

測温ロールによる連続焼鈍炉の板温計測

芹生 浩之*・増野 豊彦*・中島 康久*・小川 博之*

Strip Temperature Measurement by Measuring Roll for Continuous Annealing Line

Hiroyuki SERIU, Yasuhiko MASHINO, Yasuhisa NAKAJIMA and Hiroyuki OGAWA

Synopsis : In order to measure the emissivity of cold strip in the furnace of Continuous Annealing Line (herein "CAL"), an approach using the temperature measuring roll and radiation pyrometer has been applied at the Chiba works. The temperature measuring roll is a hearth roll in which some thermocouples are installed. The thermocouples are buried inside surface of the hearth roll. The signals of roll temperature are taken out via slip rings which are equipped at the end of the roll axle. There is very small temperature gradient across the roll shell on which the strip contacts, and the heat flux in the transverse direction is also small. Therefore, at the portion enough inside from the strip edge, the roll temperature can be equal to the strip temperature. The emissivity can be calculated from the measured values of the temperature measuring roll and the radiation pyrometer which are equipped same position. The temperature measuring roll has been used since the CAL operation started and the emissivities of various grades of strips have already evaluated.

Key words : measurement ; cold strip ; continuous annealing line ; optical parameter recognition ; radiation pyrometer ; emissivity.

1. 緒言

熱放射を利用した温度計測においては、測定対象の放射率を求めることは測定精度を維持する上で重要なことである。

当社千葉製鉄所においては、昭和53年頃より連続焼鈍設備 (Continuous Annealing Line : 以下CALと略す) の稼動に合わせて、放射温度計を用いた、CAL炉内で処理されるストリップの温度計測方法の確立に努めてきた。黒体炉及び標準放射温度計で精度を維持した放射温度計を使用し¹⁾、鋼種、温度域に対応した放射率をオンラインでプリセットする方法が実用されている。

このとき用いられる放射率はCAL炉内雰囲気と同様の還元性雰囲気に保たれた実験炉により得られた値である。CALで処理される各鋼種についての測定結果がこれまでに報告されている²⁾。

さらに、操業時にオンライン状態での放射温度計の精度をチェックするため、以下に示す方法が用いられている。

1. 接触式温度計をストリップ表面に押し付ける³⁾
2. ストリップ走行速度を低速に保ち、炉内温度とストリップ温度を等しくすることにより間接的に測定する

しかし、前者によれば、鋼板表面に傷をつける、後者によれば、長時間ストリップ走行速度を低速に保つ必要があるため生産性を落とす、等の欠陥があった。

今回、この問題を克服するための新しい手段として、ストリップを走行させるための送りロールに熱電対を埋め込

んだ測温ロールと放射温度計を組み合わせ、オンラインにて放射率を測定しストリップ温度を測定する測温システムを適用したので以下に報告する。

2. CALにおける温度計測

Fig. 1に当社CALの概念構成とストリップ温度測定ポイントの一例を示す。CALは、加熱帯I、IIと冷却帯I、IIから構成されている。加熱帯に入ったストリップは、加熱帯I、IIにおいて4ゾーンに区切られたラジエントチューブにより所定の温度まで加熱される。その後、冷却帯I、IIにおいて、ガスジェットにより冷却される。加熱帯及び冷却帯内は、窒素+水素による雰囲気ガスによって還元性雰囲気に保たれている。

CALにおいて、各帯の出側ストリップ温度を制御することは、製品品質を確保する上で非常に重要なことである。このため、各帯の出側には放射温度計を据え付けている。これらの放射温度計の仕様をTable 1に示す。

さらに、放射温度計を用いてストリップ温度を正確に計測するためには、ストリップの放射率が既知であることが必要である。以下に述べる放射率は、CALにおいて狭帯域の放射温度計を使用している関係上、分光放射率として、意味を持つ。

