
定点黒体炉の利用による放射温度計の校正法とその精度評価

A New Method for Calibrating Radiation Pyrometers and Estimation of the Accuracy

栗田 邦夫(Kunio Kurita) 岩村 忠昭(Tadaaki Iwamura) 田村 清(Kiyoshi Tamura)

要旨：

放射温度計の目盛校正には、標準として熱電対が使われているのが普通である。しかしこの方法では $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内の精度維持は難しい。そこで、定点黒体炉を用いて自動光高温計を正確に校正し、これを熱電対に代わる標準として使用する体系を考え、その精度を検討した。理論解析および実験の結果から、その精度は次のとおり評価された。(1) 定点黒体炉による自動光高温計の校正精度は、再現性、系統誤差を含めて $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ である。(2) 放射温度計を自動光高温計により校正する総合精度は $\pm 3.0^{\circ}\text{C}$ である。この結果は、鉄鋼業における放射温度計の利用分野の拡大に役立つものと期待される。

Synopsis：

This study aims at making a new practical standard for the calibration of radiation pyrometers. For this purpose, a high-precision automatic optical pyrometer, whose temperature scale has been determined beforehand in reference to silver and copper points can be used as a standard thermometer instead of the conventional thermocouple. The former is more accurate than the latter in terms of effective emissivity of cavity, errors in the measuring system, and others. The emissivity of blackbody has been calculated by integral equation method, and then the systematic errors in the calibration evaluated as follows: An automatic optical pyrometer calibrated at the silver and copper points has an accuracy better than $\pm 1^{\circ}\text{C}$ in the range of $800\text{--}1200^{\circ}\text{C}$; Radiation pyrometers can be calibrated by using the above automatic optical pyrometer has an accuracy better than $\pm 3^{\circ}\text{C}$ which is accurate enough for use in the steel industry.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

定点黒体炉の利用による放射温度計の校正法とその精度評価

A New Method for Calibrating Radiation Pyrometers and Estimation of the Accuracy

栗 田 邦 夫*

Kunio Kurita

岩 村 忠 昭**

Tadaaki Iwamura

田 村 清***

Kiyoshi Tamura

Synopsis:

This study aims at making a new practical standard for the calibration of radiation pyrometers. For this purpose, a high-precision automatic optical pyrometer, whose temperature scale has been determined beforehand in reference to silver and copper points can be used as a standard thermometer instead of the conventional PR thermocouple. The former is more accurate than the latter in terms of effective emissivity of cavity, errors in the measuring system, and others.

The emissivity of blackbody has been calculated by integral equation method, and then the systematic errors in the calibration evaluated as follows: An automatic optical pyrometer calibrated at the silver and copper points has an accuracy better than $\pm 1^{\circ}\text{C}$ in the range of $800\text{--}1200^{\circ}\text{C}$; Radiation pyrometers can be calibrated by using the above automatic optical pyrometer has an accuracy better than $\pm 3^{\circ}\text{C}$ which is accurate enough for use in the steel industry.

1. はじめに

近年、放射温度計の利用分野が拡大し、要求される計測の質が管理温度から真温度に変わってきた。この結果、放射温度計の目盛を標準（国家標準）から正確に移しかえることが重要な課題になってきている。放射温度計の誤差は 1000°C において $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以上というのが普通であり、これは他の種類の温度計、たとえば熱電対の場合の $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以

下にくらべるとはるかに大きい。

放射温度計は黒体の放射にその原理的基礎をおいている。完全な黒体は存在しないので、これに代わるものとして温度分布の一樣な空どう（洞）の放射が利用される。これを扱いやすくしたものが黒体炉である。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の両者で比較測定することにより行われる。このとき、次のような誤差が校正の精度に影響する。

(1) 標準温度計自身の誤差

* 技術研究所計測研究室室長

*** 技術研究所計測研究室

〔昭和53年1月30日原稿受付〕

** 千葉製鉄所設備部設備技術室主査(掛長待遇)

- (2) 黒体炉が完全黒体でないために生ずる誤差
 (3) その他、計測にともなう誤差

従来は、標準温度計として熱電対を用いるのが普通であった、しかしこの方法は、計測原理上、前記(2)の誤差が大きく、 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内の精度を得ようとする場合には問題が多い。

高精度の温度標準を得る他の方法は温度定点の利用である。特定の純金属の固・液平衡相の温度が温度定点として定義されている。もしこの金属の中に適当な空どうを設けることができれば定点黒体放射が得られる。そこでこのような定点黒体炉を製作し、この定点黒体炉に自動光高温計を組み合わせて標準体系を構成し（この場合、前記(2)、(3)の誤差は小さくなることが期待できる）、その精度について検討した。校正は次のように行われる（Fig.1 参照）。

A：定点黒体炉の温度を自動光高温計に移しかえる（標準温度計の校正）。

B：この自動光高温計の読みを黒体炉（トランスファ用黒体炉）を用いて被校正放射温度計に移しかえる（一般温度計の校正）。

定点黒体炉はその性格上、空どうを小さく作る必要があり、一般の放射温度計による計測は不可能のため、上記の手順によった。

ここで、Aにおける精度を $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 、Bにおける精度を $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 、これに余裕 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ を加えて総合で $\pm 3.0^{\circ}\text{C}$ の精度を期待した。

