

レーザー照射部のフラッシュ温度測定*

— 光カプラ型 2 色温度計の適用 —

上田 隆 司** 入山 孝 宏*** 杉田 忠 彰**

Measurement of Flush Temperature of Ceramics Irradiated with CO₂ Laser
— Application of Two-color Pyrometer Using Fused Fiber Coupler —

Takashi UEDA, Takahiro IRIYAMA and Tadaaki SUGITA

A new type of Infrared Radiation Pyrometer using a fused fiber coupler is made, and its characteristics are investigated theoretically and experimentally. This pyrometer can be applied to measure the flush temperature of a small area on ceramics (PSZ) when it is irradiated with CO₂ laser. In this pyrometer, the infrared rays radiated from the object are accepted by an optical fiber, and divided into two parts and transmitted to the two types of infrared detectors by a fused fiber coupler. The temperature is obtained by calculating the ratio of the output voltages from these two detectors. The characteristics of this pyrometer are as follows. It is possible to measure the temperature with controlling the disturbance of the emissivity. When the object has a surface of uniform temperature, the measuring temperature does not depend on the size of the object. In the case when the object has the distribution in temperature, it is possible to estimate the maximum temperature correctly from the experimental results

Key words: CO₂ laser, flush temperature, two-color pyrometer, infrared radiation pyrometer, fiber coupler, optical fiber

1. 緒 言

一般に、レーザー照射部は微小であり、かつ短時間に極めて高温に達するため、その過渡温度の測定はむずかしい。また、加工材料表面が融点に達して熔融するなど表面状態が変化する場合には、その輻射率の変化も問題となる。

著者らはこれまで微小加工領域で高速で変化する温度を非接触で測定する方法として、測定対象物から輻射される赤外線を光ファイバで受光して光電変換素子に導き温度測定をする光ファイバ型赤外線輻射温度計を開発してきた。そして、この温度計をセラミックス研削やダイヤモンド・ボラゾンといった超砥粒の研削温度測定に適用し、多くの知見を得てきている^{1)~4)}。

そこで本研究では、1本の光ファイバで受光した赤外線を光カプラによって2本のファイバに分岐して、特性の異なる2つの光電変換素子に導き、この2つの素子からの出力の比により温度を測定する光カプラ型2色温度計を開発し、その特性を理論・実験の両面から検討するとともに、CO₂レーザーをセラミックス(PSZ)に照射したときのフラッシュ温度の測定に適用してみた。2色温度計にすることで輻射率の影響を抑えることができ、光カプラを用いることで、これまでの光ファイバ型温度計が持つ特長をすべて備えることができる。すなわち、複雑に入り組んでいる箇所からも容易に赤外線を導き出すことができ、また、測定対象物に光ファイバが入る程度の小さな穴があれば内部の温度測定も可能である。

2. 基本構造と測定原理

温度計の基本構成を図1に示す。測定対象面からの輻射線をコア径100 μmの1本の光ファイバで受光し、融着型光カプラ

により2本のファイバに分岐する。1本の光ファイバでエネルギーを受光し、そのエネルギーを光カプラによって2つに分岐する方法をとっているため、受光面での種々の損失やファイバの設定位置による受光エネルギー変化などによる測定精度への影響を除くことができる。

伝送された赤外線は集光レンズを介して2個の光電変換素子へ導き、電気信号に変換した後増幅し、デジタルメモリーに記録してマイクロコンピュータにより解析する。このときの出力は、輻射線のエネルギー量と分光成分、光ファイバの伝送特性、光電変換素子の分光感度特性により決定されるが、輻射線の分光成分が温度によって異なるため、測定対象面の温度変化に伴う出力の変化率は2つの素子によって異なる。そこで、各温度でのそれらの素子からの出力の比をプロットしておけば、出力の比による温度の測定が可能となる。

黒体の輻射能を $J_\lambda(\lambda, T)$ 、光ファイバ、及び集光レンズの分光透過率を $F(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 、2個の光電変換素子の分光感度特性を $D_1(\lambda)$ 、 $D_2(\lambda)$ とすると、それぞれの素子からの出力 A_1 、 A_2 の比は次式で与えられる。

$$A = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta \varepsilon(\lambda) J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \beta \varepsilon(\lambda) J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

