試料表面に吹き付けられた黒色塗料層のレーザ光吸 収率と熱物性値

藤井, 丕夫 九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

朴, 壽泉 九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

富村, 寿夫 九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

https://doi.org/10.15017/17365

出版情報:九州大学大学院総合理工学報告. 17(1), pp.23-28, 1995-06-01. 九州大学大学院総合理工学 研究科 バージョン:

権利関係:

試料表面に吹き付けられた黒色塗料層の レーザ光吸収率と熱物性値

藤	井	丕	夫*・朴	壽	泉**
富	村	寿	夫*・張		興*
		(平成	7年2月28日	受理)	

Absorptivity for Laser Beam and Thermophysical Properties of Thin Black Paint Layer Sprayed on Material Surface

Motoo FUJII*, Soochun PARK** Toshio TOMIMURA* and Xing ZHANG*

The absorptivity for laser beam *a*, thermal conductivity λ_b and thermal diffusivity α_b of the thin black paint layer sprayed on material surfaces are measured by applying a non-contact measurement method of the thermophysical properties of solids. The values of a=0.67, $\lambda_b=1.45$ W/mK and $\alpha_b=1.24\times10^{-6}$ m²/s are obtained for the sprayed layer thickness $z_b=40 \ \mu$ m. Furthermore, for the $z_b=24 \ \mu$ m thick layers which are formed by rubbing with a glass rod after spraying, the values of a=0.73, $\lambda_b=1.85$ W/mK and $\alpha_b=1.09\times10^{-6}$ m²/s are obtained. It is also shown that the present thermal diffusivity α_b for $z_b=40 \ \mu$ m is about 30~80% larger than those obtained by Araki et al. for the thicker layers $z_b=150\sim248 \ \mu$ m.

1. 緒 言

透明試料や反射率の大きい試料の熱物性値をレーザ フラッシュ法などの非接触法で測定する場合,試料表 面にはレーザ光の吸収を良くするための吸収層(黒色 塗料層)が設けられる.この層の厚さは一般に数十 µm 程度であり,試料の厚さ(数 nm 程度)と比較 して十分に薄い.このため,従来の測定では試料の熱 物性値に及ぼす吸収層の影響は考慮されないかあるい は無視されており,その熱物性値も明確にされていない.

最近, 荒木ら¹²⁰はレーザフラッシュ法による層状 試料の熱拡散率測定における問題点について検討し, その中で, 試料とその表面に吹き付けた炭素塗料(ド ライグラファイト)の吸収層を二層状試料と見なした 解析と実験を行っている. その結果, 銅などのような 高熱拡散率の試料の場合は測定値に及ぼす吸収層の 影響が大きいこと, また炭素塗料の熱拡散率は6.74× 10⁻⁷~9.37×10⁻⁷m²/s であることを報告している. し

*熱エネルギーシステム工学専攻

**熱エネルギーシステム工学専攻博士課程

かし、この値は塗装層が $150-248 \mu m$ と非常に厚く、 密度が $0.78 \times 10^3 \sim 0.95 \times 10^3 kg/m^3$ の場合に得られた 結果であり、一般に使用される数十 μm の層厚さの場 合にもこのような値が妥当かどうかを明らかにする必 要がある.

本報では、熱物性値が既知のアクリル樹脂および塩 化ビニール樹脂の表面に黒色塗料を 40 µm の厚さに 吹き付けた場合と塗料層をガラス棒で擦り厚さ 24 µm とした場合について、そのレーザ光吸収率、熱伝導率 および熱拡散率を測定した結果について報告する。測 定には、著者ら³⁴⁾が提案したレーザ光と赤外線温度 計を組み合わせた試料の熱物性値の非接触測定法を応 用した.

2. 測定方法

既報³¹⁴⁾の測定法を応用し,以下の過程により黒色 塗料層のレーザ光吸収率と熱物性値を求めた.

