

© 1984 ISIJ

連続焼鈍炉内冷延鋼板の放射測温法

論文

井内 徹*・田中富三男*²・渡辺国俊*³・江崎 昂*³増田正宏*⁴・平田 久*⁵・井上 忠*⁵・高藤英生*²

Radiation Thermometry of Cold Rolled Steel Strips in a Continuous Annealing Furnace

Tohru IUCHI, Fumio TANAKA, Kunitoshi WATANABE, Akira EZAKI,
Masahiro MASUDA, Hisashi HIRATA, Tadashi INOUE and Hideo TAKAFUJI

Synopsis:

This paper describes the principle and an application of a newly developed radiation thermometry, which can measure temperature and emissivity simultaneously, and also eliminate stray radiation coming from heat sources.

The system of the method is composed of a radiometer and a reflecting mirror which are disposed symmetrically at an angle θ with respect to the normal to the surface of a measured object. p value defined as a specular reflection factor is important and substantial for this method.

This system was applied to a continuous annealing furnace for cold rolled steel strips at Nagoya Works of Nippon Steel Corporation.

The accuracy was estimated to be within $\pm 10^\circ\text{C}$.

1. 緒 言

鉄鋼プロセスにおいて温度計測はきわめて重要である。放射測温法は非接触法であるために、工業プロセスの温度計測に適している。しかし、放射測温は2つの基本的な問題点を抱えている。1つは測定物体の放射率の問題である。すなわち、放射率が未知であつたり、変動するような場合には正確な測定ができないことである。もう1つの問題点は、測定物体をとりまく環境が一般に放射と反射の系、すなわち相互反射の場にあることである。したがつて、測定物体からの放射と共に周囲からの迷光を雑音として検出するために測定誤差を生じる。鉄鋼プロセスに例をとると、鋼板の酸化に伴う放射率変化が前者の例で、炉内測温において炉壁や加熱源からの迷光が後者の例である。

従来より、これらの問題点を克服するために多くの努力がなされてきた。たとえば、適当な2つの波長での放射率の比が一定のときに有効な2色温度計¹⁾や、半球状の金めつきキャビティを測定物体面にかぶせ、放射率を

らの方法²⁾、あるいは KELSALL³⁾ や芝⁴⁾により、熱平衡状態を生成させて放射率によらず正確な測温を可能にする方法が提案されている。

筆者らは、一連の放射測温法の研究開発を進めてきたが、その中から鉄鋼プロセスに適した幾つかの手法をオンライン実用化した。たとえば、放射率が既知という条件のもとで、水冷遮蔽板を測定物体に対向させた連続焼鈍炉内鋼板の真温度測定システム⁵⁾、水冷遮蔽板の代わりに基準雑音放射源を設けて迷光雑音を消去する高温炉内鋼材の測温法⁶⁾、キャビティ内の多重反射効果を利用した温度と放射率の同時測定法⁷⁾、炉内に黒体炉を導入して、炉内で温度と放射率を同時測定する方法⁸⁾⁹⁾などがある。

本論文は、上述の諸要素技術と新しい発想を結びつけて開発した放射測温法とその連続焼鈍炉内測温への応用を述べたものである。本方法により、従来の方法に比べてより簡単なシステムで、放射率と迷光雑音という、放射測温の2つの大きな問題点を解決し、炉内走行鋼板の放射率と温度を常時オンライン測定することができる。

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 29 日受付 (Received Nov. 29, 1983)

* 新日本製鉄(株)第一技術研究所 理博 (R & D Laboratories-I, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*² 新日本製鉄(株)第一技術研究所 (R & D Laboratories-I, Nippon Steel Corp.)*³ 新日本製鉄(株)設備技術本部 (Plant Engineering & Technology Bureau, Nippon Steel Corp.)*⁴ 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)*⁵ 新日本製鉄(株)プラント事業部 (Plant & Machinery Division, Nippon Steel Corp.)

2. 測 定 原 理

Fig. 1 に測定系の 基本的構成を示す. 一对の放射計と反射ミラーを測定物体面上の測定点Oに立てた法線 N に対し, 角度 θ で互いに鏡面对称的になるように配置する. 反射ミラーの前面には回転セクタが設けられており, 測定面からミラーへの光路の開閉を行う. セクタの表面反射率は十分に小さくしておく. セクタが閉の場合に, 放射計で検出されるエネルギー L_1 は, 測定点Oからの放射だけであるから, 次式で表される.

$$L_1 = \tau \cdot \epsilon_\theta \cdot L_b(T) \dots\dots\dots (1)$$

セクタが開の場合は, 測定点からの直接の放射以外に放射ミラーを経由した放射成分が加わり, 放射計による検出値 L_2 は次式で示される.

$$L_2 = \tau \cdot \epsilon_\theta \cdot [1 + r_a \cdot \tau^2 \cdot p \cdot (1 - \epsilon_\theta)] \cdot L_b(T) \dots (2)$$

ここで,

ϵ_θ : 測定物体の θ 方向の放射率,

$L_b(T)$: 温度 T の黒体放射発散度,

r_a : 反射ミラーによる実効的反射率,

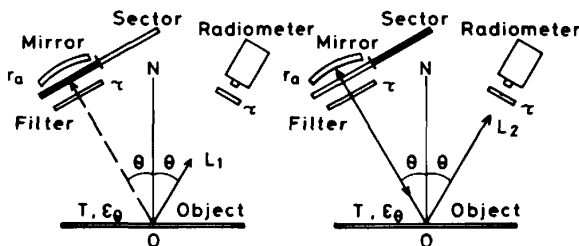
τ : フィルタ (透過窓) の透過率,

p : 鏡面反射係数 (定義),

である.