ただし、 β は種々の損失に依存する係数、 $\varepsilon(\lambda)$ は測定対象物の輻射率、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ は測定可能な波長範囲であり、 A が2色温度計の相対感度となる。しかし、波長範囲が大きくなると、かつ $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、および $\lambda_3 \sim \lambda_4$ が大きく異なる場合、 β 、 $\varepsilon(\lambda)$ を波長によらず一定とみなすことができ、このとき A は

$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

となり、2色温度計は輻射率の影響を受けないことになり、温

* 原稿受付 平成6年7月19日

** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 正会員 (株)コマツ(小松市符津町23)

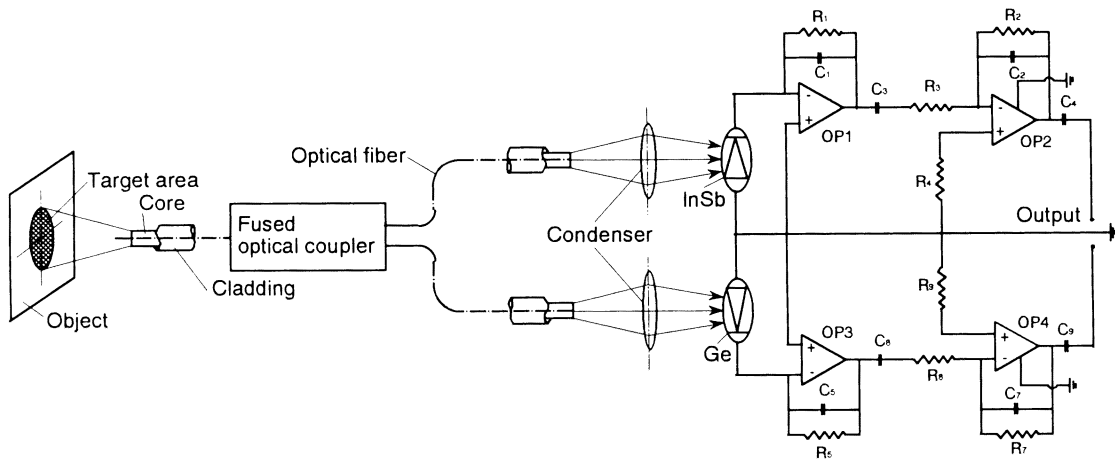


Fig. 1 System of two-color pyrometer

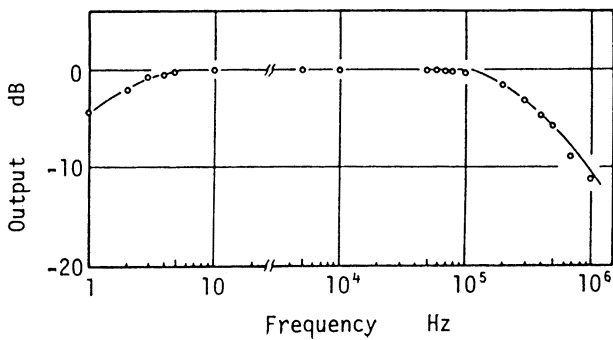


Fig. 2 Frequency characteristics of amplifier in InSb-pyrometer

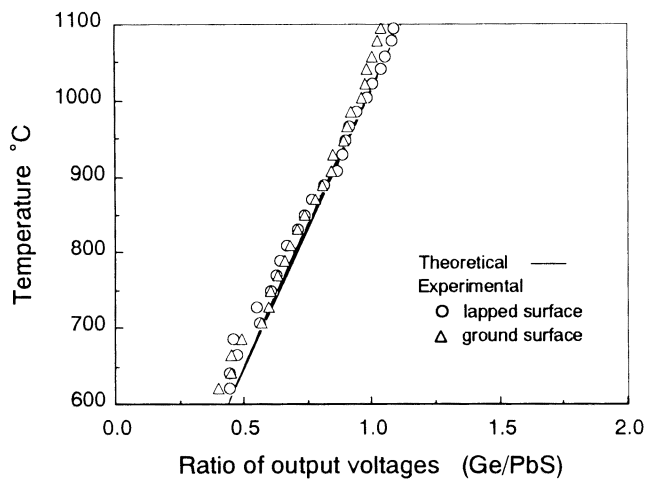


Fig. 4 Influence of emissivity on output of two-color pyrometer

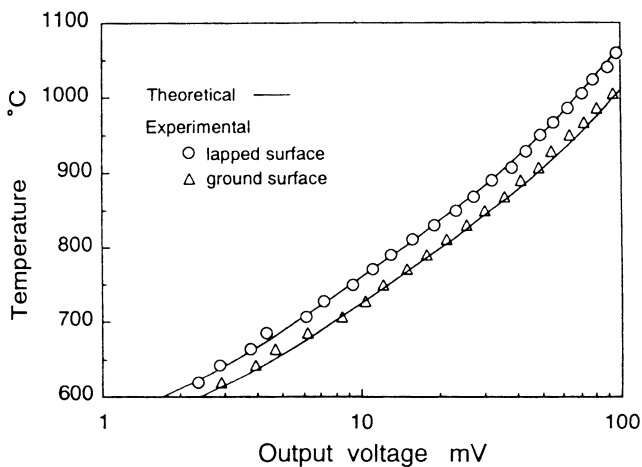


Fig. 3 Influence of emissivity on output of Ge-I.R.P

度計の感度は式(2)で計算することができる。

