



多波長温度計の開発と 亜鉛メッキ合金化炉への適用

山本 俊行*・平本 一男*・植松 千尋*・上田 潤*

Multiwavelength Pyrometer for Galvannealed Steel Sheet Temperature Measurement

Toshiyuki YAMAMOTO, Kazuo HIRAMOTO, Chihiro UEMATU and Jun UEDA

Synopsis : The multiwavelength pyrometry problem of inaccuracy in determining the true temperature has been analysed in detail. The results of this analysis and a comparison with numerical simulation results show that a proper calculation method of a temperature and a certain knowledge on the emissivity of the target surface are indispensable to an accurate temperature determination. On the basis of this study a new multiwavelength pyrometer for the use of the galvanneal process is developed with a careful design. In spite of the greatly changing characteristics of the target surface emissivity in the galvanneal process, where zinc-coated steel sheet is rapidly annealed to produce desirable intermetallic coated layer and the surface of the zinc layer changes from highly specular reflectivity with emissivity near 0.1 to a nearly diffuse reflectivity with emissivity as high as 0.7, this new pyrometer is effectively applied and the measurement accuracy is confirmed to be $\pm 10\%$ for temperature and $\pm 10\%$ for emissivity by laboratory simulations and on-line tests.

Key words : multiwavelength pyrometer ; emissivity ; radiation thermometry ; temperature measurement.

1. 緒言

鉄鋼薄板製品への超深絞り性や高耐食性等の要求高度化にともない、冷延や表面処理工程の連続熱処理炉での板温度測定や板温度制御の高精度化は安定した製品品質を確保するうえで緊急な重要課題である。一方これら熱処理炉は通常無酸化または還元雰囲気であり、熱処理の進行にともない被熱処理鋼板表面の粗さや生成酸化膜厚さが変化し鋼板の放射率が変わることはよく知られている。こういった放射率変動が放射测温精度におよぼす影響を低減または補正する目的でいくつかの方法とその適用結果が報告されている。例えば、鏡と鋼板や相向かい合う鋼板間の多重反射を利用し鋼板の見かけの放射率を1に近づけた测温法が山田ら¹⁾や山本ら²⁾から、また補助光源を用い鋼板の反射率を測定しある仮定のもとで放射率を推定して温度と放射率とを同時測定する测温法が井内ら³⁾や福高ら⁴⁾から提案され生産ラインに適用されたと報告されているが、これらの方法は全て測定対象の反射率または放射率特性を仮定しており事前に測定されたそれらの特性が今測定しようとする対象で成り立っている保証は必ずしもない。

一方反射率または放射率特性のパラメータを測定のつど同定し測定精度を常に保証していく試みも成されている。

この主たるものは多波長温度計と呼ばれる方法でおおきくは2通りに分類される。一つは補助光源を用いた方法で光を当てた場合と当てない場合とで測定されるいくつかの波長の情報から反射率と放射率の関係を同定し合わせて温度を測定するもので、牧野ら⁵⁾の方法が代表的である。一方放射情報だけを用い放射率の波長依存性のある関数で記述しその関数パラメータと温度とを逐次同定していく方法も種々提案されているが⁶⁾⁻⁸⁾、実用された報告はない。

本研究では放射情報のみを用いる多波長温度計の基本性能の検討を行い、高精度な測定を実現するための条件を明確にするとともに、亜鉛メッキラインの合金化炉へ適用しその有効性を実証した。

2. 測定原理とその特徴

2・1 測定原理

放射情報のみを用いる多波長温度計は、被測定対象表面の放射率の波長依存性($E(\lambda)$)に関し、式(1)に示す関数を仮定する点に特徴がある。

$$E(\lambda) = f_n(\lambda) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$f_n(\lambda)$ の適切な関数型については既に種々議論⁶⁾されてい

るが、ここでは代表的なものとして式(2)を仮定する。

$$f_n(\lambda) = A_0 + A_1/\lambda + \dots + A_{n-1}/\lambda^{n-1} \dots \dots \dots (2)$$

今式(2)では $A_0 \sim A_{n-1}$ の n 個の未知数を仮定している。次に温度 T (K)波長 λ (m)における温度計で測定される黒体放射出力 $L_b(\lambda, T)$ は $\lambda T < 2 \times 10^{-3}$ mKの条件ではWienの式を用い式(3)で表される。

$$L_b(\lambda_i, T) = c_1 \cdot (2C_1/\lambda^5) \text{EXP}(C_2/\lambda_i T) \dots \dots \dots (3)$$

ここで $c_1 = 5.955 \times 10^{-17}$ (W・m²), $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2}$ (m・K)でそれぞれPlanckの第1と第2定数であり c_1^* は温度計の放射エネルギー起電力換算係数である。

