

論 文

UDC 621.785.3-52 : 669.14-51

連続焼鈍炉内鋼板真温度測定システムの開発*

井内 徹**・大野 二郎**・草鹿履一郎***

Temperature Measurement System of Steel Strips in a Continuous Annealing Furnace

Tôru IUCHI, Jirô ÔNO, and Riichirô KUSAKA

Synopsis:

In order to measure the temperature of steel strips in continuous annealing furnaces with inert or reducing gases, following items were studied;

(1) The characteristics of emissivity of the steel strips were experimentally studied, which depended on the specification and the temperature of the strips as well as the wavelength of a detector.

(2) Shielding method of stray radiation energy from furnace walls or heat sources was studied in detail from theoretical and experimental points of view.

This stray energy was found to depend on the shape and the surface condition of the shielding flange, gap between the strip and the flange, the wavelength of a detector and the temperatures of the furnace wall and the steel strip.

On the basis of these results, the system was designed and was made up of radiation pyrometers with the shielding flanges and of contact thermometers for intermittent correction.

The estimated error of the measurement was less than 1%.

1. 結 言

近年生産能率の向上と品質の安定を目的として連続焼鈍炉による焼鈍方法¹⁾が急速に開発されてきた。この連続焼鈍プロセスにおいては鋼板が高速で炉内を走行するから、適切な場所で焼鈍状態の情報を常時把握して制御しなければならない。しかるに計測が困難なことから、炉内測温は炉温管理を主体として操業されてきたが、品質と生産能率のより強い向上に対する要求に対処するために、直接鋼板温度を正確に測定することが不可欠の問題となつている。この問題に関して Land 社の R. BARBER²⁾ や U. S. Steel 社の T. P. MURRAY³⁾ がそれぞれ温度計のメーカー、ユーザーの立場から報告しているが、測定精度の検討や測温システムとして総合的な考察は十分になされていない。

本研究は炉内測温に伴うさまざまな問題を整理して個々に詳細に実験考察し、鋼板真温度測定システムとして

まとめたものである^{4)~7)}。この結果、連続焼鈍炉プロセスの操業において、鋼板温度を誤差 $\pm 1\%$ 以内の精度で測温可能となつた。

2. 炉内測温の問題点と解決方針

高速で移動している鋼板表面温度測定には、非接触、高速応答の放射測温が適切であるが、放射測温では一般に放射率を把握することと、反射光など周囲からの雑音(以下背光雑音と呼ぶ)を避けることが必要である。特に連続焼鈍炉内測温では次の2点からこのことは決定的に重要である。

(1) 測定鋼板温度より周囲熱源、炉壁の温度の方が一般に高い。

(2) 通常無酸化炉ないし還元雰囲気炉であるので、鋼板の放射率がかなり低い。

したがって、鋼板から放射されるエネルギーより、背

* 昭和 48 年 4 月本会講演大会にて発表、昭和 49 年 10 月 11 日受付 (Received Oct. 11, 1974)

** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp. 1618 Ida Nakaharaku, Kawasaki 211)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 理博 (Nippon Steel Corp.)

光雑音のエネルギーの方が圧倒的に大きく、単に放射温度計を炉内鋼板に向けて測定するだけではきわめて大きな测温誤差を生ずる。たとえば、鋼板温度を $T_1=973\text{K}$ 、壁温を $T_2=1023\text{K}$ 、鋼板放射率を $\varepsilon=0.2$ とすれば、全波長域の放射温度計を使用した場合、 ε で補正した後の温度計指示 T_a は

$$\varepsilon \cdot T_a^4 = \varepsilon \cdot T_1^4 + (1 - \varepsilon) \cdot T_2^4$$

から、 $T_a=1515\text{K}$ (1242°C) となる。すなわち、上式の右辺第2項の外乱がきわめて大きいいため正確な测温は不可能である。この事実は炉内测温の最大の問題点なので、まず背光雑音を消去するために冷却した遮蔽板を設置することとし、その遮蔽効果と形状や寸法諸元との定量的な関係を求めた。3章でその理論的考察を、4章で実験的考察を論じた。

遮蔽が十分になされた状態で、次に放射测温の精度を決定するのは測定鋼板の放射率を正確に知ることである。これは実測によらなければならないので

(3) 焼鈍炉内における放射率の値とその変動範囲の把握を多量のサンプルについて測定する必要がある。

詳細は5章に述べた。以上の諸点の把握と解決によって、炉内测温方式は実用に供されるが、オンラインで本方式は十分精度があることを確認し、かつプロセス計測法としてラインに組込むにはなお次の2点を確認しておく必要がある。

(4) オンライン校正法の確立。

(5) 計器の維持管理体制。

(4)の実現には信頼性の高い接触式温度計を開発してあらかじめ実験室において測定整理したデータのオンラインでの確認を行なつて目的を達した。(5)は主として放射温度計の定期的な検定であり、簡易黒体炉を開発することで解決した。これらの事情は6章に詳しく述べた。

3. 炉内测温シミュレーション

3.1 遮蔽効果の解析

任意の放射系において、系内の任意の面 i の面積を $A_i\text{cm}^2$ 、放射率を ε_i 、温度を $T_i\text{K}$ 、単位面積あたりの実効放射エネルギーを $G_i\text{W/cm}^2\cdot\text{h}$ とすると、放射面を完全拡散反射系として次式の関係が成り立つ⁶⁾。

$$G_i \cdot A_i = \varepsilon_i \cdot E_b(T_i) \cdot A_i + (1 - \varepsilon_i) \cdot \sum_{k=1}^n G_k \cdot A_k \cdot F_{ki}$$

上式の左辺は面 i から出ている総放射エネルギーである。右辺第1項は面 i 自体からの放射エネルギー、第2項は系のあらゆる面から出て面 i に到達し、反射されて面 i を出る放射エネルギーである。 F_{ki} は放射面 k から

i への放射エネルギーの到達割合を表わす形態係数で、 $A_i \cdot F_{ik} = A_k \cdot F_{ki}$ の相互関係があるから上式は簡単になつて(1)式になる。

$$G_i = \varepsilon_i \cdot E_b(T_i) + (1 - \varepsilon_i) \cdot \sum_{k=1}^n G_k \cdot F_{ik} \dots\dots\dots (1)$$

$$(i=1, 2, \dots, n)$$

$E_b(T_i)$ は温度 T_i の黒体放射エネルギーであり、波長 $\lambda\mu\text{m}$ の放射のみを論ずる場合はプランクの公式そのもので次のように表現される。

$$E_b(T_i) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda \cdot T_i) - 1]} [W/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \mu\text{m}] \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $C_1=3.7413 \times 10^4\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu\text{m}^4$

$$C_2=1.4388 \times 10^4\text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

また、 $T_i=300 \sim 1500\text{ K}$ 、 $\lambda=0.5 \sim 10\mu\text{m}$ の範囲の放射エネルギーについて扱うときは、(2)式から次の近似式による値を使用する。

$$E_b(T_i) = \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda \cdot T_i)} \dots\dots\dots (3)$$

また、全波長域のエネルギーでは、 $E_b(T_i)$ はステファン・ボルツマンの公式により次のようになる。

$$E_b(T_i) = \sigma \cdot T_i^4 [W/\text{cm}^2 \cdot \text{h}] \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\sigma=5.699 \times 10^{-12}\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{h}^{-1}$

特定の波長帯、狭い温度域の場合、 $E_b(T_i)$ は次式で表わされる。

$$E_b(T_i) = A \cdot T_i^n [W/\text{cm}^2 \cdot \text{h}] \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $n=C_1/(\lambda \cdot T_i) \dots\dots\dots (6)$

