川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.24 (1992) No.1

放射率自動補正型放射温度計の開発
Development of Auto-Emissivity-Compensated Radiation Thermomerter

福高　善己(Yoshimi Fukutaka)　飯田　永久(Nagahisa Iida)　岩村　忠昭(Tadaaki Iwamura)　菱刈　　功(Isao Hishikari)　井手　敏彦(Toshihiko Ide)　鈴木　利房(Toshihusa Suzuki)

要旨：
川崎製鉄と(株)チノーは，面積可変の補助熱源を利用した放射率自動補正型放射温度計を開発した。この方式は，測定面に対向して設けた補助熱源の実行面積を３段階に変えて，この補助熱源より熱放射の反射成分を含む測定表面から放射エネルギーを計測する。この情報に基づいて測定表面の散乱の度合を評価し，この散乱の度合でキルヒホッフの法則に補正を加えて放射率を測定する。この放射率を用いて放射率補正を行うことにより正確な温度を得る。本温度計は，放射率変化範囲が 0.2～1.0，温度範囲が 80～700℃の測定対象の温度を±10℃の精度で測定することが可能である。

Synopsis：
The new auto-emissivity-compensated radiation thermometer developed by the authors makes possible simultaneous measurement of temperature and emissivity by determining the degree of diffusion at the surface of the object of measurement. The thermometer uses a reference radiator of known temperature, the effective area of which can varied over three steps. The thermometer measures energy radiated by an object, including energy attributable to the reference radiator, in order to determine the diffusion factor of the surface the object. By compensating for this factor in Kirchhoff's law, emissivity can be appropriately evaluated and the true temperature of the object obtained. The thermometer is applicable to object with temperatures ranging from 80℃ to 700℃ and emissivities of 0.2-1.0, and shows an error of less than ±10℃.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

放射率自動補正型放射温度計の開発*

川崎製鉄技報
24 (1992) 1, 63-67

Development of Auto-Emissivity-Compensated Radiation Thermometer

福髙 善己
Yoshimi Fukutaka
水島製鉄所 制御技術部自動化推進室 主査(掛長)

飯田 永久
Nagahisa Iida
水島製鉄所 制御技術部自動化推進室長(部長補)

岩村 忠昭
Tadaaki Iwamura
水島製鉄所 制御技術部制御技術室長(部長)

菱刈 功
Isao Hishikari
㈱チノー 久喜事業所長

井手 敏彦
Toshihiko Ide
㈱チノー 研究所開発部長

鈴木 利房
Toshifusa Suzuki
㈱チノー 研究所開発部 主任研究員

要旨

川崎製鉄と㈱チノーは，面積可変の補助熱源を利用した放射率自動補正型放射温度計を開発した。この方式は，測定面に対向して設けた補助熱源の実効面積を3段階に変えて，この補助熱源よりの熱放射の反射成分を含む測定表面からの放射エネルギーを計測する。この情報に基づいて測定表面の散乱の度合を評価し，この散乱の度合でキルヒホッフの法則に補正を加えて放射率を測定する。この放射率を用いて放射率補正を行うことにより正確な温度を得る。本温度計は，放射率変化範囲が0.2～1.0，温度範囲が80～700°Cの測定対象の温度を±10°Cの精度で測定することが可能である。

Synopsis:

The new auto-emissivity-compensated radiation thermometer developed by the authors makes possible simultaneous measurement of temperature and emissivity by determining the degree of diffusion at the surface of the object of measurement. The thermometer uses a reference radiator of known temperature, the effective area of which can varied over three steps. The thermometer measures energy radiated by an object, including energy attributable to the reference radiator, in order to determine the diffusion factor of the surface of the object. By compensating for this factor in Kirchhoff's law, emissivity can be appropriately evaluated and the true temperature of the object obtained. The thermometer is applicable to objects with temperatures ranging from 80°C to 700°C and emissivities of 0.2-1.0, and shows an error of less than ±10°C.

