

多点二色測温法に関する基礎研究

屈 明 昌* 小林 三郎** 徳田 昌則**

Temperature Measurement by Processing the Radiation Spectrum on the Basis of Two-Color Pyrometry. By Mingchang QU, Saburo KOBAYASHI and Masanori TOKUDA.

A new pyrometric technique for temperature measurement has been developed by processing the radiation spectrum on the basis of two-color pyrometry.

The technique has the capability to measure the surface temperature of materials without the need to know the surface optical properties as required in the conventional two-color pyrometry. An important characteristic of this technique is that, one can examine the radiation spectra emitted from the surface of the material and select, by visual inspection, the wavelength range of the spectra suitable for the temperature estimation.

The present technique was applied to measure the surface temperatures of oxidized stainless steel specimens which were kept at a constant temperature and pulverised coal particles which were subjected to heating. The results of these tests proved that the technique is effective for surface temperature measurements. (Received June 28, 1991)

Keywords: surface temperature measurement, radiation spectrum, two-color radiation pyrometric principle.

1. 緒 言

放射測温法は非接触測温法として広く用いられている。被測定体の放射率が既知の場合は、単色法光高温計がよく使用されるが、他方、粉粒体のように放射率の測定自身が困難の場合、二色法の光高温計が使用される^{1) - 5)}。二色法は放射率で補正した Planck の熱放射式を用いて、二つの波長の放射エネルギーの比から温度を求める方法であり、その二波長の放射率が等しいとき、真温度を示す。実際に測温する場合、測定する二波長の放射率が等しいかどうか未知であるので、測温の信頼性に問題が残る。しかし、ある波長範囲の放射スペクトルを測定し、二色測温原理を適用すれば、被測定体の灰色性を判断することができ、測温の信頼性向上の可能性がある。

本研究では、分光器により測定されるある波長範囲の放射スペクトルに二色測温原理⁶⁾を適用し、温度を求める方法について検討した。この方法においては、多くの二波長の組合せが可能であるので、多数の温度値が得られる。この意味で、多点二色測温法と称する。この方法の特徴としては次の三つがあげられる。第一に、原子や分子の吸収、発光のスペクトルの波長を避けて、二色測温原理を適用できる。第二に、得られる多数の温度値の統計処理により、信頼度が評価できる。第三に、灰色性について、判断することができる。

2. 測 温 原 理

Planck によれば、黒体放射強度 I_b は波長 λ (μm) と絶対温度 T (K) の関数として

選鉱製錬研究所報告 第1866号 日本鉄鋼協会第120回講演大会 (1990年10月, 仙台) にて一部発表

* 東北大学大学院工学研究科

** 東北大学選鉱製錬研究所

$$I_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda T) - 1] \quad (1)$$

と表わされる. $C_1 (3.743 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2)$ と $C_2 (1.4387 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K})$ は定数である⁷⁾.
 $\lambda < 0.9 \mu\text{m}$, $T < 3000 \text{ K}$ のとき, $\exp(C_2 / \lambda T) \gg 1$ であるから, 式 (1) は

$$I_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} / \exp(C_2 / \lambda T) \quad (2)$$

で近似できる (Wien の近似式). 黒体でない場合には分光放射率 $\varepsilon(\lambda)$ が 1 ではないので, 式 (2) は

$$I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \varepsilon(\lambda) / \exp(C_2 / \lambda T) \quad (3)$$

と書かれる. ただし, $I(\lambda, T)$ は非黒体の放射強度である. 二つの波長 λ_1, λ_2 を式 (3) に代入して, 強度の比を取れば, 温度 T が

$$T = \frac{C_2 (1 / \lambda_2 - 1 / \lambda_1)}{\ln \{ (\lambda_1 / \lambda_2)^5 [\varepsilon(\lambda_2) / \varepsilon(\lambda_1)] [I(\lambda_1, T) / I(\lambda_2, T)] \}} \quad (4)$$

のように求まる. これが二色測温の原理式である.

一方, 分光器で測定される放射エネルギーは

$$E(\lambda, T) = t A \Omega F(\lambda) I(\lambda, T) \quad (5)$$

である. ここで, $E(\lambda, T)$ は放射エネルギーの測定値, t は測定時間, A は測定表面積, Ω は被測定体が光検出面に張る立体角である. $F(\lambda)$ は測定装置の感度波長特性で, 被測定体の表面条件とは無関係である. ここで, 係数 $C(\lambda)$ を式 (6)

$$C(\lambda) = t A \Omega F(\lambda) \quad (6)$$

のように定義すると, 式 (5) より

$$I(\lambda, T) = E(\lambda, T) / C(\lambda) \quad (7)$$

を得る. $C(\lambda)$ は λ 以外に t , A , Ω にも依存するが, スペクトルの波長特性をとくに強調するために $C(\lambda)$ と表わした. $C(\lambda)$ は放射エネルギーの測定値を放射エネルギー強度に転換するための係数である. 黒体の測定から

$$C(\lambda) = E_b(\lambda, T) / I_b(\lambda, T) \quad (8)$$

が得られる. ここで, $E_b(\lambda, T)$ は黒体炉から放射するエネルギーの測定値である. 式 (7) を式 (4) に代入すれば

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \{ (\lambda_1/\lambda_2)^5 [\varepsilon(\lambda_2)/\varepsilon(\lambda_1)] [E(\lambda_1, T)/E(\lambda_2, T)] [C(\lambda_2)/C(\lambda_1)] \}} \quad (9)$$

