
炉内での鋼材・鋼帯の温度測定

Temperature Measurement of Slab and Strip in Furnace

田宮 稔士(Toshio Tamiya) 栗田 邦夫(Kunio Kurita) 峰松 隆嗣(Takashi Minematsu)
増野 豊彦(Yasuhiko Mashino) 田村 清(Kiyoshi Tamura) 佐藤 邦昭(Kuniaki Sato) 金田 欣亮(Yoshiaki Kaneda)

要旨：

炉の操業は従来炉温を測定することにより制御されてきた。しかし、最近の省エネルギー・品質向上の面から鋼材・鋼帯自身の温度管理が厳しい要求されるようになった。炉内の物体の温度を非接触で連続測定するためには放射温度計が最善である。しかし、一般の測温と違い、炉内での放射測温には、炉壁からの反射、輝炎の影響などの外乱がある。そこで今回、加熱炉と連続焼鈍炉に放射温度計を適用するに当たり、鋼材、鋼帯の放射率測定測定誤差などの検討、実験を行い、加熱炉内スラブ測温に遮光管と放射温度計を組合せたラジェーションシールド法を適用した結果、精度よく測定できることがわかった。

Synopsis：

In conventional furnace operation, temperature control was made only by measuring the temperature of the furnace wall or atmosphere. Recently, however, temperature control of the slab or strip itself has come to be strongly demanded owing to the trends of energy saving and quality improvement. Non-contact and continuous temperature measurement of the slab or strip in the furnace was best achieved by a radiation pyrometer. However, radiation temperature measurement in the furnace, contrary to ordinary temperature measurement, was affected by external disturbances such as reflection and obscuration. After examination and experiments on the method of measuring the radiation factor of the slab or strip and on measurement errors, a radiation shield method combining the radiation pyrometer with a shielding pipe has been applied to measuring the temperature of the slab or strip in the reheating furnace and continuous annealing line, and accurate temperature measurement has been successfully achieved.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

炉内での鋼材・鋼帯の温度測定

Temperature Measurement of Slab and Strip in Furnace

田 宮 稔 士*
Toshio Tamiya

栗 田 邦 夫**
Kunio Kurita

峰 松 隆 嗣***
Takashi Minematsu

増 野 豈 彦***
Yasuhiko Mashino

田 村 清****
Kiyoshi Tamura

佐 藤 邦 昭*****
Kuniaki Sato

金 田 欣 亮*****
Yoshiaki Kaneda

Synopsis:

In conventional furnace operation, temperature control was made only by measuring the temperature of the furnace wall or atmosphere. Recently, however, temperature control of the slab or strip itself has come to be strongly demanded owing to the trends of energy saving and quality improvement. Non-contact and continuous temperature measurement of the slab or strip in the furnace was best achieved by a radiation pyrometer. However, radiation temperature measurement in the furnace, contrary to ordinary temperature measurement, was affected by external disturbances such as reflection and obscuration.

After examination and experiments on the method of measuring the radiation factor of the slab or strip and on measurement errors, a radiation shield method combining the radiation pyrometer with a shielding pipe has been applied to measuring the temperature of the slab or strip in the reheating furnace and continuous annealing line, and accurate temperature measurement has been successfully achieved.

1. 緒 言

炉内にある鋼材・鋼帯の温度をオンラインで測定することは、品質管理・省エネルギー上重要である。この測温技術に関しては、これまで多くの文献^{1,2)}により、その手法・テスト結果が報告されており、測温対象・測温条件に応じた配慮が必要であることが明確となっている。

物体の温度を非接触で連続測定するためには、

放射温度計の利用が最適であるが、炉内での放射測温には、放射率はもちろん反射率（背光）の影響も考慮する必要がある。そこで今回、加熱炉と連続焼鈍炉に放射温度計を適用するにあたり、いくつかの実験・検討を行なったので報告³⁾する。

2. 炉内物体の放射測温について

炉内において鋼材の放射測温を行なう場合、測定される放射量は、鋼材自身の固有放射と炉壁か

* 千葉製鉄所設備部設備技術室主査(課長)

