

# 鉄鋼業における高温測定技術の現状と問題点

田村 洋一\*

## Present Status of High Temperature Measurement in Steel Industry

Yoichi Tamura

High temperature measurement methods in steel industry are presented. Items on contact temperature measurement are temperature measurement error of R and K thermocouples, characteristics of a new Nickel-based thermocouple material (Nicrosil-Nisil thermocouple), a shunt error of a sheathed thermocouple and a heat resistant data logger.

For non-contact temperature measurement methods, basic equations which can be applied to nearly all radiation pyrometer are presented. Concepts on how to select an optimum wavelength of a radiation pyrometer and emissivity of steel material are also described. Various applications of the radiation pyrometry in steel industry, such as temperature distribution measurement by a linear array, applications of an optical fiber, temperature measurement by using specular reflection characteristic of a material, temperature measurement of steel in a reheat furnace are presented. Finally, a new traceability system for the radiation pyrometer is described.

### 1. 緒 言

日本の鉄鋼業は石油ショック以来、生産量は年産1億トン前後で推移し、原燃料価格の高騰、中進国の追いあげなどに対して国際競争力を維持するために省エネルギー、プロセスの連続化による工程省略、成品の高級化などにより対処してきた。鉄鋼業では高温で製錬、加工が行われるため上記ニーズに対して正確な温度計測が常に要求され、その必要性から種々の技術開発が行われてきた。

温度計測の研究はその重要性から古くから行われてきた。高温で耐え得る新しい素材が少ないため新しいシーズの適用は比較的少ないが、応用技術開発には見るべきものがあつた。また熱間圧延工程では材料が約90 km/hの高速で走行するため本質的に非接触測温法が強く要望されることも特長の一つである。

鉄鋼業での高温測定の現状と今後の課題についてその概要を述べる。

### 2. 接触式温度計測法

接触式とは測温対象と温度計とが物理的接触状態であるとき計測可能な方法を意味する。接触法のうち現在鉄鋼業で使用されているのは熱電対法がほとんどであり、完全に生産設備に定着した技術である。その現状と最近の話題などにつき概説する。

#### 2.1 鉄鋼業での熱電温度計の使用状況

熱電温度計に使用される熱電対の種類はR(PR-13)とK(CA)が主体であり、主に温度範囲で使い分けられている。

溶鋼温度は高温(1500~1700°C)であるため連続計測が難しく消耗形浸漬熱電対<sup>1)</sup>が使用されている。この方法は細線(0.1~0.15mmφ)のR熱電対をU字形の石英管に入れた状態で溶鋼に直接浸漬することにより迅速に温度を計測する方法である。測温プローブは1回のみの使用であるが、広く鉄鋼業で使用されている。

加熱炉などの炉温計測においては、温度計測能力が1300°Cまでは要求されるのでR熱電対が一般に使用されている。R熱電対は酸化雰囲気中、特に大気中加熱で

\*住友金属工業(株)制御技術センタ：兵庫県尼崎市西長洲本通1-3 〒660

Sumitomo Metal Industries Ltd. Instrumentation & Control Technology Center  
No 3, 1-chome, Nishinagahondori, Amagasaki, Japan 660

はきわめて安定で、かつ精度の良いものであるが、水素や金属蒸気などにより劣化するのでその保護に注意を要する。しかしながら雰囲気による劣化は一般的通念としては存在するが、データが系統的に整理されているとは言えない。

1000°C以下の温度ではK熱電対が利用されている。以前は熱起電力が多少大きいという理由でJ(IC)熱電対が使用されたが最近では使用されない傾向にある。

こうした一般的状況のなかで新しい素材(熱電対、保護管などを含む)の開発と利用技術の開発が進められてきた。

2.2 溶鋼温度連続計測の試み<sup>2,3)</sup>

溶鋼温度連続計測法の開発は、鉄鋼業で計測技術開発に従事する研究者の最大の目標の一つである。したがって古くからその試みがなされてきた。熱電対法と光学法が試みられてきたが前者が主体である。

熱電対素材としては白金系のものが利用されてきた。保護管として新しい素材が開発、実用化されるごとにテストが行われてきている。試験された保護管の材質としては、モリブデンとアルミナの焼結体<sup>4)</sup>、モリブデンとジルコニアの焼結体<sup>5)</sup>、アルミナと窒化珪素の焼結体<sup>6)</sup>、高純度アルミナ磁器<sup>6)</sup>やボロンナイトライドなどである。モリブデンとジルコニアの焼結体を保護管に用いた方法は、オーストリアのフェスト(Vöest)社がV-P<sup>7)</sup>プロセ

スという名称で連続測温システムを売り出したが、実用化するまでには至っていない。いずれの場合でも溶鋼温度計測で数時間~10数時間の耐久性であり、製造現場で常用できる程の価格、性能に達しておらず、操業解析の試用程度にとどまっている。今後の新しい技術開発が要望されている。

2.3 白金熱電対の劣化原因

白金熱電対に生じる劣化の原因究明と対策例の一つを示す。白金系の熱電対は通常非金属保護管と共に使用される。しかし高温において強度が必要な用途がある。例えば高炉の送風温度計測においては風速が大きいこと、コークス炉燃焼室温度計測においては長尺となるため実用上強度が要求される。このときには白金熱電対を金属保護管と併用する必要がある。このような使用例においては白金熱電対の著しい劣化現象が生じていた。その原因を究明し、長寿命化が達成できている<sup>8~10)</sup>。

劣化原因の調査は以下のように実施した。劣化したR熱電対の白金脚と未使用の白金との組合せ、および劣化したR熱電対の白金ロジウム脚と未使用の白金ロジウムの組合せで、2組の熱電対を構成し1200°Cの炉で検定した。その後先端部を200mm切断し、再度2組の熱電対を構成し同様の検定を繰り返した。その結果をFig. 1(a)に示す。それぞれの熱電対素線に大きな熱起電力の変化が生じているが、白金脚の変化が白金ロジウム脚の変化