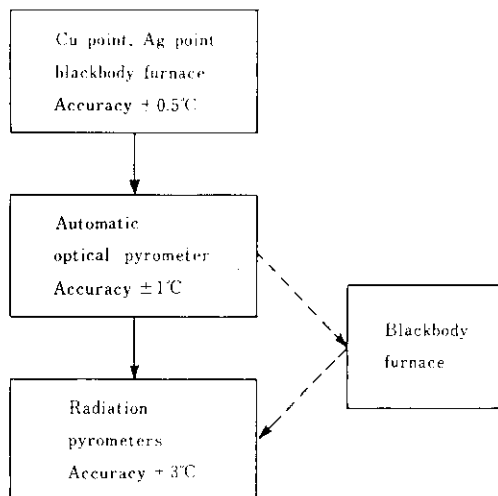


Fig.1 System for temperature standard transfer

2. 定点黒体炉

2.1 定点黒体炉の構造

定点黒体炉の心臓部は、定点金属内に設けられた空どうの大きさや形状である。その構造をFig.2に示す。すなわち、円筒形をつばの内部に金属を入れ、その内部に円筒状の空どう（サイトチューブ）を一体として組込んでいる。

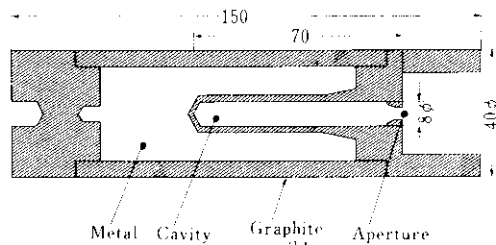


Fig.2 Structure of the blackbody radiator

金属およびつばは下記の材料を用いた。

銅 (Cu)：純度 99.99%

銀 (Ag)：純度 99.9%

つば：黒鉛(灰分 0.02%以下)

銅点 ($t_{68}=1084.88^{\circ}\text{C}$, 2次定点), 銀点 ($t_{68}=961.93^{\circ}\text{C}$, 1次定点)は国際実用温度目盛(IPTS 68)で定義された温度定点であり¹⁾、他にアンチモン点($t_{68}=630.755^{\circ}\text{C}$, 2次定点)の利用も可能である。

金属は、棒状の素材をつばの内部形状に合わせて加工し、また融解時の体積変化を考慮して、つば容積の約85%を満たすように充填した。

昇温はアルゴンガス雰囲気中(0.2l/m)で行い、つば全体は溶融石英管の中に装着して気密性を保持するようにした。

2.2 実効放射率の計算

円筒形空どうの実効放射率については多くの研究²⁻⁵⁾がなされているが、ここでは次のように計算した⁵⁾。

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放射の一般式は(1)式で表される。

$$E(x) = \epsilon_0 E_b \{T(x)\} + \rho \int_S K(x, x') E(x') dS(x') \quad \cdots (1)$$

$E(x)$: x 点における相互反射の結果定まる放射量
 $E_b \{T(x)\}$: x 点における温度 $T(x)$ によって定まる黒体放射量
 $K(x, x')$: 面素 $dS(x)$, $dS(x')$ 間の幾何学的関係から定まる固有照度係数
 ϵ_0 : 壁面の固有放射率
 ρ : 反射率

基準点を x_0 とすると, (1) 式から実効放射率を表す (2) 式が得られる。

$$\epsilon(x) = \epsilon_0 f(x) + \rho \int_S K(x, x') \epsilon(x') dS(x') \quad \cdots (2)$$

ただし $\epsilon(x) = E(x) / E_b \{T(x_0)\}$
 $f(x) = E_b \{T(x)\} / E_b \{T(x_0)\}$

半径を単位長さとし, 深さが L の円筒形空どうに Fig.3 のように座標をあたえると, 温度分布が一樣な場合について次の積分方程式が得られる。(ここには示さないが, 開口しぼりのある場合も同様の形で記述できる)。

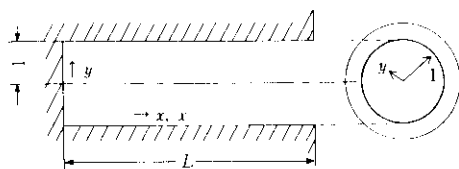


Fig.3 Schema of cylindrical cavity

$$\left. \begin{aligned} \epsilon(x) &= \epsilon_0 + \rho \int_0^L K(x, x') \epsilon(x') dx' \\ &\quad + \rho \int_0^1 K(x, y) \epsilon(y) dy \\ \epsilon(y) &= \epsilon_0 + \rho \int_0^L K(y, x) \epsilon(x) dx \end{aligned} \right\} \quad \cdots (3)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} K(x, x') &= \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{|x-x'| \{ (x-x')^2 + 6 \}}{\{ (x-x')^2 + 4 \}^{3/2}} \right\} \\ K(x, y) &= \frac{2xy(x^2 - y^2 + 1)}{\{ (x^2 + y^2 - 1)^2 + 4x^2 \}^{3/2}} \\ K(y, x) &= \frac{2x(x^2 - y^2 + 1)}{\{ (x^2 + y^2 - 1)^2 + 4x^2 \}^{3/2}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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。解の収束性と単一性も保証される。また内壁温度

