放射温度計校正用標準黒体炉†

藤原 哲雄*・服部 晋**・菱刈 功***・清水 孝雄****

Standard Blackbody Furnace for the Calibration of Radiation Thermometer

Tetsuo FUJIHARA*, Susumu HATTORI**, Isao HISHIKARI*** and Takao SHIMIZU****

A standard blackbody furnace for the calibration of commercially available radiation thermometers has been developed. This furnace has a cavity of chrome plated copper walls with an opening of 60 mm in diameter. The furnace is designed so that the temperature of the cavity can be easily estimated by a resistance thermometer. It is shown that the furnace has an accuracy of 1 K through the comparison with two fixed point blackbodies when the effective emissivity, the size-of-source effect and the absorption by water vapor of the air are corrected for.

Key Words: standard blackbody furnace, cavity, radiation thermometer, effective emissivity, size-of-source effect

1. ま え が き

本黒体炉は、亜鉛点 (420°C) 以下の温度領域の放射温度計校正用の標準黒体炉とする目的で開発したものである。

放射温度計は、従来から黒体炉を用いて校正されてきたが、その実効放射率や温度分布の評価が必ずしも十分ではなく、性能的にも問題があって、そのために精度面での信頼性を欠いた。420°C 以上の温度領域では、この困難を回避したシリコン単色放射温度計を標準温度計とする新しいトレーサビリティ方式が確立さ

れた^{1),2)}。これに対して、420°C 以下の温度領域では、高温域の標準放射温度計に匹敵する性能の放射温度計を開発できる見通しがなく、同一方式の採用は当面は望めない状況にある。また、この温度領域では標準黒体炉開発の条件は高温域に比べて緩和される。本黒体炉は、このような背景のもとに、放射温度計試験用の大開口黒体炉の開発実験³⁾の成果に基づいて開発を進めたもので、接触形の温度計を標準とする従来のトレーサビリティ方式を採用し、かつ従来の欠点を取り除いた信頼できるトレーサビリティ方式の確立を意図して開発に当たった。

本黒体炉では、精度よく校正されたシース測温抵抗体を標準温度計とした状態での放射率補正後の目標精度を 1 K とし、その精度確保が諸特性から評価できる構造としていて、目標精度がほぼ達成されていることを定点黒体を用いた比較実験によって確認している。

本報告では、この黒体炉の構造と諸特性および精度の確認実験の概要を示す。

2. 構造と特性

この黒体炉は、工業用放射温度計の校正に使用できるよう開口径を 60 mm としている。そのために、空洞壁の材質には熱伝導率が大きくかつ放射率が高い状態が実現できることが要求される。この状態を実現するために、開発当初においては空洞壁をアルミニウムで構成し、その表面を各種の方法によって黒化することを試みた。しかし、この方法は、熱接触がよく、安定で、かつ均一に黒化することの難しさのために、空洞底面に輝度温度のむらを生ずるなどして、いずれの場合も必要とする状態を実現するには至らなかった。

さらに、表面酸化のステンレス鋼 SUS 316 S 製の空洞についても実験を試みたが、この場合には、材質の熱抵抗が大きいことが障害となって、空洞底面の温度の均一性と、標準温度計挿入部の温度の均一性とを

† 第 25 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 61・7)

* 計量研究所大阪支所 大阪市北区扇町 2-6-20

** 計量研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

*** (株)チノー 久喜市河原井町 18

**** (株)チノー 埼玉県入間郡大井町大字亀久保 1145

* National Research Laboratory of Metrology, Osaka Branch, Osaka

** National Research Laboratory of Metrology, Niihari-gun, Ibaraki

*** Chino Corporation, Kuki

**** Chino Corporation, Iruma-gun, Saitama

(Received December 1, 1986)

(Revised January 28, 1987)

両立させにくく、製作条件が非常に厳しくなるとの結論に達した。本黒体炉では、このような試行錯誤によって使用材質とその黒化方法を決定した。

つぎに、目標を達成した標準黒体炉の構造と諸特性の評価結果を示す。

2.1 黒体炉の構造

黒体空洞部の構造を Fig. 1 に示す。空洞形状は、底面側円錐の頂角が 120 度の二重円錐形とし、銅棒を旋盤加工して空洞を形成しており、その外周および背面にはフライス加工によってヒータ埋設用の等間隔の溝を設けている。この状態で下地にニッケルを、表面にクロームをメッキした後 800℃ に加熱させてその表面を酸化させる方法により、銅の酸化防止と空洞壁の黒化を試みた。銅に酸化防止のためのメッキを施すことは、鉄鋼業の生産ライン部品に採用されていて、600℃ 以下の温度では酸化が進行しないことが期待できる。