1 緒　言

最近の鉄鋼製品の高級化，高品質化，高付加価値化の進展は，その製造段階における放射測温による真温度測定の重要性を，従来にも増して大きくしてきている。しかしながら，放射測温によって真温度を測定しようとする場合に，避けて通れない最大の課題は「放射率による測温誤差」である。この課題の克服のために，従来から数多くの放射率の影響を受けない放射測温法の研究，開発が行われてきた[1]。

移動する補助熱源を利用した放射測温法[2]（移動熱源法）はその中の一つで，原理的には優れた方法であるが，実プロセスに適用するには装置が大型化する難点があった。そこで川崎製鉄と株式会社チノーは，この温度計の実用化のための改善を行い，面積可変の補助熱源を利用した放射測温法[3,4]（面積可変熱源法）を開発した。

本稿では，その原理といくつかの応用例について報告する。

* 平成3年10月15日原稿受付

2 面積可変熱源法

放射率の影響を受けない放射測温を実現するためには，測定対象物の放射率を温度測定と同時に測定し，放射率補正を行う必要がある。この目的のために開発された多くの放射測温の方法は以下のように大別される。

（1） 受動方式

測定対象物からの放射情報のみを用いて真温度を測定する方式。

（2） 能動方式

補助熱源あるいはミラー等を用いて，測定対象物からの放射情報を変化させて，真温度を測定する方式。

また，測定対象物の放射率をはじめとする熱放射特性をあらかじめ事前に把握しておく必要性があるタイプと，必要性がないタイプに分けられる。

今回，開発した面積可変熱源法の放射率自動補正型放射温度計は，能動方式で，かつ熱放射特性の事前把握が必要なタイプであ

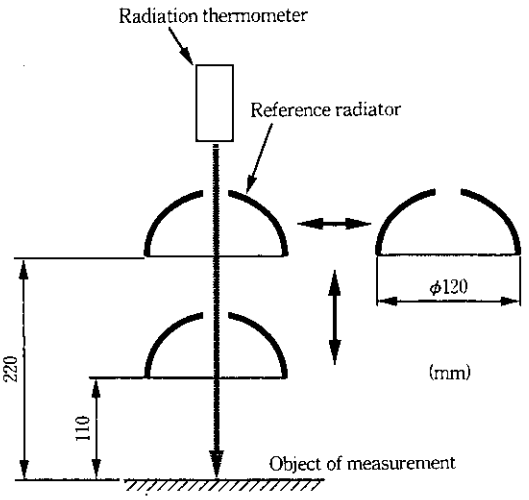

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system based on moving reference radiator (Dimensions are examples)

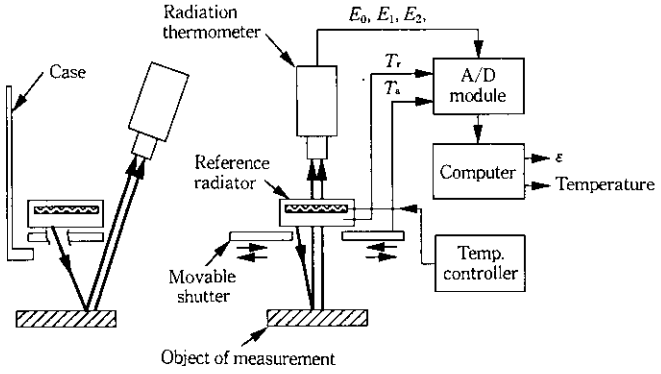

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system based on variable area reference radiator

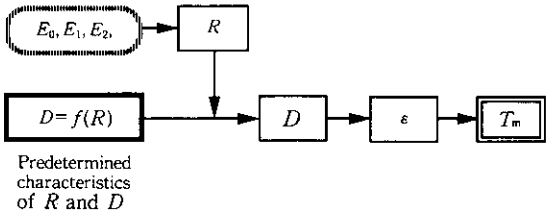

Fig. 3 General concept of measuring method

る。

本温度計は，前述したように，移動熱源法における実用面での難点を解消するために開発されたものである。移動熱源法は **Fig. 1** に示すように，おわん型補助熱源を測定対象物の前方に設置する。なお測温用の穴は，中央から少しずれた位置に設けられている。そして補助熱源を光路からはずした状態と，測定対象物からの距離を2段階に変化させた状態において，測定用の穴を通して測温する。その得られた三つのデータから放射率と真温度を求めるという方法である。

