

自動車部品を想定した断熱性能評価方法の検討 (第10報)

6 強制対流下の構造体表面の熱伝達係数の推定

長谷川浩治, 筒本隆博

Estimation of surface heat transfer coefficient by forced convection

HASEGAWA Koji and TSUTSUMOTO Takahiro

In order to estimate the surface heat transfer coefficient (SHTC), the SHTC of sandwich panel was measured. Thermal transmittance decreased from 6.2 W/(m²·K) to 5.4W/(m²·K) with descending wind speed down from 2.1m/s to 0.9m/s. Thermal conductance of sandwich panel kept constant with descending wind speed down. We calculated the coefficient of the measuring system using a result of measurement. SHTC was estimated by non-dimensional analysis for forced convection model.

キーワード：熱伝達係数, 強制対流, 熱貫流率

1 緒 言

自動車部品は、太陽光及び風並びに走行による空気の強制対流のある状況下で使用される。車内温度は、部品の断熱性能や使用環境によって変化する。自動車開発においては、快適性を求められるため、部品の断熱性向上は重要な課題となっている。これまで、当センターは、材料の断熱性能である熱貫流率を評価する方法について提案^{1),2)}してきた。本研究では、昨年度試作した熱貫流率測定装置を用いて、ガラス板と樹脂板からなる構造体の熱貫流率及び熱コンダクタンス並びに構造体表面の熱伝達係数を測定した。試料表面の強制対流が変化した際の熱伝達係数への影響について調べ、この装置を用いた場合の強制対流における熱伝達係数を見積もるための装置固有の係数算出について報告する。

2 実験方法

図1に測定試料を示す。自動車を想定するとフロントガラスから車室内空間を通じて内装材の構造となり、さらにガラス面は風などの強制対流の影響を受ける。それらを想定し、測定する構造体は、200mm×200mmの大きさのガラス板と樹脂板の間に空気層を挟んだ構造とした。ガラス板の厚みは2mm、ポリプロピレン板の厚みは1mm、空気層の厚みは12mmとした。空気層の周囲は断熱材で取り囲んだ。

測定に使用した装置の概要を図2に示す。この装置は、保護熱箱法による熱貫流率測定装置を改良して、ファンの印加電圧を変えることにより材料表面の強制対流を変化させることができるようになっている。加熱箱と保護熱箱との熱の収支をゼロにすることで、加熱箱内の総発

熱量 P (ヒーターとファンの合計電力) が全て測定試料を通過し冷却箱側に流れる仕組みである。これにより総発熱量 P と各空間の温度を測定することで試料の熱貫流率を測定できる。熱箱の設定温度 (T1) は 40℃, 冷却側の温度 (T4) は 20℃とした。強制対流の風速は、0.9～2.1m/s の範囲で変更し測定した。

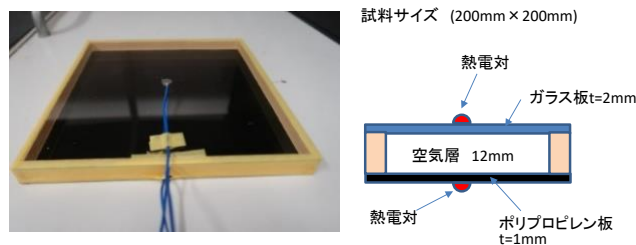


図1 構造体の測定試料

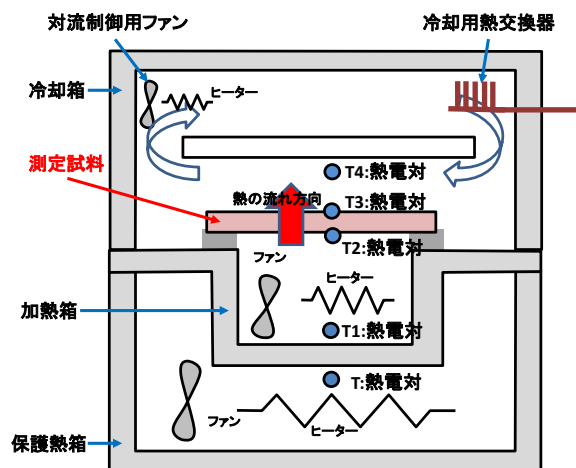


図2 保護熱箱法による熱貫流率測定装置

各空間や試料の温度が定常状態となったとき、加熱箱のヒーター及びファンの電力並びに試料表面及び空間の温度を測定することで、この試料の熱コンダクタンス C_s や、試料下面及び上面の熱伝達係数 h_{in} , h_{out} 及び熱貫流率 U を (1) ~ (4) 式で求めることができる。

$$U = \frac{P}{A(T1-T4)} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{P}{A(T2-T3)} \quad (2)$$

$$h_{in} = \frac{P}{A(T1-T2)} \quad (3)$$

$$h_{out} = \frac{P}{A(T3-T4)} \quad (4)$$

A: 試料面積 (m²)
P: 総発熱量 (W)