を得る. 二つの波長 λ_1 と λ_2 に関して, t , A , Ω は同一値であるから, 式(9)の分母に含まれる比 $C(\lambda_2)/C(\lambda_1)$ は比 $F(\lambda_2)/F(\lambda_1)$ となる. すなわち, $C(\lambda)$ の比は被測定体の条件とは無関係である. 従って, 式(8)から得られた $C(\lambda)$ の値をそのまま黒体でないときにも適用できる. 測定される面が測定波長範囲内で灰色体に近い場合は式(9)に含まれる比 $\varepsilon(\lambda_2)/\varepsilon(\lambda_1)$ は1に近似でき, 式(9)は

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \{ (\lambda_1/\lambda_2)^5 [E(\lambda_1, T)/E(\lambda_2, T)] [C(\lambda_2)/C(\lambda_1)] \}} \quad (10)$$

となる. 本測温法においては, 以上の原理をスペクトル全体に適用して温度を求める. なお, 実用的には式(6)の $C(\lambda)$ より, $C(\lambda)$ のスペクトルの最大値 $C(\lambda)_{\max}$ で規格化した $C_n(\lambda)$

$$C_n(\lambda) = C(\lambda)/C(\lambda)_{\max} \quad (11)$$

を用いる方が便利である.

3. 測定装置および測定方法

3.1 測定装置

本研究の測温システムは光ファイバー, 分光器, マルチチャンネル・スペクトルアナライザー(MDS検出器), データ処理用パソコン, 擬似黒体炉および炉の温度コントロール装置より構成される. このシステムの概念図を Fig. 1 に示す. 試料からの放射はバンドル型ライトガイドにより分光器に導かれる. ライトガイドを構成する石英光ファイバーのコア径は $100\mu\text{m}$ である. ライトガイドの受光面直径は 2mm である. 本研究での測定波長範囲 $682.1\sim 835.7\text{nm}$ では透過率がほぼ 100% である. ファイバの開口数は 0.2 で, 視野角は 22° である. 使用した分光器の焦点距離は 25cm である. 回折格子としては 600l/mm , ブレーズ波長 500nm のものを使用し, 測定波長範囲は $682.1\sim 835.7\text{nm}$ となるよう回折格子の角度を設定した. フィルタを使用して 500nm より長い二次以上の回折光をカットした. 分光器の波長精度は $\pm 0.1\text{nm}$ である. MDS

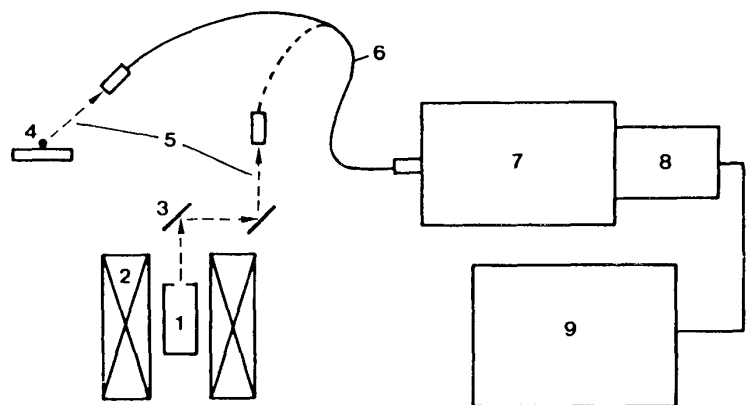


Fig. 1 Temperature measurement system.
1.black body cell; 2.electric furnace; 3.mirror;
4.sample; 5.thermal radiation; 6.light guide;
7.spectrometer; 8.sensor array(1024ch);
9.data processing system.

検出器は Fig. 2 のように構成される. イメージインテンシファイア (①) で増幅された入射光 (回折光) が, マルチチャンネル・シリコンフォトダイオード・アレイ (②) に入射する. このダイオードは光子が入射したときに起電力を発生するいわゆる光起電型検出器 (Photovoltaic