光電変換素子の組合せはいろいろできるが、ここでは測定温度や応答速度などの制約から、Ge-PbS、及びGe-InSbの2種類の組合せを用いることにした。なお、Ge-InSb温度計ではInSb側にGeフィルタを入れることによって、高温における温度計の感度を向上させている。

図2はInSb温度計に使われている増幅回路の周波数特性である。ほぼ100kHzまでフラットな特性をもっており、これらのセルの応答速度が1μsと十分高速であることから、このタイプの2色温度計の周波数特性は図2で表されることになる。

3. 測定感度

3.1 温度校正に及ぼす輻射率の影響

2節で検討したように、本温度計は原理的には測定対象面の輻射率の影響を抑えて温度測定することができる。そこで、Ge-PbS温度計を用いて確かめることにした。SiC平板を電気的に加熱することで測定対象物とした。表面は輻射率を変化させるため、#60ダイヤモンド砥石で加工した面、及び#3000のダイヤモンドペーストによりラッピング加工した面の2種類を準備した。平板には裏側から測定面近傍にまで小孔が空けてあり、白金-白金ロジウム熱電対を埋め込むことによって温度を監視している。

SiCの温度をあげてゆき、そのときのGe素子、及びPbS素子の出力を温度で整理した結果が図3である。実線は式(1)における A_1, A_2 であり、 $\lambda_1=0.5\mu\text{m}$ 、 $\lambda_2=2.5\mu\text{m}$ として計算した相対値を表している。各素子からの出力には輻射率の違いが現れており、面粗さの細かいラッピング仕上げ面で出力が小さくなっている。

ところが、図4に示すように2つの素子の出力の比をとると、2種類のSiCからの出力は同じになり、輻射率の違いによる測定誤差を除去できることがわかる。実線は式(2)を計算して得られる理論値であるが、測定結果と良い一致をみている。したがって、図4を用いることにより輻射率の影響を受けることなく温度測定が可能となり、材質や表面性状が異なる試料ご

