

試料表面に吹き付けられた黒色塗料層のレーザー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

張, 興
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 $a=0.67$, $\lambda_b=1.45\text{W/mK}$ and $\alpha_b=1.24\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ are obtained for the sprayed layer thickness $z_b=40\ \mu\text{m}$. Furthermore, for the $z_b=24\ \mu\text{m}$ thick layers which are formed by rubbing with a glass rod after spraying, the values of $a=0.73$, $\lambda_b=1.85\text{W/mK}$ and $\alpha_b=1.09\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ are obtained. It is also shown that the present thermal diffusivity α_b for $z_b=40\ \mu\text{m}$ is about 30~80% larger than those obtained by Araki et al. for the thicker layers $z_b=150\sim 248\ \mu\text{m}$.

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mm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ばず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³⁾²⁾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ばず吸収層の影響が大きいこと、また炭素塗料の熱拡散率は $6.74\times 10^{-7}\sim 9.37\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ であることを報告している。し

かし、この値は塗料層が $150\sim 248\ \mu\text{m}$ と非常に厚く、密度が $0.78\times 10^3\sim 0.95\times 10^3\text{kg/m}^3$ 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 $40\ \mu\text{m}$ 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 $24\ \mu\text{m}$ 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³⁾⁴⁾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³⁾⁴⁾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。

*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

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ー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) ではまずレーザー光の吸収率 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 $\lambda_{b, vc}$, $\alpha_{b, vc}$ (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 $\lambda_{b, ac}$, $\alpha_{b, ac}$ と $\lambda_{b, vc}$, $\alpha_{b, vc}$ を求め、次式

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

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、

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

$$\alpha_b = \frac{1}{2} (\alpha_{b, ac} + \alpha_{b, vc}) \quad (3)$$

3. 数値解析

3.1 二層モデル

Fig. 1 に二層モデルを示す。温度 T_∞ の静止空气中に置かれた熱伝導率 λ_s , 熱拡散率 α_s , 半径 r_s ,

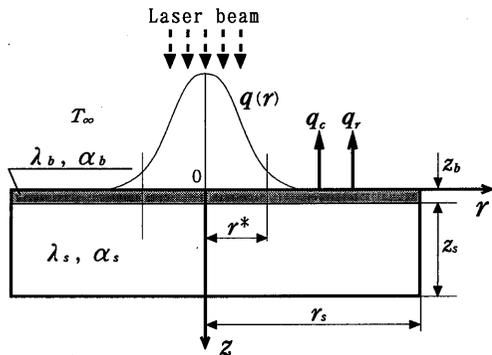


Fig. 1 Physical model and coordinate system

厚さ z_s の試料表面上に熱伝導率 λ_b , 熱拡散率 α_b , 厚さ z_b 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ー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。

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

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。

$$\frac{\partial \Theta_b}{\partial F_0} = P_\alpha \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_b}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_b}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 \Theta_b}{\partial Z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta_s}{\partial F_0} = \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_s}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_s}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 \Theta_s}{\partial Z^2} \quad (6)$$

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、レーザー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。

$$\begin{aligned} -P_\lambda \frac{\partial \Theta_b}{\partial Z} \Big|_{Z=0} \\ = \exp(-2.3R^2) - Bi\Theta_w - Rc\Theta_w \end{aligned} \quad (7)$$

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。

$$\begin{aligned} P_\lambda \frac{\partial \Theta_b}{\partial Z} \Big|_{z=z_b} &= \frac{\partial \Theta_s}{\partial Z} \Big|_{z=z_b}, \\ \Theta_b(F_0, R, Z_b) &= \Theta_s(F_0, R, Z_b) \end{aligned} \quad (8)$$

