

# フェルト・オレフィンシート・フェルトの3層構造の積層防音材の 遮音性能解析

○黒沢良夫 中泉直之 高橋学 山口誉夫  
(帝京大) (アサヒゴム) (アサヒゴム) (群馬大)

Transmission Loss Analysis for Panels Laminated with Felts and Olefin Sheet

Yoshio Kurosawa Naoyuki Nakaizumi Manabu Takahashi Takao Yamaguchi  
(Teikyo Univ.) (Asahi Rubber) (Asahi Rubber) (Gunma Univ.)

自動車の高周波車内音低減のために用いられる防音材は、軽量化や高性能化のためフェルト等の吸音材にオレフィンシートを積層したタイプがある。これらはフェルトの密度やオレフィンシートの接着・非接着により大きく音響性能が異なる。本研究では、簡易的な遮音装置を用いた実験結果と伝達マトリックス法による解析結果について紹介する。

**Key words:** 多孔体, 遮音, 伝達マトリックス法, 自動車

## 1. はじめに

近年、自動車の性能として車内快適性が重視され、さらなる車内の静粛性が求められている。例えば、エンジンルームと車室を隔てているパネル（以下トーボード：図1）は、エンジン騒音を防ぐため遮音対策が厳重になされている。トーボードは鋼板を所要の形状にプレス成形して作られ、その上には、従来フェルト・ウレタン等からなる防音材（多孔体）と、樹脂シートからなる表皮（粘弾性体）が積層されていた。最近では軽量化のため、樹脂シートの代わりにフィルム（オレフィンシート：粘弾性体）を用いる事も多い。このようにトーボード周辺の防音構造は、固体（弾性体、粘弾性体）と多孔体と気体（空気）とが混合した複合防音構造で形成されている。これらの防音性能（遮音性能）を評価する指標として透過損失（音が壁を通り抜ける際の低減量[dB]）があり、最近では伝達マトリックス法を用いた数値計算で予測が可能である。伝達マトリックス法は有限要素法に比べ、単純形状（無限平板を仮定）しか計算できない短所はあるが、計算時間が非常に短く、単純形状の積層防音材の計算には適している。

本論文では、パネルにフェルトとオレフィンシートとフェルトが積層された防音構造の数値解析手法（Allardによる伝達マトリックス法）を紹介

する。本手法を用いた計算結果と、半無響室に設置された簡易的な遮音性能計測装置を用いた防音材の遮音性能の計測結果との比較について報告する。

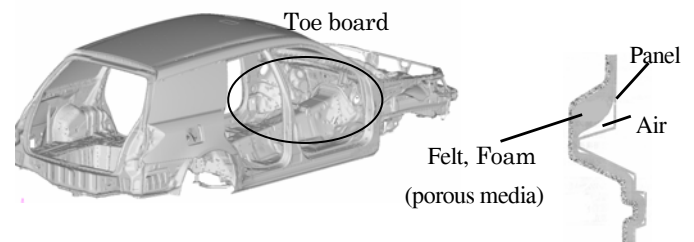


Fig.1 Toe board Insulator of automotive panel  
※Altair Hypermesh 使用

## 2. 解析手法

2.1. 多孔体や弾性体や気体のマトリックス表現  
今回の計測で用いたフェルトは多孔質弾性材料と考えられたため、空気伝搬音、固体伝搬音（縦波と横波）のそれぞれの音圧と粒子速度を考慮できる6×6マトリックスで定義した。

$$\begin{pmatrix} u_m^{sz} \\ u_m^{sx} \\ u_m \\ P_m^{sx} \\ P_m^{sz} \\ P_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{m-1}^{sz} \\ u_{m-1}^{sx} \\ u_{m-1} \\ P_{m-1}^{sx} \\ P_{m-1}^{sz} \\ P_{m-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$u_m^{sz}$  : 固体伝搬音の横波 (振動速度),  $u_m^{sx}$  : 固体伝搬音の縦波 (振動速度),  $P_m^{sx}$  : 固体伝搬音の縦波 (応力),  $P_m^{sz}$  : 固体伝搬音の横波 (応力) である. 以下に行列の成分を示す.

