

.....
論 文
.....

UDC 536.52 : 53.088.23 : 532.231.25

放射温度計の比較測定および黒体炉について*

白 岩 俊 男**・田 村 洋 一***

Comparative Study of Radiation Pyrometer and Blackbody

Toshio SHIRAIWA and Yoichi TAMAMURA

Synopsis:

The characteristics of four types of radiation pyrometers in which Si cell, Phototube (SI), thermopile, and PbS cell are used respectively, have been studied. Influences of emissivity variation, water film, steam, and scale on pyrometer readings are measured. A rotary furnace is used as a model that treats moving hot steel sheets.

As the standard of radiation pyrometers, a blackbody furnace and its effective emissivity has been investigated.

Results obtained are as follows.

1) The effects of emissivity variation, water film, steam, and scale on are smaller for the radiation pyrometers using shorter wave lengths ($< \lambda$) than for those using longer wave lengths.

2) The temperature distributions of the spherical blackbody furnace are excellent at present moment and the estimated effective emissivity is expected to be greater than 0.995.

(Received June 29, 1972)

1. 緒 言

圧延工程を主体に非接触測温法は光高温計による手動測定および全ふく射温度計あるいは光電管高温計による自動測定が成されてきた。また近年においては検出素子としてシリコン・セル、硫化鉛セル、ボロメータを用いた種々の放射温度計が開発されつつある。しかし非接触測温法のためスケール状況、水蒸気、水などの影響で熱的接触が不安定となる問題が生ずるため、各種の放射温度計に与えるこれらの因子の影響を調査することは適切な温度計を選択するために必要となる。これらについてはすでに発表された例^{1)~4)}があるが、実際の圧延ライン中での実験では板の真温度を求めることが困難であるため、圧延ラインのモデルとして回転加熱炉を用い、市販の4種の温度計すなわち検出素子としてシリコン・セル光電管(SI)、サーモパイル、PbSセルを用いた温度計を使用し、放射率変化、水膜、水蒸気の影響を比較測定をすることにより性能を調査⁵⁾⁶⁾した。

また黒体炉は放射温度計の基準となるものであるが、その理論的検討は過去に成されているが、実用の黒体炉についての報告はない。そこでわれわれは市販の球形黒

体炉の温度分布の測定を行ない実効放射率の推定を行なうと共に、4台の黒体炉について比較検定を行ない黒体炉のばらつきを調査し、実用上の標準の黒体炉として使用しうることが確認された⁵⁾⁷⁾。

2. 黒 体 炉

黒体炉の理論的検討についてはすでに発表^{8)~10)}されているが、規格化されておらず、工業的に使用する黒体炉について標準として使用できるか検討するために、比較試験および温度分布の測定を行ない実効放射率の推定を行なった。

2.1 黒体炉の仕様

実験に使用した黒体炉の主な仕様を Table 1 に示す。球形黒体炉で球内径が 300 mm ϕ 、測定口径が 64 mm ϕ と大きいので現在使用されている放射温度計のほとんどを校正することが可能である。球内面をシリコン・カーバイド (SiC) でコーティングしてある。その構造図を

* 昭和 46 年 10 月 12 日本会講演大会にて発表
昭和 47 年 6 月 29 日受付

** 住友金属工業 (株) 中央技術研究所 理博

*** 住友金属工業 (株) 中央技術研究所

Table 1. Specifications of spherical blackbody.

Type of blackbody	LAND (England) MT
Temperature working range	400~1 150°C
Radiation cavity	Hollow refractory sphere with SiC lining, 300 mm Dia.
Sighting tube	64 mm ϕ \times 150 mm l
Effective total emissivity	1.0025
Heating element	Kanthal "A" wire
Weight	136 kg

Table 2. Measuring instruments for calibration.

Radiation pyrometer	LAND OQO 35/50/10 20mV at 1 250°C
Blackbody	LAND MT
Thermocouple	Platinum-platinum 13% rhodium 0.5 mm ϕ
Potentiometer	Y. E. W. P-7B
Standard cell	Shimadzu CSC-2
Electronic galvanometer	Y. E. W. VN-11 Max 0.2u V/div.
Switch for potentiometer	Y. E. W. 2745

Fig. 1 に示す。

2.2 黒体炉の試験法

黒体炉の試験は、1台につき炉壁の温度分布を測定した。また同一の放射温度計、測定器を使用し4台の同機種の黒体炉について比較検定を行ないそのばらつきを調べた。

2.2.1 炉内壁温度分布測定方法

測定温度を 600, 800, 1 000°C とし、おのおのの温度について 1 hr 程度保持したのちに測定を行なった。

炉壁温度の測定は外径 3.2 ϕ のシース熱電対（クロメル-アルメル）にて炉壁に接触させ平衡に達したのちに測定を行なった。測定の前でシース熱電対と炉温測定用の PR 熱電対の両熱接点をほぼ同一の点に置き比較測定しシース熱電対の値を補正すると共に劣化のないことを確認した。

炉温が測定中ゆつくりと変化することが考えられるので黒体炉温度を示す測定用 PR 熱電対とシース熱電対と

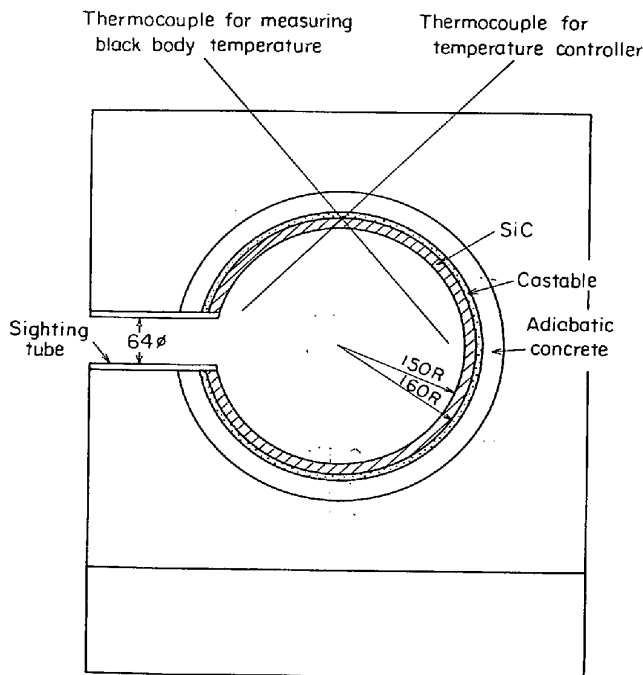


Fig. 1. Construction of spherical black body.