*** 千葉製鉄所設備部設備技術室主査(掛長)

***** 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査(掛長)
〔昭和56年11月27日原稿受付〕

** 技術研究所第4研究部計測研究室室長

**** 技術研究所第4研究部計測研究室

***** 千葉製鉄所設備部設備技術室

らの相互反射とが重畳した状態となる。この関係は一般的に(1)式のように表わされる。

$$\Psi = e + \rho \cdot \Sigma i \quad \dots\dots\dots(1)$$

Ψ : 合成放射量

e : 固有放射量

ρ : 反射率

Σi : 他のすべての面からの放射照度

ここで Fig. 1 に示す水冷式遮光管を用い、特定の放射温度計により合成放射量を測定すると、その出力は(1)式を具体的なパラメータで示すことにより(2)式のように表わされると仮定した。

$$U(T') = \epsilon_0 \cdot U(T) + (1 - \epsilon_0) \cdot (1 - \alpha) \times r_D \cdot \epsilon_W \cdot U(T_W) \quad \dots\dots\dots(2)$$

U : 放射温度計の出力に關係する有効パワー

ϵ_0 : 固有放射率

α : 遮光管の遮蔽率

r_D : 拡散反射の割合

ϵ_W : 炉壁の実効放射率

T' : 放射温度計の指示 (輝度温度)

T : 被測定物の温度

T_W : 炉壁温度

実際の测温においては ϵ_0 はもちろん、(2)式右辺第2項の係数 b [$b = (1 - \epsilon_0) \cdot (1 - \alpha) \cdot r_D \cdot \epsilon_W$] の値を知ることが不可欠である。また、各パラメータを正確に測定するためには、 $U(T)$ の関数形を知ること重要である。以下に $U(T)$ 、 ϵ_0 、 b について述べる。

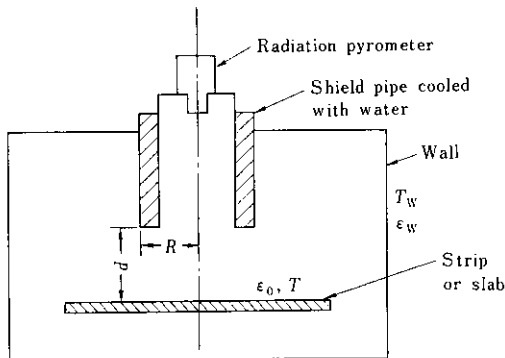


Fig. 1 Radiation shield for measuring temperature of strip or slab

3. 放射温度計の特性式

3.1 放射率と温度特性式

狭帯域および広帯域の放射温度計において検出器に入射する全放射束のうち検出器に捕えられ、温度出力に寄与する有効パワー $U(T)$ は(3)式で与えられる。

$$U(T) = A \Sigma \tau(\lambda) \cdot W(\lambda, T) \cdot S(\lambda) \quad \dots\dots\dots(3)$$

A : 定数

λ : 波長

$\tau(\lambda)$: フィルター、レンズなどの透過率

$S(\lambda)$: 検出器の分光感度

$W(\lambda, T)$: プランクの放射則

既知の $W(\lambda, T)$ や $\tau(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$ の測定値から、 $U(T)$ を(3)式により求めておけば、以下に示すように、分光放射率 $\epsilon(\lambda)$ と関係づけられる波長帯域における、固有放射率 ϵ_0 が測定できる。すなわち、分光放射率 $\epsilon(\lambda)$ の対象物についての特性式 $U'(T)$ は、

$$U'(T) = A \Sigma \tau(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot W(\lambda, T) \cdot S(\lambda) \quad \dots\dots\dots(4)$$

であり、この対象物を上記 $U(T)$ の特性の放射温度計で測定した場合の温度計の指示を T' とすると、(5)式が成り立つ。

$$U'(T) = U(T') \quad \dots\dots\dots(5)$$

ゆえに、固有放射率 ϵ_0 は(6)式で求まる。

$$\epsilon_0 = U(T') / U(T) \quad \dots\dots\dots(6)$$

実温 T は熱電対などで測定する。

3.2 二色温度計の特性式

現場実験で二色温度計を使用したため、二色温度計の特性についても述べておく。二色温度計は波長の二つの有限区間の放射輝度比を利用するものであり、有効パワーの比 $P(T)$ は、

$$P(T) = \frac{U_1(T)}{U_2(T)} = \frac{\Sigma \tau_1(\lambda) \cdot W(\lambda, T) \cdot S(\lambda)}{\Sigma \tau_2(\lambda) \cdot W(\lambda, T) \cdot S(\lambda)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

