

# 技術報告 放射温度計の新温度標準体系

田村 清\*・栗田 邦夫\*・岩村 忠昭\*2

## Improvement of Traceability for Radiation Pyrometers in the Steel Industry

Kiyoshi TAMURA, Kunio KURITA and Tadaaki IWAMURA

### Synopsis:

A traceability system for radiation pyrometers has been established. In this system a radiation pyrometer is calibrated beforehand at several fixed points, and it is used as the primary standard pyrometer. In the range of 800°C–1350°C an automatic optical pyrometer is used as the primary standard and in the range between 500°C–800°C the 0.9 μm silicon-cell pyrometer is used.

The emissivity of blackbody has been calculated by the integral equation method, and then the systematic errors have been evaluated as follows: The primary standard calibrated at the fixed points has an accuracy better than ±1K; The secondary standard (Si-cell radiation pyrometers) has an accuracy better than ±2K, when calibrated by the primary standard. Radiation pyrometers can be calibrated by using the above secondary standard, and have an accuracy better than ±3K which is accurate enough for use in the steel industry.

### 1. 緒 言

鉄鋼業においては多くの放射温度計が実操業に使用されている。非接触計測法のもつ長所、(1)過酷な測定環境に対処できること、(2)プロセスに与える擾乱が小さいこと、が鉄鋼プロセスのもつニーズに適合するためである。近年プロセスの連続化や高速化、製品に要求される品質の高度化、さらには省エネルギー、などの観点から放射温度計の使用範囲はいつそう拡大し、その測定精度の向上は厳しく要求されるようになった。これにとともに、その精度維持のための標準体系の整備は、きわめて重要なものとなつてきた。

従来、放射温度計は標準電球と黒体炉を用いて校正されてきた。しかし、この標準体系は校正方法の巧拙に依存すること、およびその精度維持が容易に行えないこと、などの問題があり精度・安定性のいずれの点においても今日の要求を満たし得ない。

当社では昭和 51 年より、定点黒体炉と自動光高温計に注目し、その再現性のよいことを長期間の実験により確認し、両者をトレーサビリティの中心においた標準体系をつくりあげた<sup>1)2)</sup>。

また同時期に計量研究所においても、標準用シリコン単色放射温度計<sup>3)4)</sup>と定点黒体炉<sup>5)</sup>の研究を系統的に進めてきた。日本学術振興会製鋼第 19 委員会第 2 分科会における共同研究(当社も参加)によりこの方式の実用性

が確認され、最近多くの製鉄所において、この標準体系の導入がはかられている<sup>6)~8)</sup>。

本報告では、これらの経緯を当社におけるデータを中心に紹介し、新しい標準体系の評価を行う。さらに新体系への移行の過程で得られた放射温度計や黒体炉に関する知見を述べ、今後の標準体系の技術動向についての考察を行う。

### 2. 従来の放射温度計の校正方法

#### 2.1 誤差発生要因

放射温度計は黒体炉により校正される。黒体炉はその内部に均一な温度分布をもつ円筒、球形またはその他形状の空洞で、校正はこの黒体炉温度を、標準温度計と被校正放射温度計とにより同時に、または交互に測定し、前者に対する後者の指示の差を求めることにより行われる。ここに標準温度計は黒体炉温度を決定する基準となるものであり、精度が高くかつ国家標準に対して誤差が定量評価されていることが必要である。

放射温度計の校正精度に影響するもう一つの問題は黒体炉の放射率である。一般に黒体の放射は PLANCK の式で定義される。すなわち  $T(K)$  の黒体から放射される波長  $\lambda$  の放射  $P(\lambda, T)$  は(1)式で表される。

$$P(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

昭和 58 年 11 月 9 日受付 (Received Nov. 9, 1983)

\* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

\*2 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

$$C_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$$

$\lambda T \leq 3 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  の条件, すなわち鉄鋼における通常の測定条件下では(1)式を簡単化した WIEN の式(2)で近似できる.

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

また放射温度計として全放射型温度計を利用する場合は, STEFAN-BOLTZMANN の式(3)がよく用いられる.

$$R(T) = \sigma T^4 \quad \dots\dots(3)$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/K}^4 \cdot \text{m}^2$$

実際の黒体炉では空洞内温度が一様でなく, したがってその放射率は1とは異なる. 黒体炉の真の温度を  $T$  (K), この温度における放射温度計の実効波長を  $\lambda$ , この温度・波長における放射率を  $\epsilon_\lambda$  とするとき, 普通  $\epsilon_\lambda \approx 1$  であるため, 放射温度計は真温度  $T$  (K) を示さず, (4)式で定義される輝度温度  $S_\lambda$  (K) を表示する. すなわち,

$$W(\lambda, S_\lambda) = \epsilon_\lambda \cdot W(\lambda, T) \quad \dots\dots(4)$$

(2), (4)式を用い, (5)式が得られ, これより  $S_\lambda$  が求められる.