(2)式において, 右辺第1項は測定物体面からの放射, 第2項は第1項の放射が反射ミラーで反射され (放射率 r_a), さらに測定物体面で反射され, そのうち $p(1 - \epsilon_\theta)$ の割合が放射計で検出されることを表している. ただし, 透過率 τ のフィルタを3度通過するために, τ^3 の係数がかかる. 測定物体面が完全鏡面的の反射面であれば $p=1$ であるが, 現実の測定面は粗面であるために拡散的反射となる. そこで $0 < p < 1$ なる係数 p を導入して放射計の方向の実効的反射率を $p(1 - \epsilon_\theta)$ で表した. p は測定面での鏡面的反射の程度を表す係数で, 上述の測定面の表面性状 (粗度), 検出波長, 測定点から反射ミラーを見込む立体角 Ω などの関数である.

さて, (2)式を(1)式で辺々割つて整理すると, 次式



(1) Sector closed (2) Sector opened

Fig. 1. Principle of measurement. Temperature and emissivity can be obtained from the measured radiance, L_1 and L_2 .

を得る.

$$\epsilon_\theta = 1 - \frac{1}{r_a \cdot \tau^2 \cdot p} \left(\frac{L_2}{L_1} - 1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

$$G = \frac{L_2}{L_1} \dots\dots\dots (4)$$

$$k = (r_a \cdot \tau^2 \cdot p)^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

とおくと, (3)式は次式で表される.

$$\epsilon_\theta = 1 - k \cdot (G - 1) \dots\dots\dots (6)$$

(6)式で得られた ϵ_θ と, 既知の τ の積 $\tau \cdot \epsilon_\theta$ で(1)式を辺々割ると次式を得る.

$$L_b(T) = \frac{L_1}{\tau \cdot \epsilon_\theta} \dots\dots\dots (7)$$

(6)式で測定物体の放射率 ϵ が求められ, (7)式と放射計の出力特性から温度 T が求められる. このようにして, セクタの開閉に応じた放射計の検出値 L_1, L_2 から, ϵ_θ と T が同時測定できる.

本原理は, パラメータ k が一定であること, すなわち通常 τ, r_a は一定であるから, p が所定の範囲で一定であるときに成り立つものである.

ところで本原理は以下に述べるような特性を示す. いま, $\Delta L = L_2 - L_1$ とおけば, (1), (2)式より

$$\Delta L = r_a \cdot \tau^3 \cdot p \cdot \epsilon_\theta \cdot (1 - \epsilon_\theta) \cdot L_b(T) \dots\dots\dots (8)$$

$$= r_a \cdot \tau^3 \cdot p \cdot \left\{ -\left(\epsilon_\theta - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{4} \right\} \cdot L_b(T) \dots (9)$$

となる. (9)式によれば, ΔL は $\epsilon_\theta = 1/2$ において最大値 $r_a \cdot \tau^3 \cdot p \cdot L_b(T) / 4$ をとる2次放物線を表している.

(1)式より

$$\epsilon_\theta = \frac{L_1}{\tau \cdot L_b(T)} \dots\dots\dots (10)$$

で, これを(9)式に代入してまとめると, 次式のようになる.

$$\Delta L = \frac{r_a \cdot \tau \cdot p}{L_b(T)} \cdot \left[-\left\{ L_1 - \frac{1}{2} \tau \cdot L_b(T) \right\}^2 + \frac{1}{4} \tau^2 \cdot L_b^2(T) \right] \dots\dots\dots (11)$$

(11)式より, ΔL は $L_1 = \tau \cdot L_b(T) / 2$ において最大値をとる. このときの $L_1, \Delta L$ の値をそれぞれ $L_1^*, \Delta L^*$ とすれば,

$$L_1^* = \frac{1}{2} \tau \cdot L_b(T) \dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta L^* = \frac{1}{4} r_a \cdot \tau^3 \cdot p \cdot L_b(T) \dots\dots\dots (13)$$

となる. (12), (13)式を T と p について書き直すと,

$$L_b(T) = \frac{2}{\tau} \cdot L_1^* \dots\dots\dots (14)$$

$$p = \frac{2}{r_a \cdot \tau^2} \cdot \frac{\Delta L^*}{L_1^*} \dots \dots \dots (15)$$

(11)式～(15)式は、本原理の検証に利用することができる。すなわち、(14)、(15)式は、本原理が成り立つとき、つまり ϵ_θ が変化しても p が不変であるときに、温度 T と係数 p が得られることを示しており、逆に実験によつて得られた ΔL と L_1 が(11)式の関係にあれば、本原理が成り立つことになる。この手法を p 不変法と名付け、後述の原理の検証実験に用いた。以上、本方法の原理を迷光雑音の存在しない場合について述べたが、連続焼鈍炉等の炉内における測定ではすでに開発した水冷遮蔽板を設置することで完全に迷光雑音を除去することができる⁵⁾。