A : 定数

遮蔽板付炉内测温系を Fig. 1 のようにモデル化して検討する。鋼板の放射率、温度をそれぞれ ε_1 、 T_1 、半径

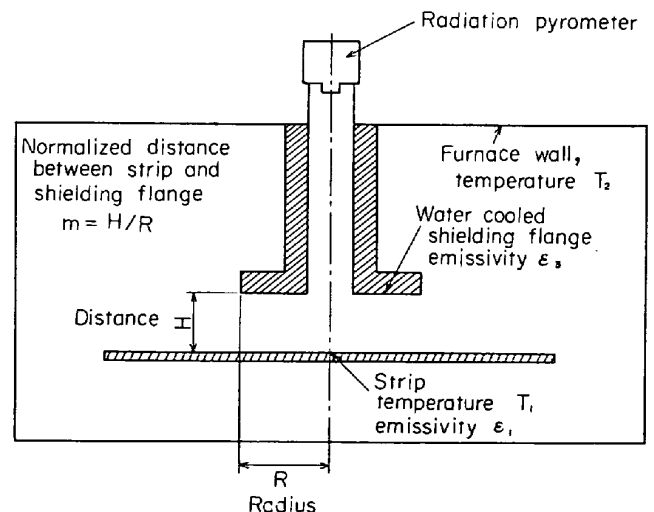


Fig. 1. A schematic diagram of temperature measurement of strip in a furnace using pyrometer with shielding flange.

R の遮蔽板の放射率, 温度をそれぞれ ϵ_3 , T_3 , 炉壁の温度を T_2 とし, 放射率 ϵ_2 は炉壁を黒体とみなして 1.0 とする. 遮蔽板開口部上端に設置した放射温度計を ϵ_1 で補正した後のエネルギー出力から求まる鋼板のみかけの温度 T_a と真の温度 T_1 の差を遮蔽板と鋼板との間隔 (規格化して $m=H/R$, H と R は図示), T_1 と T_2 の差, ϵ_3 および検出子の検出波長域 $\lambda \mu\text{m}$ の関数として (1) 式および (2) 式を用いて理論計算した. その概略については付録 1 を参照されたい. 計算で得られた結果のうち, 測温精度に大きな影響を有するファクターを列記すると次のようになる.

- (1) 遮蔽板の間隔 m
- (2) 遮蔽板の放射率 ϵ_3
- (3) 検出波長域 λ

(1), (2) は十分予測のつく事柄であり, m を小さくすることおよび ϵ_3 を大きくすることによつて測温精度は大幅に向上する. (3) の事柄は炉内測温の場合特有の現象で, 温度差 ($T_2 - T_1$) が大きくなるほど測温精度を最適にする波長域は長波長側に移行する. これらの計算結果より遮蔽板の位置 m , その放射率 ϵ_3 および検出波長 λ を最適に選択した場合, 所定の測温精度を満足することが明らかとなった.

3.2 水冷遮蔽板の鋼板冷却作用の検討

鋼板は水冷された遮蔽板が近くに設置されると測温誤差となるばかりでなく, 材質や形状不良などを起こすおそれがある. しかしこの点も計算で予測しておいた. 通常の操業条件 (ラインスピード 50m/min 以上, 遮蔽板間隔 $m=0.2$ 以上) では鋼板冷却はわずかであり, 特に影響はないことが明らかとなった.

4. 遮蔽板付放射測温法の基礎実験

3 章で述べたシミュレーション結果により遮蔽板使用の炉内測温は適切な条件を充たせば精度よい測定が可能であることがわかった. これを確認する実験を行ない, オンライン測温の際遮蔽板設置に関する定量値を求め得る基準式を導出した.

4.1 遮蔽効果の実験

4.1.1 背光率の定義

鋼板の表面温度 T_1 , 放射率を ϵ_1 , 炉壁温度を T_2 としたとき遮蔽板開口から検出される放射エネルギー G_1 は (1) 式を簡単化して次式のように書ける.

$$G_1 = \epsilon_1 \cdot E_b(T_1) + \eta \cdot E_b(T_2) \dots (7)$$

ここで η は ϵ_1 , m , ϵ_3 , λ などの関数であり, これを背光率と呼ぶこととする. すなわち炉壁周囲からの放射エネルギーのうち, それが鋼板で反射されて遮蔽板開口

より検出されるエネルギーの割合である. η が求められれば (7) 式によつて雑音となるエネルギー $\eta \cdot E_b(T_2)$ が推定できる. 放射温度計は通常 ϵ_1 で補正しておくから, その出力を $E_b(T_a)$ とすれば, (7) 式より

$$E_b(T_a) = G_1 / \epsilon_1 = E_b(T_1) + \frac{\eta}{\epsilon_1} \cdot E_b(T_2) \dots (8)$$

となる. T_a は雑音のある場合のみかけの検出温度である.

4.1.2 背光率測定実験

背光率 η は表面粗度などの鋼板表面状態に依存するが連続焼鈍炉内の冷延鋼板や電磁鋼板では還元ないし不活性雰囲気であるために常温の場合とあまり変わらないと考えられる. したがって, η の温度依存性は無視できるとした. そこで, $E_b(T_1)$ を $E_b(T_2)$ と比較して無視できるほど温度 T_1 を十分に小さくすると (7) 式を用いて (9) 式のように η を簡単に求めることができる.

$$\eta = \frac{G_1}{E_b(T_2)} \dots (9)$$

この方法で η を求めた実験装置の構造を Fig. 2 に示す. この装置は上下端開放のアルミナ製円筒の周囲に抵抗線 (カンタル A-1) を巻き, その外側と上下端を断熱材 (セラミックファイバー) で覆つて円筒内壁の温度分布を良好にした. その内壁に酸化したステンレス薄板を巻き, 同薄板表面温度を監視するために数カ所熱電対 (CA) を溶着した. この円筒加熱炉に上側から水冷された遮蔽板付円筒を挿入し, 一方下側から測定鋼板を挿入し, 鋼板を常温に保つために下面に水を常時吹きつける冷却装置を固定した. 炉壁からの放射エネルギーのうち

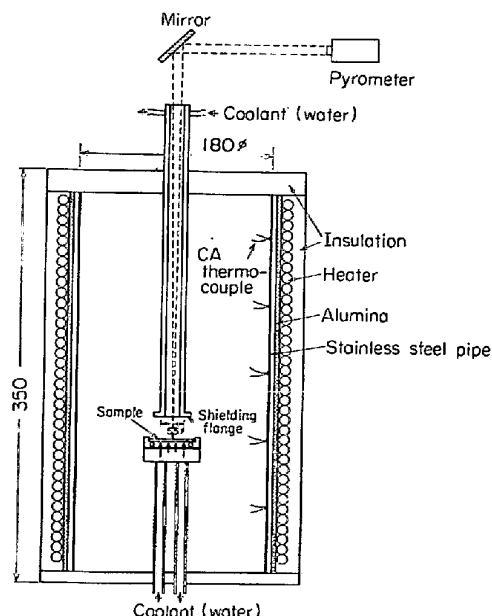


Fig. 2. An experimental apparatus for back radiation rate measurement.

