

# 冷間、熱間圧延中における金属の非接触温度計測法の研究

東洋大学工学部機械工学科

教授 井内 徹

研究開発助成 AF-97014

## 1. 研究の目的と背景

冷延鋼板、熱延鋼板、ステンレス鋼板など各種鋼板やアルミニウムなど非鉄金属板の圧延中における温度計測とその制御は、対象金属材質の均質化と向上、最終形状（目標厚みとその均一化）の設定、圧延プロセスの安定操業のために重要な技術である。

圧延プロセスにおける対象金属は一般に高速走行するために、非接触温度計測法としての放射測温法が有力な技術である。放射測温法は、高速応答、局所における一点測定から線、面測定まで可能であり、また温度分布（パターン）測定も可能であるから、幅広い活用が期待されている<sup>1)</sup>。しかし、測定対象物の放射率を知らないと、正確な温度測定ができない宿命的な問題点を抱えている。冷間および熱間圧延中の金属は、加熱・冷却にしたがって、その表面の酸化膜の生成・剝離を伴い、また表面形状変化のため、金属表面の放射率が大幅に変化する環境にあり、真温度計測は極めて困難な状況にある。

本研究は、導電体としての金属、ならびに誘電体としての酸化膜と光との相互作用を考察し、放射率の方向特性、偏光特性および分光特性に着目して、放射率の変化に関らず、温度と放射率を同時測定する放射測温法を開発することを目的としている。<sup>2~4)</sup>

## 2. 測定原理

### 2.1 角度特性を利用した手法

Maxwellの電磁波方程式から得られるFresnelの反射率公式は、理想的に滑らかで光学的に均質な表面に光が入射した場合の反射の様子を示す式であり、表面の光学定数 $n$ と $\kappa$ 、入射角 $\theta$ の

関数となっている。これから、角度ごとに放射率を求め、放射率の角度依存性について求めると、次の諸式のようになる。<sup>5)</sup>

$$\epsilon(\theta) = \frac{1}{2} \cdot [\epsilon_p(\theta) + \epsilon_s(\theta)] \quad (1)$$

$$\epsilon_p(\theta) = \epsilon_s(\theta) \cdot \frac{a^2 + b^2 + \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta (a^2 + b^2 + 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta)} \quad (2)$$

$$\epsilon_s(\theta) = \frac{4a \cos \theta}{a^2 + b^2 + 2a \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (3)$$

$$2a^2 = \sqrt{(n^2 - \kappa^2 \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 \kappa^2} + (n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta) \quad (4)$$

$$2b^2 = \sqrt{(n^2 - \kappa^2 \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 \kappa^2} - (n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta) \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon_p(\theta)$ は入射面に平行な、 $\epsilon_s(\theta)$ は垂直な方向の振動を持つ偏光放射率であり、 $n$ と $\kappa$ は表面のそれぞれ複素屈折率 $\tilde{n}$ の実数部分と虚数部分である( $\tilde{n}=n-i\kappa$ )。

$\kappa=0$ 、つまり誘電体では、放射率は角度によらずほぼ一定であり、 $\theta=90^\circ$ に近づくと0に向かって急激に減少する。一方、 $\kappa$ の値が大きい場合、つまり電氣的な良導体では、 $\theta=80^\circ$ 付近の角度で最大値を取り、その後0に落ちて行く(図1(a))。これをより定性的に見るため、それぞれの角度の放射率を法線方向の放射率 $\epsilon_n$ で規格化した値 $R_\theta = \epsilon(\theta)/\epsilon_n$ を図1(b)に示した。一般的に、鋼板など実用の金属材料は良導体の特性を示すが、酸化した後は誘電体的な性質を示すことが明らかである。

