

## 論 文

UDC 536.55 : 535.3 : 669.14-977

## 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\*

井 内 徹\*\*

## A Method for Simultaneous Measurement of Both Temperature and Emissivity, and Its Applications to Steel Processes

Tohru IUCHI

## Synopsis:

A method for simultaneous measurement of both temperature and emissivity was developed by using multi-reflecting effect of radiation energy in a cavity. Each relative error of the measurement was within 1% in temperature, and 10% in emissivity respectively.

This method brought forth a new measuring apparatus, which could not only measure the true temperature of a measuring body, but also obtain some surface informations associated with the emissivity. An on-line system of this method was developed. This system is now operated in a coated steel strip process, where it controls the furnace of the process with temperature information and the quality of the coated strips with emissivity information simultaneously.

## 1. 緒 言

放射測温法は典型的な非接触式測定法であり、熱電対による接触式測温法とともに、鉄鋼プロセスにおける最も重要な温度計測手段となつている。放射測温では、周囲熱源からの外乱、すなわち背光雑音を消去し、かつ測定物体の放射率を正しく把握すれば、その物体の真の表面温度を測定することができる。上述の背光雑音が非常に困難な問題となるのは、低放射率鋼板（たとえば冷延鋼板）の常温付近での測温<sup>1)</sup>や炉内を走行する鋼板の測温<sup>2)</sup>である。これらの場合、背光雑音エネルギーが真の情報である測定鋼板自体からの放射エネルギーと同等ないしは、それ以上に検出されるところに基本的問題がある。したがつて、まず背光雑音を消去するという点から背光雑音を消去するという点から放射測温技術の一步が始まるといつてよい。背光雑音が消えないし無視できる状態において放射率の問題が登場する。還元雰囲気中の冷延鋼板や熱間圧延中の鋼板などのように、放射率は鉄鋼プロセスの連続一貫性のゆえに小さな変動を示すにすぎない場合もある。このような場合、あらかじめ放射率を測定しておけば、正確な温度測定が可能となる。

しかるに、放射率が温度、材質などによつて大きく変

動する場合、正しい放射測温は不可能である。放射測温法がすぐれた特長を有しながら、なお十分な信頼性を得ない原因は、まさにこの放射率に起因する場合が多い。この問題を解決する手法として、放射率を実質的に高めて黒体放射に近い状態を実現する DRURY らの半球付放射温度計<sup>3)</sup>や熱平衡空洞を利用する芝の方式<sup>4)</sup>、あるいは鏡面的反射を利用する KELSALL の放射率自動補正方法<sup>5)</sup>などがある。また適当な2つの波長で放射率の比が一定のときに、放射率の値が未知であつても使用できる2色比温度計<sup>6)</sup>などがある。これらの手法はそれぞれ長短があるが、いずれも原理的には放射率の影響を受けないような放射測温法を目指したものである。

このような放射測温法の現状の中で、筆者は逆に放射率に焦点をあて、積極的にこれを把えることによつて放射測温の限界を打破することを目指した。すなわち、温度と放射率を同時に測定する方法を開発した<sup>7)</sup>。本方法により、温度の正確な測定が可能となつたこと以外に、放射率もオンラインで測定できるので、これに関連する対象物の表面情報をプロセス情報として新たに付加活用できる。たとえば、皮覆鋼板の皮膜材質や色調の評価、酸化膜生成の把握、電気伝導率の変化測定、あるいは表面粗度の評価などである。

\* 昭和 53 年 1 月 17 日受付 (Received Jan. 17, 1978)

\*\* 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

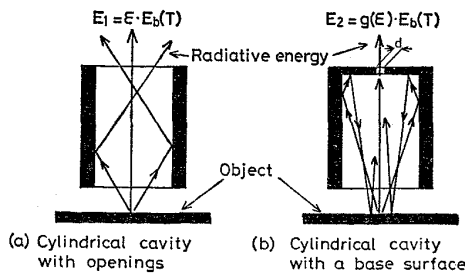


Fig. 1. Fundamental image of both temperature and emissivity measurement method. In (a) the detected energy ( $E_1$ ) is proportional to the emissivity ( $\epsilon$ ) of a measuring body, while in (b) the energy ( $E_2$ ) to  $g(\epsilon)$ , which is a function of  $\epsilon$ .

本研究論文では、本方法の原理と実験結果、および鉄鋼プロセスのオンライン実用化について述べる。

## 2. 温度と放射率の同時測定法

### 2.1 原理

温度と放射率の、2つの未知の値を求めるためには、両者を含む2つの情報を得て、これらを連立方程式として解けばよい。筆者は、内面を高反射率鏡面としたキャビティ内での放射エネルギーの多重反射効果を利用する手法でこれを実現した。Fig.1 にその基本的現象を図解する。(a)は、測定物体の上方に適当な間隔  $H$  で両端開口の円筒キャビティを設置している。(b)は、測定物体の上方に下端開口の円筒キャビティを設置している。このキャビティの上面の中心には、円筒直径  $2R$  に比較して小さな開口 ( $d\phi$ ) がある。それぞれのキャビティの上方には放射検出器が設置されているとし、(a)では円筒内を通して、(b)では小開口 ( $d\phi$ ) を通して測定物体面からの放射エネルギーを検出するものとする。いま、測定物体の温度、放射率をそれぞれ  $T, \epsilon$  とすると、(a)の構成において検出される放射エネルギー  $E_1$  は、キャビティ内面が鏡面であるために、キャビティの無い場合に等しく次式で表わすことができる。

$$E_1 = \epsilon \cdot E_b(T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、(b)の構成では、測定物体からの放射エネルギーは下端開口のキャビティ内面と、測定物体の間で多重反射する。そのために、検出されるエネルギー  $E_2$  は、実効的に放射率が增大した形で表わされ、次式のように書くことができる。

$$E_2 = g(\epsilon) \cdot E_b(T) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $E_b(T)$  は温度  $T$  の黒体放射エネルギーで、使用する放射検出器での出力を表わす。 $g(\epsilon)$  は上記のよ

