

低温用放射温度計の開発

真鍋 知多佳*・赤松 勝*・柳井 敏志*・鈴木 紀生*・寺井 克浩*²・藤本 真平*²

Development of Radiation Thermometer for Low Temperature Range

Chitaka MANABE, Masaru AKAMATSU, Satoshi YANAI, Norio SUZUKI, Katsuhiro TERAJ and Shimpei FUJIMOTO

Synopsis: In order to measure the temperature of surface treated steel strips at a low temperature range by radiation thermometry, the following items were investigated;

- (1)Shielding method of stray radiation energy from environment.
- (2)Estimation method of emissivity of measured objects.

This stray radiation energy has been eliminated by a water cooled shielding flange. And, a new emissivity measuring system has been developed. The system uses a radiation source to irradiate the measured object surface. This radiation is reflected and scattered by the object surface. The system has three detectors, and these detect scattered radiation energy by different solid angles. Hemispherical reflectance of the object surface is calculated by these three detected radiation energies, and the emissivity of the object surface is estimated by means of Kirchhoff's law. The estimated emissivities are compared with values measured by a spectrometer. The results show the obvious relationship between measured values by this system and these by spectrometer.

Key words: measurement; sensor; temperature; radiation thermometer; emissivity; surface treatment.

1. 緒言

表面処理鋼板はその機能特性により広い分野で使用されているが、近年のニーズの高度化・多様化に伴い多種多様な表面処理鋼板が生産されるようになってきている。これらのうち、化成処理あるいは塗装などの工程を経るものは、その工程での処理速度が処理皮膜の特性に大きな影響を与えるため、正確な温度管理が要求される。

表面処理鋼板の特質上、処理皮膜に疵を付ける可能性のある接触式測温方式は適用し難く、非接触式測温方式が要請される。これには、放射測温が適しているが上記工程はおおよそ200°C以下と鉄鋼の生産ラインの中では低温で、放射測温には次のような問題点がある。

1)測定対象となる表面の温度と周囲の環境の温度の差が小さいため、測定対象面以外の面から放射される赤外線が放射温度計に入射した場合、大きな誤差の要因となる。すなわち、外乱の影響を受けやすい。

2)放射温度計による温度測定では、パラメータとして測定対象面の放射率が必要であり、その設定誤差が温度測定の誤差に大きく影響する。

これらに関し、1)については外乱放射を遮蔽する水冷シールドを用いる手法、2)については材料表面の反射強度の

角度分布から放射率を求める方法をそれぞれ試み、一定の成果を得られたのでここに報告する。

2. 測定方法の検討

2・1 外乱放射の除去

外乱放射は周囲からの熱放射が測定対象物の表面で反射して放射温度計に入るものである。

測定対象物の温度を T 、放射率を ϵ 、測定波長を λ とすると放射温度計の見かけ温度 T_s は次式で表される。

$$L(\lambda, T_s) = \epsilon \cdot L(\lambda, T) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $L(\lambda, T)$: 分光放射輝度

周囲の熱放射源の温度を T_a とすると(1)式に周囲からの放射の項が加わり(2)式となる。

$$L(\lambda, T_s) = \epsilon \cdot L(\lambda, T) + (1 - \epsilon) \cdot k \cdot L(\lambda, T_a) \dots\dots (2)$$

ただし、 k : 測定対象物表面の反射特性による補正係数

これより、測定対象物の放射率が低いほど、あるいは周囲物体の温度が高いほど影響の大きいことがわかる。

この外乱放射を除去するにはFig. 1に示すように放射温度計の前方に外乱放射を遮蔽するシールドを設ける手法が知

平成4年11月13日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 13, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993)

* (株)神戸製鋼所電子技術研究所 (Electronics Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-5-5 Takatsukadai Nishi-ku Kobe 651-22)

* 2 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

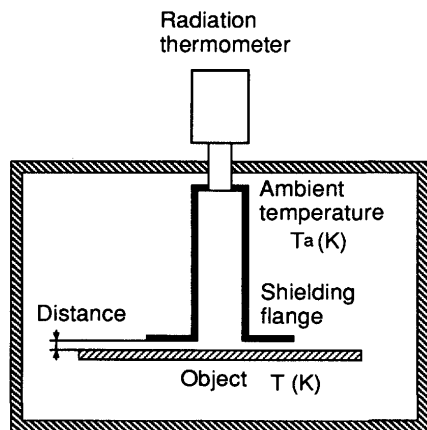


Fig. 1. Schematic diagram of temperature measurement using radiation thermometer with shielding flange.

