

# 反射情報を利用した放射率補正型温度計の開発

平本 一男\*・田村 洋一\*<sup>2</sup>

Development of Emissivity Compensated Pyrometer Using the Information of Reflection

Kazuo HIRAMOTO and Yoichi TAMURA

**Synopsis** : The emissivity change due to oxidation is very important information to measure accurate temperature by a pyrometer in steel making process, for example continuous annealing line of cold rolled steel. We have measured the behavior of spectral emissivity in detail during oxidation process. The behavior is very complex and it is difficult to compensate for change in emissivity. In order to compensate for emissivity in steel making process, we have proposed a new method. This method depends on both Kirchhoff's law and the characteristics of surface reflection of cold rolled steel. We have measured surface reflection of cold rolled steel sheets which had three kinds of surface roughness. The angular distribution of reflection mostly concentrates in a normal direction even with the roughest surface steel. 85–93% of hemispherical reflection is measured by reflection from normal to 35 degrees. Emissivity can be accurately estimated by measurement of reflection intensity from steel sheet surface.

We have manufactured a compact and practical pyrometer, in which specular and diffusive reflection components have been measured by photodiode separately. The accuracy of emissivity is  $\pm 13\%$ , and the accuracy of temperature is  $\pm 10^\circ\text{C}$  with the temperature range of 650–900°C in both laboratory experiments and continuous annealing line.

**Key words**: temperature measurement; oxidation process; pyrometer; emissivity; reflection.

## 1. 緒言

鉄鋼プロセスは高温のプロセスであるとともに、測定対象が高速で移動するため放射温度計が多く用いられている。しかし放射温度計で正確な測温をするためには、測定対象の放射率を正確に把握しておく必要がある。冷間圧延鋼板や表面処理鋼板に代表される薄鋼板の製造プロセスでは、ユーザーの要求する深絞り性等の機械的特性値を持たせるために連続焼鈍ラインでの熱処理が広く行われている。このラインでは、冷延鋼板の表面酸化を防止するため、窒素等の不活性ガス中での熱処理が一般的であるが、ラインの一部では加熱能力の高いコークス炉ガスの燃焼による直火加熱が行われている。このような加熱方式の場合、操業効率を上げるために加熱温度を高くすると表面が酸化されて放射率が変化し、放射温度計での測定値に誤差が発生する場合がある。

近年、放射測温において放射率の変化をその場で補正するための新しい方式の温度計(以下、放射率補正型温度計)が研究、提案されている。この方式は、①放射情報のみを利用する受動的な方法と②反射情報を利用する能動的な方法との2つに大別される。第1の方法には、2色温度計に代表される複数の波長におけるそれぞれの放射率の関係式を利用する温度計がよく知られている<sup>1-3)</sup>。この方式に基づく

放射率補正型温度計は、多くの波長を利用した実験的な報告<sup>1)</sup>の他に、使用する波長の数を2種類または3種類に限定した上で、温度計自体の構造を簡単にして溶融亜鉛めっき鋼板の合金化プロセスへ適用した例が報告<sup>2,3)</sup>されている。この方式は、温度計と測定対象である鋼板との距離や鋼板上の測定面積が、通常の放射温度計と同じ条件であるため既存の製造ラインへの設置が容易ではあるが、測定原理上、事前に測定対象の放射率の波長依存性等の放射率挙動を測定しておく必要がある。しかし製造ラインで放射率挙動のすべてを把握することや実験室で完全に製造ラインの状況を再現することは事実上不可能であるため、この方法を広く工業用として適用することは難しく、測定対象が限定される。特に冷延鋼板の酸化中の放射率挙動は、極めて複雑な変化を示すため、この受動的な方法では適用が困難である。