が一樣でない場合にも, (2) 式の $f(x)$ を用いて解くことができる。

関数 K がすべて積分可能なことから, 積分方程式の第 2 項以下は次のように部分積分によって簡単になる。

$$\begin{aligned} \epsilon^{(n)} &= \epsilon_0 + \rho \int_a^b K \epsilon^{(n-1)} d\xi \\ &= \epsilon_0 + \rho \left[G \epsilon^{(n-1)} \Big|_a^b - \int_a^b G \psi^{(n-1)} d\xi \right] \\ &= \epsilon_0 + \rho \left[G \epsilon^{(n-1)} \Big|_a^b - \sum_i W_i G_i \psi_i^{(n-1)} \right] \end{aligned}$$

ただし $G = \int K d\xi$
 $\psi = d\epsilon/d\xi$
 W_i : 重み

座標を等分割し簡単になると次式になる。

$$\epsilon^{(n)} = \epsilon_0 + \rho \left[\sum_i \epsilon^{(n-1)} \Big| G \Big|_{\xi_{i-1/2}}^{\xi_{i+1/2}} \right] \quad \cdots (5)$$

あとは逐次解法を実行すればよい。

以上の方法で得られた円筒形空どうの底面中心部の実効放射率を Fig.4 に示す。この結果は JIS⁶⁾ ともよく一致している。

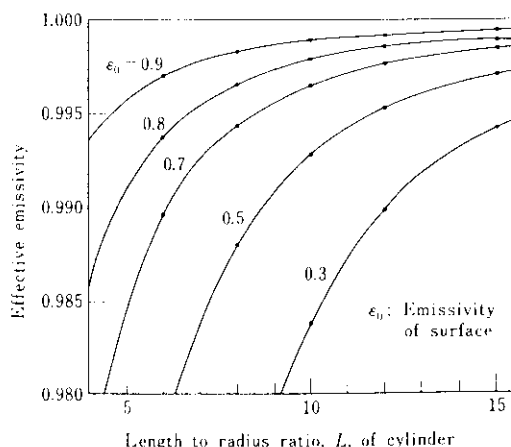


Fig.4 Effective emissivity of a cylindrical cavity with diffusively radiating walls

黒鉛の放射率は波長 $0.65 \mu\text{m}$ の近傍において 0.9 程度であり, Fig.4 から $L > 10$ であれば実効放射率は 0.999 以上になることがわかる。黒体をつばは $L = 17.5$ (半径 4mm, 深さ 70mm) であり, 実用上, 十分の黒さをもつといえる。

2.3 自動光高温計による測定

標準放射温度計は, 被校正放射温度計と同じ感

温素子を用いたものが望ましい。しかし現在の工業用放射温度計は、精度・安定度・視野の点で適していない。そこで使用波長域に問題はあが、自動光高温計を標準放射温度計として選定した。

この自動光高温計⁷⁾は 775°~5800°Cの測定範囲をもち、これを4段階に目盛分けしている。このうち、今回のテストに使用した範囲とその仕様は以下のとおりである。

測定範囲 : 775°~1225°C

精度 : ±2°C

使用波長 : 0.655μm

波長帯域: 0.016μm

最小測定径 : 1.2mm

温度分解能 : 0.15°C

また、測定には次の計測器を使用した。

デジタル電圧計: YEW 2501

精度 ±0.01%+2 digits

アナログ記録計: YEW 3052

精度 ±0.3% (5μV/cm)

自動光高温計による測定は、黒体炉空どう底面との距離400mm(ターゲット径2mm)にて行った。

温度定点は、融解点(MP)、凝固点(FP)のいずれを用いてもよい。FPは、経験的にMPより15°~20°C高温に加熱し、ヒータ電源を切って自然放熱させ、過冷却が生じたのちのプラトーから求める。銅点および銀点の融解、凝固曲線の測定例をFig.5に示す。プラトーは0.1°C以内で安定しており、9~15min持続する。光高温計のノイズ変動幅は、銅点で±0.1°C、銀点で±0.15°C程度であった。

Table 1にPR熱電対と自動光高温計による銅、

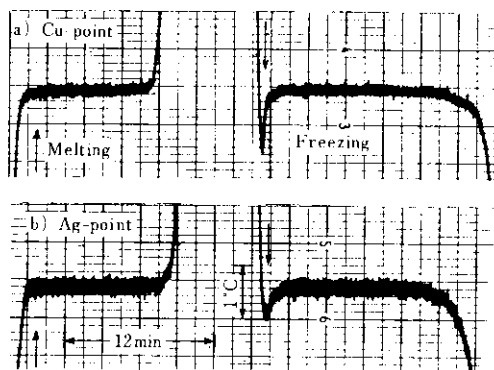


Fig.5 Heating and cooling curves of blackbodies measured with an optical pyrometer

銀点の測定結果をまとめた。またFig.6に銅点における偏差のヒストグラムを示す。

なお、MP、FPの値は、それぞれのプラトーの最も平坦と認められる部分の値をとった。またPR熱電対は公的検定機関(日本電気計器検定所)の検定を受けたもの(精度±0.01mV, 約0.8°C)を用い、先端を閉じた石英ガラス管に入れ、サイドチューブ底面に接触させて測定した(石英管を使用しない場合も指示に変化はなかった)。

Table 1 Results of copper-point blackbody, silver-point blackbody observation by PR thermocouple and optical pyrometer