鋼板による反射量は円筒の開口部を通して放射検出子に導かれる。遮蔽板付円筒は鋼板との間隔を変えられるように上下移動可能とした。このように配置した背光源測定装置で、炉壁温度 T_2 は遮蔽板移動範囲内のステンレス薄板の平均温度とし、その放射率 ϵ_2 は酸化により黒化したために大きく、かつ炉内の相互反射によりほぼ 1.0 とみなした。測定鋼板温度 T_1 は 20°C 程度に保たれたので $E_b(T_1)$ は無視でき (9) 式によつて η を求めた。また遮蔽板放射率 ϵ_3 の影響を調べるために銅製の遮蔽板表面に黒化塗料 (Nextel, velvet coating 101-c 10 Black, 3 M company) 塗布した場合 ($\epsilon_3=0.95$) と、表面を旋盤研磨し紙ヤスリで軽く磨いて $\epsilon_3=0.5$ 程度の拡散反射面とした場合の 2 つの状態を実現した。背光源の波長特性を調べるために、3 つの市販の放射温度計 (LAND 社 ONE MICRON, IR 社 THERMODOT TD-7 B, BARNES 社 12-521) を用いた。これらの検出子の実効波長はそれぞれほぼ 1.0, 2.0, 8.0 μm にある。測定試料としては焼鈍される冷延鋼板、電磁鋼板その他を用いた。測定ははじめ遮蔽板を試料と重なるように設置し、次に遮蔽板を引き上げてその間隔 ($m=H/R$) と検出される放射エネルギーの値を同時に記録した。この場合、 T_2 は一定であるように温度制御した。

4.2 測定結果と考察

Fig. 3 は実効検出波長 λ がそれぞれ 1.0, 2.0, 8.0 μm に対応した冷延鋼板の背光源 η の実測値である。比較の

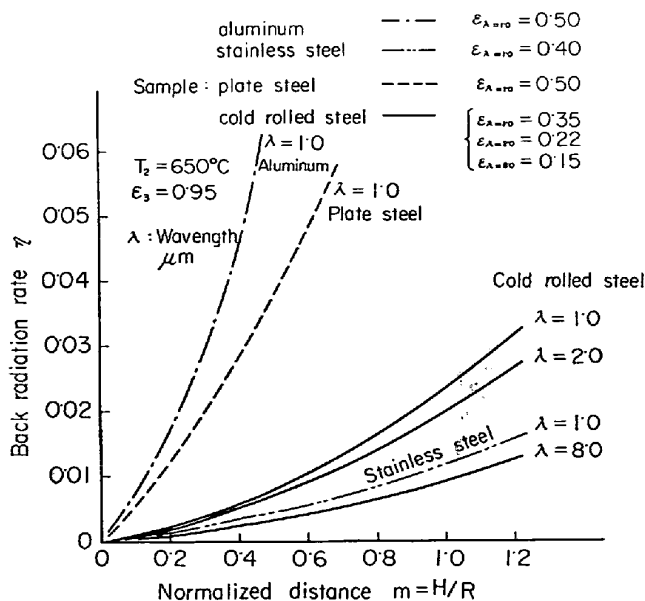


Fig. 3. Experimental results of back radiation rate η of cold rolled steel, stainless steel, plate steel and aluminum. λ is effective wavelength of the radiation detector.

Table 1. Value of reflection characteristic constant of several materials.

Material	Value of reflection characteristic constant α_2		
	$\lambda=1.0$	$\lambda=2.0$	$\lambda=8.0$
Cold rolled steel	0.024	0.020	0.009
Silicon steel	0.025	0.021	0.009
Stainless steel	0.013	0.005	0.004
Heavy plate steel	0.090	0.190	0.054
Aluminium (rough surface)	0.162	0.210	0.078

ために $\lambda=1.0$ μm の場合の厚板、ステンレス鋼板およびアルミ板の η の実測値も示した。なお電磁鋼板の η の実測値は冷延鋼板のそれとほとんど同じである。この結果から η は波長によつてかなり異なることがわかる。冷延鋼板の η は検出波長が長くなるにつれて小さくなっている。また拡散反射面と考えられる厚板鋼板や Al 板の η は大きく、鏡面的反射面に近いと考えられる冷延、電磁およびステンレス鋼板の η はその放射率が前者のそれに比較して小さいにもかかわらず小さいことを示している。これは炉内测温においては拡散的反射面より鏡面的反射面の方が周囲の背光源の影響を受けにくいことを意味しており本研究の連続焼鈍炉 (還元雰囲気) 内の鋼板测温にはきわめて好ましい状況である。間隔 m と η の関係は多少非線形であるが直線とみなして次式で近似する。

$$\eta = \alpha_2 \cdot m \dots \dots \dots (10)$$

(10) 式で $m=1.0$ のときの η の値で α_2 を与えれば各種測定試料の α_2 は Table 1 に示すようになる。 α_2

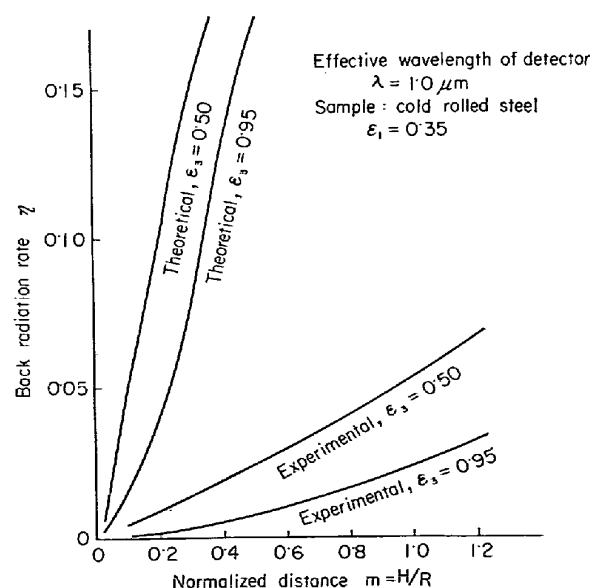


Fig. 4. Effect of emissivity value ϵ_3 of shielding flange surface on back radiation rate η . As ϵ_3 becomes higher, η becomes smaller.

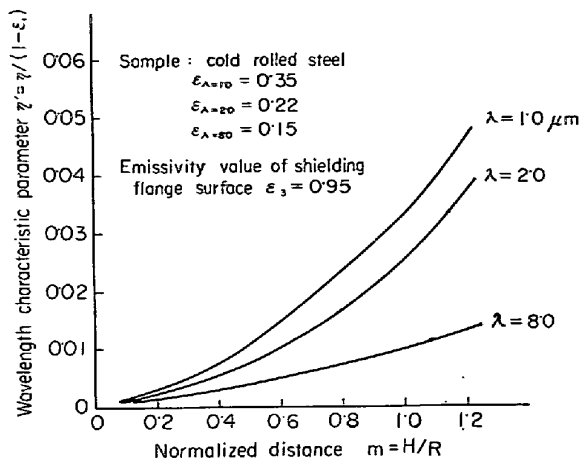


Fig. 5. Wavelength characteristic of back radiation rate η . As wavelength of radiation detector becomes longer, η' becomes smaller.

を反射特性定数と名づけた。

次に遮蔽板放射率 ϵ_s を 0.5 と 0.95 にして、それぞれの η を測定して Fig. 4 を得た。同図には同条件の理論値をも比較のために示した。この結果から明らかなように ϵ_s は測温上きわめて重大な影響を有している。 ϵ_s はできるだけ大きくしておかねばならない。一方、理論計算 (付録 1 参照) から同様の傾向を得るが、その値は実測値と大きくずれている。このことは冷延鋼板を完全拡散反射面と仮定することが実際と著しく異なることを示している。

η の波長特性を知るためには

$$\eta = (1 - \epsilon_s) \cdot \eta' \quad \dots\dots\dots (11)$$

とて、 η から測定試料の放射率に対応する反射成分 $(1 - \epsilon_s)$ を除いた値 η' から推定できる。Fig. 5 に冷延鋼板の η' の測定値を示す。 η' は検出波長 λ が長いほど小さくなる。これは冷延鋼板の反射特性の波長依存性を示すもので、波長が長くなれば測定板表面は相対的により鏡面的反射体となることを示す。この結果から一般に反射特性の見地だけから炉内測温を考察する場合、波長の長い方が好ましいといえるが、実際には放射率 ϵ_1 および放射エネルギー特性の見地から単純ではない。すなわち、 ϵ_1 は冷延鋼板、電磁鋼板の場合長波長で一般に小さく、長波長では (5) および (6) 式の n 値が小さく測温誤差が大きくなる³⁾。