このように移動熱源法は，補助熱源の位置変化が大きいために大型な装置となる。

そこで装置の小型化のために，以下の構造的改良を加えた。

(1) 補助熱源は平板のものとし，測定対象面との距離は一定とする。

(2) 補助熱源の前面にシャッタ機構を設け，その開度を開閉して補助熱源の実効面積を変えることで，測定対象物から補助熱源を見込む立体角を変化させる。

このようにすることで，補助熱源を移動させるのと等価な効果を得ることが可能になった。**Fig. 2** に本温度計の原理構成を示す。

2.1 測定原理

補助熱源の反射光を測定して反射率 r を求め，$\varepsilon=1-r$ として放射率 ε を求める方法は，不透明な鏡面体には有効である。しかし，一般の物体には拡散性があり，反射光の一部分しか測定できないため，r は見かけ上小さく計測される。その結果，ε は大きく評価されることになる。

本温度計の原理的特徴は，測定面から補助熱源を見込む立体角を変化させ，熱源からの反射成分を含む測定面からの放射エネルギーを計測して，表面の散乱の度合を評価し，キルヒホッフの法則に補正を加え，真の放射率を求める点にある。

以下，Fig. 2 に基づいて説明する。測定対象に対向して補助熱源を設け，補助熱源から放射された熱放射束が測定対象物表面で反射し，その正反射成分が入射する位置に放射温度計を設置する。そして補助熱源の前面に一定の温度以下に冷却した2分割の可動板（シャッタ）を設け，その開度を全閉，半開，全開の3段階に変化させる。シャッタは十分な面積を有し背景放射源の役割も兼ねている。

Fig. 2 において，シャッタが閉じた時の見かけの放射輝度を E_0，半開の時を E_1，全開の時を E_2，測定対象物の温度を T_m(K)，測定対象物の放射率を ε，補助熱源の温度を T_r(K)，シャッタの温度を T_a(K) とする。補助熱源およびシャッタの表面は黒化されているので，放射率はほぼ1とみなすことができる。そしてシャッタ以外の背景放射の寄与分が無視できるとすると次式が成り立つ。

$$E_0=\varepsilon\cdot E(T_m)+(1-\varepsilon)\cdot E(T_a) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$E_1=\varepsilon\cdot E(T_m)+(1-\varepsilon)\cdot F_1\cdot E(T_r)+(1-\varepsilon)\cdot(1-F_1)\cdot E(T_a) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$E_2=\varepsilon\cdot E(T_m)+(1-\varepsilon)\cdot F_2\cdot E(T_r)+(1-\varepsilon)\cdot(1-F_2)\cdot E(T_a) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで $E(T)$ は温度 T の黒体放射輝度である。F_1，F_2 は，放射温度計の方向から測定対象面に放射を入射させた場合に，測定対象面で反射した放射の内，補助熱源に捕えられる割合を示す。F_1，F_2 は幾何学的諸量（補助熱源の寸法，シャッタ開度，測定対象物との距離など）と測定対象面の2方向反射率分布によって決まる量であり，捕捉率と呼ばれる[5]。

(2)および(3)式より(4)式が，(1)，(2)および(3)式より(5)式が得られる。

$$\varepsilon=1-\frac{E_2-E_1}{(F_2-F_1)\{E(T_r)-E(T_a)\}} \quad \cdots\cdots(4)$$

$$R=\frac{E_1-E_0}{E_2-E_0}=\frac{F_1}{F_2} \quad \cdots\cdots(5)$$

(4)式で放射率 ε がわかれば，(1)式を解くことによって測定対象の温度 T_m が求められる。(4)式で未知な量は $F_2-F_1(=D)$ である。一方，F_1 と F_2 の比 R は，(5)式の中の E_1，E_2 および E_0 を実測で求めることにより容易に得ることができる。そこで R と D の間に一定の関係があれば，R を実測して，D を定めることができる。

本測定方法の特徴は，R と D の相互関係（R-D 特性）をあらかじめ把握しておき，測温時には，この R-D 特性を利用して，R から D を求めて放射率を測定するという点である。

Fig. 3 にそのフローを示す。

2.2 *R-D* 特性の同定

R-D 特性の同定は，代表性を有する測定対象物のサンプル片を用いて行う。*R* と *D* のうち，*R* は(5)式から求める。一方，*D* は(4)式を *D* について整理して得られる(6)式から求める。(6)式の中の放射率 ε は，熱電温度計でサンプル温度 T_m を測定し，(7)式より求める。

$$D=\frac{E_2-E_1}{(1-\varepsilon)\{E(T_r)-E(T_a)\}} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$\varepsilon=\frac{E_0-E(T_a)}{E(T_m)-E(T_a)} \quad \cdots\cdots(7)$$

