

自動車部品を想定した断熱性能評価方法の検討（第5報）

4 空気層の多層化による断熱性向上の検討

筒本隆博, 長谷川浩治

Improvement of heat insulating property by multiplying of air-gap-layers

TSUTSUMOTO Takahiro and HASEGAWA Koji

To improve heat insulating property of an air layer, multi-air-layer-samples were prepared by inserting PET film(s) or Al foil(s) in the middle, thermal transmittance of the samples were evaluated, and following conclusions were obtained. Inserting of PET film(s) improves heat insulating properties, and the thermal transmittance decreased from about 3.3 W/(m²K) to fewer than 3 W/(m²K). Inserting of Al foil(s) improve heat insulating properties more than PET film(s), and the thermal transmittance decreased to under 2 W/(m²K). Heat transfer coefficient of upper and lower surface of a sample, h_{out} , h_{in} were about 10 and 15 W/(m²K) respectively, and they increased to about 16 and 20 W/(m²K) respectively with decreasing thermal transmittance. It was suggested that significant effect of Al foil on heat insulation would come from depression of heat radiation.

キーワード：自動車部品, 断熱性, 保護熱箱法, 熱貫流率

1 緒 言

次世代の自動車として電気自動車が注目され, 自動車の断熱性が以前にも増して求められるようになった。電気自動車では空調がすべて電気で行われ, 空調の負荷が高い冬場や夏場の走行効率低下が懸念されるためである。

一方, 断熱性の研究は建築の分野で進んでいる。多くの評価方法が研究され¹⁾²⁾, さまざまな断熱材や断熱評価手法の規格も開発されている。しかしそれらの規格を自動車分野へ適用するには用意する試料サイズが大きすぎるなど様々な問題があった。そこで我々は自動車部品を対象とし簡便に断熱性が評価できる手法の研究を行ってきた^{3)~6)}。その中で, 熱伝導率の低い空気層に着目して断熱性を評価し, 空気層の厚さをある一定以上大きくしても断熱性は高まらないことを示した⁷⁾。また実際に自動車ドアの断熱性評価へ適用し, 断熱性能のモデル化を試みた⁸⁾。本研究では, 断熱性をさらに向上させるため, 空気の多層構造をもつ試料を作製し, それらの断熱性評価を行った。

2 実験方法

図1に測定試料の概要を示す。空気層の厚さが10mm以上になると熱貫流率がほぼ一定の値となり断熱性は向上しない⁷⁾。そこで, 全空気層の厚さはそれ以上の10mm, 20mm, 30mmとして, 図のように空気層を透明なPETフィルム, Alホイルで仕切ることによって空気を多層化し, さらなる断熱性向上を試みた。

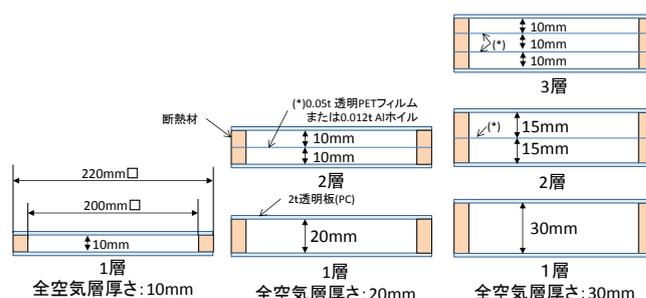


図1 断熱性を測定した試料の概要

測定に使用した小型保護熱箱装置を図2に示す。本装置は主熱箱を取り囲むように保護熱箱がある。両者を同一温度の40°Cに加熱することで, その間の壁が仮想的に断熱状態になり, 主熱箱内の総発熱量 P (ヒーターとファンの合計消費電力) がすべて試料を通り外部に排出されることになる。測定は外気温が22~23°Cの無風状態で行った。