すると各波長における温度計出力 $V(\lambda_i, T)$ は式(2), (3)を用い式(4)となる。

$$V(\lambda_i, T) = f_n(\lambda_i) L_b(\lambda_i, T) \dots \dots \dots (4)$$

今未知数は $A_0 \sim A_{n-1}$ と温度 T との $(n+1)$ 個である。多波長温度計とは一般的には $(n+1)$ 個の未知数に対して $(n+2)$ 個以上の分光放射情報を用い、各波長において温度計により測定される実測出力 $\tilde{V}(\lambda_i)$ と式(4)により求められる計算温度計出力 $V(\lambda_i, T)$ との偏差 $X_i = \tilde{V}(\lambda_i) - V(\lambda_i, T)$ の和(これは自乗の和でも絶対値の和でもよい)が最小となるよう放射率関数の未知数 $A_0 \sim A_{n-1}$ 及び温度 T を統計的に決定するのであり差の絶対値の場合は式(5)で、差の自乗の場合は式(6)で表される。

$$\begin{aligned} \Sigma X_i &= \Sigma |\tilde{V}(\lambda_i) - V(\lambda_i, T)| / \tilde{V}(\lambda_i) \\ &\rightarrow \text{最小化} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma X_i^2 &= \Sigma ((\tilde{V}(\lambda_i) - V(\lambda_i, T)) / \tilde{V}(\lambda_i))^2 \\ &\rightarrow \text{最小化} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで未知数の数に対し、同数のエネルギー情報から方程式を解く方法も考えられるが、その場合は既に牧野らの指摘⁹⁾にもあるよう実測値の誤差で解が大きく変動する為一般的な解法としては採用すべきでない。

2・2 放射率関数と温度の決定方法

最適化手法としては種々の方法があるが、本研究では式(4)を代表値($A_0^*, A_1^*, \dots, A_{n-1}^*, T^*$)のまわりで式(7)の形に線形近似した関係式を式(4)のかわりに採用した。

$$\begin{aligned} V_i(A_0 \dots A_{n-1} T) &= V_i(A_0^* \dots A_{n-1}^* T^*) \\ &+ \partial V_i / \partial A_0 (A_0 - A_0^*) + \dots \\ &+ \partial V_i / \partial A_n (A_n - A_n^*) + \partial V_i / \partial T (T - T^*) \dots \dots (7) \end{aligned}$$

これは未知数($A_0, A_1, \dots, A_{n-1}, T$)に対し線形化する事であとの最適化をやりやすくする為である。又最適化の代表的評価関数としては式(5), (6)の2通りが考えられるが、今回は式(5)を採用し、一般の多変数の最適化でよく用いられる線形計画法を採用した。この理由は2・3節で詳細に述べるが、各未知数($A_0, A_1, \dots, T$)に対する制約条件が簡

単に考慮できる点にある。

2・3 多波長温度計の特性

多波長温度計に関しては、シミュレーション上はうまく未知パラメータが求まるが、実際の適用に関してはうまくいかなかったといった報告が多い⁶⁾⁷⁾。この原因は多波長温度計の特性に関し詳細な検討を行わず、実用温度計を設計しテストした結果と考えられる。

Table 1には多波長温度計を実用する場合に注意すべき要因をまとめてある。それら要因のうち、分光放射率関数と最適化法に関しては本章で、それ以外の要因については実際の適用例に従い第3章で詳細に述べる。

多波長温度計の特性を知るため真温度と代表的な放射率分光特性を仮定し真温度の近傍で順次温度をかえ、式(5)に示される真の放射輝度出力 $V(\lambda_i)$ と計算放射輝度出力 $V(\lambda_i, T)$ との偏差の和を最小とするよう分光放射率関数のパラメータ A_0, A_1 を求めた。計算に使用した波長 λ は1.2, 1.4, 1.6, 1.8 μ mの4波長であり、真温度は500°C、また真の分光放射率関数は $f_n = 0.2 + 0.1/\lambda$ である。この関数型は純金属表面のような分光放射率特性が波長に対し単調減少するものを想定している。

計算結果のうち温度にたいする最適化残差をFig. 1に、また温度に対する分光放射率関数パラメータ A_0, A_1 の挙動をFig. 2に示してある。Fig. 1を見ると真温度近傍の約530°Cの位置に極値が存在する事がわかる。一方パラメータ A_0, A_1 についてはFig. 2に示すよう温度に対し単調変化している。式(5)の評価関数を最小化するに際しては温度が真値以外の極値に収束することを防止する必要があるが、本例では A_1 が物理的に取り得る範囲を例えばFig. 2に示すよう、

Table 1. Factors which affect the performance of a multiwavelength pyrometry.