(3), (8), (10) 式または (5), (8), (10) 式より測温誤差を評価する一般式としてそれぞれ (12) 式, (13) 式を得る。

$$\Delta T = T_a - T_1 = \frac{c_2/\lambda}{\ln \left\{ \frac{e^{c_2/\lambda} \cdot (1/T_1 + 1/T_2)}{e^{c_2/\lambda} \cdot T_2 + \frac{\alpha_2 \cdot m}{\epsilon_1} \cdot e^{c_2/\lambda} \cdot T_1} \right\}} - T_1$$

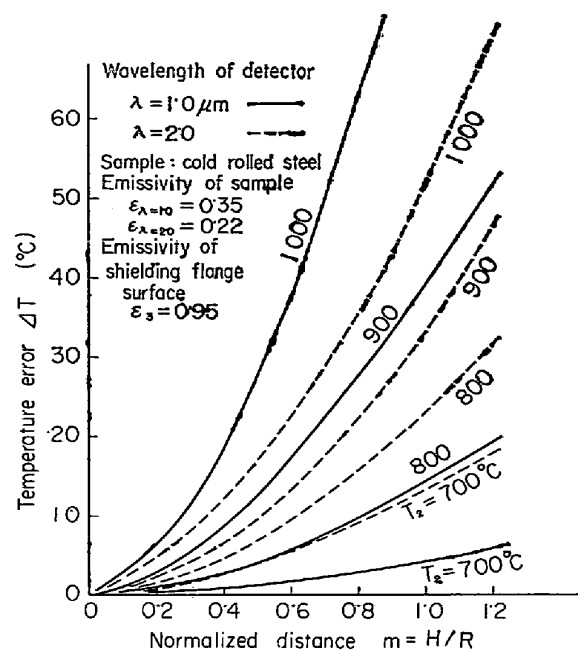


Fig. 6. Relation between temperature error ΔT and normalized distance of shielding flange m in the case of cold rolled steel. ΔT is $(T_a - T_1)$. T_a is the apparent temperature of a pyrometer after emissivity correction. T_1 is the surface temperature of cold rolled steel, in this case 700°C.

$$\dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta T = T_a - T_1 = T_1 \left\{ \left(1 + \frac{\alpha_2 \cdot m}{\epsilon_1} \cdot \frac{T_2^{n_2}}{T_1^{n_1}} \right)^{1/n_1} - 1 \right\}$$

$$\dots\dots\dots (13)$$

ただし、 T_a : 見かけの指示温度 K, T_1 : 真の鋼板温度 K

これらの式で、上記の実験により α_2 を求め、かつ ϵ_1 を 5 章に述べる方法で求め、 T_1 , T_2 をプロセスの実状に応じて与えれば、遮蔽板と測定鋼板の間隔 m に対応した測温誤差 ΔT を推定することができる。Fig. 6 に冷延鋼板の場合について (12) 式に本実験で求めた諸測定値を代入して計算した測温誤差 ΔT を示した。鋼板温度 T_1 と炉壁周囲温度 T_2 の差が小さいときは ΔT は小さく、また検出波長の短い方が誤差が少なくなる。しかるに T_2 が T_1 よりずつと大きくなるにつれ、長波長検出子の方が誤差が少なくなる。このことは 3 章の理論解析結果の (3) 項に対応している。特に本研究の対象の冷延鋼板では遮蔽板使用により測温誤差を 1% 以内に抑えるためには、たとえば $T_1 = 700^\circ\text{C}$, $T_2 = 800^\circ\text{C}$ の場合、検出波長 λ を $1.0 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$ として遮蔽板間隔 m はそれぞれ

$$m = 0.67 \quad (\lambda = 1.0 \mu\text{m})$$

$$m = 0.50 \quad (\lambda = 2.0 \mu\text{m})$$

を得る。ただし、遮蔽板表面放射率を $\epsilon_3 = 0.95$ とした。

以上背光率の実験結果およびその検討により次の結論を得た。

(1) 冷延、電磁、ステンレス鋼板など表面光沢のある鋼板は赤外波長領域で鏡面的反射面となっている。

(2) 鋼板の鏡面的反射の傾向は波長が長くなるにつれて顕著になる。

(3) 検出子波長 λ は(12)式または(13)式が最小値を与えるような値が最適であるが、一般に T_1 と T_2 の差いかに依存し、 $T_1 \geq T_2$ のときは短波長側に、 $T_1 < T_2$ の場合長波長側に最適値が見出される。

(4) 遮蔽板表面放射率 ϵ_3 は測温誤差に大きな影響を有する。実用的には ϵ_3 は 0.9 以上でなければならない。

(5) 背光率 η と遮蔽板の規格化間隔 m の間には、ほぼ

$$\eta = \alpha_\lambda \cdot m$$

の関係が成り立つ。 α_λ は鋼板種類、波長によつて異なる反射特性定数である。

(6) 冷延、電磁鋼板の場合、 T_2 が T_1 より 200 K 高い位までは、 $m \leq 0.4$ に設置すれば検出波長が 1.0, 2.0 μm のいずれの場合も測温精度を 1% 以内に抑えられる。

5. 放射率の測定実験

前章までの諸結果により遮蔽板使用の炉内測温法は、十分な実用性を有することが明らかとなった。したがつて真温度測定のためには放射率の値を正確に求めねばよい。還元雰囲気の連続焼鈍炉では鋼板表面は清浄であり放射率の安定性を予想できるが炉内測温の基礎データとして放射率に関して次の項目について測定実験した。

- (1) 放射率の波長依存性
- (2) 放射率の安定性
- (3) 放射率の温度依存性
- (4) 放射率の材質依存性

5.1 放射率測定方法およびその装置

放射温度計の放射率補正設定は実際に使用する放射温度計を用いた放射率実測によつて行なわねばならない。この場合、放射温度計を黒体炉であらかじめ校正しておけば、試料だけを加熱して上記(2)~(4)の項目について多量のデータを得る。放射率 $\epsilon(T)$ は(2)式~(5)式で与えられる黒体出力 $E_b(T)$ と試料から放射されるエネルギー $E(T)$ によつて次式で得られる。

$$\epsilon(T) = E(T)/E_b(T) \quad \dots\dots\dots (14)$$

Photo. 1 に放射率測定装置を示す。

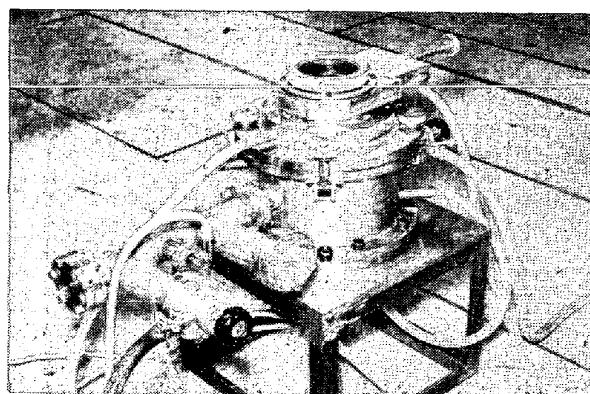


Photo. 1. An emissivity measurement apparatus.