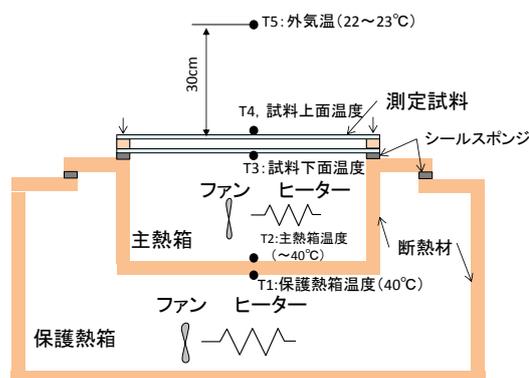


図2 断熱性評価のための小型保護熱箱装置

ここで定常状態で得られた各部の温度、 $T1 \sim T5$ と総発熱量 P 、主熱箱の開口面積 A を用い、試料の熱貫流率 U と試料の熱コンダクタンス C_S 、試料下面、上面の熱伝達係数 h_{in} 、 h_{out} 、を式(1)～(4)で求めた。

$$U = \frac{P}{A(T2 - T5)} \quad (1)$$

$$C_S = \frac{P}{A(T3 - T4)} \quad (2)$$

$$h_{in} = \frac{P}{A(T2 - T3)} \quad (3)$$

$$h_{out} = \frac{P}{A(T4 - T5)} \quad (4)$$

3 実験結果

図3に熱貫流率 U に及ぼす空気層の数 n とフィルム材質の影響を示す。 $n=1$ は挿入フィルムなし、 $n=2, 3$ は挿入フィルム数が 1, 2 枚であることを意味する。これより、空気層の数を増やすことで熱貫流率が低下し、断熱性が向上していることがわかる。また、その効果は PET フィルムよりも Al ホイルの挿入で特に顕著に現れている。

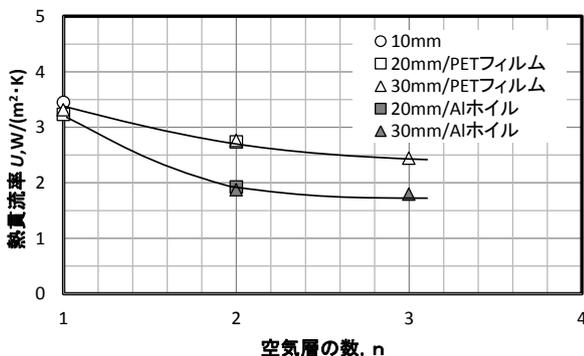


図3 熱貫流率 U に及ぼす空気層の数 n とフィルム材質の影響

図4に試料の熱コンダクタンス C_S に及ぼす空気層の数 n と挿入するフィルム材質の影響を示す。 C_S に及ぼすフィルム挿入による多層化の効果は、熱貫流率 U に与える効果よりもさらに顕著で、PET フィルムの場合 2 枚フィルムを挿入し、3 層の空気構造とすることで、 C_S は単層の場合の半分近くに低下している。さらに Al ホイルの場合は 1 枚挿入するだけで、1/3 近くまで低下している。これは低放射率で透明性がない Al ホイルが放射熱を遮断し、自身でも放射熱量を低下させたことによるものと考えられる。