1)熱物性値が既知の試料と未知の黒色塗料層とからなる系を二層モデルで置き換え、一連の広範なパラメータに対して数値解析を行い、塗料層表面温度の経時変化に関するマスタープロットを用意する。

2)無次元化した塗料層表面温度の測定値が先に求めたマスタープロットと一致するようにレーザ光の吸収率および塗料層の熱伝導率と熱拡散率を調整し最適値を決める。

本測定法の原理から、黒色塗料層の熱伝導率 λ_b と 熱拡散率 α_b を同時に決めることができる.そこで、 過程 2) ではまずレーザ光の吸収率 a を仮定し、ア クリル樹脂と塩化ビニール樹脂の測定結果から、その 吸収率に対する最適値 $\lambda_{b. ac}$, $\alpha_{b. ac}$ (ac:アクリル 樹脂) および $\lambda_{b. vc}$, $\alpha_{b. ac}$ (vc:塩化ビニール樹脂) を求める.そして、吸収率 a を変えながら同様な方 法で $\lambda_{b. ac}$, $\alpha_{b. ac}$ ϵ $\lambda_{b. vc}$, $\alpha_{b. vc}$ を求め、次式

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{\left| \lambda_{b, ac} - \lambda_{b, vc} \right|}{\lambda_{b, ac}} + \frac{\left| \alpha_{b, ac} - \alpha_{b, vc} \right|}{\alpha_{b, ac}} \right) \quad (1)$$

で与えた各物性値の誤差の平均値 δ が最小になった時 点での a, λ_b , α_b を最終的な値とする.ここで,

$$\lambda_{b} = \frac{1}{2} \left(\lambda_{b, ac} + \lambda_{b, vc} \right)$$
(2)

$$\alpha_{b} = \frac{1}{2} \left(\alpha_{b, ac} + \alpha_{b, vc} \right) \tag{3}$$

3. 数 值 解 析

3.1 二層モデル

Fig.1 に二層モデルを示す. 温度 T_{∞} の静止空気 中に置かれた熱伝導率 λ_{0} 熱拡散率 α_{0} 半径 r_{0}



Fig. 1 Physical model and coordinate system

厚さ_{*L*}の試料表面上に熱伝導率 λ_b ,熱拡散率 α_b , 厚さ_{*L*}の黒色塗料層がある.ガウス分布状の光強度 をもつレーザにより塗料層表面がステップ的に局所加 熱され,その結果,層表面での熱流束分布 q(r) が次 式のようになるとする.

$$q(r) = q_p \exp \{-2.3(r/r^*)^2\}$$
(4)

ここで, r^* は熱流束の値が中心での最大値 $q(0) = q_p$ の10%となり半径 r であり,加熱半径と呼ぶことにする.

3.2 基礎式と初期、境界および接合条件

黒色塗料層と試料に対する無次元化した非定常熱伝 導方程式は次式で与えられる.

$$\frac{\partial \Theta_{b}}{\partial F_{0}} = P_{a} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_{b}}{\partial R} + \frac{\partial^{2} \Theta_{b}}{\partial R^{2}} + \frac{\partial^{2} \Theta_{b}}{\partial Z^{2}} \right)$$
(5)
$$\frac{\partial \Theta_{s}}{\partial F_{0}} = \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_{s}}{\partial R} + \frac{\partial^{2} \Theta_{s}}{\partial R^{2}} + \frac{\partial^{2} \Theta_{s}}{\partial Z^{2}}$$
(6)

初期条件としては、全領域が周囲空気温度 T_{∞} に 等しいとした.境界条件に関しては、対称軸上 (R=0)、側面 ($R=R_s$)、裏面 ($Z=Z_b+Z_s$) で断熱条件を、 また表面 (Z=0) では、レーザ光による加熱と黒色塗 料層内への熱伝導および周囲空間への自然対流 (q_c) と放射 (q_r) による放熱とのバランスから次式を与え た.

$$-P_{\lambda} \frac{\partial \Theta_{b}}{\partial Z} \bigg|_{Z=0}$$

= exp(-2.3R²) - Bi\Theta_{w} - Rc\Theta_{w} (7)