3. 実験と考察

3.1 原理の検証

検出値が(2)式で表されるためには、測定物体面がある程度鏡面的反射の特性をもっている必要がある。このことは、Fig. 1 において測定点 O からの放射が、反射ミラーとの間で多重反射しないことを意味する。冷延鋼板の場合についてこれを確かめた。Fig. 1 において、試料を 407°C に加熱し、 $\theta = 30^\circ$ に反射ミラーと Ge 素子の放射計を設置した。いま、 $\theta = 30^\circ$ を中心にして放射計の設定角度を変化させて L_1, L_2 を検出し、 $s = (L_2 - L_1)/L_1$ をプロットしたところ、Fig. 2(a), (b)を得た。(a)は天頂角 θ の変化、(b)は方位角 φ の変化に対応するものである。いずれの方向も $\theta = 30^\circ$ を中心にして $\pm 50^\circ$ の角度変化でミラーによる反射成分 s は 0 になることがわかった。すなわち、反射ミラーからの放射が鋼板で反射された後、再び反射ミラーに戻る量は無視できることがわかった。したがつて、冷延鋼板に対して、(2)式の記述が妥当であることが示された。

次に、Fig. 3 に示した実験装置を用いて、 p 不変法による本原理の検証実験を行った。測定試料として上述

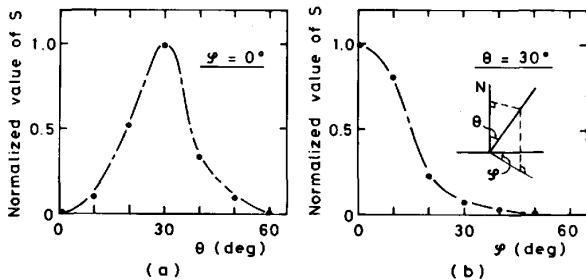


Fig. 2. Experimental result of the reflection characteristics of a cold rolled steel sheet. (a) the distribution pattern in the direction of the zenith angle. (b) in the direction of azimuth.

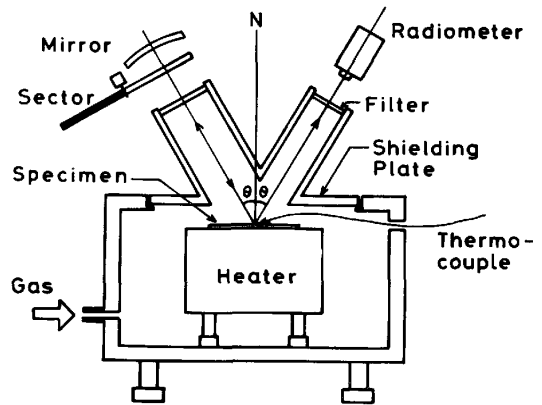
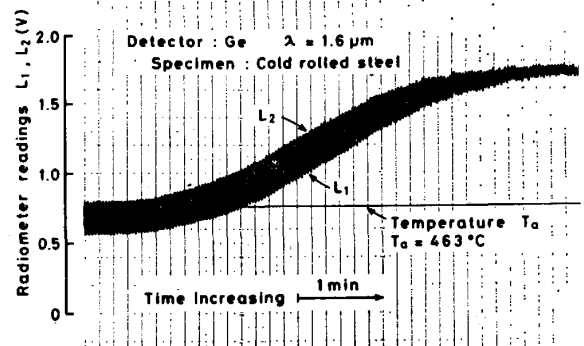
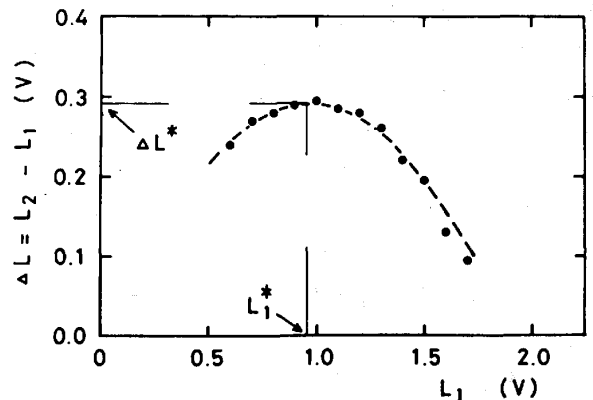


Fig. 3. Apparatus for the experiment.