ここで、それぞれ角度 $\theta_1, \theta_2$ での分光放射輝度は、

$$L_{\theta_1} = \epsilon(\theta_1) L_{\lambda, b}(T) \quad (6)$$

$$L_{\theta_2} = \epsilon(\theta_2) L_{\lambda, b}(T) \quad (7)$$

となる。ここで、 $L_{\lambda, b}(T)$ は波長 $\lambda$ 、温度 $T$ における黒体分光放射

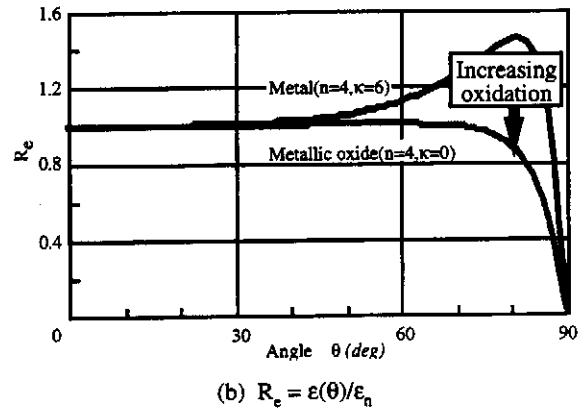
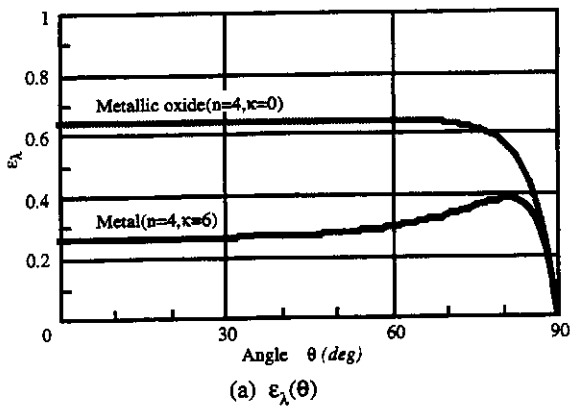


図1 放射率の角度特性

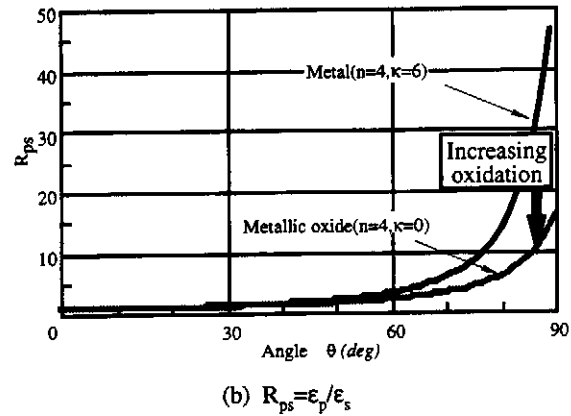
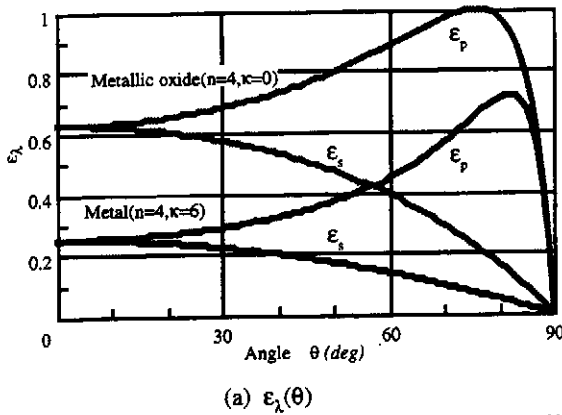


図2 放射率の偏光特性

輝度を表している。この2つの式の比を取ると、つまり2つの方向からの放射輝度の比  $R_e$  を取ると、これは(8)式に示すように放射率の比となる。

$$R_e = L_{e2} / L_{e1} = \epsilon(\theta_2) / \epsilon(\theta_1) \quad (8)$$

また通常、金属表面の酸化が進むにつれ、分光放射率  $\epsilon_\lambda$  の値は一般に増加する。

以上の金属酸化理論から、放射率の角度比  $R_e$  と分光放射率  $\epsilon_\lambda$  の間に何らかの一意的な関係があると予想される。予備実験をして、あらかじめこの関係を求めておくことにより、2つの角度での放射計の出力の比角度特性  $R_e$  を測定するだけで、分光放射率を補正することができる。分光放射率  $\epsilon_\lambda$  が求まれば、ウィーン法則より物体の真温度を知ることができる。

### 2.2 偏光特性を利用した手法

光学的に滑らかで均質な金属表面に関して、p成分、s成分の放射率である  $\epsilon_p, \epsilon_s$  は、試料表面の法線からの角度によりそれぞれ異なった性質を示し、これはFresnelの公式より、(2),(3)式に示される。この式で表される特性は図2(a)の様に、 $\epsilon_p$  が角度の増加に対して大きく変化するのに対して、 $\epsilon_s$  は単調減少するものである。これは、角度特性と同様に物質表面の光学定数によって変化する。そのため、偏光放射率比  $R_{ps} = \epsilon_p/\epsilon_s$  は金属酸化の表面状態に強く影響を受け、誘電体の場合 ( $\kappa=0$ ) と金属の場合 ( $\kappa>0$ ) では角度

$\theta$  が  $60^\circ$  以上で大きく異なる (図2(b))。そのため、2.1の方法と同様に分光放射率  $\epsilon_\lambda$  と  $R_{ps}$  の間に何らかの一意的な相関関係があると予想される。つまりこの方法も、1度  $\epsilon_\lambda$  と  $R_{ps}$  の関係を求めておけば、2つの偏光放射率の比  $R_{ps}$  の測定によって、分光放射率、真温度を求めることができる。