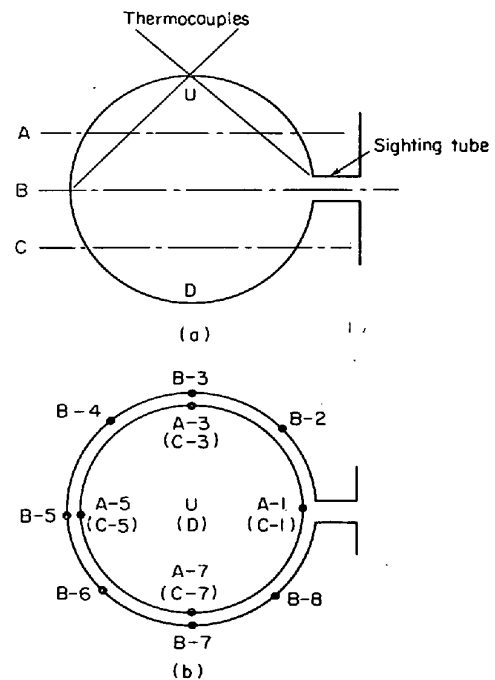


Fig. 2. Measuring point of wall temperature and symbol of measuring point.

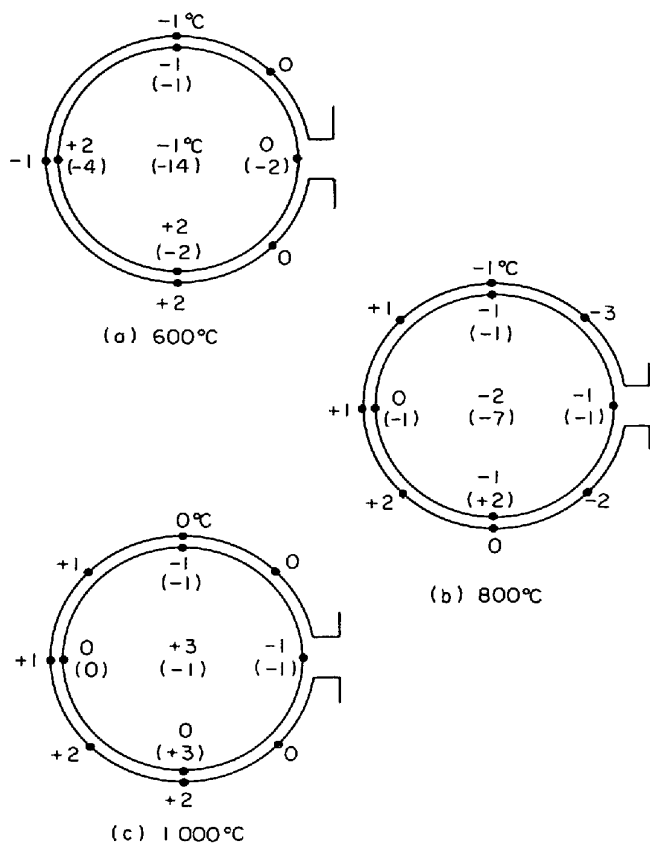


Fig. 3. Inner wall surface temperature distributions of spherical black body refer to thermocouple.

の差として温度分布を求めた。

2.2.2 黒体炉比較試験法

放射温度計, 炉温を示す PR 熱電対, 電位差計を同一のものを使用した。そのおもな仕様を Table 2 に示す。

黒体炉の測定口と温度計の中心を一致させ, その間の距離を 200 mm と一定にして比較試験を行なった。

Table 3. Results of calibration of radiation pyrometer with spherical blackbody.

	$t_p - t_{th}$		
	900°C	1000°C	1100°C
No 1 blackbody	-3.6°C -3.3	-3.6°C -3.5	0.1°C 0.4
No 2 blackbody	-5.2 -5.3	-4.7 -4.7	— —
No 3 blackbody	-3.0 -2.8	-1.1 -1.0	— —
No 4 blackbody	-3.6 -3.5	-2.4 -2.4	-1.0 -0.9
Average	-3.79	-2.93	-0.35
σ	0.88	1.35	0.86

t_p : Temperature indicated by radiation pyrometer (OQO 35/50/10)
 t_{th} : Temperature indicated by thermocouple

2.3 測定結果

2.3.1 炉内壁温度分布測定結果

測定位置とその番号付けを Fig. 2 に示す。高さ方向に A, B, C と 3 箇所とり, 円周方向に 1~8 と付ける。それと炉頂部 (U) と底部 (D) を測定した。測定結果を Fig. 3 に示す。600°C と 800°C で炉底部が -14°C, -7°C と低くなっているが, その他では測定用 PR 熱電対に対して +3°C ~ -4°C 以内に入っている。またターゲット部となる所 (B-5) については ±1°C 以内に入っている。以上の結果は良好な温度分布と考えられる。

2.3.2 黒体炉比較試験結果

比較試験は炉温 900°C, 1000°C, 1100°C の 3 点で行なった。炉温を 30 min 以上保持したのち測定を行

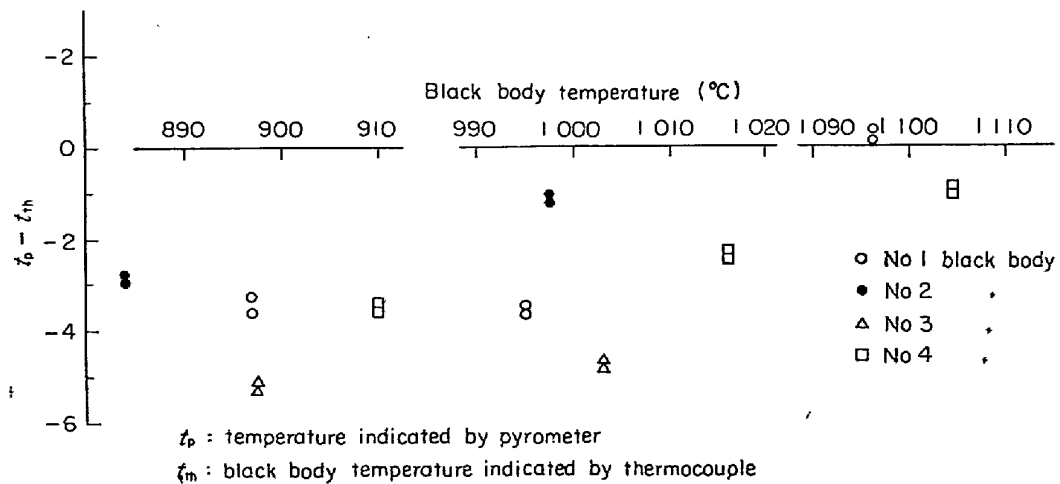


Fig. 4. Results of calibration of radiation pyrometer with spherical black body.