(a)



(b)

Fig. 4. Experimental result of p -invariant method. (a) the data of L_1 and L_2 . (b) the relation between L_1 and ΔL obtained from the data. (cf. Eq. (11))

の冷延鋼板を用い、検出器として Ge 素子の放射計 (実効検出波長 $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$) を使用し、セクタの開閉に応じて L_1, L_2 を検出した。鋼板表面に K 型熱電対を溶着し、その指示温度 T_a が $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内で一定になるように加熱装置を PID 制御した。冷延鋼板の放射率は表面の酸化状態によつて変化するので、炉内雰囲気ガス ($\text{N}_2, \text{H}_2, \text{O}_2$) を調節して酸化状態を制御し、放射率を 0.3 から 0.85 程度の範囲で変化させた。Fig. 4(a), (b)

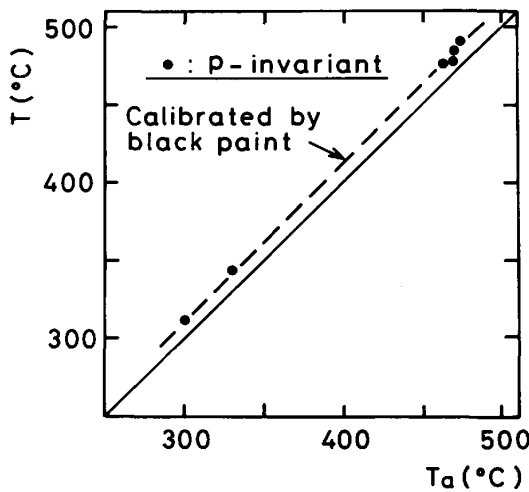


Fig. 5. Relation between T_a and T through p -invariant method, where T_a is the apparent temperature of a specimen measured by a thermocouple and T is the true one corrected by p -invariant method.

に結果の1例を示す。(a)は温度一定のもとで酸化が進行している間に検出した L_1, L_2 の変化を示す。(b)は(a)の結果をもとに得られた L_1 と ΔL の関係をプロットした。図中の破線は測定点を(11)式の2次放物線で最小2乗近似したものである。この結果は、本原理が冷延鋼板についてよく成り立っていることを実証している。

p 不変法は、熱電対で測定した試料表面のみかけの温度 T_a の校正に利用することができる。Fig. 4 から L_1^* を求め、これを(14)式に代入して試料表面の真温度 T が得られる。この実験を6回繰り返す、その結果をFig. 5に図示した。図中の破線は別方法で校正した T と T_a の関係である(付録1参照)。 T_a は T より低い値を示す。以降、熱電対の指示温度 T_a は、Fig. 5 を用いて校正した。

3.2 鏡面反射係数 p の測定

3.2.1 検出波長 λ と立体角 Ω の p への影響

p が λ や Ω の関数であることを2. で述べたが、冷延鋼板についてどのような傾向を示すか、Fig. 3 の装置を用いて調べた。 Ω は測定点Oから反射ミラー面までの距離を l 、反射ミラーの半径を R とするとき次式で定義される。

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \cos \left(\tan^{-1} \frac{R}{l} \right) \right) \text{ (Sr)} \dots\dots\dots (16)$$

(1), (2)式から p は次式で求められる。

$$p = \frac{L_2/L_1 - 1}{r_a \cdot \tau^2 \cdot (1 - \epsilon_\theta)} = \frac{L_2/L_1 - 1}{r_a \cdot \tau^2 \cdot (1 - L_1/\tau \cdot L_b(T))} \dots (17)$$

検出素子は Ge ($\lambda = 1.6 \mu\text{m}$), PbS ($\lambda = 2.2 \mu\text{m}$) および InSb ($\lambda = 5 \mu\text{m}$) の3種類である。反射ミラーとして金

めつきしたガラス円板 ($r_a = 0.95$)、透過フィルタとして熔融石英 (Ge, PbS 用) と CaF_2 結晶 (InSb 用) を用いた。いずれも $\tau = 0.93$ である。(17)式において測定温度 T から各素子の放射計の $L_b(T)$ が求められ、検出値 L_1, L_2 とから計算によつて p が得られる。 Ω は l を変化させることによつて変えた。Fig. 6 に結果を示す。 p は Ω の増加と共に、また λ が長くなるにつれて大きくなる。この現象は物理的に明らかである。すなわち、 λ が長くなるほど試料表面での反射が鏡面的反射となり、また Ω が大きくなるほど反射ミラーからの反射量が大きくなり、したがつて、 L_2 が増大することによる。

Fig. 6 のデータ中の・印は、反射ミラーとして平面鏡の代わりに凹面鏡を使用した場合の結果である。 Ω が同じであれば、両者による p 値はほとんど一致することがわかつた。しかるに、Fig. 7 に示すように、実用的な見地から、平面鏡より凹面鏡の方がすぐれている。すなわち後者の場合、測定点付近からの放射が集光され

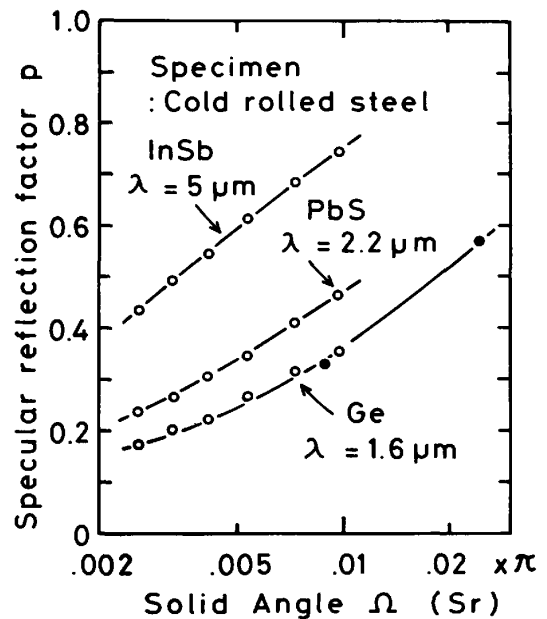


Fig. 6. Experimental relation between Ω and p . p value increases with increasing Ω .