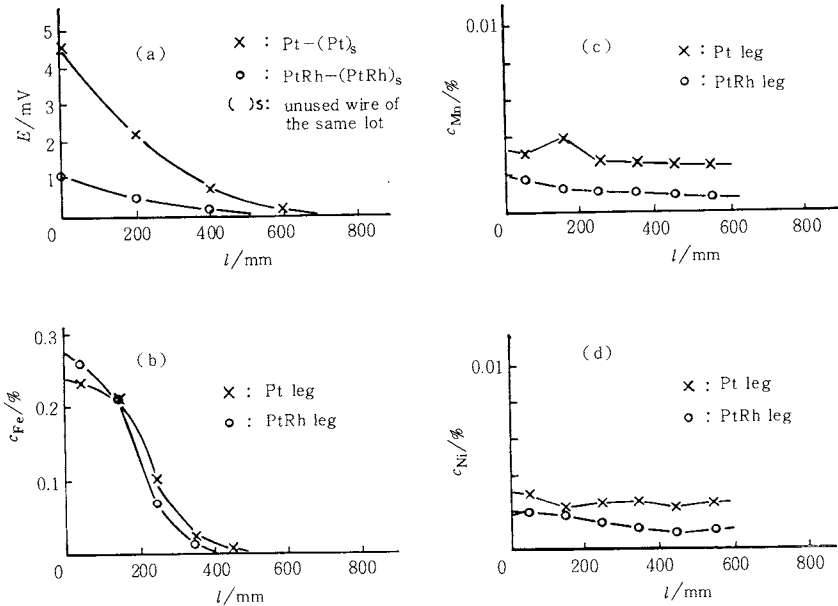


Fig. 1 Relationship between error e.m.f. of R thermocouple and foreign metal concentration. Figures are shown as a function of the length from the hot junction.

に比べて大きい。

次に切断されて残ったサンプルにつき、100 mm 単位で分析し金属元素の量を原子吸光光度法により定量した。その結果を Fig. 1 (b) から (d) に示す。鉄の濃度が 0.2 ~ 0.25% と非常に高いこと、その濃度分布と熱電対の劣化状況とが良く対応するので、R 熱電対の劣化は鉄の存在によるものと考えられる。鉄は金属保護管から鉄蒸気として発生し、アルミナ保護管を抜けて R 熱電対に達して劣化を起したものと推察できる。

上記劣化原因の解析結果から、気密性のすぐれた石英保護管を、金属保護管とアルミナ保護管の間に挿入した 3 重保護管とすることにより 1150°C で約 2 年の寿命が見込める結果が得られた。現在コークス炉の燃焼制御用の温度検出端として実用されている。

### 2.4 K 熱電対に生ずる誤差要因

最近 K 熱電対に生ずる誤差について報告されているのでその概要について述べる。

#### 2.4.1 磁界の影響 (Ettingshausen-Nernst 効果, EN 効果)

EN 効果は模擬燃料棒を用いたテストで観察された現象であり<sup>11)</sup>、Fig. 2 に示すように温度勾配と直交する磁場に直交する電界が発生するもので、その値は次式で示される。

$$\vec{E} = Q \cdot \nabla \vec{T} \times \vec{B} \quad (1)$$

ここで  $\nabla \vec{T}$  は温度勾配であり、 $\vec{B}$  は磁束密度であり、 $Q$  は EN 係数が物質により決まる係数であるが、温度と磁界の関数である。有限長さを有する導体に発生する起電力は (1) 式を積分することにより得られる。

熱電対素材に関してはニッケルの  $Q$  値が大きく、合金線では K 熱電対のアルメル線の  $Q$  値が大きく、クロメル線は問題にならないようである。アルメル線の  $Q$  値を  $2 \times 10^{-10} \text{ V/C} \cdot \text{G}$  とし、模擬燃料棒で考えられる条件として

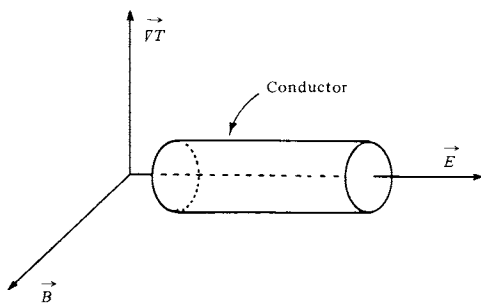


Fig. 2 Vector relationship between the temperature gradient, the magnetic induction and the electric field of Ettingshausen-Nernst effect.

$\nabla T = 35^\circ\text{C}/\text{mm}$ ,  $B = 170$  ガウスとし長さ 0.5m とすると約 600  $\mu\text{V}$  の起電力が発生し、これは 15°C の誤差に相当する。したがって強磁場を伴う環境での計測には注意を要する。対策としては他の熱電対を用いるか、K 熱電対を用いるときには熱電対の引き出し方向に注意を払う必要がある。キュリー点 (アルメル線の場合約 150°C) を越えると  $Q$  値はゼロになるので高温部では発生しない。また交流磁場に対しては EN 効果も交流信号として熱電対出力にあらわれるはずであるから消去可能となる<sup>12)</sup>。

#### 2.4.2 短範囲規則性の影響

K 熱電対を 250°C から 550°C 位の温度範囲に置くと、短時間に熱電能が 1 ~ 1.5% に及ぶ増加が生ずる。これはクロメル素線のゼーベック係数が増加するためである。Fig. 3 に Fenton が発表<sup>13)</sup>したデータを示す。この原因として Kollie らはクロメル線の合金成分の原子がランダムに配列されているものが、ある範囲内で原子配列が規則性をもつことで説明している<sup>14)</sup>。この現象は短範囲規則性 (Short-range Ordering) と呼ばれている。高温で使用する場合には、この温度域にさらされる部分が素線の一部であること、上記温度範囲を越えると熱電能は正常に回復するので熱起電力に現われるこの誤差の比率はもっと小さい<sup>15)</sup>。しかし精密な測温に対しては注意を要する。