式(5)~(8)に含まれ各無次元量は次式で定義される。

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{T - T_\infty}{q_p r^* / \lambda_s}, \quad F_0 = \frac{\alpha_s t}{r^* z}, \quad R = \frac{r}{r^*}, \quad Z = \frac{z}{r^*} \\ P_\alpha &= \frac{\alpha_b}{\alpha_s}, \quad P_\lambda = \frac{\lambda_b}{\lambda_s} \\ Bi &= \frac{hr^*}{\lambda_s}, \quad Rc = \frac{4T_\infty^3 \epsilon \sigma r^*}{\lambda_s} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 F_0 は Fourier 数、 t は時間、 P_α 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-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 ($=5.67 \times 10^{-8}$ 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 ($\lambda_s=0.21$ W/mK, $\alpha_s=0.12 \times 10^{-6}$ m²/s)⁵⁾⁶⁾ と塩化ビニール樹脂 ($\lambda_s=0.16$ W/mK, $\alpha_s=0.12 \times 10^{-6}$ m²/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 $P_\alpha=1, 3, 5, 8, 15$ および $P_\lambda=1, 3, 6, 10, 15$ を与えた。また、実験との対応から、Biot 数、伝導-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 $Bi=(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-1}$, $Rc=(1.5 \sim 5.6) \times 10^{-2}$, $Z_b=3.5 \times 10^{-2}, 5.6 \times 10^{-2}$, $Z_s=14.1$ を与えた。ここで、これらの値は $h=15$ W/m²K, $r^*=0.71$ mm, $T_\infty=293$ K, $\epsilon=0.98$, $z_b=25, 40 \mu\text{m}$ 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 $\Theta_w = \Theta_b(F_0, R, 0)$ に含まれる q_p を次式で定義される正味の平均熱流束

$$q_n = \frac{2}{r^*2} \int_0^{r^*} \{q - h(T_w - T_\infty) - \epsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4)\} r dr \quad (10)$$

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

$$I_{th} = \frac{1}{\pi R^*2} \int_0^{R^*} \Theta_n 2\pi R dR \quad (11)$$

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 $F_0=0 \sim F_0$ の区間で積分した値

$$A_{th} = \int_0^{F_0} I_{th} dF_0 \cong \int_0^{F_0} G(F_0) dF_0 \quad (12)$$

を定義しておく (5章参照)。

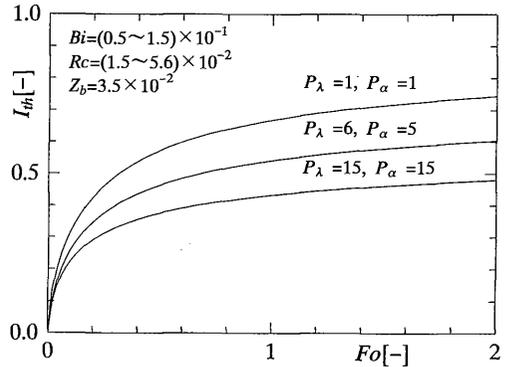


Fig. 2 Nondimensional mean surface temperature variation

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

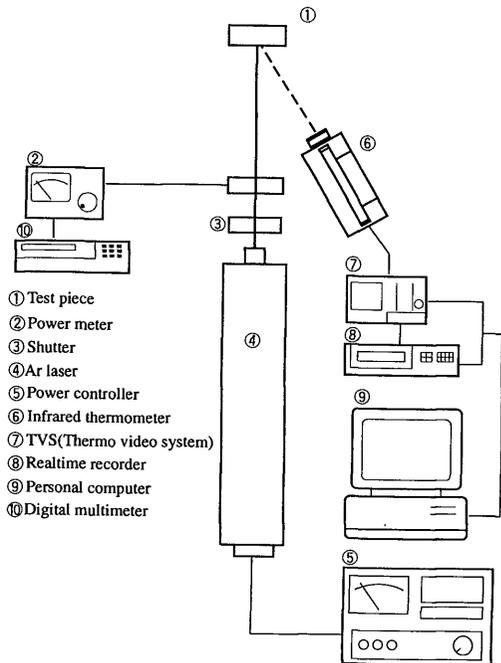


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

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ー光で加熱した。この時の加熱半径は $r^*=0.71\text{mm}$ で、レーザー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 $10\times 10\text{mm}^2$ の範囲で黒色塗料層を吹き付けたが、本研究ではレーザー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 $40\mu\text{m}$ 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 $24\mu\text{m}$ 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、成分はシリコン樹脂(密度 $1.88\times 10^3\text{kg/m}^3$, 熱伝