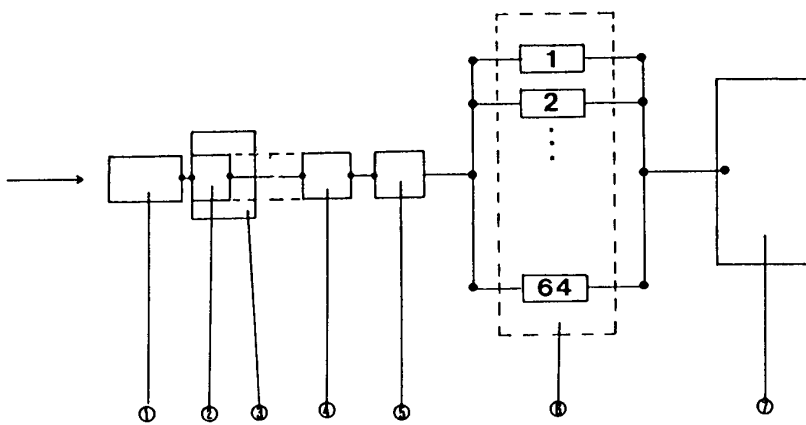


Fig. 2 Diagram of sensor array and data processing system.
 ①image intensifier; ②silicon photodiode array;
 ③electronic cooler; ④amplifier & A-D converter;
 ⑤accumulator; ⑥memory block(64); ⑦data processing system.

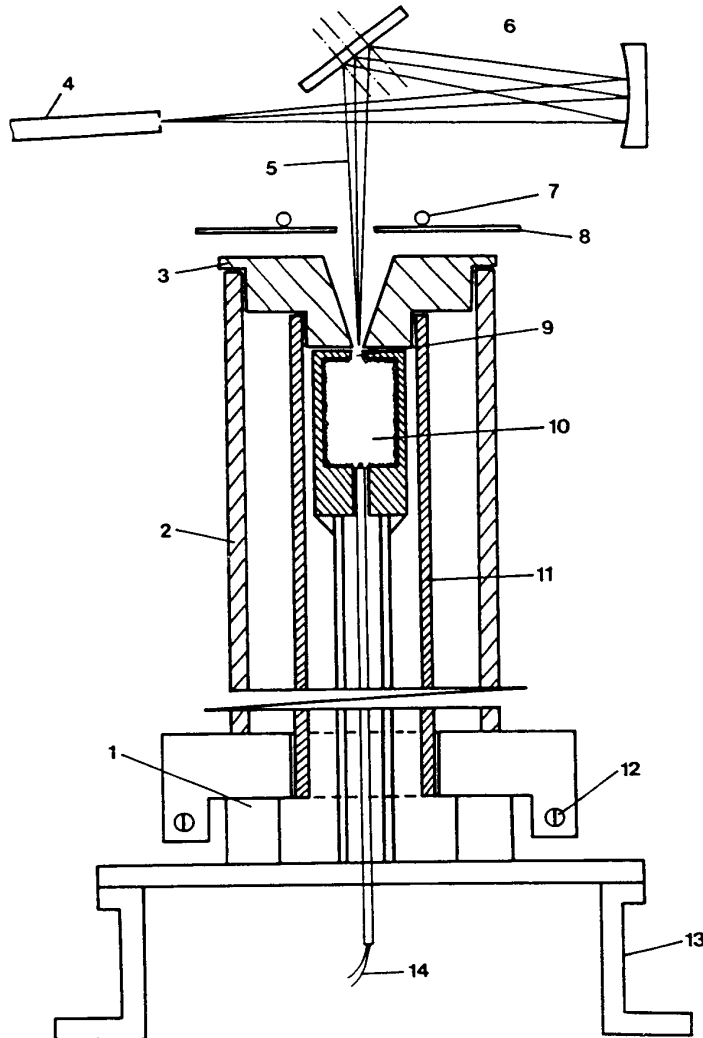


Fig. 3 Schematic diagram of black body furnace.
 1.support; 2.refractory tube; 3.refractory brick;
 4.light guide; 5.radiation beam; 6.mirror; 7.cooling tube;
 8.baffle; 9.hole; 10.black body cell; 11.SiC heater;
 12.electric terminal; 13.base;
 14.thermocouple (Pt-PtRh13%).

detector) である。アレイを構成する素子は約 $25\mu\text{m}$ ごとに配列し、全体で 25mm の長さにおいて 1024 個配列している。各素子をチャンネルと呼ぶ。分光された回折光は回折角に応じて、イメージンシファイアを介して異なったダイオード素子に入射する。ダイオードアレイに発生した起電圧の走査時間間隔は最小 $5\mu\text{s}/\text{channel}$ で、この場合アレイに関する一走査は約 $5\text{ms}/\text{array}$ である。すなわち、最少 5ms で一つのスペクトルが得られる。積

算回路(⑤)で任意の回数だけ走査した光強度の積算値は各ダイオード素子ごとにメモリブロック(⑥)に記録される。擬似黒体炉は加工を施したシリコニット管($25\phi\times 400\times 300$ 両端接続端子型)を発熱体として自作した。装置の構造と光路を Fig. 3 に示す。黒体セルは高さ 19mm 、内径 8mm のアルミナ坩堝で、その内壁面の乱反射性と吸収性を向上するため、研磨用 SiC 粉を塗布した。放射孔の直径は 3mm である。放射孔の黒度のチェックは行っていないので、完全黒体であるとは必ずしも断定できない。黒体炉上部の平面鏡と凹面鏡によって、放射孔の像を光ファイバーの受光面上に結像させ、放射孔からの放射光のみを光ファイバーに導入する。