Metal	Measuring method	Freezing point (FP)			Melting point (MP)			MP-FP
		N	ΔT	s.d.	N	ΔT	s.d.	
Cu	PR thermocouple	38	0.19	0.07	42	0.17	0.06	0.02
	Optical pyrometer	21	0.24	0.04	20	0.26	0.05	-0.02
Ag	PR thermocouple	21	0.03	0.06	21	-0.02	0.06	0.01
	Optical pyrometer	32	0.28	0.05	32	0.27	0.05	0.01

N: Number of experiments

ΔT : Mean deviation from the authorized value

s.d.: Standard deviation

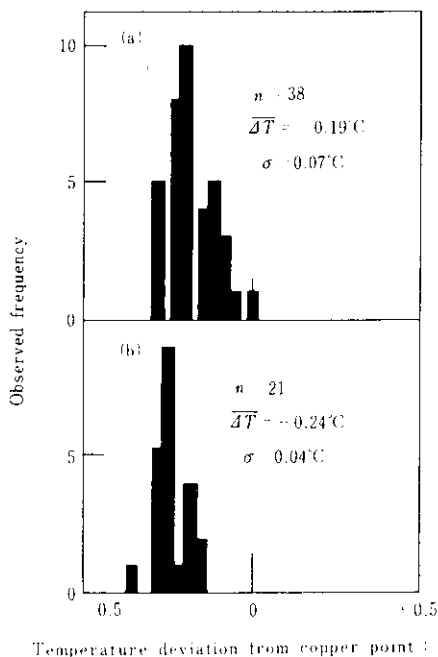


Fig.6 Variation of observed freezing point of copper measured by (a) PR thermocouple and (b) optical pyrometer

Table 1 による測定結果から次の所見を得た。

- (1) 標準偏差は 0.07°C 以内であり、測定系の誤差も含めて再現性は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ と判断できる。異なる黒体をつば間の MP, FP は銅点・銀点黒体とも測定誤差内で一致していた。
- (2) MP と FP の差は 0.02°C 以内であり、標準偏差より小さい。
- (3) 自動光高温計は、銅・銀点において熱電対よりやや低い指示を示したが、測定誤差 ΔT の両定点間における差は FP の場合 0.04°C であり、これは熱電対の 0.16°C より小さく、精度・安定度とも良好であるといえる。

2・4 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すでに述べたとおりである。

系統誤差の原因としては、サイトチューブ内の温度の不均一性、サイトチューブの内外の温度差および定点物質に含まれる不純物の影響などが考えられる⁸⁾。これらはいずれも定点温度を低くする方向に作用する。以下、原因別に検討する。

- (1) サイトチューブ内壁の温度分布による誤差

この場合には実効放射率が小さくなり誤差の原因となる。実効放射率を計算するため、次のように温度分布を近似した。

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

$T(x)$: サイトチューブ内 x 点の温度

T_0 : サイトチューブ内底面の温度

P : 温度分布のパラメータ

実効放射率は (2) 式から求められる。まず上記の温度分布から

$$f(x) = (2 - \cosh Px)^n$$

$$\text{ただし } n = \frac{\partial E / \partial T}{E}$$

となる。 n は温度 T の変化率に対する放射エネルギー E の変化率の比で、以後 n 値と呼ぶ。熱電対による温度分布の実測結果から $P=0.01$ と近似できる。この条件で、 $n=4$ (Stefan Boltzmann の 4 乗則が成立するときの n 値)、および $n=16.2$ (自動光高温計の銅点測定時の n 値) の二つの値を用いて計算した結果を Table 2 に示す。銅点において開口しぼりがないとき、実効放射率 $\epsilon=0.9993$ 、輝度

温度差 $\Delta S=0.06^{\circ}\text{C}$ であった (しぼりをつけた場合との差は 0.02°C であり、きわめて小さい。実測の結果でも、しぼりの有無による指示変化は認められなかった)。銀点においても同様の結果を得ている。このことから、温度の不均一性にもとづく誤差は 0.1°C をこえないと考えられる。

- (2) サイトチューブ内外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 (定点物質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) からの熱伝導と放射によってきまる。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。

$$F = \alpha H - \epsilon_0 \sigma T_i^4 \quad \dots\dots\dots (6)$$

α : 吸収率 (この場合 $\alpha = \epsilon_0$)

H : 他のすべての面からの入射量

σ : Stefan-Boltzmann の定数

T_i : 内壁温度

一方、実効放射率 ϵ は

$$\epsilon = \epsilon_0 + \rho H / \sigma T_i^4 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、(6)、(7) 式から (8) 式が得られる。

$$F = \frac{\epsilon_0}{1 - \epsilon_0} (\epsilon - 1) \sigma T_i^4 \quad \dots\dots\dots (8)$$

また F は外壁 (温度、銅点 T_{Cu}) から内壁 (温度 T_i) への伝導による熱流束であるから、

$$F = \frac{k' (T_{Cu} - T_i)}{d} \quad \dots\dots\dots (9)$$

k' : サイトチューブ (黒鉛) の熱伝導率

d : サイトチューブの厚み

Table 2 Calculated effective emissivity of a copper-point blackbody radiator

	Total radiation pyrometer ($n=4$)		Optical pyrometer ($n=16.2$)	
	ϵ	$\Delta S (^{\circ}\text{C})$	ϵ	$\Delta S (^{\circ}\text{C})$
Aperture removed	0.9996	0.04	0.9993	0.06
5mm ϕ	0.9998	0.02	0.9995	0.04
3.5mm ϕ	0.9998	0.02	0.9995	0.04

