



入門講座

計測技術編 - 4

非接触温度計測技術—放射測温法—

井内 徹

東洋大学工学部機械工学科 教授

Tohru Iuchi

Noncontact Temperature Measurement Engineering - Radiation Thermometry -

1 はじめに

周知のとおり、高炉から圧延・製品工程に至るまで鉄鋼プロセスは熱の出し入れ、すなわち加熱・冷却の繰り返しです。そのため、鉄鋼プロセスでは温度計測とその制御が大変重要です。

温度計測技術は測定対象に接触させて計測する方法と、測定対象に非接触で計測する方法に大別できます。転炉で溶鋼温度を測定する浸漬熱電対は前者の典型的な例で、確立された技術です。一方、光や電磁気のように空間の場を通して物理的作用を生起せしめる現象は基本的に非接触計測の可能性を秘めています。その中で絶対零度以上の物体から放射される電磁波（熱放射と呼ばれる）を検出して温度を計測する放射測温技術は後者の代表的な方法です。

放射測温法は高速で移動する対象が多い鉄鋼プロセスと相性のよい、重要な温度計測技術として長く、継続的に研究・開発・実用化がなされてきました。これからも鉄鋼プロセスに必須の計測技術として生き残っていくでしょう。そこで、本講では放射測温法に焦点を絞り、その測定原理と基本的な問題点を抽出し、現在までにどのような研究・開発がなされてきたか概観することによって、読者の理解を深めることを目的とします。本講を読了した後は、放射温度計をプロセスに導入すれば直ちに、メーカーのカタログに記載されている精度で温度測定ができるはずだという幻想を持たずにすむようになるでしょう。つまり、測定対象の環境・条件のもとで、どのような問題点があるか把握でき、問題解決のための方針をたてることができるようになるでしょう。

放射測温法は、ちょうど1世紀前の1800年代後半のドイツ鉄鋼業で溶解、鍛錬、焼き入れなどの高温測定のために組織的にかつ精力的に研究が開始されたことで発展しました。熱放射の理論は実応用だけでなく、マックス・プラン

クの量子仮説を生み、物理学の歴史のなかでも最も華麗なハイライトである量子力学を誕生させました。20世紀から間もなく21世紀に移行する現代にあって100年前の同時期を振り返るのも意義あるものと思われます¹⁾。

2 放射測温法

先に放射測温とは絶対温度0 K以上の物体は電磁波を放射することから、その電磁波を検出することによって温度を計測する方法であることを述べました。電磁波とは我々人間に見える可視光線と見えない光の仲間の総称です。光より波長の短い領域では紫外線、エックス線、ガンマ線、長い波長領域では赤外線、マイクロ波、電波と名付けられています。図1に電磁波のスペクトルを示しています。常温(300 K)から2,000 K(ケルビン; 熱力学絶対温度目盛)くらいが鉄鋼プロセスで対象となる温度域です。この温度域では可視光線(短い波長で0.6 μm程度)から赤外線(長い波長で10 μm程度)が物体から放射される主要な電磁波になります。したがって、電磁波の検出もこの領域で感度をもつ光センサや赤外線センサを用いて行われます。電磁波は波動ですから、波長λ [m]と振動数ν [1/s]で表現できます。電磁波の伝播速度c [m/s]は

$$\lambda \cdot \nu = c \quad \dots\dots\dots(1)$$

となります。cは真空中で299,792,458 [m/s]ですが、空気中ではほんのわずかに減少します。図1に参考のため、いろいろな波長域(スペクトル)での電磁波の応用技術の幾つかを記載しました。いわゆる光技術の拡がり概観できるのではないかと思います。

放射測温法の原理はごく少数の基本的な法則を知ることによって理解することができます。また、測温誤差に関わる基本的な公式もこれら少数の法則から導くことができます。したがって、少し数学的な表現を理解するだけで放射