3. 2 係数 $C(\lambda)$ の値

測定系が 600°C 以下の放射光を十分検出できないこと、黒体炉用発熱体の最高加熱温度が 1400°C であることを考慮をして、黒体セル温度 600°C から 1400°C までの間、9温度水準で放射孔からの放射エネルギーを測定した。黒体放射エネルギー測定値 $E_b(\lambda, T)$ の例を Fig. 4 に示す。黒体セル温度の違いにより、スペクトルは強度ばかりでなく分布も異なる。 I_b としては式(1)からの計算

値, E_b としては測定値を用いて, 式 (8) と式 (11) から $C_n(\lambda)$ を求めると, Fig. 5 のようになる. 9 温度水準間で $C_n(\lambda)$ 曲線の有意の差は認められなかった.

3.3 測定方法

多点二色測温法においては Fig. 6 のような手順で温度を求める. 被測定体の放射エネルギーを 682.1~835.7 nm の波長範囲内で測定し, これを Fig. 5 に示した係数で割ると, 放射強度のスペクトルになる. このスペクトルについて, 波長差 $\lambda_2 - \lambda_1 = 30.0$ nm (200チャンネル) として式 (10) を適用した. 実際に, 温度を求めるために使用した波長範囲は 712.1 nm (第200チャンネル) から 803.5 nm (第800チャンネル) までの範囲である. このようにすると, 一つのスペクトルから400の温度値が求められる. 712.1 nm 以下と 803.5 nm 以上の点を用いない理由はその波長範囲の両端の分光精度が悪いためである. 被測定体の温度 T_0 は次式

$$T_0 = \Sigma T_i / n \quad (12)$$

により計算する. ここで, n は二色温度値の数 (400), T_i はそれぞれの二色温度である. T_0 の標準偏差 σ は次式

$$\sigma = \Sigma (T_i - T_0)^2 / n \quad (13)$$

で与えられる.

4. 測温法の検討と応用

4.1 温度一定の場合

純窒素雰囲気中で温度を一定に保って, 表面を予め十分酸化したステンレス円板 (直径 22 mm, 厚さ 2 mm) の表面温度を測定した. 試料加熱装置 (装置 (a)) を Fig. 7 に示す. 装置 (a) では炉内は二重管にし, かつ内管の表面は研磨材を塗布し, 乱反射面として試料付近の温度を一様にした. 線直径 0.3 mm の熱電対 (Pt-PtRh 13%) の接点ビーズ (直径 0.75 mm) をステンレ

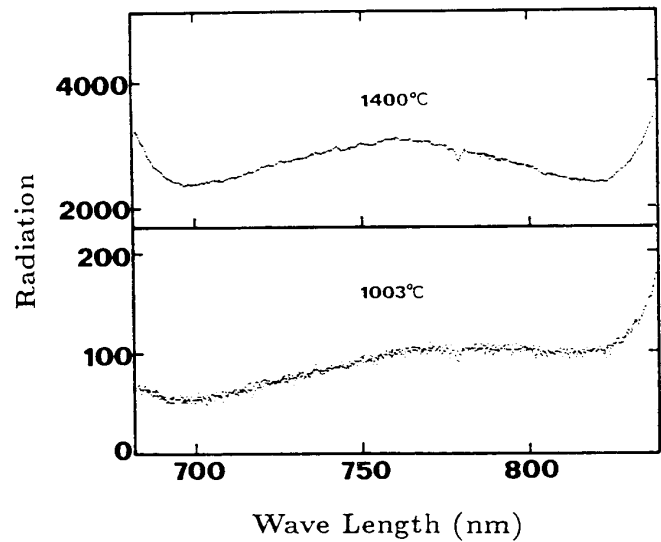


Fig. 4 Spectra of radiation from black body.

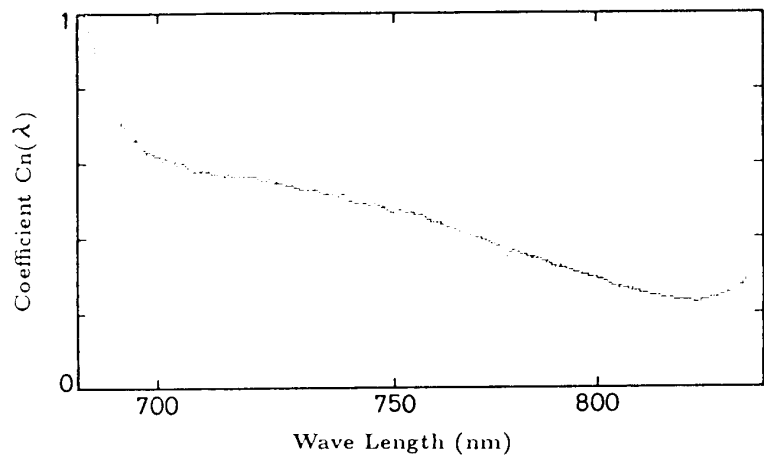


Fig. 5 Spectrum of coefficient $C_n(\lambda)$.