### 3. 実験

本手法の理論を実証し、実用化に際して最適な条件を探するために、以下のような実験を行った。

#### 3.1 角度特性を利用した手法

図3に実験装置の構成図を示す。放射率の角度特性を検出するために、試料に対して法線方向に1台と、法線から角度  $\theta=80^\circ$  傾けた方向に1台、それぞれ  $1.5\mu\text{m}$  を検出波長とする InGaAs センサ放射計を設置した。この2つの放射計の出力、つまりそれぞれの角度での分光放射輝度  $L_{e1}, L_{e2}$  の比を取ると、(8)式のように放射率の比となる。また、真温度を求めるために、表面にK型熱電対を溶接した。試料としては、酸化すると放射率が変化しやすい冷延鋼板を用い、温度  $723\text{K}$  付近で測定を行った。

図4に法線方向と  $80^\circ$  方向のそれぞれの分光放射率  $\epsilon_\lambda$ 、および放射率の角度比  $R_e$  の加熱時間による変化を示した。この図で加熱し始めたばかりのところでは、法線方向よりも  $80^\circ$  方向の分光

放射率が高く金属的な角度特性を持っているが、酸化が進み試料表面が酸化膜で覆われるに従い、法線方向の分光放射率の方が大きくなり、誘電体的な性質を示すようになる。そのため比 $R_0$ は、酸化の進行に伴い減少している。

図5に $R_0$ と法線方向の分光放射率 $\epsilon_\lambda$ の関係を示した。この補正図で、加熱して酸化が進行するに従い、 $\epsilon_\lambda$ は上昇し、 $R_0$ の値は減少するため、図の右下から左上の方向に向かう結果となった。これは、理論で予想されるものと同じ結果となっており、2つの放射計の出力から得られる $R_0$ が測定できれば、その時の分光放射率を補正できることが実証された。また、図の左上では酸化膜の成長による放射率の干渉現象が現れている。しかし、この様な範囲では放射率自身の値が大きいため、温度誤差はさほど大きくならない。

次に、有効な角度を調査するために角度特性が最も顕著だと思われる $80^\circ$ 以外に、 $60^\circ$ 、 $30^\circ$ で測定した補正図を図6に示す。この結果、 $80^\circ$ の傾きが最もゆるいため、酸化の進行と細かく対応しており、最も正確に補正できる。また、 $60^\circ$ でもある程度の傾きがあるため、補正はできるが、 $30^\circ$ では $R_0$ はあまり変動せず、 $R_0$ の値から分光放射率 $\epsilon_\lambda$ を補正することができない結果となった。この様に、角度が大きい方が補正しやすいという図2(b)の理論が実験的に確かめられた。よって、この手法では1つの放射計を $60^\circ \sim 80^\circ$ に設置することが有効であることが分かった。

また、放射率の干渉現象の影響を最小限にするためには、適切な波長を選択する必要がある。このため、 $1.5\mu\text{m}$ の放射計以外に、 $3.4\mu\text{m}$ のバンドパスフィルタを介した $\text{LiTaO}_3$ をセンサとする放射計により、角度特性を検出する実験を行った。それぞれの波長で放射率の補正曲線を示したものが図7である。(a)は $1.5\mu\text{m}$ で $R_0$ を検出し $1.5\mu\text{m}$ 、 $3.4\mu\text{m}$ のそれぞれの分光放射率

$\epsilon_\lambda$ を補正したもの、(b)は $3.4\mu\text{m}$ での $R_0$ から $1.5\mu\text{m}$ 、 $3.4\mu\text{m}$ の分光放射率 $\epsilon_\lambda$ を補正したものである。(a)の様に $1.5\mu\text{m}$ で $R_0$ を検出すると、 $R_0$ の値が干渉現象の影響を受けて1つの $R_0$ に対して2つ以上の $\epsilon_\lambda$ が得られる結果となる。一方、(b)の $3.4\mu\text{m}$ で $R_0$ を検出した場合は、放射率の干渉現象の影響が少なく理想的な補正図が得られている。この結果から角度特性 $R_0$ の検出は、放射率の干渉現象を避けるために、できるだけ長波長側を選ぶ方がよいことが分かった。

また、2つの異なる波長で同時に放射輝度を検出し、その比を取って温度を求めようとする2色比放射温度計もまた、酸化による表面状態の変動によって分光放射率比 $\epsilon_R = \epsilon_{\lambda_1} / \epsilon_{\lambda_2}$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ )が変化し温度誤差を生じる。本手法は単色放射温度計の分光放射率だけでなく、この2色比放射温度計の分光放射率比の変動も補正することができる。そこで法線から $20^\circ$ の所に $1.5\mu\text{m}$ と $3.4\mu\text{m}$ の2台の放射計を設置して2色比放射計を構成し、また $80^\circ$ に $3.4\mu\text{m}$ の放射計を置いて角度特性を求め、分光放射率比 $\epsilon_R$ と角度特性 $R_0$ の関係を求める実験を行った。

