

自動車部品を想定した断熱性能評価方法の検討 (第 14 報)

4 構造体内部を通過する熱流方向と対流伝熱の関係

梶田洋平、長谷川浩治、内山陽介、筒本隆博

Relationship between the heat flow passing through the structure and convective heat transfer

NATSUMEDA Yohei, HASEGAWA Koji, UCHIYAMA Yosuke and TSUTSUMOTO Takahiro

Automotive parts have different directions of heat flow in each part depending on the temperature inside and outside the vehicle due to the season, as well as the installation angle of the parts. Additionally, the convection of air inside the parts may change depending on the surrounding temperature conditions, which is believed to affect the insulation performance. Therefore, in this study, we developed a heat flux measurement device that can change the direction of heat flow by adjusting the angle of the sample. Using this evaluation device, we measured the impact of the direction of heat flow on heat transfer for a structure with an air layer simulating automotive parts.

キーワード：熱伝達、熱流方向、自然対流

1 結 言

自動車産業は、従来のエンジン車から次世代自動車 (EV) への移行が進んでいる。この流れの中で、空調によるエネルギー消費が走行効率に影響を与えるため、自動車部品の断熱性能の向上は重要な課題となっている。そこで、当センターでは、断熱性能を評価するため、簡易的に材料や自動車部品を評価する方法^{1)、2)}について構築してきた。

自動車部品は、車内外温度の高低関係が季節により入れ替わることに加え、部品の取り付け角度や部品内部に存在する空気層の厚さも対流伝熱に影響を与える。

そこで本研究では、試料の取り付け角度を調整することで、試料を通過する熱流の方向を変更可能とする熱流測定装置を試作した。また、この評価装置を用いて、自動車部品を模擬した空気層のある構造体に対して、熱流の方向が内部空気層の対流伝熱に及ぼす影響を測定したので報告する。

2 実験方法

2.1 熱流測定装置の概要

試作した熱流測定装置の構成を図 1 に示す。本装置は、測定試料の上下面に温度差を設け、試料上下を通過する熱流束と温度差を測定し、熱抵抗を求める装置である。

測定試料の上下部に温度差を設けるため、異なる温度の水循環銅板で測定試料を挟み込んだ。水循環銅板の温

度を均一に保つため、温度調節器により一定の温度にコントロールされた水を銅パイプ内に循環させた。また、熱漏れを防ぐため水循環銅板の周囲を建築用断熱材 (旭化成建材 (株) ネオマフォーム) で覆った。

測定試料の上下表面に熱電対を取り付け、温度差を測定した。また、下部の水循環銅板に 4 枚のペルチェ素子を直列に繋ぎ配置することで、試料上下を通過する熱流を測定した。ペルチェ素子は、表裏間に温度差が生じると起電力を発生する性質を持つ。この特性を利用し、ペルチェ素子を熱流センサとして活用した。

図 1 に示す回転方向に熱流測定装置全体を回転させることで、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ まで任意の角度に調整可能とした。この熱流測定装置の外観を図 2 に示す。