Table 4. Specifications of radiation pyrometer used in experiment.

Type of pyrometer	Total radiation pyrometer	Pyrometer with Si Cell	Photo tube pyrometer	Infrared radiation pyrometer
Maker	Tokyo Seiko	Land (England)	Hokushin	Infrared Industry (U.S.A.)
Type Number	RP40L	OQO 35/50/10	K11N, K23	TD-6B
Temperature range	600~1800°C	700~1400°C	700~1200°C	100~1800°C
L/D and/or Min. target size	L/D=40 D \geq 30 mm ϕ	20mrad. 8.5 mm ϕ at 250 mm	D \geq 20+0.17L	7 mrad. Min. target size 3.7 mm ϕ
Used wave length	\sim 2.6 μ	0.5~1.1 μ 0.8 μ peak	0.4~1.1 μ 0.8 μ peak	1.7~2.2 μ
Detector	Thermopile	Silicon cell	Photo tube (S1)	PbS cell with filter
Ambient temperature operating range		\sim 80°C		\sim 50°C
On put	1.74mV at 1000°C	2.7mV at 1000°C	36.45mA at 1000°C	10mV full scale

なつた。その結果を Table 3 および Fig. 4 に示す。

放射温度計の指示と炉温を示す PR 熱電対の指示の差が温度によって異なるのは放射温度計の誤差と考えられる。各温度でのばらつきは黒体炉そのもののばらつきおよび検定のばらつきと思われるが、その値は 900°C で $\sigma=0.88^\circ\text{C}$ 、1000°C で $\sigma=1.35^\circ\text{C}$ 、1100°C で $\sigma=0.86^\circ\text{C}$ であり実用の標準炉として十分な精度であると思われる。

3. 放射温度計の比較試験

3.1 使用温度計について

比較試験に使用した放射温度計はいずれも市販のものであり、そのおもな仕様を Table 4 に示す。また使用波長について Fig. 5 に示す。使用波長の制限は機種に

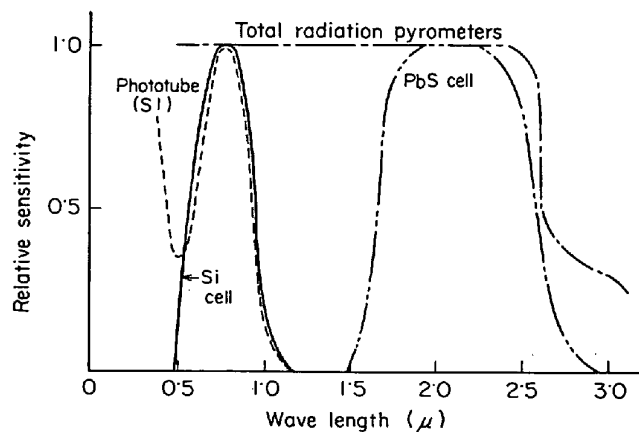


Fig. 5. Relative spectral sensitivity of radiation pyrometers.

よつて違うが、検出器の感度によつて制限されるもの(シリコン・セル, 光電管)窓材によるもの(サーモパイル)および内蔵フィルタと検出器感度によるもの(PbSセル)に分けられる。

3.2 実験方法

3.2.1 応答速度の測定

応答速度の測定は、応答の遅い機器に対してはタングステンランプのオン・オフにより測定し、応答速度の速い機器に対してはレンズシャッタの開閉により光束をオン・オフすることにより測定した。

使用したタングステンランプは立上り 60m sec, 立下り 45m sec なので時定数 0.3 sec 以上のものに対しては誤差が生じないので適用した。レンズシャッタは 1/500 sec で開閉すると立上り, 立下り共に約 0.4m sec であつたので、これ以上速い応答速度に対しては測定していない。また工業的にはこれ以上速い測定は必要ないものと判断した。

3.2.2 放射率変化に対する誤差を求める方法

これは黒体炉と温度計の中間に回転セクタを設け、高応答速度の温度計に対しては一次遅れの積分性をもたせ等価的に灰色体になるようにして測定した。放射率はセクタの面積から換算した。セクタの設置位置はほぼ温度計の焦点上に置いた。セクタの回転数は約 1800 rpm である。

3.2.3 回転加熱炉における実験法

移動鋼材のモデルとして回転加熱炉を用いて実験した。その概略を Photo. 1 に示す。加熱円板の表面温度

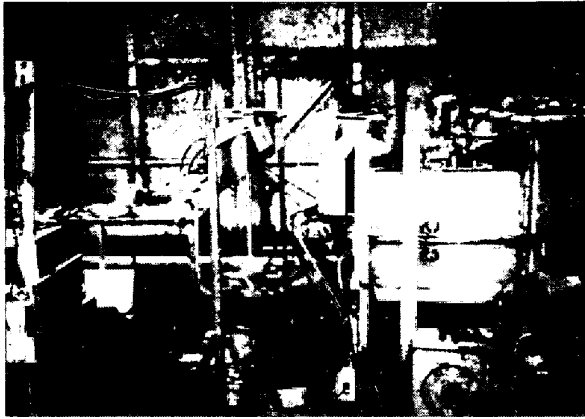


Photo. 1. General view of rotary furnace.