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_\lambda} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \epsilon_\lambda \quad \dots\dots(5)$$

したがって誤差  $\Delta S_\lambda$  は,

$$\Delta S_\lambda = S_\lambda - T \text{ (K)} \quad \dots\dots(6)$$

ここに真温度  $T$  (K) は標準温度計の読みから与えられる. (3)~(5)式から,  $\epsilon$  が変わるときの誤差を計算すると, Table 1 のようになる. (熱電対自身の誤差は含まず). 放射率が低下するほど, また被校正放射温度計の実効波長が長くなるほど, 誤差は大きくなる. この大きさは, 標準として使用するには大きすぎる.

## 2.2 標準温度計

標準温度計としては, 光高温計, 放射温度計および熱電対の3種類の温度計が考えられる. このうち光高温計はトレーサブルであり, かつ被校正温度計と同じく放射を利用する温度計であるため, 従来は標準体系の一つとしてよく用いられてきた. しかし誤差が大きく ( $\pm 5$  K) かつ使用範囲も  $1000^\circ\text{C}$  以上に限られるため, 今後の標

Table 1. Calculated calibration error of thermocouple standard at  $1000^\circ\text{C}$ .

Wave length		Error (K)				
		0.65 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	Total
$\epsilon$	0.995	-0.36	-0.56	-1.12	-2.11	-1.59
	0.990	-0.73	-1.13	-2.26	-4.24	-3.19
	0.980	-1.47	-2.26	-4.53	-8.50	-6.41
	0.970	-2.22	-3.41	-6.82	-12.79	-9.65

準温度計としては適当でない. また放射温度計にはトレーサビリティが成立せず, このままでは使えない. これに対し熱電対はトレーサブルであり, かつ  $1000^\circ\text{C}$  近傍における誤差も  $\pm 10 \mu\text{V}$  ( $< 1$  K) と小さく, 信頼できる手段としてよく用いられている. しかしこの方式の欠点は, 前記のように黒体炉の放射率の影響を大きく受けることである.

## 3. 新しい放射温度計の標準体系

### 3.1 放射温度計標準の考え方

ここで, トレーサビリティのある放射温度計 (実効波長  $\lambda_0$ ) を仮定し, (5)式に対応する(5')式を考える.

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_{\lambda_0}} = \frac{\lambda_0}{C_2} \ln \epsilon_{\lambda_0} \quad \dots\dots(5')$$

(5), (5')式より,

$$\frac{1}{S_{\lambda_0}} - \frac{1}{S_\lambda} = \frac{\lambda_0}{C_2} \ln \epsilon_{\lambda_0} \quad \dots\dots(7)$$

(7)式は実効波長  $\lambda_0$  の放射温度計を標準とし, 同じく実効波長  $\lambda$  の放射温度計を校正する場合の温度指示の関係を示すもので, 誤差は(8)式で表される.

$$\Delta S_\lambda = S_\lambda - S_{\lambda_0} \quad \dots\dots(8)$$

(6)式に比し(8)式の誤差は小さい. とくに標準および被校正温度計の波長特性が等しい場合には, (7)式から  $\Delta S_\lambda = 0$  となり, 校正は放射率の影響を受けない. したがって放射温度計を基準とする方式は, 熱電対基準よりも原理的にまさる. そこで問題はいかにしてトレーサブルな標準放射温度計を準備するかにある.

### 3.2 新標準体系の採用

以上の結果から, トレーサブルな放射温度計すなわち標準放射温度計を実現することが本研究の主課題となった. その方法として定点黒体炉 (銅点および銀点) と自動光高温計 (Leeds & Northrup 社製, 8642 型, 温度範囲  $800^\circ\text{C}$  以上) を導入した. すなわち前者により IPTS で定義された温度定点を実現し, これをトランスファすることにより, 後者を標準放射温度計として機能させる体系を構成する. 本研究はこの体系の実用性を追求したものである.

なお標準放射温度計は前項に述べたように被校正放射温度計の種類に応じ, その波長域ごとに用意するのが望ましい. しかし現状では, 精度・安定度・視野の大きさ, などの点から実現はむずかしく, そこで使用波長域に問題はあがるが, 上記温度計 (波長  $\lambda = 0.655 \mu\text{m}$ ) を標準放射温度計として選んだ.