である。分光放射率 $\epsilon(\lambda)$ の物体を測定するときの有効パワーの比 $P'(T)$ は、

$$P'(T) = \frac{U'_1(T)}{U'_2(T)} = \frac{\Sigma \tau_1(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot W(\lambda, T)}{\Sigma \tau_2(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot W(\lambda, T)}$$

$$\times \frac{S(\lambda)}{S(\lambda)} \dots\dots\dots (8)$$

となる。二色温度計は灰色条件〔 $\epsilon(\lambda) = \text{const.}$ 〕で校正されているので、 $\epsilon(\lambda)$ の物体を測定した場合の二色温度計の指示を T'' とすると(9)式が成り立つ。

$$P(T'') = P'(T) \dots\dots\dots (9)$$

すなわち、 $T'' - T$ が二色温度計の誤差となる。二色温度計は普通干渉フィルターを用いて単色化されているのでウィーンの式を用いて、 $P'(T)$ は(10)式となる。

$$P'(T) = \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)} \cdot \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \cdot \frac{\exp(-C_2/\lambda_1 \cdot T)}{\exp(-C_2/\lambda_2 \cdot T)} \dots\dots\dots (10)$$

C_2 ：プランクの定数

この場合は狭帯域放射温度計と違って放射率比 $\epsilon_{\text{ratio}} = \epsilon(\lambda_1)/\epsilon(\lambda_2)$ の補正をしなければならない。(7)、(8)式より真温度 T と二色温度計指示 T'' との関係式は、

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T''} = \frac{1}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)} \ln \epsilon_{\text{ratio}} \dots\dots\dots (11)$$

となる。また、反射光の影響がある場合は(2)式を用いて、

$$P'(T) = \frac{\lambda_2^5 \{ \epsilon(\lambda_1) \cdot \exp(-C_2/\lambda_1 \cdot T) \}}{\lambda_1^5 \{ \epsilon(\lambda_2) \cdot \exp(-C_2/\lambda_2 \cdot T) \}} \cdot \frac{+ b \cdot \exp(-C_2/\lambda_1 \cdot T_w)}{+ b \cdot \exp(-C_2/\lambda_2 \cdot T_w)} \dots\dots\dots (12)$$

となる。(7)、(9)、(12)式を用いて、実炉での測温誤差の比較検討を6・2項で行なう。

4. 放射率の測定

4・1 放射率測定装置

放射温度計の適用に当たり、事前に確認すべき項目の1つに対象材の放射率変動量がある。物体の放射率が表面性状、温度により変化することはよく知られているが、加熱炉と焼鈍炉とでは雰囲気条件が全く異なる。このため、Fig. 2に示す小形雰囲気炉を製作し、各種鋼板の放射率の測定を行なった。鋼板表面はできるかぎり現場プロセスの状態を再現させるため、還元雰囲気または無酸化雰囲気中で加熱される。また、鋼板からの放射のみを測定するため試料を下方から加熱する。