られている²⁾³⁾。図からわかるように外乱放射はシールドによって大部分が遮られシールドと対象物体との隙間から入射するものだけに制限される。したがって、シールドが物体に接したときに遮蔽は完全になるが、実用上は十分な効果のある範囲で物体より離して使用される。また、当然のことながらシールドからの放射が外乱となるが、シールドを低温とすることで影響を無視できるようにしている。

しかし今回対象としたような低温域ではシールドの放射を無視できるほどの低温にすることは、結露あるいは凍結などの点から実用的ではなく、シールドの温度を一定に保ち、与える影響を一定にすること、および、シールドの温度を測定して影響を補正することが必要となる。

2・2 放射率測定方法

物体表面の放射率を求める手法は種々提案されており^{4)~8)}、小野⁹⁾の分類によれば「受動計測」と「能動計測」とに大別される。「受動計測」とは対象物からの放射情報のみを用いて、放射率の推定を行う方式であり、「能動計測」とは補助熱源あるいはミラーなどを用いて対象物からの放射情報を変化させて放射率の推定を行う方式である。本報告で提案する手法は対象物表面に光を入射させてその反射率から放射率を求めるもので上記の「能動計測」に属するものである。

さて、Kirchhoffの法則により放射率は反射率と関係づけられており、反射率が求まれば放射率は計算可能である。測定対象表面において透過光成分が存在しない場合、反射率(ρ)と放射率(ϵ)の和は1となる。

$$\rho + \epsilon = 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、反射率を知ることができれば、間接的に放射率は求まる。ここでの反射率とは半球反射率であり、反射率計算のためには半球反射エネルギーを測定することが必要となる。

反射率測定には従来Coblentz球¹⁰⁾、Gier-Dunkleキャビテ

ィ¹⁰⁾などの手法が用いられていたが、これらは測定対象物表面を半球面以上の立体角で覆う反射鏡あるいはキャビティを必要としていた。したがって、測定装置と測定対象物表面との間のリフトオフ量を確保することができず、非接触測定法という利点が生かせなくなる (Fig.2a)。しかし、反射エネルギーの角度分布特性が既知であれば、ある方向に反射されるエネルギーを測定することで半球反射エネルギーを計算することが可能である (Fig.2b)。

2・2・1 反射強度の角度分布特性

Fig. 3 は表面処理鋼板の反射強度の角度分布を Fig. 4 に示す角度分布測定装置で測定した結果である。横軸は鏡面反射方向を0とした角度であり、縦軸は鏡面反射方向の反射強度を基準にして正規化したものである。

Fig. 3 から、角度分布曲線は鋭いピークを形成する成分となだらかに変化するベースラインを形成する成分から構成されていることがわかる。これは従来からいわれている鏡面反射成分 (鋭いピーク) と拡散反射成分 (ベースライン) に対応すると考えられる。また、新井ら¹¹⁾によれば拡散反射成分の強度分布は鏡面反射方向からの角度 θ を用いて $\cos^n \theta$ で

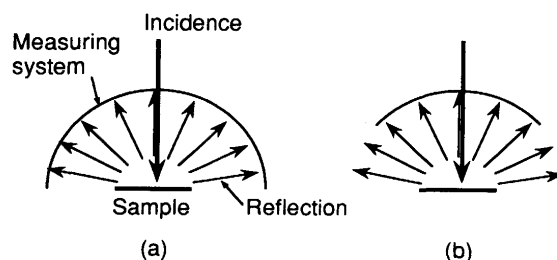


Fig. 2. Measuring method of hemispherical reflection.