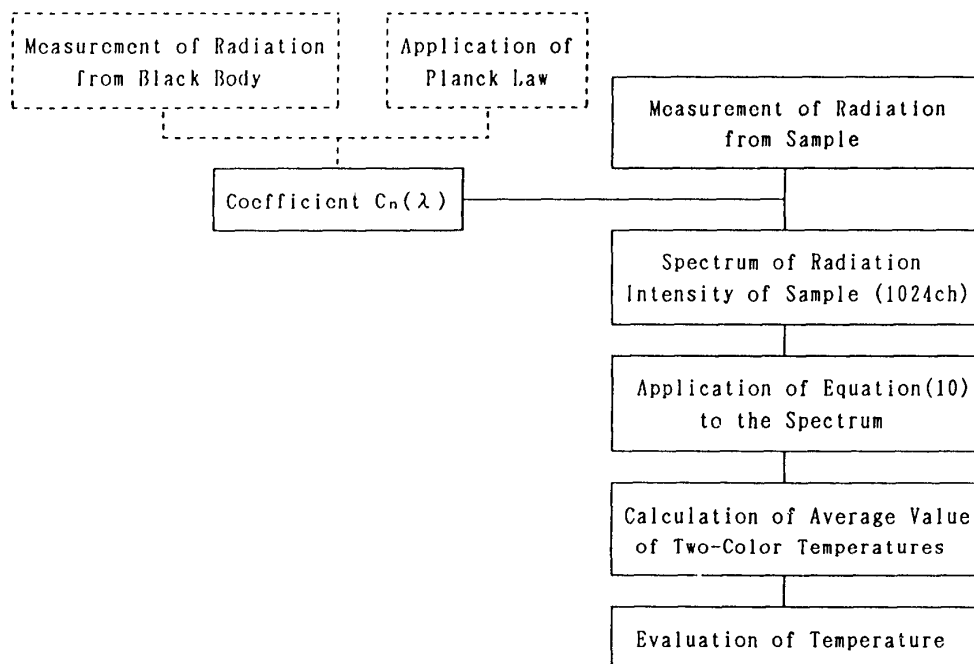


Fig. 6 Procedure of temperature evaluation

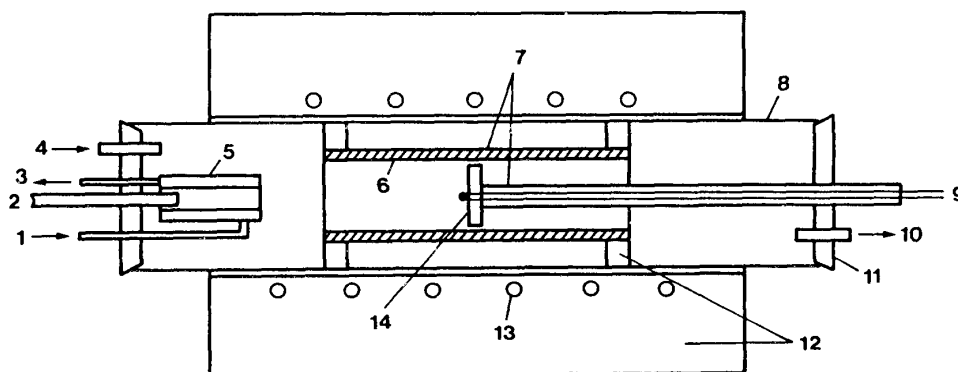


Fig. 7 Schematic daigram of experimental apparatus(a).

- 1.water inlet; 2.light guide; 3.water outlet; 4.gas inlet; 5.water-jacket;
 6.diffusive surface; 7.alumina tube; 8.quartz tube;
 9.thermocouple (Pt-PtRh13%); 10.gas outlet; 11.Si plug;
 12.refractory; 13.heater; 14.circular disk sample of stainless steel.

ス円板表面と接触した。被測定面は一様な温度場にあるので、熱電対の温度は表面温度と等しいと考えられる。これは多点二色測温と熱電対測温を互いに比較するためである。熱電対温度を943℃一定に保持したとき、ステンレス円板の放射強度の最大値で規格化した放射スペクトル(曲線A)と、求めた二色温度(B)をFig. 8に示す。(B)は400個の二色温度値を含む。温度は完全に一定ではなく、全波長範囲にわたって必ずしも灰色体ではないことがわかる。式(12)より T_0 を求めると、946℃となり、熱電対温度と約3℃の差がある。同じ方法で四つの温度水準に測定した結果をFig. 9に示す。いずれも1%の誤差範囲内で熱電対と多点二色測温法の測温結

果が一致している。

4.2 測定値の分散について

測定値の分散程度は式(13)で評価される。波長差 ($\lambda_2 - \lambda_1$) を変えると二色温度値の分散程度が変わる。波長差が小さいほど、温度値の分散程度が大きくなる。これは波長差が小さいほど放射エネルギー測定値の検出揺らぎの影響が大きくなることを示す。標準偏差 σ と波長差 (1チャンネル = 0.15 nm) の関係を