Fig. 4 に *R-D* 特性の同定のフローを示し，**Fig. 5** に面積可変熱源法の試作機の *R-D* 特性を示す。

サンプルとしては圧延されたままの冷延鋼板，サンドブラストを掛けた冷延鋼板，アルミニウム板およびステンレス鋼板を用いた。

放射温度計は，測定波長 2～12 μm のサーミスタボロメータを検出素子とする広帯域放射温度計を用い，補助熱源の温度 T_r を 500 °C とし，サンプル温度は常温とした。補助熱源の形状は正方形で，その大きさは，160 mm×160 mm である。その材質はアルミニウムであり，表面には黒体塗料を塗布した。補助熱源と測定対象の距離は 170 mm である。

測定は，シャッタ半開時のスリット幅を 11 mm と 22 mm の 2 水準で行った。Fig. 5 に示すとおりいずれのスリット幅においても *R* と *D* はサンプルの種類に関係なく同一曲線上に分布している。すなわち，温度計の幾何学的条件が変わらなければ，一つの *R-D* 特性が定まるということがわかる。ただ塗装鋼板のように，反射特性が大きく変化する測定対象においては，複数の *R-D* 特性にした方が良い場合がある。

なお，シャッタ半開時のスリット幅が小さくなるにしたがって *R* は小さく，*D* は大きくなる傾向がある。これは，測定表面の拡散性が増大するにしたがい，鏡面反射成分はその裾が広がるという 2 方向反射率分布特性のために，スリット幅が狭いと鏡面反射成分のすべてを捕捉することができなくなることに起因している[6]。

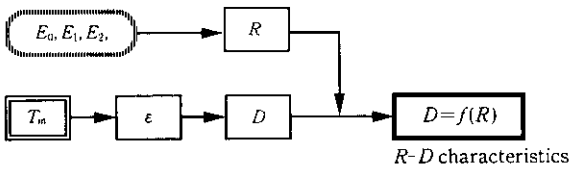

Fig. 4　Flow of determination of *R-D* characteristics

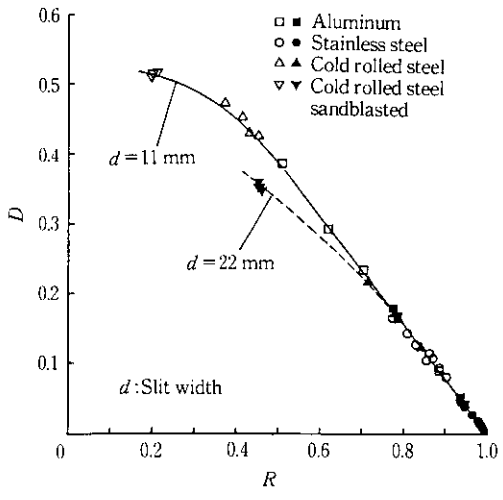

Fig. 5　*R-D* characteristic curve

3　放射率自動補正型放射温度計

面積可変補助熱源法を原理としたオンライン用の放射率自動補正型放射温度計を開発する過程で得られた多くの知見に基づき，より実用性の高い温度計が製品化された。

3.1　温度計の構成

汎用タイプの放射率自動補正型放射温度計の構成を **Fig. 6** に示す。主要構成品である補助熱源，シャッタ機構，放射温度計およびこれらに関係する電気機器はコンパクトにまとめられて，水冷ケース内に納められている。

主要構成品の特徴は以下のとおりである。

3.1.1　補助熱源

補助熱源にとって重要なことは，表面温度の均一性と表面の放射率の長期安定性である。これらの課題に対して以下のような工夫によって，信頼性の高い補助熱源を達成している。

(1)　表面温度の均一性は，熱源基材（500°C 未満ではアルミニウム，500°C 以上はニッケル）の熱伝導性を考慮したヒータの適正配置によって，±1°C 以内の均一性を実現している。

