新型放射測温システムの開発と CAPL, CGLプロセスへの適用

田中 富三男*・大平 尚*・増田 正宏*²・丸山 孝一*³・大浜 光正*⁴

New Radiation Thermometry Systems for Continuous Annealing and Continuous Galvanizing Lines

Fumio TANAKA, Hisashi OHIRA, Masahiro MASUDA, Koichi MARUYAMA and Mitsumasa OHAMA

Synopsis : New radiation thermometry systems have been developed and applied to continuous annealing and continuous galvanizing lines. The new method, which is referred to as the TRACE method, uses a prior knowledge about the functional relationship between two spectral emissivities of target materials. Temperature and emissivities of galvanized steel, whose emissivity variation is mainly caused by the change in surface roughness due to the growth of iron-zinc alloy crystals, are measured by dual-spectral type TRACE systems. Polarized type TRACE systems are useful in measuring those of oxidizing cold-rolled steel, whose emissivity variation is mostly attributed to the oxidation.

Principle of measurement of the TRACE method, and the recent development of PbS-polarized TRACE system and scanning type of Ge-PbS dual spectral TRACE system are discussed.

Key words : radiation thermometry ; emissivity ; polarization ; cold-rolled steel ; galvanized steel ; continuous annealing ; continuous galvanizing.

1. 緒言

冷延鋼板連続焼鈍設備 (CAPL) および連続式亜鉛めっきライン (CGL) においては熱処理条件の多様化、鋼板内部と表面品質の高級化にともない鋼板温度の厳格な計測と制御が必須の条件となっている。多様な熱処理条件と高品質化を可能にしながら、生産性とエネルギー効率を維持、向上させるためにCAPLおよびCGLの焼鈍炉部においては直火加熱、気水冷却設備など酸化性雰囲気中で熱処理を行う設備の導入が盛んに進められており、その結果、炉内鋼板表面の酸化にともなう放射率変動が放射測温による炉内鋼板温度測定上の重大な問題となっていた。また、CGLの合金化炉においては最適な合金層を形成させるために、合金化による放射率変動の影響を受けない放射測温システムが囑望されてきた。

筆者らは、異なる二つの分光放射率間の関係を利用して、放射率が変動してもそれを自動的に補正して正確な温度と放射率を同時に測定できる新しい放射測温システムを開発しCAPLとCGLに適用している。本報では最近開発した放射測温システムと、連続焼鈍設備および連続合金化設備における適用状況について論ずる。

2. 新しい放射測温法の測定原理

2・1 放射測温の基本原理解

ある温度 T 、分光放射率 ϵ_λ の物体表面の熱放射を計測したときに得られる分光放射輝度 L_λ は

$$L_\lambda = \epsilon_\lambda \cdot L_b(\lambda, T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ただし、 ϵ_λ は物体表面の分光放射率、 $L_b(\lambda, T)$ は温度 T における黒体分光放射輝度である。加熱炉内にある物体の温度を計測するような場合には炉壁面からの迷光雑音が混入してくるが、これは水冷式の迷光遮蔽板により除去する対策、あるいは迷光雑音を何らかのアルゴリズムで補償する対策が施される。

黒体分光放射輝度は厳密にはプランクの式

$$L_b(\lambda, T) = \frac{2C_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表現されるが、 $\lambda \cdot T < 3,000$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$) の条件下では1%以下の誤差でウィーンの様式

$$L_b(\lambda, T) = \frac{2C_1}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

がよく用いられる。 C_1 、 C_2 はそれぞれ放射の第1、第2定数である。

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

* 新日本製鉄(株)エレクトロニクス研究所 (Electronics R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

* 2 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鉄(株)津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

* 4 日鉄テクノス(株) (Nippon Steel Technos Corporation)

放射测温で物体温度を推定するという事は、基本的には測定された分光放射輝度 L_λ から黒体分光放射輝度を

$$L_b(\lambda, T) = L_\lambda / \epsilon_\lambda \quad (4)$$

によって算出し、対応する温度 T を(2)式、(3)式あるいは予め求めた黒体炉校正表より求めることにほかならない。

2・2 従来の分光放射率研究

物体表面の分光放射率は波長、測定角度など測定する側が選択しうる条件と、材質など被測定物体の条件によりさまざまな定義が可能である。すなわち測定系だけでも波長、偏光状態、測定角度(方向性)が異なる定義が可能であり、さらに被測定物体の材質、処理条件、処理時間、表面粗さ、酸化還元程度、熱履歴、温度、その他の不確定要素などの影響も考慮すると一言で言い表せない多様性がある。従来からも放射率をこのような条件の関数として理解しようとする優れた研究や膨大なデータベースの構築¹⁾もなされてきた。しかし、これらの知識、データもCAPLやCGLといった工業プロセス内で表面状態が変化する物体に対しては、酸化程度などの変動要因が正確に把握できないこともあって必ずしも有効に活用できていなかった。