ϵ : Effective emissivity

ΔS : Difference of luminance temperature

$\epsilon = 0.999$, $\epsilon_0 = 0.9$ として(7),(8)式から $T_{cu} - T_r$ を計算すると 0.07°C である。すなわち、サイトチューブ内外の温度差による誤差は 0.1°C をこえない。

(3) 定点物質に含まれる不純物による誤差

不純物の混入および酸化は、定点温度を変動させ、プラトーに勾配をつけるなどの原因となる。測定に用いた金属の純度はすでに述べたとおりである。銀の場合、バヤ純度が不足するとも考えられるが、MP, FPのプラトーをみると、MPにおいて融解の開始・完了の温度差約 0.05°C が認められるものの、この値は1桁純度の高い銅の場合より小さい。またFPにおいては特に有意な勾配は認められない。また多数回の測定を通じてきわめて安定した再現性をもつことから、顕著な定点変動はないと考えられる。一方、銅について純度変動を原子吸光法で確認した結果は次のとおりで外周部以外に純度の変化はみられなかった。

使用前 : 99.99%

26回使用後 : 中心部 99.99%
外周部 99.98%

これらの現象から、不純物の影響は小さく、過大に評価しても $\pm 0.1^\circ\text{C}$ をこえないと考えられる。

以上(1), (2), (3)の結果から系統誤差は $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内であり、これに再現性 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ を加えて定点実現精度は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ であるといえる。

2.5 自動光高温計の検定精度

前記の定点精度には、自動光高温計による計測のバラツキ(再現性)も含まれており、したがってその精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ は定点における自動光高温計の校正精度といえることができる。しかし現在までの2個の定点検定だけでは、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(銅)を用いて $800 \sim 1100^\circ\text{C}$ にわたり熱電対との比較測定を行った。その結果は $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内で一致し、かつそのバラツキは定点におけるバラツキと有意な差はなかった。

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定点において $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度で校正されれば、前記の温度範囲ではほぼ同程度の精度と考えられる。自動光高温計についても、この熱電対と

の比較結果から同程度の精度を期待できるが、ここでは実用上はどの厳密さを必要としないので、余裕を見込んで $\pm 1.0^\circ\text{C}$ とみなした。これは前記の熱電対との偏差 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ を加えてなお余裕がある。将来、さらに高精度の標準が必要とされる場合には、定点に全点を加えるなどデータを豊富にすることにより、これをさらに小さくすることが十分に期待できる。

また約3箇月、延べ100hの使用において、光高温計の指示に有意な変化は認められなかった。これは、この自動光高温計が放射温度計の標準として十分な精度と安定性をもつことを保証するものである。

3. 放射温度計の校正

3.1 校正の方法と精度

放射温度計の校正はトランスファ黒体炉(定点黒体炉との区別がつく場合には単に黒体炉と呼ぶ)を用い、これを標準温度計と比較測定して行う。標準温度計の種類が被校正温度計と同種の放射温度計である場合を除き、黒体炉の実効放射率が1でないときには誤差を生じる。

黒体の放射エネルギー E はPlanckの式(10)で表される。

$$E = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

c_1, c_2 : 定数

λ : 波長

放射による温度測定は(10)式にその基礎をおくが、これを次のように近似する。

$$E = kT^n$$

k : 放射温度計に固有の定数

$$n: n \text{ 値}, n = \frac{\partial E}{\partial T} / \frac{E}{T} = \frac{c_2}{\lambda T}$$

黒体炉の真温度を T_r とし、この値で放射温度計($k = k_r, n = n_r$)を校正すると実効放射率(この放射温度計の波長域において $\epsilon - \epsilon_r$)が1でなければ誤差を生じ、正しくは(11)式で定まる T_r としなければならない。

$$k_r T_r^{n_r} = k \epsilon_r T_c^{n_r} \quad \dots\dots\dots (11)$$

したがって誤差 ϵ_r は

$$e_c = T_s - T_r = (1 - \epsilon_r^{1/n_r}) T_c \quad \cdots (12)$$

これは誤差のない熱電対で T_c を求めて校正する場合に相当する。

一方、自動光高温計 ($k=k_s$, $n=n_s$, この波長域における $\epsilon=\epsilon_s$) で測定する場合, (11) 式に準じて (13) 式が得られる。

$$k_s T_s^{n_s} = k_s \epsilon_s T_c^{n_s} \quad (11), (13) \quad \cdots (13)$$

自動光高温計の読み T_s を基準にするときの誤差を e_s とすれば, (10), (12) 式とから

$$e_s = T_s - T_r = \left(1 - \frac{\epsilon_r^{1/n_r}}{\epsilon_s^{1/n_s}} \right) T_s \quad \cdots (14)$$

一般に $e_c > e_s$ であり, 計算結果の一例を Table 3 に示す。波長 $0.9\mu\text{m}$, $2.25\mu\text{m}$ はそれぞれ Si セル, PbS セルの主波長に近い。また ϵ_r は 0.99 とし, ϵ_s はこの条件における黒体炉の実効放射率を計算して使用した。

Table 3 Calculated calibration error of thermocouple standard and radiation pyrometer standard, taking effective emissivity at 0.99

Standard	Thermocouple		Optical pyrometer	
Wave length	0.9 μm	2.25 μm	0.9 μm	2.25 μm
800°C	0.72°C	1.81°C	-0.34°C	-0.88°C
1 000°C	1.02	2.55	0.10	0.30
1 200°C	1.36	3.41	0.13	0.40