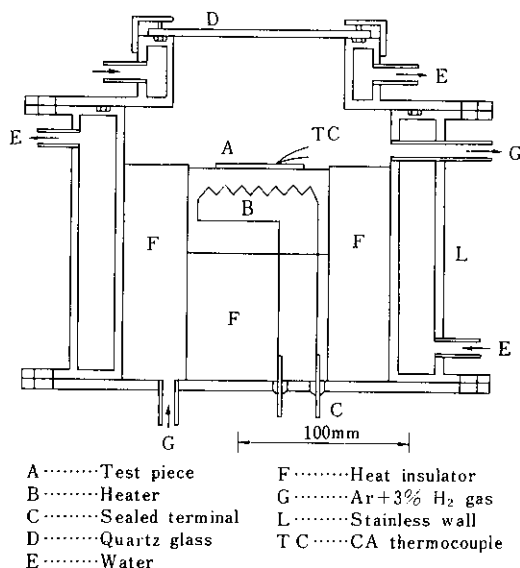


Fig. 2 Small experimental furnace

本装置を用い約15種類の材料について放射率測定を実施した。

4・2 放射率測定結果

(1) 冷延鋼板の放射率

(a) Fig. 3に実効波長(以下 λ と記す)が $0.98\mu\text{m}$ のSiセルを使用した場合のブリキ原板8品種の放射率測定結果を示す。図中 800°C において放射率 ϵ_0 は $0.336 \sim 0.362$ の範囲に入っており、この ϵ_0 の範囲を温度差に換算すると、 5.8°C に相当しわずかである。

(b) Fig. 4にPbSセル($\lambda = 2.0\mu\text{m}$)によるブリキ原板、高張力冷延鋼板の測定結果を示す。図中 600°C において $\epsilon_0 = 0.235 \sim 0.260$ の範囲にあり、温度換算で $\Delta T = 10.6^\circ\text{C}$ に相当する。

(c) Fig. 5に二色温度計による冷延鋼板の放射率比 ϵ_{ratio} の測定結果を示す。図中 600°C において、 $\epsilon_{\text{ratio}} = 1.071 \sim 1.086$ の間でばらつき、温度換算すると $\Delta T = 12.0^\circ\text{C}$ に相当する。