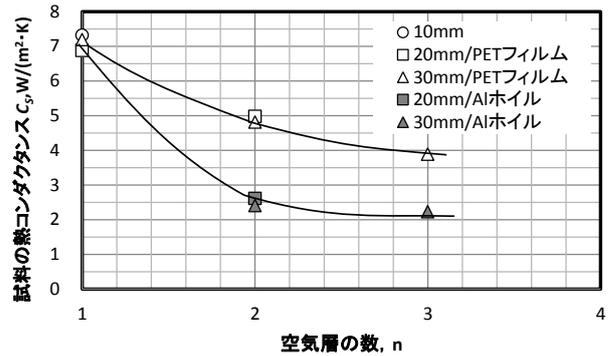


図4 試料の熱コンダクタンス C_S に及ぼす空気層の数 n とフィルム材質の影響

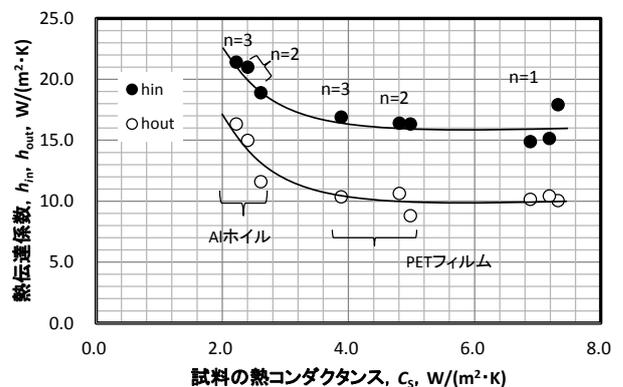


図5 熱伝達係数 h_{in} 、 h_{out} に及ぼす試料の熱コンダクタンス C_S の影響

図5に試料の下面、上面の熱伝達係数 h_{in} 、 h_{out} に及ぼす試料の熱コンダクタンス C_S の影響を示す。試料上下面の空気の状態は、試験片が変わっても変化しないので、熱伝達係数も変化しないと予想していたが、空気層内にフィルムを挿入することで C_S が低下し、 h_{in} 、 h_{out} が増加していることがわかる。 C_S の低下が少ない PET フィルムでは h_{in} が 15～17 $W/(m^2 \cdot K)$ 、 h_{out} が 10 $W/(m^2 \cdot K)$ でほぼ一定となるが、挿入フィルムが Al ホイルの場合、 C_S は大きく低下して、 h_{in} が 20 $W/(m^2 \cdot K)$ 以上に、また h_{out} が 15 $W/(m^2 \cdot K)$ 以上に増加していることがわかる。

水平二面間の密閉流体層の対流熱伝達については、無次元解析によりヌセルト数 Nu で整理されており、空気層の厚さ d 、空気の熱伝導率 λ 、試料の対流熱伝達係数 h_c 、レイリー数 Ra との関係式が与えられている⁹⁾。空気を流体とした場合、式(5)、(6)が与えられる。

$$Nu = h_c \cdot d / \lambda \quad (5)$$

$$Ra = 9.33468 \times 10^7 \cdot \Delta T \cdot d^3 \quad (6)$$

ここで $Ra < 1708$ の場合、対流が起こらず $Nu=1$ となり、 $Ra \geq 1708$ では、対流が起こり Nu は式(7)となる。

$$Nu = \left\{ \left[1 + 1.446 \left(1 - \frac{1708}{Ra} \right) \right]^{15} + \left(\frac{Ra}{4103} \right)^5 \right\}^{1/15} \quad (7)$$

ここで、式(6)の中の ΔT は試料の上下面の温度差である。今回の実験では $\Delta T = 8 \sim 14\text{K}$ であったが、空気の各層当たりの温度差 ΔT は $4 \sim 8\text{K}$ となった。そこで $\Delta T=5, 10, 20\text{K}$ として、この無次元解析による空気の対流熱伝達係数 h_c を求めると、**図6**のようになった。

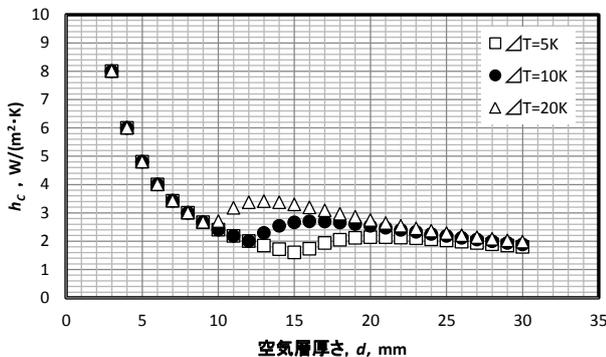


図6 無次元解析により計算した空気層の熱伝達係数 h_c 、に及ぼす空気層厚さ d の影響

図からわかるように、空気層の厚さが臨界値を超えると対流が起これ、空気層厚さが増加しても対流熱伝達係数 h_c はあまり低下していない。 $\Delta T = 20\text{K}$ とした時の臨界空気層厚さ($d = 10\text{mm}$)での対流熱伝達係数 h_c は $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ となる。

一方、放射熱による熱伝達係数 h_r は(8)式のように与えられる¹⁰⁾

$$h_r = 4\sigma E T_m^3 \quad (8)$$

ここで σ はステファン-ボルツマン定数 ($5.67032 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)、 T_m は平均放射絶対温度で、(9)式で与えられる。

$$T_m \cong \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (9)$$

また、放射係数 E は(10)式で与えられる。

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (10)$$

ここで、 ε_1 、 ε_2 はそれぞれ試料下面、上面の放射率である。今回の実験では低放射率材である Al ホイル (放射率 ~ 0.04) とその他の材質を用いたので、 ε_1 と ε_2 の両方が高放射率 (0.95) の時、どちらか片方が低放射率の時、両方が低放射率の時の組み合わせで式(10)により放射係数 E を計算すると、それぞれ $0.9, 0.04, 0.02$ を得た。これらの値を基に、放射熱伝達係数 h_r を求め、平均放射温度、 $T_m - 273$ ($^{\circ}\text{C}$) に対してプロットすると**図7**のようになった。