うに、実効的に増大した測定物体のみかけの放射率を表わす。いま、 $g(\epsilon)$  の定式化を試みるために、次の諸仮定をおく。

- 仮定 1 : キャビティ自体からの放射エネルギーは無視する (周囲からの水冷ないし空冷などで実現できる)。
- 仮定 2 : 下端開口円筒キャビティの内面の反射率  $r$  が一定で、かつその寸法 (円筒内径  $2R$ , 長さ  $L$ ) が一定のとき、キャビティの実効的な反射率  $r_a$  ( $\leq 1$ ) は一定である。
- 仮定 3 :  $\epsilon$  は方向によらず一定である。すなわち、垂直放射率に等しい (多くの物体は、面法線に対して  $60^\circ$  位まではほぼ等方的である)。
- 仮定 4 : キャビティから測定物体に反射された放射エネルギーは、物体面で  $(1-\epsilon) \cdot p$  の割合で再びキャビティ内に反射される。ここで、 $p$  ( $\leq 1$ ) は物体面の非完全拡散の反射特性の程度を表わし、 $\epsilon$  に依存しない定数である。

以上の仮定のもとで、Fig.1 (b)を参照して、 $E_2$  を求めると次の諸式で表現される。

$$E_2 = [\epsilon + \epsilon \{r_a \cdot (1-\epsilon) \cdot p + r_a^2 \cdot (1-\epsilon)^2 \cdot p^2 + r_a^3 \cdot (1-\epsilon)^3 \cdot p^3 + \dots\}] \cdot E_b(T) \quad \dots\dots (3)$$

$$= \frac{\epsilon}{1 - r_a \cdot (1-\epsilon) \cdot p} \cdot E_b(T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$= \frac{(\alpha + 1) \cdot \epsilon}{\epsilon + \alpha} \cdot E_b(T) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$\alpha \equiv \frac{1 - r_a \cdot p}{r_a \cdot p} (\geq 0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3) 式の右辺第1項は、測定物体自体からの直接の放射エネルギー、第2項は第1項のエネルギーのうち、キャビティ内で反射され (実効反射率  $r_a$ )、さらに測定物体面で反射して再びキャビティに入射する (反射割合  $(1-\epsilon) \cdot p$ ) エネルギーを表している。第3項は第2項のエネルギーのうち、上記と同様な過程によってキャビティに入射する量を表わす。以下全く同様なプロセスを繰り返すまで続けていく。(3)式の右辺は、公比  $r_a \cdot (1-\epsilon) \cdot p < 1$  であるから(3)式は(4)式のように表わされる。ここで(6)式のように  $\alpha$  を定義すれば、(4)式は(5)式でまとめられる。したがって、(2)式の  $g(\epsilon)$  は

$$g(\epsilon) = \frac{(\alpha + 1) \cdot \epsilon}{\epsilon + \alpha} \quad \dots\dots\dots (7)$$

とおくことができる。仮定 2,4 により、 $\alpha$  は  $\epsilon$  には依らないが、間隔  $H$ , キャビティの寸法とその内面の放射率  $r$  および測定物体面の反射に関する特性に依存する定数

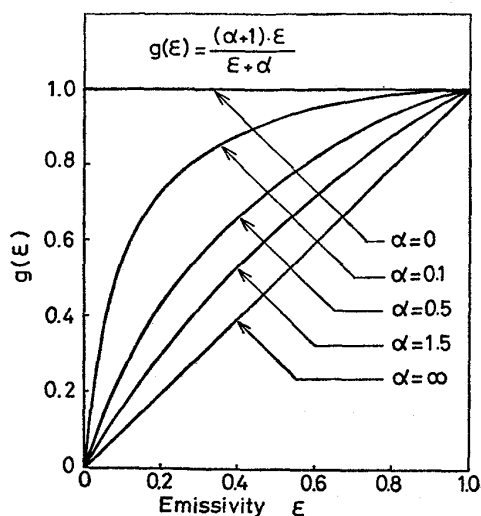


Fig. 2. Relation between  $g(\epsilon)$  and  $\epsilon$ . (Cf. eq. (7)).  $g(\epsilon)$  represents multi-reflecting effect of radiation energy in a cavity, where  $\alpha$  is a parameter independent of  $\epsilon$ .

パラメータである。Fig. 2 に  $\alpha$  をパラメータとして、 $g(\epsilon)$  の特性曲線を示した。同図において、 $\alpha$  が小さいほど同じ  $\epsilon$  に対して  $g(\epsilon)$  が大きくなるのがわかる。すなわち、キャビティの実効反射率  $r_a$  が大きく、 $p$  が大きいほど  $g(\epsilon)$  が大きい。 $\alpha=0$  の場合、(6) 式より  $r_a \cdot p=1$  であつて、キャビティは完全反射体となり、 $\epsilon$  のいかなる値にもかかわらず  $g(\epsilon)=1$  となる。したがつて、 $E_2$  は温度  $T$  の黒体放射エネルギーを示す。また、 $\alpha=\infty$  の場合、キャビティ内壁は完全吸収面となり、任意の  $\epsilon$  に対して、 $g(\epsilon)=\epsilon$  となる。したがつて、 $E_2$  は  $E_1$  に等しくなり、キャビティ効果はなくなる。 $\epsilon$  が大幅に変化しても  $\alpha$  が一定であることが、本原理の重要な点である。鉄鋼プロセスの各種鋼板は、1つのプロセスの中で一定の  $\alpha$  の値をとることが多い。この  $\alpha$  に関して 4.2 で述べる。(1) 式と (5) 式が  $\epsilon$  と  $T$  の、2つの未知数を含む2つの情報であり、したがつて両式を解けば、 $T$  と  $\epsilon$  が同時に求められることになる。

次にその解法のプロセスを述べる。(5) 式を (1) 式で辺々割り、 $G=E_2/E_1$  とおくと、

$$G = \frac{\alpha + 1}{\epsilon + \alpha} \dots \dots \dots (8)$$

となる。(8) 式の関係を  $\epsilon$  について書き直すと、次式になる。

$$\epsilon = \frac{\alpha + 1 - \alpha \cdot G}{G} \dots \dots \dots (9)$$

(9) 式より  $\epsilon$  が求まる。一般に、(9) 式は Fig. 3 のような非線形特性を有している。次に、この  $\epsilon$  で (1) 式を