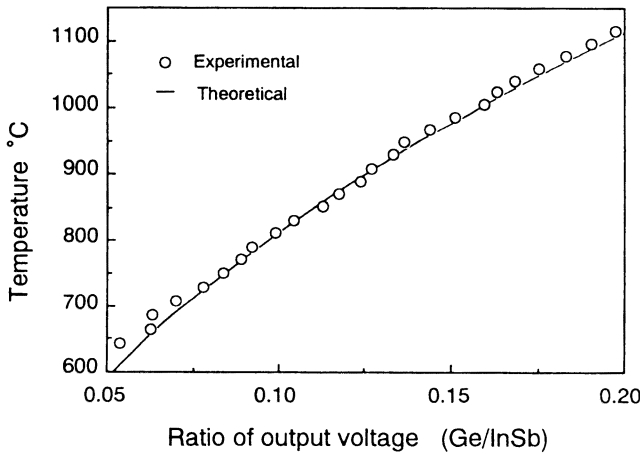


Fig. 5 Calibration curve of Ge-InSb two-color pyrometer

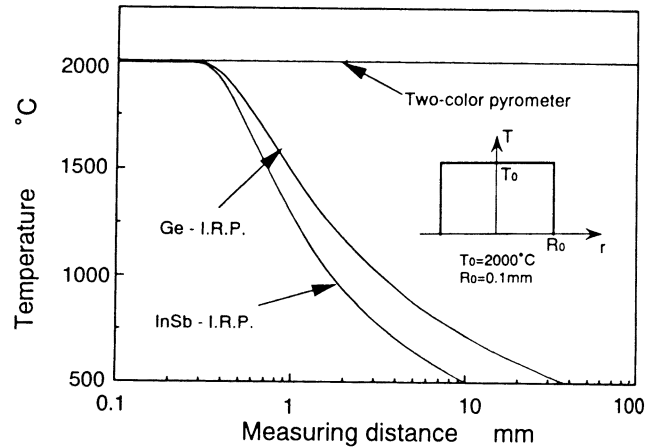


Fig. 7 Influence of measuring distance on temperature measured by two-color pyrometer when temperature of object is constant

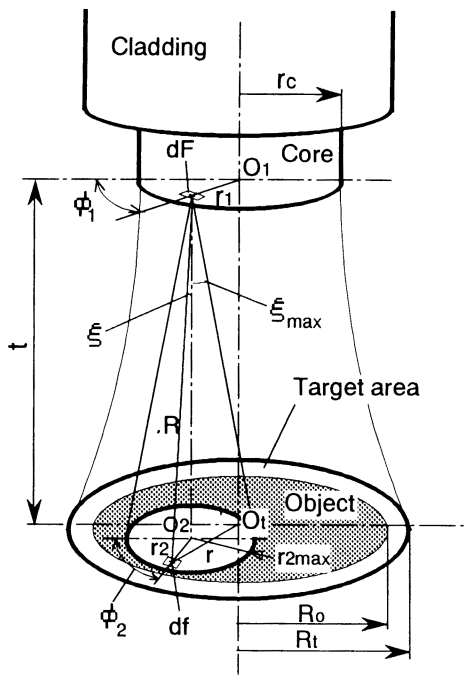


Fig. 6 Illustration of energy accepted at incidence face of optical fiber

とに校正実験を行う必要がないことになる。

図5はレーザー照射部のフラッシュ温度測定に用いる Ge-InSb 温度計の校正曲線である。実験値と理論値がよく一致していることから、校正には理論曲線を用いることにする。

3.2 測定領域の温度分布の影響

均一温度にある測定対象領域が温度計の感温面より大きい場合、温度計の出力は測定距離に影響されず、一定の出力が得られることはこれまでの光ファイバ型温度計と同じである³⁾。そこでここでは、測定対象領域が感温面に比べてはるかに小さい場合について、均一温度の場合、及び温度分布を持つ場合に対して温度計の出力を理論的に求めてみることにする。

3.2.1 解析方法

解析に使用したモデルを図6に示す。ファイバの中心軸は測定対象面に垂直に設置され、ファイバの中心と測定対象領域の中心は、同一直線上にあるとする。

測定対象領域の中心から距離 r にある微小領域 df から、距離 R だけ離れた光ファイバの微小領域 dF へ単位立体角当た

Table 1 Characteristics of fused fiber coupler

Graded index type quartz fiber
Core diameter, d_c : 100 μm
Cladding diameter : 150 μm
Refractive index of core (peak), n_1 : 1.47
Refractive index difference, Δ : 1.9%
Numerical aperture, NA : 0.29
Divided ratio : 1 : 1
Loss : 0.18 dB