ここで、 $\Theta_w = \Theta_b (F_0, R, 0)$ である. さらに、塗料と 試料の境界面 $(Z = Z_b)$ では、熱流束と温度の連続性 から次の接合条件を与えた.

$$P_{\lambda} \frac{\partial \Theta_{b}}{\partial Z} \bigg|_{Z=Z_{b}} = \frac{\partial \Theta_{s}}{\partial Z} \bigg|_{Z=Z_{b}},$$

$$\Theta_{b}(F_{0}, R, Z_{b}) = \Theta_{s}(F_{0}, R, Z_{b}) \qquad (8)$$

式(5)~(8)に含まれ各無次元量は次式で定義される.

$$\Theta = \frac{T - T_{\infty}}{q_{b}r^{*}/\lambda_{s}}, \quad Fo = \frac{\alpha_{s}t}{r^{*2}}, \quad R = \frac{r}{r^{*}}, \quad Z = \frac{z}{r^{*}}$$

$$P_{\alpha} = \frac{\alpha_{b}}{\alpha_{s}}, \quad P_{\lambda} = \frac{\lambda_{b}}{\lambda_{s}} \qquad (9)$$

$$Bi = \frac{hr^{*}}{\lambda_{s}}, \quad Rc = \frac{4T_{\infty}^{3}\varepsilon \ \sigma \ r^{*}}{\lambda_{s}}$$

平成7年

ここで、 F_0 は Fourier 数、t は時間、 P_a は熱拡散率 比、 P_λ は熱伝導率比、Bi は Biot 数、h は熱伝達係 数、Rc は伝導一放射パラメータ、 ϵ は黒色塗料の全 放射率、 σ は Stefan-Boltzmann の定数 (=5.67×10⁻⁸ W/m²K⁴) である. なお、本測定で求める黒色塗料層 の吸収率 a はアルゴンイオンレーザの可視光(波長 514.5nm) に対する単色吸収率であり、式(9)のRc に 含まれる全放射率 ϵ とは等しくない.

3.3 計算パラメータ

本測定の試料には、比較的正確な熱物性値が与えら れているアクリル樹脂 (λ_s =0.21W/mK, α_s =0.12× 10^{-6} m²/s)⁵⁾⁶⁾ と塩化ビニール樹脂 (λ_s =0.16W/mK, α_s =0.12×10⁻⁶m²/s)⁵⁾⁶⁾ を用いている. これらの物 性値と炭素塗料層に関する荒木ら¹⁾²⁾の測定結果を参 考にして、熱拡散率比と熱伝導率比には P_{α} =1, 3, 5, 8, 15 および P_{λ} =1, 3, 6, 10, 15 を与えた. また、実 験との対応から, Biot 数, 伝導一放射パラメータ, 黒色塗料層および試料の無次元厚さについては Bi= (0.5~1.5)×10⁻¹, Rc=(1.5~5.6)×10⁻², Z_b =3.5× 10^{-2} , 5.6×10⁻², Z_s =14.1 を与えた. ここで, これら の値は k=15W/m²K, r^* =0.71mm, T_{∞} =293K, ϵ = 0.98, z_b =25, 40 μ m の場合に対応している.

3.4 マスタープロット

既報³⁾⁴⁾で示したように, 無次元表面温度 $\Theta_w = \Theta_b$ (Fo, R, 0) に含まれる q_p を次式で定義される正味の 平均熱流束

$$q_{n} = \frac{2}{r^{*2}} \int_{0}^{r} \{ q - h(T_{w} - T_{\infty}) - \epsilon \ \sigma \ (T_{w}^{4} - T_{\infty}^{4}) \} r dr$$
(10)

で置き換え ($\Theta_n = \Theta_w q_p/q_n$), さらにこれを加熱半径 ($R = R^* = 1$) 内で平均した無次元平均表面温度

$$I_{\iota h} = \frac{1}{\pi R^{*2}} \int_{0}^{R^{*}} \Theta_{n} 2 \pi R dR$$
(11)