ストリップ放射率は、オフラインの実験炉において測定された値を使用する。実験炉の構造をFig. 2に示す。サンプルは、電気ヒータにより加熱される。

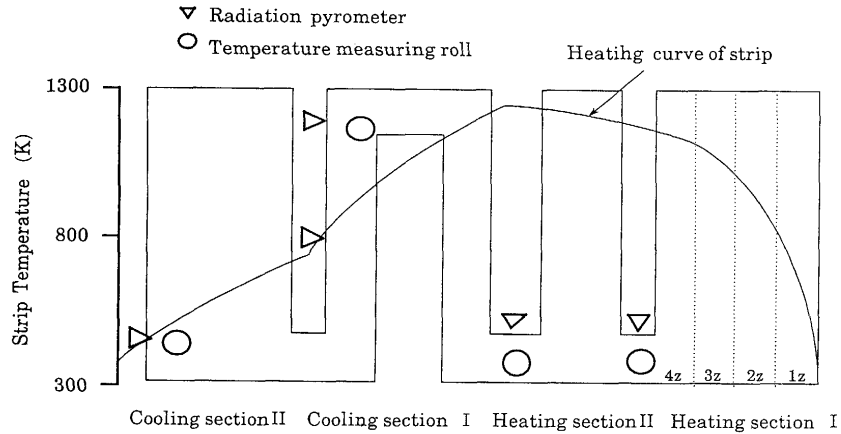


Fig. 1. Temperature measuring point in CAL.

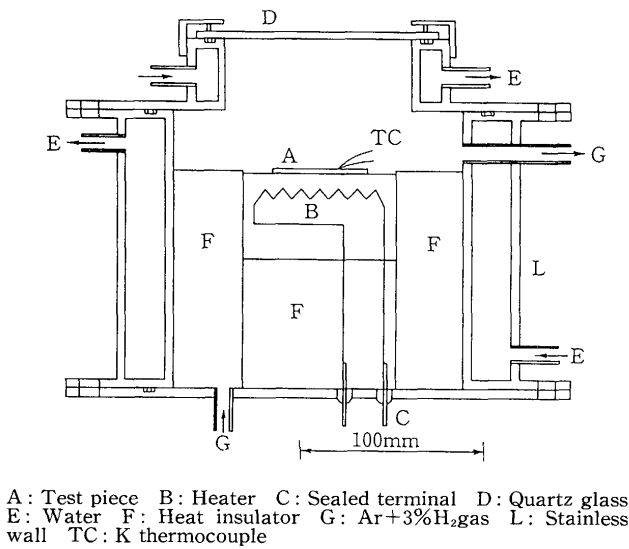


Fig. 2. Experimental furnace.

Table 1. Specification of radiation pyrometer.

Section	Detecting Device	Wave Length (μm)	Measuring range (K)
Heating Section I	Si cell	0.96	873~1173
Heating Section II	Si cell	0.96	873~1173
Cooling Section I (1)	Ge cell	1.6	673~973
Cooling Section I (2)	Pbs cell	2.0	473~873
Cooling Section II	PbSe cell	4	423~573

放射率を決定する要因としては、粗度、酸化等による表面性状、温度が挙げられるが、CALにおいて最も影響の大きい要因は、酸化による表面性状の変化である。実験炉では残留酸素による酸化を防止するため炉内を不活性ガス+水素により還元性雰囲気保つ。これは炉内滞在時間の関

数となる酸化膜の厚みの変化による放射率の変動を防止し、再現性のあるデータの測定を行なうことを目的としているため、不活性ガスの種類は特に問わない。CALサンプルの真温度は、サンプルに溶接された熱電対により測定され、真温度と、上部の窓を通して測定された放射輝度と比較することによってサンプルの放射率を得る。Fig. 3に実験炉を用い一般冷延鋼板 (Grade A~Hと呼ぶ) に関する測定結果を示す。図中A~HはCALにおいて処理される鋼種を示す。一般冷延鋼板の放射率は、温度依存性を持ち、かつ、鋼種によって異なった値をとることが判明している。

このようにして得られた放射率は、ラインのプロセス計算機内において温度と鋼種、放射温度計検出素子に応じてテーブル化され、ストリップのトラッキングにより、適宜用いられる。

しかし、一般に操業中のCAL炉内には炉体のシール不十分により侵入したり、ストリップに付着して持ち込まれる酸素が存在する。しかも、その濃度は一定であるとは限らないため、実験炉でのCAL炉内雰囲気シミュレートは非常