上記誤差に対する対策は非現実的なものが多く、後述するナイクロシル-ナイシル熱電対はこの問題が解決されているとのことで、その利用研究がなされることが望ましい。

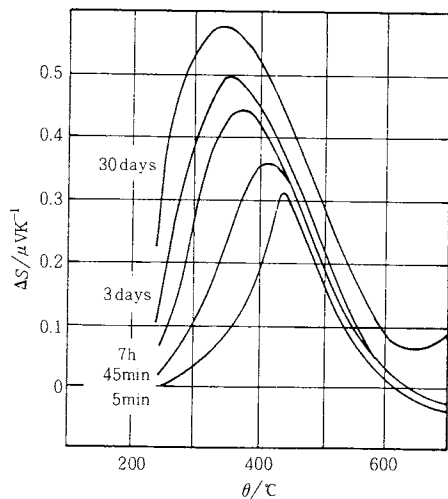


Fig. 3 Change in Seebeck coefficient as a function of heat treatment temperature for various periods.

2.5 ナイクロシル-ナイシル熱電対

ナイクロシル-ナイシル熱電対(以下N熱電対と略す)は、オーストラリアのBurleyが開発した<sup>16)</sup>ものであり、その後各国でその特性を評価するテストが実施されている<sup>17)</sup>。この熱電対の開発の主なねらいは高温での熱起電力が安定であり、耐酸化性の良い特性を得ることである。その主成分はナイクロシル(Nicrosil)がNi-14.2wt% Cr-14 wt% Siであり、ナイシル(Nisil)がNi-44 wt% Siである。この成分によればK熱電対に生ずる短範囲規則性により生ずる可逆的誤差要因は生じないといわれているが、必ずしも正しいと言えないデータも公表されている<sup>18)</sup>。またキュリー点は常温以下となるので磁場の影響は常温以上では生じないはずである。

日本学術振興会製鋼19委員会第2分科会(测温, 主査菅野猛)においては、鉄鋼業での利用を念頭に1000℃から1300℃の温度範囲において大気中で加熱し特性調査を実施した<sup>19)</sup>。使用した熱電対は国内外4社の外径3.2 mmのものである。実験はK熱電対と比較できるように行った。その結果では4社間の差異は認められず、初期の熱起電力特性はNBS(National Bureau of Standards)の発表した起電力値<sup>19)</sup>を基準として0.4%の精度以内に入っていた。高温での熱起電力のドリフトは1000℃においてはK熱電対より少ないが大きな差はない。しかし1100℃, 1200℃においては明らかにK熱電対より安定性が良好である。1200℃での試験結果をFig. 4に示すが、N熱電対のドリフト量はK熱電対のその1/4以下である。また1250℃の結果をFig. 5に示すが、途中断線したものがああるものの、初期に大きくドリフトし、その後安定する傾向にあり、1250℃までの使用が可能と判断できる。しかし常用限度は1200℃と推定できる。

現在ASTM(American Society for Testing and

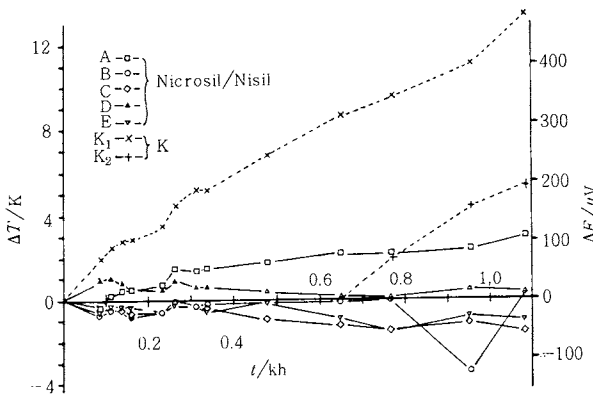


Fig. 4 Thermal e.m.f. drift of Nicrosil/Nisil and K thermocouples at 1200°C in air.

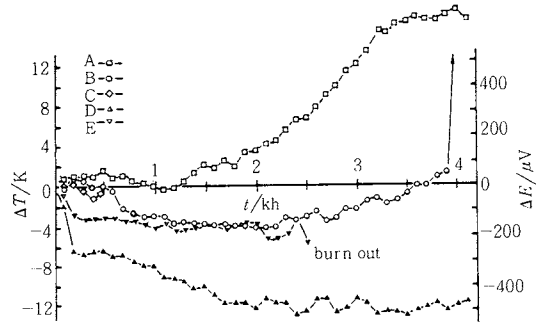


Fig. 5 Thermal e.m.f. drift of Nicrosil/Nisil thermocouples at 1250°C in air.

Materials)からは起電力表が示されている(E 20 D16)し、IEC(International Electrotechnical Commission)では規格化する方向で検討されているので、今後利用技術が進歩し産業界に普及することが望まれる。

2.6 シース熱電対

シース熱電対は、長尺物が容易にできる、曲げられる、絶縁が不要などの利点があるため種々の用途に利用されている。シース熱電対を用いたことにより実現できた测温技術も相当ある。その一例として高炉などの耐火物浸食診断技術用センサがある<sup>20)</sup>。センサ部は複数本のシース熱電対を熱接点の位置を変えて設置したものである。その外側に外シースをかぶせ2重シース構造とし、その外径が8~12mmと小形に設計されている。このセンサにより耐火壁内の温度分布を計測し耐火物の侵食量を推定する技術が確立されている。