図8にこの2色比放射温度計の分光放射率比補正図を示した。ここで、分光放射率比 $\epsilon_R$ の値は酸化の進行に従って一度上昇し、ピークを迎えてから下降する軌跡を取った。この現象は波長によって、酸化による放射率変動の速さが異なっていることが原因で現れると考えられる。すなわち、 $\epsilon_R$ の分子にある短波長側の放射率が早く変化し一定の値を取るのに対して、分母の長波長側の放射率がゆっくりと、変化するために生じる。しかし、 $\epsilon_R$ がどの様に変動しようと、 $R_0$ に対してその時の $\epsilon_R$ が1つだけ求められているため、本手法が2色比放射温度計の分光放射率比補正にも適用されることが示された。

さらに、これらの結果より、今回の実験の中で最も精度良く補

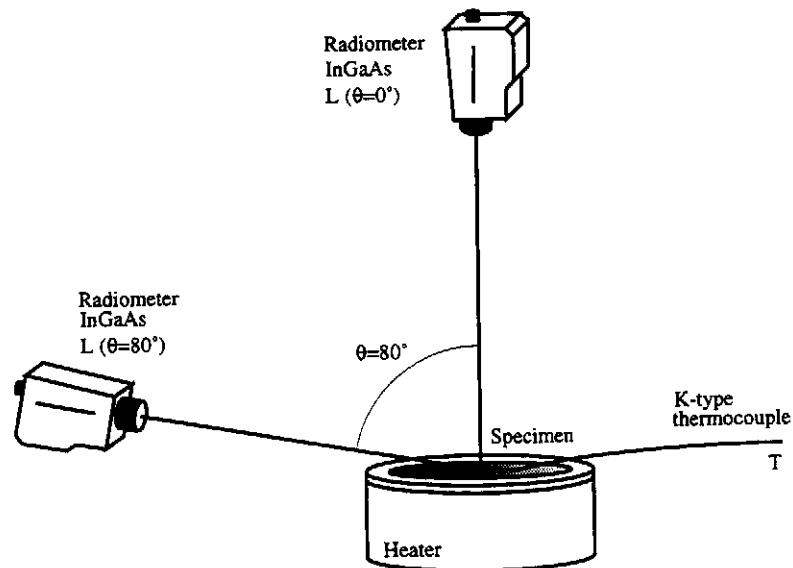


図3 実験構成図 (角度の手法)