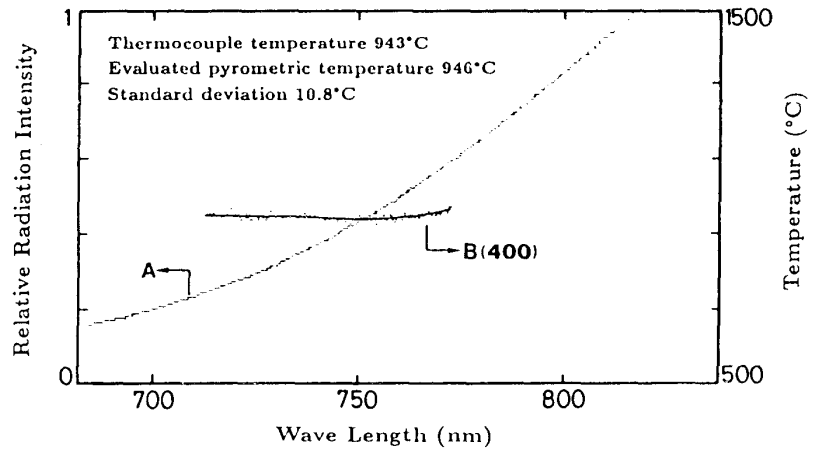


Fig. 8 Radiation spectrum and pyrometric temperature of the surface of stainless plate.

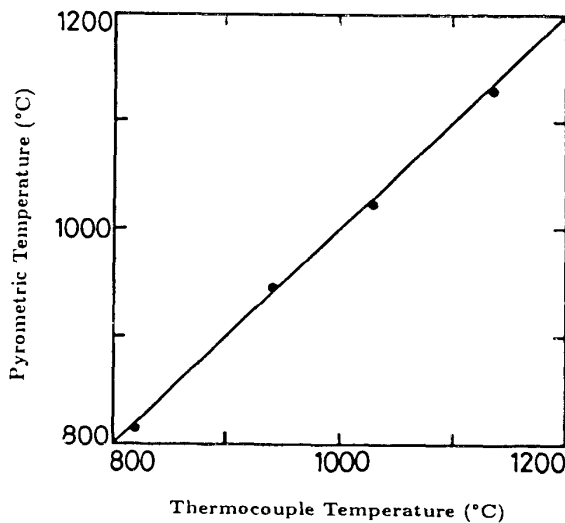


Fig. 9 Comparison of thermocouple and pyrometric temperatures.

Fig. 10 に示す。チャンネル間隔が200 (波長差 30 nm) より小さい領域では、チャンネル間隔の減少とともに、 σ は著しく増大する。200チャンネル間隔のとき、 σ が約20°Cであることから、本研究の場合、 $\sigma \leq 20^\circ\text{C}$ を温度評価の基準とする。 σ が20°Cより大きい場合、チャンネル間隔を大きくして、 σ が20°Cより小さくなるまで繰り返して上述した計算をする。

4.3 温度が変化する場合

装置 (a) は急速に温度を変化することができないので、Fig. 11 に示した加熱装置 (b) を用いて、被測定体の温度変化がある場合の本測温法の適用性を検討した。空気中で SiC 棒状発熱体 (直径8 mm, 長さ300 mm) の外側に同心円状にステンレス管 (厚さ0.3 mm, 直径12 mm) を置いた。ステンレス管の表面は予め加熱して十分酸化した。線直径0.3 mm の熱電対 (Pt-

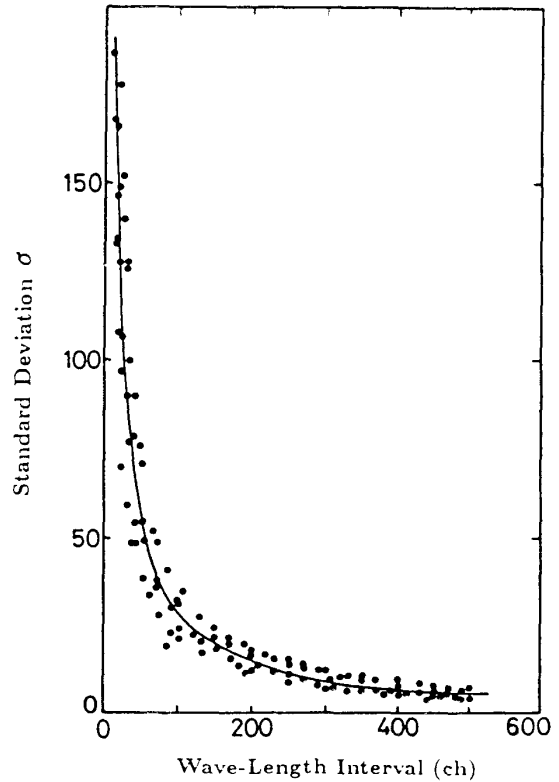


Fig. 10 Relationship between wave-length interval and standard deviation of temperatures. (1ch=0.15nm)