シース熱電対の構造は、熱電対素線が絶縁物(通常はマグネシア)で絶縁された状態で金属シース内に封入されている。したがって金属シースが健全であれば熱電対の劣化は一般に起こりにくく、金属シースの寿命でほぼ全体の寿命が決定されるものと判断できる。しかし細径の金属シース内に封入されているため新しい問題が生じている。その一つにシャントエラがある。

シャントエラは熱電対素線間の絶縁抵抗が低下することにより発生する。とくに中間部温度が熱接点温度より高いときに顕著に発生する。誤差を定量的に解析するモデルとして2線式と3線式が提案されている。3線モデルは2本の熱電対素線とシース金属を3線として扱ったものでその等価回路<sup>21)</sup>をFig. 6に示す。中間部を1100℃に加熱し、测温接点温度と中間部加熱長さを変えた実験結果と、上記モデルを用いて解析した結果をFig. 7に示す。図中のRifは絶縁抵抗の温度特性を数式化したとき全体にかかる係数である。この場合は

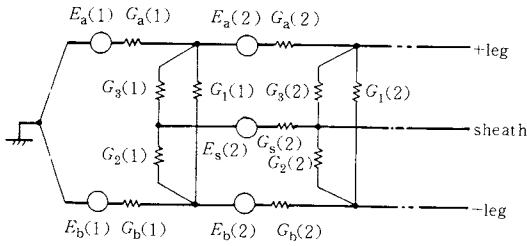


Fig. 6 Approximate electrical model of shunt error of sheathed thermocouple.

$G_a, G_b, G_s$  : Conductance of thermocouple wires (a and b) and sheath (s).  
 $G_1, G_2, G_3$  : Conductance between thermocouple wire and sheath.  
 $E_a, E_b, E_s$  : E.m.f. at each node.

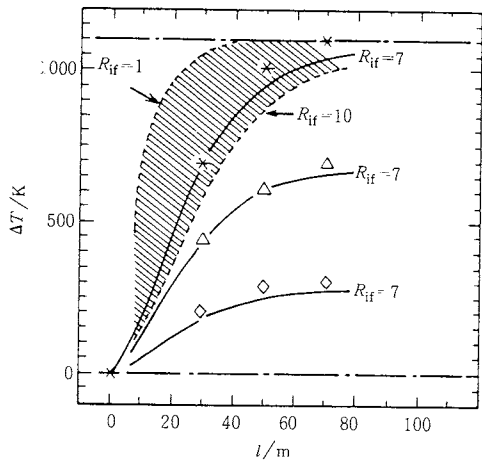


Fig. 7 Comparison between theoretical and experimental shunt errors of sheathed thermocouple as a function of the length of heating zone. Solid lines show calculated values. Hot junction temperatures are 0°C (×), 400°C (Δ), and 800°C (◇).

Rif=7で良く一致する。これらの結果より実物の絶縁抵抗値が決定でき(Rifの決定)、温度パターンが決まればシャントエラの値が評価できる見通しが得られた<sup>22,23)</sup>。

2.7 炉内材料温度計測～耐熱型データロガ

加熱炉、熱処理炉などにおいては材料の温度履歴すなわち温度パターンは製品の品質、歩留り、省エネルギーに大きく関係するため容易に計測する技術の開発が望まれてきた。ICメモリを内蔵したデータ収集装置を断熱装置内に入れ、材料とともに炉内に挿入し温度パターンを計測する方法が開発されている<sup>24)</sup>。シース熱電対からの温度情報はA/D変換されICメモリに記憶され、炉か

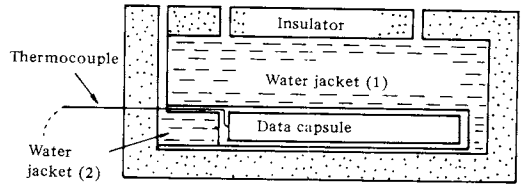


Fig. 8 Schematic figure of a heat-resistant data logger.

ら材料が抽出されたのちデータ収集装置を回収し、データを再生する。

当初、加熱炉用として1200°Cの炉内で4時間計測できる装置を開発目標として進め、所期以上の性能が得られた。この装置を耐熱型データロガと呼んでいる。断熱装置は水の蒸発熱を最大限に活用する構造であり、プロトタイプタイプの断熱装置の構造をFig.8に示す。

回転する鋼管の温度パターンの計測方法は、断熱用の水が回転中に漏れない構造とすることにより実用化された。このことにより従来計測できなかった熱処理中の回転する鋼管の温度パターンの計測が可能となり、生産性向上、省エネルギーなどに多大の効果をおよぼす<sup>24)</sup>ことができた。

3. 非接触式温度計測法<sup>1)</sup>

非接触測温法については、光学的方法すなわち熱放射を利用する方法が実用化されている。本方法の基本特性と鉄鋼業における最近の開発事例について述べる。

3.1 熱放射に関する一般公式

熱放射の分光放射輝度はその物体の温度に依存し、物体が黒体の場合にはプランクの放射則に従う。

$$L(\lambda, T) = \frac{2c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (2)$$

ここでλは波長(m)、Tは温度(K)でありc<sub>2</sub>は放射の第2定数でその値は0.014388m・Kである。

現在工業的に利用されている放射温度計においては、ほとんどの場合ウィーンの公式((3)式)が適用できる。

$$L(\lambda, T) = \frac{2c_1}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (3)$$

(3)式をkT<sup>n</sup>の形で表わすと(4)式が求まる<sup>1)</sup>。

$$L(\lambda, T) = kT^n \quad \text{ただし } n = c_2/\lambda T \quad (4)$$

上式は放射温度計の出力変化が使用する波長と温度により大きく変化することを意味する。例えば鉄鋼業によく利用されている検出器Siセルに関しては、λ≒0.9μm、T=1000Kとするとn≒16となり温度変化により大きく分光放射輝度が変化する。