- | |
|--|
| 1. Calculating method of optimization |
| 2. Function form of a spectral emissivity |
| 3. The number of unknown coefficients |
| 4. The number of spectral radiance for calculation |
| 5. Wavelength interval of each spectral radiance |

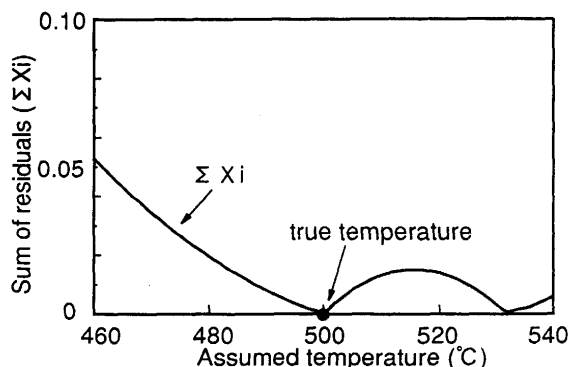


Fig. 1. Simulation results of optimization for temperature (spectral emissivity function: $f(\lambda) = A_0 + A_1/\lambda$).

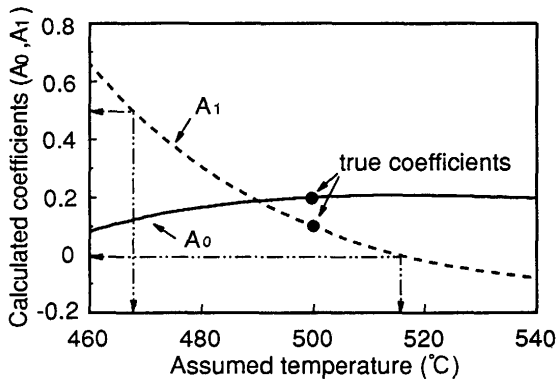


Fig. 2. Simulation results of optimization for A_0 and A_1 (spectral emissivity function: $f(\lambda) = A_0 + A_1/\lambda$).

①分光放射率関数は波長にたいし単調減少であり A_1 は常に正

②分光放射率の波長依存性係数 A_1 の取り得る範囲は放射率そのものが1以下である事より今回の波長範囲であれば例えば0.5以下

と制約することで真温度への収束が保証される。こういった制約条件を温度や分光放射率関数パラメータに付与するためにはあらかじめ被測定対象の分光放射率の挙動や温度の取り得る範囲についての情報が必要になる。またこのような最適化パラメータに取り得る範囲の制約条件を付加するのは一般の最小自乗法のような手法では困難である。またここでは簡単化のため真の放射率分光特性を波長に対し単調減少するよう仮定したが、分光特性が変極点を持つ等複雑になれば、パラメータの最適化に際し式(5)または(6)に示す評価関数がより多数の極値を持つことになる。以上の検討より以下の結論が導かれる。

①多波長温度計を用いた高精度な温度測定のためにはあらかじめ被測定対象の分光放射率挙動を十分に知る必要がある

②最適化によるパラメータ決定に際しては温度を含め、各パラメータの取り得る範囲を制限し、極値に収束するのを防止する必要がある

このため本研究では簡単にパラメータの取り得る範囲が制約できる線形計画法を最適化手法として採用した。

3. 溶融亜鉛メッキ鋼板表面温度測定への適用⁹⁾

3・1 溶融亜鉛メッキプロセスの概要

溶融亜鉛メッキプロセスは溶融亜鉛浴中に脱スケール処理した鋼板を通し亜鉛を鋼板上に付着させ、その後エアージェットにより付着亜鉛厚みを制御するプロセスである。亜鉛メッキされた鋼板はそのまま製品となる物とメッキの後Fig. 3に示すように合金化炉の加熱帯・保持帯及び強制冷却帯を通し合金化処理(GA)と呼ばれる鋼板上に亜鉛と鉄の

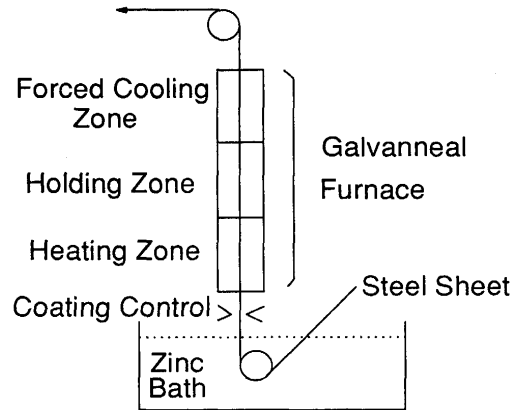


Fig. 3. Schematic diagram of a commercial galvanneal process.