り放射される赤外線エネルギー $de_{\lambda 0}$ は、

$$de_{\lambda 0} = J_{\lambda n}(r, T) \cos \xi df \quad (3)$$

で表される。ここで、 $J_{\lambda n}(r, T)$ は測定領域の法線方向へのスペクトル強度であり、 ξ は df と dF を結ぶ直線と対象面の法線との角度である。このとき、 df から dF への立体角を $d\Omega$ とすると、 $d\Omega = dF \cos \xi / R^2$ より、 df から dF への放射エネルギー de_{λ} は

$$de_{\lambda} = \frac{J_{\lambda n}(r, T) \cos^2 \xi df dF}{R^2} \quad (4)$$

となる。

したがって、光ファイバの受光面が受光する全エネルギー E_{λ} は

$$E_{\lambda} = \iint_F \iint_f \frac{J_{\lambda n}(r, T) \cos^2 \xi}{R^2} df dF \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 $dF = r_1 dr_1 d\phi_1$ 、 $df = r_2 dr_2 d\phi_2$ 。ここで、 r_2 の最大値 $r_{2\text{max}}$ は dF が受光する放射線を放射する対象面内の円形領域の半径であり、受光角で決まる。今、コア径 r_c のグレーデッド型光ファイバを考えると、コアの中心から距離 r_1 での受光角 $2\xi_{\text{max}}(\omega)$ は、 $\omega = \sin^{-1}(r_1/r_c)$ とする変数 ω ($0 \leq \omega \leq 2\pi$) を導入すると、 $\xi_{\text{max}}(\omega) = \tan^{-1}(n_1 g r_c \cos \omega)$ となる³⁾。ただし、 n_1 はコアのピーク屈折率、 $g(\omega) = \sqrt{2\Delta}/d_c$ はファイバの集束定数である。したがって、 dF が受光する放射線は、 dF からの垂線が測定対象面と交わった点 O_2 を中心として $r_{2\text{max}} = t \tan \xi_{\text{max}}$ を半径とする円内からの放射線となる。

3.2.2 均一温度分布の場合

温度測定領域が微小な場合、領域内の温度分布を無視し、一定温度とみなしてよい場合が多い。そこで、半径 $R_0 = 0.1 \text{ mm}$ の微小円形領域が $T_0 = 2000^\circ\text{C}$ と均一状態にあるとき、温度計の測定温度を式(5)を用いて計算した結果が図7である。光ファイバの特性値は表1のカプラに用いたファイバの値を用い

Table 2 Physical properties of PSZ

Density, ρ ; $5.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Melting point ; $2500\text{--}2600^\circ\text{C}$
Specific heat, C ; $480 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Thermal conductivity, k ; $3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Thermal diffusivity, α ; $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

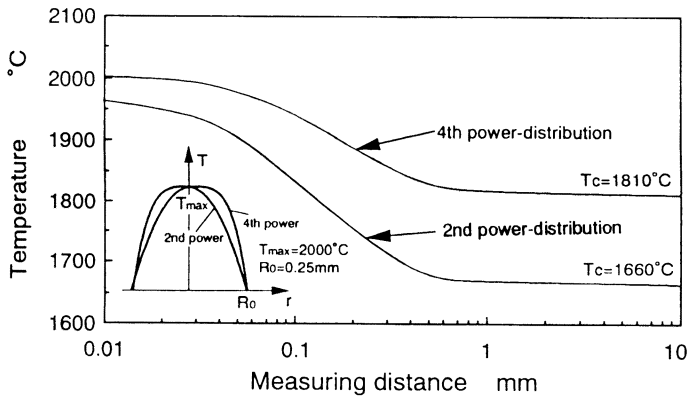


Fig. 8 Influence of measuring distance on temperature measured by two-color pyrometer when object has distribution in temperature