試料 (60mm ϕ 円板) は石英管周囲に巻いたヒーター (カンタル A-1 線, 1.0mm ϕ) を 3 重のステンレス反射管の中に挿入して構成した小さな加熱炉の上に設置した。試料温度は表面に CA 熱電対 (0.2 ϕ) を点溶接して測定した。熱電対の指示と実際の試料表面温度の差はあらかじめ校正しておいた。なお、校正方法の詳細は付録 2 に示した。装置内は焼鈍炉と同じ雰囲気 (H_2 と N_2 の混合ガス) とし、ガスボンベから減圧弁を通して常時供給した。温度は 950°C まで加熱できる。試料からの放射エネルギーは鋼板真上に設置した透過フィルター (熔融石英) を通して測定した。フィルターの透過率は使用した 2 つの放射温度計で 93% であつたので、放射率は(14)式を補正して次式で与えられる。

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{0.93E_b(T)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

装置はそれ自体からの放射を避けるために水冷を施し内部壁での反射防止のために黒化吸収塗料を塗布した。なお放射率の波長依存性は市販の分光器を改造した分光放射率測定装置で黒体出力と試料出力の比を各波長ごとに測定した。なお加熱方法およびその装置は上記のそれと同じである。波長域は 0.5~15 μm である。

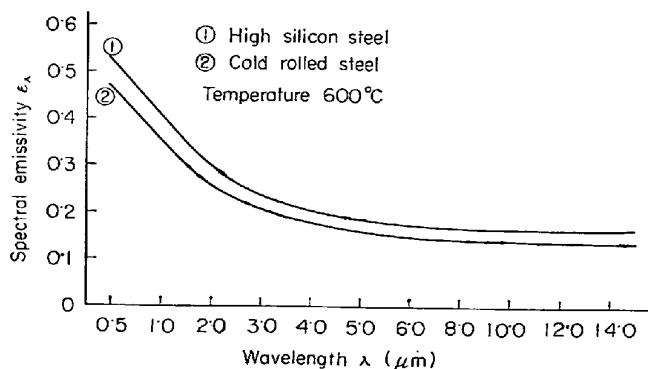


Fig. 7. Result of spectral emissivity measurement in the case of cold rolled steel and silicon steel.

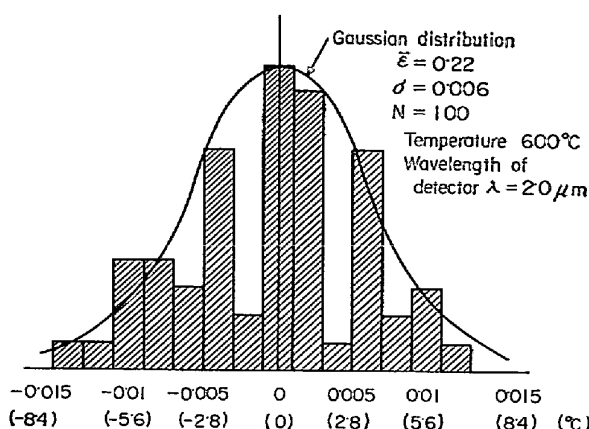


Fig. 8. Fluctuation of emissivity of cold rolled steel (equivalent temperature error at 600°C).

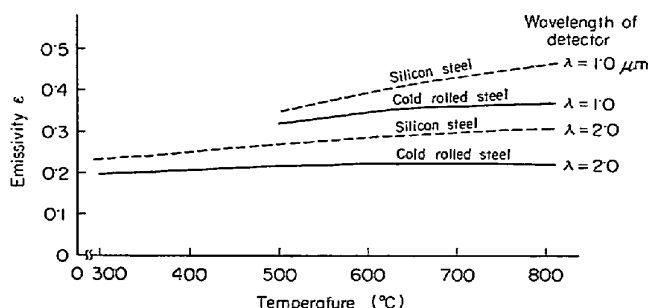


Fig. 9. Relation between emissivity and temperature in the case of cold rolled steel and silicon steel (Si 1.5%).

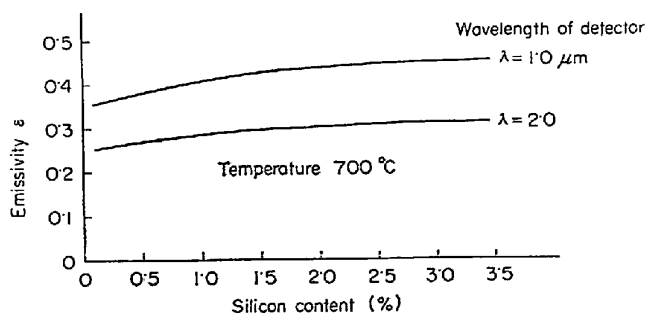


Fig. 10. Relation between emissivity and silicon content in the case of silicon steel.

5.2 測定結果と考察

Fig. 7 に冷延鋼板と電磁鋼板の分光放射率の測定例を示す。放射率は可視域で高く、近赤外域で急激に小さくなり、5 μm 以上の波長域で比較的平坦な特性を示す。Fig. 8 は冷延鋼板の放射率の安定性の測定結果である。冷延鋼板の場合、材質、表面状態（ダル、プライト）による放射率のちがいは小さく、PbS 検出子（実効波長 2 μm）で温度 600°C のとき平均放射率は $\bar{\epsilon} = 0.22$ で標準偏差 $\sigma = 0.006$ であった。これは温度誤差として約

3°C に相当する。Fig. 9 は試料の温度依存性の測定結果である。いずれの試料も温度の上昇と共に放射率も増大する。Fig. 10 は電磁鋼板の材質による放射率の変化の測定結果である。放射率は Si 含有量によりかなり変化し、その量の多いほど高くなることが実測された。このことは多種類の電磁鋼板を製造する焼鈍プロセスでの測温は放射率の設定を可変にすべきことを示している。

Hagen-Rubens の理論によれば⁹⁾¹⁰⁾、放射率 ϵ_λ は次式で与えられる。

$$\epsilon_\lambda = 36.05 \sqrt{\rho/\lambda} \quad (16)$$

ここで、 ρ : 比体積抵抗 [$\Omega \cdot \text{cm}$]

λ : 波長 [μm]

一方、 ρ は高温においては温度 TK に比例するので¹¹⁾、(16)式から

$$\epsilon_\lambda \propto \sqrt{T} \quad (17)$$

となる。Fig. 7 は(16)式の波長依存性の特性と、Fig. 9 は(17)式、Fig. 10 は(16)式の電気抵抗依存特性とその傾向がよく一致している。特に電磁鋼板の Si 含有量が多くなれば、 ρ は大きくなりその特性が顕著である。これらの対応は酸化していない冷延鋼板や電磁鋼板が金属特有の光学的特性を有していることを示している。以上の諸測定結果をまとめて放射率に関して次のような結論を得た。

(1) 焼鈍炉内の鋼板の放射率は金属特有の光学的特性を示す。すなわち、放射率は短波長で高く、長波長で低くなる。鋼板の電気抵抗が大きくなるほど放射率は高くなる。鋼板の温度が上昇するほど放射率は高くなる。

(2) 一定波長域で温度が大きく変化しない場合、鋼板の放射率は安定しており、その変動 $\Delta\epsilon/\epsilon$ は標準偏差で $\sigma = 0.03$ である。