3 実験結果

3.1 構造体表面の強制対流の影響

強制対流制御用ファンの印加電圧を 20V, 15V, 10V に変更して試料表面の風速を下げたときの試料の熱貫流率測定結果を図3に示す。試料表面の風速は風速計を用いて目視により読み取った。風速が小さくなることで、試料表面の熱が流れにくくなり熱貫流率は小さくなった。

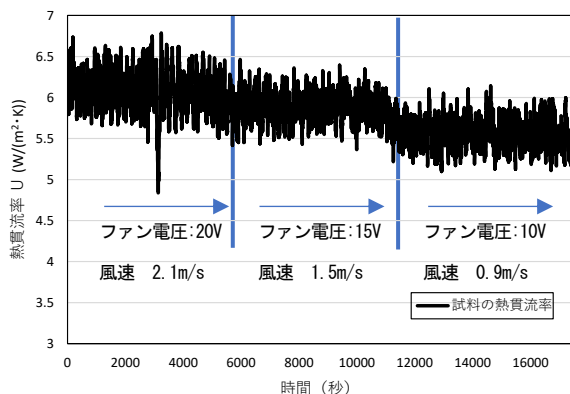


図3 強制対流の変化に対する熱貫流率Uの変化

試料の熱貫流率 U を、温度測定点間における熱抵抗で表し、その熱抵抗と熱伝達係数や熱コンダクタンスとの関係を図4に示す。

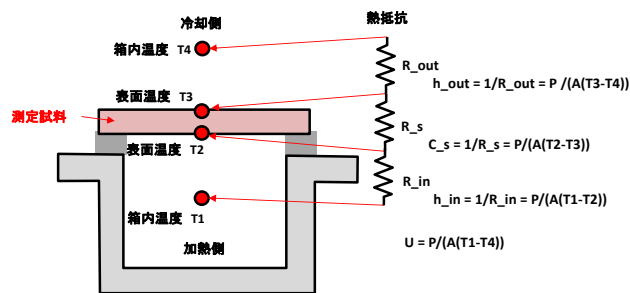


図4 熱貫流率測定における熱抵抗モデル

次に試料表面の風速を変化させたときの熱伝達係数 h_{in} , h_{out} , 熱コンダクタンス C_s を図5に示す。

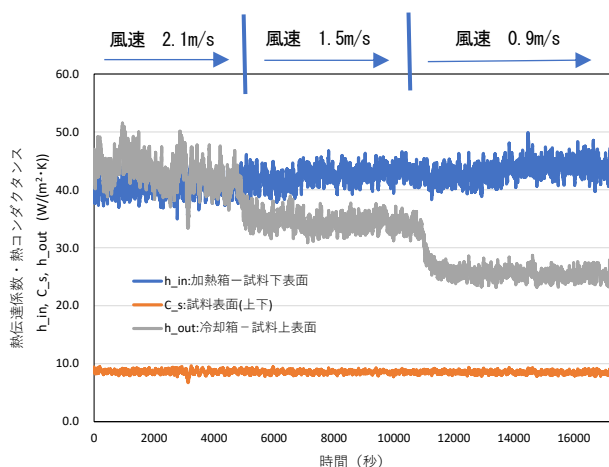


図5 強制対流の変化に対する熱伝達係数 h_{in} , h_{out} 及び熱コンダクタンス C_s の変化

風速が変化するガラス板の上面と冷却箱間の熱伝達係数 h_{out} のみが大きく変化していることが分かる。これらの風速に対する熱貫流率、熱伝達係数及び熱コンダクタンスの値について、各温度測定点の温度が安定した領域での 100 秒間の平均値を代表値として表1に示す。

表1 構造体の温度測定点間の熱的特性

風速 (m/s)	U (W/(m ² ·K))	h_{in} (W/(m ² ·K))	C_s (W/(m ² ·K))	h_{out} (W/(m ² ·K))
0.9	5.4	43.6	8.3	24.6
1.5	5.8	41.9	8.4	34.2
2.1	6.2	41.1	8.8	42.1