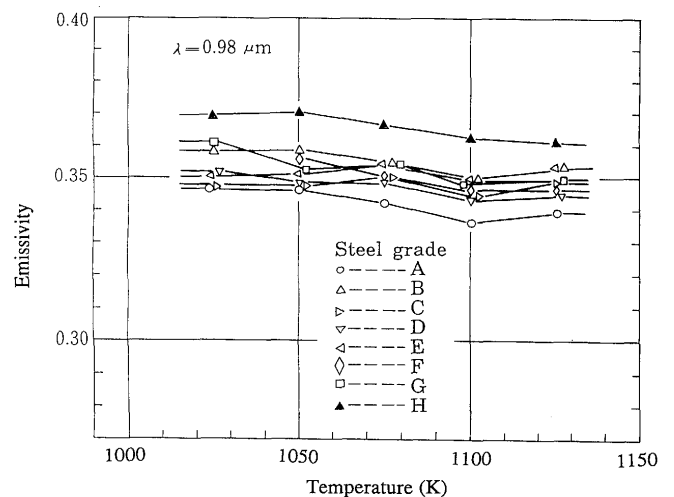


Fig. 3. Emissivity evaluated by experimental furnace.

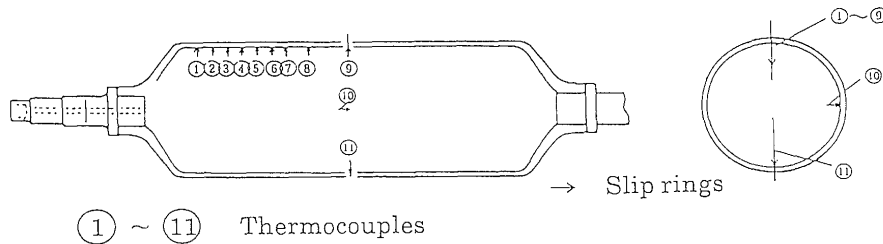


Fig. 4. Sectional view of temperature measuring roll.

に困難である。よって、実験炉で得られた放射率は、CAL炉内での値と異なっている可能性は残る。

3. ストリップ温度計測用炉内ロール

3・1 測温ロールの構造

今回用いた測温ロールの構造をFig. 4に示す。ロール胴部は中空構造で、胴長2060mm、外径800mm、シェル肉厚20mmの耐熱鋳鋼製である。熱電対はロール胴長方向にNo. 1～11まで11本設置した。測温ロールは、Fig. 5に示すように炉内ストリップ送りロールの内表面に外径3.2mmのシース型熱電対(先端非接地)を強固に接触させ、かつ、先端部にエア溜のできない構造として、ロール表面温度を測定することにより間接的にストリップ温度を測定する。ロール表面に熱電対を露出させた場合、ロールとの硬度差のために長期使用時に摩耗の度合に差が生じ、ストリップの傷の原因となる。これを避けるために熱電対のロールへの取り付けは、ロール内表面となった。熱電対の取り付けは、接触熱抵抗が小さくなり、かつ、取り付け強度が確保できるような工夫を行なった。

なお、温度信号はロール軸端に取り付けたスリップリングを介して炉外に取り出し、プロセス計算機にデータを取り込む。

3・2 測温ロールを用いた鋼板温度計測

測温ロールを用いてストリップ温度を計測する場合、ストリップはヘルパーロール外表面に接触するのに対し、温度測定用熱電対はヘルパーロール内表面に埋め込まれているため、ロールシェル方向に温度差を生じた場合測定誤差を生じる。以下に、定常状態(ストリップ走行速度一定、ストリップ温度一定)における測温ロールの測定誤差の評価を行なう。

定常状態においてFig. 6の状態を考える。ロール熱容量とロール回転数を考慮して、ロール周方向の温度分布は均一とする。また、ロール胴長方向に関しては

①加熱帯ではラジアントチューブによる加熱のためストリップ幅方向の温度分布は小さい

②ストリップは高温のため柔らかくなり、ロール胴長方向に均一に密着する

③ストリップの接触長さに対し、ロール半径は充分小さ

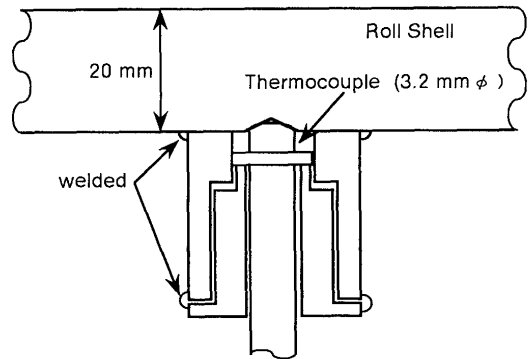


Fig. 5. Thermocouple of temperature measuring roll.