(3) 電磁鋼板の場合、放射率の設定を Si 含有量によつていくつかのグループに分類する必要がある。

(4) 連続焼鈍炉の各ゾーンを通過する鋼板温度はかなり異なるので、放射率の設定をその温度特性に合せて行なう必要がある。

(5) 遮蔽板を使用する本測温方式は放射率が安定しているので十分に精度よい測定ができる。

(6) 放射温度計の検出子波長域は既述のように 3 ~ 5 章の総合的な検討に基づく必要がある。我々の場合は PbS セルを採用した。

6. 校正技術の開発

6.1 接触式温度計

背光率、放射率などのオフライン諸実験結果に基づい

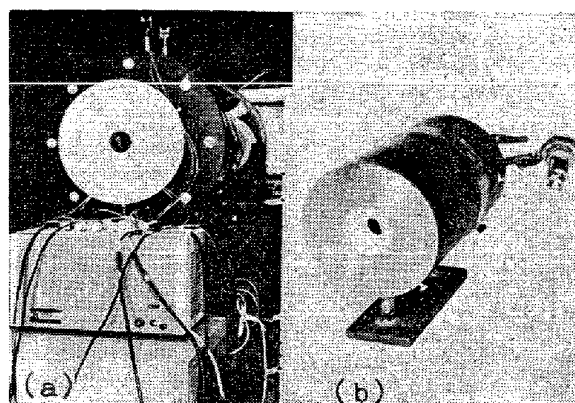
て直ちに現場ラインに本測温方式を適用実施することは可能である。しかるに、実際の連続焼鈍炉には実験室で完全には再現できない要素がある。たとえば炉内ガス、鋼板のカテナリーやバタツキ、熱源の局在などの影響をあらかじめ見積ることはむずかしい。それ故、計測技術の基本としてこの場合遮蔽板を適切な位置に設置し、放射率を補正した放射温度計の温度指示が正しいかどうかの校正方法がまず必要である。これに対して筆者らは校正用接触式温度計を開発した。これを遮蔽板のある鋼板面の裏面または鋼板移動方向に遮蔽板と並列に設置し、放射温度計と接触式温度計の同時測定によつて校正する方法である。開発した接触式温度計の構造は薄いステンレス鋼板（厚さ 0.2 mm、以下保護板と称す）に CA 熱電対を溶着し、その裏面を適当な圧力で測定鋼板に圧接して測温する¹²⁾。保護板は熱電対の保護と良好な熱接触状態確保を目的とする。この方式で生ずる誤差要因とその程度を調べた諸結果は省略するが、保護板をセラミックファイバーで断熱し、保護板が常に圧接するようにバネ機構を有し、その機構が炉内において効力を発揮できるように水冷機構を有した構造の本接触式温度計の精度は鋼板温度 800°C 付近で $\pm 5^\circ\text{C}$ の誤差内におさまる。なお接触時に生ずる鋼板傷はやむを得ない。また、還元雰囲気では熱電対の劣化が激しいために、900°C で使用する場合 24 hr で検出端を交換する。Photo. 2 に接触温度計の検出部を示す。

6.2 簡易黒体炉

半永久的に常時使用する放射温度計はその精度確保のために定期的に校正する必要がある。現状の放射温度計が苛酷な現場プロセスで常用に耐え得る唯一の方法は黒体炉によつて校正を実施することである。黒体炉による校正を簡略化、迅速化し、かつそれを生産プロセスの現場において実施することは現場ラインの管理の面からも重要である。筆者らはこの目的のために小型簡易黒体炉



Photo. 2. A detector of the contact thermometer.



(a) High precision type
(b) Simple type

Photo. 3. Blackbodies for pyrometer calibration.

を開発した。この場合、放射検出子の検定だけでなく、現場計器を含めた総合的な検定が可能となるメリットがある。簡易黒体炉はステンレス (SUS 310) で製作した円筒型黒体 (開口 10 mm ϕ , 長さ 60 mm) の外側に絶縁した後ヒータ (カンタル線) を巻きつけ、さらにその外側を断熱材 (セラミックファイバー) で覆ったものである。ステンレスはあらかじめ酸化黒化し、円筒底の見かけの黒さ、すなわち実効放射率は $\epsilon_a = 0.98$ 程度としてある。黒体炉は円筒底壁に埋め込んだシース熱電対を PID 温度制御器で調節する。使用温度領域は 50~900°C である。900°C までの昇温時間は約 10 min である。なお、簡易黒体炉の精度検定は筆者らの研究所で所有する高精度黒体炉 ($\epsilon_a = 0.997$) であらかじめ校正した。この結果、現場における検定は著しく簡略化され、さらに総合的管理が可能となったので測温精度維持が著しく高められた。Photo. 3 に高精度黒体炉 (a) と簡易黒体炉 (b) の外観を示す。

7. 真温度測定システム

開発した炉内鋼板真温度測定システムの概略図を Fig. 11 に示す。冷却された遮蔽板は鋼板の上側に設置され、上下移動可能となつている。放射温度計は遮蔽板開口上に炉外にあるフィルターを通して設置され常時測温する。フィルターは N_2 ガスパージによつて汚染防止を施しているが、定期的に交換出来るようにしてある。一方、間欠使用の接触式温度計は鋼板の下側に設置され、使用しないときは炉外に格納される。温度指示器は現場から離れた計器室に計装されているが、接触式温度計を用いて放射率の設定実験および簡易黒体炉による放射温度計の検定実験の際には現場設置場所において記録が行なえるようにしてある。

8. オンライン測定

連続焼鈍炉に数カ所設置した本測定システムでの測定例をいくつか紹介する。

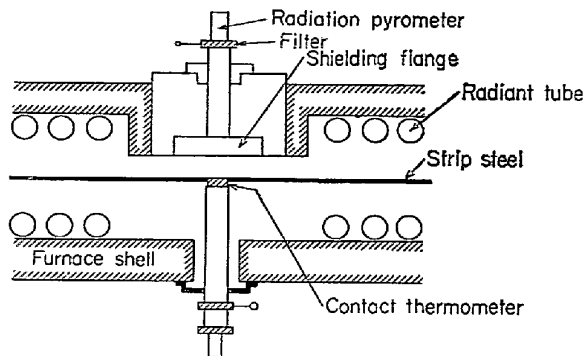


Fig. 11. A configuration of a temperature measurement system.

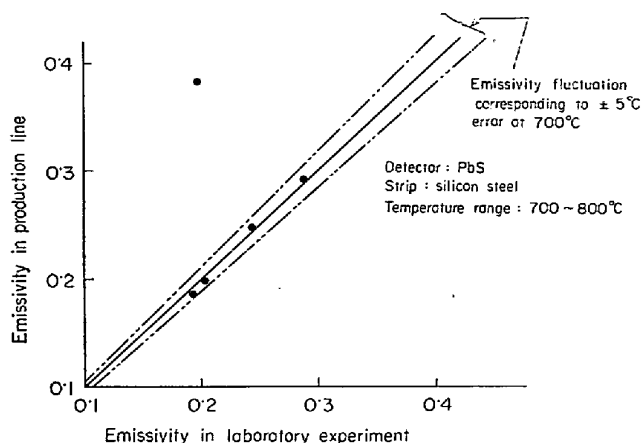


Fig. 12. Correspondence of emissivity of silicon steels which are measured with a contact thermometer in production line and with an experimental apparatus in laboratory.

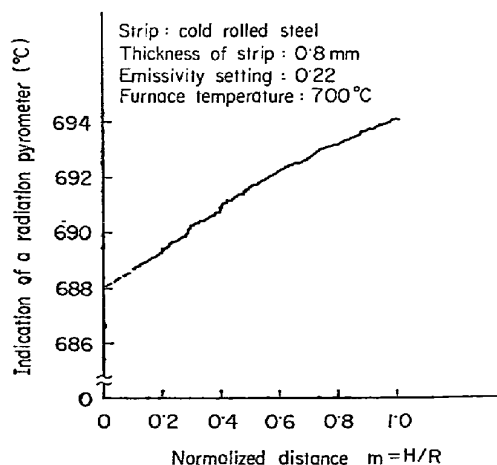


Fig. 13. Back radiation is decreased as shielding flange position approaches to strip.