このことから、本黒体炉の使用温度では、製作時に酸化させて黒化した空洞壁の表面状態が安定に維持されるとみなした。金属は表面が酸化することによって放射率が高まり、多くの金属は酸化層が一定の厚さ以上になると高放射率状態が長波長域に及ぶ。ニッケルやクローム系金属の酸化面は比較的放射率が高い部類に属し、酸化面の放射率特性がよく調べられているニッケル・クローム合金のインコネル鋼などでは、可視から 15 μm の波長帯域の分光放射率が 0.8 以上の状態にある⁴⁾。これらのことから、本黒体炉では、この方法で、熱伝導率の大きい銅の長所が利用できて均一な温度分布の達成を可能にし、放射率が高くかつ安定な空洞が実現できると期待した。

ヒータ埋設用の溝は図からわかるように、円周部が二つに分かれていて、開口部側を底部側の 2 倍の溝数としている。ヒータには直径 1.0 mm のカンタル線を用い、底部、後部、前部の三つの部分を通して 1 本のヒータとしていて、各部の加熱密度は約 1:1:2 の割合である。ヒータは絶縁管で空洞壁と絶縁している。

後部および前部ヒータの加熱長は、予備実験に基づいて、意図した温度分布が得られるよう決めた。

Fig. 1 Metal cavity and heater windings

Fig. 2 Blackbody furnace with a metal cavity

Fig. 3 Warming-up characteristics of the furnace observed by a PRT and a radiation thermometer

この空洞部を金属管に設置し、黒体炉として組立てた状態の断面を Fig. 2 に示す。测温孔は、左右対称位置に設けていて、シース外径 3.2 mm、感温部の長さ 10 mm の同種の白金测温抵抗体を設置し、空洞底面の延長面と测温孔の中心軸が交わる点に感温部の中心を位置させていて、一方を温度制御用、他方を標準温度計としている。この测温点では、测温孔の前後方向の温度勾配が小さく、空洞底面が左右の直径方向に対して温度勾配をもたない状態を実現することにより、底面の温度と一致する温度が測定できる。Fig. 2 からわかるように、この炉では断熱材を薄くして周囲条件の変動の影響を防止する程度の保温にとどめていて、50℃ の低温まで温度制御できる状態を得ている。

温度制御は SSR 素子を用いてパルス形 PID 方式で行っている。温度調節計を 500℃ に設定した状態で通電を開始し、0.9 μm シリコン単色放射温度計と標準用测温抵抗体とで測定した黒体炉の温度の記録を Fig. 3 に示す。1 時間 30 分以内に安定な温度状態が得られており、設定温度を順次高めて校正する手順では、500℃ 以下の温度範囲の 3 から 4 温度の校正を 1 日で行うことを可能にする。また、この記録から定常状態では 0.3 K 以内の安定度を有することがわかる。

2.2 空洞の温度分布と実効温度

試作した黒体炉では標準用の测温抵抗体挿入孔が開口部付近まであけられていて、空洞側壁の温度分布が測定できるようにしている。Fig. 4 にこの挿入孔内

Fig. 4 Temperature distribution along the side wall of the cavity

で測温抵抗体感温部を前後に移動して測定した設定温度 100°C, 300°C, 500°C の 3 温度での温度分布を示す。測定は空洞底面延長面と挿入孔中心軸との交点を基点として行い, T_0 は基点, T_x は基点から距離 x の点の温度を表わす。この図では縦軸を $(T_x - T_0)/T_0$, 横軸を x と空洞開口の半径 r との比 x/r で表わし正規化して示した。