長期間の実験により, 定点黒体炉・自動光高温計とも, 精度の点で十分に標準として満足できる機能をもつ

ことを確認し、この組み合わせをもつて当社における温度標準として使用することとした。次節以下にこの標準に関して詳しく考察する。また、温度標準を黒体炉から被校正温度計に移しかえる (トランスファする) ときの誤差については次章でとりあげる。

3.3 定点黒体炉

3.3.1 温度定点

定点黒体炉の基本部は定点金属溶融部と空洞部であり、本研究で試作した構造を Fig. 1 に示す。

銅などの定点金属は棒状の素材をるつぼの形状に合わせて加工し、るつぼ容積の約 85% を満たすように充填する。昇温は溶融石英製炉芯管に黒鉛るつぼを装着して、アルゴンガス雰囲気中 (流量約 0.2 l/min) で行つた。この定点黒体炉は黒鉛るつぼが容易に交換できるという長所をもつ。

使用範囲を中低温域まで拡大することを考慮し、Table 2 に示す 8 種の定点を準備した。ほぼ 100°C ごとに定点が得られる。これらの精度を確認するため、Type-R 熱電対で融解点および凝固点を測定した結果、いずれも 0.3 K 以内で一致した<sup>9)</sup>。Cu-Ag 共晶点、Cu-Al 共晶点は他の定点と同様の精度であつたが、むしろ融解点のプラトーの方が平坦で良い結果を得ている。

3.3.2 定点実現精度

定点の実現精度を評価する場合には、その再現性と系統的な偏りとが問題になる。このうち再現性については長期間の試験の結果、測定系の誤差を含めて ±0.2 K 以内であつた<sup>2)</sup>。

系統的な偏りの原因としては、完全黒体 ( $\epsilon = 1$ ) でないこと、サイトチューブの厚さ方向に温度差ができるこ

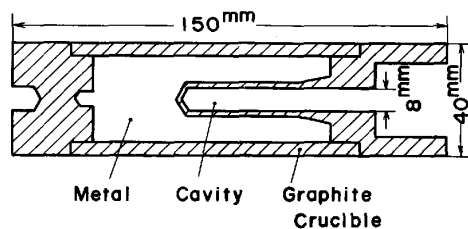


Fig. 1. Configuration of the blackbody radiator in the fixed point furnace.

Table 2. List of fixed points.

	No.	Fixed points	Temperature, °C
Above 800°C	1	Cu	1084.88
	2	Ag	961.93
200°C to 800°C	3	Cu-Ag	779.6
	4	Al	660.46
	5	Cu-Al	548.26
	6	Zn	419.58
	7	Pb	327.502
	8	Sn	231.9681

とおよび定点金属に含まれる不純物による影響などが考えられる。これらはいずれも測定値を低くする方向に作用する。以下、原因別に検討する。

(1) 実効放射率による誤差

サイトチューブ内壁に温度分布があるときの実効放射率を計算するため、つぎのように温度分布を近似した。

$$T(x) = T_0(2 - \cosh Px) \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $T(x)$ : サイトチューブ  $x$  点の温度

$x$ : 半径を単位長さとする、サイトチューブ内壁の底面からの距離

$T_0$ : サイトチューブ底面の温度

$P$ : 温度分布のパラメータ

熱電対による温度分布の実測結果から、サイトチューブ中間部の底面に対する温度降下は約 3 K であり、 $P = 0.01$  と近似できる<sup>10)</sup>。この条件で、波長 0.65  $\mu\text{m}$  の銅点における実効放射率は  $\epsilon = 0.9993$  であつた (計算方法は第 4 章に示した)。またこれによる誤差は (6) 式を用いて  $\Delta S_1 = 0.06 \text{ K}$  であつた。銀点においても同様の結果を得ている。

(2) サイトチューブ厚さ方向の温度差による誤差

測定されるサイトチューブ内壁の温度は、外壁 (定点金属に直接触れているのでその温度は定点に等しいと考えられる) からの熱伝導と、内壁からの放射によつて決まる。サイトチューブ底部およびその近傍においては、壁面に平行な熱流束は無視できるので、壁面に垂直なものだけを考える。このとき熱流束  $F$  は放射の放出と吸収との差として次式で表される。

$$F = \alpha H - \epsilon_0 \sigma T_t^4 \dots\dots\dots (10)$$

一方、実効放射率  $\epsilon$  は、

$$\epsilon = \epsilon_0 + \rho_0 H / \sigma T_t^4 \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $\epsilon_0$ : 固有放射率

$\alpha$ : 吸収率 ( $\alpha = \epsilon_0$ )

$H$ : 他のすべての面からの入射量

$\rho_0$ : 反射率 ( $\rho_0 + \alpha = 1$ )

$T_t$ : 内壁温度

(10), (11) 式から次式を得る。

$$F = \frac{\epsilon_0}{1 - \epsilon_0} (\epsilon - 1) \sigma T_t^4 \dots\dots\dots (12)$$

また  $F$  は外壁 (その温度  $T_{cu}$  は銅点に等しい) から内壁 (温度  $T_t$ ) への伝導による熱流束であり、

$$F = \frac{k'(T_t - T_{cu})}{d} \dots\dots\dots (13)$$

$k'$ : サイトチューブ (黒鉛) の熱伝導率

$d$ : サイトチューブ厚み

$\epsilon = 0.999$ ,  $\epsilon_0 = 0.9$  として (12), (13) 式から温度差

$(T_t - T_{eu})$  を計算すると、 $T_t - T_{eu} = -0.07 \text{ K}$ .