2・3 みかけの分光放射率間の関係

新原理の測定アルゴリズムについて論ずるまえに、異なる2つの分光条件により測定された分光放射輝度(L_x, L_y)だけから得られる情報について考えてみる。いま2つの分光放射輝度(L_x, L_y)が測定され、物体の真の温度が T_0 、真の分光放射率が $(\epsilon_{x0}, \epsilon_{y0})$ であったとすると、(1)式の一般的な表現として次式を得る。

$$\begin{aligned} L_x &= \epsilon_{x0} \cdot L_b(\lambda_x, T_0) \\ L_y &= \epsilon_{y0} \cdot L_b(\lambda_y, T_0) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $\epsilon_{x0} = \epsilon(\lambda_x, p_x, \theta_x)$

$\epsilon_{y0} = \epsilon(\lambda_y, p_y, \theta_y)$

λ_x, λ_y : 検出波長

p_x, p_y : 偏光状態を表すパラメータ

θ_x, θ_y : 物体表面法線と測定方向のなす角度

分光放射輝度測定値に対して物体の温度を仮定して T とおき、対応するみかけの分光放射率を (ϵ_x, ϵ_y) とおくと(5)式と同様な形で次式を得る。

$$\begin{aligned} L_x &= \epsilon_x \cdot L_b(\lambda_x, T) \\ L_y &= \epsilon_y \cdot L_b(\lambda_y, T) \end{aligned} \quad (6)$$

黒体分光放射輝度の表現式として(3)式を用い、(5)式、(6)式と連立させて(L_x, L_y)、(T_0, T)を消去すると真の分光放射率とみかけの分光放射率の関係が次式のように導かれる。

$$\epsilon_y = \epsilon_{y0} \cdot \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_{x0}} \right)^{\lambda_x / \lambda_y} \quad (7)$$

これはFig. 1に示した (ϵ_x, ϵ_y) の関係図中、原点(0,

Fig. 1. The cross point of f and g functions gives true emissivities.

0)および真の分光放射率($\epsilon_{x0}, \epsilon_{y0}$)を通る実線で描いた曲線 g を表す。(7)式は、一組の分光放射輝度計測値(L_x, L_y)に対して考え得る見かけの分光放射率(ϵ_x, ϵ_y)間の関係を示す。物体の真の放射率の座標は、(7)式の見かけの分光放射率を示す曲線 g と、真の分光放射率($\epsilon_{x0}, \epsilon_{y0}$)の変化挙動を示す曲線 f の交点として得られる。

従来の二色法では波長のみ異なる2つの真の分光放射率間の関係式が $\epsilon_y = R \cdot \epsilon_x$ で与えられる場合に正しい解が求められる。現実の物体では、真の放射率変化挙動がそのような単純な式で表現できないため、往々にして大きな測定誤差を生ずる。

2・4 新しい放射测温法の測定原理

工業プロセスにおいて物体温度を放射测温法によって測定しようとする場合、材料は冷延鋼板であるとか、温度や表面粗さはどの程度か、あるいは酸化が予想されるかといった情報はかなりの範囲で既知で、かつ変動もある程度の範囲内に制限されているのが普通であって、放射率変動は物体あるいはプロセスに固有な一つかせいぜい二つの要因に限定されていることが多い。

測定系の条件が異なる二つの分光放射率(例えば波長の異なる分光放射率)を考えてみると、物体の表面状態が物体あるいはプロセスに固有な要因(例えば酸化)により変化し、その結果どちらの分光放射率も変動したとしても、同一表面の同時刻における物性値である以上両者の間にはある程度の相互関係が成立すると考えるのが自然である。