この空洞では, 空洞壁の温度 T_x を

$$T_x = \left(\frac{x}{4r}\right)^2 T_a \quad (1)$$

ただし, T_a は $x=4r$ の位置の温度 ($T_a = T_{4r}$) で表わし, 空洞壁の放射率が 0.75, r と空洞の深さ l との比が 4 の円筒空洞での実効温度 T_e と空洞開口部の温度 T_a との関係⁵⁾を適用して, $|T_e - T_0|/T_0 < 0.0005$ (100°C で $|T_e - T_0| < 0.19$ K, 400°C で $|T_e - T_0| < 0.34$ K) を満たす T_a の許容限界を算出すれば $|T_a - T_0|/T_0 \approx 0.015$ となる。この温度分布に対して, Fig. 4 の温度分布は T_0 に対する差が 1/3 以下となっていて小さい。本黒体炉においては, 同一仕様で作られたものについては, 無調整で実効温度 T_e と空洞底面の温度 T_0 との差が目標精度の 1/3 (0.33 K) 以下となる $|T_x - T_0|/T_0$ を達成することを目指した構造とした。 $|T_x - T_0|/T_0$ の実測値 (Fig. 4) がその許容値に比べて十分に小さいことから, この目標は達成されているとみなすことができ, この実測の温度分布では, T_e と T_0 との差は無視できる。

つぎに, 0.9 μ m シリコン単色放射温度計で測定した設定温度 420°C における空洞底面の左右の直径方向の温度分布を Fig. 5(a) に, 100°C, 300°C, 500°C の 3 温度で標準測温抵抗体の感温部をその設置位置から ± 10 mm 移動させて測定した温度計設置位置附近の温度分布を Fig. 5(b) に示す。空洞底面の温度が均一な状態では, その温度は空洞底面に近接したその延長面の近傍に現れる。測温抵抗体感温部はわずかな広がり

(a) Horizontal temperature distribution of the bottom surface of the cavity measured by a 0.9 μ m radiation thermometer at 420°C

(b) Temperature distribution along the cavity wall around the reference position measured by a PRT

Fig. 5 Temperature distribution over the bottom of the cavity

りをもっているが, Fig. 5(b) の測定結果から推定して, そのことによる測温誤差は小さく, 標準抵抗温度計の指示値と底面の面積平均の温度との差は, Fig. 5(a) の温度分布のレンジ以下であるとみなせる。

以上の測定結果と考察から, 放射温度計で測定される実効温度と, 標準温度計で測定される温度との差を ± 0.2 K 以下と評価した。

2.3 空洞放射率

空洞の放射率 ρ_e は, 空洞底面からの放射率 ρ_1 および側面からの放射率 ρ_2 から次式で求まる³⁾。

$$\begin{aligned} \rho_e = & \frac{\Omega_1 \rho_1}{\pi} + \frac{\Omega_2 - \Omega_1 \rho_2}{\pi} + \frac{\pi - \Omega_2}{\pi} \times \frac{(1 - \epsilon_0) \rho_2}{2} \\ & \pm \left[\left(\frac{\Omega_1}{\pi} \times 2\sigma_1 \right)^2 + \left(\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{\pi} \times 2\sigma_2 \right)^2 \right. \\ & + \left. \left\{ \frac{\pi - \Omega_2}{\pi} \times (1 - \epsilon_0) \sigma_2 \right\}^2 \right. \\ & + \left. \left\{ \frac{\pi - \Omega_2}{\pi} \times \frac{(1 - \epsilon_0) \rho_2}{2} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\Omega_1 = 2\pi \left\{ 1 - \cos \left(\tan^{-1} \frac{r}{l} \right) \right\} \quad (3)$$

(a) Radiance temperature distribution of the bottom surface of the cavity measured by a 0.9 μm and 5 μm radiation thermometer. The broken line shows the radiance temperature distribution over the surface estimated from the reflectivity distribution measurement assuming a uniform temperature distribution

(b) Distribution of the effective emissivity over the bottom of the blackbody cavity

Fig. 6 Radiance temperature and effective emissivity distribution over the bottom of the cavity

$$\Omega_2 = 2\pi \left\{ 1 - \cos \left(\tan^{-1} \frac{3r}{l} \right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 ε_0 は空洞壁の放射率、 σ_1 、 σ_2 は ρ_1 、 ρ_2 の場所むらなどに起因して生じた測定値の標準偏差、 r は空洞開口の半径、 l は空洞の深さ（この黒体炉は $l/r \approx 5$ ）を表す。この黒体での 0.9 μm の測定波長における実測値は、 $\rho_1 = 0.0839$ 、 $\sigma_1 = 0.0063$ 、 $\rho_2 = 0.0076$ 、 $\sigma_2 = 0.0011$ であって、 $\varepsilon_0 = 0.75$ として計算すると $\rho_c = 0.0051 \pm 0.0010$ となり、空洞放射率 (1-