$$T_{11} = \frac{2N\beta^2(p_2D_1 - p_1D_2) - (p_3(C_1D_2 - C_2D_1))}{\Delta} \quad (2)$$

$$T_{12} = j\beta \frac{\alpha_2 q_1 \{\mu_2(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} - \alpha_1 q_2 \{\mu_1(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} + 2\alpha_3 q_3 \alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2)}{\alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2) (\beta^2 + \alpha_3^2)} \quad (3)$$

$$T_{13} = j\beta \frac{(\alpha_1 q_2 - \alpha_2 q_1)}{\alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2)} \quad (4)$$

$$T_{14} = \frac{\beta\omega}{\Delta} \{p_1 D_2 - p_2 D_1 - p_3 (D_2 - D_1)\} \quad (5)$$

$$T_{15} = \frac{j\omega}{N(\alpha_3^2 + \beta^2)} \left( \frac{\beta^2 q_1 (\mu_2 - \mu_3)}{\alpha_1 (\mu_2 - \mu_1)} + \frac{\beta^2 q_1 (\mu_1 - \mu_3)}{\alpha_2 (\mu_1 - \mu_2)} + \alpha_3 q_3 \right) \quad (6)$$

$$T_{16} = \frac{\beta\omega}{\Delta} (p_2 C_1 - p_1 C_2 - p_3 (C_1 - C_2) + 2N\beta^2 (p_2 - p_1)) \quad (7)$$

$$T_{21} = \frac{j\beta}{\Delta} \left( 2N(\alpha_1 q_1 D_2 - \alpha_2 q_2 D_1) - \frac{q_3}{\alpha_3} (C_1 D_2 - C_2 D_1) \right) \quad (8)$$

$$T_{22} = \frac{p_2 \{\mu_1(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} - p_1 \{\mu_2(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} + 2\beta^2 p_3 (\mu_1 - \mu_2)}{(\mu_1 - \mu_2) (\beta^2 + \alpha_3^2)} \quad (9)$$

$$T_{23} = \frac{p_1 - p_3}{\mu_1 - \mu_2} \quad (10)$$

$$T_{24} = -\frac{j\omega}{\Delta} \left( \alpha_1 q_1 D_2 - \alpha_2 q_2 D_1 + \frac{\beta^2 q_3}{\alpha_3} (D_2 - D_1) \right) \quad (11)$$

$$T_{25} = T_{14}$$

$$T_{26} = \frac{j\omega}{\Delta} \left( \alpha_1 q_1 (C_2 + 2N\beta^2) - \alpha_2 q_2 (C_1 + 2N\beta^2) - \frac{q_3 \beta^2}{\alpha_3} (C_1 - C_2) \right) \quad (12)$$

$$T_{31} = \frac{j\beta}{\Delta} \left( 2N(\alpha_1 \mu_1 q_1 D_2 - \alpha_2 \mu_2 q_2 D_1) - \frac{\mu_3 q_3}{\alpha_3} (C_1 D_2 - C_2 D_1) \right) \quad (13)$$

$$T_{32} = \frac{-\mu_1 p_1 \{\mu_2(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} + \mu_2 p_2 \{\mu_1(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} + 2\beta^2 \mu_3 p_3 (\mu_1 - \mu_2)}{(\mu_1 - \mu_2) (\alpha_3^2 + \beta^2)} \quad (14)$$

$$T_{33} = \frac{\mu_1 p_1 - \mu_2 p_2}{\mu_1 - \mu_2} \quad (15)$$

$$T_{34} = T_{26}$$

$$T_{35} = T_{16}$$

$$T_{36} = \frac{j\omega}{\Delta} \left( \mu_1 \alpha_1 q_1 (C_2 + 2N\beta^2) - \mu_2 \alpha_2 q_2 (C_1 + 2N\beta^2) - \frac{\beta^2}{\alpha_3} \mu_3 q_3 (C_1 - C_2) \right) \quad (16)$$