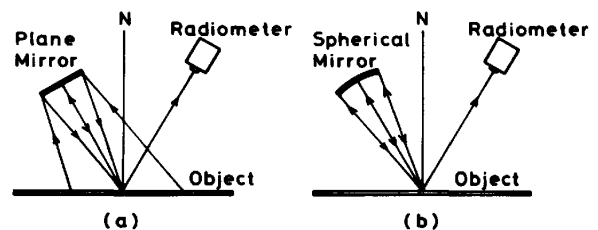


Fig. 7. Comparison of a plane mirror and a spherical mirror for a reflecting mirror. The latter is suitable for practical use.

て再び測定点に戻るため、光路を狭くすることができる。したがって、炉壁に設置する透過窓の口径も小さくすることができ、炉内ダスト等による透過率 τ の劣化を防止する N_2 ガスパージが容易となり、システム構成も簡単化される¹⁰⁾。

3.2.2 各鋼種の p 値測定

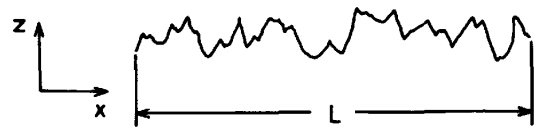
本原理では p 値を知ることがきわめて重要である。そこで、適用対象である 3 鋼種の冷延鋼板について 3.2.1 と同じ手法で p 値を測定した。ただし、 $\Omega=2.4 \times 10^{-2}\pi$ (Sr), $T=508^\circ\text{C}$ に設定し、Ge 素子の放射計を使用した。Table 1 に各試料 10 枚の平均値 \bar{p} と相対変動の最大値 $|\bar{p}-\bar{p}|_{\max}/\bar{p}$ を示す。各鋼種の p 値のばらつきは最大 5% であるが、別途検討した p 値測定の実験誤差は約 6% 以内と見積もれるので、同一鋼種内の真の p 値変動は非常に小さいと考えられる (付録 2 参照)。また、鋼種間の p 値は若干有意差があると考えられ、目視によつても粗度のちがいによる光沢度の差が明らかであつたので、粗度と p 値の関係、および鋼板の酸化による粗度の変化を次に調べた。

連続焼鈍炉の無酸化炉ゾーンなどでは、炉内の微量 O_2 によつて鋼板面に微妙な酸化膜が生成され、放射率の変化はむしろのこと、表面粗度が変化する可能性があり、これによつて p 値が変化する恐れがある。上述の 3 種類の冷延鋼板から、それぞれ 6 枚ずつ試料を用意し大気雰囲気での加熱炉で加熱酸化させた。温度を 300°C に設定して、各試料の酸化時間をそれぞれ 0 (無酸化, 原板のまま), 2, 5, 10, 30 および 60 min とした。各酸化時間後、試料の表面粗度を触針式の粗度計で測定し、圧延方向およびそれに直角方向の測定値の平均値を求めた。粗度の評価は、Fig. 8 に定義される平均傾斜角 θ_a で行つた¹⁰⁾。Fig. 9 に結果を示す。図から明らかのように酸化時間の変化によつては各冷延鋼板の θ_a はほとんど変化しなかつた。しかるに、図中に破線で示すように放射率は一般に大幅な変化を示す。以上の結果から、冷延鋼板の場合、放射率の変化があつても同鋼種であれば p 値はほぼ一定であり、本原理の適用が可能である。Fig. 10 は Table 1 の各鋼板の p 値と Fig. 9 の θ_a

Table 1. p values of cold rolled steel sheets.
 $\Omega=2.4 \times 10^{-2}\pi$ (Sr)
 Detector : Ge ($\lambda=1.6 \mu\text{m}$)

Specular reflection factor	Steel grade		
	A	B	C
\bar{p}	0.573	0.521	0.494
$ \bar{p}-\bar{p} _{\max}/\bar{p}$	0.025	0.050	0.044

($n=10$)



$$\theta_a = \frac{1}{L} \int_0^L |\theta - \theta_m| dx$$

where

$$\theta = \frac{dz}{dx}, \quad \theta_m = \frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dz}{dx} \right) dx$$

Fig. 8. Definition of average slope angle θ_a .

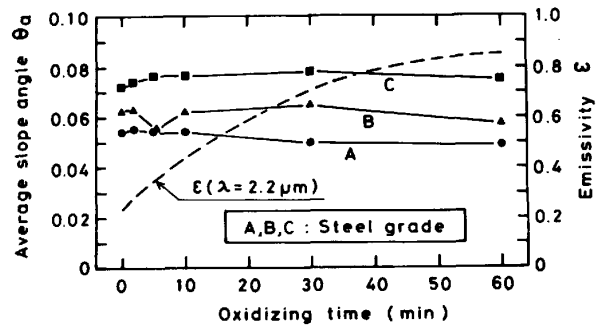


Fig. 9. Experimental result of the changes of ϵ and θ_a with oxidizing time of cold rolled steel sheets. θ_a is stable in spite of emissivity change.