は円板上に点溶接したクロメル-アルメル熱電対の指示をスリッピングを通して測定している。

スケールの影響を調べる以外は、加熱前に試料円板の表面をグラインダにて研削しスケールを落とし実験中ルース・スケールの発生しない状態で測定した。

(1) 水膜吸収の影響

加熱鋼材の表面に水が乗っている状態で鋼材が走っていることがときどき生ずる。このときには水膜による吸収のほかに水膜と板表面の間に水蒸気膜が発生すること、水乗りによる表面温度の低下が生ずるため表面温度測定が妥当であるかどうか検討する所までもどるの必要があり、水乗りの影響を単なる水膜の吸収だけで論ずることは出来ないが、水乗りが生じているときの指示低下の目安として水膜の吸収の影響を調査した。

実験方法は、加熱円板と放射温度計の間に水膜を作りそれによる指示低下を測定した。水膜の厚みは、水膜が初速ほぼ零で落下するようにし、自由落下から速度を算出し、流量、水膜の幅から推定した。

(2) 水蒸気の吸収による指示誤差

水蒸気の発生はロール冷却水、脱スケール用の水などが原因で発生する。水蒸気の吸収による誤差を求める実験方法は水膜と同様に加熱円板と放射温度計の間に水蒸気を吹き付けて行なった。これはゴムホースの先端から水蒸気を吹き付けたため、すべての温度計に対して同一の状態を再現することがむずかしく1台ずつ調査したため水蒸気の量が一定になり難い。その状況をPhoto. 2に示す。

(3) スケールの影響

ルースなスケールが発生すればスケールの表面温度は低下するため指示温度も低下する。ルースなスケールを発生させ、距離係数の大きな赤外線放射温度計 (PbS) にて測定し、その出力、時間平均およびピーク値をピークピッカーで求めた。時間平均は時定数約0.6 sec とし、



Photo. 2. Appearance of steam.

Table 5. Results of response time measurement.

	Rise time	Fall time
Thermopile	1.2 sec	1.2 sec
Si Cell	<0.4 msec	<0.4 msec
Phototube	*200msec	3msec
PbS Cell	14msec	21msec

* Settling time within $\pm 5\%$ of final value

サーモパイルを使用した全ふく射温度計 (Total radiation pyrometer) の値に大体一致させた。ピークピッカーは充電時定数約 1m sec 放電時定数約 15 sec である。

3.3 実験結果

3.3.1 応答速度

応答速度の測定結果を Table 5 に示す。一次遅れのとき定数として示している。光電管高温計は調整不十分のためか立上り時に振動的になるため最約値の $\pm 5\%$ 以内に収束するまでの整定時間で示してある。

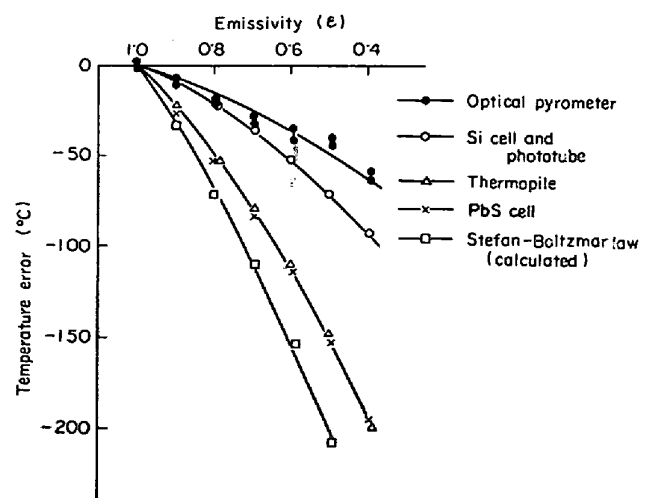


Fig. 6. Temperature errors of pyrometer due to emissivity variation (i) 1000°C.

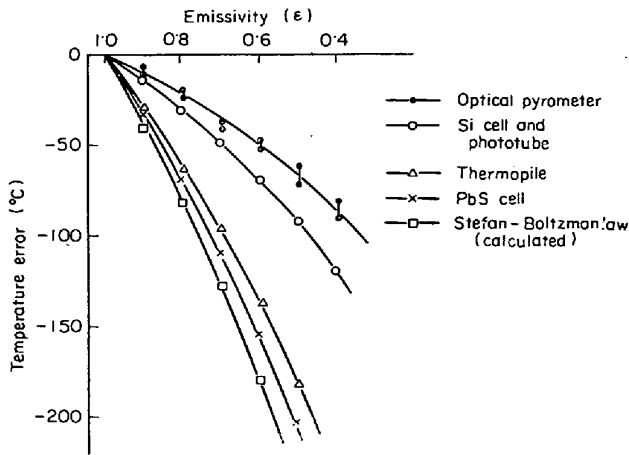


Fig. 7. Temperature errors of pyrometer due to emissivity variation (ii) 1200°C.

全ふく射温度計の 1.2 sec 以外は工業的には十分な応答速度を有している。とくにシリコン・セルを用いた放射温度計は高応答速度を有している。

3.3.2 放射率変化による誤差

Fig. 6 および Fig. 7 に 1000°C および 1200°C での測定結果を示す。放射率は 0.4 から 1.0 まで測定している。図には前記の 4 種の温度計のほかにも手動測定による光高温計の測定結果とステファン・ボルツマンの 4 乗則に対する計算結果も示してある。

また鋼材の放射率を鋼板に点溶接した熱電対と放射温度計の指示より求めると機種により多少の差はあるが 0.8 ± 0.02 である。したがって 1000°C での各放射温度計の補正量は光高温計で -15°C 、Si セルおよび光電管高温計が 21°C 、サーモパイルおよび PbS セルは 49°C であり、使用波長が短いほど補正量が少ない。

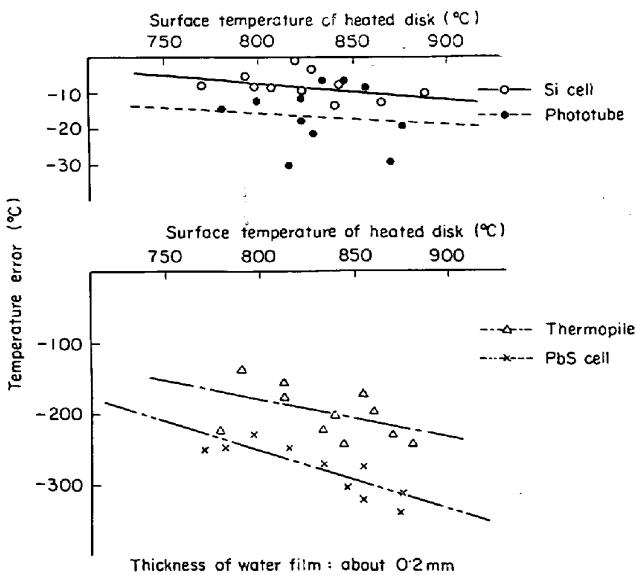


Fig. 8. Temperature errors due to water film.