第2の能動的な方法は、測定対象表面の反射率を測定し、キルヒホッフの法則をもとにして反射率から放射率をその場で推定する方法である<sup>4-6)</sup>。この方法に基づく放射率補正型温度計は、溶融亜鉛めっき鋼板の合金化プロセス<sup>4)</sup>やカラー塗装鋼板への適用<sup>5)</sup>が報告されており、その原理から酸化中の冷延鋼板への適用が比較的容易である。しかし反射情報を得るために大型の平面黒体熱放射源<sup>4)</sup>、楕円面鏡<sup>5)</sup>、棒状光源<sup>6)</sup>を温度計内部に備えるため、装置自体が

平成11年4月12日受付 平成11年12月10日受理 (Received on Apr. 12, 1999; Accepted on Dec. 10, 1999)

\* 住友金属工業(株) システム事業部 (現: シチックス事業本部) (System Div., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660-0891, now Sitix Div., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 826-1 Nagahama Higashiyamashiro-cho Imari 849-4271)

\* 2 長崎総合科学大学 (Nagasaki Institute of Applied Science)

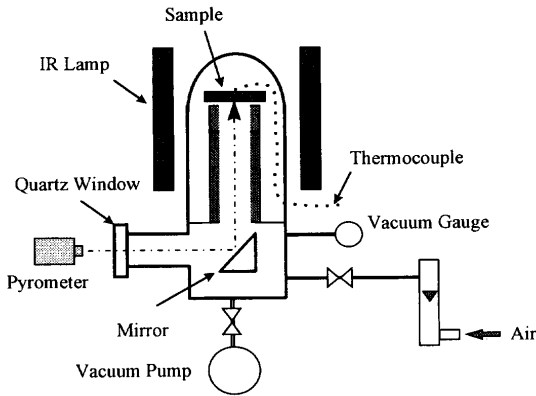


Fig. 1. Schematic diagram of IR vacuum furnace.

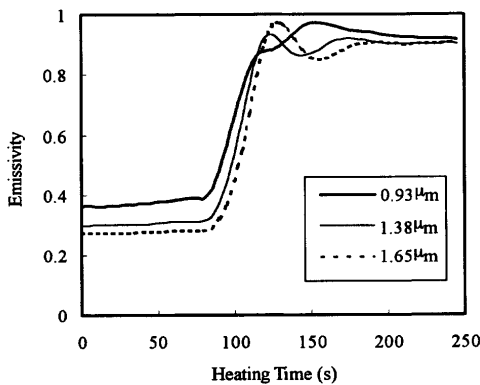


Fig. 2. Emissivity change of cold rolled steel in oxidation.

複雑・大型化し、工業用としては使いにくいものにならないという問題があった。

本開発では、入射方向から35度までの角度範囲の反射光を測定することで冷延鋼板の半球反射率と放射率が高精度で求められることを明らかにした。この結果を基にして反射光の角度分布に何らかの仮定を用いることなく、外形寸法の小さい独自の光学系を用いた、正確な放射率をオンラインで測定する機能を持つ工業用放射率補正型温度計を開発した。

## 2. 酸化中の鋼板の放射率変化

冷延鋼板表面の酸化による放射率変化の挙動を明らかにするために、Fig. 1に示す赤外線加熱真空炉を用いて、冷延鋼板サンプルの酸化中における放射率を測定した。真空炉（約 $10^{-2}$  Pa）内にサンプルを設置し、900°Cに加熱した。次に徐々に空気を炉内に導入し、サンプル表面を酸化させた。サンプルの温度は、細径のK熱電対素線を表面に溶着して測定した。熱電対の溶着面と反対側からの熱放射は、3枚の干渉フィルタを使ってそれぞれの波長における分光放射輝度を測定した。干渉フィルタの中心波長はそれぞれ0.93, 1.38, 1.65  $\mu\text{m}$ であり、半値幅はそれぞれ80, 104, 106 nmである。0.93  $\mu\text{m}$ 帯の検出器はシリコンフォトダイ

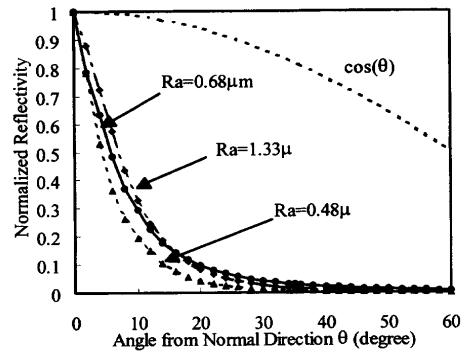


Fig. 3. Angular distribution of reflection for cold rolled steel.