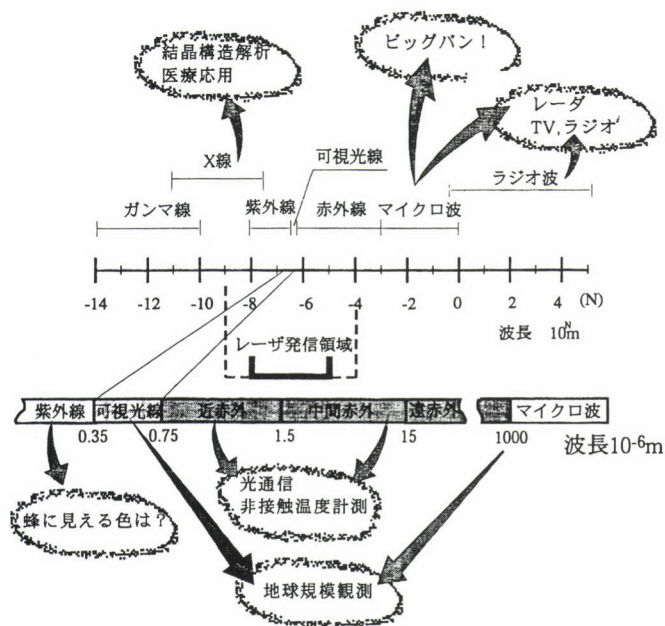


図1 電磁波スペクトル

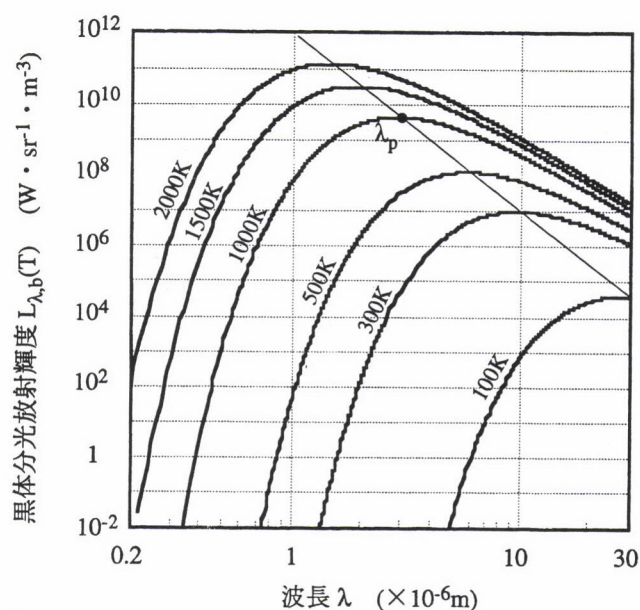


図2 黒体分光放射輝度

測温法の全体像を把握できますので、ぜひ基本法則に馴染んでください。

2.1 基本法則と放射率

放射測温法で、黒体(blackbody)は完全放射体(full radiator)とも呼ばれていますがもっとも重要な放射量の基準です。黒体は入射する電磁波を完全に吸収する理想的な熱放射体で、同時に熱平衡状態において与えられた温度のもとで電磁波の最大の放射体になります。(ちなみにレーザーは熱非平衡状態での電磁波放射ですので、ここでの議論には対応しません)。このことを定量的に表現するために分光放射輝度という物理量で示するのが便利です。この量を $L_{\lambda,b}(T)$ という記号で表します。つまり、 $L_{\lambda,b}(T)$ は温度 T の黒体の特定の波長 λ において単位時間あたり、単位波長間隔あたり、単位面積あたり、単位立体角あたりの放射エネルギーで、式 (2) で厳密に表すことができます。この式 (2) をプランクの黒体放射則と呼びます。

$$L_{\lambda,b}(T) = \frac{2c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda \cdot T) - 1} \quad (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}) \quad \dots(2)$$

ここで、 c_1 、 c_2 はそれぞれプランクの第1定数、第2定数と呼ばれている定数です。特に定数 c_2 は測温精度に深く関係することがあとで分かります。図2は、式 (2) の $L_{\lambda,b}(T)$ を温度 T をパラメータとし、波長 λ の関数としてグラフ化したものです。このグラフをながめると、温度が高くなるにしたがって $L_{\lambda,b}(T)$ の極大値をとる波長 λ_p が短波長側にシフトするのがわかります。

プランクの黒体放射則 (2) は $\lambda \cdot T \leq 2898 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{K}$ の場合、誤差0.8%以内の精度でウィーンの近似則と呼ばれる次式で表すことができます。

$$L_{\lambda,b}(T) = \frac{2c_1}{\lambda^5} \cdot e^{-c_2/\lambda \cdot T} \quad \dots(3)$$