(2)　表面には NiO を溶射し，高い放射率と長期安定性を達成している。

なお，補助熱源は円形であり，φ150 mm の大きさである。

3.1.2　幅可変スリット用シャッタ

可変スリットを構成するシャッタは，補助熱源とともに本温度計の主要構成品である。その駆動機構は，**Fig. 7** に示すように冷却された半円状の部材を補助熱源の回りで回転移動させる方式である。このような駆動機構にすることで，装置をより小型にすることができた。また，その単純な機構によって機械的信頼性の高い装置となっている。

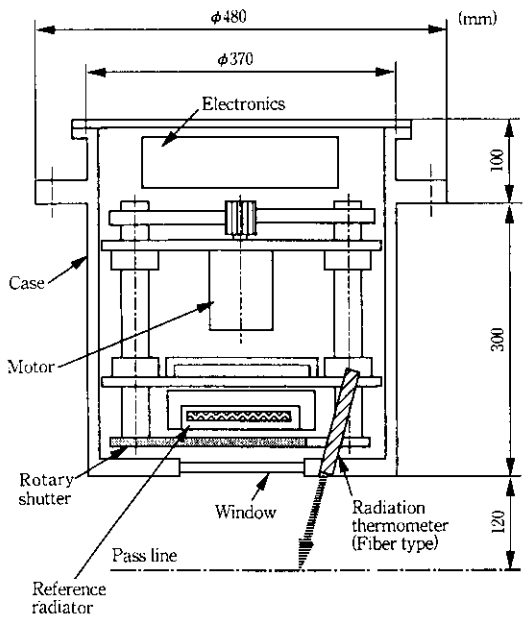

Fig. 6　Structure of thermometer head

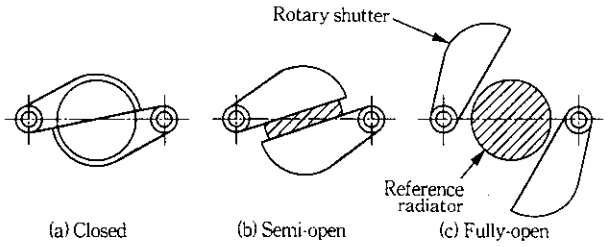

Fig. 7 Mechanism for varying area of reference radiator

3.1.3 放射温度計

コンパクトな装置にするために，放射温度計は光ファイバー式放射温度計を用いている。検出素子は測定温度範囲によって，PbS（冷却型），Ge，Si を使い分ける。

3.2 温度計の仕様

放射率自動補正型放射温度計の主な仕様を **Table 1** に示す。放射率の測定範囲は 0.2～1.0 であるが，原理的には 0.2 以下の領域も測定可能である。しかしその場合は，放射率測定値の相対誤差の増大による測温誤差に注意する必要がある。

一方，パスライン変動が ±30 mm 以内であれば固定設置でよいが，±30 mm を超える場合には，温度計を鋼板の動きに追従させる機構が必要である。筆者らは，±150 mm の鋼板の動きに対応できる温度計昇降装置を製作した。**Fig. 8** にその概略構成を示す。

Table 1 Specifications of the auto-emissivity-compensated radiation thermometer

Applicable measurement range (°C)	80～250 (A)	100～300 (B)	250～500 (C)	400～700 (D)
Detector	PbS [Coollde] (λ=2.0μm)		Ge (λ=1.6)	Si (λ=0.9)
Emissivity range	0.2 - 1.0			
Accuracy	±10°C			
Measuring cycle	5 s			
Measurement distance	120±30 mm			

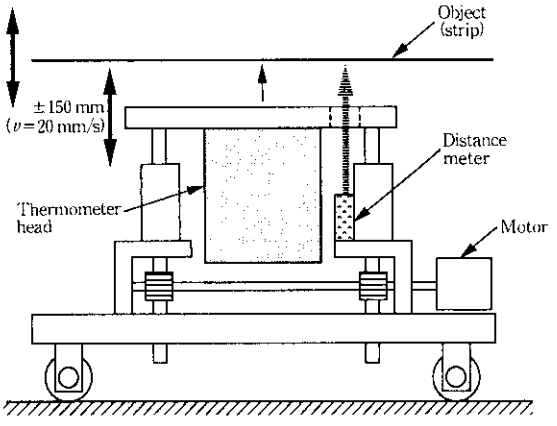

Fig. 8 Schematic diagram of device for control of distance between object and thermometer head