オードであり、その他はゲルマニウムフォトダイオードを用いた。各サンプルの放射率は、それぞれの波長における検出器出力とK熱電対の指示温度における黒体放射に対応する検出器出力との比で求めた。

測定した放射率変化の一例をFig. 2に示す。空気の導入に伴って放射率は単調に増加した後、極大値をとり、その後振動現象を生じる。さらに酸化が進行すると、放射率の振動振幅は減少し、一定の値に収束する。この値は一般に酸化膜を持つ鋼板の放射率とほぼ同じである。このような酸化による放射率の振動現象は、透明な薄膜の干渉現象で説明できるが、詳細な考察は別論文にて行う予定である。

## 3. 測定原理

### 3.1 表面粗さと光学反射特性

放射率と半球反射率とは、不透明体の場合はキルヒホッフの法則から次式で関係づけられ、半球反射率を正確に測定すれば放射率は求められる。

$$\varepsilon = 1 - R \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ : 放射率,  $R$ : 半球反射率。

表面粗さが比較的小さい場合は、反射光が限られた角度範囲に集中するため、小型で簡単な光学系で半球反射率と放射率とが測定できる。しかし一般に冷延鋼板は表面が粗く、反射光は半球面に広く分布する。

冷延鋼板の表面粗さと反射特性との関係を定量的に評価し、反射光検出用光学系を設計するため、連続焼鈍炉内で熱処理される冷延鋼板の代表的な粗さを3水準、サンプルとして選び反射光強度の角度分布を測定した。中心線平均粗さ（以下、 $R_a$ ）はそれぞれ0.48, 0.68, 1.33  $\mu\text{m}$ である。Fig. 3にその結果を示す。光源は中心波長約880nm、半値幅50nmの発光ダイオード（以下、LED）を平行光束にして、法線に対し6度の方向から上記サンプルに入射させた。 $R_a$ が1.33  $\mu\text{m}$ のサンプルでも反射光は正反射条件に近い角度に集中することがわかる。

半球反射率は(2)式で表される<sup>7)</sup>。

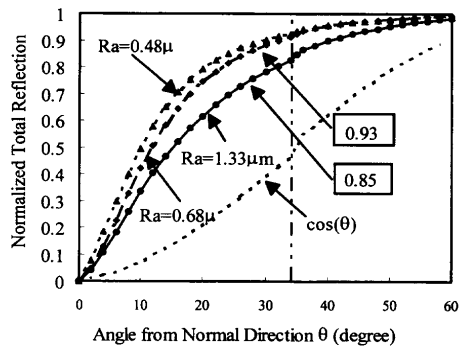


Fig. 4. Dependence of hemispherical reflection on zenith angle (θ).

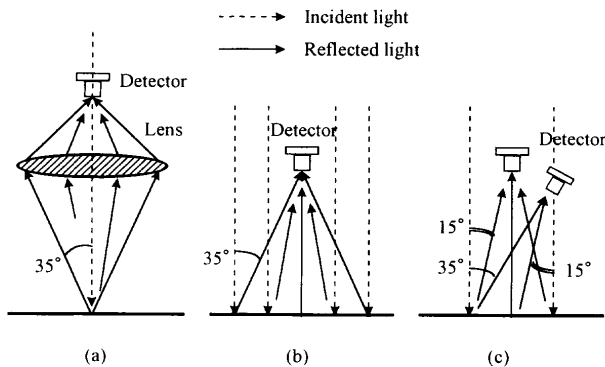


Fig. 5. Optical schematic view for measuring hemispherical reflection.