3.2 放射温度計の波長の選択

放射測温においては使用する波長の選択は非常に重要

である。ここでいくつかの選択の考え方を示す。

熱放射の特性から低温になるほど長波長の赤外線割合が多くなるので、それに適した波長を選択する必要があり、低温の測温ほど長波長の赤外線が利用されている。

一般の熱放射体は黒体条件を満たさないこと、光路中での吸収などにより受光エネルギーは(4)式を満たさず次式のように表わせる。

$$L(\lambda, T) = \epsilon \cdot \alpha \cdot kT^n \underline{\Delta a} \cdot kT^n \quad (a = \epsilon \cdot \alpha) \quad (5)$$

ここで  $\epsilon$  は物体の放射率、 $\alpha$  は光路中の透過率である。(5)式より次式が得られる。

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta a}{a} \quad (6)$$

すなわち  $n$  値が大きいほど  $a = \epsilon \cdot \alpha$  の変動に対して測温誤差は小さくなる。(4)式より波長が短いほど  $n$  値が大きくなり有利となる。ただし非線形が強くなるので注意を要する。

鉄鋼プロセスにおいては高温で熱間加工を行うため水蒸気が発生する。水蒸気の透過率も  $1 \mu\text{m}$  以下の波長の方が有利である<sup>25)</sup>。この特長と前述の  $n$  値が大きいこと、シリコンセルが安定性にすぐれており構造が簡単であるため、発表<sup>26)</sup>されて以来鉄鋼業において急速に普及してきた。

2色温度計は2波長での分光放射輝度の比から温度を求める原理であるため次式が得られる。

$$R = \frac{\epsilon_{\lambda_1} \cdot \alpha_{\lambda_1} \cdot L(\lambda_1, T)}{\epsilon_{\lambda_2} \cdot \alpha_{\lambda_2} \cdot L(\lambda_2, T)} \\ = \frac{a_{\lambda_1}}{a_{\lambda_2}} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp\left[-\frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right] \quad (7)$$

上式において  $a_{\lambda_1} = a_{\lambda_2}$  が成り立つときには(7)式は温度のみの関数となるが、一般的に成り立つとは言えない。(7)式において  $1/\lambda_1 = 1/\lambda_1 - 1/\lambda_2$  なる  $\lambda_t$  を考え、 $a_{\lambda_1}/a_{\lambda_2} = a$  とすれば(3)式から(6)式までの展開がそのまま適用できる。したがって2色温度計の一方の波長を用いた放射温度計に比べて2色温度計の  $n$  値は小さくなる。しかし放射率と透過率の積の変動は比を取ることでより除去でき得る特長を有している。この特長と欠点のどちらが実際の計測対象についてまさるか2色温度計使用の有効性が評価できると思う。実際に使用する時にはなんらかの手段で上記項目を確認することが望ましい。

また赤外線領域の特定波長を利用することも有効である。プラスチックの薄膜の測温にC-H結合の吸収帯を利用することやガラス産業においては不透明になる波長を利用する例などがある。

### 3.3 放射率

放射測温を適用する場合には、計測対象の放射率の挙動を知っておく必要がある。しかしながら現状では必ず

しも体系化されたとは言えず、放射率の基礎的理論の研究から、実ラインでの検証、実測技術の確立が必要である。

鉄、鉄合金の放射率の温度、波長依存性についての検討が成されている<sup>27)</sup>。波長が  $5 \mu\text{m}$  より長いときには自由電子モデルから計算されるが、可視域については束縛電子に関する分散を考慮する必要があり、Durde-Lorentz 分散公式により全波長にわたって放射率の示す性質を矛盾なく説明できるとしている。鉄についての計算結果と実測結果の対応を Fig. 9 に示す。

酸化膜が生成する過程での放射率の変化例を Fig. 10 に示す<sup>28)</sup>。鉄の試料を一定温度で加熱し、時間とともにゆっくりと酸化膜を生成し、その間の放射率変化を調査したものである。時間とともに値が振動的に変化すること、しかも短波長側から変化しているのがこの現象は光干渉によるものと考え、モデルの検討がなされている。

一般に鉄鋼での熱間加工中は酸化膜が十分生成しているため、酸化膜の表面温度を計測することになる。この放射率をオンラインで計測した結果も報告されている<sup>29)</sup>。実測はキャビティ法と2波長放射温度計方式を用い、普通鋼の放射率として  $0.76 \pm 0.026$  ( $\sigma$ ) が得られている。

以上のように放射率についていくつかの検討がなされ

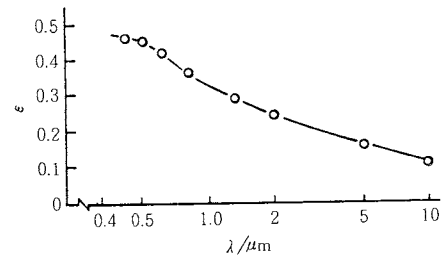


Fig. 9 Comparison between theoretical and experimental emissivities of Fe as a function of wave length. The solid line shows calculated values.

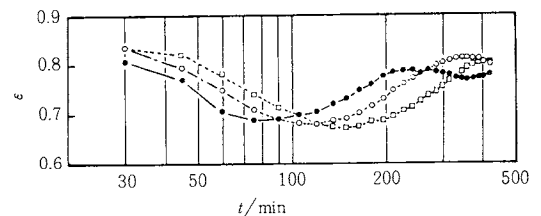


Fig. 10 Emissivity change of steel as a function of heating time. The wavelength of a radiation pyrometer are  $1.76 \mu\text{m}$  (solid circle),  $2.06 \mu\text{m}$  (empty circle), and  $2.34 \mu\text{m}$  (empty square).