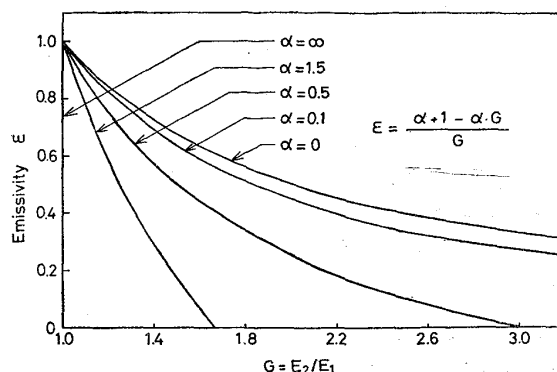


Fig. 3. Relation between  $\epsilon$  and  $G$ . (Cf. eq. (9)).  $\epsilon$  is obtained from  $G$ , which is the ratio of  $E_2$  and  $E_1$ .

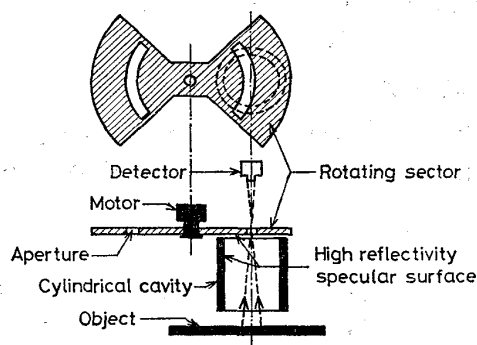


Fig. 4. Schematic diagram for the apparatus realizing the measurement principle.

辺々割ると次式になる。

$$\frac{E_1}{\epsilon} = E_b(T) \dots \dots \dots (10)$$

(10) 式の右辺は、放射検出器が温度  $T$  の黒体放射エネルギーを検出したときの値であるから、これを逆算して  $T$  が求められる。

### 2.2 装置構成

本測定原理を実現する装置の基本的構成を Fig. 4 に示す。測定物体面から  $H$  だけ離して両端開口の円筒キャビティを設置し、その上方に扇形の回転セクターを近接して設ける。セクターには図に示すように円周方向に幅  $d$  のスリットがある。セクターの上方には、このスリットを通して測定物体からの放射エネルギーを検出する検出器がある。キャビティ内面とセクター面は金メッキし、高反射率鏡面となつている。セクターの面がキャビティ開口面を覆つてないときには、Fig.1(a) の状態と同じであり、検出器は  $E_1$  を検出する。一方、セクターの面がキャビティを覆うとき、同様に Fig.1(b) の状態となる。したがつて、 $E_2$  を検出する。セクターを回転させれば、その速度に応じて2つの信号  $E_1, E_2$  が交互に検出され、

2.1 の原理に基づく演算により、温度と放射率を同時に求めることができる。Fig. 5 に本測定方法の検出演算システムのブロックダイアグラムを示す。

### 3. 基礎実験

#### 3.1 実験装置

Photo. 1 は基礎実験用装置で、両端開口の円筒キャビティと回転セクター（モーター駆動）、および測定鋼板を置いた加熱炉を示している。キャビティは長さ  $L=130\text{ mm}$  で真鍮製同軸 2 重円筒（内径  $2R=50\text{ mm}\phi$ 、外径  $80\text{ mm}\phi$ ）になつており、その中を冷却水が循環する。扇形のセクターの直径は  $220\text{ mm}$  で空隙幅は  $d=5\text{ mm}$  である。検出器として、市販の放射温度計（IR 社 Thermo-dot TD-7）を使用した。検出素子は PbS で検出波長帯は  $1.8\sim 3.0\mu\text{m}$  にある。

#### 3.2 実験方法

原理を確認する実験として、 $\epsilon$  の異なる測定サンプルを多数用意し、 $\epsilon$  を本原理以外の方法で測定するとともに、本測定法で  $G$  を測定し、両者の間に (9) 式、または Fig. 3 の関係をみたす定数  $\alpha$  が存在することを確かめればよい。実験の手順は以下の通りである。100 mmφ の円板にした測定サンプルを加熱炉の上で加熱した。サ

ンプルの表面温度は表面に点溶接した CA 熱電対によって求めた。

検出器で  $E_1, E_2$  を検出し、比  $G=E_2/E_1$  を計算した。一方、表面温度  $T$  に対する放射率は、定義により次式で求められる。

$$\epsilon = \frac{E_1}{E_b(T)} \dots\dots\dots (11)$$

#### 3.3 原理の実証

測定サンプルとして、冷延鋼板、ステンレス鋼板、およびアルミ板など、表面状態が多様に異なるものを各 10 枚ずつ用意した。表面温度を約  $200^\circ\text{C}$  から  $900^\circ\text{C}$  まで変化させて、前節の実験方法によつて  $\epsilon$  と  $G$  の関係を求めたところ、Table 1 のような結果を得た。各種サンプルごとの設定定数  $\alpha$  はそれぞれ表面状態が異なるために異なるが (2.1 仮定 4 参照)、同じ種類の間では  $\epsilon, T$  が大幅に変化しても  $\alpha$  はほぼ一定である。すなわち、本測定原理が成り立っていることが実証された。

#### 3.4 誤差の検討

測定値のバラツキが放射率の演算解に及ぼす誤差、さらに温度解を得る際の誤差を検討する。いま、 $\alpha$  が  $\Delta\alpha$

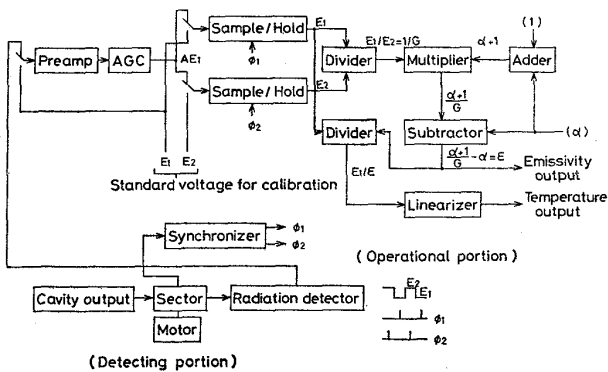


Fig. 5. Block diagram of the measurement system.