### (3) 定点金属に含まれる不純物による誤差

不純物の混入あるいは定点金属の酸化は定点温度を低下させ、プラトーに勾配をつけるなどの原因となる。銅、銀とも純度 99.99% のものを使用した結果、約 100 回の測定を通じてきわめて安定した再現性をもっていた<sup>2)</sup>。融解・凝固のプラトーをみると、融解の開始・完了の温度差約 0.05 K が認められたが、凝固においては特に有意な勾配は認められなかつた。これらの現象から、不純物による温度低下は小さく、過大に見積つても 0.1 K 以内であると考えられる。

以上(1)、(2)、(3)の結果から系統的な偏りは 0.25 K 以内である。これに再現性  $\pm 0.2 \text{ K}$  を加えても定点実現精度は  $\pm 0.5 \text{ K}$  を超えない。

#### 3.3.3 計量研型定点黒体炉との比較実験

計量研究所作成の定点黒体炉は、るつぼ容積が小さく、このため昇温時間が短いので使いやすい。

この定点黒体炉の回送実験（昭和 55 年 3 月～8 月）の分担として、当社標準体系とのつき合わせ試験（各々 5 回交互に測定）を行つた。その結果は銅点および銀点について 0.12 K 以内で一致しており、実用上十分に高い精度をもつことが確認された。

### 3.4 標準放射温度計

前述のように標準放射温度計として Leeds & Northrup 社の自動光高温計を採用した。本装置の精度は、 $\pm 0.2 \text{ K}$  以下の分解能と、1 カ月間における使用実績から、同程度の再現性が得られることが確認された。しかし 2 個の定点校正だけでは定点以外における精度を保証できない。そこで定点黒体炉を用いて、800, 900, 1000 °C 近傍の 3 点にて熱電対との比較測定を行つた。その結果は  $\pm 0.3 \text{ K}$  以内で一致し、かつそのばらつきは定点測定におけるばらつきと有意な差はなかつた。一方、熱電対自身も定点において校正されている。熱電対はその起電力特性が安定していることから、2 点において前項で示した  $\pm 0.5 \text{ K}$  の精度で校正されるので、800～1100 °C の範囲ではほぼ同程度の精度といえる。したがって定点炉を含むこの温度標準体系の誤差は  $\pm 0.5 \text{ K}$  に前記の  $\pm 0.3 \text{ K}$  を加え、 $\pm 0.8 \text{ K}$  といえる。若干の余裕を与えて  $\pm 1 \text{ K}$  を本体系の精度とした。

なお、1 年以上、延べ 200 h をこえる使用において、自動光高温計の指示に 0.5 K 程度の経時変化が認められたが、これにより十分な安定度をもつことが確認された。

自動光高温計の使用範囲は 800 °C 以上に制限されることから、以上の作業につづき、より低温域への拡張

Table 3. Specifications of standard radiation pyrometer.

	Automatic optical	0.9 $\mu\text{m}$ silicon
Temperature range	800 ~ 1350 °C	450 ~ 800 °C
Accuracy	$\pm 2 \text{ K}$ (800 ~ 1200 °C)	$\pm 1 \text{ K}$ (400 ~ 1100 °C)
Size of source effect	0.2 % (1.2 $\mu$ ~ 25 $\mu$ )	0.3 % (6 $\mu$ ~ 50 $\mu$ )
Resolution	0.15 K	0.03 K (600 °C)
Stability	$\sim 1 \text{ K/year}$	$\sim 1 \text{ K/year}$

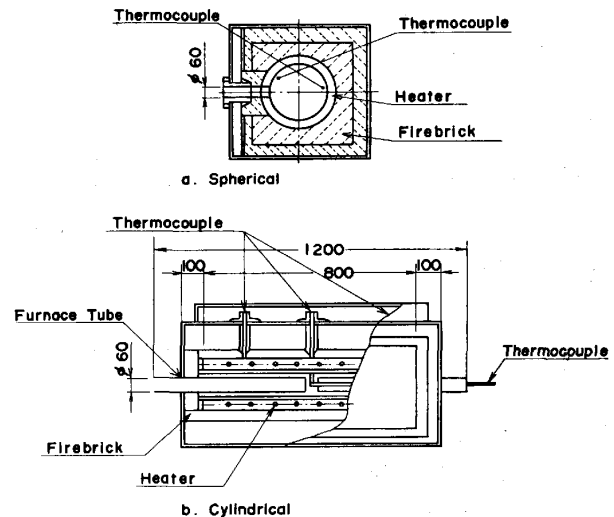


Fig. 2. Commercial blackbody furnace.