$$T_{41} = \frac{2N\beta}{\omega\Delta} (C_1 p_1 D_2 - C_2 p_2 D_1 - p_3 (C_1 D_2 - C_2 D_1)) \quad (17)$$

$$T_{42} = -j \frac{C_1 q_1 \alpha_2 \{\mu_2(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} - C_2 q_2 \alpha_1 \{\mu_1(\alpha_3^2 - \beta^2) + 2\beta^2 \mu_3\} - 4N\alpha_3 \beta^2 \alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2) q_3}{\alpha_1 \alpha_2 (\beta^2 + \alpha_3^2) (\mu_1 - \mu_2)} \quad (18)$$

$$T_{43} = j \frac{\alpha_2 C_1 q_1 - \alpha_1 C_2 q_2}{\omega \alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2)} \quad (19)$$

$$T_{44} = T_{22}$$

$$T_{45} = T_{12}$$

$$T_{46} = T_{32}$$

$$T_{51} = \frac{jN\beta^2}{\Delta\omega} \left( 4N\alpha_1 q_1 D_2 - 4N\alpha_2 q_2 D_1 - q_3 \frac{\alpha_3^2 - \beta^2}{\beta^2 \alpha_3} (C_1 D_2 - C_2 D_1) \right) \quad (20)$$

$$T_{52} = T_{41}$$

$$T_{53} = \frac{-2N\beta}{\omega(\mu_1 - \mu_2)} (p_1 - p_2) \quad (21)$$

$$T_{54} = T_{21}$$

$$T_{55} = T_{11}$$

$$T_{56} = T_{31}$$

$$T_{61} = T_{53}$$

$$T_{62} = T_{43}$$

$$T_{63} = \frac{j}{\omega(\mu_1 - \mu_2)} \left( \frac{q_1 D_1}{\alpha_1} - \frac{q_2 D_2}{\alpha_2} \right) \quad (22)$$

$$T_{64} = T_{23}$$

$$T_{65} = T_{13}$$

$$T_{66} = T_{33}$$

$\alpha_i = k_{i3}$ : 多孔質内の波長定数の垂直成分,

$p_i = \cos k_{i3} d$ ,  $q_i = \sin k_{i3} d$  ( $i = 1, 2, 3$ ),

$d$ : 多孔材の厚さ,

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2(P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Phi})}{2(PR - Q^2)}, \quad (23)$$

$$\delta_2^2 = \frac{\omega^2(P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} + \sqrt{\Phi})}{2(PR - Q^2)}, \quad (24)$$

$$\delta_3^2 = \frac{\omega^2(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)}{N\rho_{22}}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} C_i &= (P + Q\mu_i)(\beta^2 + \alpha_i^2) - 2N\beta^2 \\ D_i &= (R\mu_i + Q)(\beta^2 + \alpha_i^2) \quad (i=1,2), \quad \beta = k_0 \sin \theta, \\ \Delta &= D_1(2N\beta^2 + C_2) - D_2(2N\beta^2 + C_1) \end{aligned}$$

$N$  : せん断弾性率,  $P, Q, R$  : 弾性係数,  
 $\mu_i$  ( $i=1,2,3$ ) : 多孔質の骨格と空隙との音速比,

$$\Phi = \omega^2(P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12})^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2), \quad (26)$$

である.

パネルやオレフィンシートは, 応力と振動速度の縦波と横波を考慮できるよう  $4 \times 4$  マトリックスで定義した.