ているが、放射測温の精度をより向上するとともに適用を拡大するためには放射率の理論的、実験的検討がより一層進められる必要がある。

### 3.4 鉄鋼業における放射測温の新しい開発例

鉄鋼業では非接触測温法を多くのプロセスで必要としている。また石油ショック以後は国際競争力を維持するために省エネルギー、品質向上、工程の連続化などを目的とした技術開発がなされ、そのなかで種々の温度計測技術の開発が行われた。その代表例を以下に示す。

#### 3.4.1 リニア・アレイによる温度分布計測

シリコンリニア・アレイを用いて一次元温度分布計測する技術が開発されている。寸法、位置計測などにおいては主にリニア・アレイのデジタル機能が用いられているが、ここではアナログ量を扱うため種々の工夫が加えられている。

リニア・アレイは出力電圧のダイナミックレンジが狭い。広範囲な温度計測を行うために、リニア・アレイの蓄積効果を活用し走査周波数を変えることにより温度計測範囲を拡大している<sup>30)</sup>。その状況を Fig.11 に示す。また素子間の感度ばらつきが10%程度存在する。前述のように  $n$  値が大きいことから温度誤差で1%程度になる。その他にレンズの収差やゼロ点ドリフトなどの誤差要因がある。感度むらとレンズ収差は再現性があるので特性を記憶し補正することが可能である。ゼロ点ドリフトはアレイの温度が主原因であるため温度を実測し補正することにより、1000℃の温度計測時に上記誤差を0.5 K以内に改善することができると報告されている<sup>31)</sup>。

本温度計は走行する材料の温度分布計測や細径の線材が振動し従来の放射温度計では視野の確保が難しいプロセスに有効に活用できるであろう。

#### 3.4.2 光ファイバ利用の放射温度計

光ファイバを使用する一般的な利点は防爆構造が可能、

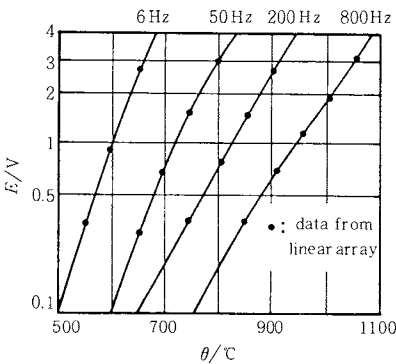


Fig. 11 Output voltage vs. temperature curves of a linear array for various scanning frequencies.

耐電磁誘導特性、小形化などが挙げられる。鉄鋼業での計測環境は非常に厳しいので、センサヘッドを小形化できることにより環境(温度、水、蒸気、ほこりなど)からセンサを保護することが容易となる。この利点あるいは他の利点を組合せて開発された例は以下の通りである。

- (1) 電縫鋼管の溶接部の温度パターンを求めるためのイメージガイドの利用<sup>32)</sup> — 小形、耐電磁誘導特性の利用、
- (2) 連続鑄造の鑄型直下部の狭いスペース、水や水蒸気の多い雰囲気での温度分布計測<sup>33)</sup> — 小形、伝送路の環境問題なし、
- (3) 誘導加熱炉への適用<sup>34)</sup> — 小形、耐電磁誘導 (Fig. 12 参照)、などである。

光ファイバ技術の進歩は光通信の技術開発によるものであるため、デジタル伝送が基本となっている。しかし上記のように放射温度計として利用するときにはアナログ伝送を行う必要があり、光部品(コネクタなど)の伝送損失などアナログ伝送を行うときにはまだ満足できる特性とは言えない。したがって今後の技術開発の進展が望まれる。

#### 3.4.3 材料の鏡面反射の利用

鋼板などの鏡面反射特性を利用した方法が開発されている。その一例を Fig. 13 に示す<sup>35)</sup>。一对の放射温度計と反射ミラを測定対象物面上の測定点Oに立てた法線Nに対し、角度 $\theta$ で互いに鏡面対称的に配置する。角度 $\theta$ は鏡面反射成分のみと考えられる条件に選ぶ。このときミラを完全反射体、ミラの前の回転セクタにて完全吸収体と完全透過体の条件を作り得ると、両方での放射温度計の出力は鋼板の温度と放射率のみの関数となり解が求

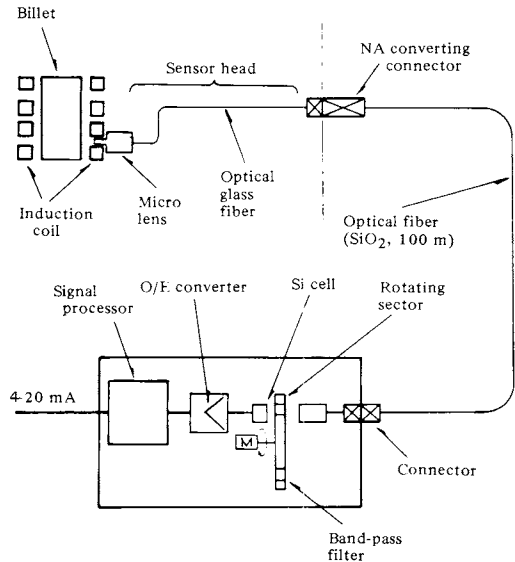


Fig. 12 Schematic diagram of a radiation pyrometer using a long optical fiber.

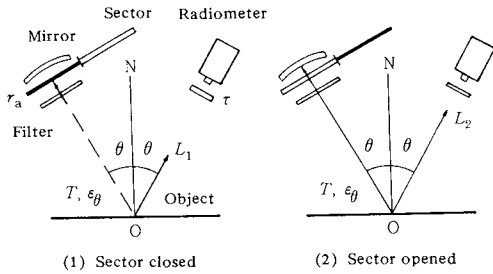


Fig. 13 Principle of temperature and emissivity measurements using specular reflection. Both are obtained from measured radiances  $L_1$  and  $L_2$ .