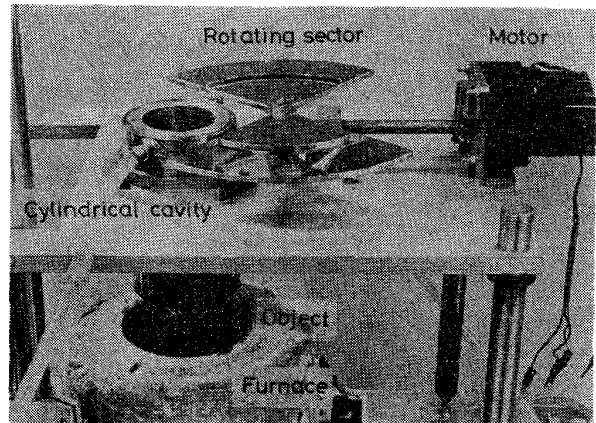


Photo. 1. An apparatus used in the laboratories.

Table 1. Experimental confirmation of the measurement principle. Parameter  $\alpha$  is a variable which depends on the surface condition of a sample.

Sample	Temperature range °C	Emissivity range $\epsilon$	$\alpha \pm \Delta\alpha$	RMS $\sigma$ $\mu\text{m}$	$ \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} $	$ \frac{\Delta T}{T} $
Cold rolled steel(dull)	200 ~ 600	0.19 ~ 0.81	$0.45 \pm 0.04$	1.329	0.11	0.01
Stainless steel(BA1)	300 ~ 900	0.20 ~ 0.74	$0.25 \pm 0.02$	0.078	0.06	0.01
Stainless steel(BA2)	300 ~ 900	0.21 ~ 0.73	$0.34 \pm 0.02$	0.190	0.06	0.01
Aluminum (specular)	300 ~ 500	0.05 ~ 0.08	$0.38 \pm 0.02$	0.351	0.28	0.026
Aluminum (shot blast)	300 ~ 500	0.30 ~ 0.38	$0.75 \pm 0.04$	8.541	0.05	0.005

だけ変動し、測定値  $G$  が  $\Delta G$  だけ変動するとき、 $\varepsilon$  の変動  $\Delta\varepsilon$  は(9)式を用いると次式で表わせる。

$$\Delta\varepsilon = -\frac{G-1}{G} \cdot \Delta\alpha - \frac{\alpha+1}{G^2} \cdot \Delta G \quad \dots\dots (12)$$

一方、测温誤差は、 $\varepsilon$  の誤差に依存し、次式で示される<sup>8)</sup>。

$$\Delta T = \frac{T}{n} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \quad \dots\dots (13)$$

$$n = \frac{C_2}{\lambda \cdot T} \quad \dots\dots (14)$$

ここで、

$T$  = 測定物体の表面温度、 $K$

$\lambda$  = 放射検出器の実効検出波長、 $\mu m$

$C_2 = 14388 =$  プランクの第2定数、 $\mu m \cdot K$

(13) 式に(12)式と(14)式を代入すると、

$$\Delta T = -\frac{\lambda \cdot T^2}{14388} \left( \frac{G-1}{\varepsilon \cdot G} \cdot \Delta\alpha + \frac{\alpha+1}{\varepsilon \cdot G^2} \cdot \Delta G \right) \quad \dots\dots (15)$$

が得られる。(12)式と(15)式が、本測定原理による定数  $\alpha$  と測定値  $G$  の変動による、 $\varepsilon$  と  $T$  の演算解の誤差である。この両式において、右辺第1項は  $\alpha$  の変動効果、第2項は  $G$  の変動効果である。第1項は  $G$  が大きいほど誤差が大きくなるが、第2項は逆に  $G$  の2乗に比例して誤差が小さくなる。したがって、一般に  $G$  の大きい方が誤差は小さいといえる。このことはキャビティの選択が重要であることを示しており、興味あるところである。次章でキャビティ特性を考察する。Table 1 には  $\alpha$  の変動  $\Delta\alpha$  に対して  $\varepsilon$ 、 $T$  のそれぞれの相対誤差を示してある。いずれのサンプルに対しても  $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$  は10%以内、 $|\Delta T/T|$  は1%以内である。ただし、アルミ鏡面板は、放射率がきわめて小さいので、例外的に誤差は大きくなる。波長  $\lambda$  がより短い場合、测温精度が比例して向上することは(15)式から明らかである。

#### 4. 考 察

本測定原理において最も重要な点は、 $G$  を求めるキャビティの特性である。この特性は、その形状、寸法、内面と測定物体の反射特性(拡散的反射、鏡面的反射等)および間隔などに関係がある。これらの間の関係を理論的に解明することは、放射测温系に対する相互反射理論としてそれ自体重要かつ興味ある研究対象である。2.1において簡単な理論展開による定式化を試みたが、多くの実験で得られた現象をすべて説明できる一般理論を組立てることは容易ではない。このことに関する、さらに詳細な解析と考察は別途報告する予定である<sup>9)</sup>。ここでは、実用上重要な2, 3の実験データを中心に述べる。

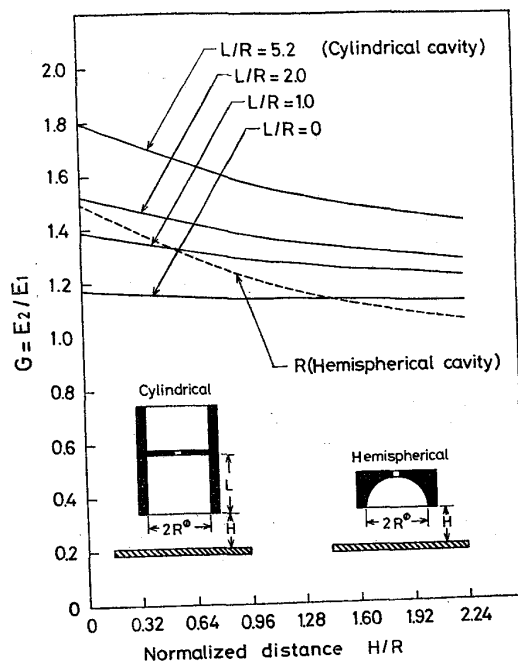


Fig. 6. Relation between  $G$  and normalized distance,  $H/R$ . A cylindrical cavity is superior to a hemispherical cavity because of less change of  $G$  against change of  $H/R$ .

