

自動車部品を想定した断熱性能評価方法の検討 (第7報) 10 冷却法による表面熱伝達係数の推定

筒本隆博, 長谷川浩治

Estimation of surface heat transfer coefficient by cooling of heated copper plate

TSUTSUMOTO Takahiro and HASEGAWA Koji

In order to estimate the surface heat transfer coefficient (SHTC), heated sample of polished copper plates were cooled in air or in water, the cooling curves were analyzed to estimate the SHTC, and the effects of wind and surface condition on the SHTC were studied. SHTC of cooling in water are about 1400 ~ 1800 W/(m² · K) at higher temperature and decrease to 200 ~ 400 W/(m² · K) with descending the temperature. SHTC of cooling in air are about 5 ~ 10 W/(m² · K) under no wind and increase up to 42 W/(m² · K) with rising wind speed up to 3.5 m/s. Black-body painting of polished sample rise SHTC 3 ~ 4 W/(m² · K).

キーワード: 自動車部品, 断熱性, 表面, 熱伝達係数, 風, 放射率

1 結 言

我々は自動車部品を想定し様々な評価方法を検討してきた^{1)~8)}。その中で、断熱性の指標となる熱貫流率は、風の影響を強く受け、表面の熱伝達係数が測定において重要であることがわかった⁴⁾。また、銅の蓄熱板を試料で挟み込みオープンで加熱後、大気中で自然に冷却し、その冷却曲線から試料の断熱性を比較する方法を提案した¹⁾。本報告ではこの方法を使い、銅板単体の冷却曲線から表面の熱伝達係数を解析する方法を検討した。冷却は水冷、空冷で行い、空冷の場合、風量を変え、その影響を調べた。また、無風の空冷では表面に黒体スプレーを塗布する影響も考察した。

2 実験方法

図1に熱伝達係数を求めるため試験手順の概要を示す。

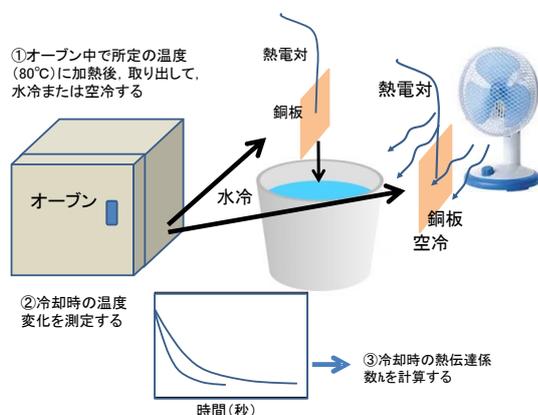


図1 冷却時の熱伝達係数を求めるための試験手順

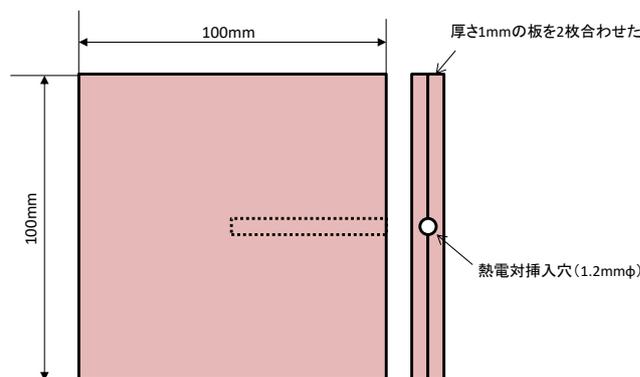


図2 水冷実験に用いた銅板の形状

水冷試料の銅板は、図2のように厚さ1mmの銅板2枚を貼り合わせ、その中心部の穴に熱電対を差し込んで、温度変化を測定した。試料をこのような貼り合わせの構造にしたのは、①銅板に細い深穴を加工することが難しいというだけでなく、②試料の両側の表面が均等に冷却される場合、中心部は断熱状態となり、たとえ2枚の銅板の間に隙間があったとしても、厚さ2mmの一枚の銅板の中心部の温度と同じ測定結果になると考えたからである。空冷の場合、一辺が100mmの正方形で厚さ1mm銅板一枚の中心部にK熱電対の接点をアルミテープで貼り付けた試料で温度測定を行った。

3 解析方法

試料の体積を V (m³)、表面積を A (m²)、熱容量を C_v (J/m³ · K)、銅板温度を T (°C)、空気(外気)あるいは水の温度を T_r (°C)、平均熱伝達係数を h (W/(m² · K)) とする。試料の銅は熱伝導率が高いので、試料内の

温度はほぼ均一であると仮定し、試料表面から逃げる熱量は試料の温度変化 (dT/dt) から与えられ、それが雰囲気温度 T_r と試料温度 T の差に比例すると置くと次式が得られる。

$$-Cv \cdot V \left(\frac{dT}{dt} \right) = h \cdot A \cdot (T - T_r) \quad (1)$$