$$\begin{pmatrix} u_n^{sz} \\ u_n^{sx} \\ p_n^{sx} \\ p_n^{sz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{n-1}^{sz} \\ u_{n-1}^{sx} \\ p_{n-1}^{sx} \\ p_{n-1}^{sz} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$E_{11} = \frac{1}{\delta_3^2} \{2k_t^2 \cos(k_{13}d) + (k_{33}^2 - k_t^2) \cos(k_{33}d)\} \quad (28)$$

$$E_{12} = \frac{jk_t}{\delta_3^2} \left\{ \left( k_{33}^2 - \frac{k_t^2}{k_{13}} \right) \sin(k_{13}d) - 2k_{33} \sin(k_{33}d) \right\} \quad (29)$$

$$E_{13} = \frac{\omega k_t}{\mu \delta_3^2} \{ \cos(k_{13}d) - \cos(k_{33}d) \} \quad (30)$$

$$E_{14} = \frac{-j\omega}{\mu \delta_3^2} \left\{ \frac{k_t^2}{k_{13}} \sin(k_{13}d) + k_{33} \sin(k_{33}d) \right\} \quad (31)$$

$$E_{21} = \frac{jk_t}{\delta_3^2} \left\{ 2k_{13} \sin(k_{13}d) - \frac{k_{33}^2 - k_t^2}{k_{33}} \sin(k_{33}d) \right\} \quad (32)$$

$$E_{22} = \frac{1}{\delta_3^2} \{ (k_{33}^2 - k_t^2) \cos(k_{13}d) + 2k_t^2 \cos(k_{33}d) \} \quad (33)$$

$$E_{23} = \frac{-j\omega}{\mu \delta_3^2} \left\{ k_{13} \sin(k_{13}d) + \frac{k_t^2}{k_{33}} \sin(k_{33}d) \right\} \quad (34)$$

$$E_{24} = E_{13}$$

$$E_{31} = \frac{-2k_t \mu (k_{33}^2 - k_t^2)}{\omega \delta_3^2} \{ \cos(k_{13}d) - \cos(k_{33}d) \} \quad (35)$$

$$E_{32} = \frac{j\mu}{\omega \delta_3^2} \left\{ \frac{(k_{33}^2 - k_t^2)}{k_{33}} \sin(k_{13}d) + 4k_t^2 k_{33} \sin(k_{33}d) \right\}$$

$$E_{33} = E_{22}$$

$$E_{34} = E_{12}$$

$$E_{41} = \frac{j\mu}{\omega \delta_3^2} \left\{ 4k_t^2 k_{33} \sin(k_{13}d) + \frac{(k_{33}^2 - k_t^2)}{k_{33}} \sin(k_{33}d) \right\} \quad (36)$$

$$E_{42} = E_{31}$$

$$E_{43} = E_{21}$$

$$E_{44} = E_{11}$$

$$x_i = \frac{\cos(-k_{i3})}{\delta_3^2}, \quad y_i = j \frac{\sin(-k_{i3})}{k_{i3} \delta_3^2}, \quad (i=1,2) \quad c_1 = k_{33}^2 - k_t^2,$$

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2 \rho_s}{\lambda + 2\mu}, \quad \lambda = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu}, \quad \mu = \frac{E(1+j\eta)}{2(1+\nu)}$$

気体 (空気) のマトリックス表現は以下になる.

$$\begin{pmatrix} p_k \\ u_k \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_k^* l_k) & W_k^* \sinh(\gamma_k^* l_k) \\ \frac{1}{W_k^*} \sinh(\gamma_k^* l_k) & \cosh(\gamma_k^* l_k) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_{k-1} \\ u_{k-1} \end{pmatrix} \quad (37)$$

$\gamma_k^*$  : 伝搬定数  $W_k^*$  : 特性インピーダンス,  $l_k$  : 空気層の厚さ.

### 3. 実験結果と解析結果

#### 3.1. 残響箱を用いた実験結果

図 2 に, 今回の計測で用いた半無響室に設置された簡易的な遮音性能計測装置 (残響箱) を示す. 外周が 1 辺約 1000mm の立方体の箱の底面にスピーカーが設置されており, 上面に設置するベースパネル (板厚 0.8mm の鉄板) やその上に積層した防音材を音圧加振できる. ベースパネルの 500mm 上方にマイクが設置されており, 同じ音圧で加振した際の音圧レベルの差 (ベースパネルに防音材を積層した場合の音圧レベルとベースパネルのみの音圧レベルの差) により遮音性能を評価できる.