本測定原理の実用化のためには、次の諸特性をキャビティに持たせることが重要である。

- (1)  $G$  が大きいこと。
- (2)  $H$  の変動に対する  $G$  の変動が小さいこと。
- (3) キャビティ構造の簡単さ、特に製作、保守管理の容易さ。

結論的には、上記3点をよく満たす、長い円筒キャビティが実用上最良のキャビティ構造である。

##### 4.1 キャビティ特性

キャビティ効果を調べるために、円筒キャビティと半球キャビティを用意した(Fig. 6参照)。キャビティの上面は内径に沿って上下移動可能な円盤とし、その中心に直径7mmφの小開孔を設けた。一方、半球キャビティも同じ寸法の小開孔  $d$  をその頂点に設けた。測定サンプルとして、一定温度に保持したときに放射率がほとんど変化しない皮覆鋼板を選んだ。間隔  $H$  を変化させたときの  $G$  の変化を Fig. 6 に示した。グラフの横軸は  $H/R$  で規格化してある。パラメータ  $L/R=0$  は移動円盤面がキャビティ下部端面にきた場合に相当する。Fig. 6 から2つのキャビティ特性の優劣は明らかである。円筒キャビティは  $G$  が大きく、 $H$  の変化に対する  $G$  の変化は小さい。一方、半球キャビティは上述の2つの点で円筒キャビティに決定的に劣るので、本測定原理を実用化するためには円筒キャビティを採用する。次に円筒キャビティ

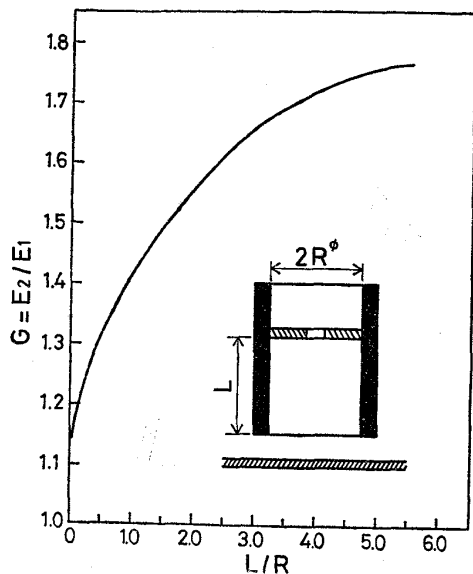


Fig. 7. Relation between  $G$  and  $L/R$  of a cylindrical cavity.

の最適な筒の長さ  $L$  の選択が問題になる。Fig. 7 に、 $L/R$  の変化に対する  $G$  の変化実験結果を示した。  $G$  は  $L/R$  の小さいところで  $L$  の増大と共に急速に大きくなるが、 $L/R=4$  以上ではその増加率はしだいに鈍ってくる。  $G$  の増大のためには  $L/R$  の大きい方がよいが、Fig. 6 から  $H$  の変化に対する  $G$  の変化は  $L/R$  の小さい方が少ないので、キャビティの構成としてこの相反する結果は好ましくない。一般に  $G$  の大きい方が測定精度の点から好ましい (3.4 参照)。したがって、円筒キャビティの製作仕様として  $L/R=5$  前後が適当と考えられる。

#### 4.2 測定サンプルの反射特性

Table 1 に示す各種サンプルに対する設定パラメータ  $\alpha$  は異なっている。このちがいは、キャビティ構造と構成が全く同じであるから、明らかに測定物体の特性に起因している。放射に関する特性は、放射率の方向依存性と反射特性である。滑らかで平坦な金属の場合、その光学的性質として 2.1 の仮定 3 (放射の等方性) は成立しないが、面法線に対して  $60^\circ$  位まではほぼ等方的とみなすことができる。ところで、本研究で使用した円筒キャビティとサンプルの間で放射エネルギーの多重反射作用は、上述の  $60^\circ$  の角度内のエネルギー束が大部分を占めている。なぜなら角度  $\theta = \tan^{-1} R/H$  は通常  $50^\circ$  以内であつて、それ以上の角度の効果はほとんど影響を及ぼさないからである。したがって、放射率の方向依存性の影響はほとんどないと考えられる。ゆえに、このちがいは反射に関する特性であることが容易に推定できる。反射特性 (非完全拡散の反射特性) は測定サンプルの表面粗度と密接に関係していることから<sup>10)</sup>、 $\alpha$  をこの点に着

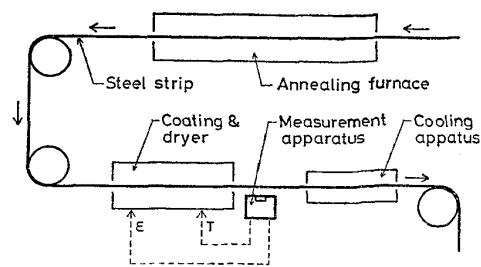


Fig. 8. Outline of coated steel strip process and layout of the measurement apparatus. The measurement is carried out just after the outlet of a dryer. The dryer and coating are controlled with temperature and emissivity information, respectively.