$$R = \int R(\theta) \cos \theta d\omega = \iint R(\theta) \cos \theta \sin \theta d\phi d\theta$$

$$= \pi \int R(\theta) \sin 2\theta d\theta \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\omega$ 、 $\phi$ 、 $\theta$ はそれぞれ立体角、法線を中心にした方位角、法線となす角度つまり天頂角であり、 $R(\theta)$ は $\theta$ 方向の反射率を表す。冷延鋼板の表面は均一でランダムな粗さを持っているため、反射率は方位角 $\phi$ には依存せず一定であり、天頂角 $\theta$ のみに依存すると仮定している。 $R(\theta)$ としてFig. 3の反射率分布を用い、 $\theta$ と法線からその角度までの反射率の積分値との関係を計算した結果をFig. 4に示す。縦軸はサンプルの反射率の積分値を半球反射率で正規化している。 $\theta$ が35度までの積分値は、 $R_a$ が1.33μmのサンプルで半球反射率の85%、 $R_a$ が0.48μmでは93%になる。両方の値を上下限として平均を求め、その逆数で正反射条件から35度までの角度の反射光を補正すれば4.5%以内の誤差で半球反射率が求められる。

3.2 反射光測定の光学系と特徴

反射光測定の光学系として、Fig. 5(a), (b)に示す2種類が考えられる。Fig. 5(a)の方法は、測定対象上の1点に光を照射して、その反射光を結像光学系で光検出器上に集光する。Fig. 5(b)の方法は、広い平行光束を対象表面に照射し、反射光を平行光束の中心に設置した光検出器で測定する。

Fig. 5(a)の適用例として、複数の楕円面鏡によって反射光を集光検出する方法<sup>5)</sup>がある。この報告例では反射光を検出する角度範囲が20度と狭いため、検出角度範囲を3分割して正反射光成分と散乱反射光成分とに分離し、散乱光強度の角度分布が $\cos \theta$ の $n$ 乗という関数に比例するという仮定のもとに、検出できない20度以上の散乱光強度を推定している。鏡面反射性の強い測定対象では、正反射と散乱反射とを分離することができ、関数も近似精度がよい。しかし一般の冷延鋼板ではFig. 1に示した反射光の角度分布から明らかなように、正反射光と散乱反射光とは必ずしも明確に分離できず、散乱光強度も $\cos \theta$ の $n$ 乗にはあてはまらない。検出する角度範囲を大きくしてこの仮定を利用しないためには、放物面鏡を大きくする必要があり、その結果として温度計が大型化することは避けられない。また実際の測定対象である走行中の冷延鋼板では、光軸方向の変動、いわゆるパスライン変動や傾きが必ず発生し、この方法では光検出器での結像位置がずれるため、反射光強度の測定値が大きく変化する。

Fig. 5(b)の適用例として、平面熱源からの熱放射光を測定対象物体に照射し、その反射光を検出する方法<sup>6)</sup>がある。この方法では対象の温度が高くなると放射計でSN比よく熱放射と反射光とを検出するために、平面熱源の温度も高温にする必要がある。例えば900°C、放射率0.3の測定対象からの熱放射輝度に相当する平面熱源の温度は、波長0.9μmにおいて、約800°Cになる。実際には測定対象物体の反射率は1よりも小さく、また開口面積も小さく制限されているため、熱源の温度はより高温にする必要がある。また報告では平面熱源は150mmφの大きさであるため、800°Cを越えるような高温において面内の温度分布を均一にすることは極めて困難である。放射温度計の内部にこのような高温で、かつ面積の大きな熱源を内蔵することは、温度計内部温度上昇を招くとともに、冷却のための対策によって温度計の外形を極めて大きくしてしまう問題がある。したがってこの方法は比較的低温が低い測定対象に限定される。