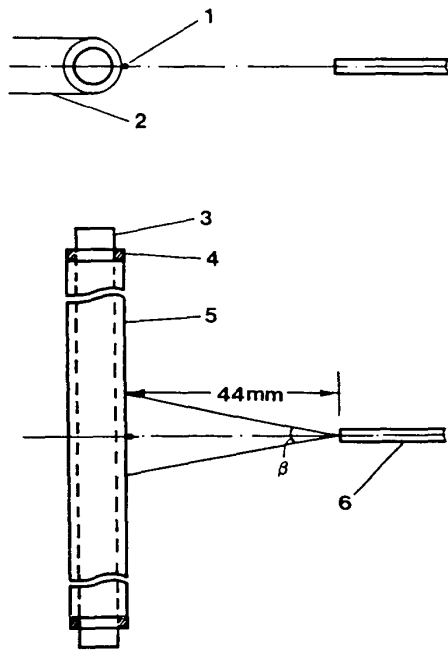


Fig. 11 Schematic diagram of cylindrical plate of stainless steel(b).

- 1.bead of thermocouple;
- 2.thermocouple(Pt - PtRh13%);
- 3.insulation ring; 4.stainless steel plate tube;
- 5.SiC bar heater; 6.light guide.

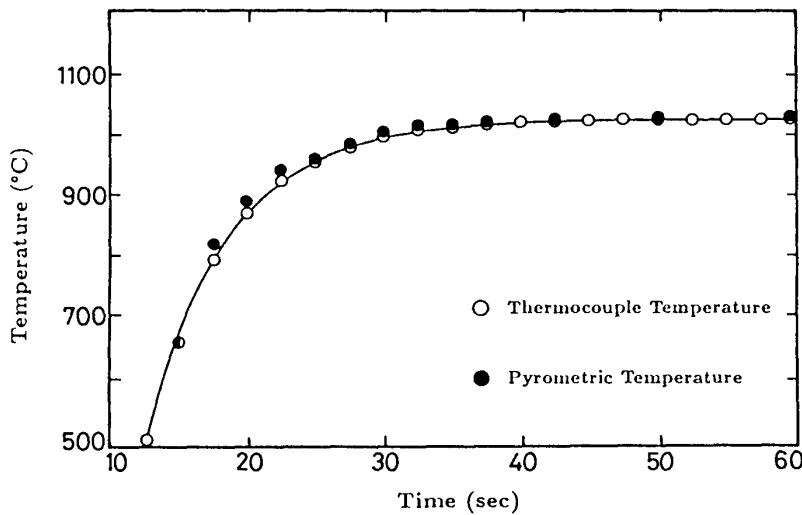


Fig. 12 Surface temperatures of heated-up cylindrical tube of stainless steel. (Diameter of thermocouple bead 0.30mm)

るが、これは周囲の温度が低いので、熱電対温度が表面温度と一致しないためと考えられる。

測定装置 (b) で、温度制御をせず、温度が室温から変化する場合のステンレス管表面温度を熱電対と多点二色测温法で同時に測定した。一つのスペクトル (1024 ch) の測定時間は10 ms とした。高い S/N 比が得られない600°C以下の测温は行わなかった。接点ビーズ直径が0.3 mm の場合の温度の時間変化を Fig. 12(最大昇温速度60°C/sec) に、両温度の関係を Fig. 13 に示す。

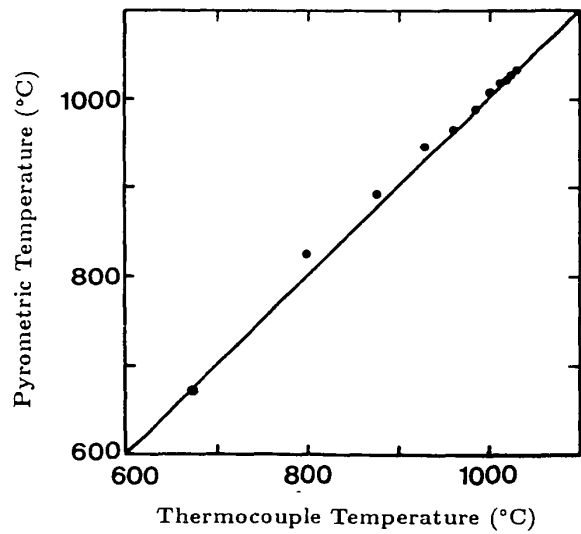


Fig. 13 Comparison of pyrometric and thermocouple temperatures.