この結果から, 黒体炉の実効放射率が 0.99 以上のとき, 自動光高温計を標準にすれば $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の誤差で校正できることがわかる。熱電対を標準にする場合の誤差は, 使用波長の大きい (あるいは n 値の小さい) とき特に大きくなるが, このほかに熱電対自身の誤差 (通常の公的検定で約 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)、黒体炉と熱電対との熱接触の誤差, 熱伝導誤差, 冷接点・補償導線の誤差, 電位差計の誤差などが加わる。これらの誤差は無視できるほど小さくはなく, またその定量化が難しい。このような理由から, 熱電対を標準にする方式では $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の精度保証は難しい。また実効放射率が 1 から離れるにしたがい誤差の増加割合も大きくなる。

3.2 黒体炉の実効放射率

校正の精度は黒体炉の実効放射率によるので,

その黒度 (実効放射率) をいかに 1 に近づけるかが重要である。ここでは普通に市販されている 3 分割加熱式の円筒形黒体炉 ($500^{\circ}\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 常用) を用いて, 温度分布と黒さの関係を求めた。

(1) 黒体炉の温度分布

黒体炉の形状は Fig. 7 に示すように $60\phi \times 600\text{l}$ である。温度分布としては炉底・径方向の温度分布と, 炉壁・長さ方向の温度分布とがあるが, ここでは温度変化の小さい前者についての検討は省略する。長さ方向については, 加熱用温度調節計 (3 台) の設定を適当に変えることにより, ある程度温度分布を変えることができる。Fig. 7 は PR 熱電対による実測結果であり, この中で ΔT_w (炉壁最高温度 - 炉底温度) が炉温分布を代表するパラメータとして重要である。

(2) 温度分布と実効放射率の計算

定点黒体炉の場合と同様の方法により, 各種の温度分布をあたえて実効放射率を計算できる。その結果を Fig. 8 に示す。炉底温度 T_0 を $800^{\circ}\sim 1300^{\circ}\text{C}$ の間で変化させるとき, 実効放射率 ϵ を 1 とする ΔT_w の値は Fig. 8 より

波長 $0.655\mu\text{m}$: ΔT_w 4.0 $^{\circ}\sim 4.1^{\circ}\text{C}$

0.9 μm : 3.5 $^{\circ}\sim 5.2^{\circ}\text{C}$

2.25 μm : 6.0 $^{\circ}\sim 11.5^{\circ}\text{C}$

一方, $\epsilon = 1.00 \pm 0.01$ にする条件は

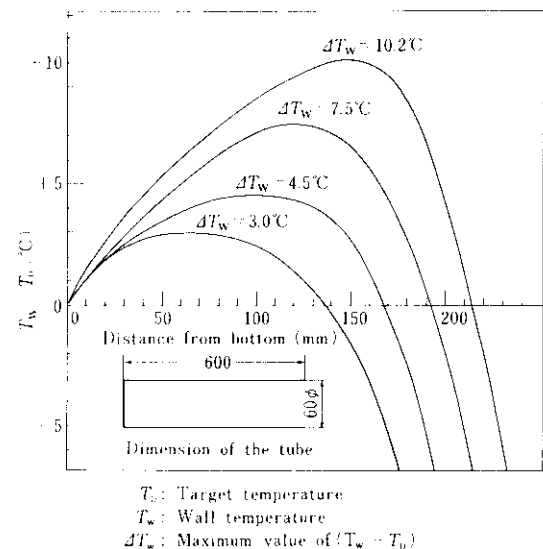


Fig. 7 Temperature distribution along the cylindrical tube at 1200 $^{\circ}\text{C}$

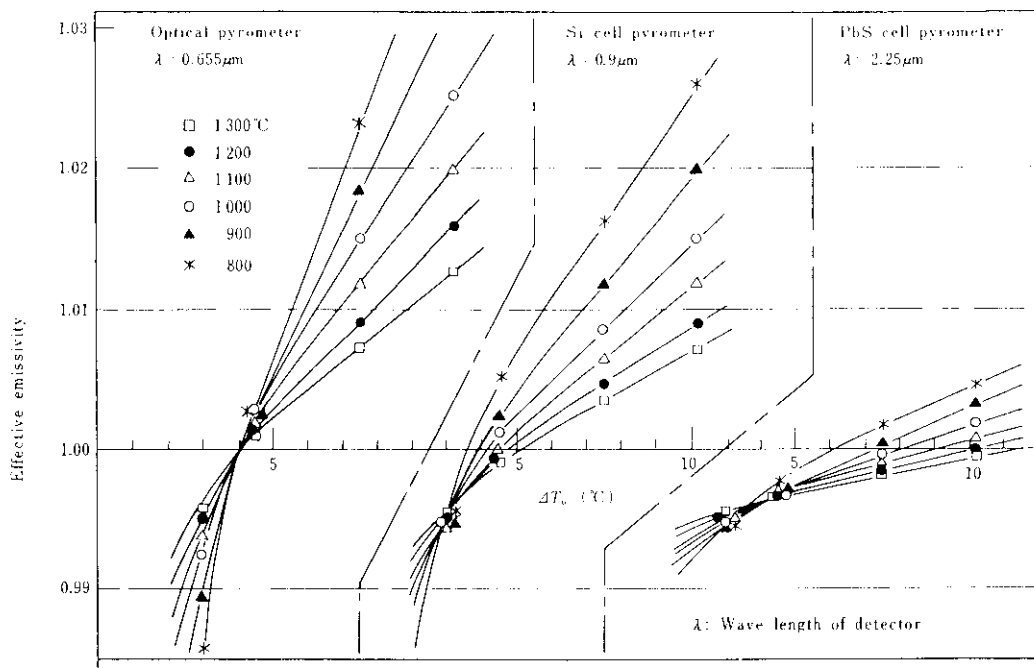
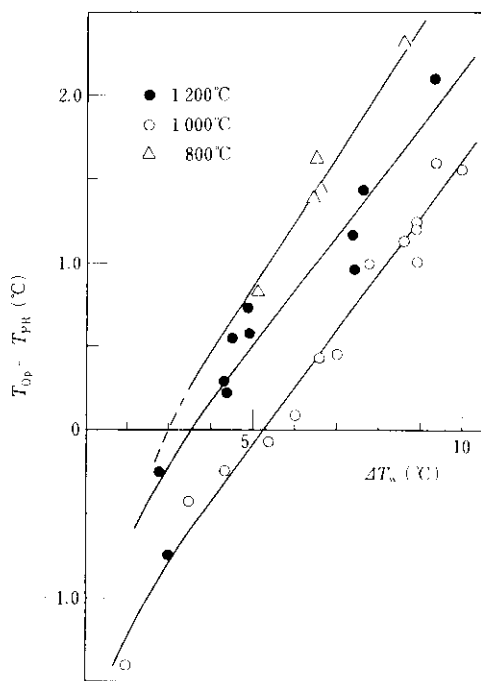