本開発では、光学系の外形を大きくすることなく広い角度範囲の反射光の検出を可能にするFig. 5(c)の方法を考案した。法線方向から照射した光の反射光は、 $\theta$ が0度から15度までの角度成分（以下、正反射光成分と呼ぶ）と、15度から35度の範囲の角度成分（以下、散乱反射光成分と呼ぶ）とに分けて視野制限のための絞りをつけた別々の光検出器で測定する。この方法での冷延鋼板表面上の反射率測定部の面積をFig. 6に示す。正反射光成分と散乱反射光成分はそれぞれFig. 6(a)の $S_1$ ,  $S_2$ の部分からの反射光を測定している。ここで本来の散乱反射光成分はFig. 6(b)の斜線で示す $\theta$ が15度から35度の範囲 $S_3$ をすべて測定する必要があるが、実際に測定している面積 $S_1$ ,  $S_2$ はその内の一部であるため、後述する放射率基準サンプルを用いた校正

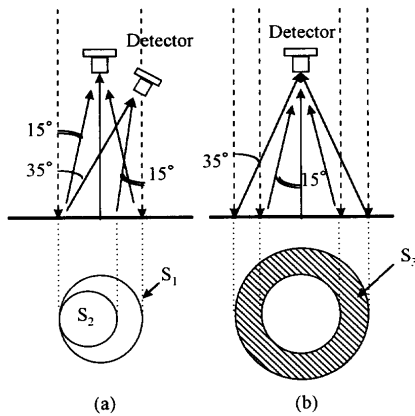


Fig. 6. Detection area of reflection.

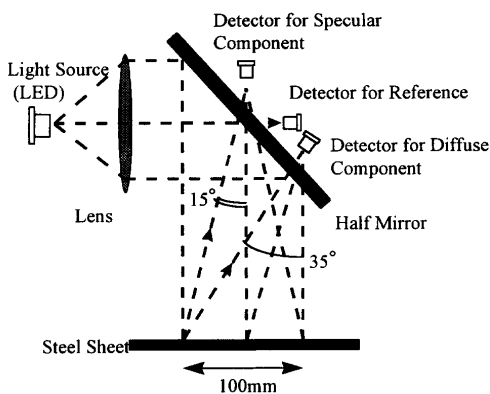


Fig. 7. Schematic diagram of a new pyrometer.

によって、補正を行った。

光源にはLEDを使用することで、小型で発熱が少なく高輝度の光照射が可能になり、測定対象物体が高温の場合でも高SN比で反射光が測定できる。

#### 4. 温度計の構成

Fig. 7に今回開発した温度計の全体構成を示す。平行光束の光源には放射温度計の検出波長とほぼ同一波長の約880nmに中心発光波長があり、半値幅が50nmの発光スペクトルを持つ高輝度LEDを使用し、駆動電流によって100Hzで矩形波状に発光強度を変調した。このLEDからの変調光をレンズとハーフミラーを通して平行光束にして、冷延鋼板に垂直に照射した。正反射光成分測定用の光検出器は、平行光束と同軸上に設置するとともに、熱放射光の測定も兼ねている。散乱反射光成分は特に冷延鋼板の傾斜による測定値の変動が大きい。Fig. 8は傾斜角度に対する正規化した散乱反射光成分の変化を示している。破線で示した1方向のみの散乱反射光成分測定では、2度の傾斜でも約50%の測定値変化があるが、互いに対向する2つの方向からの測定値を平均した場合には3度の傾斜でも測定値変化は5%以下になった。したがってFig. 7では省略しているが、散乱反射光成分の光検出器は光束の円周方向

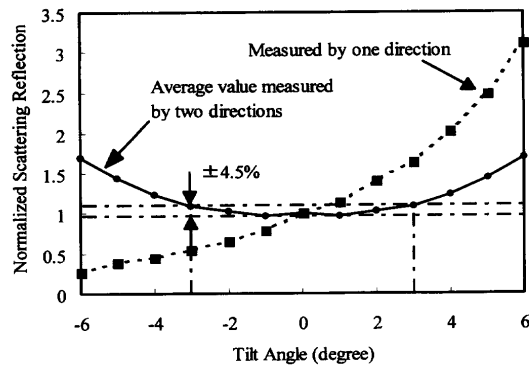


Fig. 8. Dependence of normalized scattering reflection on tilt angle.