PtRh 13%) を Fig. 11 の上部に示したようにステンレス表面外周に沿って半周だけ巻いた。接点ビーズの直径は0.3と0.75 mm の二種類とした。ライトガイドはステンレス管表面に垂直に配置し、

ライトガイドの受光面とステンレス管との距離は44 mm とした。加熱したステンレス管表面の管長方向の温度分布を熱電対で測定し、光ファイバーの視野 (視角 β は22°である) の範囲内で、ステンレス管表面の温度が均一であることを確かめた。装置 (a) の測定結果と比較するため、まず、ステンレス管表面の熱電対温度を1043°C一定に保持し、测温した。 T_0 を求めると、1052°Cとなり、熱電対温度より約9°C高い。測定結果は装置 (a) より数度悪くな

両図において、昇温速度が大きい領域（800℃近傍）で両温度差が大きくなっている。温度差は最大3%である。これは熱電対の温度追従性が悪いためと考えられる。昇温速度が小さい領域では両温度は1%以内で一致する。接点ビーズ直径0.75 mm の場合を Fig. 14 に示す。この場合は熱電対温度が約80℃低くなっている。これは熱電対のビーズが大きいために、試料表面より温度の低い空間部分の影響を強く受けるためと考えられる。

4. 4 応 用

熱電対が使えない粒子の温度測定に本測温法を応用した。結果の一例を Fig. 15 に示す。この場合は、純窒素雰囲気中で、炭酸ガスレーザの照射下⁸⁾での分散黒鉛粒子（粒径0.15～0.21 mm）の表面温度の時間変化（最大昇温速度170℃/sec）である。

5. 結 言

- (1) 分光器で測定する放射スペクトルに二色測温原理を適用して、温度を求める方法について検討した。
- (2) 表面温度測定に関する熱電対と本方法との比較を行った結果、本方法の方が信頼性が高いことがわかった。
- (3) 試料表面温度が変化する場合については、昇温速度60℃/secまで実験的に検討した。
- (4) 放射エネルギー検出器のS/N比が600℃以下では低いので、本方法の適用はできない。

文 献

- 1) Bach, J.H. ; Street, P.J. ; Twamley, C.S. : Journal of Physics E : Scientific Instruments, **3** (1970), 281.
- 2) Ayling, A.B. ; Smith, I.W. : Combustion and Flame, **18** (1972), 173.
- 3) Niksa, S. ; Mitchell, R.E. ; Hencken, K.R. ; Tichenor, D.A. : Combustion and Flame, **60** (1984), 183.
- 4) Timothy, L.D. ; Sarofim, A.F. ; Beer, J.M. : Symposium on Combustion, **19th** (1982), 1123.
- 5) Mitchell, R.E. ; Mclean, W.J. : Symposium on Combustion, **19th** (1982), 1113.
- 6) 平田 浩, 片山裕之, 小林三郎 : 界面移動現象部会中間報告書, (1989.3), 82.
- 7) Holman, J.P. : Heat Transfer, (1976).
- 8) 屈 明昌, 小林三郎, 徳田昌則 : CAMP-ISIJ, **3** (1990), 1042.

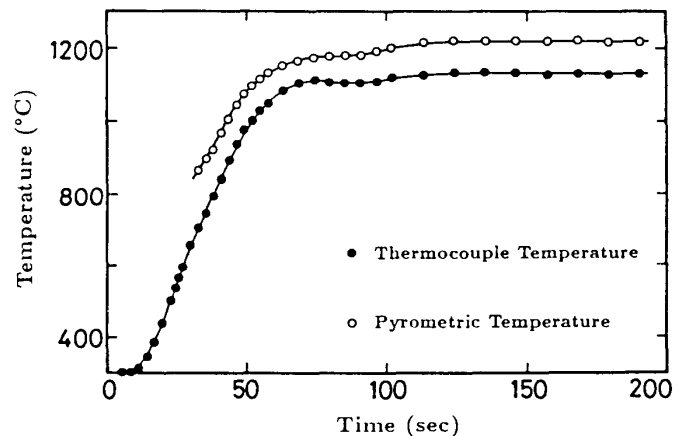


Fig. 14 Surface temperatures of heated-up cylindrical tube of stainless steel.

(Diameter of thermocouple bead 0.75mm)

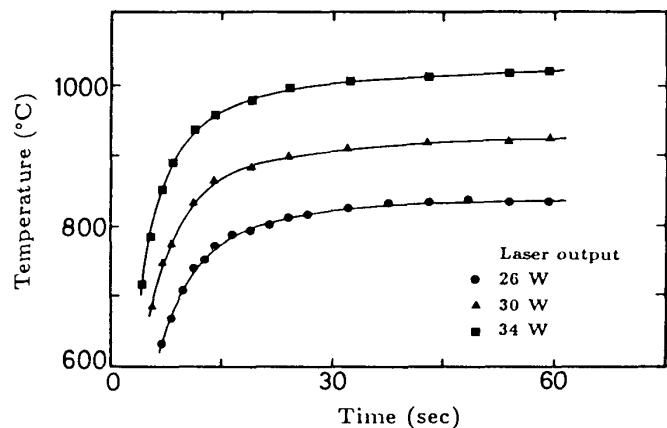


Fig. 15 Temperature changes of graphite particles under laser beam irradiation.