筆者らが開発したTRACE法(Thermometry Reestablished by Automatic Compensation of Emissivity)は、二色法のような数学的あるいは人為的な表現形式を使わず、Fig. 1中に示すように物体表面の二つの分光放射率の変化挙動をそのままの関数関係に表した一般式

$$\epsilon_y = f(\epsilon_x) \quad (8)$$

を用いたことに最大の特徴がある。関数 f の形は実験的に分光放射率の変化挙動を計測し、Fig. 1に示したように($\epsilon_x,$

ϵ_y 線図の上で両者間の関係を、例えば多項式を用いて容易に表現することができ、非線形でもよい。

(8)式は、あくまで2つの分光放射率間の関係が再現性よく表現できるならば、との仮定にすぎない。しかし後述するように、合金化反応により放射率が変動する溶融亜鉛めっき鋼板や、酸化反応により放射率が変動する冷延鋼板などの例でも二つの分光放射率間の関係は(8)式により関係づけることが可能である。

3. 偏光型および2波長型放射計

TRACE法では一般的な(8)式の採用によって、複雑な放射率変化挙動も容易に表現することが可能となり、より正確な温度および分光放射率の同時測定が可能となった。Fig. 2(a)に筆者らが開発した2波長型(Dual Spectral Type)放射計の光学系を示す。またFig. 3(a)は偏光型(Polarized Type)放射計の光学系を示す²⁾³⁾。

放射率などの光学的性質の変化が、どのような表面状態変化に起因しているかを理解することは放射測温上も重要である。周知のように不透明物体表面に対しては分光放射率 ϵ_λ (Directional spectral emissivity), と分光反射率 (Directional hemispherical reflectivity) ρ_λ の間にはキルヒホッフの法則 $\epsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$ の関係が厳密に成立する。したがって、分光放射率変化がどのような表面状態変化に起因す

るのかを理解するためには、物体表面への入射光に対する反射率の変化挙動を理解すればよい。

Fig. 2(a)に示した2波長型は異なる波長における分光放射輝度を検出するもので、合金化溶融亜鉛めっき鋼板のように、鉄と亜鉛の合金化現象にともなって起こる表面粗度変化が放射率変化を引き起こす物体の測定に適している⁴⁾。

Fig. 2(b)は、金属表面の粗度変化により反射率が変化する様子を模式的に示した図である。

一方、Fig. 3(a)に示した偏光型は同一波長で異なる直線偏光成分(p偏光, s偏光)の分光放射輝度を測定するもので、酸化過程の冷延鋼板のように、金属表面に透明性の酸化薄膜が成長することによって起こる光学的干渉効果により放射率変化が引き起こされる物体の測定に適している。Fig. 3(b)は、金属表面に透明な薄膜が生成されることにより反射率が変化する様子を模式的に示した図である。Fig. 4は物体表面に対して斜め方向から観測した場合のp偏光成分の電気ベクトル($E_{\parallel}$)とs偏光成分の電気ベクトル($E_{\perp}$)の定義を示している。

2波長型放射計により酸化過程の冷延鋼板を測定すると、酸化の初期段階において若干の精度低下をきたすため、冷延鋼板の測定には一般に偏光型放射計を利用している。これはg曲線の傾き ($d\epsilon_y/d\epsilon_x$) と、酸化冷延鋼板に対する2波長型放射計のf関数の傾き ($df/d\epsilon_x$) が酸化初期にほぼ等しい値を持つために解が不安定になるためである。

Fig. 2(a) Dual spectral type TRACE radiometer.

(b) Change in surface roughness causes the variation of the optical properties of a metallic surface.

Fig. 3(a) Polarized type TRACE radiometer.

(b) Oxidation of a metallic surface causes the variation of the optical properties.

Fig. 4. Linearly polarized components of radiation.

g曲線の傾きは、もともとプランクの熱放射式から導かれた式(7)から計算が可能である。またf関数の酸化初期における傾きは、Fig. 3 (b)に示したように鉄酸化物が平滑で、かつ薄膜状態であるという最も簡単な光学的モデルに対して薄膜光学理論を適用して計算が可能である。両者を計算して比較した結果、後者が前者にほぼ一致し、さらにそれは鉄酸化物が赤外線領域においては透明体であり、かつ屈折率が波長によらずほぼ一定であるという事実に起因していることが明らかになった⁵⁾。Fig. 5 (a), (b)はそれぞれヘマタイト(Fe_2O_3)、ウスタイト(FeO)の可視および近赤外線領域における屈折率と吸収係数を示す。