Fig.8 Calculated effective emissivity of the blackbody furnace



T_{op} : Temperature indicated by optical pyrometer
 T_{PR} : Temperature indicated by PR thermocouple

Fig.9 Influence of the temperature distribution on the temperature difference between optical and PR methods

波長 $0.655\mu\text{m}$: ΔT_w $3.5^\circ\sim 5.5^\circ\text{C}$

$0.9\mu\text{m}$: $2.5^\circ\sim 5.8^\circ\text{C}$

$2.25\mu\text{m}$: $2.0^\circ\sim 12.0^\circ\text{C}$

であることがわかる。

3.3 放射温度計の校正誤差の計算

T_0 および波長によらず ΔT_w が $3.5^\circ\sim 5.5^\circ\text{C}$ のとき、 $\epsilon=1.00\pm 0.01$ である。この中の1点、たとえば $\Delta T_w=4.5^\circ\text{C}$ としたとき、 ϵ の変化は

波長 $0.655\mu\text{m}$: ϵ $1.002\sim 1.007$

$0.9\mu\text{m}$: $0.999\sim 1.007$

$2.25\mu\text{m}$: $0.996\sim 0.998$

である。 ϵ の相違のため各温度計間に指示の差が生じ、これを自動光高温計との差でみると、

波長 $0.9\mu\text{m}$: 輝度温度差 $-0.3^\circ\sim +0.3^\circ\text{C}$

$2.25\mu\text{m}$: $-1.4^\circ\sim -0.6^\circ\text{C}$

すなわち $800^\circ\sim 1300^\circ\text{C}$ の温度範囲で、校正誤差は波長 $0.9\mu\text{m}$ の温度計で $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、波長 $2.25\mu\text{m}$ の場合は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ に入ることがわかる。後者については、適当な ΔT_w を選定することにより $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度も可能であるが、ここでは検討を行わない。

逆に校正誤差として $\pm 1.5^\circ\text{C}$ を認めて、これを

常に満足する ΔT_w の値を求めると

$$\Delta T_w \ 3.0 \sim 6.0^\circ\text{C} : \pm 0.5^\circ\text{C} (\lambda = 0.9\mu\text{m}) \\ \pm 1.5^\circ\text{C} (\lambda = 2.25\mu\text{m})$$

となり、 ΔT_w をこの範囲で設定するのは容易である。

3.4 実験と結果

自動光高温計の場合、 $800^\circ\text{C} \sim 1300^\circ\text{C}$ の範囲で $\Delta T_w = 4^\circ\text{C}$ のとき $\epsilon = 1.00$ である。これが確認できれば上記の理論解析の正当性が確かめられる。

$\epsilon = 1$ であれば、炉底温度 T_0 の測定において自動光高温計の読み T_{Op} と熱電対の読み T_{PR} は等しい、すなわち $T_{Op} - T_{PR} = 0$ となるはずである。またこの条件は $\Delta T_w = 4^\circ\text{C}$ で成り立つはずである。

実験は、 T_{PR} を 800°C に保ち ΔT_w を $2^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ の間で変化させ、このときの T_{Op} を測定した。ついで T_{PR} を 900°C 、 1000°C 、 1100°C 、 1200°C に設定し、同様の測定を行った。その結果の一部を Fig. 9 に示す。

実験結果から次のことが言える。

$T_{Op} - T_{PR}$ を 0 にする ΔT_w の値は $3.0^\circ\text{C} \sim 5.4^\circ\text{C}$ (平均 4.0°C) の間で変わる。また $\Delta T_w = 4^\circ\text{C}$ のとき、 $T_{Op} - T_{PR}$ は $-0.4^\circ\text{C} \sim +0.4^\circ\text{C}$ (平均 0.02°C) の間でばらつく。これらの測定結果は、 T_{PR} 、 T_{Op} の測定の精度を考えれば前記の仮定が正しい、すなわち理論解析の結果が妥当であることを示している。特に、 $\Delta T_w = 4^\circ\text{C}$ におけるバラツキ $\pm 0.4^\circ\text{C}$ を校正精度の余裕として加えればその一致は完全であり、このときの放射温度計の精度は