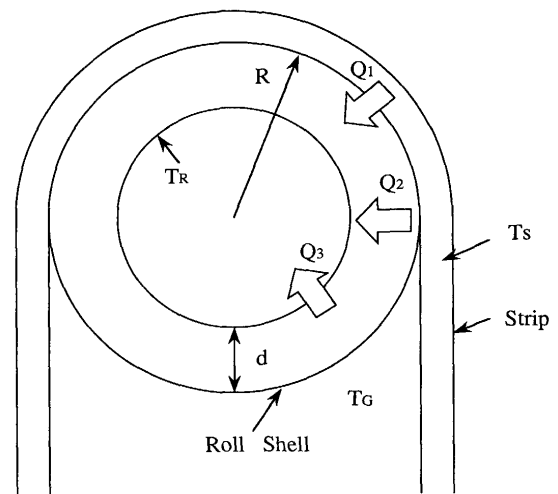


Fig. 6. Heat balance model of temperature measuring roll.

いためロールは無限に長い円筒と考える

と考え、胴長方向への熱量の移動はないものとする。このとき、ストリップ及び雰囲気ガスからロール外表面へのロール胴長方向単位長さ当たりの移動熱量 Q_1 、ロール内部における外表面から内表面方向の移動熱量 Q_2 、ロール内表面からロール内部雰囲気ガスへの移動熱量 Q_3 は以下のように表される。

$$Q_1 = 2\pi R \{ h_h (T_s - T_R(R)) / 2 + h_c (T_g - T_R(R)) / 2 \} \cdots (1)$$

$$Q_2 = 2\pi k (T_R(R) - T_R(R-d)) / \ln \{ (R-d) / R \} \cdots (2)$$

$$Q_3 = 2\pi h_c (R-d) (T_R(R-d) - T_g) \cdots (3)$$

- h_h : ストリップ～ロール熱伝達係数 ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
 h_c : ストリップ～雰囲気ガス熱伝達係数 ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
 k : ロール熱伝導率 ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 T_s : ストリップ温度 (K)
 $T_R(R)$: 半径 R でのロール温度 (K)
 T_G : ロール外雰囲気ガス温度 (K)
 T_G' : ロール内雰囲気ガス温度 (K)
 R : ロール半径 (m)
 d : ロールシェル厚 (m)

定常状態では $Q_1=Q_2=Q_3$ であるので、(1)～(3)式を T_R について解く。Fig. 7 に测温ロールによるストリップ温度測定誤差 $\Delta T (=T_s - T_R(R-d))$ についてストリップ温度 T_s をパラメータにして示す。このときの計算条件を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 h_h &= 1.40 \times 10^3 \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)} \\
 h_c &= 18.6 \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)} \\
 k &= 48.0 \times 10^{-3} \text{ (Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} \\
 R &= 0.400 \text{ (m)} \\
 d &= 2.00 \times 10^{-2} \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

また、ロール内部は空洞となっており、かつ、内部の雰囲気ガスはロール外部と循環する構造となっているため、本計算ではロール内外の雰囲気ガス温度は同一であるとした。結果から定常状態においては雰囲気ガス温度とストリップ温度差が200K以内であれば、測定精度 ± 5 K以内での测温ロールによるストリップ温度測定は充分可能であるという結論が導出される。

また、当社の連続焼鈍炉においては、安定通板を確保する目的から、测温ロール付近では電気ヒータ等の設置により雰囲気ガス温度とストリップ温度の差を100K程度に保つ様に制御されている。その結果、测温ロールによるストリップ温度測定が可能な状態が常時得られている。