鉄鋼プロセスでの温度領域はほとんどウィーンの近似則が適用できる範囲ですので、これからの議論は特に指摘しないときは、黒体放射は式 (3) を前提として進めていきます。

さて、温度 T の一般の物体からの電磁波の放射を分光放射輝度 $L_{\lambda}(T)$ で表しますと、 $L_{\lambda}(T)$ は同じ温度 T の黒体が放射する $L_{\lambda,b}(T)$ より決して大きくはなりません。このことを次式のように表します。

$$L_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda} \cdot L_{\lambda,b}(T) \quad \dots(4)$$

ここで、 ϵ_{λ} は分光放射率と呼ばれ、 $0 \leq \epsilon_{\lambda} \leq 1$ の係数です。

図3は黒体と一般の物体の分光放射輝度を温度の関数として模式的にプロットしたものです。同じ温度 T での一般物体と黒体の分光放射輝度の比が分光放射率 ϵ_{λ} になります。また、

$$L_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda} \cdot L_{\lambda,b}(T) = L_{\lambda,b}(S) \quad \dots(5)$$

となる黒体分光放射輝度を $L_{\lambda,b}(S)$ とし、対応する温度 S を輝度温度とよびます。輝度温度 S は真温度 T より高くない、すなわち

$$S \leq T \quad \dots(6)$$

の関係にあります(等号は $\epsilon_{\lambda} = 1$ のとき成立)。真温度 T を測定するのは放射率の関連で難しいので、輝度温度 S を測定

し、これを管理温度と称してプロセスの操業に用いている状況が依然続いているようです。

図4に放射温度計の基本的な構成を示しました。測定対象からの放射は空間を伝播し、レンズないしミラーで集光され、通常チョッピング(変調)して光信号が交流化され、光センサに入射します。センサ出力は交流増幅され、放射率補正回路で測定対象の想定された放射率値 ϵ_λ で補正されたのち、温度換算されて温度表示で出力されます。センサは、主として測定温度域に対応して選択されます。比較的中高温域では、シリコン(Si)、インジウム・ガリウム・ヒ素(InGaAs)などの量子効果型半導体センサが多く使われます。低温領域ではサーモパイル、焦電素子などの熱効果型光センサもよく使用されています。光学的、電気的雑音を抑えるためのさまざまな工夫、センサの温度ドリフト(センサの感度が温度変化によって変動すること)防止、特定の波長域だけを検出するためのフィルタ挿入など、実用の放射温度計には種々の対策が施されています。具体的には放

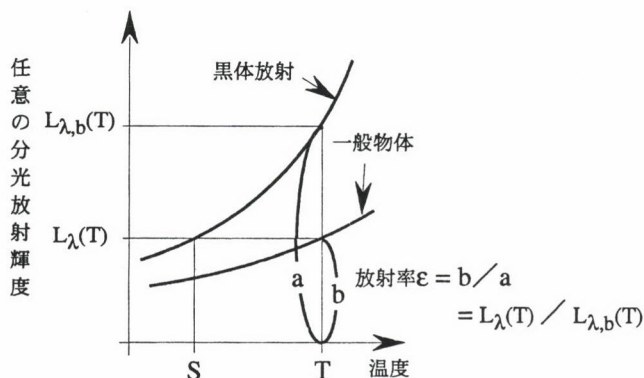


図3 放射率の定義

射温度計メーカーのカatalogを参照されるとよいでしょう。

測定対象の放射率値 ϵ_λ があらかじめ分かっているならば、式(4)の測定値 $L_\lambda(T)$ を既知の ϵ_λ で割り算する操作で、黒体放射の式 $L_{\lambda,b}(T)$ を得ることができます。

$$L_{\lambda,b}(T) = L_\lambda(T) / \epsilon_\lambda \quad \dots\dots\dots (7)$$

さらに、式(7)を逆算して真温度 T を求めることができます。この手順が上記放射温度計の基本的な方式です。

ところで、補正すべき放射率 ϵ_λ が実際には $\pm\Delta\epsilon$ だけ変化しているとしますと、式(5)において、 ϵ_λ の代わりに $\epsilon_\lambda \pm \Delta\epsilon$ を代入し、式(7)と同様に $L_\lambda(T)$ を ϵ_λ で割った値を $L_{\lambda,b}(T_a)$ としますと、 $L_{\lambda,b}(T_a) = (\epsilon_\lambda \pm \Delta\epsilon) L_{\lambda,b}(T) / \epsilon_\lambda$ が成り立ちます。 T_a が放射率変動 $\pm\Delta\epsilon$ による見かけの温度となります。真温度 T からの温度変動分 $\Delta T = T_a - T$ を式(3)を利用して求めると、近似的に次式のように得られます。

$$\Delta T \equiv \pm \frac{T}{n} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_\lambda} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)が放射率変動による温度誤差を見積もる重要な公式です。ここで、 n 値は

$$n = \frac{c_2}{\lambda \cdot T} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表されます。ただし、 $c_2 = 14388 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$ です。