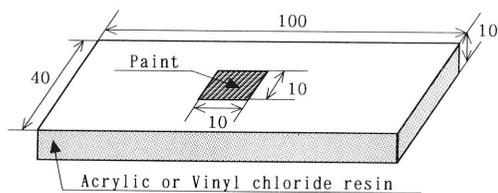
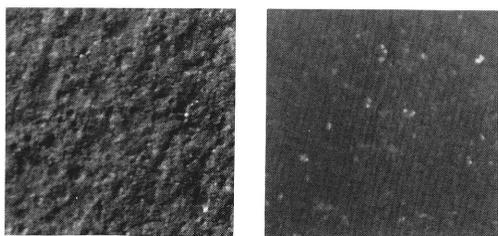


Fig. 4 Schematic of test piece



(a) sprayed (b) sprayed and rubbed

Fig. 5 Surface of black paint layer

導率 0.50W/mk)⁷⁾, 顔料(グラファイト:密度 $2.26\times 10^3\text{kg/m}^3$, 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果

レーザー光の吸収率 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_n 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

$$i_{ex} = \frac{1}{\pi r^{*2}} \int_0^{r^*} \frac{T_w - T_\infty}{q_n} 2\pi r dr \quad (13)$$

を求めることができる。また、 i_{ex} の時間 t 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、

$$a_{ex} = \int_0^t i_{ex} dt \doteq \int_0^t g(t) dt \quad (14)$$

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、

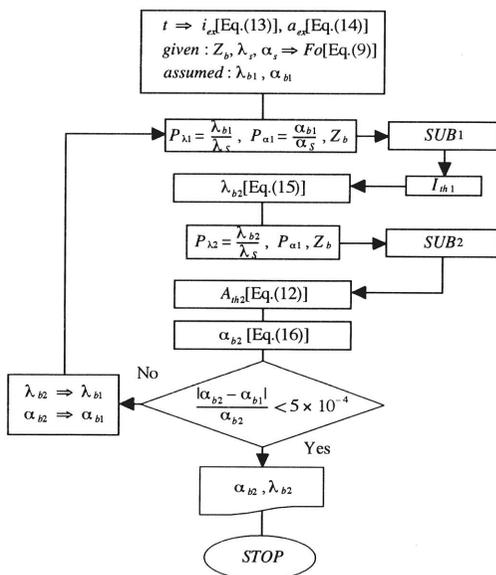


Fig. 6 Flow chart for evaluating thermal conductivity and diffusivity of thin black paint layer

1) 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 F_0 , 塗料層の無次元厚さ z_b , 層の熱物性値の仮定値 $\lambda_{b1}, \alpha_{b1}$ を与える.

2) 与えられた値と仮定値から $P_{\lambda 1}$ と $P_{\alpha 1}$ 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 $P_{\lambda 1}, P_{\alpha 1}$ に対する時間 F_0 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.

4) 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} との関係式,

$$\lambda_{b2} = \frac{I_{th1}}{i_{ex}/t^*} P_{\lambda 1} \quad (15)$$

から, 熱伝導率の第一近似値 λ_{b2} 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 $G(F_0)$ 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_{th2} と測定結果から与えられる有次元の a_{ex} との関係式,

$$\alpha_{b2} = \frac{A_{th2}}{(\lambda_s/t^*3)a_{ex}} P_{\alpha 1} \quad (16)$$

から, 熱拡散率の第一近似値 α_{b2} 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 $\lambda_{b1}, \alpha_{b1}$ を $\lambda_{b2}, \alpha_{b2}$ で置き換え, 過程2)~6)を反復する.