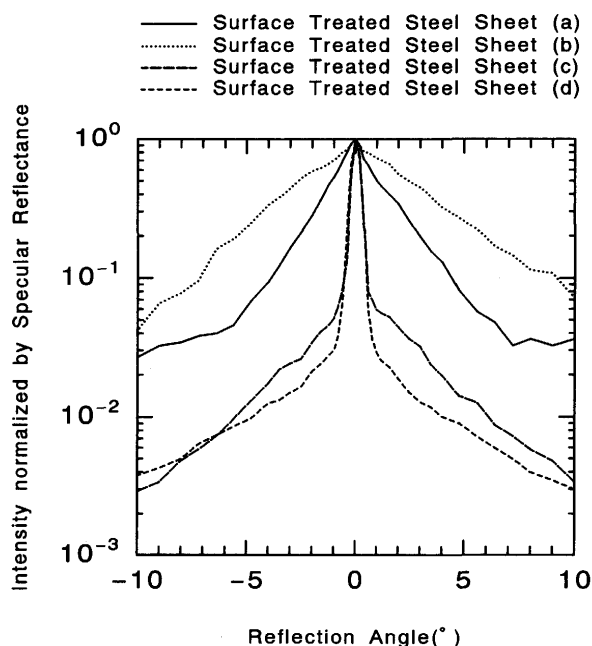


Fig. 3. Angular distributions of reflection (Wavelength: 7.5 μ m~8.5 μ m).

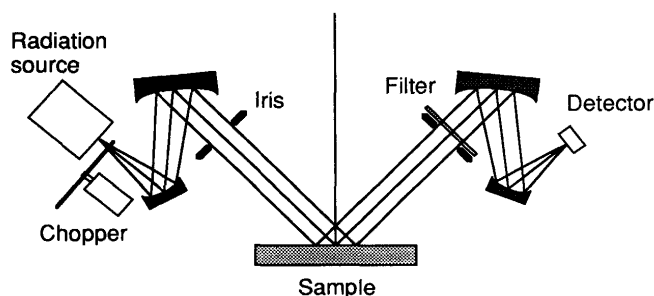


Fig. 4. Schematic diagram of measuring system of angular distribution of reflection.

近似できるとされている。 n は測定対象表面に固有の値である。

これらより、本報告では、以下の仮定を導入することで半球反射エネルギーを推定することとした。

1) 半球反射エネルギーは鏡面反射成分と拡散反射成分からなる。

2) 鏡面反射成分は鏡面反射方向近傍の狭い角度範囲に存在する。

3) 拡散反射成分は半球方向に拡散的に反射されるが、その反射強度の角度分布は鏡面反射方向を基準とした角度を θ として $\cos^n \theta$ で表される。

3. 実験方法

3・1 外乱放射の除去

外乱遮蔽シールドとしては、冷却と温度を一定にする観点から水冷構造(以下水冷シールドと称する)とした。その構造をFig. 5に示す。水冷シールド先端のフランジ部内に、同図右側に示すように、外周部より渦巻状に内周部へ冷却水が流れるように導流板を設けた。これは今回のような低温域では水冷シールドと測定対象物の温度差が小さく、水冷シールド自体の放射が外乱として加わるため、水冷シールドの温度分布、温度変動を小さく抑える必要があるからである。またフランジ部は黒体塗料で黒化している(放射率 $\varepsilon=0.93$)。水冷シールドの温度は結露を考慮して20℃に設定した。使用した放射温度計の仕様をTable 1に示す。

水冷シールドの評価は、当社EGLの化成処理工程のオープン出側で行った(Fig. 6参照)。材温の比較参照用には接触式温度計(コロ付きリボン式のK型熱電対)を用いた。

3・2 放射率測定手法

3・2・1 放射温度計構造

前節の考え方に基づいた試作機の概略をFig. 7に示す。試作機は測定対象物表面に赤外線を照射するための参照熱源と、測定対象物表面からの反射エネルギーを測定するための3個の異なった大きさの反射鏡とそれに対応する検出素子を備えている。参照熱源には、約900℃に通電加熱したシリコニット光源を用いる。反射エネルギー集光に用いる反

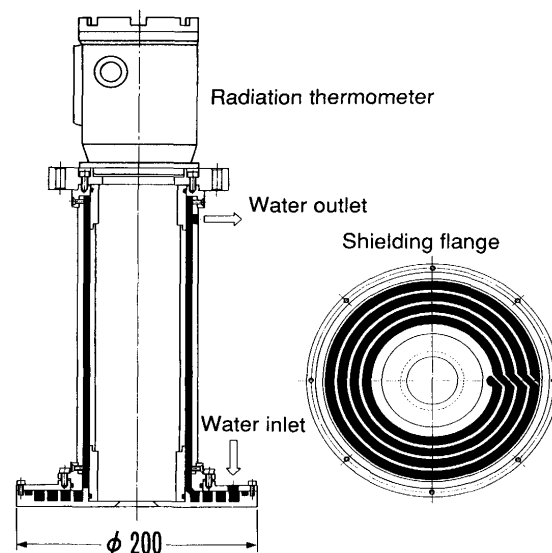


Fig. 5. Radiation thermometer with water cooled shielding flange.