この式を変形すると次式のように熱伝達係数 h を試料温度 T の関数として求める式が得られる。

$$h(T) = - \frac{Cv \cdot V}{A} \cdot \left(\frac{dT}{dt} \right) \cdot \frac{1}{(T - T_r)} \quad (2)$$

この計算で使用する (dT/dt), T の値は、**図3**のように、ある温度ステップを通過する直前の温度 T と時間 t の値でサンプリングした (T_i, t_i) から以下の式で求めた。

$$\left(\frac{dT}{dt} \right) = \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

$$T = \frac{T_{i+1} + T_i}{2} \quad (4)$$

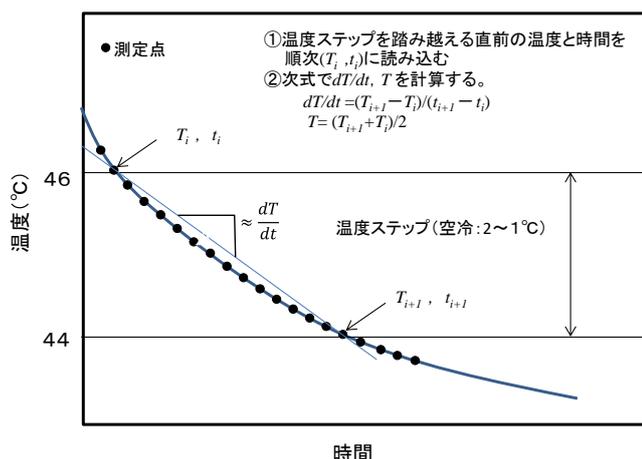


図3 熱伝達係数 h を求めるために、測定点から ($dT/dt, T$) を決定する方法

また、式(2)の右辺の $Cv \cdot V/A$ は、試料由来の値で、純銅の比熱と比重の値⁹⁾を用いて**表1**のように決めた。

表1 水冷, 空冷各試料の $Cv \cdot V/A$ の値

| | 表面積 A m^2 | 体積 V m^3 | 熱容量 Cv^* $J/(m^3 \cdot K)$ | $Cv \cdot V/A$ $J/(m^2 \cdot K)$ |
|------|------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 水冷試料 | 0.0208 | 2×10^{-5} | 3.4496×10^6 | 3317 |
| 空冷試料 | 0.0204 | 1×10^{-5} | 3.4496×10^6 | 1691 |

* 銅の比熱 C : 385 J/(kg·K), 密度 ρ : 8.96 g/cm³(=8969 kg/m³)の値⁹⁾を用い、 $Cv = C \cdot \rho$ で計算した

さらに、無風状態の空冷測定では、試料の表面を銅板のまま(普通光沢面では放射率 ϵ : 0.072)¹⁰⁾、黒体スプレー(放射率 ϵ : 0.94)を塗布したもので測定を行い、

表面放射率の影響を調べた。

4 実験結果

4.1 水冷実験の結果

図4に水冷実験での試料の温度変化を示す。比較のために空冷時の温度変化も示した。空冷に比べ、水冷はかなり試料の冷却速度が早いことがわかる。このデータから熱伝達係数 h を求め、試料温度に対してプロットすると**図5**が得られる。

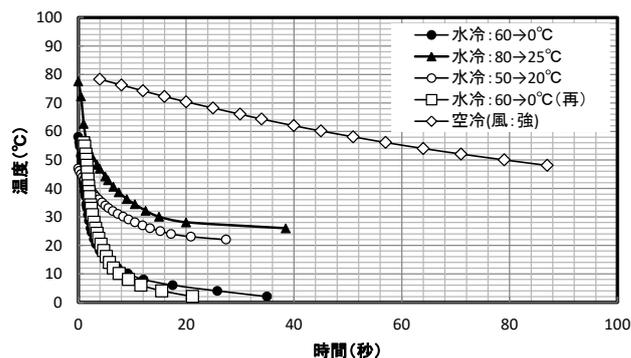


図4 水冷時の冷却板の温度変化

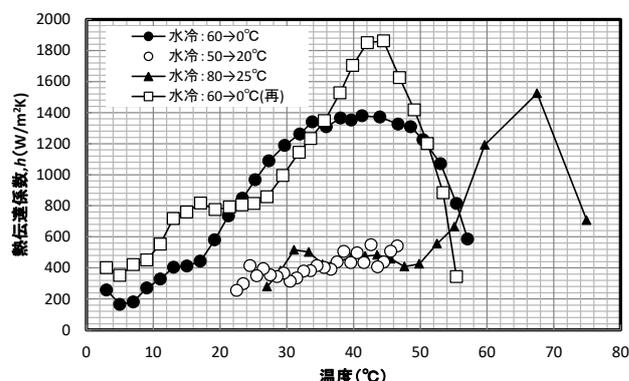


図5 水冷時の熱伝達係数に及ぼす試料温度の影響

これより水冷時の熱伝達係数の値は最高 1800 から 200 W/(m²·K)まで変化し、冷却水と試料の温度差が大きいほど大きい。また、冷却初期の試料温度が高い領域で大きく、水温に近づくにつれて低下することがわかる。水温を常温から氷温に下げることにより、冷却能力が大きく向上することもわかる。