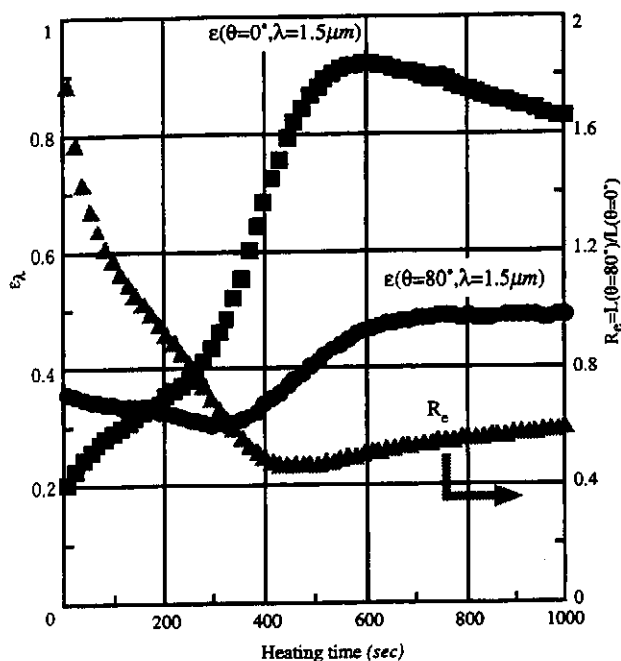


図4 酸化の進行による  $\epsilon(\theta_1), \epsilon(\theta_2), R_e$  の変化

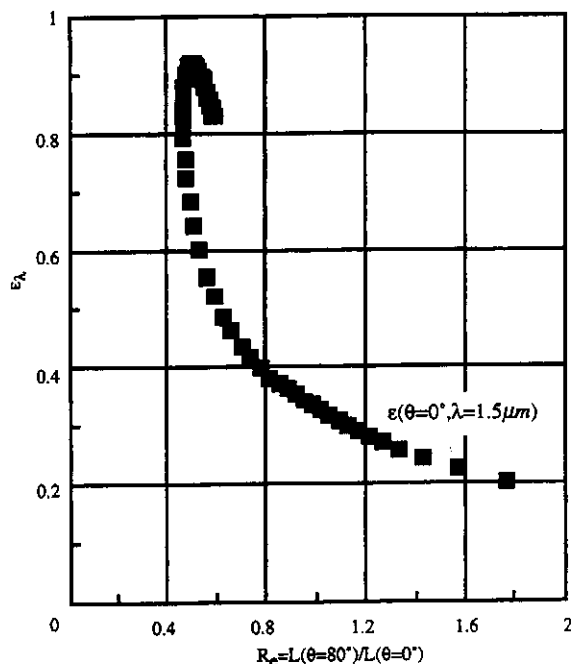


図5  $R_e$  と  $\epsilon_\lambda$  の関係

正できると考えられる条件( $\theta=80^\circ$ , 角度特性は $3.4\mu\text{m}$ で検出する)で, 再現性を見る実験を行い分光放射率のばらつきから測温誤差を計算した結果を Table 1 に示した. この時, 試料は冷延鋼板ダル仕上げとブライト仕上げの2種類で, 単色放射温度計, 2色比放射温度計の両方で誤差を計算した. この結果で, ダル仕上げに注目してみると, 分光放射率が大きく変動しているにも関わらず, 相対的な放射率誤差, 及び相対的な温度誤差は $1.5\mu\text{m}$ ではそれぞれ6.5%, 0.5%で,  $3.4\mu\text{m}$ ではそれぞれ9.3%, 1.6%となっている. これから分かるように, 補正する対象の放射計は短波長側の $1.5\mu\text{m}$ が最も良い精度で測定できる結果になっている. 一方, 2色比温度計でも温度誤差では0.8%と大変少なく, 本手法が酸化の進行によって温度誤差を生じる場合に, 精度良く放射率を補

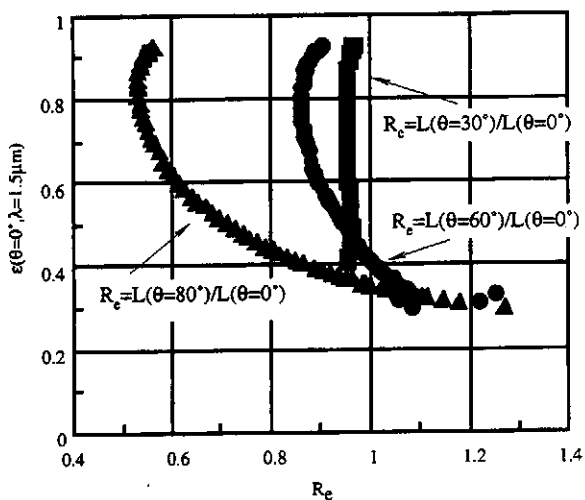
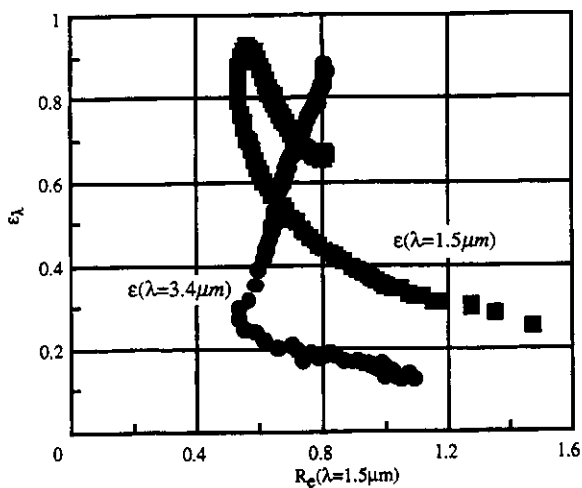
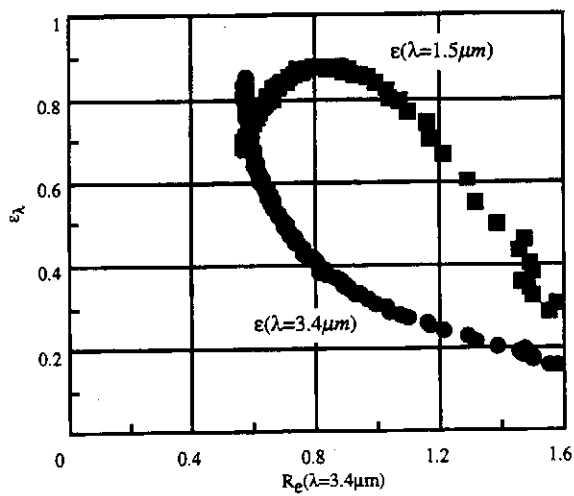


図6 測定角度の影響 (角度の手法)



(a)



(b)

図7 測定波長の影響 (角度の手法)

正できると言える。

### 3.2 偏光特性を利用した手法

図9に偏光放射率比 $R_{ps}$ と分光放射率 $\epsilon_\lambda$ の関係を求めるための実験装置の構成図を示す。加熱された試料から出る電磁波の内、 $\theta=80^\circ$ 方向の放射を偏光ビームスプリッタを通し、p成分、s成分に分けて、それぞれ1.5 $\mu\text{m}$ に検出感度を持つInGaAs素子の放射計に入射させた。さらに、試料の法線方向に補正する対象の放射計を設置した。また、試料は酸化しやすい冷延鋼板ダル仕上げを用い、723K付近で加熱した。この時の真温度は試料表面にK型熱電対を溶接して計測した。この80°方向の2台の放射計からの出力、すなわちp偏光、s偏光の分光放射輝度 $L_p$ 、 $L_s$ の比をとると、偏光放射率の比 $R_{ps}$ が得られる。

$$R_{ps} = \frac{\epsilon_p(\theta) L_{\lambda,p}(T)}{\epsilon_s(\theta) L_{\lambda,s}(T)} = \frac{\epsilon_p(\theta)}{\epsilon_s(\theta)} \quad (9)$$