Fig. 12 は 5 章に述べた実験室での放射率測定値と接触式温度計を用いたオンライン放射率測定値の対応を電磁鋼板の場合について示したものである。測定結果はきわめてよい一致をみた。このように放射率の 2 つの異なる測定方法による測定値の一致から計測の信頼性が高いことがわかった。Fig. 13 は遮蔽板による鋼板の冷却がほとんど無視できるラインスピードにした状態で遮蔽板を鋼板に近づけていった場合、背光雑音が減少して放射温度計のエネルギー出力が減少し、みかけの温度が鋼板の真温度に近づく本測温方式の基本関係をオンラインで確認したものである。この実験ではとくに炉温、ラインスピード、鋼板厚さなど出来る限り一定の状態として変動を避けて実施した。遮蔽板の規格化高さ m が 0.1 から 1.0 に変化する場合、約 5°C の背光雑音の増加がある。Fig. 14 は遮蔽板が適確に設置され、放射率を正確に補正した場合に鋼板温度変化を放射温度計で正確に計測する、いわゆる放射温度計の追従性の測定結果である。接触式温度計で 32°C の鋼板温度指示変化が放射温

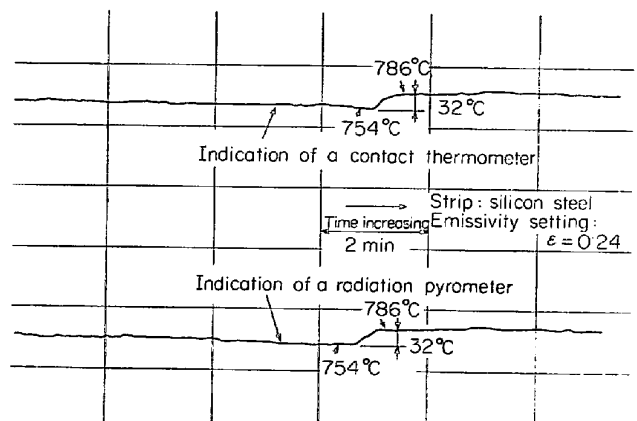


Fig. 14. Correspondence between indications of a radiation pyrometer and a contact thermometer.

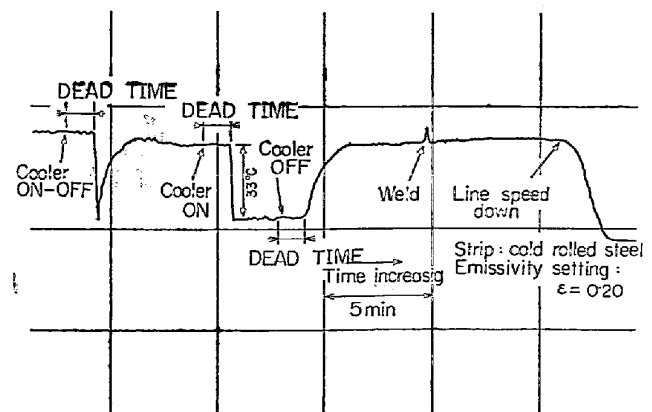


Fig. 15. Various measurement examples in cooling zone.

度計でも適確に指示されている。遮蔽板が適切配置になかつたり放射率設定が正しくない場合にはこうした正しい測定はできない。Fig. 15 は溶接点の検出、ラインスピード変化による温度変化、あるいは冷却ゾーンにおけるクーラーの効果などの測定例である。クーラーは鋼板面に冷却された雰囲気ガスを吹きつけて強制冷却するが、クーラーの作動は鋼板を急速に冷却する。逆にクーラーの停止後はゆるやかに鋼板温度が上昇する。これらは焼鈍プロセス制御の重要な操作量とすることができることを示している¹³⁾。むだ時間は測温地点がクーラーの吹きつけ地点から離れた位置にあるためである。溶接部は一般に表面が粗面であるので放射率が高く、温度指示もパルス波形状の高い指示を示すことが多い。したがってこの個所の測温指示は意味をなさないが溶接点通過の信号となり得る。ラインスピードの変化は鋼板温度を制御する最も有力な手段である。定常状態よりラインスピ

ードが上昇すれば加熱、均熱ゾーンでは温度は下降し、冷却ゾーンでは上昇する。逆にスピードが下降するとき、前者は上昇し、後者では下降する。Fig. 16 は加熱から冷却に至る連続する4種類の熱処理用の各ゾーンから構成されている連続焼鈍炉プロセスに設置された5台の本真温度測定システムの操業中の同時測定記録の1例である。これらの各測定値はそれぞれのゾーンの諸操作への制御量として、またプロセス全体の制御量として不可欠な情報となつている。

9. 結 論

我々はさまざまな角度から検討した実験室における豊富な実験を行ない次の諸点を明らかにすることができた。

(1) 不活性ないし還元性雰囲気連続焼鈍炉においては鋼板の放射率は安定しており、通常の放射測温を基本に考えて良い精度で鋼板温度が測定可能であることを見出した。

(2) 鋼板放射率の性質、すなわち材質、温度、波長などによる効果を明らかにした。

(3) 炉壁周囲からの放射エネルギーの遮蔽効果、すなわち遮蔽板の形態、位置、表面状態、測定波長、炉壁周囲および鋼板の温度などの測温精度に与える影響を明らかにした。

以上の結果に基づき遮蔽板付放射温度計の連続測温と間欠的使用の校正用接触式温度計から成る炉内鋼板真温度測定システムを開発した。その結果、測温誤差1%以内の精度で連続焼鈍炉内の鋼板真温度が常時適確に測温可能となつた。本測定システムは現在、君津製鉄所冷延鋼板用連続焼鈍一貫処理ライン(CAPL)などの連続焼鈍炉にそれぞれ数カ所設置され(昭和47年10月)、以後順調に移動し、生産と品質向上に、さらに新プロセス開発のための適確な情報を得るために多大の効果を発揮している。

なお、本測定システムの開発に当つては、測温装置の設計、製作および測温系の計装をそれぞれ新日鉄エンジニアリング事業本部工作事業部、設備技術センターの諸氏に担当していただいたことを付記して謝意を表します。

文 献

- 1) 権藤, ほか: 特公昭 48-29004
- 2) R. BARBER: Industrial and Process Heating, (1967) Feb.
- 3) T. P. MURRAY: Iron Steel Eng., (1971) Feb., p. 33

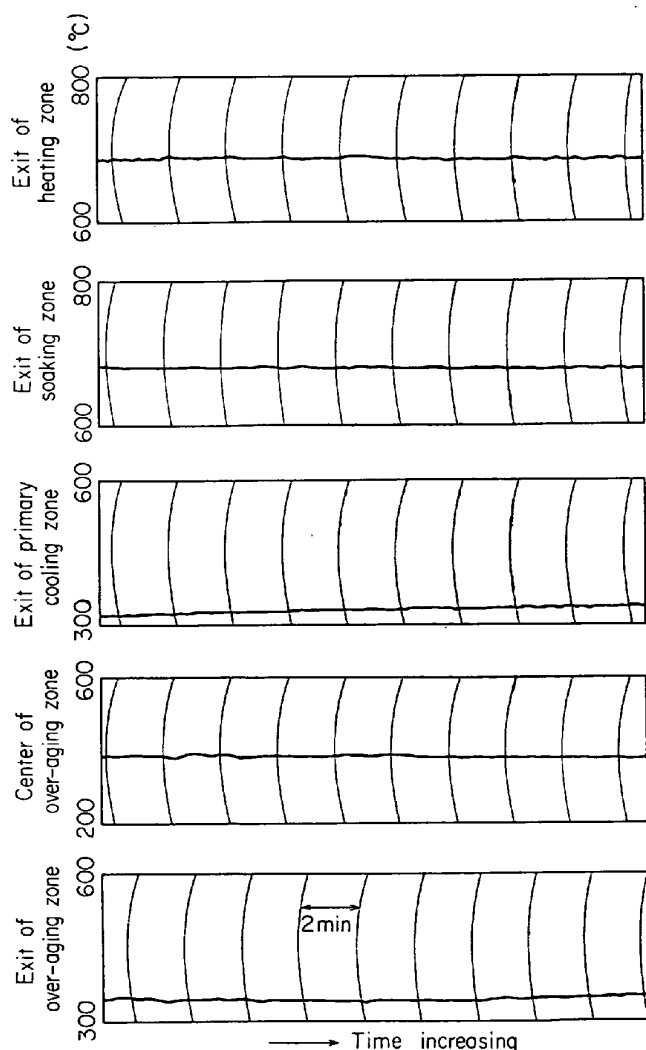


Fig. 16. Temperature measurement during operation at the continuous annealing furnace.