式(8)から分かるように、测温誤差は n 値が大きいほど小さくなることを示しています。 n 値は式(9)から波長 λ が短くなるほど大きくなります。したがって、式(8)、

(9)は放射测温における放射率変動による测温誤差を少なくするためには可能な範囲で放射温度計の使用波長を短波長側で測定すべきことを示唆しています。たとえば、放射率の相対変動 $\Delta\epsilon/\epsilon_\lambda$ が同じであれば、 $\lambda = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ($= 1 \mu\text{m}$) 付近を検出波長とするシリコンセンサは $4 \times 10^{-6} \text{ m}$

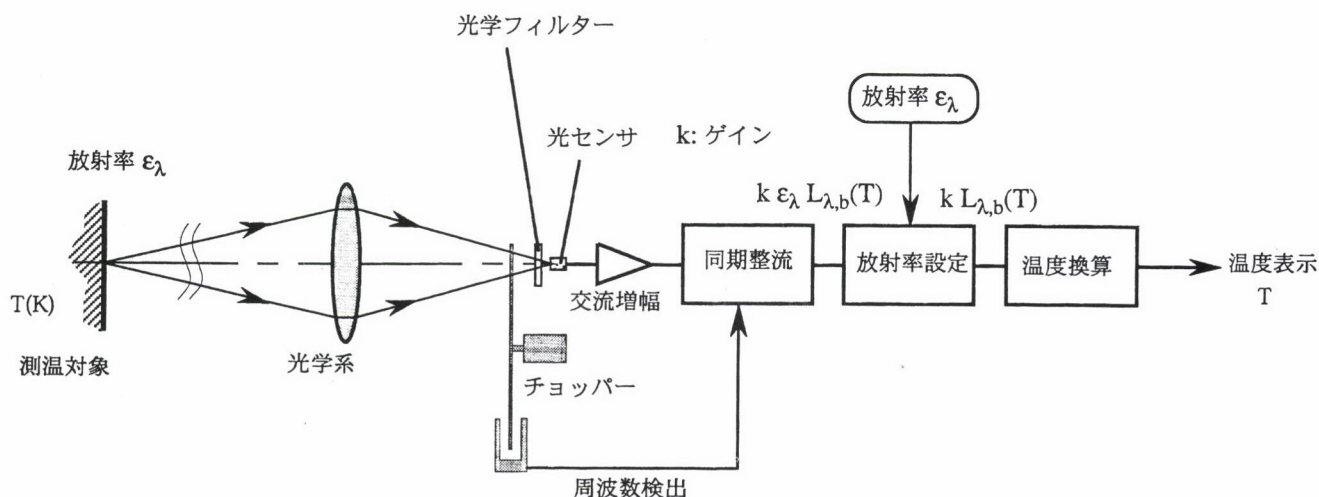


図4 放射温度計の基本構成

(4 μm) 付近を検出波長とする硫化セレンセンサ (PbSe) の 4 倍の測温精度を確保できます。

以上が放射測温法の基本的な法則と放射率に関わる測温誤差の表式です。これだけの前知識だけで、放射測温技術の大半を理解することができます。

2.2 計測上の問題点

放射測温法の特長を列記してみましょう。

- (1) 非接触で遠方から温度計測でき、測定対象に擾乱を与えないこと
- (2) 低温から高温まで計測できること
- (3) 高応答であること
- (4) 1 点測定から線測定ないし面測定が可能なこと

などです。上記項目はいずれも鉄鋼プロセスに適した特長です。項目 (4) の線測定、面測定はパターン測定とも呼ばれ、シリコンダイオードや白金ドーブシリコン (SiPt) などのアレイ状センサを用いることによって現在では非常に容易になりました。