Table 1. Specification of radiation thermometer.

Detector	Thermopile
Wavelength range	7.5~8.5 μ m
Temperature range	0~300℃
Accuracy	$\pm 0.75\%$
Response time	150ms~10sec (95%)
Output signal	4~20mA
Distance coefficient	10

Radiation thermometer Displacement (adjustable 5~100mm)

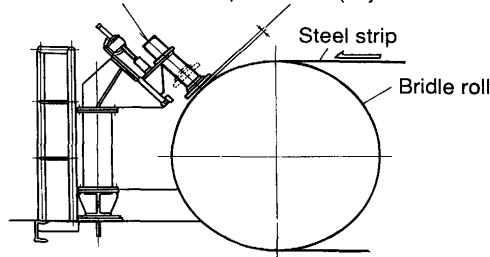


Fig. 6. On-line test system in a coated steel strip process.

射鏡は楕円面鏡であり、ひとつの焦点が測定対象物表面上に、もうひとつの焦点が検出素子の受光部に位置するように配置する。検出素子には焦電素子を用いる。測定モードは反射光測定モードと放射光測定モードの2種類を設定した。

反射光測定モードでは、シリコニット光源前に1mm径のピンホールを配置した光源を用いて反射光測定を行う。光源から放射される赤外線は7.5 μ mから8.5 μ mのバンドパスフィルタを経て、軸外し放物面鏡で平行光となり、ビームスプリッターで反射し、測定対象物表面に対して垂直に入射する。測定対象物表面上での照射径は20mmである。反射光は反射鏡1, 2, 3および検出素子1, 2, 3により検出する。光源前にチョップをおき断続光として入射させ、反射光検出の際に同期検波を行うことで反射光成分のみを検

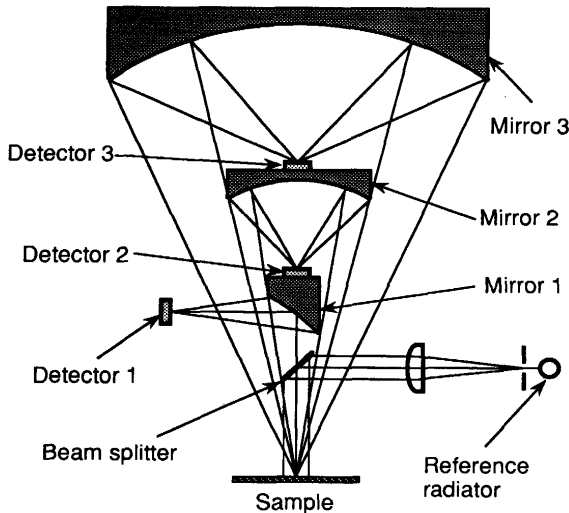


Fig. 7. Schematic diagram of measuring system.

出する。検出素子1は鏡面反射方向(測定対象物表面の鉛直方向)に対して 0° から 4° の方向に反射されるエネルギーを測定し、検出素子2はその外側の 4° から 10° の方向に反射されるエネルギーを、検出素子3はさらにその外側の 10° から 20° の方向に反射されるエネルギーを測定する。各検出素子で検出されたエネルギーの出力は解析装置であるパーソナルコンピュータに入力され放射率推定に用いる。

放射光測定モードでは光源前に配置したシャッタを閉じ、光源から測定対象試料面に放射される赤外線を遮断し、検出素子1の前に置いたチョップを回転させることにより、検出素子1で測定対象物表面からの放射光成分のみを検出する。

3.2.2 測定データの解析方法

各検出素子からの出力から放射率を計算する方法をFig. 8を用いて示す。Fig. 8は反射強度の角度分布曲線の模式図であり、Fig. 3に対応する。2.2.1項の仮定により、検出素子1の出力には鏡面反射成分の全エネルギーと拡散反射成分の一部が含まれており、この値は全ての鏡面反射成分を含んでいると考え、検出素子1の方向に反射された反射エネ

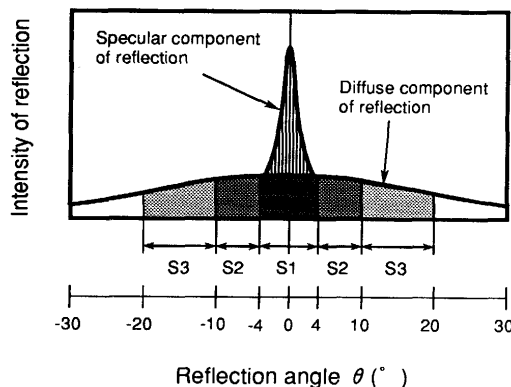


Fig. 8. Model of angular distribution of reflection.