をはかつた。当初、市販のシリコン型放射温度計を準備したが、後に計量研究所開発の 0.9  $\mu\text{m}$  シリコン単色放射温度計を導入した。この結果、現在は 800 °C 以上では 0.65  $\mu\text{m}$  帯の自動光高温計を、800 °C 以下 500 °C までは 0.9  $\mu\text{m}$  帯のシリコン放射温度計を使用する。両放射温度計の仕様を Table 3 に示す。

さらに中低温域 (200～800 °C) における体系化を目的として、同様の方法で定点黒体炉による校正が可能なら、波長 2  $\mu\text{m}$  近傍の PbS 型標準放射温度計についても検討を行つた。しかし現在までの状況は再現性の点で問題があり、この型の標準放射温度計の整備は今後の課題となつている。

## 4. 黒体炉の特性評価

### 4.1 黒体炉の構造

現在よく用いられている黒体炉は Fig. 2 に示す球形および円筒形の 2 種類である。いずれも基準熱電対 (Type R) が炉底付近に挿入され、この温度を参考に放射温度計の校正が行われる。高精度の黒体炉では開口径を小さくして温度分布を一様にし、黒体の条件を満たすようにくふうされているが、通常は開口径が 50～60 mm  $\phi$  と大きく、黒体条件を十分に満たさない。

円筒形と球形とを比較すると、前者は炉底が奥まった所にあるため、炉底部の温度均一性が得られやすく、また長手方向の炉温分布を可変にすることにより、実効放射率をある程度自由に操作できるという利点がある。このため以下、円筒形黒体炉のみを対象として、実効放射率の計算を行い、最適炉温分布、および波長帯域の相違による輝度温度差を導出して、標準移しかえ誤差の定量的評価を試みる。

4.2 実効放射率の計算

炉壁が完全拡散面であることおよび固有放射率が一定であることを仮定すると、相互反射の結果定まる実効放射率  $\epsilon(x_1)$  の一般式は(14)式で表される。

$$\epsilon(x_1) = \epsilon_0 f(x_1) + (1 - \epsilon_0) \int_s K(x_1, x) \epsilon(x) dS(x) \dots\dots\dots (14)$$

- ただし、 $f(x_1) = \Psi_b(T(x_1)) / \Psi_b(T(x_0))$
- $[f(x_1) \approx (T(x_1) / T(x_0))^n]$
- $\Psi_b(T(x_1))$  :  $x_1$  点における温度  $T(x_1)$  によって定まる黒体放射量
- $x_0$  : 基準点
- $\epsilon_0$  : 壁面の固有放射率
- $K(x_1, x)$  : 面素  $ds(x_1)$ ,  $ds(x)$  間の幾何学的関係から定まる固有照度係数
- $S$  : 黒体炉空洞内壁の全面積
- $n \approx C_2 / \lambda T$

半径を単位長さとし、深さが  $L$  の円筒形空洞に Fig. 3 のように座標を与えると次のようになる。(開口しほりのある場合も同様の形に記述できる。)

$$\epsilon(x) = \epsilon_0 f(x) + (1 - \epsilon_0) \int_0^L K(x, \xi) \epsilon(\xi) d\xi + (1 - \epsilon_0) \int_0^1 K(x, y) \epsilon(y) dy \dots\dots (15)$$

$$\epsilon(y) = \epsilon_0 f(y) + (1 - \epsilon_0) \int_0^L K(y, x) \epsilon(x) dx \dots\dots (16)$$

$$K(x, \xi) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{|x - \xi| \{ (x - \xi)^2 + 6 \}}{\{ (x - \xi)^2 + 4 \}^{3/2}} \right] \dots\dots\dots (17)$$

$$K(x, y) = \frac{2xy(x^2 - y^2 + 1)}{\{ (x^2 + y^2 - 1)^2 + 4x^2 \}^{3/2}} \dots\dots\dots (18)$$

$$K(y, x) = \frac{2x(x^2 - y^2 + 1)}{\{ (x^2 + y^2 - 1)^2 + 4x^2 \}^{3/2}} \dots\dots\dots (19)$$

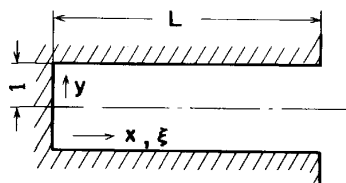


Fig. 3. Configuration of the cylinder of the blackbody furnace.