(2) 厚い酸化膜のあるスラブの放射率

Fig. 6にスラブの放射率測定結果を示す。 $\epsilon_0 = 0.8$ で安定している。

(3) まとめ

以上の結果より以下のことがわかった。

(a) 冷延鋼板は 600°C 以上の高温域では、放射率の変動が小さいことから判断し酸化膜は解離し、

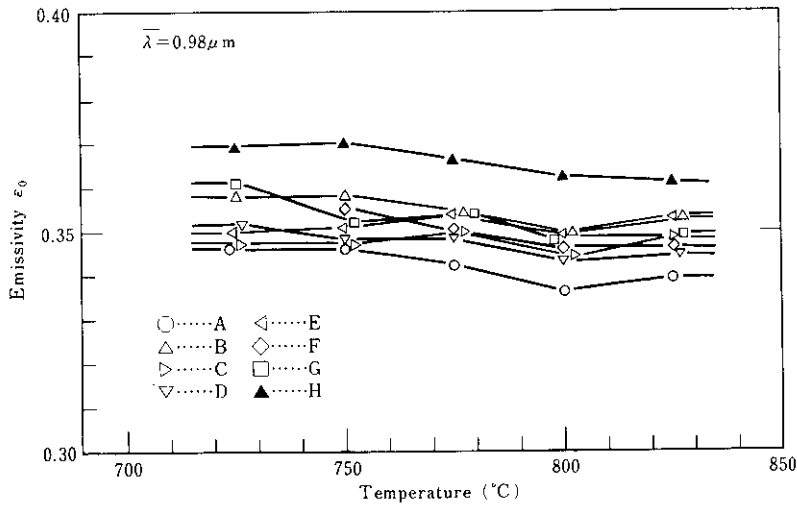


Fig. 3 Emissivity of cold strip when Si cell used

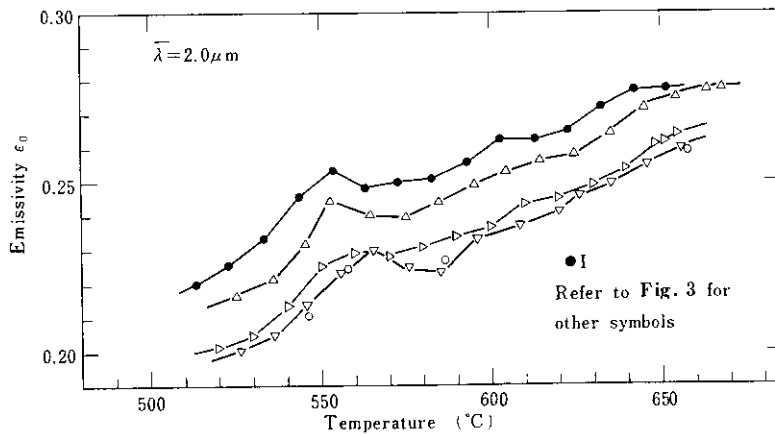


Fig. 4 Emissivity of cold strip when PbS cell used

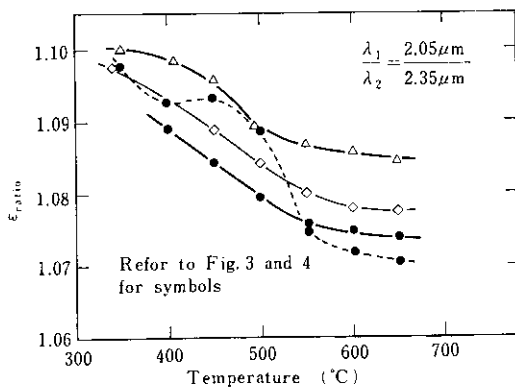


Fig. 5 Ratio of emissivity of cold strip measured by two colour pyrometer

その後の酸化は認められず、安定した測定が可能

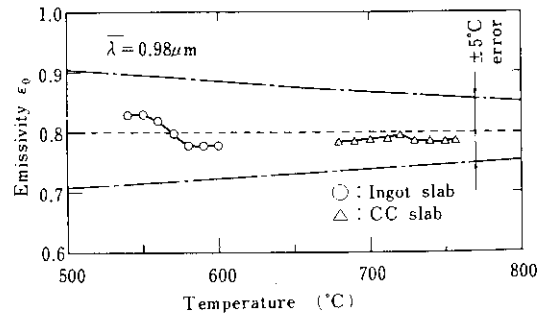


Fig. 6 Emissivity of slab when Si c used

である。

(b) 600°C 以下の低温域における冷 鋼板の放射率の変動が大きく、酸化膜の生成に いて酸素

分圧の影響を受けやすいことがわかった。

(c) 放射率の影響を受けにくいといわれている二色温度計においても、通常形の放射温度計と同程度の、材質による温度差が認められた。

(d) 加熱炉内などの厚いスケールが付着しているスラブの放射率は $\epsilon_0=0.8$ で $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内の温度差で安定している。

5. 連続焼鈍炉内鋼帯の測温

連続焼鈍炉として当所には、連続溶融亜鉛メッキライン（以下 CGL と記す）と連続焼鈍炉（以下 KM-CAL と記す）とがある。前者は両面・片面亜鉛メッキ、後者はブリキ原板、高張力鋼板、珪素鋼板を処理し、いずれもストリップの温度管理が品質管理上重要なラインである。

5-1 放射温度計の機種選定

放射温度計の機種選定は、測定精度・使用方法保守に大きい影響を与える。特に今回新設した KM-CAL は同一ラインで多品種を処理するため、各品種に対応できる適切な機種を選定することがポイントである。機種の選定については、従来より実績のあるものの中から、Si、PbS を素子とする単色温度計と、二色温度計を選んで検討した。

前記放射率測定装置による放射測定結果を中心に検討を加え、KM-CAL では最終的に Table 1 に示す機種に決定した。

5-2 精度確認

放射温度計のインラインでの精度確認、校正は従来熱電対による接触測温を利用するのが一般的である。これは放射温度計と同一箇所に配置した熱電対をストリップに接触させて測温し、精度確認、放射率補正を行なう方法であるが、ライン走行中は摩擦熱による誤差、接触方法による誤差な

どを考慮する必要があるので精度確認には不向きである。そこで今回、CGL では、熱電対を溶接した鋼帯を炉内走行させ、昇温過程を記録するとともに放射温度計と比較した。測温はラインを停止しない状態で実施するため、Fig. 7 に示すような熱電対をつけた鋼板を炉の入口でストリップに引っかける方法をとった。熱電対は $3.2\text{mm}\phi$ のシーシ形 CA を用い素線の先端数 mm をむき出しにして鋼板に点溶接した。本方法による測温結果と放射温度計の比較を Fig. 8 に示す。放射温度計の誤差が熱電対に比べ $+10^\circ\text{C}$ であったのは放射率比を $\epsilon_{\text{ratio}}=1.0$ にしたためと考えられる。放射温度計取付場所にはラジアントチューブ等の熱源はなく、また遮光管も取り付け測定したので背光の影響は無視できる。