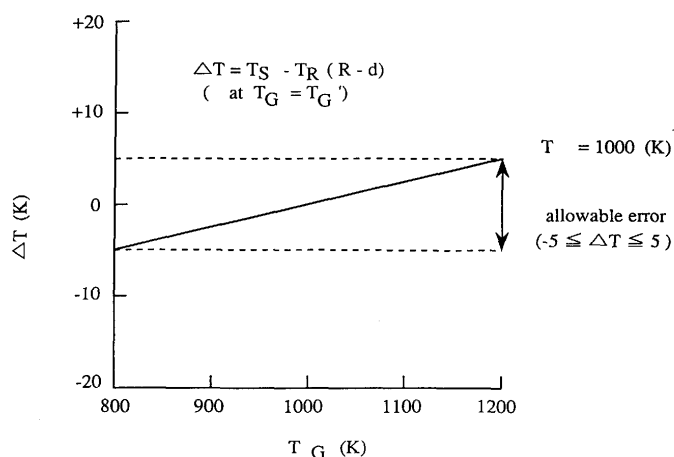


Fig. 7. Measuring error of temperature measuring roll.

4. CALにおける放射率測定

4.1 测温ロール温度測定 (定常状態)

Fig. 8 に定常状態における测温ロール幅方向温度分布を示す。測定時、ストリップはライン中央を走行中であり、その位置を図中に示す。ロール温度はストリップ接触部である、ラインセンタから400mmの点までほぼ均一の分布となっていることが読み取れる。测温ロールに関し、ストリップとロールの接触部分では幅方向温度勾配が小さいことになり、誤差の評価で用いたロール胴長方向の熱の流れは極めて小さいことが確認された。

しかし、ストリップとの非接触部では、加熱帯Ⅰに関してはロール軸端に向って温度が降下するが、加熱帯Ⅱについてはロール軸端に向う方向に対して一旦ロール温度が上昇し、その後降下する現象が見られる。

これは、

①ストリップ非接触部ではロール温度は雰囲気ガス温度に近づく (No. 1 の雰囲気ガス温度はストリップ温度より低く、No. 2 では、雰囲気ガス温度が高い)

②ロール軸端は冷却されている

という理由により、No. 1 ロールについてはロール→雰囲気ガス及び、ロール→軸端冷却装置への熱流が生じているためと考えられる。よって、3・2で得られた結論と合わせて、ストリップ温度測定値としてロール中央部温度 (Fig. 4 に示したNo. 9, 10, または11) を用いることとする。

4.2 测温ロール温度測定 (非定常状態)

Fig. 9 に非定常時 (ストリップ走行速度変更時) における放射温度計指示値と测温ロール温度の応答を示す。本測定では、ストリップ速度変更前に、速度一定の条件においてストリップ温度が測定できるものとして得られた放射率の値を使用したため、速度変更前の放射温度計指示値とロール温度は一致している。

ストリップ走行速度を下げる場合、加熱炉内の炉温の応

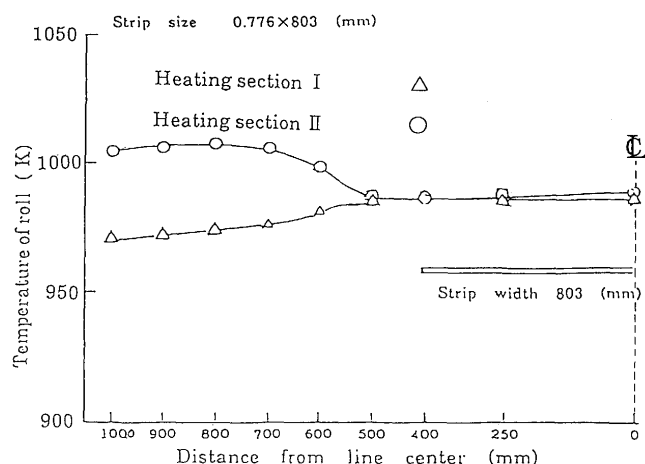


Fig. 8. Temperature profile of temperature measuring roll.