図10に法線方向の放射率、80°方向のp偏光放射率 $\epsilon_p$ とs偏光放射率 $\epsilon_s$ 、及びその比である $R_{ps}$ の加熱時間による変化を示した。

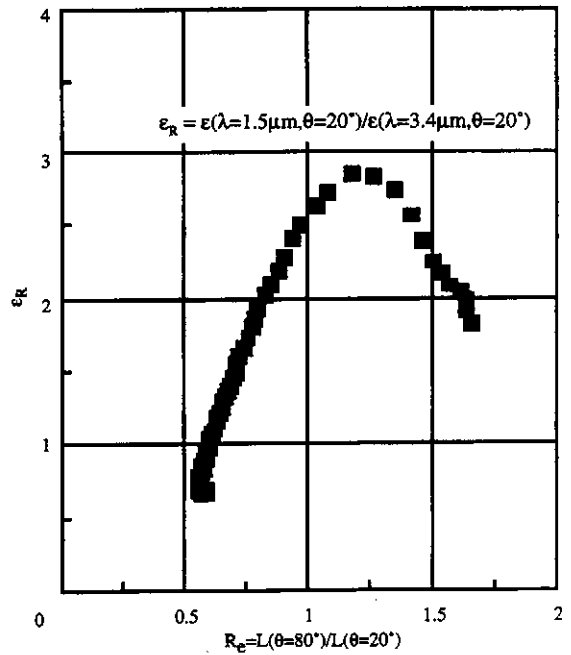


図8  $R_{ps}$ と $\epsilon_R$ の関係

表1 冷延鋼板ダル、ブライト仕上げの計測誤差

$\epsilon_\lambda$ -compensated pyrometer	Wavelength $\lambda(\mu\text{m})$	Specimen type	Emissivity $\epsilon_\lambda$	Emissivity error $\left  \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \right _{\text{max}}$	Temperature error $\left  \frac{\Delta T}{T} \right _{\text{max}}$
	1.5	dull	0.28 ~ 0.86	6.5%	0.5%
		bright	0.25 ~ 0.94	10.1%	0.8%
3.4	dull	0.15 ~ 0.96	9.3%	1.6%	
	bright	0.14 ~ 0.97	8.0%	1.4%	
$\epsilon_R$ -compensated pyrometer	Wavelength $\lambda_1, \lambda_2(\mu\text{m})$	Specimen type	Emissivity ratio $\epsilon_R$	Error of emissivity ratio $\left  \frac{\Delta\epsilon_R}{\epsilon_R} \right _{\text{max}}$	Temperature error $\left  \frac{\Delta T}{T} \right _{\text{max}}$
	1.5 3.4	dull	0.7 ~ 3.0	5.6%	0.8%
		bright	0.8 ~ 2.9	8.1%	1.2%

$\epsilon_p$ は $\epsilon_s$ よりも常に大きい値を取っているが、酸化が進むにつれて、その違いの割合が小さくなっている。そのため、偏光放射率比 $R_{ps}$ は時間が進むにつれ、減少している。

図11は、80°方向の $R_{ps}$ と法線方向の $\epsilon_\lambda$ の関係である。酸化が進むにつれ、 $R_{ps}$ の値は小さくなり、 $\epsilon_\lambda$ は大きくなるため、左上がりの形になった。この補正図でも、左上の所つまり酸化がかなり進行したところで放射率の干渉現象が現れている。しかしこれ以外では、 $R_{ps}$ と $\epsilon_\lambda$ に1対1の関係があるため、酸化初期段階での本手法の有効性が示せた結果となっている。

次に、図12に $\theta=80^\circ$ の他に、30°、60°における $R_{ps}$ と $\epsilon_\lambda$ の関係の実験結果を示した。30°方向では補正曲線が立っており、 $R_{ps}$ が

ほとんど変化しないため、本手法には適さない。一方、60°では $R_{ps}$ が変化しているため、80°より細かくはないが酸化の状況を示すことができた。これより、図2(b)に示されているような、酸化による偏光放射率比 $R_{ps}$ の角度特性の変動が証明された。同時に $R_{ps}$ は、60°~80°付近で検出することが有効であることが分かった。

また、この手法でも干渉現象を避けるために、適切な波長を選択する必要がある。よって、1.5 $\mu\text{m}$ 以外に3.4 $\mu\text{m}$ のバンドパスフィルタを介したPbSeをセンサとする放射計で $R_{ps}$ を検出し、図13に検出波長による補正図の違いを示した。この時、 $R_{ps}$ の測定角度は60°とした。(a)は1.5 $\mu\text{m}$ の短波長側で $R_{ps}$ を測定して1.5 $\mu\text{m}$ と