光高温計の精度： $\pm 1.0^\circ\text{C}$

校正の精度： $\pm 0.5^\circ\text{C} (\lambda = 0.9\mu\text{m})$
 $\pm 1.5^\circ\text{C} (\lambda = 2.25\mu\text{m})$

余裕： $\pm 0.5^\circ\text{C}$

総合精度はこれらを加えて、Si セルで $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 、PbS セルで $\pm 3.0^\circ\text{C}$ と考えられる。現在の鉄鋼業における通常の使用に限れば、放射温度計の精度は $\pm 3^\circ\text{C}$ が保証されれば十分である。

3.5 校正方法の簡易化

黒体炉の実効放射率の決定において ΔT_w は重要なパラメータであるが、最高温度位置は設定温度により変化するので、 ΔT_w の設定はかなりわずらわしい。そこで、炉底から 120mm の位置の炉壁が

炉底に対して 5°C 高くなるような温度調節計の設定値を求めて作業の標準とした。黒体炉特性の経時変化を考慮する必要はあるが、現状ではこの設定は $\Delta T_w = 5^\circ\text{C}$ に相当する。 $\Delta T_w = 5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ において校正精度は前記範囲に入る。

3.6 2次標準

通常の放射温度計に要求される精度は $\pm 5^\circ\text{C}$ 以上であり、このような場合にはこれまで述べてきた高精度校正法は適切でなく、むしろ $+3^\circ\text{C}$ で校正された Si セルまたは PbS セルの放射温度計を標準（2次標準）として用いる方がよい。2次標準と被校正温度計の感温素子が同種のものであれば、(13)式において $\epsilon_r = \epsilon_s$ 、 $n_r = n_s$ であるため、 $e_s = 0$ となり実効放射率の変動による誤差を生じない。すなわち、黒体炉の黒度に対する特別の考慮が必要でなく、この点、従来の熱電対基準の場合にくらべきわめて有利な特性となる。

2次標準として Si セルおよび PbS セルの2種類を用意すれば、ほとんどすべての放射温度計に対応でき、どのような n 値のものに対しても、実効放射率が 1.0 ± 0.1 と変動したとして、誤差は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内となる。その他、校正時に生ずる誤差 $+0.5^\circ\text{C}$ を加えても、2次標準による校正誤差は $+1^\circ\text{C}$ 、したがって総合で $\pm 4^\circ\text{C}$ 以内の精度が得られる。このように一般温度計の校正が2次標準により精度よく行われることは、この標準体系の精度維持と運用の上できわめて有効である。

4. まとめ

現在普通に行われている放射温度計の校正方法は、鉄鋼業で必要とする精度を十分に満足するものとはいえず、新しい標準体系の整備が望まれていた。このようなニーズから、筆者らは定点黒体炉・自動光高温計（1次標準）・放射温度計2種（2次標準）の標準体系を考案した。その誤差は、理論的・実験的検討から次のとおり評価された。

- (1) 定点黒体炉・自動光高温計（1次標準）系の精度は $\pm 1.0^\circ\text{C}$ であった。必要があればこれをさらに小さくすることも期待できる。
- (2) 自動光高温計による放射温度計（2次標準）の校正精度は $\pm 3.0^\circ\text{C}$ であった。Si 温度計では、

$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ の精度保証も可能である。

(3) 一般の放射温度計を2次標準により校正する場合の校正精度は、黒体炉の実効放射率を特に考慮することなく $\pm 4.0^{\circ}\text{C}$ をこえない。

実用上必要な精度は(2)、(3)に示す値であるが、この場合の誤差は、温度範囲($800^{\circ}\sim 1200^{\circ}\text{C}$)と温度計種類によらずこれらに共通の総合誤差を表わす特定の条件のもとでの誤差は個々の条件において評価することが必要であり、この検討の過程でその評価も可能となった。

800°C 以下においてはアンチモン黒体を使用で

きる。しかしこの領域には、標準放射温度計、黒体炉など 800°C 以上の標準体系をそのまま適用できないという問題があり、一貫した扱いは難しく、現在検討中の課題である。

なおこの温度標準は、この分野における当社のトレーサビリティ体系の軸として考えていきたい。

本研究をはじめるにあたり、工業技術院・計量研究所第2部長高田誠二氏の御助言をいただいた。また定点黒体炉の製作には東京精工㈱の諸氏に御協力をいただいた。ここに深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 計量研究所(仮訳)：1968年国際実用温度目盛の1975年修正版，計量管理，26(1977) 1，44
- 2) 高田誠二：照明学会誌，11(1967) 12，702
- 3) T.J.Quinn: Brit. J. Appl. Phys., 18(1967) 1105
- 4) 上滝致孝：電試研究報告，558(1957)
- 5) 山本弘：応用物理，38(1969) 6，618
- 6) JIS Z 8706：光高温計による温度測定法，(1970)，27
- 7) Leeds & Northrup General Catalog: (1973) B 70
- 8) 伊藤寿：計量研究所報告，25(1976) 4，40