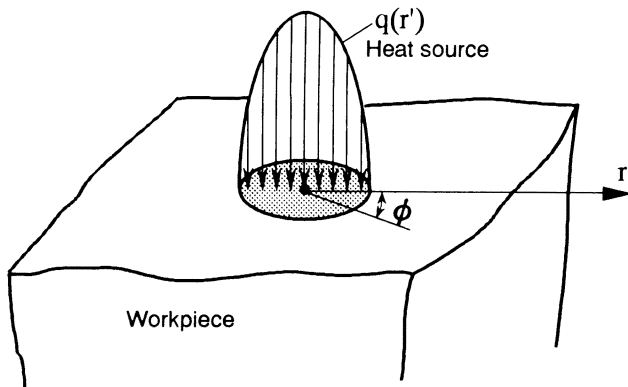


Fig. 9 Model of heat source

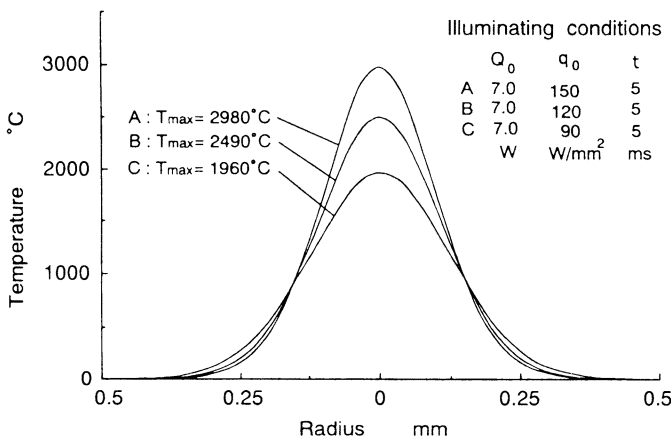


Fig. 10 Temperature distribution calculated numerically on surface of PSZ heated with Gaussian source

ている。

図にみるように、これまで使用してきた光ファイバ型の放射温度計では測定距離 t が数百 μm で測定誤差が出始め、 t が大きくなるとともに急速に低下している。これに対し、光カプラ

型 2 色温度計では測定距離にかかわらず測定温度 2000°C が得られている。したがって、温度が均一に分布している対象物に対して、対象領域の大きさや光ファイバの設定位置（測定距離）に関係なく温度測定が可能であることがわかる。

3.2.3 2 乗温度分布, 4 乗温度分布の場合

一般に測定領域は温度分布をもっている。そこで、 $r=0$ の中心で最高温度 T_{max} 、 $r=R_0$ の円周上で 0°C となる 2 乗分布、及び 4 乗分布をしている領域を考えることにする。 $T_{\text{max}}=2000^\circ\text{C}$ 、 $R_0=0.25 \text{ mm}$ の領域に対して本温度計の測定温度を計算した結果が図 8 である。

2 乗分布の場合、測定距離 t が小さいとき、最高温度に近い値が得られているが、 t が大きくなるとともに低下し、一定値へ収束している。このとき、収束温度/最高温度(= T_c/T_{max}) は 0.83 となり、この値は最高温度や対象領域の寸法が変化しても、ほぼ一定となる。すなわち、 t を測定対象領域の大きさに比べて十分大きく設定すれば、測定温度は t に依存せず、最高温度 T_{max} の 83% の温度が測定されることになる。したがって、この比を使うことにより測定結果から最高温度を精度よく推定することもできる。

4 乗分布においては、測定距離 t が小さい場合はほぼ最高温度が測定されるが、 t が大きくなると 2 乗分布の場合と同様低下し、一定値に収束している。しかし、低下の割合は 2 乗分布よりはるかに小さく、収束温度/最高温度(= T_c/T_{max}) も 0.89 と大きい。この値も最高温度や対象領域の寸法が変化しても、ほぼ一定となることから、この比を用いてやれば測定結果から精度よく最高温度を推定できる。

4. レーザ照射部のフラッシュ温度測定

本温度計の応用例として、 CO_2 レーザを部分安定化ジルコニア (PSZ) に照射したときの、照射領域の温度測定に適用してみた。ジルコニアの物性値を表 2 に示す。

4.1 理論による検討

レーザー照射領域は一般に中心部が高温となる温度分布をしている。そこで、図 9 に示すように、円筒座標系において、回転対象の中心から距離 r' における強度が $q(r')$ で表される分布熱源が、ある瞬間 ($t=0$) より連続的に発現した場合、表面上の任意の点 ($r, 0$) における時間 t での温度上昇は、

$$T(r, 0, t) = \frac{1}{\pi k} \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{q(r')}{(r'^2 + r^2 - 2r'r \cos \phi)^{1/2}} \times \text{erfc} \frac{(r'^2 + r^2 - 2r'r \cos \phi)^{1/2}}{(4\alpha t)^{1/2}} \cdot r' dr' d\phi \quad (6)$$