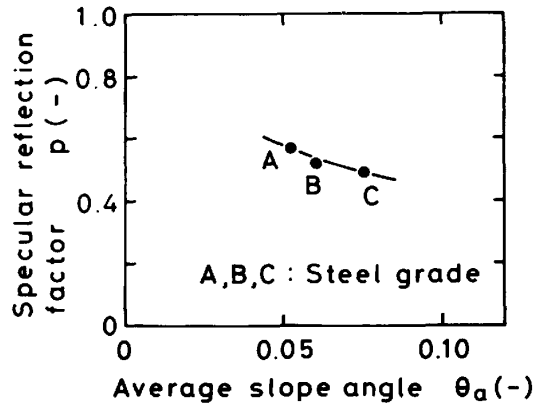


Fig. 10. Experimental relation between θ_a and p . (see Table 1 and Fig. 9)

の関係を図示したものである。 θ_a が小さいと p が大きい。表面粗度に差がある場合、Fig. 10 の p と θ_a の相関を利用して p 値を修正することができる。

3.3 測定例

実験室での測定例を Fig. 11 に示す。試料 A の冷延鋼板を 508°C に保ち、Fig. 3 の炉の雰囲気還元性から弱酸化性にしたいに変化させて放射率を変化させた。Ge 素子の放射計を検出器として用いた。 $\Omega=2.4 \times 10^{-2}\pi$ (Sr), $\theta=30^\circ$, $p=0.58$ に設定した。放射率は 0.32 から 0.86 まで変化したが、本方法による测温誤差

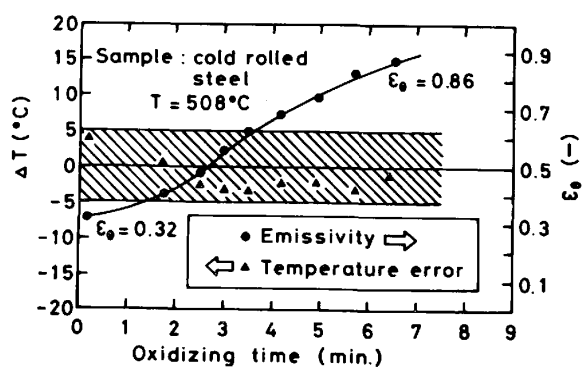


Fig. 11. Measurement example during oxidation of a specimen. The temperature error, ΔT , measured by the method is within $\pm 5^\circ\text{C}$ for all the observations.

は常に $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内であった。

4. オンライン測定

本原理に基づく測定システムを TERM-S と名づけた。TERM-S は Fig. 12 に示すような新日鉄(株)名古屋製鉄所の冷延連続焼鈍炉 (C.A.P.L.) のゾーン間を結ぶスロート部, すなわち気水冷却炉出側に適用された¹²⁾。

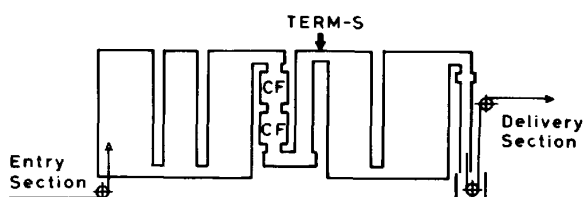


Fig. 12. Schematic diagram of Continuous Annealing and Processing Line at Nagoya Works. (CF: Cooling furnace)

Table 2. Specifications of TERM-S installed Continuous Annealing and Processing Line.

No.	Items	Specifications
1	Detector	Ge ($\lambda = 1.64 \pm 0.16 \mu\text{m}$)
2	Range	Temperature: 250-500°C Emissivity 0.2-1.0
3	Accuracy	$\pm 10^\circ\text{C}$
4	Protection of stray radiation	Water cooled shielding flange
5	Dimensions	
	(1) Solid angle, Ω	$0.042 \pi \text{ Sr}$
	(2) Radius of the shielding flange, R	250 mm
	(3) Gap, H	50 mm

Table 3. Specifications Continuous Annealing and Processing Line at Nagoya Works.

No.	Items	Specifications
1	Products	Cold rolled steel strips (Carbon < 0.2%)
2	Dimensions of products	
	(1) Thickness	0.4-2.0 mm
	(2) Width	700-1600 mm
3	Line speed	31-310 mpm
4	Production	55 000 t/Month

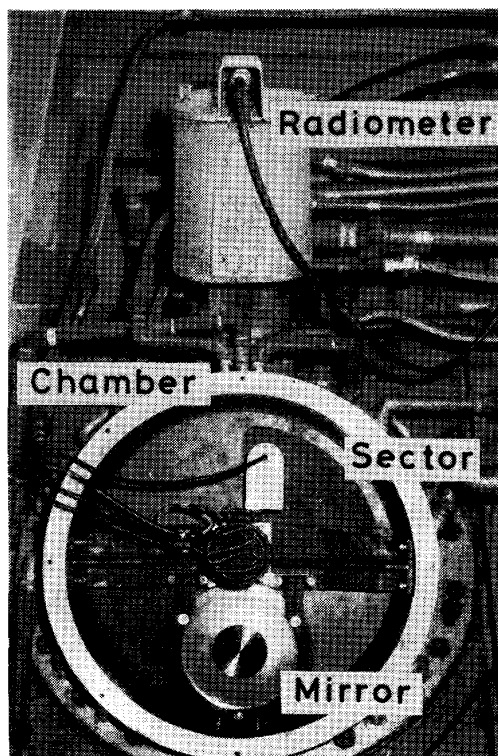


Photo. 1. TERM-S system installed at Continuous Annealing and Processing Line. A reflecting mirror and a rotating sector are settled inside the chopping unit chamber.