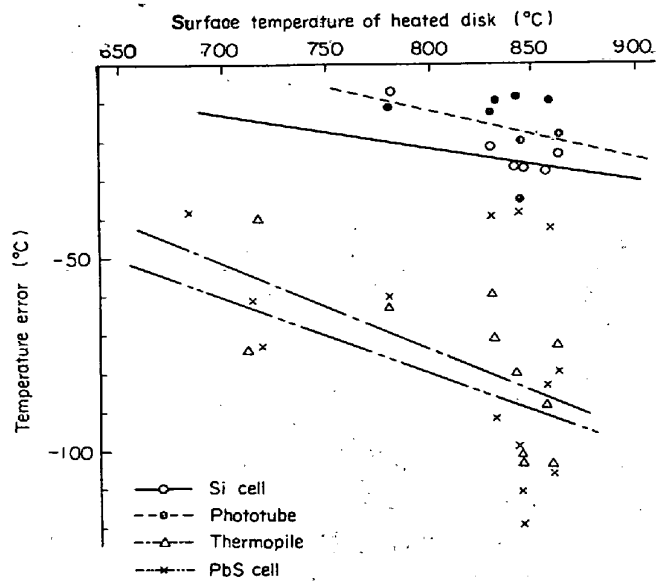


Fig. 9. Temperature errors due to steam.

3.3.3 水膜吸収の影響

測定結果を Fig. 8 に示す。水膜の厚さは約 0.2 mm である。これによるとサーモパイルと PbS セルは 850°C で約 -200°C 、 -290°C と非常に低い値を示している。一方 Si セル、光電管高温計は 850°C で -10°C 、 -17°C で上記の値に対して 1 桁以上誤差が少ない。

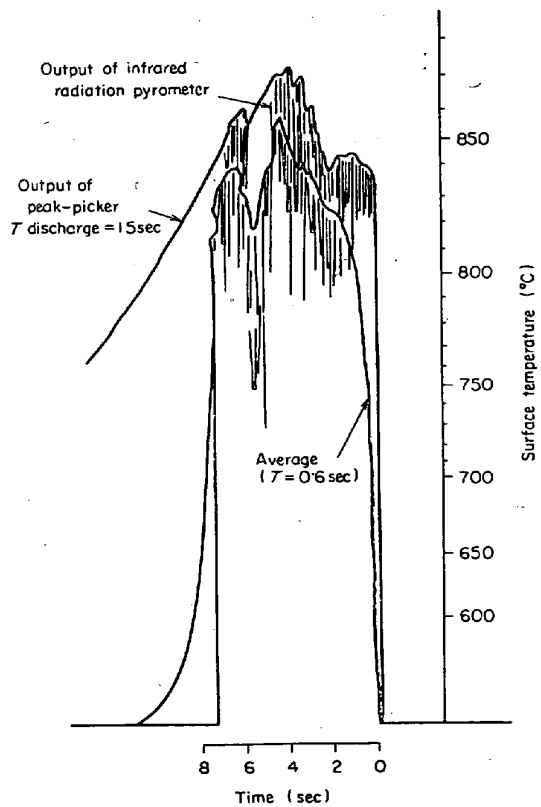


Fig. 10. Influence of loose scale and record of peak-picker output.

Table 6. Experimental results of radiation pyrometer.

Type of pyrometer	Response time	Emissivity *1 variation	Water film *2	Steam *2
Thermopile	1.2 sec	-63°C	-200°C	-85°C
Si Cell	<0.4msec	-30°C	-10°C	-27°C
Phototube	Rise time 200msec Fall time 3mses	-30°C	-17°C	-20°C
PbS Cell	21msec	-68°C	-290°C	-90°C
Optical pyrometer		-20°C		

*1 at 1200°C, ε: 1→0.8 *2 at 850°C

これは水膜の吸収係数が 1μ 以上になると急激に増加する¹¹⁾ことから定性的に説明できる。

光高温計については光電管高温計, Si セルと同程度の誤差が期待できるが, 実測は水膜のゆらぎのため困難であった。

3.3.4 水蒸気の吸収による誤差

測定結果を Fig. 9 に示す。測定結果にばらつきが多いのは水蒸気の吹き付け状況が各温度計に対して一定にしにくいためである。サーモパイルと PbS セルがやはり誤差が大きく, 850°C で -85°C, -90°C であり, 光電管高温計, Si セルがそれぞれ -20°C, -27°C であり, 水蒸気に対しても波長の短い方が誤差が少ない。

3.3.5 スケールの影響およびピークピッカの試験

測定結果を Fig. 10 に示す。ピークピッカ出力と時間平均出力との差は 10~40°C 生じておりピークピッカのスケールに対する有効性がわかる。ピークピッカはその他に水乗り, 水蒸気の発生する所にも有効に使用しうる。

以上の実験結果を Table 6 に示してあるが, 試験した4種の温度計については使用波長の短い Si セルおよび光電管高温計が影響因子のいずれに対しても誤差が少ない。

4. 考 察

4.1 球形黒体炉の実効放射率

黒体炉はターゲット以外との相互反射作用を利用して黒体条件に近づけているので, 炉壁の温度分布, 炉壁の放射率の波長および温度依存性を考慮して算出するのは非常に困難であるので次の2点を仮定して実験に使用した黒体炉の実効放射率を算出する。

仮定 1: 炉壁については完全拡散面であり, かつ透過はないものとする。

仮定 2: 炉壁の放射率は温度および波長の依存性がないものとする。すなわち炉壁は灰色体(gray body)

であるものとする。

4.1.1 2点間の相互係数¹⁰⁾について

まず一様な連続面について相互反射の結果求まる放射量の一般式は (1) 式のように書ける。

$$E(X_1) = \epsilon E_b\{T(X_1)\} + (1 - \epsilon) \int_S k(X, X_1)(EX) dS(X) \dots\dots\dots (1)$$

ここで $E_b\{T(X_1)\}$: X_1 点における温度 $T(X_1)$ によって決まる黒体放射量

$E(X)$: X 点における相互反射の結果求まる放射量

$k(X, X_1)$: X と X_1 の2点間の相互係数

ϵ : 物質(灰色体)の放射率

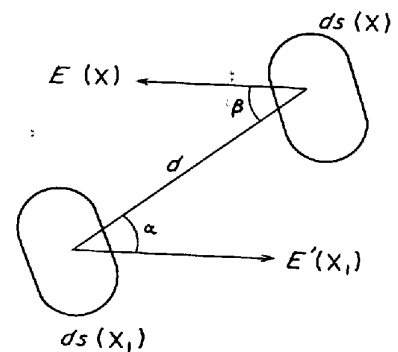
(1)式によつて定義される2点間の相互係数はFig. 11に示すように2点間の距離 d , 2点を結ぶ直線と角 α , β をなすような $dS(X_1)$, $dS(X)$ において(2)式で求める¹⁰⁾。

$$k(X, X_1) = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\pi d^2} \dots\dots\dots (2)$$