これに対して鉄鋼プロセスに应用する際の計測上の問題点に言及してみましょう。

- (i) 測定対象の放射率がわからないと真温度を求めることができないこと
- (ii) 測定対象の放射率はさまざまな要因によって変化すること
- (iii) 測定対象以外の熱源からの外乱 (反射光) の影響を受けやすいこと
- (iv) 水、油、水蒸気、ガス、ダストなど光路中に存在する物質による吸収、散乱を受けること
- (v) 放射温度計は定期的に性能チェックを受ける必要があること (トレーサビリティ)

などです。以上のように問題点は放射測温法の原理的な問題点と使用環境によって生じる技術的な問題点に分けられます。

問題点の (i)、(ii) は、放射測温の原理的、宿命的な問題点です。最近の研究・開発の多くがこの点に集中しています²⁾。(iii) に関してセンサの検出波長帯と測定温度域によっては、太陽光や蛍光灯なども外乱雑音となることもあり、注意が必要です。鉄鋼プロセスでは各種炉内での放射測温が最大の問題です³⁾。(iv) も鉄鋼プロセスで深刻な問題点の 1 つです。光伝播経路にパイプを設けエアパージをすることや、吸収・散乱を受けにくい波長域を検出波長に選ぶこと、あるいはそれらの組み合わせと信号処理技術による問題点回避の措置が不可欠です。最近では光ファイバの利用により、この問題をかなり克服することもできるようになりました

た⁴⁾。(v) 計測機器はすべて定期的な点検をする必要がありますので、(v) の問題は放射測温だけの問題点ではありませんが、とりわけ放射温度計は再現性校正を主とした定期検査を要します。校正技術が国家機関の標準器から企業の日常使用機器まで一貫した性能保証システムにあることをトレーサビリティ・システム (traceability system) といいます。トレーサビリティ・システムの完成度の高い産業は質の高い産業であり、このシステムが根付いている企業の技術レベルは高いといわれます。現在の日本の鉄鋼業はどうでしょうか。

3 応用例

環境の厳しい鉄鋼プロセスでの放射測温法の具体例を幾つか紹介して、この技術の全般的な理解の手助けにするとともに、今後の発展のヒントになればと思っています。

3.1 反射光の影響を防ぐ手法 (炉内測温)

図 5 は、連続焼鈍炉内における冷延鋼板温度測定システムです³⁾。この測温システムは日本に連続焼鈍炉が初めて開発・導入されたころ、プロセスの制御のために不可避とされた炉内鋼板の温度をオンライン計測する目的で開発されました。2.2 (iii) の項目で言及した放射測温法の問題点の 1 つで、炉内の加熱源からの外乱光をまともに受ける炉内測温の典型的な例です。この問題を解決するために、本システムでは走行する鋼板に対向させて水冷遮蔽フランジ (板) を設置しています。この装置によって、周囲熱源からの雑音光を吸収し、鋼板からの放射だけを放射計センサに導いています。当時の連続焼鈍炉の各ゾーンは酸化による鋼板の放射率変化を考慮しないでよい還元ガス雰囲気でしたので、鋼種ごとに放射率の設定をすることで正確な測

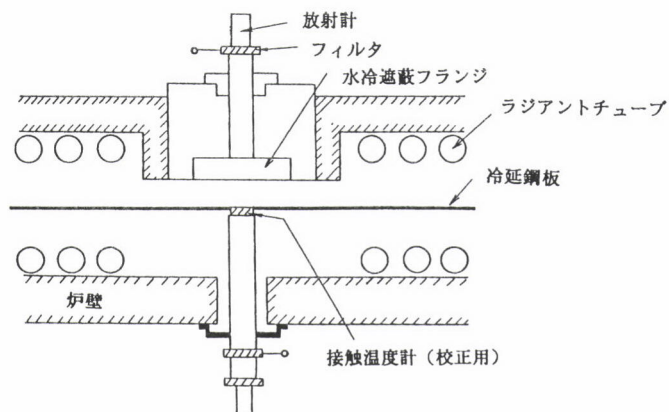
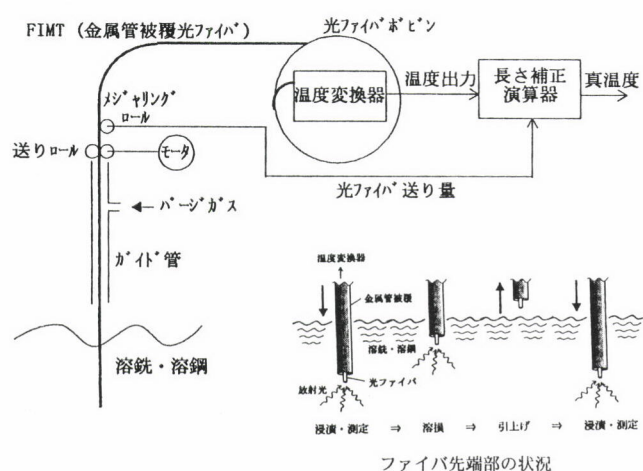