で与えられる⁵⁾。ただし、 k は熱伝導率、 α は熱拡散率である。今、ジルコニアに照射した熱の全エネルギー量が Q_0 であり、中心強度が q_0 のガウス分布をしているとすると

$$q(r') = q_0 \exp\left(-\frac{r'^2}{a^2}\right) = \frac{Q_0}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{r'^2}{a^2}\right) \quad (7)$$

ただし、 a は中心からの距離で、強度が q_0 の $1/e$ となる点を表す。

$Q_0=7.0 \text{ W}$ のレーザーを 5 ms 照射したときの、温度分布を種々の q_0 に対して求めた結果が図 10 である。ただし、照射エネルギーはすべて吸収されるとし、温度上昇に伴う相変化、熱物性の変化は考慮していない。このような温度分布を持つ領域に本温度計を適用したときの測定温度を解析的に求めた結果が図 11 である。図にみるように、測定距離 t を大きくするにつ

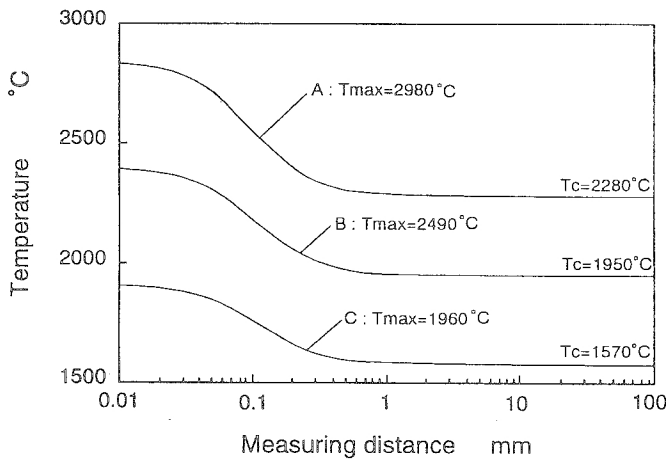


Fig. 11 Influence of measuring distance on temperature measured by two-color pyrometer when temperature distribution of object is given in Fig. 10

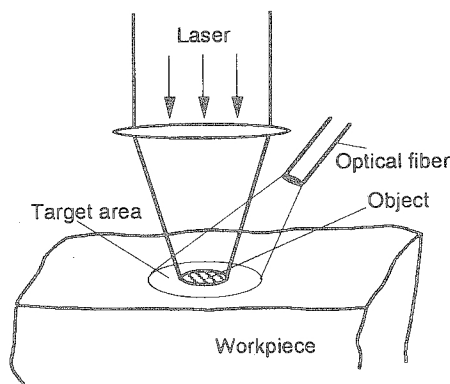


Fig. 12 Illustration of laser heating and temperature sensing

れて小さな値になってゆくが、数 mm 以上になるとほぼ一定値に収束しており、 t の影響を受けることなく測定できることがわかる。また、測定温度/最高温度 ($= T_c/T_{max}$) はおよそ 0.78 であり、この値を用いて測定温度から最高温度を推定することができる。

4.2 実験による検討

PSZ に CO₂ レーザ十数 W を半径約 0.1 mm の領域に 5 ms の間、矩形波状に照射したときのフラッシュ温度を測定した。フラッシュ温度は微小領域で短時間に極めて高温に達する過渡的温度である。測定部の概略図を図 12 に示す。光ファイバはやや斜めに設置されているが、測定精度への影響はない³⁾。