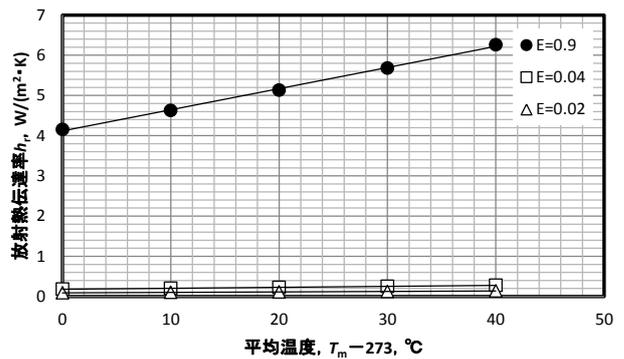


図7 放射熱伝達係数 h_r 、に及ぼす平均放射絶対温度 T_m と放射係数 E の影響

これより、放射熱伝達係数 h_r は、放射率の高い通常の材料であれば、常温で $4 \sim 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度となる。この値は臨界空気層厚さでの対流熱伝達係数、 $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と比較しても2倍ほどの大きな値である。すなわち静止空気の常温環境下では、放射伝熱が大きな役割を示すことになる。たとえば、試料に挿入したり挟んだりする材料のどれか一つが Al の研磨面の 0.04 程度の低放射率材になると、放射伝熱は抑えられ h_r は大きく低下する。そのため、空気層の試料の間に挿入する Al ホイルは1枚で十分大きな断熱効果を発揮し、平均温度が高くなるほど Al ホイルの挿入の効果は大きくなるのが期待される。

4 結 言

単層の空気層の断熱性をさらに向上させるため、透明な PET フィルム、低放射率で不透明な Al ホイルを中間に挿入することで空気の多層構造をもつ試料を作製し、その断熱性を評価、以下の結論を得た。

- (1) PET フィルムを挿入し空気層を多層化すると、 $3 \sim 3.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度あった熱貫流率は $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以下となり、挿入枚数が増えるに従い、さらに低下した。
- (2) Al ホイルを挿入し空気層を多層化すると、熱貫流率は $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以下になり、挿入枚数が増えるほどさらに低下、PET フィルムの挿入より大きな断熱効果が期待できることがわかった。
- (3) 試料の上面 (外気) と下面 (加熱箱内) の熱伝達係数、 h_{out} 、 h_{in} は空気単層の試料でそれぞれ $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度であったが、試料を多層化し断熱性を向上させることで増加し、もっとも高い断熱性を持つ Al ホイル挿入試料では h_{out} が $16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 h_{in} が $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度までになった。
- (4) Al ホイル挿入による断熱効果の要因は、放射伝熱

の抑制にあることが示唆された。

文 献

- 1) 日本規格協会 編集発行：JIS ハンドブック⑨ 建築Ⅱ 試験（2018），“JIS A 4710(建具の断熱性評価方法)”，1013-1066
- 2) 日本規格協会 編集発行：JIS ハンドブック⑨ 建築Ⅱ 試験（2018），“JIS A 1420(建築用構成材の断熱性測定方法)”，1294-1306
- 3) 羽原雄太，長谷川浩治，筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工技セ研究報告，59(2016)，17-20
- 4) 羽原雄太，長谷川浩治，筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工技セ研究報告，60(2017)，8-11
- 5) 筒本隆博，長谷川浩治，羽原雄太，西川隆敏：広島県立総合技術研究所西部工技セ研究報告，61(2018)，20-22
- 6) 長谷川浩治，羽原雄太，筒本隆博：広島県立総合技術研究所西部工技セ研究報告，61(2018)，23-26
- 7) 筒本隆博，長谷川浩治，羽原雄太：第39回日本熱物性シンポジウム講演論文集，238-240
- 8) 松村忠教，長谷川浩治，筒本隆博，杉原毅：自動車技術会2018年秋季大会（名古屋）講演要旨集，
- 9) 日本機械学会編：伝熱工学資料 改定第4版，丸善（2003），77
- 10) 日本規格協会 編集発行：JIS ハンドブック⑨ 建築Ⅱ 試験（2018），“JIS A 1420(建築用構成材の断熱性測定方法)”，1302