熱電対を溶接して炉内を走行させる方式は、事前準備が大変であり頻繁に実施すべきものではないが、炉からストリップへの伝熱解析を行なう上でも有益な手段となった。

KM-CAL では、板温管理が特に重要なため小形

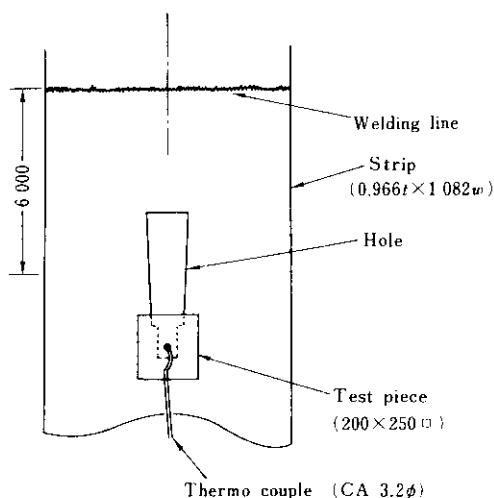


Fig. 7 Continuous temperature measuring method in furnace

Table 1 Radiation pyrometer type used in KM-CAL

Type	A	B	C	D
Item				
(1) Range ($^\circ\text{C}$)	600-1000	400-800	200-600	300-600
(2) Detector	Si	PbS	PbS	PbS
(3) Single/Two colour	Single	Single	Single	Two colour

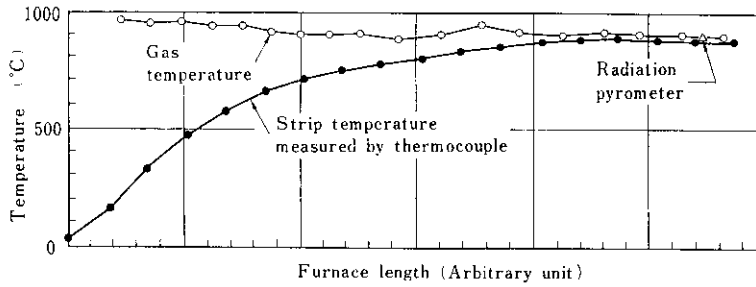


Fig. 8 Continuous measurement of strip temperature in furnace

実験炉での放射率測定結果にもとづき、計算機による放射率（比）の設定を行なっている。放射温度計の精度チェックは、豎形炉のため前記方式が採用できず、熱流補償形接触温度計（自社製）を使用した。この結果、200～600℃の範囲で±10℃以内の精度があることを確認した。しかし、ある鋼種については、絶対温度の差がやや大きい（10℃～20℃）ため、放射率の見直しを行なっている。

6. 加熱炉々内スラブの测温

炉内のスラブ温度を下記に示すような必要性から、直接測定するための検討・実験を行なった。

(1) 装入材料の寸法のばらつき、抽出ピッチのばらつき等により、従来の炉温一定制御ではオーバーヒートや焼け不足が生じる。省エネルギー・品質の面から、スラブ温度を管理しながら炉の設定

温度を制御する必要がある。

(2) 圧延機の計算機による板厚制御などの面からスラブの抽出温度測定が必要。

(3) 加熱炉の計算機による鋼材の温度制御の適応制御にスラブ実温が必要。

6.1 実験方法

温度測定方法は各種方法を比較検討した結果、他製鉄所でも実績のある、放射温度計と遮光管を組み合わせたラジエーションシールド法（Fig. 1 参照）を採用した。本方法での测温実験で次の項目を検討し测温方法を確立する。

(1) 反射光による测温誤差の検討

放射测温をする限り反射光による测温誤差は除去できないため、この誤差を定量的に求め、測定値の補正手段とする。この誤差は前記(12)式を用いて計算すると Fig. 9 に示すようになる。