ρ_c) は 0.995 ± 0.001 と評価される。

実際の空洞は、測定波長によって空洞放射率が若干異なり、放射率の場所むらも長波長側で大きくなる傾向をもつ。Fig. 6(a) はその影響調査の測定の一例で空洞底面の 420°C における輝度温度むらを測定波長 0.9 μm 放射温度計と 5 μm 帯域に最大分光感度を有する HgCdTe 放射温度計とで測定して比較したものである。この測定位置は、空洞底面半径方向での輝度温度むらが大きい部位に属し、Fig. 5(a) の測定の中心から左の位置と一致する。この図には、空洞底面の温度が均一な状態を仮定し、反射率の場所むら測定の結果から推定した 0.9 μm の波長に対する輝度温度むらを点線で示した。この図に表われている輝度温度むらは、0.9 μm の波長では温度むらが、5 μm 帯では放射率むらが主因となって生じたものとみなせる。Fig. 6(b) にこの測定結果 (2 波長の輝度温度差) と、0.9 μm での放射率測定の結果とから求めた、空洞底面中心を基準にして表わした放射率の場所むらを示す。5 μm 帯での放射率変化は 0.9 μm に比べて約 5 倍で大きい。

Fig. 6(b) では、中心点の二つの波長での放射率の差が定かではなく、この測定結果から長波長帯域での空洞放射率を確定することは困難であるが、ここではこの結果に基づいて、0.9 μm で評価された空洞放射率の誤差 ± 0.001 に、Fig. 6 から求める放射率の変動 ± 0.002 を加えて空洞放射率 ε_c を評価し、

$$\varepsilon_c = 0.995 \pm 0.003 \quad (5)$$

とした。この評価結果については、定点黒体との輝度温度比較などによって、その妥当性を検討することが必要である。

3. 定点比較による精度の検証

すず点 (231.9681°C) 黒体⁶⁾および亜鉛点 (419.58°C) 黒体⁷⁾の輝度温度と、標準測温抵抗体の表示温度がその定点温度と一致する状態に維持した本黒体炉の輝度温度とを放射温度計で測定し、その測定値を比較して、目標精度の達成を検証することを試みた。この実験では、標準測温抵抗体は定点校正したものを設置しており、定点黒体も精度評価されているものを使用しており、それらの誤差は無視できる。したがって、この方法では、使用する放射温度計の面積効果³⁾と、光路の水蒸気などによる放射吸収の影響を適正に評価して補正するか、その影響による誤差を消去することができれば、両黒体での放射温度計測定値の差から、目標精度の達成の可否が検証できる。

この測定において、面積効果の影響を消去するために採用した方法を Fig. 7 に示す。標準黒体炉前面に

Fig. 7 Scheme for measuring the radiance of the standard blackbody furnace with a radiation thermometer

設置した絞りは、定点黒体の放射発散面の直径 D とほぼ等しい開口径とし、絞りと放射温度計との距離は、定点黒体測定時の黒体開口部と放射温度計との距離 L に等しくしている。この配置では、放射温度計から放射発散面を臨む立体角は互いにほぼ等しく、この等しい状態が完全に実現できれば、面積効果に起因する誤差が消去される。

一方、光路の放射吸収については、光路の長さ、温度分布、空気成分などが関係してその影響が現れる。

これに対しここでは、恒温恒湿室で絶対湿度が一定に保たれた状態で測定を行い、空洞開口部と放射温度計との距離が等しい条件での放射吸収は等しいとみなして実験し、光路差のみを補正した。この補正は、Fig. 7 の測定系で標準黒体炉を前後に移動させ、その移動に伴う放射温度計出力の変化を 1 次式で表わし、絞りの位置が黒体空洞開口部に一致する状態の出力値を補外して推定する方法で行っている。この方法では、面積効果の影響を排除した状態で、標準黒体開口部と放射温度計との距離を、定点黒体開口部と放射温度計との距離に等しくした状態の測定値が求まる。

以後に、標的サイズ直径 4 mm (測定距離 40 cm) の $0.9\mu\text{m}$ シリコン単色放射温度計⁹⁾を用いて行った亜鉛点黒体との比較結果と、測定波長帯域が $2\sim 5\mu\text{m}$

Fig. 8 Radiance distribution near the opening of the fixed point blackbody furnace