4.2 空冷実験の結果

80°Cに熱した銅板を無風状態の大気中で冷却したときの温度変化を**図6**に示す。ここで、銅板表面は、銅の普通光沢面(銅)及び黒体スプレー(黒体SP)を塗布した面の2種類とした。

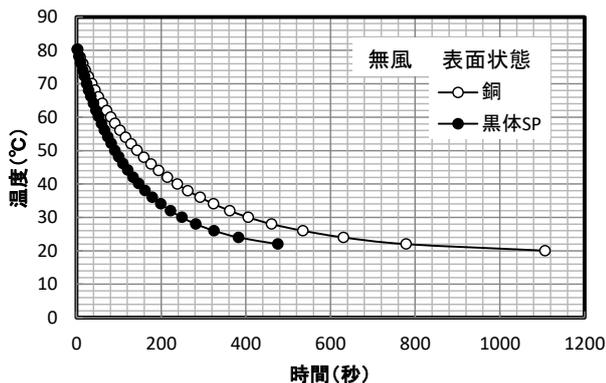


図6 無風空冷時の温度変化に及ぼす表面状態の影響

これより、明らかに黒体スプレーを塗布した試料のほうが早く冷却されていることがわかる。この時の冷却曲線を前述した方法により解析し、熱伝達係数として求め、試料温度に対してプロットすると図7のようになる。

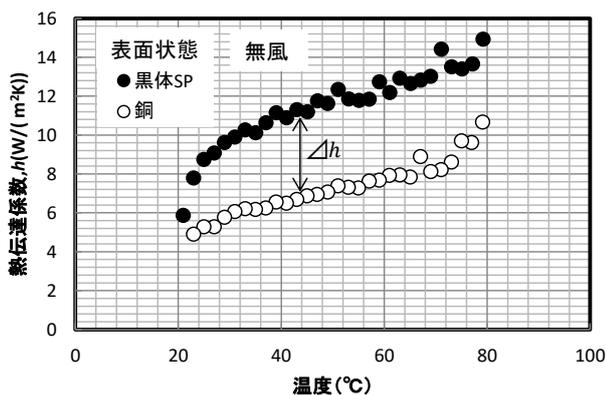


図7 無風空冷時の熱伝達係数に及ぼす表面状態の影響

これより、黒体スプレーを塗布した試料のほうが銅の表面そのままの試料より約3~4W/m²Kほど高い値を示している。この差Δhが、試料の放射率の違いによる差であると仮定してデータの解析を試みる。

放射熱による熱伝達係数 h_r は式(5)のように与えられる¹¹⁾

$$h_r = 4\sigma ET_m^3 \quad (5)$$

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、試料温度を T 、外気温度 T_r が環境温度と同じであるとすると、式(6)で与えられる。

$$T_m \cong \frac{T + T_r}{2} + 273 \quad (6)$$

また、放射係数 E は式(7)で与えられる。

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (7)$$

ここで、 ε_1 、 ε_2 はそれぞれ試料表面、試料を取り巻く環境の放射率である。環境の放射率 ε_2 を 0.8 として試料表面を銅の普通光沢面、黒体スプレー塗布面としたときの各放射係数 E とその差 ΔE を表2に示す。

表2 試料表面の違いによる放射係数Eの試算値

| 試料表面の状態 | 試料の放射率 ε_1 | 環境の放射率 ε_2 | 放射係数 E |
|---------|------------------------|------------------------|----------|
| 銅普通光沢面 | 0.072 | 0.8 | 0.0707 |
| 黒体スプレー | 0.94 | 0.8 | 0.7611 |

$$\Delta E = 0.6904$$

この放射係数の差が熱伝達係数の差を引き起こすと考え、 Δh を次式のように定義する。

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

図8に Δh の実験データと式(8)による計算値とを比較すると、実験データとほぼ一致し、表面状態による熱伝達係数の差は放射エネルギーが主因であることが示唆される。