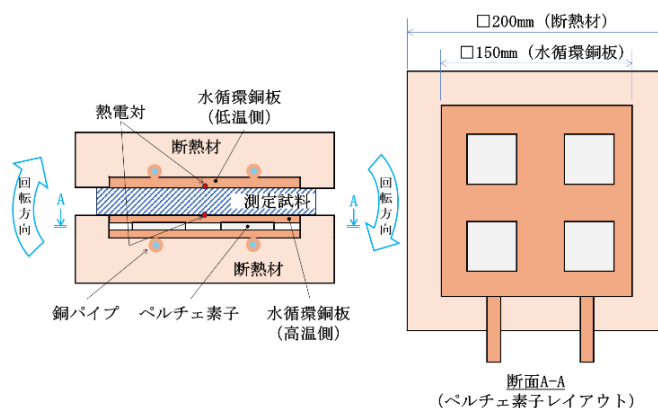


図 1 熱流測定装置の構成

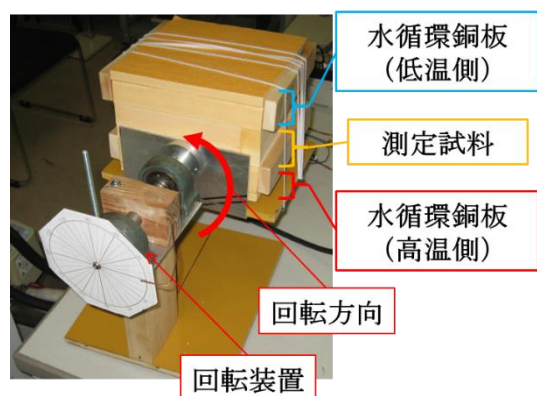


図2 角度調整可能な熱流測定装置の外観

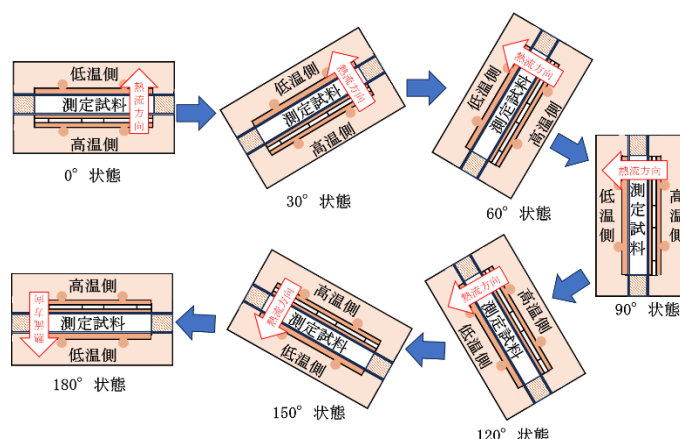


図5 回転角度に伴う熱流方向の変化

求められる。

$$h = \frac{q}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{h} \quad (2)$$

3 実験結果及び考察

試料の設置角度の変更に伴う熱抵抗値の推移を図6に示す。空気層4mmの熱抵抗値は、約 $0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ とほぼ変化がないことから、熱流方向の影響はなく空気による伝導伝熱のみであったと推測される。一方空気層30mmでは、回転角度 0° では約 $0.31 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ であったが、角度の変更に伴い熱抵抗値が上昇し、 180° では約 $0.54 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ と、 0° 状態の約 1.7 倍の熱抵抗値の上昇となった。これは、空気層30mmの 0° 状態では、下面にある高温側の水循環銅板により加熱された空気が上昇し、内部で自然対流が発生するため、空気層内の対流伝熱が促進され、熱抵抗値が低下したと考えられる。逆に 180° 状態では、上面に高温側の水循環銅板があるため、内部で自然対流が起きにくく対流伝熱が抑えられ、熱抵抗値が上昇したものと推測される。

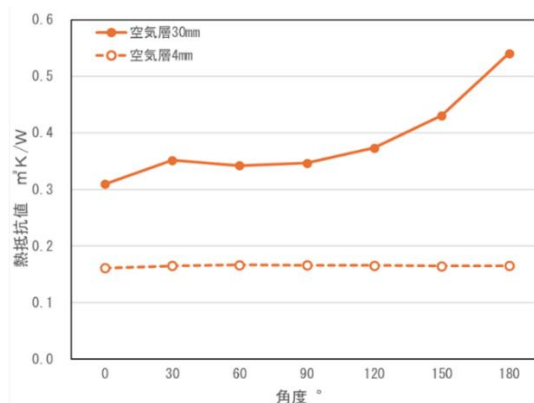


図6 試料の設置角度変更に伴う熱抵抗値の推移

2.2 実験条件

図3に測定試料の構造を、図4に測定試料の外観写真を示す。自動車部品を簡易的に模擬した構造体とするため、 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times t\text{mm}$ のアルミ板2枚の間に空気層を挟んだ構造とした。空気層の周囲は建築用断熱材で取り囲んだ。空気層のサイズは、縦 $150\text{mm} \times$ 横 150mm とし、構造体内部における自然対流の発生の有無を評価するため、厚みを4mmと30mmの2種類とした。

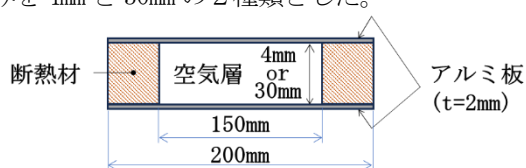


図3 測定試料の構造

試料サイズ: $200\text{mm} \times 200\text{mm}$
(空気層: $150\text{mm} \times 150\text{mm}$)

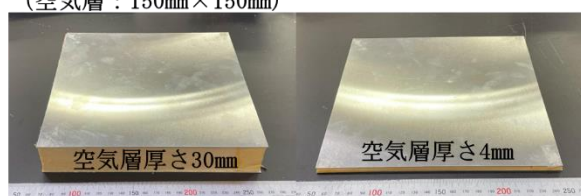


図4 測定試料

図1の高温側銅板を 40°C 、低温側銅板を 10°C とし、測定試料を挟み込んだ。また、図5に示すように初期状態を 0° とし、回転装置により 180° (反転状態) まで 30° 刻みで角度を調整することで、測定試料を通過する熱流の方向を変化させた。

測定試料の上面と下面に熱電対 (Kタイプ) を取り付け、測定試料の高温側表面温度 T_1 、低温側表面温度 T_2 を測定し、ペルチェ素子で測定試料を通過する熱流束 q を測定した。計測は1秒ごとに行い、計測開始から3,000秒以上経過した安定領域の100秒間で平均化した。計測した表面温度および熱流束から、構造体全体の熱伝達率 h および熱抵抗値 R が式(1)及び式(2)で

今回の試料構造における内部空気層の対流状態を考える。平行二面間の密閉流体層の対流熱伝達は、熱伝達に関するヌセルト数 Nu と自然対流の強さに関するレーリー数 Ra で整理できる³⁾。 Nu は熱伝達係数 h と以下の関係がある。