Table 1. Specifications of a new pyrometer.

Items	Specifications
Temperature range	650 - 900°C
Emissivity range	0.3 - 1.0
Detector	Silicon photodiode (0.93 $\mu$ m) Specular:1, Diffusive:4
Light source	IR LED (880nm, 50mW)
Light diameter	100mm
Measuring time	1 s

に90度ごとに等間隔で4カ所に設置し、この検出器からの平均値を散乱反射光強度とすることで、測定対象である冷延鋼板の傾斜に伴う反射光検出の変動を低減した。LEDの発光強度は温度によって変動するので、ハーフミラーを透過した光の一部を検出し、基準光強度として補正に用いている。

正反射光、散乱反射光、基準光強度はLEDの発光したタイミングと同期して測定する。正反射光成分の検出器ではLEDが消光したタイミングと同期した出力を熱放射輝度として測定している。それぞれの出力は演算装置によって第3章で述べた放射率の演算を行い、黒体炉を用いてあらかじめ校正した熱放射輝度と温度との関係から、放射率で補正した真温度として出力する。

温度計の測定部は、連続焼鈍炉内等の高温環境下で使用されるため、水冷した保護管に収納するとともに、窓部には酸化錫を主成分にした熱線反射膜のコーティングや窒素ガスでの測定部内部のパージによって放射伝熱による内部温度上昇を防いでいる。また長期にわたる炉内環境での動作に伴う光学系の汚れを検知するために、測定部の下部にアルミ蒸着ミラーと黒色塗料を塗布した冷延鋼板とを取り付けた基準反射板を設置した。この基準反射板は外部からの指示で電動で回転させることができ、アルミ蒸着ミラーを測定する場合は反射率が0.97、黒色塗料の場合は反射率が0.04として適切な期間ごとに異常の有無の確認を行う。もし測定した反射率に異常が発生した場合には測定部を取り外して清掃等の処置を行う。本温度計の主な仕様をTable 1に示す。

平行光束の直径を100mmにした場合、正反射光検出器

Table 2. Results of emissivity estimation.

True emissivity	Estimated emissivity	Estimated error (%)
0.42	0.423	2.9
0.59	0.55	6.8
0.7	0.657	6.2
0.85	0.79	-7.1
0.9	0.85	-5.5
0.96	0.96	0

と散乱反射光検出器はそれぞれ冷延鋼板から 186 mm, 120 mm の位置に離して設置できた。

以上の構成によって連続焼鈍炉内で長期的な稼働が可能で、工業用に適した温度計を実現できた。

### 5. 反射率測定法の校正と測温実験

冷延鋼板を第2章で述べた真空炉を用いて徐々に酸化させ、所定の放射率に達したときに空気の導入を止めて、酸化の進行を停止させる方法で、酸化状態によって放射率の異なる放射率基準サンプルを5種類作成した。酸化してない状態で放射率は最も低く0.42であり、酸化によって放射率が飽和した状態で0.9であった。なおすべての放射率は波長0.93 μmにおける値である。このサンプルと、第4章で基準反射板に使用したものと同一アルミ蒸着ミラーと黒色塗料を塗布した冷延鋼板と合わせて7種類のサンプルに対して、(3)式を用いて以下の手順で反射率測定法の校正を行った。

$$\text{反射率} = C_1 \times \text{正反射光強度} / \text{基準光強度} + C_2 \times \text{散乱反射光強度} / \text{基準光強度} \dots\dots (3)$$