図5 連続焼鈍炉内冷延鋼板真温度測定システム³⁾

図6 消耗型光ファイバ放射温度計⁴⁾

温が可能でした。現在は多鋼種に加え、加熱方式が効率を高めるために鋼板の酸化を伴うようになってきていますので、放射率をオンライン測定する新たな技術が必要です⁹⁾。炉内に水冷装置を導入することは、水漏れによる事故のおそれがありましたが、水冷装置の材質改良や設計基準の変更で克服しました。このため、その後多くの連続焼鈍プロセスに設置することができました。もう一つの特徴はオンライン温度計測が正確かどうか校正するために、間欠使用の接触温度計システムを開発・導入したことです。

3.2 光路中の散乱・吸収を防ぐ方法（光ファイバ伝播）

図6は、最近実用化された消耗型光ファイバ放射温度計です⁴⁾。この温度計は2.2(iii)、(iv)の項目の問題点を克服した典型的な例です。周知のように、製銑・製鋼工程は水蒸気、ダストの充満した厳しい環境にあり、溶銑・溶鋼温度を放射测温で計測するのは容易ではありません。この测温システムは光ファイバを熔融金属内に直接挿入させることによって、上述の問題点を解決したものです。さらに、熔融金属内に挿入されたファイバ先端部（ファイバ径をD、ファイバ長をLとしたとき、 $L/D \gg 1$ ）は、瞬時に熔融金属

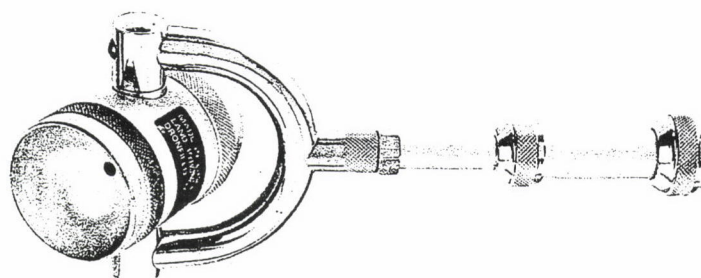
温度に等しくなり、 $L/D \gg 1$ の条件下では、ちょうど熔融金属温度の黒体空洞を形成することになります。したがって、2.2(i)(ii)の放射率問題をも解決しています。この温度計は侵漬熱電対に取って代ることができるほど完成度が高いようです。同様な考えの方法にサファイア単結晶ファイバを使用し、その先端部を特殊なコーティングを施して黒体条件（ $L/D \gg 1$ ）を作り、そこからの放射を途中で通常の通信用光ファイバで伝播させて、2000K以上の高温ガス体の测温を可能にした放射温度計も開発されています⁵⁾。

3.3 放射率補正法

放射测温法において放射率変化は测温誤差を生じさせる最大の問題です。そのために、放射率問題を低減する方法に関する研究・開発が数多くなされてきました。放射率補正法と言われるこの手法の流れの全体像を一度把握しておくのも役に立つものと思われます。放射率補正法は大きく分けて3つの手法に分類できます。

その1つは、放射率を出来るだけ黒体に近い値に高めて、実質的に测温精度を真温度測定に近づける手法です。上述の消耗型光ファイバ放射温度計⁴⁾やサファイアファイバ放射温度計⁵⁾がこの手法の好例ですが、この考え方の先がけは図7に示すようなランド社の半球状キャビティを利用した放射温度計です⁶⁾。この方法は、内面を金メッキした半球状のキャビティをわずかな隙間をあけて測定対象面にかぶせ（短時間であれば接触させて）、キャビティ内面と測定面の間での放射の多重反射によって、その空間を実効的に黒体空洞にしてキャビティ面の小さな孔からの放射をシリコンセンサで検出するものです。この方法は、測定対象の放射率がもともと0.8以上でないと近似黒体とはなりません。が、短波長で感度をもつシリコンセンサを使用しているため、式（8）の効果で、比較的高温域の鋼材温度計測に有効です。具体的には熱延工程を中心にずいぶん利用されてきた貴重な方法です。