合金層を成長させる熱処理を施す物がある。

後者のGA鋼板は主として自動車用として利用されるが、その合金層のプレス曲げ加工時の付着強度(耐パウダリング性)はメッキ後の熱処理温度・高温での保持時間や冷却速度に強く依存し、これらを精度良く管理することが良い製品を作る上で必須である。そこで筆者らは合金化処理時の鋼板表面温度測定に多波長温度計を適用しその有効性を検討した。

3・2 亜鉛メッキ合金化処理鋼板の分光放射率挙動

亜鉛メッキされた鋼板を加熱し合金層を成長させた際の鋼板の放射率変化の一例をFig. 4に示す。熱処理の進行にともない放射率は鏡面に近い溶融亜鉛の放射率である0.1から0.7程度まで変化する。この変化の主たる要因は既に徳永ら¹⁰⁾により詳細に検討されており合金層の成長にともない鋼板の表面粗さが鏡面状態から粗面状態に変化していくためと考えられている。

Fig. 5には横軸に波長をとり合金化過程での分光放射率変化の一例を示してある。合金化熱処理により放射率は変化するが、主として変わるのは分光放射率関数の第1項であって第2項の波長依存性係数はほとんど変化しないことが解る。そこでこの放射率関数の特性を基に±1%の温度測定

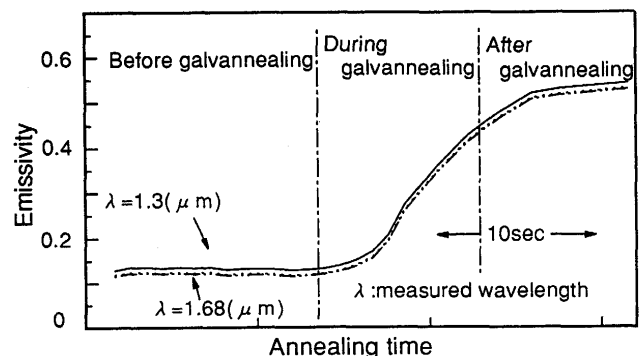


Fig. 4. Characteristic behavior of the spectral emissivity of zinc-coated steel sheet during the galvanneal process.

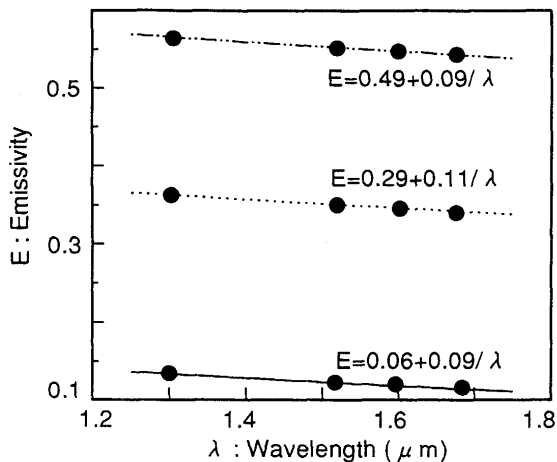


Fig. 5. Spectral emissivity function for a galvanneal steel sheet.

精度を持つ多波長温度計の設計を行った。

3・3 多波長温度計の設計

Table 2 に設計条件を示してある。分光波長関数としては Fig. 5 の結果より制約条件のうち一番極端な条件である A_1 を常数とする未知数 1 個の関数型を採用した。Fig. 6 には放射輝度測定誤差が $\pm 1\%$ である場合での A_0 及び T の未知数 2 個に対し使用分光放射輝度情報の数をかえ温度及び放射率の推定誤差を求めた結果を示してある。ここでは使用放射輝度情報のそれぞれの波長間隔を $0.1\mu\text{m}$ として計算してある

Table 2. General design conditions of a new pyrometer.

Items	Design Conditions
Function form of spectral emissivity	$f(\lambda) = A_0 + 0.1/\lambda$
Measuring temperature range	400 to 600°C
Spectral response range	1.1 to 1.8 μm
Measurement reproducibility of the spectral radiance	$\pm 1\%$ of measured value
Accuracy requisite for temperature measurement	$\pm 1\%$ of measured value

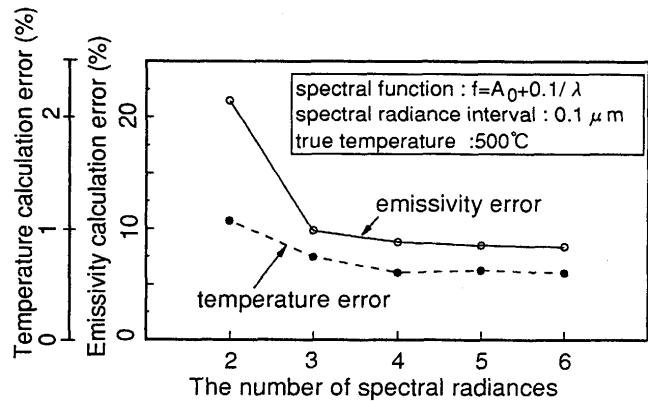


Fig. 6. Dependence of temperature and emissivity calculation errors on the number of spectral radiances.