目して定式化することは可能である。参考までに Table 1 には、 $\alpha$  に対応して表面粗度を表わす RMS (Root Mean Square Roughness),  $\sigma$  の測定値も記してある。これから  $\alpha$  と  $\sigma$  の間により対応のあることが明らかである。本論文でこの問題に関して論ずるのは省略する。別途報告を予定している<sup>9)</sup>。

### 5. 鉄鋼プロセスへの応用 —オンライン実用化—

#### 5.1 概要

本原理は、放射率が大幅に変化する物体の温度測定に特に威力を発揮するが、同時に放射率に関連する表面情報をも得ることができるメリットがある。鉄鋼プロセスで考えられる数多くの適用可能分野の中で、皮覆鋼板の測温への応用は、その代表的なものである。すなわち、皮膜の放射率は大幅に変化するが、地の鋼板自体の放射率は安定で、しかも粗度など、表面状態は一様であり、 $\alpha$  はほぼ一定である。したがって、温度と放射率を同時に測定する本方法の原理が、正確に応用できる対象である。本方法を適用した皮覆鋼板製造プロセスの概要を簡単に述べておく。Fig. 8 に示すように、薄板鋼板は連続焼鈍炉を通過した後、皮膜付着工程に入る。鋼板表面に皮膜塗料を塗布し、次いで乾燥炉において焼き付け処理をする。この表面皮膜の焼き付け状態を炉出口での鋼板温度で管理するのであるが、従来の放射温度計では放射率の著しい変化のために測温は不可能であつた。そのため接触式の温度計で間欠的に測定し、乾燥炉の炉温を手動で制御していた。このような方法では、焼き付け状態の安定性が不十分であり、また作業労働に危険と負担が大変大きかつた。そこで、本方法の実用化測定装置を試作導入した結果、非接触による温度と放射率の適確な連続測定が可能となつた。乾燥炉の温度制御を鋼板温度

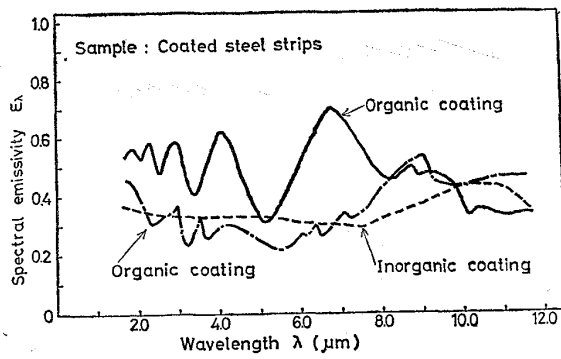


Fig. 9. Measurement result of spectral emissivities of coated steel strips. These emissivities depend largely on the quality, the thickness and the temperature of the coats.

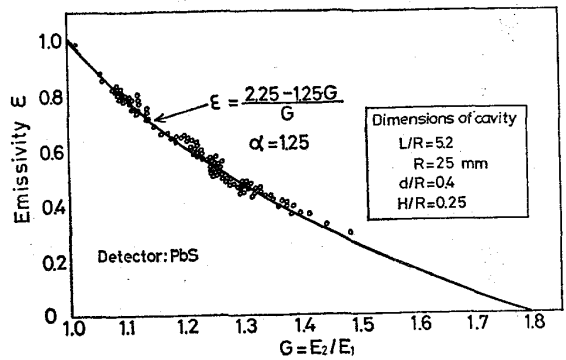


Fig. 11. Relation between  $\epsilon$  and  $G$  of coated steel strips. The line shows theoretical result and the circles show measured points. The measurement principle was experimentally proved.

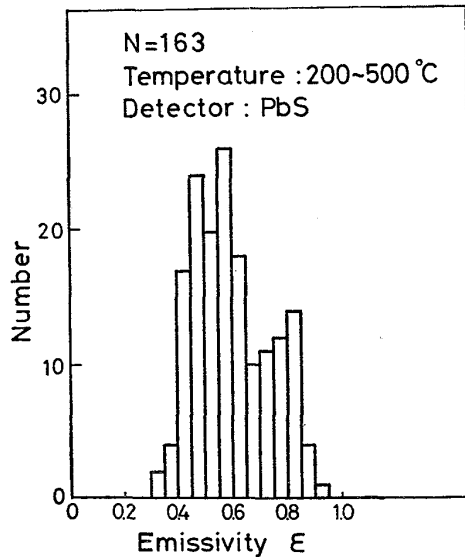


Fig. 10. Measurement result of emissivity distribution of coated steel strips. These emissivities change from 0.3 to 0.9.

情報により、また皮膜の品質管理を放射率情報によつて行なうことによつて、不安定な操業は解消し、また作業労働も大きく改善された。

### 5.2 皮覆鋼板の放射率特性

皮膜の材質は無機、および有機の2種類に大別される。さらに、それぞれの分類の中で、材質やその厚さなどが微妙に変化しているため、色調もさまざまに変化しており、したがつて放射率も著しく変化していると考えられた。これら皮膜鋼板の放射率をあらかじめ測定し、その波長依存性、温度依存性を一通り調べた。まず分光放射率測定装置で波長特性を測定した。本測定装置は、市販の2光束分光器(日本分光工業(株),SS-50)を改造したもので、同じ温度に設定した試料鋼板と黒体炉の放射エネルギー出力の比を各波長(0.5~15 $\mu$ m)ごとに測定する

ものである。Fig. 9に示すように、無機、有機材質によつてそれぞれ異なつた特徴ある変化を示した。分光放射率測定結果は、材質、皮膜厚み、温度によつて大幅に変動し、そのために全種類の鋼板の放射率が安定し、一定の値を示すような特定の波長域は存在せず、通常の放射測定の適用は不可能であることが確認された。上記の結果に基づき、3.2の方法で特定の波長域の検出器(PbS素子、波長域 1.8~3.0 $\mu$ m)で多量の放射率測定を実施した。測定数  $N=163$  で、温度を 200~500 $^{\circ}$ C の範囲で変化させたとき、放射率の度数分布は Fig. 10 のようになった。放射率の変化は、実に 0.3 から 0.9 までに広がっていることがわかる。

### 5.3 原理の確認

3.に述べた方法で、皮膜鋼板について測定原理の確認実験をした。Fig. 11は、 $\epsilon$ が著しく変化するにもかかわらず、 $\epsilon$ と $G$ が(9)式の関係で定式化できることを示している。測定値のバラツキが放射率と温度の演算解に及ぼす誤差は、3.4の考察により、それぞれ  $|\Delta\epsilon/\epsilon| \leq 0.08$ ,  $|\Delta T/T| \leq 0.01$  であつた。