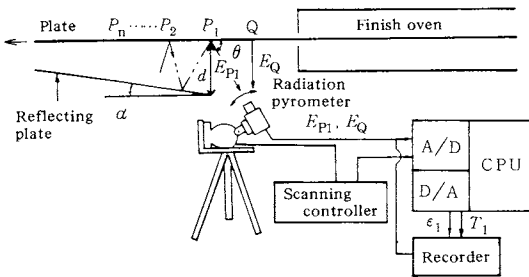


Fig. 14 Principle of temperature and emissivity measurements using multiple specular reflection. Both are obtained from  $E_q$  and  $E_p$ .

まる。実際には上記条件を完全に満足しないので実験的に条件を求めている。

また多重反射を利用する方法<sup>33)</sup>も開発されている。Fig. 14 に示すように測定対象に対して角度  $\alpha$  にて、反射率既知の反射板を設置する。測定対象からのみの放射量 ( $E_q$ ) と、多重反射の結果求まる放射量 ( $E_p$ ) から温度と放射率を求める方法である。

鏡面反射成分を利用したこれら新しい試みが実用化され、広く普及されることが望まれる。

### 3.4.4 高温炉内の温度計測

高温炉 (~1400°C) 内へ計測装置を挿入して温度計測する例は従来ほとんどなかった。しかし石油ショック以後の強い省エネルギー指向のために実施されるようになった。

--例としてコークス炉の燃焼室内の壁温度計測のために水冷3重管内に放射温度計を内蔵した計測装置が開発されている<sup>36)</sup>。その構造を Fig. 15 に示す。炉温 1300~1400°C の炉内に直接挿入し、炉の壁温度を計測し、操業条件と温度分布の関係を求め、解析することにより省エネルギーに大きく寄与した。またこのように計測装置を炉内に入れる技術は、高温炉の多い鉄鋼業では温度計測以外に発展性のある技術と評価できる。

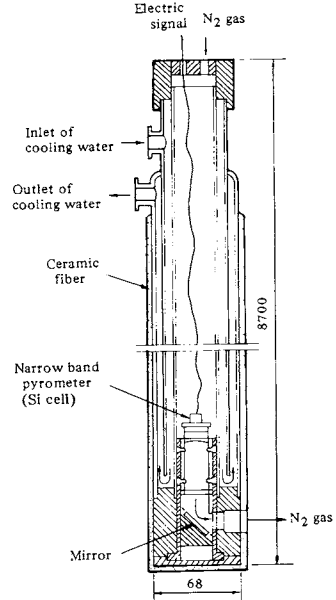


Fig. 15 Schematic figure of a temperature measurement probe for a coke oven.

また加熱炉(約 1200°C)や連続焼鈍炉内の材料温度計測の開発も多く行われている。通常炉壁温度の方が材料温度より高いため、炉壁からの放射が雑音となり正確な材料温度計測が難しくなる。この雑音の除去に色々な工夫がなされている。詳細内容は紙面の都合上省略するので解説記事<sup>37)</sup>を参照されたい。

### 3.4.5 放射温度計のトレーサビリティ

現在光高温計以外の一般の放射温度計は国家標準にトレーサブルな状態でない。この現状に対して計量研究所から提案された体系を Fig. 16 に示す。それは実用形定点点黒体炉<sup>38)</sup>(純金属を封入しその凝固点を利用する)と、(3)式のウィーン公式を満たす単色(波長帯域がせまい)の標準用の放射温度計<sup>36)</sup>を用いる体系<sup>40)</sup>である。複数個(3個以上)の実用形定点点黒体炉で単色放射温度計の特性をあらわす定数((8)式の A, B, C)を決定する方法である。このような作業は従来は計量研究所またはその代行機関で実施されていたが、本方法では一次標準を備える事業所が実施するのが特長である。

$$V(T) = C \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{AT+B}\right) \quad (8)$$

ここで  $V(T)$  は単色放射温度計の出力電圧、 $T$  は温度 (K)、 $c_2$  は放射の第 2 定数 ( $0.014388\text{m} \cdot \text{K}$ )、 $A, B, C$  は定数である。

本方法の実用性を確認するために日本学術振興会製鋼 19 委員会第 2 分科会で共同実験を行った。その結果は、(1)  $0.9\mu\text{m}$  単色放射温度計の校正精度は 660~1100°C の



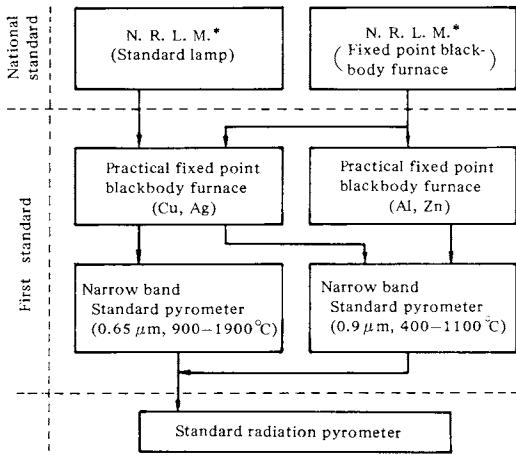


Fig. 16 Traceability system for radiation pyrometers.

温度範囲で $\pm 0.6\text{ K}(2\sigma)$ が期待できる。(2)本校正システムは操作が容易で高度な校正技術を必ずしも必要としない。

なお Fig. 16 に示した  $0.65\mu\text{m}$  単色放射温度計の校正は、計量研究所大阪支所で実施可能である。

#### 4. 結 言

鉄鋼業で現在実用されている、あるいは開発されている高温測定技術の現状と問題点の概略を述べた。温度計測技術とくに放射測温技術は種々の局面で技術開発がなされているため系統的なまとめが出来なかったので判りにくい面が多々あったと思う。個々の技術の説明も十分とはいえないので興味のある方は文献を参照いただければ幸いである。

#### 文 献

- 1) 温度計測部会編, “温度計測” 計測自動制御学会, 東京(1981), p. 119.
- 2) 田村洋一, 計測自動制御学会温度計測講習会資料(1980) p. 33
- 3) 田村洋一, 高温学会誌 **11**, 100(1985).
- 4) J. D. Sharp, *Iron & Steel* 590 (1962 Dec.).
- 5) R. F. Rinesch, *J. Metals* 26 (1967 Feb.).
- 6) 篠原幹三, 計測技術 76 (1977 増刊号).
- 7) *The Magazine of Metals Producing* 33 (1969 Dec.).
- 8) 田村洋一, 山本俊行, 阪口育平, 計測技術 **13-8**, 35(1985).
- 9) 田村洋一, 湯本修介, 山本俊行, 第22回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 709 (1983).
- 10) 田村洋一, 湯本修介, 山本俊行, 計測自動制御学会第1回センシングフォーラム予稿集 p. 49 (1984).