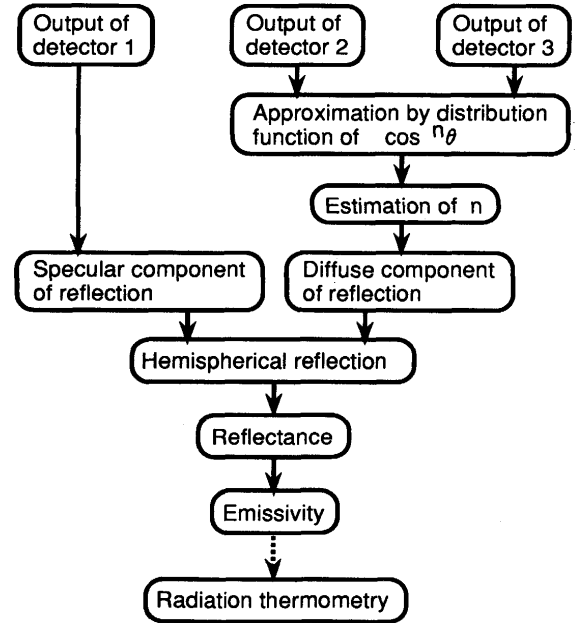


Fig. 9. Flow of estimation of emissivity.

ルギーとしてそのまま用いる。検出素子2, 3の出力には鏡面反射成分は含まれておらず、拡散反射成分のみであると考え。検出素子2, 3の出力をもとにして拡散反射成分の角度分布曲線の n の値を定め、反射鏡3の外側に反射された拡散反射成分の量を推定する。半球反射エネルギーは鏡面反射成分と拡散反射成分の和として計算し、反射率から放射率を求める。以上の処理手順をまとめてフローチャートとしたものがFig. 9である。

4. 結果と考察

4.1 外乱放射の除去

放射温度計の指示と接触式温度計の指示とを対比させたものをFig. 10に示す。板温を変化させるため、板速を15m/minから55m/minまで変化させている(低速で板温高)。図に示す放射温度計の指示はオフラインで得られた放射率を用いて、水冷シールドからの放射の影響の補正を施した値である。図からわかるように測温値は $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内で対応しており、オフラインでの放射率測定値とオンラインでの値は、ほぼ一致していると考えられる。またリフトオフ量を5~100mmの範囲で変化させたが温度指示の変化は認められず、水冷シールドの放射の補正のみで上記の一致が見られることより水冷シールド以外からの外部からの放射は入射していないものと推定される。温度指示のずれには一定の傾向が認められるが、これは板速の変化にともなう処理膜厚の変化に起因するものと推定されるが、材種(H)(放射率 $\epsilon \approx 0.4$)については抜き取りサンプルの放射率に、速度による傾向が認められたが材種(L)(放射率 $\epsilon = 0.1$)については、抜き取りサンプル間に明瞭な差は認められなかった。

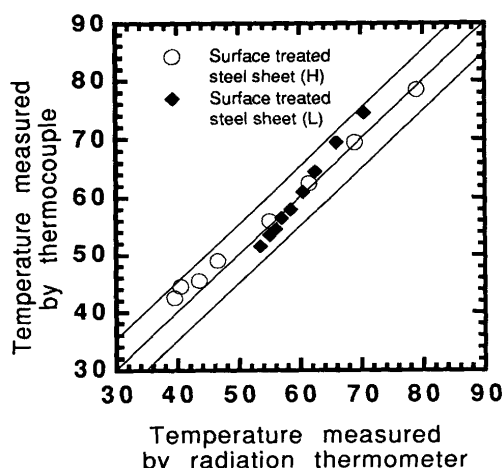


Fig. 10. Relation between the temperature measured by radiation thermometer with shielding flange and that measured by thermocouple.