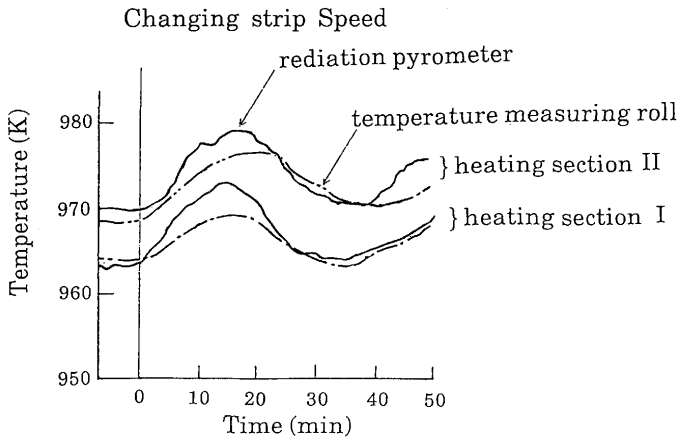


Fig. 9. Dynamics of temperature measuring roll (Line speed changed).

答はストリップ走行速度に比べて遅いためロールに接触するストリップの温度は一時的に上昇する。これにより、ストリップからロールへの熱の移動を生じ、ロール温度は上昇する。しかし、Fig. 9における速度変更直後のロール温度が示すように、ロールの熱容量のためストリップ温度の応答に対して遅れが生じる。ストリップ温度上昇後は、炉温が自動制御により低下するためストリップ温度は下がり始め、ロール温度もこれに伴い低下する。

さらに、ロール重量から求めた熱容量から応答遅れを概算した結果、測温ロールを用いたストリップ温度計測では、応答遅れによる測定誤差を ± 5 K以内に収めるためには、速度、炉温等の変更後12分以上経過しているという定常状態の判定が必要であることが判明した。

5. 測温ロールを用いた放射率測定

5・1 従来方法との比較

連続焼鈍炉加熱帯で従来より行なわれてきた、一定でかつ低いストリップ走行速度で、一定炉温を保った状態で炉温＝ストリップ温度となることを利用した放射温度計の簡易チェックを実施した。測定は、一般冷延鋼板(SPCCクラス)であり、実験炉及び実ラインにおいて、経験上、放射率は安定していると確認された鋼種によって行なった。

結果をTable 2に示す。この測定で使用した分光放射率は0.35(実験炉により得られた値)である。測定結果から、炉

Table 2. Comparison of temperature.

Furnace Temperature (K)				Strip Temperature (K)	Roll Temperature (K)	Line Speed (mpm)
1z	2z	3z	4z			
1075	1076	1079	1080	1076	1078	55
1080	1080	1080	1082	1077	1078	82
1078	1078	1078	1078	1078	1075	126
1080	1080	1078	1078	1076	1075	93

温、放射温度計指示値、測温ロールセンタ温度は一致していることが読み取れ、測温ロール温度をストリップ温度として用いることは、従来手段とも矛盾するものではないことが確認された。

5・2 測温ロールを用いた放射率測定

Fig.10に鋼種Aと呼ぶストリップに関して、測温ロール温度指示値と放射温度計指示値を比較した結果を示す。参考として、製品上要求される精度として ± 10 Kの直線をFig.10に示す。本測定において使用した放射率補正値は実験炉から得られた放射率を離散的な値として補正を行っており、Fig.11にその値を示す。測定は、先の検討での定常判定より厳しくし、ストリップ走行速度、炉温を一定に保ち、放射温度計指示値及びロール温度が15分以上変動しない状態において行なった。

現在使用中の放射温度計は狭波長タイプのものであるため放射輝度温度(放射温度計から得られる)及びストリップ温度(測温ロール温度から得られる)からプランクの式により放射率(分光放射率)を求めることが可能である。Fig.11に測温ロール指示値をストリップ温度とし、放射温度計指示値から放射率を逆算した結果を示す。CALにおいてオンラインで求められた放射率(Fig.11の一次回帰直線)と実験炉から得られた現在使用中の放射率の差は(1050Kにおける) 6.0×10^{-3} であり温度差に換算すると1.3Kに相当し、実用上問題となる差ではない。同様の結果は、Fig.12に示す別の鋼種(Grade Bとする)においても確認された。

CAL炉内では炉内微量酸素による酸化のため実験炉で得られた値と異なることが懸念されたが、本測定の結果から得られた結果は、従来使用していた値と大きく異なるものではなく、かつ実験炉で安定である鋼種の放射率はCAL炉内においても安定であることが確認された。ただし、放射率は、温度依存性があるため、より精度の高い測定のためにはプリセットする放射率を温度の関数とすべきである。