実際の冷延鋼板表面は、中心線平均粗さRaでほぼ $1(\mu\text{m})$ 程度の粗さをもっており、厳密にはFig. 3 (b)に示した光学的モデルほどの干涉性は有しないと思われる。しかし、計算値が、実験値と良く一致するという事実は、酸化膜が薄い酸化初期に限定するならば、このような簡単なモデルでも光学的性質の変化挙動把握には有効なことを示唆するものと考えられる。2波長型による酸化冷延鋼板測定時の精度低下が、この事実によることを解明することで偏光型放射計の発想が得られた(詳細は文献5)参照)。二つの独立な理論から導かれる傾きの値が偶然一致するというのは、自然のいたずらというほかに興味深い。

Table 1にはこれまで開発されたTRACE法による放射測温システムの基本的仕様を示した。Ge-PbS 2波長型は、Ge素子とPbS素子を用いて波長 $1.55\mu\text{m}$, $2.2\mu\text{m}$ で検出するもので、主にCGLの合金化炉において溶融亜鉛めっき鋼板の測定に利用されている。ストリップの幅方向走査を行うシステムの開発については後述する。偏光型は、PbS, Ge及びSi素子を用いたものが開発され、主にCAPL, CGLの焼鈍炉において冷延鋼板の測定に利用されている。後述するPbS偏光型は低温域での測定を目的に開発された。Ge, Si偏光型はさらに高い温度領域での測定に利用されている。偏光型放射計は両偏光成分の有意差が現れて、かつ実用システムの小型化を確保するために、主に鋼板表面法線にたいして45度の方向への熱放射を計測するように設置されている。

TRACE放射測温システムには上述したように種々のタイ

Fig. 5.(a) Refractive index n and extinction coefficient κ of hematite (Fe_2O_3) in visible and near infrared region⁶⁾.

(b) Refractive index n and extinction coefficient κ of wustite (FeO) in visible and near infrared region⁷⁾.

Table 1. Main specifications of dual-spectral and polarized type TRACE radiometers.

Type	Ge-PbS Dual Spectral	PbS Polarized	Ge Polarized	Si Polarized
Temperature Range($^{\circ}\text{C}$)	400-700	250-500	400-700	600-800
Wavelength (μm)	1.55(Ge) 2.20(PbS)	2.20	1.55	0.90
Observation Angle(deg.)	0(Normal)	45	45	45

プがあり、通常は検出素子の種類と、2波長型か偏光型かを例えればGe-PbS 2波長型といった区別の仕方をしている。また、測定点をスキャンして計測できるものはさらに走査型と呼称している。

TRACE放射測温システムは、基本的にはFig. 2 (a)やFig. 3 (a)に示したような放射計と、演算処理装置から構成され、走査型の場合はさらに測定点をスキャンするための走査光学系が加わる。演算処理装置は、放射計が検出した二つの分光放射輝度信号(L_x , L_y)に対して温度 T を仮定して見か

けの分光放射率(ϵ_x , ϵ_y)を計算し、(8)式が成立するまで T を変化させて繰り返し数値計算を行い、最終的な温度と放射率の解(ϵ_x , ϵ_y , T)を求める。この過程はすでにFig. 1 に図式的に示した。

4. 最近のTRACE放射测温システムの開発

4・1 PbS偏光型放射测温システムの開発

4・1・1 目的

連続焼鈍炉の1次冷却帯出側における冷延鋼板の温度と放射率を250-500°Cの比較的低温度域で測定するための偏光型放射温度計を開発した。鋼板表面は気水冷却により酸化をうけているため偏光型を採用し、冶金学的要請から250°Cの比較的低温度域まで測定する必要からPbS光導電素子を用い、検出波長は $2.2\mu\text{m}$ とした。p 偏光放射率 ϵ_p とs 偏光放射率 ϵ_s はTRACE法の原理式 $\epsilon_p = f(\epsilon_s)$ で関係づけられる。

4・1・2 実験

Fig. 6 に実験装置の概念図を示す。真空炉中の加熱装置に

Fig. 6. Experimental apparatus for the measurement of spectral and polarized emissivities.

Fig. 7. Variation of spectral polarized emissivities of cold-rolled steel during oxidation. Air was continuously introduced in the chamber after $t=1\text{min}$ at constant flow rate. ($\lambda=2.2\mu\text{m}$, $\theta=45\text{deg}$.)