3.4 $\mu\text{m}$ の放射率 $\epsilon_\lambda$ を補正したもの、(b)は3.4 $\mu\text{m}$ の長波長側で $R_{ps}$ を測定して1.5 $\mu\text{m}$ と3.4 $\mu\text{m}$ の放射率 $\epsilon_\lambda$ を補正したものである。角度特性を利用する手法と同様に、短波長側の放射率、偏光特性が酸化膜による干渉の影響を受けている。このため、偏光を利用する手法でも、干渉しにくい長波長で検出した方がより精度の良い測定が行えることが分かった。

#### 4. 結論

金属の酸化進行過程で放射率が変動し温度誤差を生ずる場合、角度特性、偏光特性を利用する両手法が以下の条件で有効である

ことを実証した。

- (1) 角度特性は0°方向と60°～80°方向で検出する
- (2) 偏光特性は60°～80°方向で検出する
- (3) 角度、偏光特性は長波長側で検出する

また、両手法を実用化させるため以下のような課題がある、

- (i) 測定条件の最適化のため、多くの波長や角度で放射率挙動を調査する
- (ii) 酸化膜成分の違いによる補正曲線への影響の考察する
- (iii) 冷延鋼板以外の酸化しやすい金属試料へ適用する

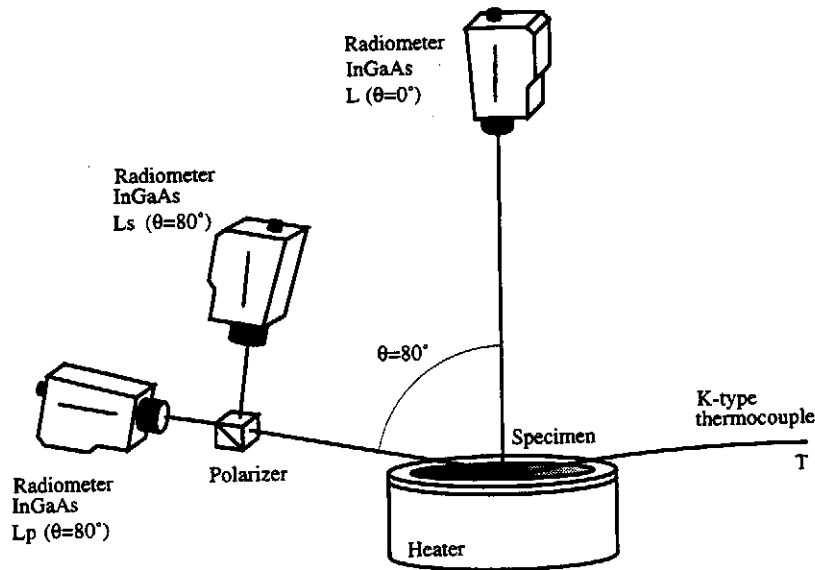


図9 実験構成図（偏光の手法）

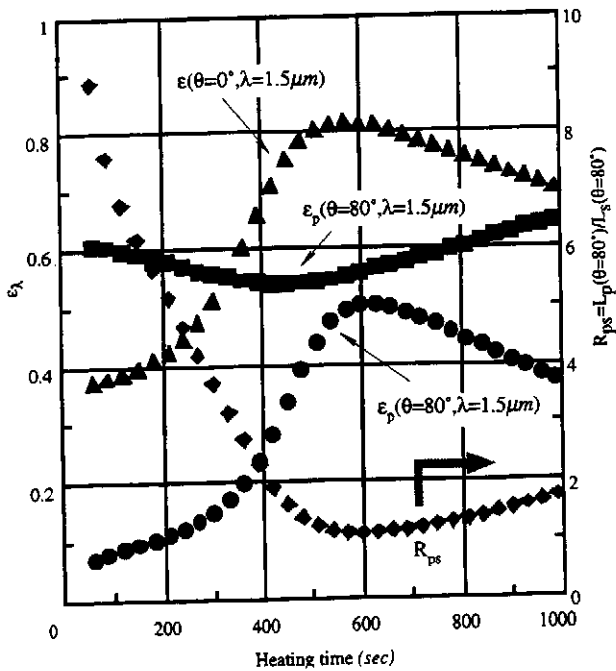


図10 酸化の進行による $\epsilon_p, \epsilon_s, R_{ps}, \epsilon_\lambda$ の変化

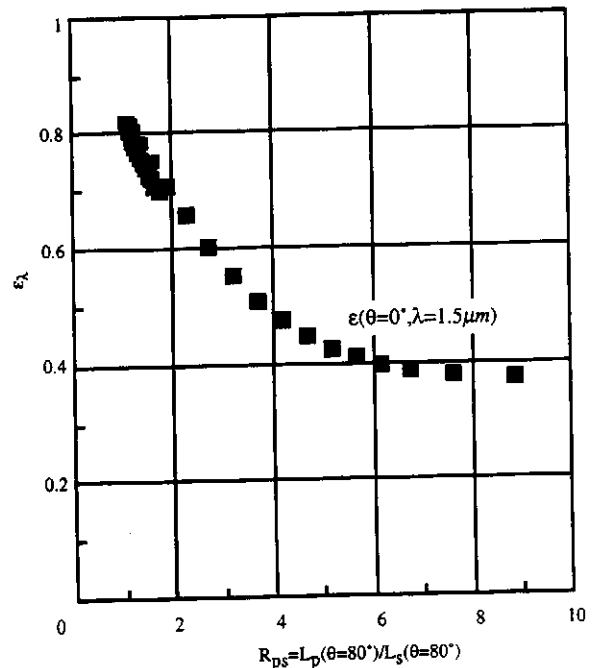


図11  $R_{ps}$ と $\epsilon_\lambda$ の関係

(iv)光ファイバで構成するコンパクトな実用計測システムを開発し、現場実験する。