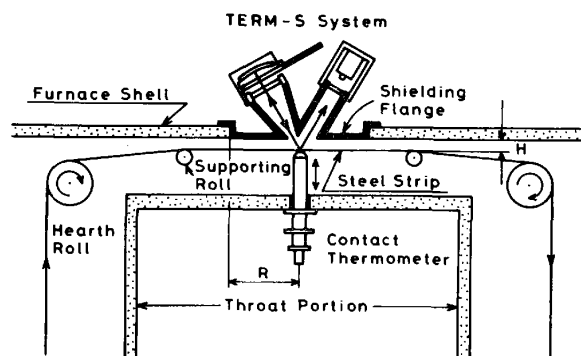


Fig. 13. Schematic diagram of TERM-S online system installed at the throat portion of a continuous annealing furnace.

ここでは、気水により鋼板面が酸化されるため、放射率変化が不可避であると考えられている。Photo. 1 に実装置を示す。Table 2 と Table 3 にそれぞれ TERM-S および C.A.P.L. の主仕様をまとめた。

Fig. 13 に実用 TERM-S の概略を示す。本システムは走行鋼板に対向して水冷遮蔽板が炉壁に設置され、その上に放射計と反射ミラー、および回転セクタを取り付けたものである。また、接触温度計はソリ状の薄い金属板上に K 型熱電対を溶着したものを走行鋼板に接触させて測温するもので、校正用として間欠的に使用する¹³⁾。

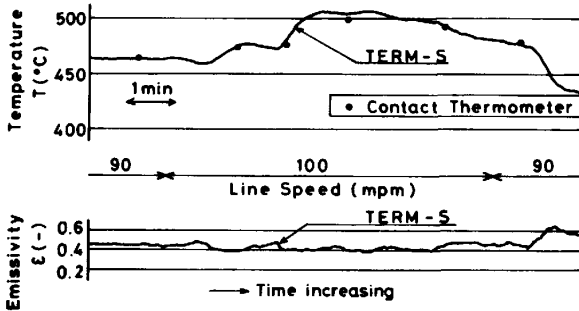


Fig. 14. Example of online measurement by TERM-S. Both temperature and emissivity are continuously indicated.

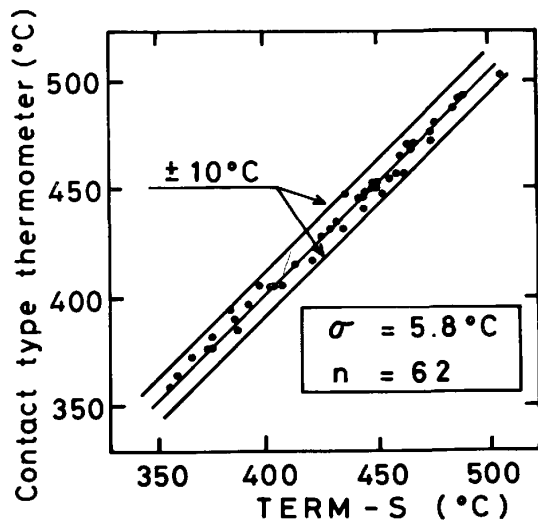


Fig. 15. Accuracy of temperature measurement of the online system. The difference between the temperatures of TERM-S and the contact type thermometer is within $\pm 10^\circ\text{C}$.

本温度計の精度は $\pm 5^\circ\text{C}$ と見積もられている⁵⁾。走行鋼板の振動を防止するために、通常サポートロールが導入される。透過窓の透過率 τ は、 N_2 ガスパージ機構によつて、3カ月ごとの定期チェックまで劣化しないことが確認されている。本システムは実用的に次のような特長がある。

- (1) 放射計、反射ミラー、回転セクタ等の構成要素を炉外に設置できること、
- (2) 全体として小型で、かつ一体化構造にでき、炉壁に組み込むことができること。

Fig. 14 はオンライン測定中の温度と放射率の出力を同時表示したものである。図中の・印は、間欠的に測定した校正用接触温度計の指示値を示す。Fig. 15 は Fig. 14 のオンライン測定を多数回実施し、接触温度計による温度指示と TERM-S による温度指示を比較したものである。両者の差がほぼ $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内であることから TERM-S 実用システムは目標精度を得たと判断した。

5. 結 論

放射計と反射ミラーを測定面に対して鏡面对称的に配置し、反射ミラーによる反射光の有無に対応する放射計の2つの検出値から、温度と放射率を同時測定する放射测温法を考案した。本原理と水冷遮蔽板を組み合わせた測定システムを開発し、連続焼鈍炉内鋼板测温システムとして実用化した。測定精度は接触温度計を基準にして、 $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内の誤差と見積もることができた。

最後に、本方法の実用化にあたり、新日鉄(株)名古屋製鉄所設備部、設備技術本部電気計装技術部、およびエンジニアリング事業本部プラント事業部の多くの関係者の協力を得た。紙面にて謝意を表します。