冷延鋼板試料(直径65mm, 厚さ0.8mm)を取り付け、真空のまま設定温度まで昇温した後徐々に炉内に空気を導入して酸化過程における偏光分光放射率の測定を行った。試料は測定方向から45度の角度に傾斜して設定し、試料真温度は裏面に溶着したK熱電対にて測定した。

偏光分光放射率の酸化にともなう変化挙動の例をFig. 7に示す。真空中で約400°Cまで加熱して測定を開始し、1分後に降炉内に一定流量の空気を導入した。炉内に空気を導入すると同時に放射率は急増し、いったん極大値に達した後徐々に減少してほぼ一定値に収束した。両偏光分光放射率間の関係例をFig. 8に示す。このような測定を鋼種、温度を変えて行い両放射率間の関係を表す f 関数の平均をとって改めて f 関数として定義した。Fig. 9はこの f 関数と、測定した偏光分光放射輝度信号とからTRACE法の原理にしたがって温度と2つの放射率を計算した結果を示した例である。Fig. 9にはp 偏光放射率 ϵ_p の中間値(最大値と最小値の平均)と、p 偏光分光放射輝度信号とから単色法により温度を計算した結果をあわせて示した。図から明らかなように単色法では大きな誤差を生じているが、TRACE法による温度

Fig. 8. Functional relationship between s and p polarized spectral emissivities of oxidized cold-rolled steel. ($\lambda=2.2\mu\text{m}$, $\theta=45\text{deg}$.)

Fig. 9. Temperatures measured by TRACE and conventional spectral method.

計算値は熱電対による真温度測定値と極めてよい一致を示している。

4・2 Ge-PbS 2 波長走査型放射測温システムの開発

4・2・1 目的

合金化溶融亜鉛めっき鋼板の鉄-亜鉛合金皮膜には耐食性、塗装密着性、加工性が求められ、CGLの合金化炉における温度管理は幅方向にも厳格に管理される方向にある。合金化溶融亜鉛めっき鋼板の幅方向の温度および放射率計測を目的としてGe-PbS 2 波長型放射計を用いた走査型放射測温システムを開発した。

Ge-PbS 2 波長型放射計により鋼板表面の法線方向から測定した場合のTRACE法の有効性は既に確認済みであり、今回の実験の目的は走査型とした場合に危惧される f 関数の角度依存性を実験的に把握し、必要があれば角度依存性の補償対策を検討することにあった。

4・2・2 実験

Fig. 6 に示した実験装置を用いて溶融亜鉛めっき鋼板試料を600℃まで加熱し、合金化にともなう放射率変化挙動を $\theta = 0, 30, 60$ 度の角度で測定した。実用機の仕様は幅1600mmの鋼板全幅を距離2000mmの位置で走査して測定できることであったため鋼板表面法線と測定方向とのなす最大角度は24度であり、したがって60度まで測定しておけば充分である。

Fig.10に測定角度 $\theta = 0, 30, 60$ 度で測定して得られた f 関数を示す。図から明らかなように f 関数は角度 θ によらずほぼ一定とみなすことができ、

$$\epsilon_y = f(\epsilon_x) = a \cdot \epsilon_x + b \quad (9)$$

という1次式で表現できる。これを用いてTRACE法による温度測定誤差を計算したところ、平均測定誤差で-0.1℃、標準偏差で1.9℃であった。

鋼板表面が溶融亜鉛に覆われている状態では、表面は光学的にかなり平滑であるため屈折率 n と吸収係数 κ からフレ

Fig. 10. Angular dependence of f -functions for galvanized steel.

ネルの式により反射率 ρ_λ を計算することができ、さらにキルヒホッフの法則 $\rho_\lambda + \epsilon_\lambda = 1$ により放射率 ϵ_λ を計算できる。一般的な金属表面の放射率の角度依存性を示す一例として、平滑な鉄表面の分光放射率の角度依存性を波長1.55μm, 2.2μmについて計算により求めたものをFig.11に示した。分光放射率は、放射方向への半径座標として示されている。計算に用いた複素屈折率 $\mathbf{n} = n - i \cdot \kappa$ は文献値を用いた。角度 θ が30度付近まではほとんど角度の影響がなく、また角度60度程度まで大きくなっても両者がともに増大する。金属表面は一般に同様な光学的性質をもつため亜鉛および鉄-亜鉛合金表面でも結果としてFig.10のように f 関数に角度の依存性が強くは現れてこないと考えられる。

Fig.12に走査型放射計検出器の内部概観図を示す。石英ガラスを通して物体からの熱放射が入射し、光学スキャナにて幅方向の信号が順次放射計に伝送される構造になっている。

4・3 CAPLとCGLにおける適用状況

CGLにおけるTRACE放射測温システムの設置状況概念図をFig.13に示す。CAPLにおける設置状況はCGLの焼鈍炉部とほぼ同じと考えて良い。

2 波長型放射測温システムはおもにCGLの合金化炉に設置され、合金化溶融亜鉛メッキ鋼板の合金化温度計測制御

Fig. 11. Calculated directional spectral emissivity of smooth iron surface. Spectral emissivity is given as radius as a function of direction of emission.
($n = 3.6 - 5.9i$ for 1.55μm,
 $n = 4.0 - 7.7i$ for 2.20μm)

Fig. 12. Scanning radiometer system.