### 5.4 オンライン実験

オンライン実用装置は、Fig. 8の皮覆ストリップ鋼板製造プロセスの乾燥炉出口直後に設置された。Photo. 2(a)にその検出部の配置を示している。キャビティ内面は約10 $\mu$ m厚の金メッキが施されており、その反射率の劣化を防止するためにキャビティ開口面にはフィルターとして熔融石英硝子がとりつけられている。またその外部表面に $N_2$ ガスバージを施してほこり付着防止をはかっている。フィルター透過率の検定を2ヶ月ごとに実施する管理対策をとつているが、実用上ほとんど問題はない。キャビティ、検出器および光学系を含む検出部全体は、Photo. 2(a)に示すように筐体内に配置され、その

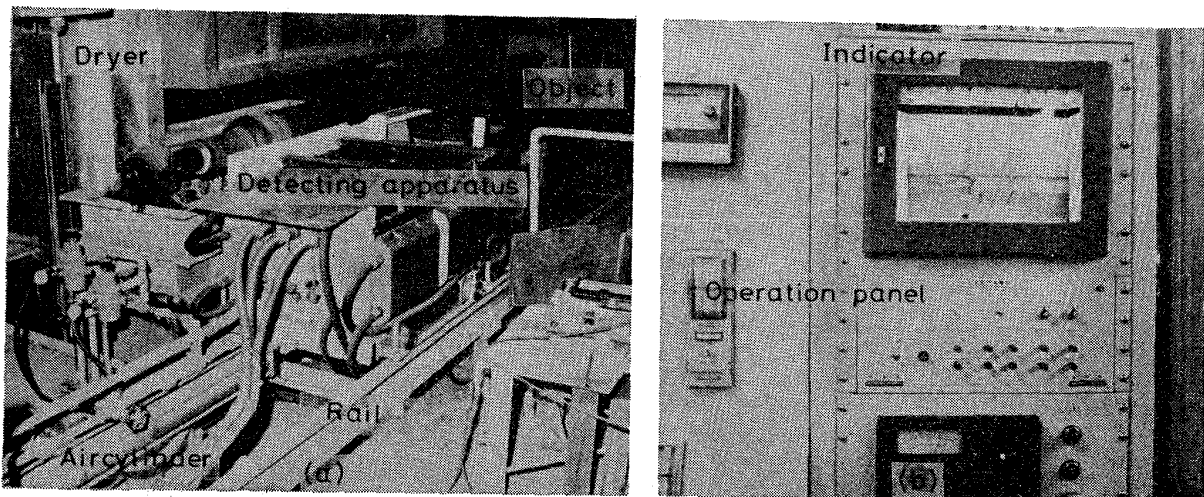


Photo. 2. The on-line system in a coated steel strip process.

- (a) The detecting apparatus is set just after the outlet of a dryer.  
 (b) The indicator is set in an operation room about 50 m apart from the measuring place.

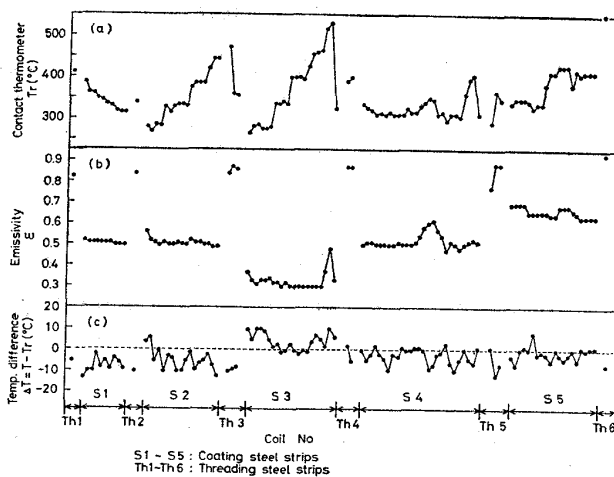


Fig. 12. Result of on-line measurement experiments in a coated steel strip process. Measured emissivities change from 0.3 to 0.9. The temperature error, however, is within  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

内部はほこり侵入防止のために内圧を大気中より数 10 mmHg 高くし、かつ熱的变化を防止するために、筐体周囲は水冷却されている。Photo. 2(b) は出力表示部で測定場所より数 10 m 離れたライン運転室に配置されている。オンライン実験の目的は、本装置が原理通りに  $\epsilon$  と  $T$  を適確に測定しているか実証することにある。走行する測定鋼板の上側から接触温度計 (安立計器製 HP-4F) で測温し、この指示を鋼板温度とみなした。この温度計の、筆者による実験によれば、測定物体が静止状態にあるとき、 $\pm 3^\circ\text{C}$  の誤差であった<sup>11)</sup>。鋼板速度は通常 100 m/min 程度で、走向時の接触摩擦によつて生ずる誤差

は、大野らの実験結果によれば  $\pm 2^\circ\text{C}$  程度である<sup>12)</sup>。したがつて、熟練した技術者が走向鋼板に接触測定した場合、ほぼ  $\pm 5^\circ\text{C}$  の誤差内に入ると推定されている。Fig. 12 に一連の測定結果をまとめた。(a) は接触温度計の鋼板温度指示値  $T_r$ 、(b) は本装置による放射率指示値、(c) は本装置による温度指示値  $T$  と  $T_r$  の差をそれぞれプロットしたものである。(c) の下部に測定鋼板のコイル番号を示した。この中で、S1~S5 は成品皮覆鋼板コイル、Th1~Th6 は継ぎ用スレッディングコイルを表わしている。Fig. 12 から明らかなように、 $300^\circ\text{C}$  から  $500^\circ\text{C}$  以上までの、鋼板温度の大幅な変化に対して ((a) 参照)、放射率指示は鋼板種類によつて 0.3 から 0.9 までの大幅な変化を示している ((b) 参照)。一方、温度指示差  $\Delta T = T - T_r$  はほぼ  $\pm 10^\circ\text{C}$  以内の誤差におさまっている ((c) 参照)。