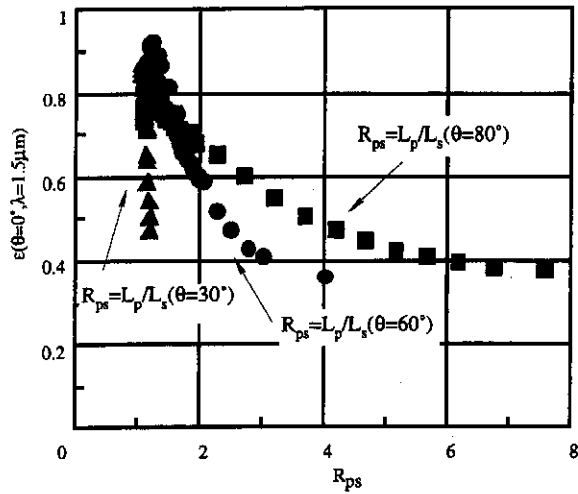


図 1.2 測定角度の影響 (偏光の手法)

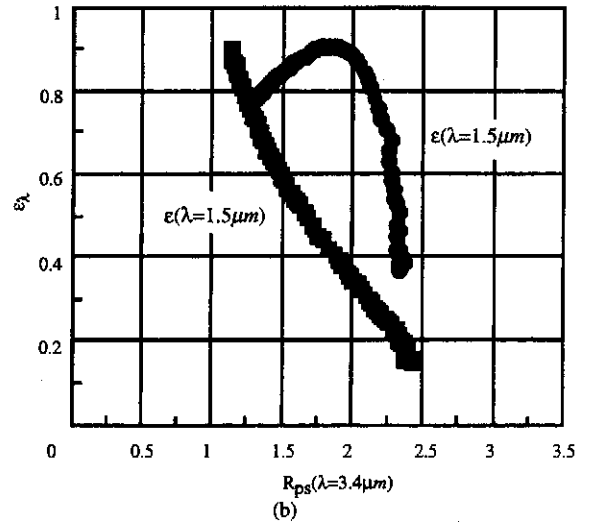
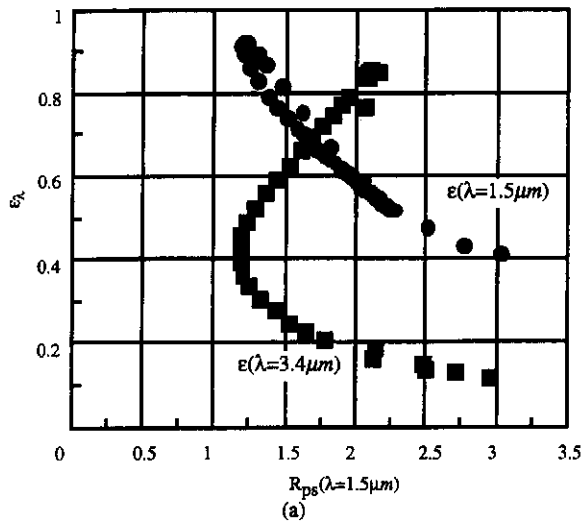


図 1.3 測定波長の影響 (偏光の手法)

## 謝辞

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成9年度研究助成 (AF-97014) によって遂行された。同財団関係者に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 山田：国内外の温度計測技術の最新動向、計測と制御、37-3、(1998)
- 2) T.Iuchi and T.Tsurukawaya, New radiation thermometry using directional emissivity, Proc. of the TEMPMEKO'96, 359/3649 (1997)
- 3) 井内、鶴川屋、田添：分光放射輝度の方向依存性を利用した放射率補正放射測温法、計測自動制御学会論文集、34-3、175/181 (1998)
- 4) T.Iuchi F.Furukawa and T.Tsurukawaya, Measurement of polarization properties of metals and its application to radiation thermometry, Proc. of the IMEKO'97, 6, 108/113 (1997)
- 5) E.M.Sparrow and R.D.Cess : Radiation Heat Transfer, Hemisphere Publ., pp.68-73 (1979)