で実測の指数 n^9 が $n(232^\circ\text{C})=8$, $n(420^\circ\text{C})=4.4$ の市販の HgCdTe 放射温度計を用いて行ったすず点および亜鉛点黒体との比較の結果を示す。なお、使用した HgCdTe 放射温度計の測定距離 20 cm での標的サイズは、実測値からは直径 5 mm 程度と評価され、幾何光学的に求められたカタログ値に比べて数倍大きい状態にある。

3.1 比較実験の結果

HgCdTe 放射温度計で測定した亜鉛およびすず点黒体の空洞開口部周辺の放射輝度分布を Fig. 8 に示す。定点黒体の空洞の開口径は亜鉛、すず点ともに 6 mm で、図の分布の差は加熱炉の構造および開口絞りの材質の違いによる。Fig. 8 に基づき $V_1/V_0 > 0.5$ の放射発散面の直径を D とし、亜鉛点およびすず点に対する Fig. 7 の絞りの直径を 8 mm および 18 mm とした。この絞りをを用い、Fig. 7 の配置で測定した標準黒体の測定温度と定点黒体の測定温度およびその差を Table 1 に示す。標準黒体の温度は標準抵抗温度計の指示値が定点温度と一致するように設定していて、両測定温度の差が見掛けの誤差である。

測定光路差補正のための測定結果を Fig. 9 に示す。絞りと標準黒体との距離を 0~600 mm まで変化させた場合の HgCdTe 放射温度計の指示値の変化を

Table 1 Comparison of the radiance temperatures between the fixed point blackbody furnace and the standard blackbody furnace

Fixed point	Radiation thermometer	Standard blackbody furnace			Fixed point blackbody furnace			Temperature difference $x_1 - x_0$ (K)	Standard deviation 2σ (K)
		Mean temp. x_1 (°C)	Repeated times n	Standard deviation 2σ (K)	Mean temp. x_1 (°C)	Repeated times n	Standard deviation 2σ (K)		
Sn 231.97°C	HgCdTe ($5\mu\text{m}$)	232.38	5	± 0.14	234.41	5	± 0.30	-2.03	± 0.34
Zn 419.58°C	HgCdTe ($5\mu\text{m}$)	419.90	5	± 0.18	422.84	6	± 0.54	-2.94	± 0.56
	Si ($0.9\mu\text{m}$)	419.54	6	± 0.01	419.58	4	± 0.42	-0.04	± 0.42

Table 2 Error estimation of the realized temperature of the standard blackbody furnace

unit (K)

Fixed point (radiation thermometer)	Temperature difference ΔT	Correction for emissivity ΔT_e	Absorption along the optical path ΔT_p	Size-of-source effect ΔT_s	Temperature distribution ΔT_d	Total error
Sn (5 μm)	-2.03 $\pm$ 0.34	+0.44 $\pm$ 0.27	+0.65 $\pm$ 0.12	$\pm$ 0.1	$\pm$ 0.2	-0.94 $\pm$ 0.50
Zn (5 μm) (0.9 μm)	-2.94 $\pm$ 0.56	+0.83 $\pm$ 0.51	+1.48 $\pm$ 0.30	$\pm$ 0.3	$\pm$ 0.2	-0.63 $\pm$ 0.89
	-0.04 $\pm$ 0.42	+0.15 $\pm$ 0.09		$\pm$ 0.1	$\pm$ 0.2	+0.11 $\pm$ 0.48

Fig. 9 Effect of the absorption in the optical path for a 5 μm radiation thermometer

温度換算して示しており、絞りが炉前面から 215 mm 離れた炉の内部に位置する状態が相互の光路長が等しい状態に相当する。この測定結果から光路差補正値は、錫点で $0.65 \pm 0.12 \text{ K}$ 、亜鉛点で $1.48 \pm 0.30 \text{ K}$ と評価した。シリコン単色放射温度計では光路長変化による指示値の変化は 0.1 K 以下で測定のばらつきに比べて小さく、放射吸収が非常に小さい測定波長帯域であることから無視した。

3.2 総合精度

以上の測定結果と放射率補正値などをまとめて Table 2 に示す。この表の ΔT は Table 1 の温度差、 ΔT_e は(5)式の空洞放射率と放射温度計の指数 n とから求めた放射率補正値、 ΔT_p は Fig. 9 から求めた光路差補正値、 ΔT_s は Fig. 8 の測定結果に基づいて決定した $V_i/V_o > 0.75$ および $V_i/V_o > 0.25$ に対応する D での測定値から推定した面積効果が関与した誤差、 ΔT_d は 2.2 で求めた実効温度と標準温度計で測定される温度との差を表わしており、総合誤差はこれらの集計によって求めている。