なお、接触式温度計の指示には対象材との摩擦による摩擦熱の影響および接触による材温度の低下が考えられるが、前者に関しては別途行った実験では最高の板速でも3℃程度と考えられ、また、後者に関しては熱電対を通して生じる単位時間あたりの流出熱量と、単位時間あたり通過する処理皮膜がもっている熱容量とが、材料の搬送を考慮して検討するとはほぼ同等であり、鋼板の熱容量が皮膜の熱容量よりはるかに大きいことを考慮すると無視してもよいと推測される。

以上より十分な遮蔽効果があるものと判断される。

4・2 放射率測定

数種類の表面処理鋼板と低放射率の材料として加えたアルミニウム板を対象とした放射率測定を、試作機を用いてオフラインで行った。放射率の推定結果は分光光度計による測定結果と比較し、推定放射率により温度をどの程度の精度で測定できるかを評価した。

Fig.11には、放射测温において放射率設定値の誤差が放射温度計出力値に与える影響を計算で推定した結果を示した。横軸は測定対象物表面の真の放射率に対する設定放射率の比の値、縦軸は測定対象物表面の温度が150℃である場合の放射温度計出力値を示した。この計算結果より、測定対象物表面の真の温度が150℃である場合、測定温度の誤差を±10℃に抑えるためには、放射率の推定値を真値に対し0.90倍から1.12倍の範囲に抑えなければならないことがわかる。

前項の温度範囲と異なる150℃という値で議論しているが、これは、前項が外乱放射の除去の観点から極力外乱の大きい条件下で評価するため、EGLのオープン出側という低温部を選定したことによる。操業上の検討からは、150℃がひとつの目標値となる。

4・3 放射率測定結果

試作機を用いて、種々の試料を測定した結果を以下に示

す。

Table 2は試作機による出力値の一例である。結果は検出素子1, 2, 3で測定されたエネルギーに対応した電流の値として示してある。表中のS1, S2, S3がそれぞれに対応している。出力値にはそれぞれの試料面の特徴が表れている。本報告ではシリコンウエハ上に金を蒸着した表面を基準鏡面と考えており、出力値からも、S1の出力が極端に大きく表れている。これに対して例えば表面処理鋼板(a)についてはS1, S2, S3はほぼ同様の出力値を示しており、拡散性の強い試料面であることがわかる。

Fig.12は実際に放射率の推定を行った結果を示したものである。横軸はフーリエ変換赤外分光器(日本電子(株)製JIR-5500)による測定結果である。縦軸は試作機による推定結果である。放射率の大きい領域(0.2以上)の測定結果はよく一致するが、放射率の小さい領域(0.2未満)の測定結果は必ずしも一致しない試料が存在する。放射率の推定を反射率測定から行っているため、反射率の測定誤差が直接放射率推定値に影響していると考えられる。特にアルミニウム板については精度はよくない。その原因は一例として以下のよ

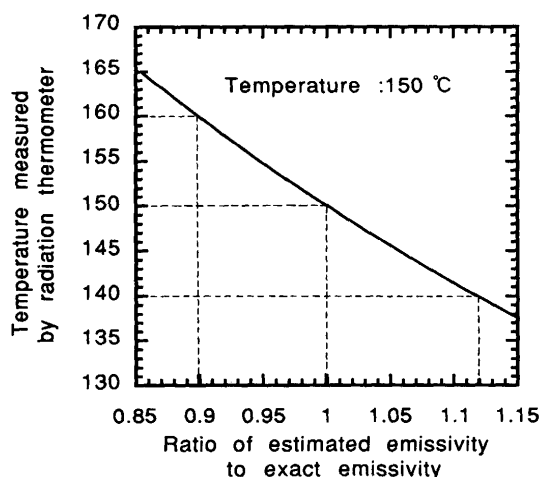


Fig. 11. Deviation of radiation thermometer indication due to emissivity estimating error.

Table 2. Output of detectors.