を用いることにより,時間すなわち F_0 に関して Biと Rc に依存しないマスタープロットが得られる. Fig. 2 はその一例であり,裏面 $(Z=Z_b+Z_s)$ 温度が 上昇しない範囲では、パラメータ P_{λ} , P_{α} , Z_b の組み 合わせ数 N に対応する N 本のマスタープロットが存 在する.ここで,黒色塗料の熱拡散率を求めるため, 各マスタープロットを F_0 の多項式 $G(F_0)$ で近似し, その関係を $F_0=0-F_0$ の区間で積分した値

$$A_{th} = \int_{0}^{F_0} I_{th} \, dF_0 \approx \int_{0}^{F_0} G(F_0) \, dF_0 \tag{12}$$

を定義しておく (5章参照).



ig. 2 Nondimensional mean surface temperature variation

4. 実 験

実験装置の概要を **Fig. 3** に示す. 既報³⁾⁴⁾と同様, シャッター③付きのアルゴンレオンレーザ④,赤外線



Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

温度計システム⑥~⑨および試料①から構成されてい る.ただし、本実験では前回の赤外線スポット温度計 の代わりに二次元の温度分布測定が可能なシステムを 用い,表面温度分布の変化を 1/30s 毎に測定,記録 した. また,今回は光ファイバーを使用せず,黒色塗 料表面を直接レーザ光で加熱した.この時の加熱半径 は r*=0.71mm で、レーザ光の強度はガウス分布状 である.なお、出力はパワーコントローラ⑤で調整し 約 20mW としたが、実験前後での値をパワーメータ ②とディジタルマルチメータ⑩で測定した.二層状試 料の概要を Fig. 4 に示す. 試料の材質はアクリル 樹脂および塩化ビニール樹脂である. 表面中央部に 10×10mm²の範囲で黒色塗料層を吹き付けたが、本 研究ではレーザ光の吸収率に及ぼす塗料層の表面状態 および熱物性値に及ぼす層密度の影響も調べた. すな わち、試料表面に単に塗料を吹き付けて厚さ40 µm とした場合(Fig. 5(a))と吹き付けた層をガラス棒で 擦り厚さ 24 um とした場合 (Fig. 5(b)) について実験 を行った. 塗料を吹き付けただけでは表面は粗く層内 はポーラス状のようであるが、 ガラス棒で擦ることに より面は平滑化し密度も大きくなる. なお、使用した 黒色塗料は日本ペイント(株)の耐熱用スプレーであり、 成分はシリコーン樹脂(密度 1.88×10³kg/m³, 熱伝



Fig. 5 Surface of black paint layer

導率 0.50W/mk)⁷⁾, 顔料(グラファィト: 密度 2.26× 10³kg/m³,比熱 0.693kJ/kgK, 熱伝導率 16W/mK)⁸, 有機溶剤からなっている.

5. レーザ光吸収率,熱物性値の算出過程と測定結 里

レーザ光の吸収率 a を仮定すると、出力および表 面温度分布の測定値から正味の平均熱流束 q, が計算 できるので、測定結果に関して、式(11)に対応する平 均表面温度

$$i_{ex} = \frac{1}{\pi r^{*2}} \int_{0}^{r} \frac{T_w - T_{\infty}}{q_n} 2 \pi r dr$$
(13)

を求めることができる. また, iex の時間 / に関する 多項式の近似関数をg(t)とすると、式(12)に対応す る測定結果は,

$$a_{ex} = \int_{0}^{t} i_{ex} dt = \int_{0}^{t} g(t) dt$$
(14)

で与えられる.

以上から,仮定された吸収率 a のもとで黒色塗料 層の熱伝導率と熱拡散率を求める過程を Fig. 6 に示 した. すなわち.



Fig. 6 Flow chart for evaluating thermal conductivity and diffusivity of thin black paint layer

 測定時間 t, その時間における平均表面温度 i_{ex} とその積分値 a_{ex}, 試料の熱物性値 λ_s, α_s, Fourier 数 Fo, 塗料層の無次元厚さ Z_b, 層の熱物性値の仮定 値 λ_{b1}, α_{b1} を与える.