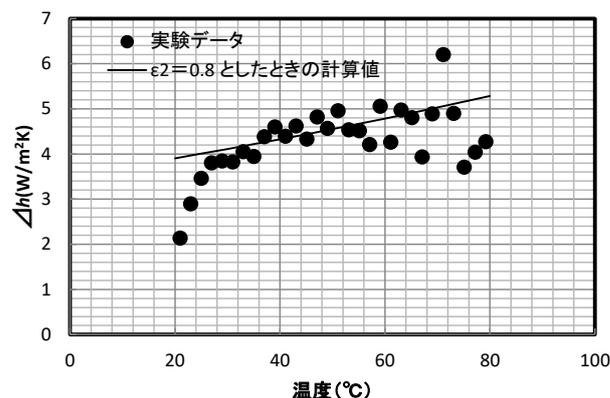


図8 表面状態の違いによる熱伝達係数の差Δhに及ぼす試料温度の影響とその試算値

銅研磨面試料の熱伝達係数の風量による変化を図9に示す。このグラフより冷却試験の開始温度80°C近くと室温の20°C近くでは直線からのずれやばらつきが大きくなる傾向がある。80°C近くで熱伝達係数 h の値がばらつくのは試験片をオープンから取り出し、扇風機の定常的な風にさらされるまでに多少時間がかかるためと考えられる。また、室温の19°C近くになると h が低下するのは、試料温度の測定値が室温値よりも若干高めにならざるためと考える。この試料温度のずれの理由は今のところ不明である。そこで、 h のデータが比較的安定な30~70°Cの平均値を求め、風量に代わり試料位置で計測した風速に対してプロットしたものを図10に示す。

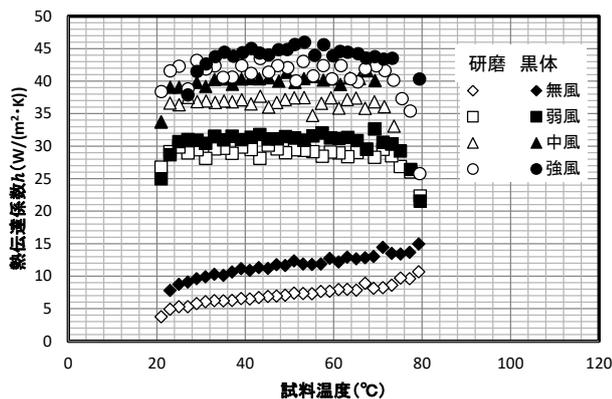


図9 研磨面試料の熱伝達係数hに及ぼす風量の影響

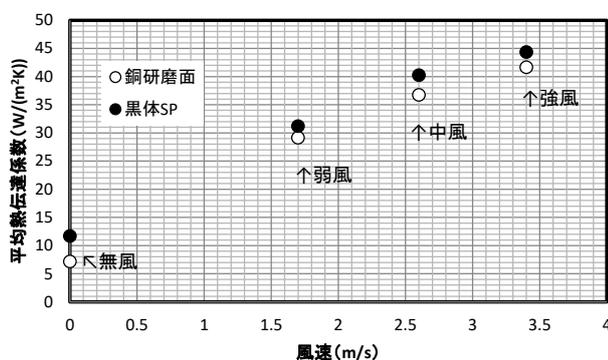


図10 熱伝達係数hに及ぼす風速と試料表面の影響

各風速での熱伝達係数は、すべて黒体スプレーを塗布した試料のほうが高くなり、放射の影響が出ていることがわかる。特に、風のある状態での黒体塗布による熱伝達係数の増分割合は6~9%程度であるに対し、無風状態では39%と高く、空気が動かない閉空間での断熱を考慮するうえで、放射率は重要な要素となるという実験結果⁷⁾と一致する。

5 結 言

自動車部品の断熱性を評価するうえで重要となる表面熱伝達係数(SHTC)を測定するために、80°Cに加熱した銅板を、常温の水の中または大気中で冷却し、その冷却曲線を解析することで熱伝達係数を計算、水温や風、表面への黒体スプレーへの塗布が熱伝達係数に及ぼす影響について調査し、以下の結論を得た。

- (1) 水冷時の SHTC の値は試料温度が高い領域で最高で 1400~1800 W/(m²·K) になり、試料温度が水温に近づくにつれて 200 ~400 W/(m²·K) まで低下、水温が低いほど大きくなる。
- (2) 空冷時の SHTC は水冷の値の数十分の一から数百分の一と小さく、無風の銅光沢表面で 5~10 W/(m²·K)、風速を 3.5 m/s まで増加させるにつれて 42 W/(m²·K) まで増加する。
- (3) 黒体スプレーを試料表面に塗布することで、空冷の SHTC は 3~4 W/(m²·K) 増加し、その増加割合は、風のある場合が 6~9% 程度であるのに対して、無風状態では 39% にもなる。

文 献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 筒本隆博, 長谷川浩治: 広島県立総合技術研究所西部工技セ研究報告, 62(2019), 14-17
- 8) 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, 62(2019), 18-21
- 9) <https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.htm>
- 10) <https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01070.htm>
- 11) 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