本実験では, 測定時間が $t=1.5, 2, 2.5, 3s$ ($F_0=0.36, 0.48, 0.60, 0.71$) の場合について λ_b と α_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 $30 \times 30 \times 0.5 \text{mm}^3$ のアクリルシート上に作成した面積 $10 \times 10 \text{mm}^2$ 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 1 Absorptivity, thermal conductivity and diffusivity of thin black paint layer

	$z_b [\mu\text{m}]$	$\rho_b [\text{kg}/\text{m}^3]$	$a [-]$	$\lambda_b [\text{W}/\text{mK}]$	$\alpha_b [\text{m}^2/\text{s}]$
S_A	40	1.6×10^3	0.67	1.45	1.24×10^{-6}
S_B	24	2.3×10^3	0.73	1.85	1.09×10^{-6}

45, 58 μm と $z_b=14, 26, 32, 45 \mu\text{m}$ 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イトの値 ($2.26 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$)⁸⁾ 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,

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

の関係があるが, S_A, S_B の結果から, $\alpha_{bA}/\alpha_{bB}=1.14, (\lambda_{bA}/\lambda_{bB})(\rho_{bB}/\rho_{bA})=1.13$ 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 $z_b=150 \sim 248 \mu\text{m}$ の塗料層を吹き付けた場合の測定結果から, $\alpha_b=6.74 \times 10^{-7} \sim 9.37 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ を得ている. これに対し, 塗料層が薄い $z_b=40 \mu\text{m}$ の場合は $\alpha_b=1.24 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 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 $t=3s$ ($F_0=0.71$) 後の塗料層表面温度分布 Θ_n について測定値と数値解と比較して示す. 図は S_A の場合であり, 記号“○”と“△”はアクリル樹脂

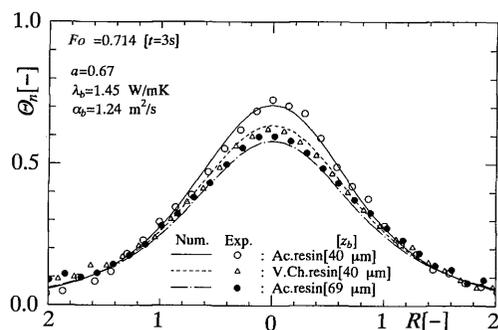


Fig. 7 Surface temperature distributions at $F_0 = 0.714$ [sprayed]

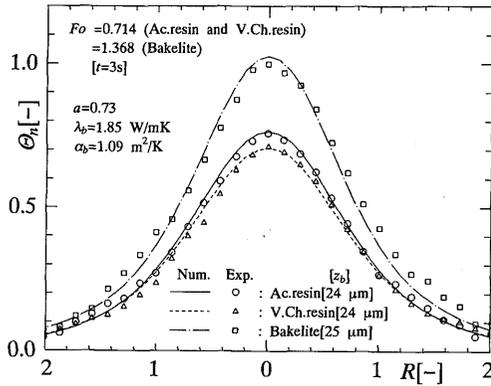


Fig. 8 Surface temperature distributions at $Fo = 0.714$ [sprayed and rubbed]

と塩化ビニール樹脂試料による測定値を $a = 0.67$ とし、無次元化したものである。実線と破線は $\lambda_b = 1.45 \text{ W/mK}$, $\alpha_b = 1.24 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、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、無次元化した測定値 (“○”, “△”) と $\lambda_b = 1.85 \text{ W/mK}$, $\alpha_b = 1.09 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とし得られた数値解 (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. 結 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 $z_b = 40 \mu\text{m}$ の場合は $a = 0.67$, $\lambda_b = 1.45 \text{ W/mK}$, $\alpha_b = 1.24 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 塗料層をガラス棒で擦り $z_b = 24 \mu\text{m}$ とした場合は $a = 0.73$, $\lambda_b = 1.85 \text{ W/mK}$, $\alpha_b = 1.09 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ が得られた。また、 $z_b = 40 \mu\text{m}$ の場合の α_b は、荒木らによって報告されている $z_b = 150 \sim 248 \mu\text{m}$ の場合の $\alpha_b = 6.74 \times 10^{-7} \sim 9.37 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 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ジウム論集, 179 (1988).
- 2) 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ジウム論集, 245 (1992).
- 4) 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).