Fig. 13. Polarized and dual-spectral TRACE systems installed in a CGL process.

に利用されている。合金化炉では、鋼板表面疵の発生を防ぐため、炉内における鋼板の拘束を行わず鋼板の揺れが激しいが f 関数の角度依存性を心配する必要がないため鋼板の揺れにかかわらず安定した温度計測が可能になっている。

偏光型放射测温システムはCAPLおよびCGLの焼鈍炉部のスロート部に設置されている。加熱帯、均熱帯、一次冷却帯出側に温度領域にあわせてSi, Ge, およびPbS偏光型の放射测温システムが利用されている。炉内計測となるため炉内壁面からの迷光雑音の混入を防ぐ必要から、水冷式の遮蔽板が併用されるのが一般的である。

TRACE法に基づく新しい放射测温システムでは、温度とともに物体表面状態と密接な関係がある分光放射率が同時に測定できる。従来の単色温度計では温度の異常か放射率の変動が不明な状況で生産が行われていたため、炉内状況の異常発見が遅れる場合があった。TRACE法では、放射率情報から炉内鋼板の酸化、還元状況が測定できるなど、炉内状況の把握、異常の早期診断も可能となる。走査型の適用が最も進んでいるCGL合金化炉では、幅方向の温度および放射率情報を利用した合金化制御への利用も試みられている。

5. 結論

TRACE法では、物体からの直接熱放射を検出するだけで

温度と二つの分光放射率を同時測定できる。従来の単色、2色法のように放射率あるいは放射率比が一定という人為的な仮定が成立しない測定対象に対しても、対象に固有な f 関数を予め求めておけば正確な測定が可能であり、鉄鋼材料のみならず他の材料にも適用できる可能性がある。

TRACE法の特徴は、(8)式のように物体表面が実際に示す分光放射率変化挙動をそれぞれの被測定物体ごとに容易に表現できる形式で表現したことにある。例えば、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の場合では、(9)式のように1次式を用いて再現性よく表現可能であることが実験的に確認さえできればよい。すなわち、TRACE法では真の放射率間の関係が(8)式のようになんらかの関数式として既知であることが必要なのであって、従来の二色法のように、2つの分光放射率間の関係が予め人為的に決められた関数関係であることを被測定物体に要請するわけではない。

2つの分光放射率 ϵ_x , ϵ_y 間の具体的関係は、被測定物体の種類、放射率の変化要因、および ϵ_x , ϵ_y それぞれの定義に対応する検出波長、偏光、測定方向角度によって異なった関数で表現されるのは言うまでもない。

従来、放射率は厄介な問題にすぎなかったが、被測定物体の表面状態に関する重要な情報として工業プロセスの操業、製品品質の管理などに利用することができるようになりつつある。

文 献

- 1) Y.S.Touloukian and D.P.Dewitt : Thermal Radiative Properties, Vol. 7, 8, and 9, from Thermophysical Properties of Matter, TPRC Data Series, ed. by Y.S.Touloukian and C.Y. Ho, (1970-1972), [IFI Plenum Press, New York]
- 2) 田中富三男 : 計測と制御, **31** (1992), p.930
- 3) F. Tanaka and H. Ohira : Temperature, Vol.6, part 2, (1992), p.895
- 4) F. Tanaka and D.P.Dewitt : 計測自動制御学会論文集, **25** (1989), p.1031
- 5) F. Tanaka and D.P.Dewitt : 1989 National Heat Transfer Conf., HTD-Vol. 112, (1989), p.69
- 6) B. Karlsson, C.G.Ribbing, A.Roos, E.Valkonen and T.Karlsson : Phys. Scr., **25** (1982), p.826
- 7) A.I.Galuza, V.V.Eremenko, A.P.Kirichenko and V.A.Konstantinov : Sov. Phys. Solid. State, **23** (1980), p.140