(1) アルミ蒸着ミラーを測定し、反射率が0.97になるようにC<sub>1</sub>を決定する。このとき、当然ミラーは鏡面反射特性を示すから、(3)式の右辺第2項は0である。

(2) 次に、残りの6種類の放射率基準サンプルをすべて測定し、(3)式から直線回帰計算を用いてC<sub>2</sub>を決定する。

その結果、実測放射率と反射率から求めた放射率との誤差は、Table 2に示すように最大でも約±7%程度であり実用上十分な精度での放射率測定が可能であることを確認した。

上記校正に用いた放射率基準サンプルとは別に表面粗さと放射率の異なる冷延鋼板を18種類作成し、本温度計の放射率測定精度を評価した。表面粗さは、Raで0.90, 1.36, 1.44 μmの3水準である。この粗さは第2章で述べた酸化中の放射率変化を測定した鋼板と比較すると、Raが大きくなるため散乱反射成分が多くなり、反射率の測定精度が悪くなる可能性も考えられた。しかしFig. 9に示すように、両者の放射率の対応は良好であり、0.37~0.91の放射率範囲で測定精度は2σで±13%であった。黒体炉で校正した結果から、本温度計のTable 1に示した測温範囲における

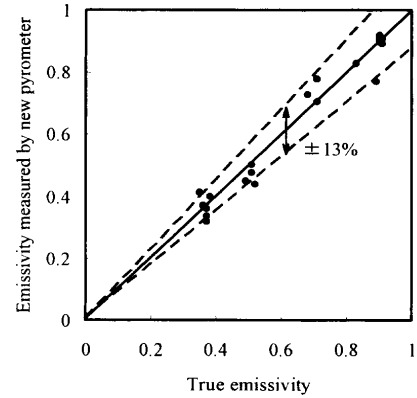


Fig. 9. Correlation between true emissivity and emissivity measured by a new pyrometer.

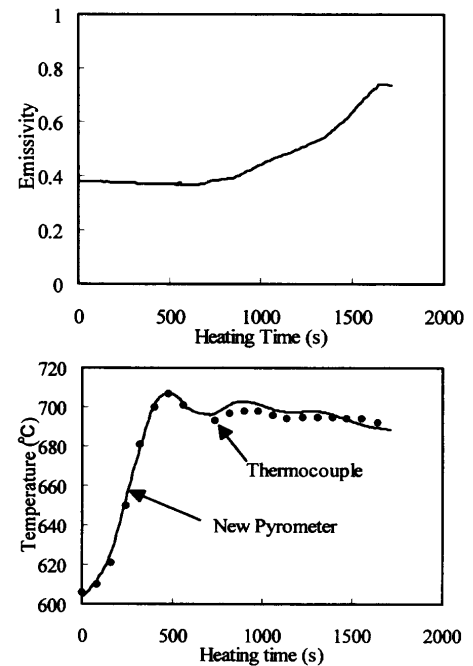


Fig. 10. Temperature and emissivity data during oxidation in laboratory experiment.

放射温度計の指数 $n^8)$ は、700°Cと900°Cで、それぞれ16と13になるため、測温精度は絶対温度に対して1%以下になる。

次に冷延鋼板を約700°Cまで加熱し、酸化によって放射率を増加させたときの本温度計の測温値と、冷延鋼板表面に溶着した熱電対の測温値とを比較したデータをFig.10に示す。放射率は約0.4から約0.74まで変化しているが、測温精度は±8°Cであり、前述した指数 $n$ からの推定がほぼ妥当であることが確認された。

開発した本温度計を連続焼鈍炉内の加熱帯出側に試験的に設置し、同じ位置に既に設置されている放射率を固定して設定する通常の放射温度計との測温値の比較をした。連続焼鈍炉は通常は不活性ガスで置換され操作しているが、このときは定期修理直前のため通常では起こり得ない温度低下と酸化状態を発生させた。冷延鋼板の温度は、耐熱性