球形黒体炉について求めると $k(X, X_1)$ は位置に無関係になり球の表面積に逆比例する。すなわち

$$k(X, X_1) \text{ 球形} = \frac{1}{4\pi R^2} \dots\dots\dots (3)$$

ただし R は球の半径



$E(x)$: radiation normal to $ds(x)$
 $E'(x)$: reflection normal to $ds(x_1)$ due to $ds(x)$
 $k(x, x_1) = E'(x_1)/E(x)$

Fig. 11. Illustration of $k(x, x_1)$.

Table 7. Effective emissivity of spherical black body.
(i) Uniform temperature.

ϵ : emissivity of SiC	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\epsilon_{ef}(X_0)$: effective emissivity of spherical blackbody	0.987	0.991	0.994	0.997	0.999	1.0

4.1.2 実効放射率をあらわす一般式

球形黒体炉においてターゲット部 (X_0 とする) の炉壁温度 $T(X_0)$ [K] をもつて黒体温度とすると, X_1 点での実効放射率 $\epsilon_{ef}(X_1)$ は (4) 式で表わされる.

$$\epsilon_{ef}(X_1) = \frac{\Delta E(X_1)}{E_b\{T(X_0)\}} = \epsilon \frac{E_b\{T(X_1)\}}{E_b\{T(X_0)\}} + \frac{1-\epsilon}{4\pi R^2} \int_s \frac{E(X)}{E_b\{T(X_0)\}} \cdot dS(X) \dots\dots (4)$$

ここで $\frac{E(X)}{E_b\{T(X_0)\}} = \epsilon_{cf}(X)$, $\frac{E_b\{T(X)\}}{E_b\{T(X_0)\}} = f(X)$ とすると

$$\epsilon_{ef}(X_1) = \epsilon f(X_1) + \frac{1-\epsilon}{4\pi R^2} \int_s \epsilon_{cf}(X) dS(X) \dots\dots (5)$$

温度分布が決まると (5) 式の第 2 項は定数になるので, これを C とおくと $\epsilon_{ef}(X_1) = \epsilon f(X_1) + C$ となり

$$\epsilon_{ef}(X_1) = \epsilon f(X_1) + C = \epsilon f(X_1) + \frac{1-\epsilon}{4\pi R^2} \int_s (\epsilon f(X) + C) dS(X) \dots\dots (6)$$

(6) 式より C を求め, 開口部を見込んだ立体角を ω_1 とし, 立体角で書き直すと (7) 式が得られる.

$$C = \frac{\epsilon(1-\epsilon) \int_s f(X) dS(X)}{4\pi R^2 - (1-\epsilon) \int_s dS(X)} = \frac{\epsilon(1-\epsilon) R^2 \int_{\omega_1}^{4\pi} f(X) d\omega}{4\pi R^2 - (1-\epsilon) R^2 (4\pi - \omega_1)} \dots\dots (7)$$

したがって X_1 点の実効放射率は (8) 式のように書き, ターゲット部 (X_0) での実効放射率 $\epsilon_{ef}(X_0)$ は (9) 式のようになる.

$$\epsilon_{ef}(X_1) = \epsilon f(X_1) + \frac{\epsilon(1-\epsilon) \int_{\omega_1}^{4\pi} f(X) d\omega}{4\pi - (1-\epsilon)(4\pi - \omega_1)} \dots\dots (8)$$

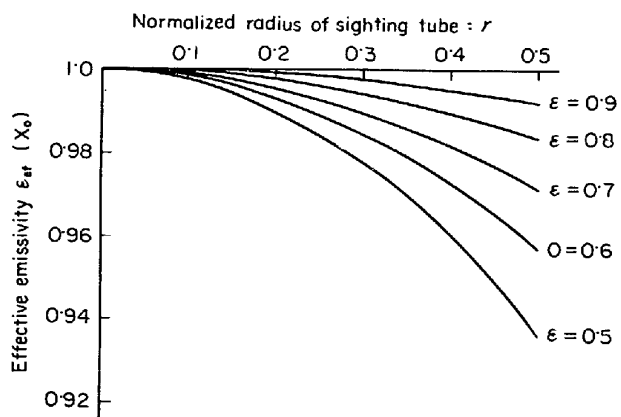


Fig. 12. Effective emissivity of spherical black body (i) Uniform temperature.

$$\epsilon_{ef}(X_0) = \epsilon + \frac{\epsilon(1-\epsilon) \int_{\omega_1}^{4\pi} f(X) d\omega}{4\pi - (1-\epsilon)(4\pi - \omega_1)} \dots\dots (9)$$

4.1.3 温度分布が一様なとき

温度分布が一様なときには $f(X) = 1$ となる. 球の半径 R_1 , 開口部の半径を R_2 とし $r = R_2/R_1$ で定義すると r と ω_1 の関係は (10) 式となり実効放射率は (11) 式のようになる.

$$\omega_1 = 2\pi(1 - \sqrt{1-r^2}) \dots\dots (10)$$

$$\epsilon_{ef}(X_0) = \frac{2\epsilon}{1 - \sqrt{1-r^2} + \epsilon(1 + \sqrt{1-r^2})} \dots\dots (11)$$

実験に使用した炉の条件を入れると $r = 0.227$ となりこれを (11) に入れると (12) 式のようになり種々の放射率 (ϵ) に対して計算したものを Table 7 に示す.

$$\epsilon_{ef}(X_0) = \frac{2\epsilon}{0.026 + 1.974\epsilon} \dots\dots (12)$$

また一般的に, 種々の r , ϵ に対して計算した結果を Fig. 12 に示す.

4.1.4 温度分布を考慮したときの実効放射率

開口部の影響を入れ, かつ温度分布を考慮したときの実効放射率を推定する. Fig. 3 にて示した温度分布の測定点は 15 もしくは 17 点であるが, それぞれの温度値が炉内壁の面積をそれぞれ 15 等分, 17 等分したときのおおのの代表値であると仮定して計算する. 種々の炉壁材質の放射率に対して計算した結果を Table 8 に示す.