2つ目の手法は、試料が不透明体の場合、放射率と反射

図7 ランドの半球状キャビティ⁶⁾放射温度計（写真はLand（株）の厚意による）

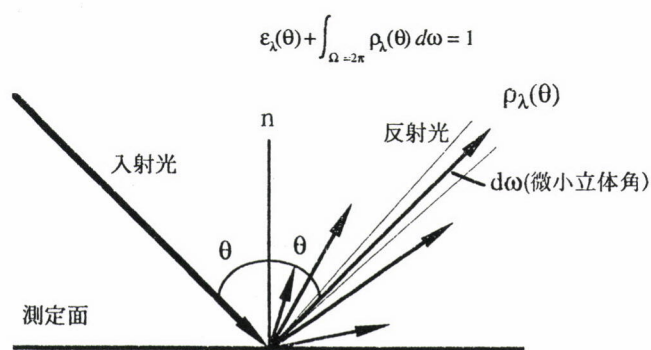


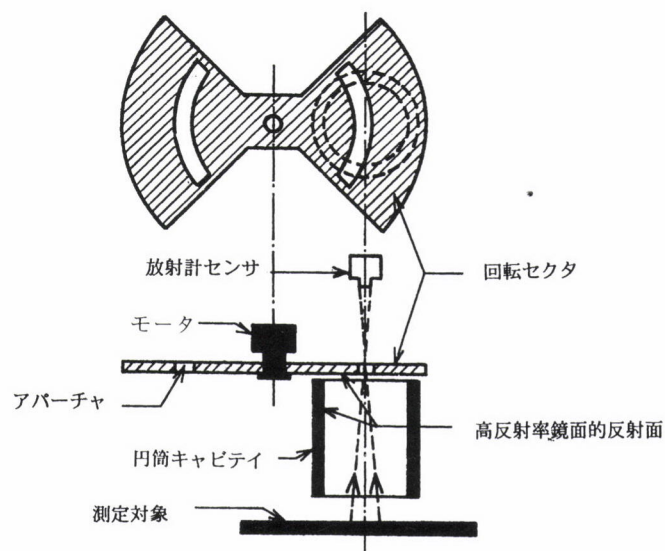
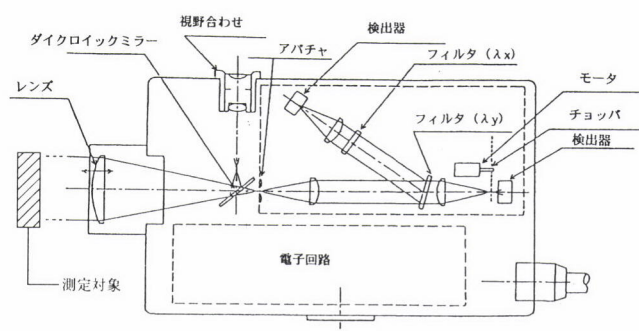
図8 放射率と反射率の関係

率が相補的な関係にあることを利用して放射率を求める方法です。すなわち、図8に示すように、試料面法線から θ 方向の分光放射率を $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ とし、鏡面对称方向から入射した放射の θ 方向への分光反射率を $\rho_{\lambda}(\theta)$ としますと、両者の間には次式の関係式が成り立ちます。