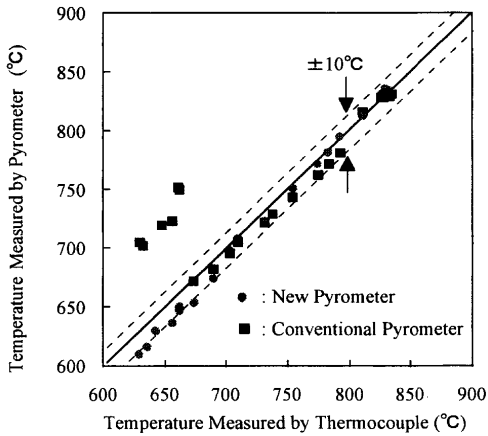


Fig. 11. Comparison of temperature accuracy between new pyrometer and conventional pyrometer.

の車輪を具備し走行中の高温の冷延鋼板でも安定した温度測定が可能な接触式温度計<sup>9)</sup>を利用して測定した。Fig.11にその結果を示す。本温度計は600°Cから850°Cの範囲で接触式温度計との対応はほぼ $\pm 10^\circ\text{C}$ であったが、放射率補正機能を持たない放射温度計は650°C近傍から低温の領域で100°C以上の誤差が生じている。これは冷延鋼板表面の酸化に伴って放射率が0.4から0.9に急激に上昇したため放射輝度が増加し、温度を高く測定したことが原因である。

## 6. まとめ

表面粗さが方向性を持たず、最大でRaが $1.44\ \mu\text{m}$ 冷延鋼板表面における反射光強度の角度分布を詳細に測定し、法線から35度までの角度範囲の反射光を検出することで近似的に半球反射率の測定が可能になり、オンラインで正確

な放射率が測定可能な方式を提案した。その方式をもとに放射率測定機能を持つ新しい放射温度計を試作した。実験室と生産ラインでの試験で測定精度を評価し、放射率は $\pm 13\%$ 、温度は $\pm 10^\circ\text{C}$ の精度があることを確認した。

本温度計は放射率補正機能を持たない放射温度計と比較して、測定対象に接近させる必要があるとともに、測定用の開口部面積が広いため設置環境上の制約はあるが、冷延鋼板を測定対象にする場合には、放射率を高精度に測定する手段として有効であることが、連続焼鈍炉内での測定実験結果から確認された。

この方法を未知の測定対象物体へ適用するためには、事前に代表的な表面粗さの水準を選んで反射光強度の角度分布を測定する必要がある。その結果、反射光強度が照射角度から35度まで積分値で半球反射率の85%に達しないような散乱性の強い物体の場合には本測定方法の適用をそのまま適用することはできない。

## 文 献

- 1) J.L.Gardner: *High Temp.-High Press.*, **12** (1980), 699.
- 2) F.Tanaka and H.Ohira: *Trans. Soc. Instrum. Control Eng.*, **25** (1989), 1031.
- 3) T.Yamamoto, K.Hiramoto, C.Uematsu and J.Ueda: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 779.
- 4) Y.Fukutaka, N.Nagahisa, T.Iwamura, I.Hishikari, T.Ide and T.Suzuki: *Kawasaki Steel Giho*, **24** (1992), 63.
- 5) C.Manabe, M.Akamatsu, T.Yanai, N.Suzuki, K.Terai and S.Fujimoto: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 326.
- 6) Y.Yamada, D.Yuasa, M.Uesugi, T.Yamada, T.Manabe, N.Inue and K.Yamauchi: *Proc. of 35th SICE Annu. Conf.*, (1996), 321.
- 7) *Theory and Practice of Radiation Thermometry*, ed. by D.P.Dewitt *et al.*, Wiley-Interscience, New York, (1988), 64.
- 8) 新編温度計測, 計測自動制御学会温度計測部会編, コロナ社, 東京, (1992), 199.
- 9) C.Uematsu, K.Hiramoto, Y.Adachi and Y.Uemura: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), T155.