 5.
 2) 与えられた値と仮定値から P_{λ1} と P_{α1} を計算 する.

3) 副プログラム SUB₁ により, マスタープロット からパラメータ P_{λ1}, P_{a1} に対する時間 F₀ における 無次元平均表面温度 I_{th1} を内挿によって求める.

 測定結果から与えられる有次元の *i_{ex}* と数値解 析に基づくマスタープロットから得られる無次元の *I_{th1}* との間の関係式,

$$\lambda_{b2} = \frac{I_{th1}}{i_{ex}/r^*} P_{\lambda 1} \tag{15}$$

から,熱伝導率の第一近似値 λ₆₂を求める.

5) 副プログラム SUB₂ によりパラメータ $P_{\lambda 2}$, $P_{\alpha 1}$, Z_b に対するマスタープロットの多項式近似関数 G (Fo) を求め,式(12)に基づきその積分値 A_{th2} を計算 する.

6) 無次元の積分値 A_{u2} と測定結果から与えられる有次元の a_{ex} との間の関係式,

$$\alpha_{b2} = \frac{A_{th2}}{(\lambda_s/r^{*3})a_{ex}} P_{\alpha_1} \tag{16}$$

から,熱拡散率の第一近似値 α₆₂を求める.

7) 熱拡散率 α_b の相対誤差が所定の収束判定条件 を満足するまで λ_{b1} , α_{b1} を λ_{b2} , α_{b2} で置き換え, 過程2)~6)を反復する.

本実験では、測定時間が t=1.5, 2, 2.5, 3s (Fo= 0.36, 0.48, 0.60, 0.71)の場合について $\lambda_b \geq \alpha_b$ を求め、その算術平均値を仮定した吸収率 a におけ る最適値とした.そして、第2章で述べたように、ア クリル樹脂と塩化ビニール樹脂からなる試料に関して、 吸収率 a を変えながら上記の過程を繰り返し、式(1) で与えた誤差δが最小になるような a, λ_b , α_b を求 めた.

Table 1 に測定結果を示す. S_A は試料表面に単に 塗料を吹き付けた場合, S_B は層をガラス棒で擦り面 を平滑化しかつ密度を大きくした場合である.ここで, 密度 ρ_b は 30×30×0.5mm³ のアクリルシート上に作 成した面積 10×10mm² の塗料層の厚さ z_b と質量を測 定して求めた. S_A と S_B の ρ_b は, それぞれ z_b =41,

Table 1Absorptivity, thermal conductivity and
diffusivity of thin black paint layer

	<i>z_b</i> [μm]	$\rho_{b}[kg/m^{3}]$	a[-]`	$\lambda_b[W/mK]$	$\alpha_b [m^2/s]$
S _A	40	1.6×10^{3}	0.67	1.45	1.24×10^{-6}
SB	24	2.3×10^{3}	0.73	1.85	1.09×10^{-6}

45, 58 μ m と z_b =14, 26, 32, 45 μ m の場合の平均値 であるが, ガラス棒で擦った場合はグラファィトの値 $(2.26 \times 10^3 \text{kg/m}^3)^{\$}$ とほぼ同じになっている. S_A と 比較して S_B は吸収率が *a* が約10%, 熱伝導率 λ_b が 約30%大きくなり, 熱拡散率 α_b が約15%小さくなっ ている. S_A と S_B で比熱は同じと仮定すると, 密度, 熱伝導率, 熱拡散率の間には,

$$\frac{\alpha_{bA}}{\alpha_{bB}} = \frac{\lambda_{bA} \rho_{bB}}{\lambda_{bB} \rho_{bA}}$$
(17)

の関係があるが、S_A、S_Bの結果から、 α_{bA}/α_{bB} = 1.14、 $(\lambda_{bA}/\lambda_{bB})(\rho_{bB}/\rho_{bA})$ =1.13であるので、本 測定結果は式(17)を満足している.