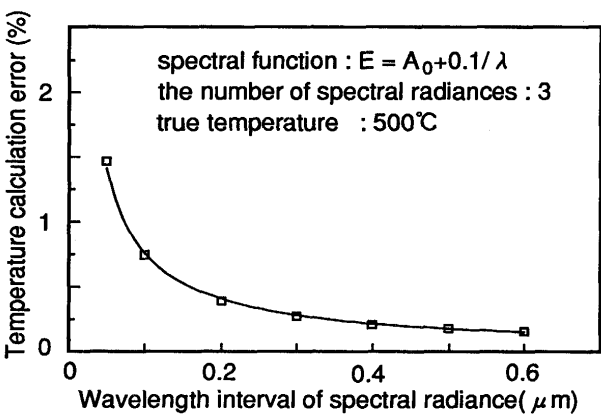


Fig. 7. Dependence of temperature calculation errors on wavelength intervals of spectral radiance.

Table 3. General specifications of a new multiwavelength pyrometer.

Items	Specifications
Measuring temperature range	300 to 600°C (at emissivity=1)
The number of spectral radiances	3 (1.3, 1.58, 1.68 μm)
Detector	Ge with cooling
Condenser section	lens diameter : 50mm focus length : 70mm (transferred by optical fiber)
Measuring interval	4 sec

が温度測定精度 $\pm 1\%$ を確保するには未知数 2 個に対し 3 個以上の数の分光放射輝度情報を用いる必要があることがわかる。また多波長温度計では温度推定誤差と放射率推定誤差の関係は単色温度計のそれらの関係と同等である。

Fig. 7 には使用放射輝度情報 3 個の場合で波長間隔を順次大きくし $\pm 1\%$ の放射輝度測定誤差に対する温度推定精度を示してあるが温度推定精度 $\pm 1\%$ を確保するには $0.1\mu\text{m}$ 以上の波長間隔があればよいことがわかる。放射輝度測定誤差に対する温度推定誤差の依存性を小さくするには Fig. 7 からわかるように使用する分光放射輝度情報間の波長間隔を広げればよい。例えば波長間隔を $0.6\mu\text{m}$ とすることで温度推定誤差は約 $1/10$ と単色温度計並にできるが、その場合には一つの Ge 素子で三つの放射輝度情報を測定することは難しくなり他の光検出素子(例えば PbS 等)を併用する必要がある。以上の検討結果より温度計は単純な装置構成とするため Table 3 に示すように単一の光検出器を用いた設計とし、また測定温度及び放射率の範囲から電子冷却をした Ge 検出器を採用した。

3・4 開発した多波長温度計の概要

開発した多波長温度計の構成を Fig. 8 に示す。放射光は $50\text{mm}\phi$ の集光レンズにより端面径 3.1mm 芯数 156 本石英系多芯光ファイバー結像される。用いた光ファイバーは波長 $2\mu\text{m}$ まで透過率が $95\%/m$ 以上であり特に減衰の問題はない。

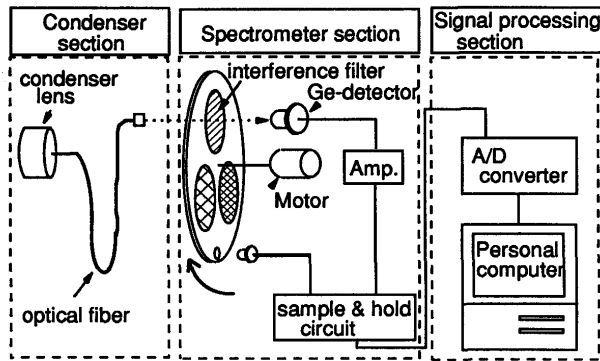


Fig. 8. Schematic diagram of a new multiwavelength pyrometer.

光ファイバーからの出射光は球レンズを介し -25°C に冷却したGe光検出器に結像される。放射光の分光は球レンズとGe光検出器との間に置いた三枚の回転干渉フィルタによりおこなった。三枚の干渉フィルタの中心波長は $1.3, 1.58, 1.68\mu\text{m}$ で、半値幅は各波長の透過光がほぼ同じ強度になるようそれぞれ $0.5, 0.11, 0.12\mu\text{m}$ とした。集光レンズから光検出器までの放射光の全透過率は55%でありGe検出器を冷却しS/Nを向上させることで測定下限温度 300°C (放射率1の場合)を確保している。

光検出器からの信号はサンプル&ホールド回路により各波長に対応した放射輝度信号に分けられA/D変換されたのちパーソナルコンピュータにより温度 T ・放射率パラメータ A_0 及び放射率 E が計算される。