- 11) T. G. Kollie, R. L. Anderson, J. L. Horton and M. J. Roberts, *Rev. Sci. Instrum.* **48**, 501 (1977).
- 12) 奥寺正晴, 小林一夫, 第19回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 127 (1980).
- 13) A. W. Fenton, “Temperature, Its measurement and control in science and industry” **4**, 1973 (1973).
- 14) T. G. Kollie, J. L. Horton, K. R. Carr, M. B. Herskovitz and C. A. Mossman, *Rev. Sci. Instrum.* **46**, 1447 (1975).
- 15) 菊池正文, 小林一夫, 第19回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 129 (1980).
- 16) N. A. Burley, “Temperature, Its measurement and control in science and industry” **4**, 1677 (1973).
- 17) G. W. Burns, “Temperature, Its measurement and control in science and industry” **5**, 1121 (1982).
- 18) 岡田 聡, 稲光政司, 小林一夫, 第23回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 537 (1984).
- 19) N. A. Burley, R. L. Powell, G. W. Burns and M. G. Scroger, *National Bureau of Standards Monograph* 161 (1978).
- 20) 堀内健文, 川手剛雄, 小西正躬, 永井信幸, 鉄と鋼, **70**, 1153 (1984).
- 21) M. J. Roberts and T. G. Kollie, *Rev. Sci. Instrum.* **48**, 1179 (1977).
- 22) 上坂辰男, 川手剛雄, 第24回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 667 (1985).
- 23) 山本俊行, 第24回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 669 (1985).
- 24) Y. Tamura, M. Tatsuwaki, T. Sugimura, T. Yokoi, M. Sano and M. Koriki, “Temperature, Its measurement and control in science and industry” **5**, 505 (1982).
- 25) 白岩俊男, 田村洋一, 鉄と鋼 **59**, 668 (1973).
- 26) R. Barber and T. Land, “Temperature, Its measurement and control in science and industry” **3**, 391 (1962).
- 27) 大野二郎, 計測自動制御学会論文集 **14**, 283 (1978).
- 28) 菱刈 功, 計測と制御 **21**, 1055 (1982).
- 29) 田村洋一, 計測自動制御学会第46回温度計測部会資料(1981).
- 30) 山田健夫, 原田直樹, 小柳弥夫, 計測と制御 **21**, 1050 (1982).
- 31) 菱刈 巧, 鈴木利房, 片山憲作, 井手敏彦, 第22回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 205 (1983).
- 32) 遠藤正雄, 高間館千春, 堀田一之, 鉄と鋼 **70**, 1045 (1984).
- 33) 山田健夫, 原田直樹, 今井清隆, 川畑成夫, 手塚宏之, 寺尾精太, 鉄と鋼 **70**, 1007 (1984).
- 34) 田村洋一, 吉吉良定雄, 渡辺泰之, 渡 正博, 藤本

- 敢, 中村 晋, 第23回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 517 (1984).
- 35) 井内 徹, 田中富三男, 渡辺国俊, 江崎 昂, 増田正宏, 半田 久, 井上 忠, 高藤英生, 鉄と鋼 **70**, 1037 (1984).
- 36) 田村洋一, 山本俊行, 片山昭彦, 奥井信之, 高瀬省二, 鉄と鋼 **70**, 1014 (1984).
- 37) 田村洋一, 計測と制御 **21**, 1039 (1982).
- 38) 佐久間史洋, 服部 晋, 計測自動制御学会論文集 **18**, 52 (1982).
- 39) 佐久間史洋, 服部 晋, 計測自動制御学会論文集 **18**, 482 (1982).
- 40) 服部 晋, 計測と制御 **21**, 1014 (1982).
- 41) 立花種則, 菱刈 功, 小川実吉, 田村洋一, 第24回計測自動制御学会学術講演会予稿集 p. 663 (1985).

## 次回講習会とワークショップのお知らせ

熱測定学会では、定期的に熱分析を中心とした講習会を開催しているが、1月の定例幹事会において、次の講習会とワークショップの開催が決定された。

講習会は、来る5月7日(水)と8日(木)の2日間にわたり、大阪府商工会館で開かれる。これまでの講習会と同様、熱分析の基礎に関する解説が行われ、また、各種の材料への新しい応用が紹介される。熱分析が研究開発を始め、品質管理などへ応用され、その範囲が拡大していることを反映して、これまでもほぼ満員の盛況の中に講習会が開かれてきたが、次回も大きな成果を挙げることを期待したい。

内容の詳細と申込方法などは、4月発行の次号に掲載

される予定であるが、関心のある方は、学会へ問い合わせられたい。

また、前回の講習会のレポートと共に、前回の講習会の翌日に行われたワークショップ「生物系へのカロリメトリーの応用」が本号に報告されているが、次回講習会に引き続き、5月9日(金)、大阪府商工会館において、応用熱測定のワークショップ「高分子材料の研究開発のための熱分析一問題点とその解決法の模索一」が開かれる。ワークショップは、研究業績発表の場ではなく、関連分野間での経験と情報の交換の場を会員に提供するものである。詳細は同じく次号に掲載されるが、関連分野の会員の積極的参加を期待したい。