図 3 に遮音性能の計測結果を示す. 上図はベースパネルに上 (mic 側) から 20t (厚さ 20mm) 雑色 PET フェルト 800g + オレフィンシート 35g + 20t 反毛フェルト 1550g の順に積層された防音材の計測結果 (オレフィンシートとフェルトの接着の有無の比較) で, 下図がベースパネルに上から 5t 反毛フェルト (バインダー-25%) 550g + オレフィンシート 35g +

20t 反毛フェルト 1550g の順に積層された防音材の計測結果（オレフィンシートとフェルトの接着の有無の比較）である。フェルトとオレフィンシートの接着の有無により遮音性能が大きく変化していることがわかる。また、1 番上に積層したフェルトの密度の違いにより接着した際の遮音性能が大きく異なるのがわかる。これは、薄くて密度の高い（固い）フェルトの方が接着による剛性 Up の影響が大きい事を示している。

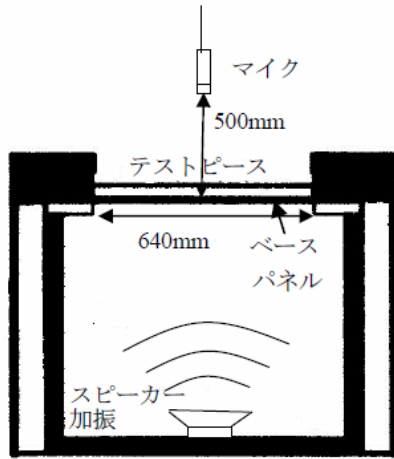


Fig.2 Experimental setup of sound insulation level

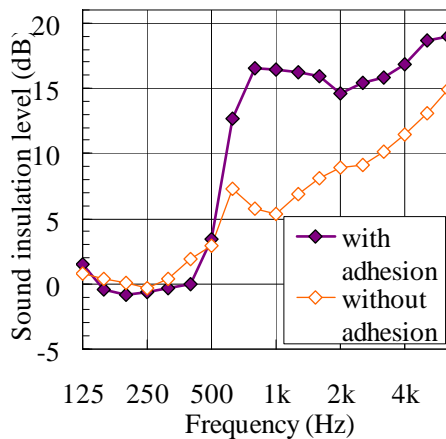
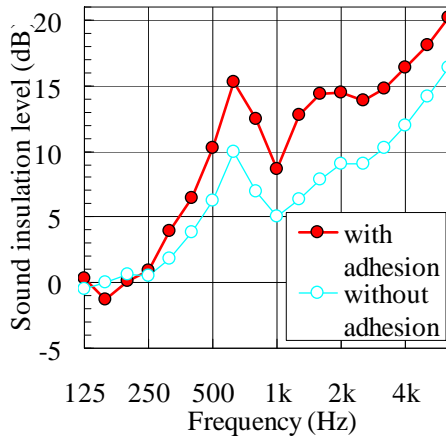
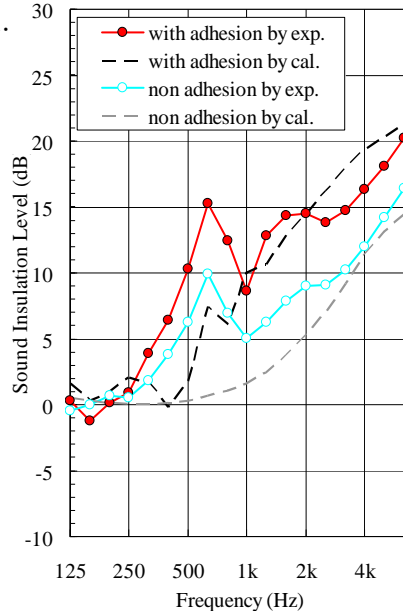