$$\varepsilon_{\lambda}(\theta) + \int_{\Omega=2\pi} \rho_{\lambda}(\theta) d\omega = 1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $d\omega$ は微小立体角、積分の意味は半球面内(2π sr)に散乱する反射成分の和をとることを意味します。この手法はミラーなどの反射体あるいは黒体光源などの放射体を測定対象に対して何らかの幾何学的配置に設置して、式(10)の関係をうまく取り扱うことによって、測定対象の放射率と温度を同時に測定する方法で、ハイブリッド法とも呼ばれます。図9はこの考え方で最初に実用化された温度と放射率の同時測定法です⁷⁾。この方法は円筒キャビティを測定対象に対向させて設置し、キャビティ内と測定面の間での放射の多重反射がある場合とない場合に応じた2種類の放射信号を取り出し、両者の演算によって放射率を求め、さらに温度を式(7)に基づいて得るものです。この種の手法は、放射率と反射率の物理法則に基づいているため、もっとも合理的な計測法なのですが、キャビティのような反射体と測定面の間隔を一定に保つこと、あるいは十分離して設置する(リフトオフ)ことが困難であることなど、現実的な問題点を抱えています。このリフトオフの問題を緩和する実用化がこの方面での研究・開発の焦点になっています⁸⁾。リフトオフの問題が解決すれば最も汎用性のある手法になるでしょう。

最後の3つ目の手法は2波長以上の放射輝度スペクトルの測定だけを用い、その間の何らかの関係を別途実験的に求めておいて、放射率を推定し、温度を計算する方法です。よく知られている2色温度計もこの範疇の手法として分類できますが、一般に多波長温度計と呼ばれています。この方法はかなり以前より旧ソ連、欧米を中心にいろいろな研

図9 円筒キャビティを利用した温度と放射率の同時測定法⁷⁾図10 TRACE法の構成⁹⁾

究・開発がおこなわれています。図10は最近実用化されたTRACE法と名付けられている放射温度計です⁹⁾。この方法は、測定対象の2つの分光放射率 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ の間の関係式

$$\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2) \quad \dots\dots\dots (11)$$

を実験的に求めておき、式(11)と真の分光放射率と見かけの分光放射率の間で独自に成り立つ関係式との交差する点を求めるアルゴリズムにより、放射率を求めるものです。この種の手法は2つ目の手法とは異なり、分光放射輝度だけの情報から温度を求めるので、リフトオフの問題はなく、測定系を簡単な構成で実現できるところに実用的に大きな利点があります。

4 おわりに

鉄鋼プロセスと放射測温法は歴史的ないきさつから技術的な相性のよさといった面まで含め、深く長い関わりがあります。多岐に渡る鉄鋼プロセスに汎用的に使用できる放射測温法というもの、いままでの記述からも非常に困難であることが伺えるでしょう。測定対象と測定環境に適合

した個々の放射測温法を考え出していくという手順が不可避です。しかし、今年度（平成9年）日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会では「鋼板表面の光学的特性のモデリング」研究会を発足させ、例えば表面傷からの光反射特性や放射率特性変化を表現できるシミュレーションモデルを構築することに取り組み始めました¹⁰⁾。このような研究会の成果から、いままでより効率的に計測原理や方法を行う手段を提供することができるようになるかも知れません。成否は今後の課題として残されています。本稿がいささかでも鉄鋼プロセスにおける放射測温法の全体像の把握理解と今後の発展のヒントになれば幸いです。

参考文献

- 1) 天野清：量子力学史，（1949）[日本科学社]，p.1-41
- 2) 井内徹：鉄鋼業における計測技術の応用と進歩，第47回湯川正夫記念講演，日本鉄鋼協会九州支部主催，5月（1993），p.1-13
- 3) 井内徹，大野二郎，草鹿履一郎：連続焼鈍炉内鋼板真温度測定システムの開発，鉄と鋼，61（1975）8，p.2076-2087
- 4) 山田善郎：消耗型光ファイバ放射温度計による溶融金属測温，第96回SICE温度計測部会資料（2月2日），（1996），p.17-21
- 5) Dils, R.R.: High-temperature optical fiber thermometer, J. Applied Physics, 54（1983）3，p.1198-1201
- 6) Land Product Data Sheet 57: Surface pyrometers and thermometer
- 7) 井内徹：温度と放射率の同時測定法とその鉄鋼プロセスへの応用，鉄と鋼，65（1979）1，p.97-106
- 8) 山田善郎，湯浅大二郎，上杉満昭，山田健夫，真鍋俊樹，井上紀夫，山内賢志：棒状光源反射像による放射率補正温度計測，第35回SICE学術講演会予稿集，111A-6，（1996），p.321-322
- 9) 田中富三男：熱放射に基づく真温度推定，計測と制御，31（1992）9，p.930-936
- 10) ICS NEWSLETTER：研究会報告，日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会，No.2，6月1日発行（1997），p.5

（1997年5月29日受付）