4 実プロセスへの適用結果

本温度計は，現在社内の 5 箇所に設置されている。これらの中で，鉄鋼製品の高級化，高付加価値化を代表する製品である塗装鋼板と合金化溶融亜鉛めっき鋼板の製造プロセスに適用した例について述べる。

4.1 塗装鋼板への適用

塗装鋼板の製造では，塗装膜の乾燥・焼付け温度が塗装膜の品質を決定するといわれている。このため乾燥・焼付け温度の管理が非常に重要である。しかし塗装鋼板の放射率は，塗料の種類，塗装膜の厚さ，焼付け炉での熱履歴，さらには放射温度計の検出波長などによって広い範囲に分布する。

このような塗装鋼板の代表的サンプルの *R-D* 特性を **Fig. 9** に示す。検出波長は λ=2 μm(PbS) である。塗装の種類と鋼板表面の材質によって，特性が少し異なっている。これは塗装の種類，鋼板表面の材質によって，光学的諸性質（2 方向反射率分布特性，分光吸収率など）が異なることに起因していると思われる。

このようなことから，オンラインでは測定対象に応じて *R-D* 特性を切り換えて測温している。**Fig. 10** にオンライン測定結果の一例を示す。接触式温度計との差は ±10°C 以内である。

なお，適用したラインは，サポートロールのないフロータ方式であり，大きなパスライン変動が予想されたので，Fig. 8 に示した昇降装置を装備している。

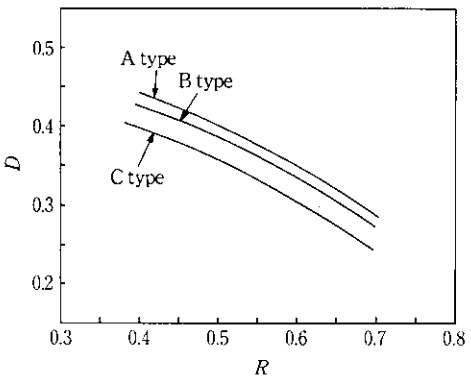

Fig. 9 *R-D* curves obtained from three types of organic composite coated steel sheets

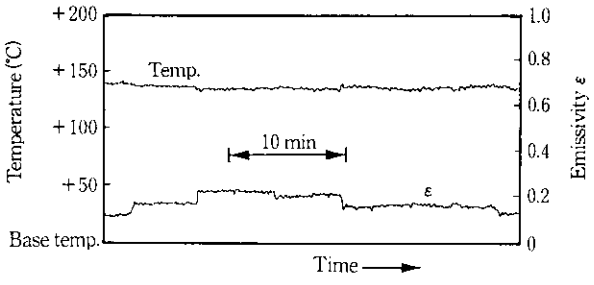

Fig. 10 Result of measurement of organic composite coated steel sheet

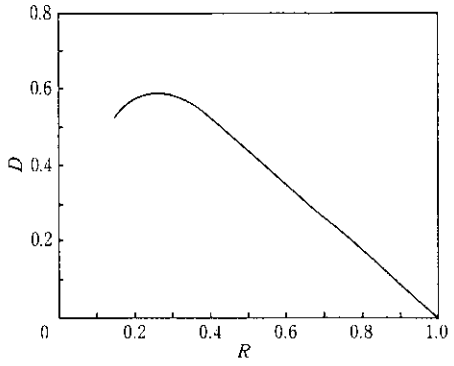

Fig. 11　*R-D* curve of galvannealed steel sheet

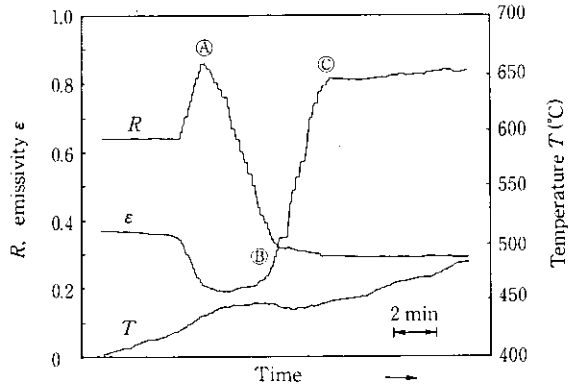

Fig. 12　Results of measurement during alloying of galvannealed steel sheet

4.2　合金化溶融亜鉛めっき鋼板への適用

合金化溶融亜鉛めっき鋼板の放射率は，溶融した亜鉛がその表面を覆っている合金化の初期段階では 0.1～0.2 であり，合金化の進行とともに放射率は増大し，合金化が完了する段階では 0.6～0.7 に達する[7]。