Fig.3 Experimental results of sound insulation

### 3.2. 計算結果と実験結果との比較

次に本解析手法による計算結果を紹介する。図4に、遮音性能の計測結果と計算結果の比較を示す。上図がベースパネルに上（Mic側）から20t 雑色PETフェルト800g + オレフィンシート35g + 20t 反毛フェルト1550gを積層した場合、下図がベースパネルに上から5t反毛フェルト（ハイダグ-25%）550g + オレフィンシート35g + 20t反毛フェルト1550gを積層した場合の接着の有無による計測結果と計算結果の比較である（図3と同じ比較）。計算モデルでは、接着無しの場合はオレフィンシートと上下のフェルトの間に厚さ0.1mmの空気層を設定した。計算結果は接着有無の影響の定性的な差を再現出来ており、遮音性能予測に十分な計算精度であることが確認できた。なお、昨年著者らがD&D2013で発表した論文より、多孔体の弾性を考慮しない計算モデルでは、接着の有無の影響が表現されないことは確認済みで、今回のモデル化で解析精度が向上できた。図5に5tフェルト1200g + オレフィンシート35g + 20フェルト800gを積層した場合で接着面積を変えた時の計算結果と実験結果の比較を示す。実験結果（図5上）より接着面積を半分にすると遮音性能も全面接着と接着なしの中間の値になっていることが分かる。図6に、5tフェルト550g + オレフィンシート35g + 20フェルト1550gを積層した場合と5tフェルト1200g + オレフィンシート35g + 20フェルト800gを積層した場合でオレフィンシートの両面、上面のみ接着、下面のみ接着、接着なしの計算結果の比較を示す。上図より、硬いフェルト（5tフェルト1200g）とオレフィンシートの接着の有無の影響が大きいことが分かる。このことから、オレフィンシートに硬いフェルトを接着することで遮音性能を大きく向上させることが可能であることが分かった。



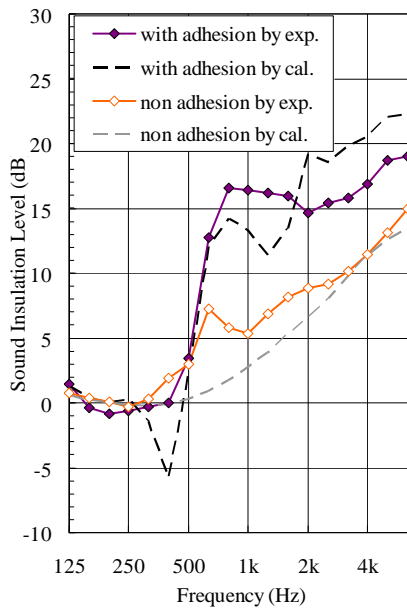


Fig.4 Comparison of experimental results and calculation

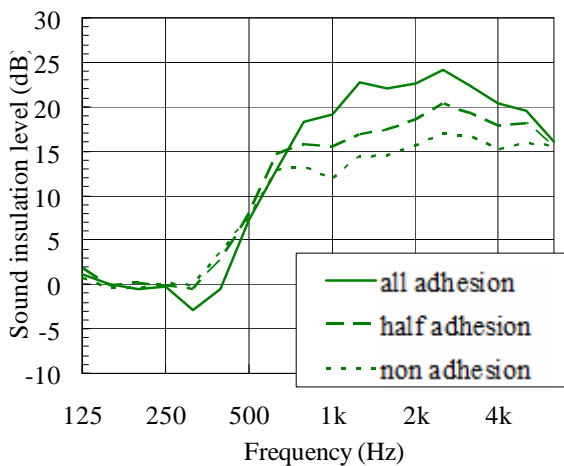
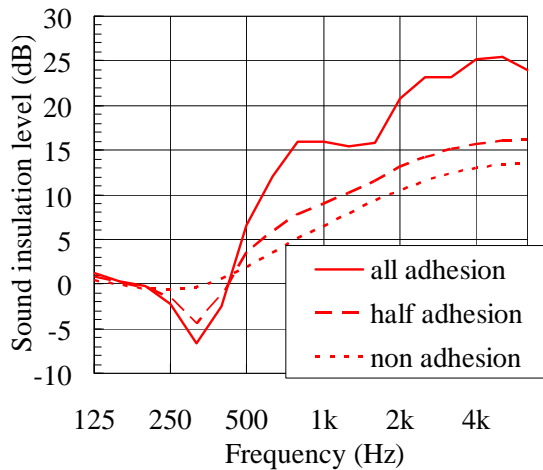