4.1.5 SiC の放射率

黒体炉内壁にライニングされている SiC の放射率を実際に測定することは難しいので, 文献¹²⁾にて SiC のデータを調べると Fig. 13~Fig. 15 に示したものが得

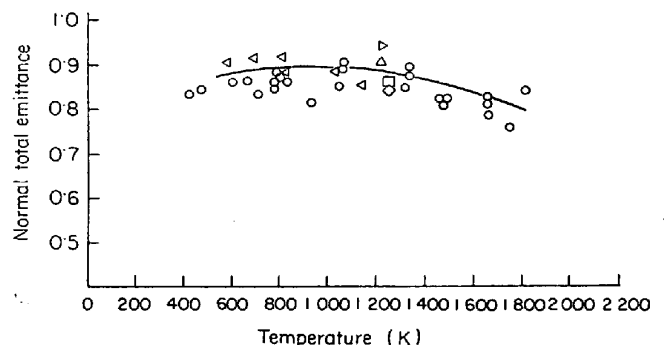
Fig. 13. Normal total emittance...Silicon carbide¹²⁾.

Table 8. Effective emissivity of spherical black body (ii) including temperature distribution.

Emissivity : ϵ	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Temperature						
600°C	0.988	0.992	0.994	0.997	0.999	1.0
800°C	0.985	0.989	0.993	0.996	0.998	1.0
1000°C	0.987	0.991	0.994	0.997	0.999	1.0

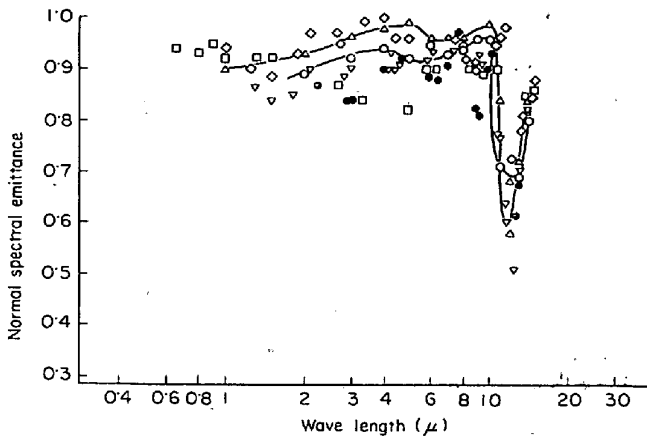


Fig. 14. Normal spectral emittance...Silicon carbide¹²⁾.

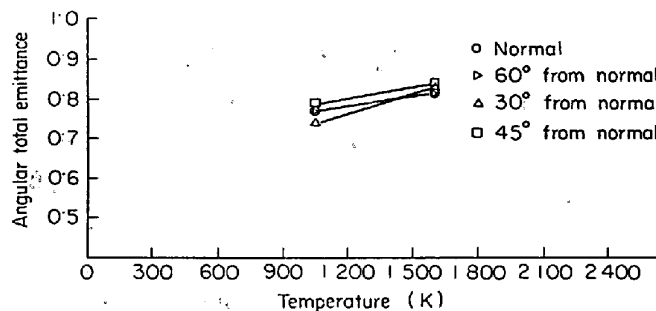


Fig. 15. Angular total emittance...Silicon carbide¹²⁾.

られた。

以上のデータから、先に仮定した2点すなわち完全拡散面と灰色体の2つの仮定がほぼみたされているものとする。またその仮定のもとで SiC の放射率が0.8以上あるものと思われる。

以上の結果より SiC を内壁とした球形黒体炉は、実効放射率が0.995以上が期待できる。

4.1.6 球形黒体炉で校正したときの誤差

以上のように実効放射率が0.995以上期待できることより、この黒体炉で校正したときの黒体炉のみにより生ずる誤差を算出すると次のようになる。

すなわち放射温度計の出力はある温度で黒体にて校正したとき、その温度近傍で (13) 式で示される。

$$E = kT^n \dots\dots\dots (13)$$

Table 9. Example of n value.

Temperature	$t = 800^\circ\text{C}$	$t = 1000^\circ\text{C}$
Type of pyrometer		
Si Cell	14	11.9
Thermopile	6.5	5.8
Law of Stefan-Boltzman	4	4

Table 10. Errors calibrated with black body whose emissivity is 0.995.

Temperature	$t = 800^\circ\text{C}$	$t = 1000^\circ\text{C}$
Type of pyrometer		
Si Cell	0.4°C	0.5°C
Thermopile	0.8°C	1.1°C
Law of stefan-Boltzman	1.3°C	1.6°C

Table 11. Calibration error caused by temperature variation of black body.

Temperature of black body	Heating rate (°C / min)	Cooling rate (°C / min)	Calibration error (°C)
About 1000°C	2.15	2.25	-2.3~1.7
	1.5	2.1	-1.5~1.6
	0.75	1.1	-0.7~0.7
	0.1	0.4	-0.1~0.3

ここで E : 放射温度計の電氣的出力

T : 温度 [K]

(13) 式の n の値をシリコンセルを用いた放射温度計, サーマピルを用いた放射温度計の値を求めると、機種によつても多少差異があるが、Table 9 のようになり、圧延工程で実用されているものは5~15の間であると思われる。

Table 9 の値を用い (14) 式より、実効放射率 0.995 を有する黒体炉で検定したとき生ずる誤差は Table 10 のようになり、1000°C にて最大約 1°C であり、工業用の標準としては十分であろう。

$$k(T - \Delta T)^n = \epsilon_{\text{eff}} \cdot kT^n \dots\dots\dots (14)$$

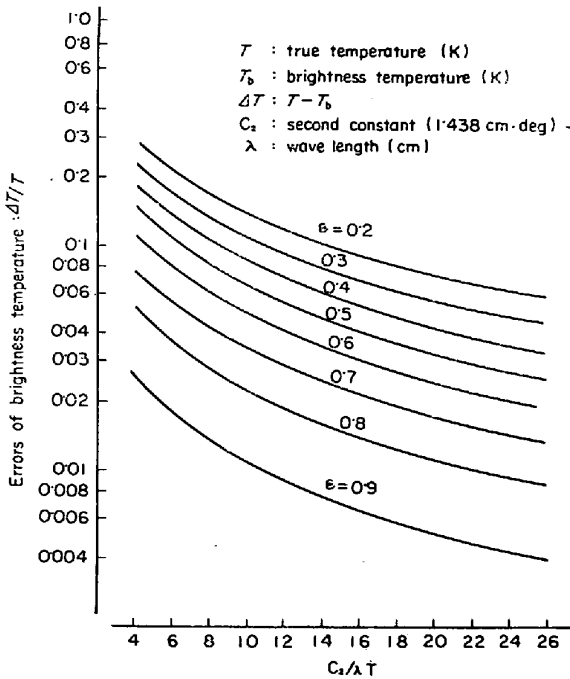


Fig. 16. Errors of brightness temperaturc.