Fig.13に測温ロールにより得られた温度と放射率を示した

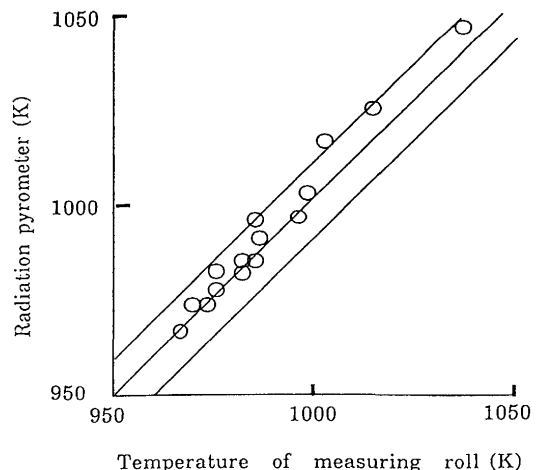


Fig. 10. Comparison of temperature measuring roll and pyrometer.

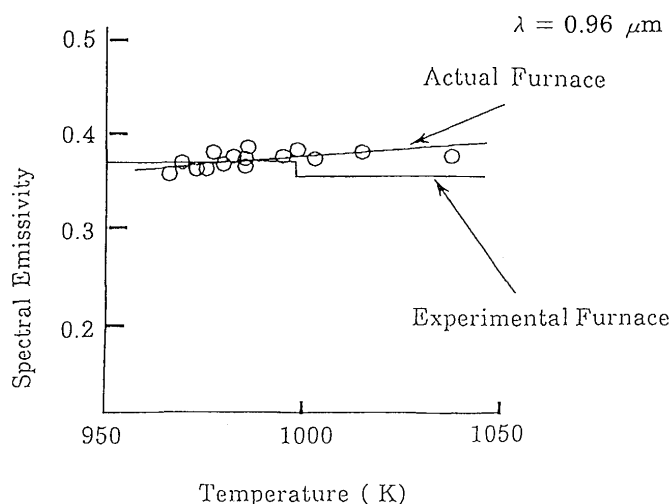


Fig. 11. Emissivity of the strip in CAL (Steel grade A).

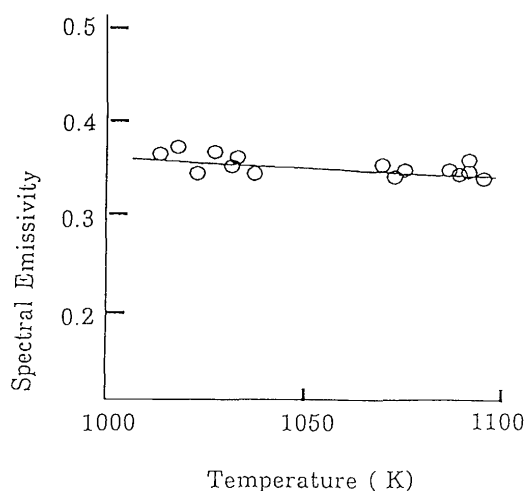


Fig. 12. Emissivity of the strip in CAL (Steel grade B).

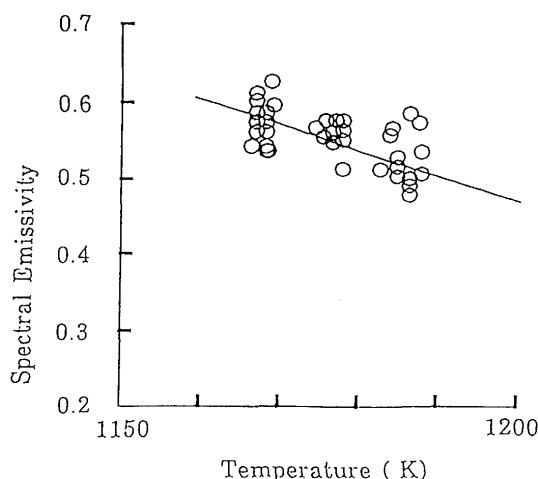


Fig. 13. Emissivity of the strip in CAL (Steel grade I).