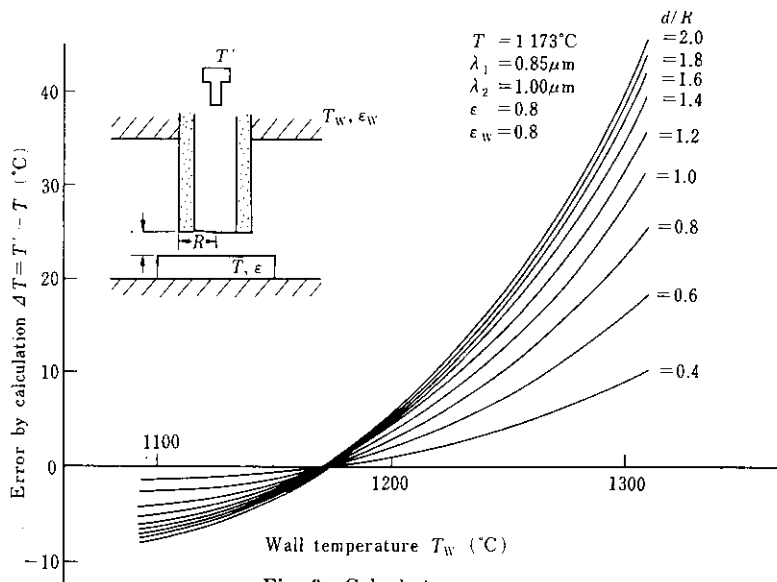


Fig. 9 Calculation error

(2) 测温误差の実炉における確認実験

Fig. 10 に示す場所に本温度計を設置し、Fig. 11 に示すようにスラブの実温を熱電対で測定し、测温误差を求めた。また、反射光の影響を調べるため、遮光管を上下させ、その遮光効果を計算値と比較する。

(3) (2)の実験結果よりの最適遮光管の設計方法の確立。

6-2 実験結果

実験結果を Fig. 11, 12 に示す。本図から以下のことがわかる。

(1) 遮光管とスラブ上面との相対位置が d/R 値で 1.2~1.3 以下になると遮光管により炉壁からの放射熱が遮へいされるため、スラブの表面温度が低下する。

(2) Fig. 12 からわかるように、前記 3-2 項で検討した誤差計算値差は最大 12°C 以内で良い一致を示している。

(3) 以上より、放射温度計と遮光管を組み合わせたスラブ温度計において、遮光管の形状についてはスラブが冷却されない範囲で、 d/R 値を小さくし、また、测温误差については計算で補正することにより、スラブの実温を精度よく求め得ることがわかる。