3・5 温度測定精度の検証

実験室で亜鉛メッキ鋼板を通电加熱により急速加熱し合金化熱処理炉の模擬実験を行ない、本温度計の測定精度を検証した。鋼板の加熱パターンをFig. 9に示す。加熱帯・保持帯に対応した温度域での加熱速度はそれぞれ $15^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 及び $5^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ である。鋼板の真温度はTypeKの熱電対素線を鋼板表面に溶着し測定した。また放射率は真温度及び単色温度計の出力より逆算した。Fig. 10に測定結果の一例を示してある。多波長温度計の測定値は合金化過程を通し真温度とよく一致しており、精度良い測定ができていることがわか

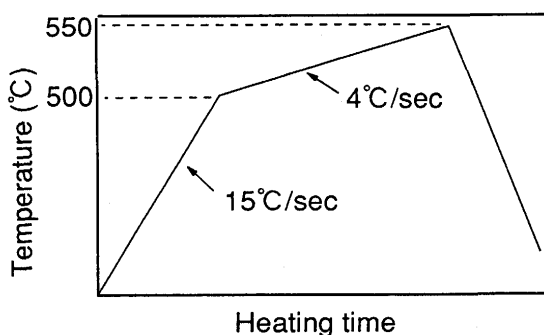


Fig. 9. Heating condition for laboratory simulation of the galvanneal process.

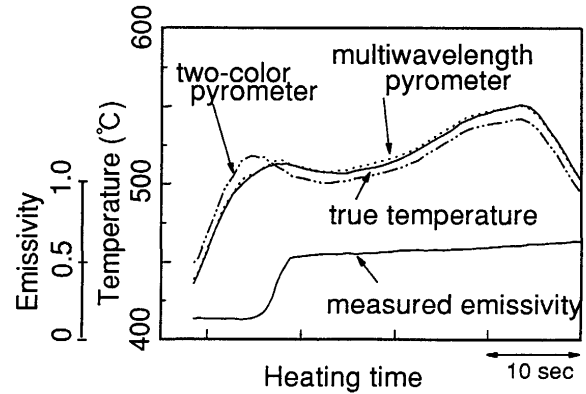


Fig. 10. Typical data measured at a laboratory test.

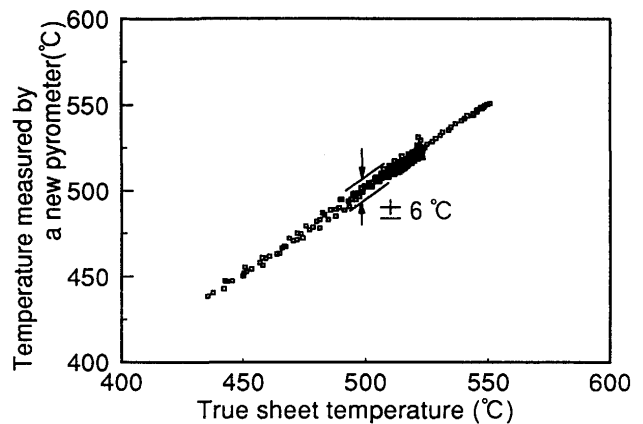


Fig. 11. Correlation between true temperature and measured temperature by a new pyrometer.

る。また波長 $\lambda_1 = 1.30\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.68\mu\text{m}$ を用いた従来型二色温度計(検出器Ge)の放射率比を1.06とした場合の測定値もあわせて示してあるが既にFig. 5に示したように放射率比は一定でなく二色温度計の前提条件では測定誤差が大きくなる。

亜鉛皮膜厚みと母材鋼板組成を変えその変化が測定再現性に与える影響を検証した結果をFig. 11に示す。本多波長温度計は合金化処理の全期間にわたり $\pm 6^{\circ}\text{C}$ の精度で鋼板表面温度が測定できている。

4. 合金化炉内鋼板温度測定への適用⁹⁾

4・1 測定装置概要

本多波長温度計の有効性を確認するため、和歌山製鉄所No2CGLラインの合金化炉保持帯入側に温度計を取付けオンラインでの測定精度の検証と温度測定の有効性評価を行なった。温度計の設置にさいしては①炉壁温度が鋼板温度より高いこと②鋼板の表面反射率が条件によってはかなり拡散性となり炉壁からの放射光が一部鋼板表面で反射され温度計に入ってくる可能性が高いこと等から、Fig. 12に示す直径500mmの水冷円板で作った放射シールドを設置した。

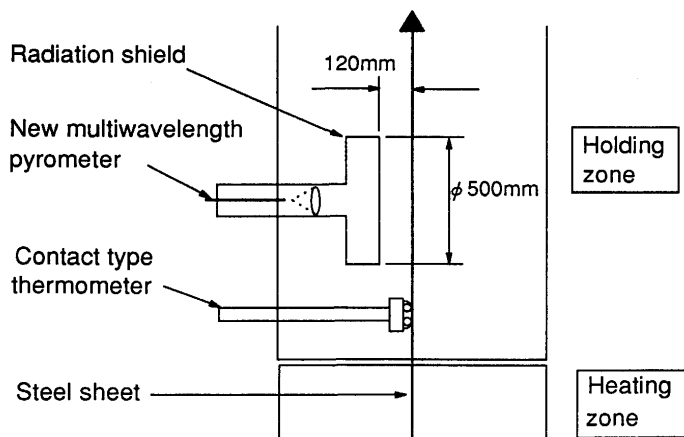


Fig. 12. Illustration of pyrometer installation at a galvanneal furnace.