図 13 は InSb, 及び Ge からの出力であり、これらの比をとることによって温度を定量的に知ることができる。レーザ照射開始と同時に温度は急速に上昇するが、次第にゆるやかとなり、照射終了直前に最高温度に到達している。照射終了後は急速に冷却されている。図 14 は PSZ の表面の観察写真であり、照射エネルギーの異なる場合を比較している。融点は表 2 にあるように 2 500~2 600°C である。照射領域が均一温度であるとした場合の温度 T_c を測定し、中心部の最高温度 T_{max} を推定している。照射エネルギーの大きい (a) でははっきりと溶融痕ができており、このとき $T_c=2 340°C$ が融点に近い温度、 $T_{max}=3 000°C$ が融点をはるかに越えた温度になっている。エネルギーを小さくした (b) では照射中央部の表面が薄く溶融した程度であり、このとき $T_c=2 090°C$ が融点よりはるかに低く、 $T_{max}=2 700°C$ が融点を少し越えた温度となっている。し

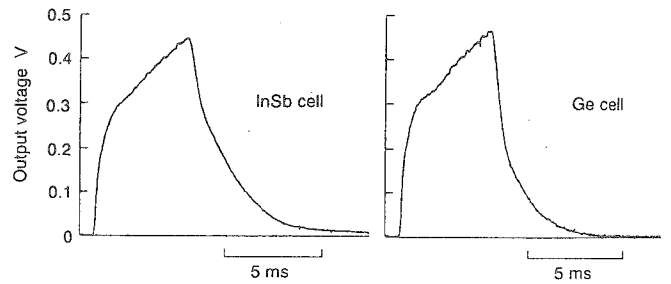


Fig. 13 Output waves of two-color pyrometer

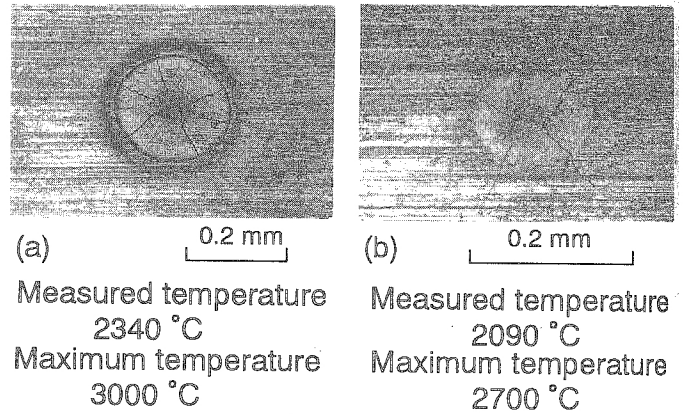


Fig. 14 Weld profiles on PSZ surface irradiated with CO₂ laser

たがって、これらの測定温度はほぼ妥当な値を示していると考えられることができる。

5. 結 言

光カプラを用いた新しいタイプの輻射温度計を試作し、この特性を理論・実験の両面から検討するとともに、CO₂ レーザをジルコニアに照射したときのフラッシュ温度の測定に適用してみた。その結果、輻射率の影響を抑えて測定できること、均一分布温度領域では、対象領域の大きさや測定距離に関係なく正確な温度測定が可能なること、分布を持つ温度領域では分布状態を知ることにより最高温度を推定できること、などの特性を備えており、レーザを照射したときのフラッシュ温度の測定に適用できることがわかった。

終わりに、レーザ加工機、研究試料の提供を受けた和泉電気(株)、および日本特殊陶業(株)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) T. Ueda, A. Hosokawa & A. Yamamoto : Studies on Temperature of Abrasive Grains in Grinding - Application of Infrared Radiation Pyrometer, ASME, J. Eng. Ind., 107, (1985) 127.
- 2) T. Ueda, A. Hosokawa & A. Yamamoto : Measurement of Grinding Temperature Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber, ASME, J. Eng. Ind., 108, (1986) 247.
- 3) 上田隆司, 岡田公之, 鳥居明人 : 光ファイバを用いた赤外線輻射温度計による研削機構の研究——砥粒切れ刃の温度と切削作用, 日本機械学会論文集 C 編, 55, 516 (1989) 2251.
- 4) 上田隆司, 金田泰幸, 佐藤昌彦, 杉田忠彰 : 光ファイバ型赤外線輻射温度計による加工温度の測定——温度計の特性, 日本機械学会論文集 C 編, 58, 545 (1992) 302.
- 5) 宮本 勇 : 大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究, 博士論文 (大阪大学) (1971) 54.