	Output of detectors (mA)		
	S1	S2	S3
Gold	2.63	0.37	0.22
Surface treated steel sheet (a-1)	0.58	0.29	0.46
(a-2)	0.45	0.36	0.63
(a-3)	0.64	0.37	0.66
(a-4)	0.94	0.42	0.73
(b-1)	0.77	0.41	0.85
(b-2)	0.99	0.44	0.77
(c)	0.37	0.12	0.25
(d)	1.44	0.32	0.39
Aluminum (1)	2.11	0.45	0.39
(2)	2.19	0.44	0.29
(3)	2.24	0.37	0.30
(4)	2.24	0.37	0.31

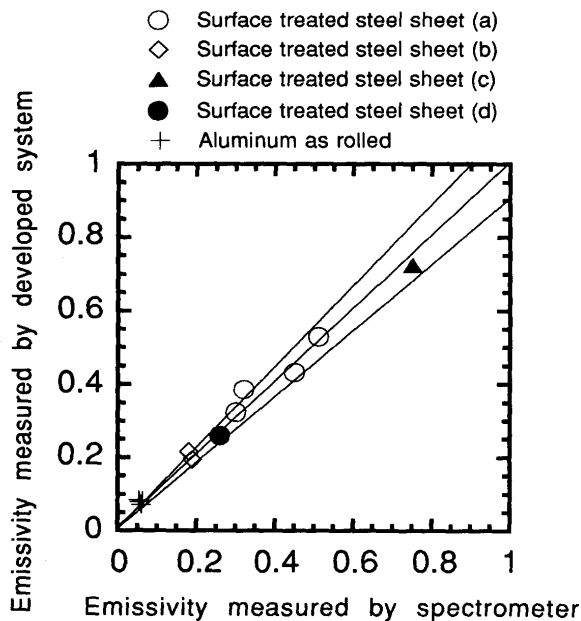


Fig. 12. Relation between the emissivity measured by spectrometer and that measured by developed system.

うなものであると考えられる。放射率の小さい試料は、すなわち反射率の大きい試料であり、ほとんどの場合は鏡面反射性の強い試料である。鏡面反射性の強い試料の場合、反射される立体角が小さいため、その方向に検出できない方向が存在する場合、例えば、光学部品のアライメントにずれがあり反射鏡1と2の間に隙間が存在する場合、検出できない反射光が存在することとなる。実際に、ビームスプリッタおよび反射鏡の支持金具は、光路内に存在しており、このようなことを生じる可能性はある。その結果推定放射率は実際より大きく見積もられると考えられる。この問題については、光学系のシミュレーションからも一部光路の欠如があることは予測されており、今後詳細な解析を進めていく過程で明らかにできるものと考えている。

Fig.12には測定結果とともにFig.11で述べた $150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$

の測定精度を満足する放射率の許容誤差の範囲を2本の直線で示した。多くの表面処理鋼板は、必要とされる許容誤差範囲内で測定されていると考えられ、種類はことなるものの同一のモデルが適用できることを示しており、他の分野への応用が可能であることを示唆しているものと思われる。

5. 結言

低温域での放射測温において問題となる外乱放射の影響を水冷シールドの使用により除去できることを示した。また同様に誤差の要因となる放射率の変動についても、測定対象物表面に垂直に光を照射し、その表面で反射散乱する光の強度を異なる三種の角度成分について測定し、放射率を求める手法を開発した。オフラインテストの結果、開発した手法で求めた放射率と従来の分光器による測定結果とはよい一致が認められた。

今後は二つの手法を組み合わせ、オンラインテストを行うと共に、他の適用分野を探索してゆく。

文 献

- 1) 須田 新, 萩野陸雄, 田中成夫: 鉄と鋼, **77** (1991), p.1042
- 2) 井内 徹, 大野二郎, 草鹿覆一郎: 鉄と鋼, **61** (1975), p.2076
- 3) 井内 徹, 田中富三男: 計測自動制御学会論文集, **19** (1983), p.557
- 4) 菱刈 功, 鈴木利房, 井手敏彦: 第21回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1982), p.385
- 5) 菱刈 功, 井手敏彦, 本杉賢司, 福高善己: 第26回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1985), p.649
- 6) 牧野俊郎, 小坂 武, 有馬二郎, 青山 聡, 辻村裕次: 計測自動制御学会論文集, **24** (1988), p.331
- 7) 山田範秀, 長井慶郎, 藤村貞夫: 計測自動制御学会論文集, **24** (1988), p.1029
- 8) F. Tanaka and D. P. DeWitt: 計測自動制御学会論文集, **25** (1988), p.1031
- 9) 小野 晃: (社)計測自動制御学会第77回温度計測部会資料, (1989), p.1
- 10) 温度計測 第2版 (温度計測部会編), (1982), p.234 [(社)計測自動制御学会]
- 11) 新井照男, 小野 晃: 第22回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1983), p.193