空気よりも音速が速い気体は低周波で透過損失を増大させ、空気よりも音速が遅い気体もしくは空気よりも音響インピーダンスが小さい気体は高周波で透過損失を増大させるという結果が得られた。

(2) 残響室無響室を用いた透過損失測定実験により上記の計算結果により算出される気体封入による透過損失増大効果を確認した。

(3) 透過損失の尺度に JIS A 1419-1 で定める重みつき透過損失 Rw を導入した場合、常温大気中の気体の中では、平均分子量が小さく、比熱比が大きい気体が Rw を増大させることを明らかにした。

本研究の過程において、伝達マトリクス法のアルゴリズムや音響抵抗の取り扱い方法についてご教示いただきました群馬大学工学部機械システム工学科 山口 誉夫准教授に心より感謝を申し上げます。

文 献

- (1) London, A., Transmission of Reverberant Sound through Double Walls, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 22, No. 2 (1950), pp. 270-279.
- (2) Ohta, M. et al., *Journal of the Acoustical Society of Japan* (in Japanese), Japanese ed., Vol. 35, No. 3 (1979), pp. 118-125.
- (3) Yamaguchi, T., Numerical Simulation of Sound Insulation and Sound Absorption Properties for Automotive Multiple-Layered Sound Proof Structures, Society of Damping Technology, *Proceeding of Symposium 99* (in Japanese), SDT 99020 (1999-12), pp. 91-94.
- (4) Muto, D. and Takano, Y., Dependence of transmission loss of double-wall structures on the acoustic characteristics of gases between walls, *Proceedings of the 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, (2006-12), File No. [in06-364] (Presentation No. 421).
- (5) Muto, D. et al., Dependence of transmission loss of double-wall structure on the acoustic characteristics of gases between walls, *Proceeding of 17th JSME Symposium on Environmental Engineering*, (2007-7), pp. 42-45.