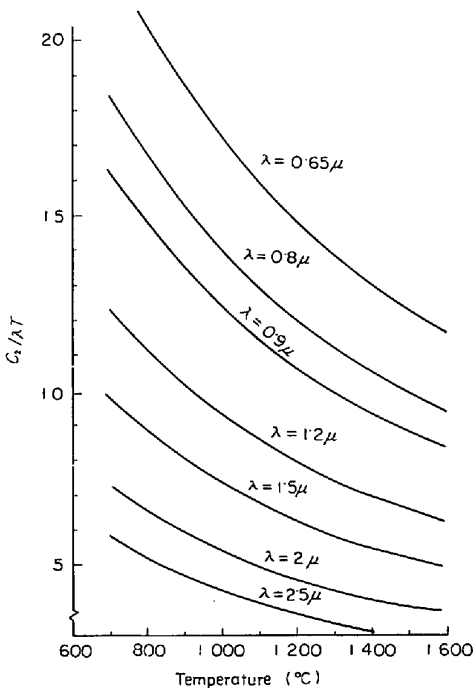


Fig. 17. Relation between temperature and $C_2/\lambda T$

4.2 黒体炉の炉温の保持について

炉の昇温中および降温中では放射温度計と炉温指示用熱電対との応答の差および炉の温度分布の変化などのため誤差が生ずることが考えられる。

1000°C 付近で炉温を人為的にハンチングさせたときの熱電対と放射温度計 (OQO 35/50/10) との指示の差を求めたのが Table 11 である。この結果によると精密

な検定をするには炉温を少なくとも 0.5°C / min 以内の変動におさえる必要があるものと思われる。

4.3 輝度温度の放射率変化による誤差

輝度温度の放射率変化による誤差は古くから論ぜられているが、われわれは以下に示すような図を作成して求めている。

輝度温度はプランクの式に従いある特定の波長での輝度を求めるもので、高温測定を行なう範囲ではウィーンの式 (15) 式で近似できる。

$$E(\lambda, T) = \frac{\epsilon \cdot C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T)} \dots\dots\dots (15)$$

ここで C_1 , C_2 は定数で、 ϵ が放射率、 λ が波長である。(15) 式を全微分すると (16) 式が得られる。

$$\frac{dE(\lambda, T)}{E(\lambda, T)} = \frac{d\epsilon}{\epsilon} + \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{dT}{T} \dots\dots\dots (16)$$

すなわち温度の変化率の方が $C_2/\lambda T$ 倍だけ放射率の変化率よりエネルギー変化に寄与するため $C_2/\lambda T$ が大きいほど放射率の変化が指示温度に与える影響が少なくなことはよく知られている。したがって感度の点で許されるならできるだけ短い波長を利用することが、この式から有利であることがわかる。

次に輝度温度の誤差を求めると、よく知られているように (17) 式が求まり、それを (18) 式のように変形する。

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} = \frac{\ln \epsilon}{C_2/\lambda} \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\ln \epsilon}{(\ln \epsilon - C_2/\lambda T)} \dots\dots\dots (18)$$

ここで T : 黒体温度 [K]

T_b : 輝度温度 [K]

λ : 使用波長

ϵ : 放射率

$\Delta T = T - T_b$

(18) 式をグラフにしたものが Fig. 16 であり、図の横軸 ($C_2/\lambda T$) と温度の関係を求めたものが Fig. 17 である。

われわれは Fig. 16 と Fig. 17 から輝度温度の誤差を求めている。

5. 結 言

以上の実験結果より次の点が言える。

(1) 球形黒体炉は温度分布も良好で、炉壁材質 (SiC) について灰色体、拡散性を仮定すると実効放射率は 0.995 以上が期待でき、黒体からのずれによる誤差は 1000°C で 1°C 以内の誤差で検定できる。

(2) 4 個の黒体炉についてのばらつきは 900°C で

$\sigma=0.88^{\circ}\text{C}$, 1000°C で $\sigma=1.35^{\circ}\text{C}$, 1100°C で $\sigma=0.86^{\circ}\text{C}$ である.

(3) 昇温速度, 降温速度が検定に誤差を主ずるので, 炉温は少なくとも $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内の変動におさえる必要がある.

(4) 以上の3点より 1150°C までの温度で実用上の標準炉として十分使用しうる.

(5) 市販の放射温度計を用いて環境因子の指示温度に与える影響を調査したが, すでに発表されている結果¹⁾³⁾⁴⁾と同様スケール, 水蒸気, 水乗りのいずれに対しても波長 1μ 以下を使用した温度計が誤差が少ない.

(6) ルーススケールの発生, 水蒸気, 水乗りなどの問題が生ずるが, 測定環境条件の改善が第一であるが, 不完全な所はピーク値保持による方法で改善が期待できる.

文 献

1) A. S. WEINSTEIN: Iron Steel Eng., 43 (1966)

July, p. 85
 2) E. F. KURZINSKI: Iron Steel Eng., 42 (1965) Dec., p. 91
 3) W. MIKELSON: ISA Journal, 11 (1964) Sep., p. 61
 4) R. BARBER and J. D. CRESSWELL: ISA Proceedings, 1965 National Conference Instrumentation for Iron & Steel Industry (1965) p. 12-1 [ISA]
 5) 白岩・田村: 鉄と鋼, 57 (1971) 11, p. 163
 6) 鉄鋼協会 計測部会 第 48 回会議資料
 7) 鉄鋼協会 計測部会 第 50 回会議資料
 8) J. C. DE Vos: Physica 20 (1954), p. 669
 9) 山内: 電気試験所研究報告第 378 号 (1935)
 10) 上滝: 電気試験所研究報告第 558 号 (1957)
 11) International Critical Tables vol5, p. 269 [McGraw Hill]
 12) Y. S. TOULOUKIAN: Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials, 5(1967), p. 131 [Macmillan Company]