荒木ら¹⁾²⁾は、試料表面に厚さ $z_b = 150 - 248 \mu m$ の塗料層を吹き付けた場合の測定結果から、 $\alpha_b = 6.74 \times 10^{-7} - 9.37 \times 10^{-7} m^2/s$ を得ている.これに対し、塗料層が薄い $z_b = 40 \mu m$ の場合は $\alpha_b = 1.24 \times 10^{-6} m^2/s$ であり、荒木らの結果と比較して約30~80%大きくなっている.

測定結果の妥当性を検証するために, **Fig. 7** に加熱 開始から t=3s (Fo=0.71)後の塗料層表面温度分布 Θ_n について測定値と数値解を比較して示す. 図は S_A の場合であり,記号 "〇"と "△" はアクリル樹脂



Fo = 0.714 [sprayed]



Fig. 8 Surface temperature distributions at $F_0 = 0.714$ [sprayed and rubbed]

と塩化ビニール樹脂試料による測定値をa=0.67と して無次元化したものである.実線と破線は $\lambda_b=$ 1.45W/mK, $\alpha_b=1.24\times10^{-6}m^2/s$ として,測定に対 応する条件で得られた数値解である.両者は良く一致 しており,本測定結果は実際の温度分布を正しく反映 したものとなっている.なお,塗料層が厚くなると, 一点鎖線と記号 "●"の例で示すように数値解は測定 値より若干低めになる傾向が見られた.**Fig.8**は同じ く S_Bの場合であり,a=0.73として無次元化した測 定値("〇", "△")と $\lambda_b=1.85$ W/mK, $\alpha_b=1.09\times$ $10^{-6}m^2/s$ として得られた数値解(実線,破線)は良く 一致している.一点鎖線と記号 "□"は,試料として ベークライトを用いた場合の結果を比較したものであ る.この場合も両者は良く一致しており,本測定によ り妥当な a, λ_b , α_b が得られていることがわかる.

6. 緒 言

レーザ光と赤外線温度計による試料の熱物性値の非 接触測定法を応用し、試料表面に吹き付けた黒色塗料 層のレーザ光吸収率 a、熱伝導率 λ_b および熱拡散率 α_b を測定した. その結果, 吹き付けた塗料層の厚さ が $z_b = 40 \ \mu m$ の場合は a = 0.67, $\lambda_b = 1.45 W/mK$, $\alpha_b = 1.24 \times 10^{-6} m^2/s$, 塗料層をガラス棒で擦り $z_b = 24 \ \mu m$ とした場合は a = 0.73, $\lambda_b = 1.85 W/mK$, $\alpha_b = 1.09 \times 10^{-6} m^2/s$ が得られた. また, $z_b = 40 \ \mu m$ の場合 の α_b は, 荒木らによって報告されている $z_b = 150 \sim$ 248 μm の場合の $\alpha_b = 6.74 \times 10^{-7} - 9.37 \times 10^{-7} m^2/s$ と比較して約30~80%程度大きくなることがわかった

- 参考文献
- 1) 荒木信幸,牧野 敦,三原 順:第9回日本熱物性シン ポ講論集,179 (1988).
- N. Araki, A. Makino and J. Mihara: Int. J. Thermophysics, 13-2, 331 (1992).
- 3) 藤井丕夫,富村寿夫,張 興,朴 寿泉,藤井 哲:

 第13回日本熱物性シンポ講論集,245 (1992).
- M. Fujii, T. Tomimura, X. Zhang, S. Park and T. Fujii: *Thermophysical Properties*, p. 120, International Academic Publishers, (1992).
- 5) 伝熱工学試料 (改訂第4版), p. 321, 日本機械学会, (1986).
- 6) 熱物性ハンドブック, p. 272, 養賢堂, (1990).
- 7) 熱物性ハンドブック, p. 274, 養賢堂, (1990).
- 8) 熱物性ハンドブック, p.19, 養賢堂, (1990).