鋼種(Grade I と呼ぶ)は、添加される微量元素(Si, Cr等)が炉内において表面に酸化膜を生じる材料であり、実験炉では時間の経過と共に放射率変動するため、放射率の同定が困難な材料であった。Fig.13において測温ロールを用い

てストリップ温度であると仮定した値から推定した放射率は前出の鋼種とは異なり同一温度でも放射率はかなり変動する。この原因は、ストリップ表面の酸化膜厚みが、雰囲気成分、炉内滞在時間、表面付近の添加物濃度等により変動するためである。この鋼種に関して、一次回帰からの測定値の変動の標準偏差は 2.3×10^{-2} であり、この値は温度に換算すると3.7Kに相当し、許容される変動であることが判明した。

しかしながら、本鋼種の放射率変動原因を考慮すると、処理時期の違いによる雰囲気成分、添加元素濃度の変動に伴う一次回帰式自体の変動の可能性が残るため、放射率を固定する従来方法では精度維持が困難であると思われる。よって、ストリップ温度を測定するセンサとして、測温ロールと放射温度計を組み合わせた温度測定システムが必要となる。

6. オンライン温度測定システム

上記の知見をもとに、定常時には測温ロールから得られたストリップ温度と放射温度計から得られる放射輝度を用いて放射率を測定し、非定常時には定常時に得られた放射率を用いて放射温度計指示値を補正するオンライン温度測定システムを構築する。

測温ロールを用いてストリップ温度を測定する場合、以下の条件を満たすことが必要である。

- (1) 測温ロール雰囲気温度とストリップ温度の差が $\pm 200\text{K}$ 以内
- (2) ストリップ温度一定
- (3) ロール温度一定

本システムでは、定常状態の判定のため、炉内温度、測温ロール温度、放射温度計指示値、ストリップサイズ等のプロセスデータを収集する。プロセスデータより判断して、定常状態であれば、測温ロール温度、放射温度計指示値から放射率を求め、保存する。一般冷延鋼板では放射率が安定であることを考慮すると、求められた放射率が現在使用中の値と大きく異なるときは放射温度計または測温ロール異常と判定することができる。また、現在使用中の値との差が小さい場合には放射率変動として放射率を修正する。

本システムにより、放射温度計によるストリップ温度の測定精度を維持することができる。また、従来、低ストリップ走行速度かつ定常状態において炉温=ストリップ温度として行っていた放射温度計及び放射率補正の精度確認が定常状態であれば容易にかつ作業を阻害することなく可能となる。

7. 結言

測温ロールは限られた条件のもとで、ストリップ温度を

測定することができる。よって、測温ロールと放射温度計を組み合わせることによりCAL炉内における放射率を測定することができた。その結果、一般冷延鋼板については従来実験炉から得られた放射率とほぼ等しい値であることが確認された。しかし、実験炉による放射率の同定が困難であった特定の鋼種では、測温ロールによる放射率測定が可能であることを示した。

よって、CALにおけるストリップ温度測定のためのセンサとしては、測温ロールを用いてストリップ温度を測定し、使用する放射温度計に応じたストリップ分光放射率を求め、放射温度計に正しく放射率補正を行ない、ストリップ温度を計測するシステムが有効である。

川鉄千葉No. 3 連続焼鈍設備では、稼動当初より測温ロールを適用し、6ヶ月で処理量の約70%材料の放射率を求め

た。さらに、1年後には処理量の約90%の材料の放射率を得、製品品質の安定に貢献している。

また、測温ロールは、放射率が未知の鋼種(テスト材等)に対し、処理時に定常状態を維持することにより放射率を測定し、精度の高い温度測定が可能になるという利点も合わせ持つ。

文 献

- 1) 田村 清, 栗田邦夫, 岩村忠昭, 田宮稔士: 第19回計測自動制御学会学術講演会, (1980), R-A005(F) L-9947
- 2) 田宮稔士, 栗田邦夫, 峰松隆嗣, 増野豊彦, 田村 清, 佐藤邦昭, 金田欣亮: 川崎製鉄技報, 14 (1982), p.106
- 3) 下間照男: 温度計測 (計測自動制御学会編), (1981), p.178, p.255
- 4) 田宮稔士, 峰松隆嗣, 増野豊彦, 佐藤邦昭, 金田欣亮, 田村 清: 鉄と鋼, 67 (1981), S365
- 5) J.R.ホールマン: 伝熱工学, (1982), p.52 [ブレイン図書出版]