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad (3)$$

ここで、代表長さ l は空気層の厚さ、 λ は空気熱伝導率である。 Nu は対流伝熱と伝導伝熱の比を表す無次元数で、 $Nu=1$ ではすべて伝導伝熱、 $Nu>1$ では対流により伝熱が促進されていることを示す。試料の設置角度と測定した熱伝達率をもとに式 (3) より得られたヌセルト数との関係を図 7 に示す。空気層厚さ 4mm では、 Nu はほぼ 1 と伝導伝熱であり、空気層厚さ 30mm では、 Nu は 1 を大きく超え、対流伝熱が促進される状態であることがわかる。

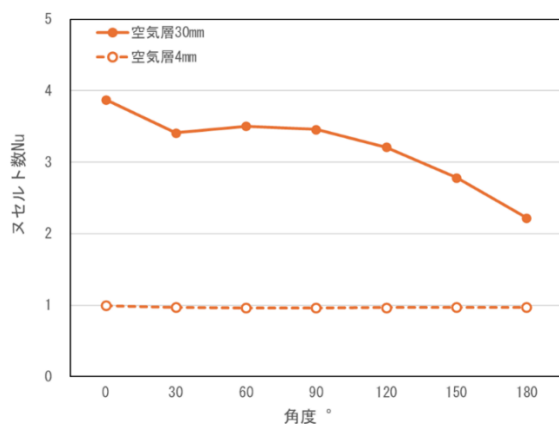


図7 ヌセルト数と試料の設置角度の関係

次に対流が発生する空気層厚さの条件を予測する。自然対流の強さに関するレーリー数 Ra は、プラントル数 Pr とグラフホフ数 Gr の積 $Ra=Pr \cdot Gr$ で定義されており、式 (4)、式 (5) の定義式がある³⁾。また、 Ra が臨界値である 1708 を越えると、対流が発生する。

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (4)$$

$$Gr = \frac{g\beta(Th - Tc)l^3}{\nu^2} \quad (5)$$

動粘性率 ν は空気 15.83mm²/s、熱拡散率 a は 300K の空気 22.07mm²/s であることから $Pr=0.717$ となる⁴⁾。 g は重力加速度 (9.8m/s²)、 β は流体の熱膨張係数で、気体の場合 0.00341 (1/K) となる。本実験では、 Th を高温側 40℃、 Tc を低温側 10℃で実施しており、代表長さ l は空気層の厚みである。以上の数値を式 (4)、式 (5) に代入すると、 $Ra=Pr \cdot Gr$ の関係からレーリー

数 Ra は、式 (6) となる。

$$Ra = 2.869l^3 \quad (6)$$

式 (6) より求めた空気層厚さとレーリー数の関係を図 8 に示す。図 8 に示すように空気層の厚さが 8.5mm 以上になると、 Ra が臨界値の 1708 を越えて対流が発生し、対流熱伝達の促進が予測される。一方、空気層の厚さが 8.5mm 以下では、対流が発生しないため、空気層 4mm では、取り付け角度に依存しない安定した断熱効果が期待できる。

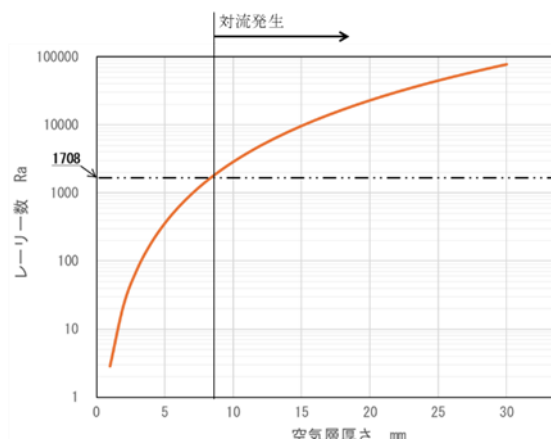


図8 空気層厚さとレーリー数の関係

4 結 言

空気層のある構造体に対して熱流の方向が熱伝達に及ぼす影響を評価するため、試料の設置角度を調整可能な熱流測定装置を製作した。その装置を用い、空気層のある構造体の熱抵抗値を測定し、以下のことが分かった。

- (1) 空気層 4mm の構造体では、熱流方向を変化させても熱抵抗値に影響はなかった。
- (2) 空気層 30mm の構造体では、内部に自然対流が起きる影響で、熱流方向を変化させると熱抵抗値に最大で約 1.7 倍の差が生じた。

これらの知見から、構造体の断熱性を向上させるためには、構造体内部の対流も考慮した設計が今後必要になると考えられる。

文 献

- 1) 長谷川他：広島県西部工技研究報告、61 (2018)、7
- 2) 長谷川他：広島県西部工技研究報告、63 (2020)、11
- 3) 日本機械学会編：伝熱工学資料 改定第 4 版、丸善 (2003)、77
- 4) 日本機械学会編：伝熱工学資料 改定第 4 版、丸善 (2003)、329