冷却箱の熱伝達係数 h_{out} は、試料表面の風速を 0.9m/s から 2.1m/s に変化させると 24.6 W/(m²·K) から 42.1W/(m²·K) に大きくなるが、構造体自体の熱コンダクタンス C_s , 試料表面と加熱箱間の熱伝達係数 h_{in} は、あまり変化しない結果となった。

3.2 強制対流による熱伝達係数の算出

本装置において、風速の変化による試料表面の熱伝達係数 h_e を推定する。空気の流れが層流か乱流かで熱伝達係数は変わるため、レイノルズ数により流れの状態を判断した。冷却箱の空気を循環させる流路を矩形の管と想定した場合、その流速 u とレイノルズ数 Re の関係は、

(5) 式で表される。ここで、空気の密度 ρ は 1.176 kg/m^3 、冷却箱の流路の断面積 S は 0.042m^2 、粘性係数 η は $18.62 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、ぬれぶちの長さ L を 1.34m とすると (5) 式 (2行目) となる。

$$Re = \frac{4 \rho u S}{\eta L} = 7920 \times u \quad (5)$$

今回の実験では、冷却箱内の風速は、 $0.9 \text{ m/s} \sim 2.1\text{m/s}$ であることからレイノルズ数 Re は、 $7100 \sim 16000$ 程度となる。この管形状では、レイノルズ数 Re が $2700 \sim 3000$ 以上で乱流領域³⁾になる。

平板に沿う乱流熱伝達としてプラントル数 Pr が $0.5 \sim 5$ の流体に対して、ヌセルト数 Nu とプラントル数とレイノルズ数 Re の関係を示した Johnson-Rubensin の式 (6)³⁾ より、風速に対する局所ヌセルト数 Nu を求めた。この局所ヌセルト数と空気の熱伝導率 λ (300K 時の $0.02614\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 及び試料の代表長さ d (試料の中心位置までの長さ: 0.1m) から熱伝達係数 h_e を求める式を、装置係数 A を含む (7) 式のような関係式として定義した。

$$Nu = 0.0296 \times Pr^{\frac{2}{3}} \times Re^{\frac{4}{5}} = 29.6 \times u^{\frac{4}{5}} \quad (6)$$

(Pr は 300K 時の 0.717 を用いた)

$$h_e = \frac{A \times Nu \times \lambda}{d} = 7.75 \times A \times u^{\frac{4}{5}} \quad (7)$$

装置係数 A を 3.1 として、 h_e の実測値と (7) 式による計算値を **図6** に示す。これにより、風速が変化するときの本装置の冷却箱側の試料表面の熱伝達係数を見積もることができる。

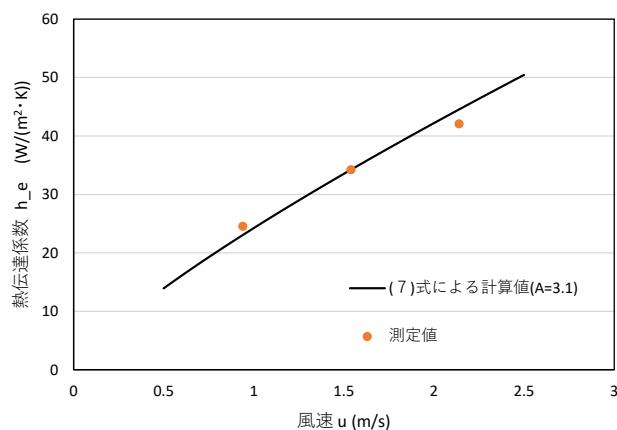


図6 試料表面の熱伝達係数の測定値と計算値

4 結 言

昨年度試作した熱貫流率測定装置を用いて、構造体の試料表面に当たる強制対流の風速を変化させて試料の熱貫流率、熱伝達係数及び熱コンダクタンスを測定した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 熱貫流率は、試料表面の強制対流による風速の上昇に伴い増加した。
- (2) 熱箱と試料下面の熱伝達係数、及び、試料表面間の熱コンダクタンスは、試料上面の風速にあまり影響を受けなかった。
- (3) ファンの風速変化に伴う、冷却箱側の試料表面の熱伝達係数は、装置係数を導入することにより推定できることがわかった。

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) 社団法人日本機械学会：伝熱工学資料 改定第4版