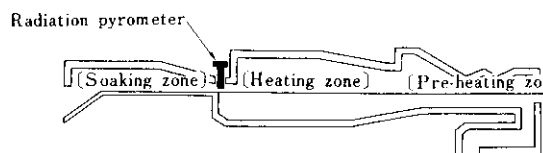


Fig. 10 Mounting location of pyrometer in reheating furnace

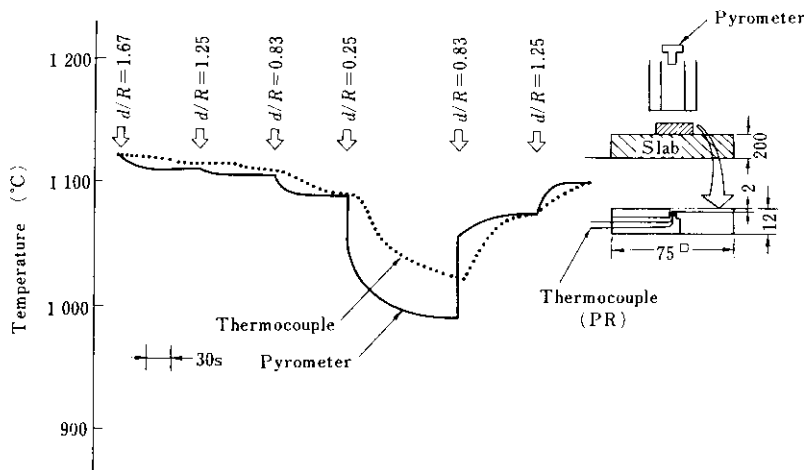


Fig. 11 Experimental result in reheating furnace

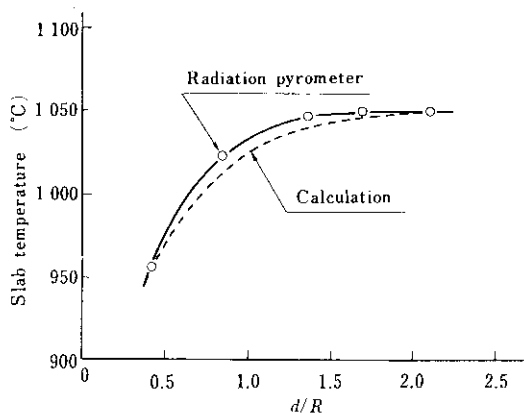


Fig. 12 Comparison of calculated temperature with measured one by radiation pyrometer

6-3 操炉への影響

本装置を実験的に当所厚板加熱炉に設置し、操炉作業への影響を確認した。その結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 に示すように、本装置を設置した炉(b)の方が設置しない炉(a)に比べ、操炉作業がやりやすくなるため抽出温度が安定してくる。

7. 結 言

加熱炉、焼鈍炉等の炉内における鋼材・鋼帯の放射温度計による测温方法について検討・実験し、以下のような知見を得た。

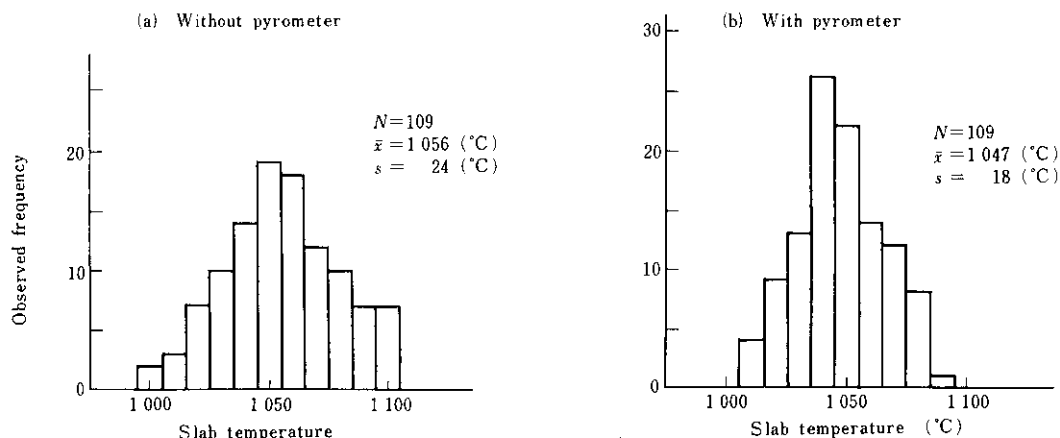


Fig. 13 Effect of pyrometer application on slab temperature control performance measured at the furnace exit

- (1) 各種鋼材・鋼板の放射率測定用に製作した小形雰囲気炉を用いた事前の放射率測定は、放射温度計機種選定、放射率の実体を知る上で有効であった。
- (2) 放射温度計の選定にあたっては、測定波長・測定温度、測定物体の放射率変動を事前に把握して選定する必要がある。
- (3) 加熱炉内スラブ測温に遮光管と放射温度計を組み合わせたラジエーションシールド法を実験的

に適用した結果、精度よく測定できることがわかった。

- (4) 炉内物体測温は、抽出鋼材温度のバラツキ減少などの効果があり、炉の省エネルギーに非常に有効な手段である。

- (5) 放射温度計をオンライン計器として使用する場合、その校正が簡単にできる治具の開発が今後の課題である。

参考文献

- 1) 井内他：鉄と鋼，61 (1975) 8, 78
- 2) 住金中研：日本鉄鋼協会共同研究会計測部会資料，計70-3-9 (1978)
- 3) 田宮他：鉄と鋼，67 (1981) 4, S365