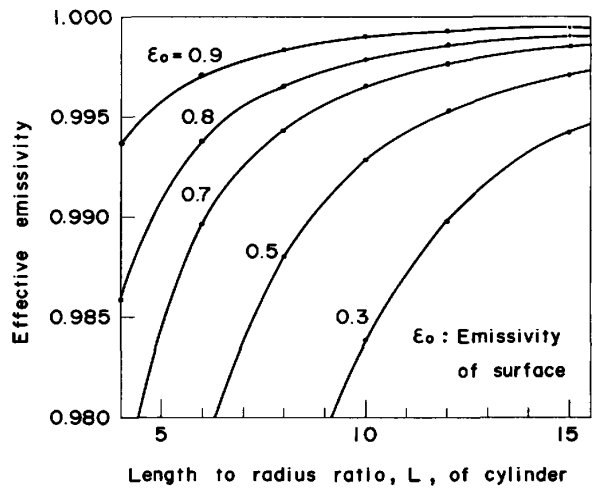
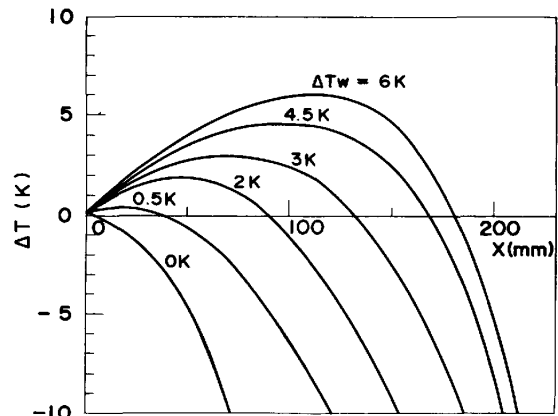


Fig. 4. Effective emissivity of a cylindrical cavity with diffusely reflecting walls.



$\Delta T = T(x) - T(x_0)$   
 $T(x)$  = wall temperature at x  
 $T(x_0)$  = target temperature ( $x=0$ )  
 $\Delta T_w$  = maximum value of  $\Delta T$

Fig. 5. Temperature distribution along the cylinder in the blackbody furnace.

この積分方程式は、逐次代入法を適用することにより比較的簡単に解くことができ精度もよい<sup>(11)(12)</sup>。また、内壁温度が一樣でない場合でも(14)式の  $f(x_1)$  を用いて解くことができる。なお、温度分布一樣のときは、 $f(x_1) = 1$  であり波長依存性はないが、温度分布があるときは  $f(x_1)$  の数値は波長によつて異なるので、実効放射率が波長依存性をもつことになる。

温度分布一樣の場合に、上記の方法で得られた円筒形空洞の底面中心部の実効放射率を Fig. 4 に示す。この結果は JIS<sup>(13)</sup> とよく一致している。

つぎに温度分布の実測値を用いて実効放射率を計算する。ただし、計算条件は下記のとおりとする。

- (1) 円筒形状 : 半径 = 30 mm  
 長さ = 390 mm ( $L=13$ )
- (2) 温度分布 : Fig. 5 に示す 6 個の温度パターン

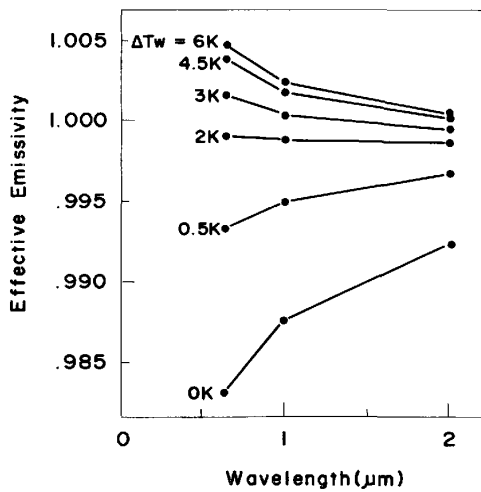


Fig. 6. Effective emissivities of the blackbody furnace. (Calculation in case of a high emissivity wall,  $\epsilon_0=0.8$ ,  $T(x_0)=1000^\circ\text{C}$ )

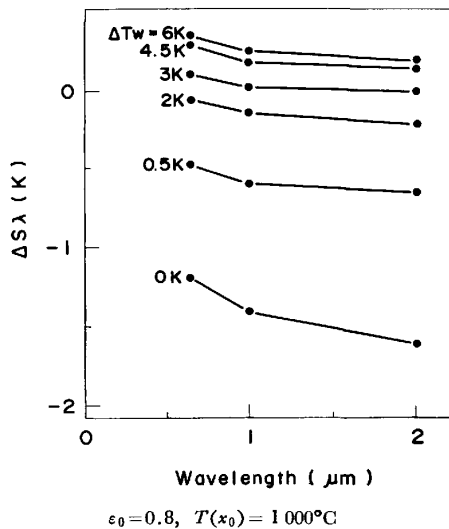


Fig. 7. Errors of brightness temperature. (Calculated from the effective emissivity values in Fig. 6)

(ただし軸に垂直な方向は温度分布一様とした.)