この測定では、放射吸収に対する光路の温度分布と空気成分の影響を考慮すれば、(1)標準黒体炉は空洞開口部と底面との距離が定点黒体炉に比べて長く、かつ空洞内光路の空気の温度も空洞内で対流を生じていて低いために、実際の放射吸収は仮定よりも若干大き

い、(2)亜鉛点黒体ではつぼの酸化防止のためにアルゴンガスを流した状態で測定が行われていて、光路の水蒸気の含有が少なく、実際の放射吸収は仮定よりも若干小さい、(3)すず点黒体の加熱炉は炉体の前面近くまで加熱される構造になっていて、実際の放射吸収は仮定よりも若干小さいとみなせる。これらの影響は、いずれも Table 2 の総合誤差を小さくする方向に作用する。Table 2 では、HgCdTe 放射温度計による測定での総合誤差が有意な傾向にあるが、それはこのような現象に起因したと考えられる。

以上の測定結果と考察から推定して、本黒体炉は、目標とした 1 K の精度が十分に達成されていると評価できる。

水蒸気および炭酸ガスの吸収帯を避けた $10 \mu\text{m}$ の波長帯での性能のよい放射温度計が開発されれば、放射吸収の影響を除去することが容易となり、精度のよい評価が可能となる。一方、 200°C 以下の低温域では油槽を利用することによって高精度の黒体の開発が可能で、比較条件のほぼ等しい黒体が開発されれば、長波長帯域での精度確認を容易にする。評価精度の向上には、このような放射温度計や黒体を必要とし、その開発を期待する。

4. あとがき

本黒体炉は、目標精度の達成を可能にするとともに、性能評価が行いやすい構造に設計し、製作したものであって、目標精度の達成は、性能評価実験と定点黒体を基準とした確認実験の双方の実験で実証された。この実験結果から推定すれば、同一仕様で作られた黒体炉では、反射率測定により空洞放射率を評価して補正することによって 1 K の目標精度を達成できると期待でき、 $0.9 \mu\text{m}$ 単色放射温度計による空洞底面の輝度温度分布の測定と、亜鉛点黒体との比較測定を行うことによって、その目標精度の達成を確認できるとみなせる。本報告では、さらに多くの実験を試み、その結果に考察を加えて提示したが、前述の 3 測定に限定すれば、測定が行いやすく、実用的な評価法として採用できる。

なお、空洞内壁の黒化処理については、メッキ層が剥離を起こすことがあり、メッキ層の厚さ、酸化方法などについて今後更に検討が必要である。

本黒体炉は、工業技術院共同研究規定に基づいて、産官で共同して開発したもので、すでに製品化された状態にあり、本黒体炉の完成によって信頼できる放射温度計校正方式が確立されたとみなせる。

おわりに、本黒体炉の開発に当り、有効なアドバイスをいただいた住友金属工業(株)田村洋一氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 服部 晋：放射温度計の新方式のトレーサビリティ，計測と制御，**21**-11，1014/1019 (1982)
- 2) 田村洋一：放射温度計のトレーサビリティに関する共同実験，計測と制御，**24**-12，1119/1124 (1985)
- 3) 服部 晋：放射温度計試験用の大開口黒体炉の開発実験，計測と制御，**24**-5，449/456 (1985)
- 4) Y. S. Touloukian and D. P. DeWitt: Thermal Radiative Properties of Metallic Elements and Alloys, Thermophysical Properties of Matter, **7**, 1242/1360 (1970)
- 5) 温度計測部会編：温度計測，計測自動制御学会，p. 239 (1981)
- 6) 藤原，服部：すず点黒体炉の開発，計測自動制御学会論文集，**23**-2，195/196 (1987)
- 7) F. Sakuma and S. Hattori: A Practical-Type Fixed Point Blackbody Furnace, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, **5**, 535/539 (1982)
- 8) F. Sakuma and S. Hattori: Establishing a Practical Temperature Standard by Using a Narrow-Band Radiation Thermometer with a Silicon Detector, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, **5**, 421/427 (1982)
- 9) 温度計測部会編：温度計測，計測自動制御学会，188/189 (1981)