Table 4. Specifications of Contact-type Thermometer.

Items	Specifications
Detector	K-type thermocouple
Measurement range	R.T. to 850°C
Contact range	±40 mm
Line speed of measuring object	0 to 250 mpm
Response time	8 sec
Accuracy	±2°C

また多波長温度計の近傍に校正用の接触式温度計を設置しオンラインでの精度確認を行なった。用いた接触式温度計は市販のリボン型TypeK接触式熱電対を改造し、車輪と押しつけバネを付けた物で、高速で移動する鋼板に対しても一定の押しつけ圧で接触可能な構造となっている¹⁴⁾。その仕様をTable 4に示すが、測定精度は被測定鋼板と雰囲気との温度差による冷却誤差を補正して静止鋼板に対して±2°C、移動鋼板による摩擦温度上昇は鋼板速度250m/分以下では1°C以下であり、本開発温度計の精度確認に十分適用可能なものである。

4・2 オンラインでの測定精度検証

合金化反応速度は亜鉛中の鉄の拡散速度に支配されるが、それは母材鋼板中に含まれるリン、チタン、シリコン等の濃度によって大きく異なることが既に知られており、特にリン濃度は高くなるほど拡散速度を遅らせる¹²⁾¹³⁾。したがって適正な合金皮膜特性を得るには、合金化反応速度の異なる鋼板によって加熱帯及び保持帯温度を変える必要がある。ここではリン濃度が低く合金化反応速度の速い鋼板Aと、逆にリン濃度が高く反応速度の遅い鋼板Bとの2種類のテスト鋼板を連続して流し、鋼板つなぎ目での温度と放射率の変化を測定しオンラインにおいて本多波長温度計の測定精度を検証した。その結果をFig.13に示す。図中には接触式温度計の測定結果もあわせて示してあるが、多波長温度計指示

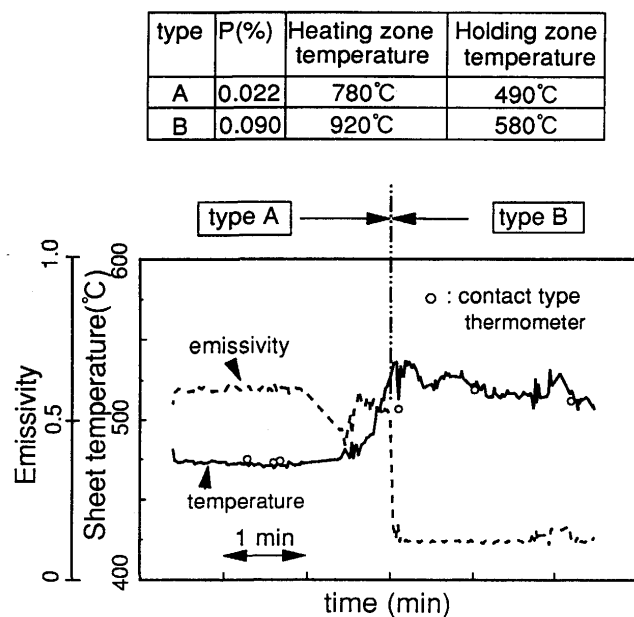


Fig. 13. Online comparison test between a new pyrometer and a contact type thermometer.

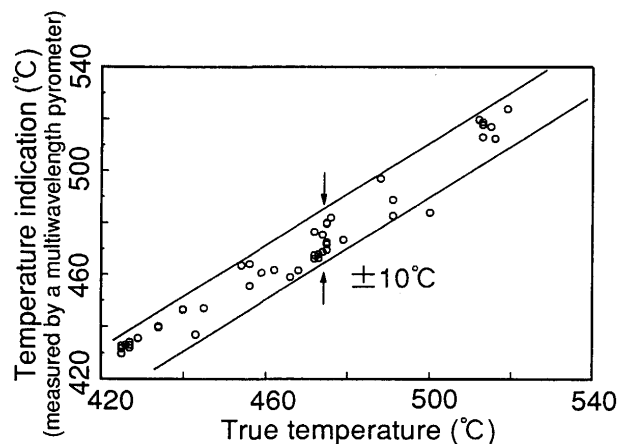


Fig. 14. Measurement accuracy of a new multi-wavelength pyrometer.