(3) 固有放射率: 0.3 および 0.8

(4) 波長:  $0.65\ \mu\text{m}$ ,  $1.0\ \mu\text{m}$  および  $2.0\ \mu\text{m}$

Fig. 5 において  $\Delta T_w$  は管壁温度と炉底温度との差の最大値を示す。

固有放射率  $\epsilon_0=0.8$  における, 波長により異なる実効放射率の計算を Fig. 6 に, (5)式を用いて計算した輝度温度差  $\Delta S_\lambda (=S_\lambda - T(x_0))$  を Fig. 7 に示す。

実効放射率の計算結果からつぎのことがわかる。

(1) 実効放射率  $\epsilon_\lambda$  は管壁の温度分布によつて変わりやすく, 管壁の温度降下が急な時は短波長側の  $\epsilon_\lambda$  が低くなる。また管壁の温度が高く  $\epsilon_\lambda$  が 1 以上になるような時は, 短波長の方がより高くなる傾向にある。この

中間に, 波長間の実効放射率変化が小さく, また輝度温度変化の小さな領域がある。

(2)  $\epsilon_\lambda$  が波長によらず一定になる温度分布は固有放射率  $\epsilon_0=0.8$  の場合,  $\Delta T_w \approx 2\ \text{K}$  であり, このとき  $\epsilon_\lambda \approx 0.998$  である。同様に  $\epsilon_0=0.3$  の場合,  $\Delta T_w \approx 3\ \text{K}$  であり, このとき  $\epsilon_\lambda \approx 0.992$  である。これは温度分布一様として計算した実効放射率  $\epsilon$  (Fig. 4 に示す  $L=13$ ,  $\epsilon_0=0.8$  および  $0.3$  における数値,  $\epsilon=0.9987$ ,  $\epsilon=0.9918$ ) にほぼ等しい。

(3) 光高温計 (波長  $0.65\ \mu\text{m}$ ) を基準としたときの各波長 ( $\lambda=1.0\ \mu\text{m}$ ,  $2.0\ \mu\text{m}$ ,  $4.0\ \mu\text{m}$ ) の輝度温度変化は, 計算から次のとおりである。  $\Delta T_w=0.5\ \text{K} \sim 6\ \text{K}$  の範囲で, この数値はほとんど一定であり, 固有放射率  $\epsilon_0$  により決まり, 温度分布によらない。また  $\epsilon_\lambda = \text{const.}$  と仮定したときよりも, 大幅に減少している (固有放射率  $\epsilon_0=0.8$  の場合)。

$$\left. \begin{aligned} S_{0.65} - S_{1.0} &\approx 0.5\ \text{K} \\ S_{0.65} - S_{2.0} &\approx 1.5\ \text{K} \end{aligned} \right\} (\epsilon_0=0.3)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{0.65} - S_{1.0} &\approx 0.1\ \text{K} \\ S_{0.65} - S_{2.0} &\approx 0.2\ \text{K} \\ S_{0.65} - S_{4.0} &\approx 0.5\ \text{K} \end{aligned} \right\} (\epsilon_0=0.8)$$

上記の数値は温度分布一様の空洞実効放射率によつても計算できる (実効放射率が波長によらず一定になるとき, この数値は温度分布一様の実効放射率と等しいことが, (15), (16)式を用いて,  $f(x_1) = [T(x_1)/T(x_0)]^n$  と近似できる範囲で, 示されるため)。

(4) 輝度温度変化  $S_{0.65} - S_{2.0}$  が  $0.2\ \text{K}$  以下であるためには実効放射率  $\epsilon_{0.65}$  は  $0.99$  以上である必要がある。この範囲の実効放射率を得ることは  $\epsilon_0 \approx 0.8$  の高放射率材質を用いれば難しくない。

(5) 上記の結果は, 放射温度計を校正用黒体炉の基準とすれば, 管壁の温度分布の影響をほとんど受けることなく, 熱電対を基準として, 温度分布一様で高い実効放射率の黒体炉を用いたときと同様の精度で標準の移しかえができることを示している。

(6) 以上を総合して, 黒体炉による校正誤差を  $\pm 0.5 \sim 1.0\ \text{K}$  とする。炉温分布, 炉壁形状, 炉壁材質などの経時変化や放射温度計の実効波長などに対する厳密な考察をするとき  $\pm 0.5\ \text{K}$  を得ることができ, 通常は  $\pm 1.0\ \text{K}$  を黒体炉の校正誤差とする。

## 5. 放射温度計

### 5.1 当社における標準系

当社における体系は, 定点黒体炉および標準放射温度計からなる温度標準を技術研究所で保有して, これを 1 次標準とし, 各事業所では, この 1 次標準で校正された

2次標準を保有する。2次標準としては主に Si セル型放射温度計であり、一部 Ge セルおよび PbS セル型が用いられている。Si セルについては、複数個保有して相互比較ができる体制にしている。