亜鉛付着量が 30～150 g/m² の未合金化サンプルを，合金化させながら，*R-D* 特性を調査した。その結果は，付着量，成分によらず一定であった(**Fig. 11**)。なお検出波長は $\lambda=0.9\,\mu m$(Si) である。

Fig. 12 は，得られた *R-D* 特性を用いて，合金化過程の *R*，放射率および表面温度を測定した結果である。温度が 420°C になると純亜鉛は溶融し始め（Ⓐ点），その表面は鏡面性が増す。その結果として *R* は 0.9 程度と高くなる。さらに加熱を続けると光沢を失い，*R* が小さくなって来る。*R* が 0.3 程度になると表面に Zn-Fe 合金が現われ，放射率が増大し始める（Ⓑ点）。そして時間とともに Zn-Fe 合金の占める割合が多くなり，表面から純亜鉛の部分が完全に消滅すると（©点），放射率はほぼ一定値となる。

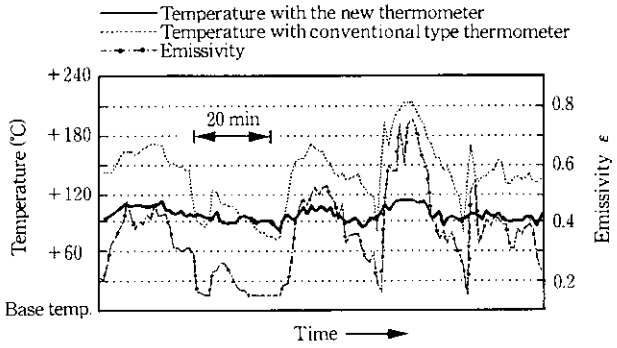

Fig. 13　Results of measurement of galvannealed steel sheet

Fig. 13 はオンラインで，放射率が大きく変動するように操業した時の測温結果である。放射率の変動範囲は，本温度計によれば，0.1～0.8 である。Fig. 13 によれば，放射率の補正値が一定値である従来型の放射温度計の出力値は，150°C 程度の変化幅になっているが，本温度計では放射率の自動補正によって，放射率変動の影響をほとんど受けていないことが分かる。

5　結　　言

面積可変の補助熱源を利用した放射率自動補正型放射温度計を開発した。本温度計は以下の特徴を有している。

（1）　放射率の測定に面積可変の補助熱源を利用して，測定表面の散乱の度合を評価し，その度合を用いてキルヒホッフの法則を補正することで，放射率の測定精度を高めている。

（2）　能動計測法でありながら，測定距離は 120 mm と大きく，実用性が高い。

（3）　補助熱源の面積を変える機構として，ロータリ式のシャッタを採用しているので，信頼性が高い。

（4）　温度測定の精度は，放射率の変動範囲が 0.2～1.0，温度範囲が 80～700°C の測定対象に対し，±10°C 以内である。

現在，本温度計は，川崎製鉄ではコーティングラインをはじめとして 5 箇所に設置され，品質管理，品質保証の強化に寄与している。

参　考　文　献

1) 小野　晃：第 77 回温度計測部会資料，(社)計測自動制御学会，(1989)，1-9
2) 菱刈　功，鈴木利房，井手敏彦：第 21 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，(1982)，385
3) 菱刈　功，井手敏彦，本杉賢司，福高善己：第 24 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，(1985)，649
4) 福高善己，山下英明，菱刈　功，井手敏彦：第 26 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，(1987)，651
5) 小野　晃，新井照男：第 22 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，(1983)，191
6) 新井照男，小野　晃：第 22 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，(1983)，193
7) 徳永良邦，山田正人：「合金化溶融亜鉛めっき鋼板表面の合金化挙動」，鉄と鋼，**70** (1984) 14，97-103