付録 1 表面温度校正

試料に溶着した熱電対による温度指示 T_a を別途以下に述べる方法で校正した。

試料の表面に耐熱黒色塗料(日東工業, HB-600)を塗布すると、その放射率 ϵ' が 0.95 ± 0.03 の範囲で安定する。このときの放射計による検出値を L' とすると次式が成り立つ。

$$L_b(T) = L' / \epsilon' \dots\dots\dots (18)$$

(18)式で求まる鋼板温度は、 $T = 500^\circ\text{C}$ で $\pm 3^\circ\text{C}$ の誤差である。この方法によつて得られた T と熱電対の指示 T_a の関係が Fig. 5 中に破線で示されている。

付録 2 誤差の推定

τ_a, τ が一定としたとき、(17)式で求まる p 値は次のような測定誤差を含んでいる。

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta(L_2/L_1)}{L_2/L_1 - 1} + \frac{\Delta\epsilon_\theta}{1 - \epsilon_\theta} \dots\dots\dots (19)$$

右辺第1項は検出値の読み取り誤差、第2項は熱電対による测温誤差によつて生じる誤差である。(1)式において、 ϵ_θ が $\Delta\epsilon_\theta$ だけ変動したときの $L_b(T)$ の変化量を $\Delta L_b(T)$ とすれば、

$$\Delta L_b(T) = - \frac{L_1}{\tau \cdot \epsilon_\theta} \cdot \frac{\Delta\epsilon_\theta}{\epsilon_\theta} \dots\dots\dots (20)$$

(20)式と(1)式から

$$\frac{\Delta L_b(T)}{L_b(T)} = - \frac{\Delta\epsilon_\theta}{\epsilon_\theta} \dots\dots\dots (21)$$

しかるに、 $L_b(T)$ は次の WIEN の式で与えられる。

$$L_b(T) = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp(-c_2/\lambda \cdot T) \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 $c_1 = 3.7413 \times 10^4 (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

(21)、(22)式より

$$\frac{\Delta L_b(T)}{L_b(T)} = \frac{c_2}{\lambda \cdot T} \cdot \frac{\Delta T}{T} \dots\dots\dots (23)$$

(21)式と(23)式を(19)式に代入して、測定誤差によつて生じる p 値のみかけの変動の最大値を次式で見積もることができる。

$$\left| \frac{\Delta p}{p} \right|_{\max} = \left| \frac{\Delta(L_2/L_1)}{L_2/L_1 - 1} \right|_{\max} + \frac{\varepsilon_\theta}{1 - \varepsilon_\theta} \cdot \frac{c_2}{\lambda \cdot T} \cdot \left| \frac{\Delta T}{T} \right|_{\max} \quad (24)$$

実際の測定では $|\Delta(L_2/L_1)| \approx 0.01$, $L_2/L_1 \approx 1.3$, $|\Delta T|_{\max} \approx 3$ (K), $T \approx 508 + 273 = 781$ (K), $\varepsilon_\theta \approx 0.35$, $\lambda = 1.6$ (μm), $c_2 = 14388$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)であるから、これらの数値を(24)式に代入すれば、

$$\left| \frac{\Delta p}{p} \right|_{\max} \approx 0.06 \quad (25)$$

を得る。実験で測定した p 値の相対変動は Table 1 に示すように 0.05 以内であつた。誤差解析より見積もれるみかけの相対変動は(25)式のように最大 0.06 であるから、両者はほぼ等しい値である。したがつて、 p 値の真の相対変動はかなり小さいと考えられる。

一般に、 r_a , τ , p の変動によつて生じる放射率、温度の測定誤差はそれぞれ次のようになることが容易に導かれる。

$$\frac{\Delta \varepsilon_\theta}{\varepsilon_\theta} = - \left(\frac{1}{\varepsilon_\theta} - 1 \right) \cdot \frac{\Delta k}{k} \quad (26)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\lambda \cdot T}{c_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_\theta} - 1 \right) \cdot \frac{\Delta k}{k} \quad (27)$$

ただし、

$$\frac{\Delta k}{k} = \left(\frac{\Delta r_a}{r_a} + 2 \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{\Delta p}{p} \right) \quad (28)$$

文 献

- 1) G. J. HECHT: Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 3, Part 2 (1962), p. 407
- 2) M. D. DRURY, K. P. PERRY and T. LAND: JISI, 169 (1951), p. 245
- 3) D. KELSALL: J. Sci. Instrum., 40 (1963), p. 1
- 4) 芝 亀吉: 応用物理, 27 (1958), p. 212
- 5) 井内 徹, 大野二郎, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2076
- 6) 井内 徹, 田中富三男: 計測自動制御学会論文集, 19 (1983), p. 557
- 7) 井内 徹: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 97
- 8) 井内 徹: 計測自動制御学会論文集, 16 (1980), p. 233
- 9) T. IUCHI and R. KUSAKA: Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 5, Part 1 (1982), p. 491 [AIP]
- 10) 高藤英生, 石田次雄, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 679
- 11) 実開昭 58-6239
- 12) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 85 回計測部会 (1983 年 11 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 13) 実用新案登録第 1280501