### 5.2 2次標準

2次標準として用いる Si セルの誤差  $\Delta T_2$  は、1次標準放射温度計の誤差  $\Delta T_1$ 、標準移しかえ誤差  $\Delta T_r$ 、放射温度計固有の誤差  $\Delta T_e$ 、および安定度に関連したばらつき  $\Delta T_s$  からなり、これまでの結果の他、 $\Delta T_s$  は  $\pm 1.0$  K/y 以内に入っていることから、

$$\begin{aligned}\Delta T_2 &= \Delta T_1 + \Delta T_r + \Delta T_e + \Delta T_s \\ &= \pm 1.0\text{K} \pm 0.5\text{K} \pm 0.5\text{K} \pm 1.0\text{K}\end{aligned}$$

すなわち、計算の上で  $\pm 3.0$  K 以内に押さえられる。また、 $\Delta T_r$  および  $\Delta T_s$  をさらに減少させて、 $\Delta T_2 = \pm 2.0$  K とすることも可能である。ただし、 $\Delta T_e$  については次節に述べる。

Ge セル、PbS セル型は、 $\Delta T_s = \pm 3.0$  K/y 程度とばらつき大であるため、2次標準としては、直接、定点黒体炉で校正できる型式のものを検討している。これにより、 $\Delta T_p$  を定点黒体炉の偏りとして、 $\Delta T_2$  は、

$$\begin{aligned}\Delta T_2 &= \Delta T_p + \Delta T_r + \Delta T_e + \Delta T_s \\ &= \pm 0.3\text{K} \pm 0.5\text{K} \pm 0.5\text{K} \pm 0.5\text{K}\end{aligned}$$

すなわち、 $\pm 2.0$  K 以内とすることが期待できる。(上記  $\Delta T_s$  は 1d~10d の経時変化を考慮した。)

これらの改良された2次標準により校正して、一般の放射温度計は、黒体炉の誤差  $\pm 1.0$  K を加えて、その系統的な偏りを  $\pm 3.0$  K 以内に入れることが期待できる。

### 5.3 放射温度計の誤差要因

放射温度計の誤差要因としては次のものが主にあげられ、要求される仕様の一例を示した。

- (1) 室温の影響,  $\Delta T_{RT}$ : 0.1 K/K 以内
- (2) 迷光の影響,  $\Delta T_{SS}$ : 0.5% 以内 (面積効果)
- (3) 補間誤差,  $\Delta T_{LN}$ : 0.2 K 以内
- (4) 安定度,  $\Delta T_s$ : 0.5 K/月以内

前記の誤差  $\Delta T_e$  を  $\pm 0.5$  K, すなわち 1.0 K 以内の温度幅に押さえるためには、例えば上の条件で、検出器の

温度変化を 5 K 以内の変動幅に、面積効果を  $\Delta T_{SS} = 0.3$  K 以内にする必要がある。

( $\Delta T_e = \Delta T_{RT} + \Delta T_{SS} + \Delta T_{LN} = 0.5\text{K} + 0.3\text{K} + 0.2\text{K}$ )  
安定度については偶然誤差と考えられるので除外した。

## 6. 結 言

高温域 (800°C 以上) では自動光高温計を、中温域 (500~800°C) ではシリコン単色放射温度計を用い、これを定点黒体炉と組み合わせて放射温度計の標準体系を確立した。この標準体系を用いて、放射温度計の校正を実施する場合の誤差について評価し次の結果を得た。

- (1) 1次標準……定点黒体炉・標準放射温度計の精度は  $\pm 1.0$  K である。
- (2) 2次標準……1次標準により校正される Si セル型放射温度計の精度は  $\pm 3.0$  K である。また  $\pm 2.0$  K の精度保証も可能である。
- (3) 一般の放射温度計は2次標準により校正して、その系統的な偏りは、黒体炉の実効放射率をとくに考慮することなく、 $\pm 3.0$  K 以内とすることが可能である。

## 文 献

- 1) 栗田邦夫, 岩村忠昭, 田村 清: 川崎製鉄技報, 11 (1979), p. 93
- 2) 岩村忠昭, 田村 清: 計量管理, 28 (1979), p. 5
- 3) 服部 晋, 佐久間史洋: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), p. 484
- 4) 服部 晋, 佐久間史洋: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), p. 704
- 5) 佐久間史洋, 服部 晋: 計測自動制御学会論文集, 18 (1982), p. 52
- 6) 田村洋一: SICE 学術講演会予稿集 (1983) No. 1608
- 7) 服部 晋: 計測と制御, 21 (1982), p. 1014
- 8) 放射温度計トレーサビリティWG: 学振 19 委-No. 10499 (昭和 58 年 7 月)
- 9) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 78 回計測部会 (1981 年 7 月) 川崎製鉄(株) (私信)
- 10) 川崎製鉄(株)技術研究所: 学振 19 委-No. 10027 (昭和 52 年 7 月)
- 11) 山本 弘: 応用物理, 38 (1969), p. 618
- 12) E. M. SPARROW, L. U. ALBERS and E. R. G. ECKERT: J. Heat Transfer, 84 (1962), p. 73
- 13) JIS Z 8706: 光高温計による温度測定法 (1980), p. 28