値との一致は良好で、放射率が0.6から0.1と大きく変化している場合でも精度良く鋼板温度が測定されていることがわかり、本測定法の妥当性が検証された。

このように被熱処理鋼板の組成やメッキする亜鉛の厚みの条件により加熱帯温度を変化させることで、鋼板温度を変え加熱帯出側での多波長温度計指示値と接触温度計指示値との比較を行った結果をFig.14に示してある。本データは被測定鋼板放射率が0.1から0.6と大きく変化している条件のデータであるが、両者の指示値の差は広い温度範囲にわたり±10°C以内と良く一致しており、本多波長温度計の測定精度も±10°C以内にあることが確認できた。

4・3 合金化鋼板の温度・放射率と製品品質

組成の異なる母材鋼板に対し、異なる加熱温度で合金化処理した場合の鋼板表面放射率測定値と耐パウダリング特

type	P (%)	Ti (%)
C	0.015	0.04
D	0.090	0.05

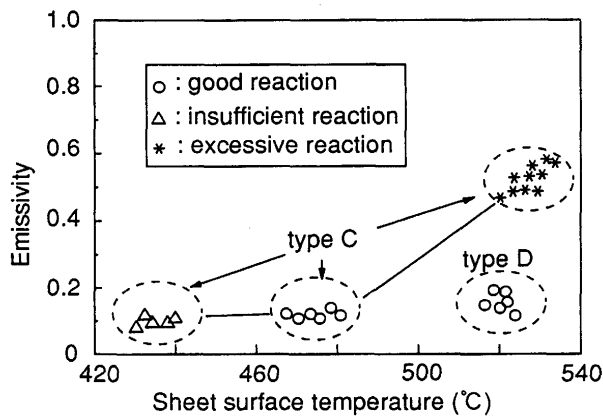


Fig. 15. Difference of heat treatment conditions according to the steel sheet composition.

性の評価結果をFig.15に示す。タイプCの母材鋼板については耐パウダリング特性の良好な範囲以外の未合金化及び過合金化の範囲を、タイプDについては良好な範囲のみを示している。タイプDのリン濃度はタイプCのそれに比べ約5倍高いため、合金化反応速度は遅く適正な特性の合金層を形成するためにはタイプDの方がタイプCに比較し約140°C高く加熱帯温度を設定する必要がある。今回温度計を設置した保持帯入側においては耐パウダリング特性の良好な熱処理条件では鋼板の放射率は約0.1と低く鋼板表面まで合金化が進行していない。しかし加熱帯以降の保持帯で合金化が進行しこの場合には適正な合金層形成が行われている。この様に加熱帯出側での鋼板温度及び放射率を測定することで鋼板上の亜鉛メッキ層の合金化の進行状況を正確に知ることができるようになり合金化プロセスの操業指針が得られ

安定した品質のGA鋼板の製造が可能となった。

5. 結言

多波長温度計を用い被測定対象の放射率と温度とを同時測定する技術を開発した。実験室での精度検証の結果本温度計は放射率を±10%で、温度を±1%で測定できることを実証した。また亜鉛メッキ合金化処理プロセスに適用した結果オンラインでの測定精度は検証用の接触式温度計の不確かさも含め±10°Cであった。さらに種々の操業条件でのデータ解析から合金化処理プロセスでは被熱処理鋼板の放射率と温度とを同時に知ることが操業管理上重要であることが判明した。

文 献

- 1) N.Harada, K.Imai, T.Yamada and E.Makabe: Proc. of 5th Process Tech. Conf., AIME, (1985), p.179
- 2) T.Yamamoto and Y.Sakaguchi: Temperature, **6** (1992), p.933
- 3) 井内 徹: 計測自動制御学会論文集, **16**(1980), p.233
- 4) 福高善己, 山下英明, 菱刈 功, 井手敏彦: 計測自動制御学会学術講演会予稿集, **26**(1987), p.651
- 5) 牧野俊朗, 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
- 6) J.L.Gardner: High Temperature-High Pressure, **12**(1980), p.699
- 7) J.L.Gardner, T.P.Jones and M.R.Davies: High Temperature-High Pressure, **13**(1981), p.459
- 8) G.B.Hunter, C.D.Allemand and T.W.Eagar: Optical Engineering, **24**(1985), p.1081
- 9) 植松千尋, 平本一男, 山本俊行: 材料とプロセス, **5**(1992), p.378
- 10) 徳永良邦, 山田正人: 鉄と鋼, **70**(1984), p.1727
- 11) 上田 潤, 赤瀬道孝, 平本一男, 植松千尋, 高谷有志: 材料とプロセス, **5**(1992), p.379
- 12) 浦井正章, 有村光史, 堺 裕彦: 材料とプロセス, **4**(1991), p.1635
- 13) 阿部雅樹, 神原繁雄, 奥山 健: 鉄と鋼, **70**(1984), S1112
- 14) 安達祐司, 植松千尋, 植村敬明: 材料とプロセス, **5**(1992), p.380