Fig.5 Comparison of calculation results and experimental

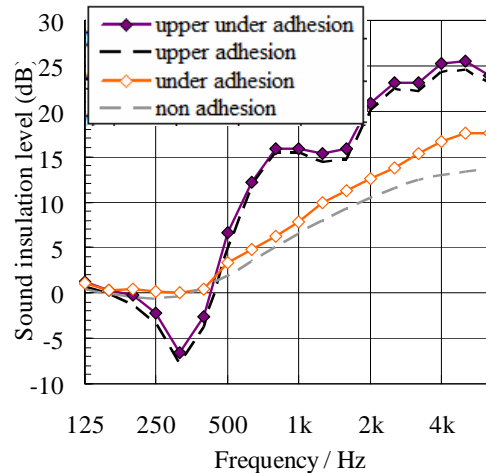
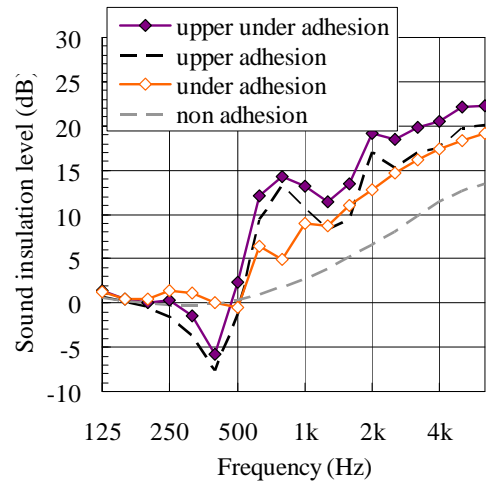


Fig.6 Calculation results of sound insulation level

#### 4. まとめ

半無響室に設置された簡易的な遮音性能計測装置（残響箱）を用いて、パネルにフェルトとオレフィンシートとフェルトが積層された自動車用防音材の遮音性能を計測した。オレフィンシートがフェルトと接着された場合と接着されていない場合で遮音性能が大きく変化することを確認した。また、フェルトの密度が大きい（フェルトが硬い）場合、オレフィンシートとの接着により遮音性能を大幅に向上できることが分かった。

Biot 理論を用いた伝達マトリックスによる計算コードを用いて、自動車用積層防音材の遮音性能を計算した。残響箱の計測結果と比較し、接着有無の影響の定性的な差を再現出来ており、十分な解析精度であることを確認した。

本手法では、実際の自動車で用いられるような複雑形状をした防音材の計算は不可能であるため、

有限要素法によるプログラム開発が今後の課題である。

#### 参 考 文 献

- (1) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T.,  
“Transfer Function Method for Measuring  
Characteristic Impedance and Propagation  
Constant of Porous Material”,  
J. Acoust. Soc. Am. Vol. 86, No. 2 (1989),  
pp. 637-643.
- (2) 山口誉夫, 自動車用防音構造の遮音吸音特  
性シミュレーション, 制振工学研究会 1999  
技術交流会, pp. 91-94.
- (3) London, A., Transmission of Reverberant  
Sound through Single Wall, Journal of  
Acoustical Society of America, Vol. 22,  
No. 270 (1950).
- (4) Allad, J. F., Atala, N., Propagation of  
Sound in Porous Media, John Wiley & Sons,  
Inc (2009).
- (5) 加藤大輔, 多孔質材料内伝搬音の予測モデ  
ル—Kato モデルにおける Biot 理論の適用  
—, 日本音響学会誌, Vol. 64, No. 10  
(2008), pp. 597-606.
- (6) 黒沢良夫, 中泉直之, 高橋学, 山口誉夫, 防  
音材を積層したパネルの振動と透過損失,  
Dynamics and Design Conference 2013, No.  
262.