- 4) 大野, ほか: 特開昭 49-31380
- 5) 井内, ほか: 日本鉄鋼協会第85回(春季)講演大会 (1973), S 234
- 6) 草鹿, ほか: 製鉄研究, 279 (1973), p. 79
- 7) R. KUSAKA, ほか: Nippon Steel Technical Report, (1974) 5, p. 92
- 8) 甲藤: 大学演習伝熱工学(内田編), (1969), p. 340, [裳華房]
- 9) N. F. MOTT and H. JONES: The Theory of the Properties of Metals and Alloys, (1958), p. 105, [Dover Publ.]
- 10) N. W. SNYDER: Trans. ASME, (1954) May, p. 541
- 11) C. KITTEL: 固体物理学入門 (上) (1968), p. 207, [丸善]
- 12) M. YAKOB: Heat Transfer, Vol I, (1965), p. 151 [John Wiley & Sons]
- 13) 大野, ほか: 特開昭 49-28512

付 録

1. 遮蔽効果のシミュレーション

$i = 1, 2, 3$ をそれぞれ測定鋼板, 周囲炉壁, 遮蔽板に対応させれば, (1)式は3行3列の行列式となる(ただし, 実際にはもつと細かく分割するので, さらに多次元の行列式となる). ϵ_i および T_i を仮定し, Fig. 1の配置より形態係数 F_{ik} を求めて(1)式に代入すると $G_i (i=1, 2, 3)$ が求まる. このうち本論文で考察するのは G_1 , すなわち鋼板面から出る単位面積あたりの実効放射エネルギーである. G_1 を用いて(7)式から背光率 η を

$$\eta = \frac{G_1 - \epsilon_1 \cdot E_b(T_1)}{E_b(T_2)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

で計算出来る. みかけの放射検出温度 T_a は同様に(8)

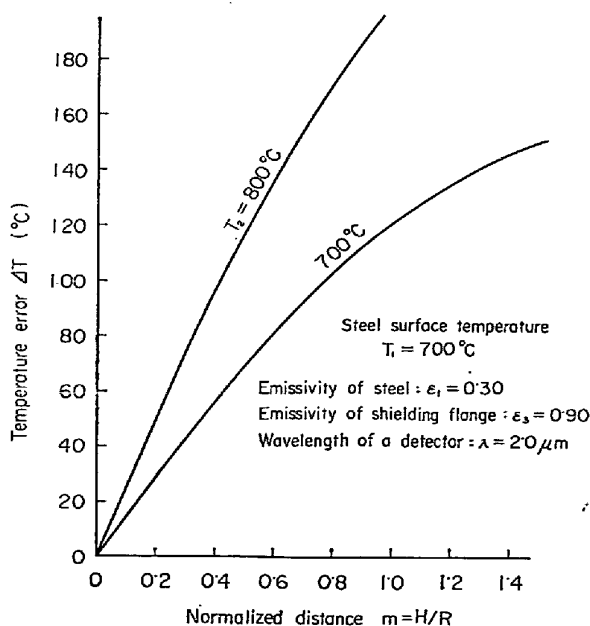


Fig. 17. Relation between distance m and temperature error (theoretical).

式を用いて計算できる. 間隔 m は F_{ik} に, 検出波長 λ は $E_b(T_i)$ にそれぞれ含まれており, 各々をパラメータとして計算でき, 炉内測温の諸パラメータの影響を調べることができる. ここで2, 3の計算結果を示しておく.

Fig. 17 は間隔 m が大きくなるにつれ測温誤差が増大する傾向を示している. Fig. 18 は ϵ_3 が測温系の精度に著しい影響をもつことを示している. なお T_3 はそれ自体からの放射を防止するために $T_3 = 50^\circ\text{C}$ として計算

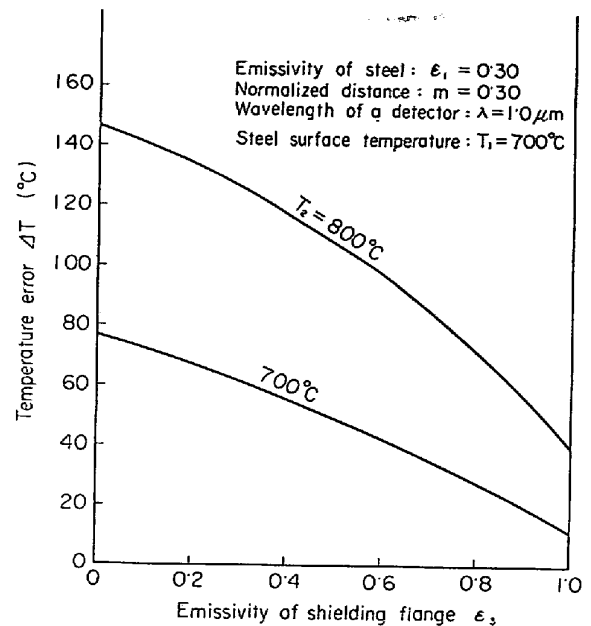


Fig. 18. Relation between emissivity ϵ_3 and temperature error (theoretical).

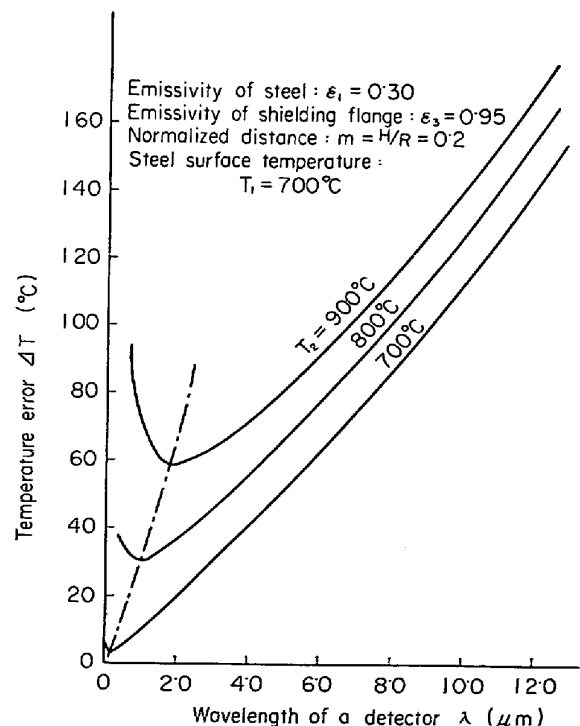


Fig. 19. Relation between wavelength of a detector and temperature error (theoretical).

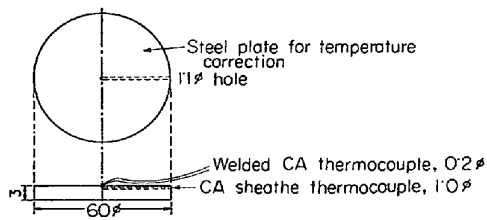


Fig. 20. A method for surface temperature correction. Surface temperatures are previously corrected by a CA sheath thermocouple inserted in the plate for correction.

した。

Fig. 19 は放射検出子の検出波長の測温に及ぼす影響が炉内の状況によつて推移することを示している。すなわち、 T_1 より T_2 が高くなるにつれ、測温の最適検出

波長は長波長側に推移する。 η の計算値は本文 Fig. 4 に示した。

2. 表面温度の校正方法

熱電対を溶着して鋼板の表面温度を正確に求めることはかなり難しい。筆者らは Fig. 20 に示すような方法で表面温度を正確に求めた。厚さ 3 mm, 60 mm ϕ の軟鋼を用意し、これを放射率測定装置に装入し試料諸鋼板と同じ条件で加熱した。この軟鋼板を校正用鋼板と名づけた。同鋼板表面に実際に使用する CA 熱電対 (0.2 ϕ) を点溶接し、かつその表面直下に側面からあけた穴 (1.1 ϕ) を通して 1.0 ϕ の CA シース熱電対を装入し、後者の温度指示をもつて鋼板の真の表面温度とみなし、測定領域の各温度における溶接熱電対指示をあらかじめ校正した。