(c) のコイル S3 の測定データのうち、 $300^\circ\text{C}$  以下の測温域でのデータはいずれも  $\Delta T$  が高目になっている。この原因は、 $\epsilon$  が低く、温度が低い領域で、本装置の演算回路の精度が感度不足のため不良であることによることが判明している。スレッディングコイルの  $\epsilon$  が 0.8 以上あるのは、その表面状態が焼き過ぎのため黒変していることに起因する。これらの結果より、本装置のオンライン実用化は成功と判定した。

次に、本装置の特長を示すオンライン測定データを若干紹介する。Fig. 13 はスレッディング鋼板から成品鋼板への継ぎ目前後の記録である。 $\epsilon$  と  $T$  の指示は、いずれも急激に変化している。スレッディング鋼板の放射率は  $\epsilon = 0.87$  で非常に高く、したがつて熱吸収がよいか



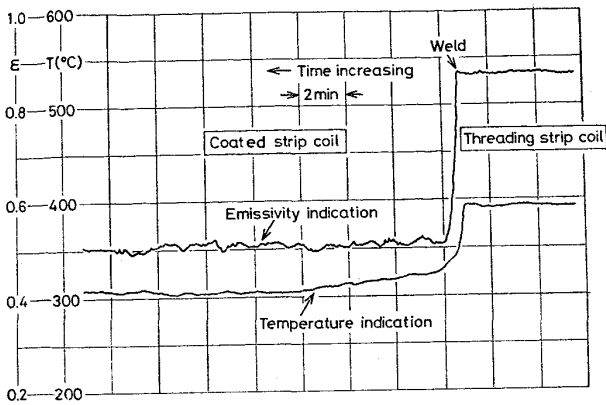


Fig. 13. An example of on-line measurement in coated steel strips. The temperature of a threading strip is higher than that of a coated strip product because the emissivity of the former is higher than the latter. These informations are applicable to the furnace control.

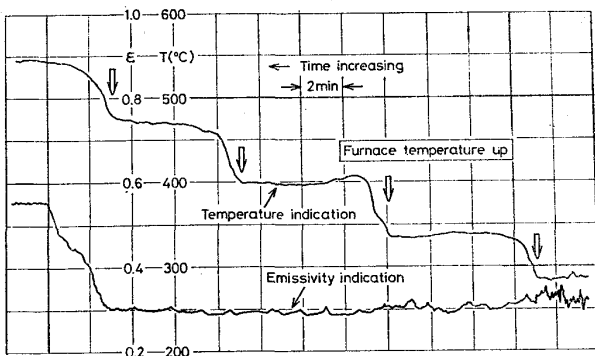


Fig. 14. An example of on-line measurement in a coated steel strip. The strip temperature increases according to the furnace temperature, while the emissivity is constant until about 470°C. Above that the emissivity increases abruptly. This phenomenon is an important information for the quality control of the strip.

らその温度も高い。一方、成品鋼板はほぼ  $\epsilon = 0.51$  であり、それに対応して温度も約 80°C 低くなっている。これらの情報は、乾燥炉の確実な操業情報となる。Fig. 14 は乾燥炉の雰囲気を一時間ごとに数10°C 以上昇温させていった測定例である。炉温に追従して鋼板温度指示は上昇する。ところが、放射率の方は  $T = 470^\circ\text{C}$  まで全く変化しないが、それ以上の温度で急激に増大した。この現象は皮膜材質の急激な状態変化に対応する。この情報は、皮膜の品質管理への重要な制御情報である。なお、右端の指示の乱れは、感度不足による。

本装置は、昭和50年末に生産現場に設置されて以来現在まで約2年間順調に稼動し、プロセスの制御と品質管

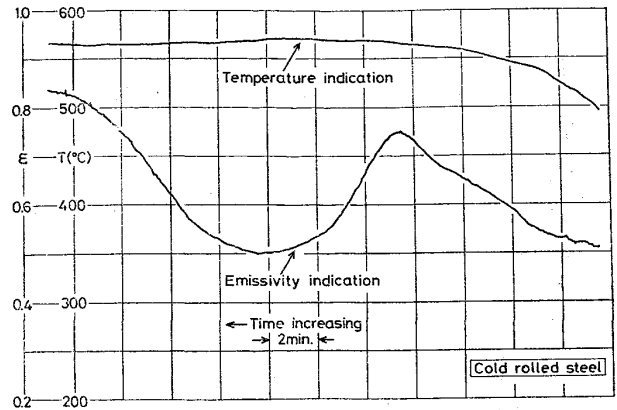


Fig. 15. The measurement of the emissivity change of a cold rolled steel when it is heated up.

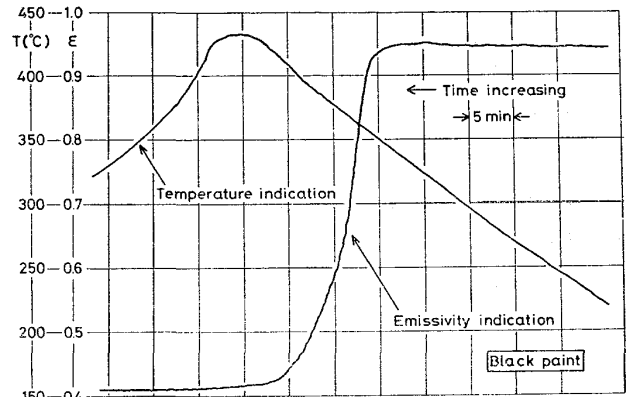


Fig. 16. The measurement result of the emissivity change of the black paint for optics. (Eppley-Parsons).

理の制御情報機器として実用化されている。

### 5.5 その他の応用について

Table 1 にまとめた各種材料について本測定原理は成立するので、それぞれ測定法の実用化が可能である。いくつかのプロセスにおいて、すでに実用化の計画も進められている。ここで、本測定原理の活用方法として興味ある例を1, 2 紹介しておく。Fig. 15 は冷延鋼板を加熱していくとき酸化膜の形成とともに放射率が変化する様子をとらえたものである。はじめ放射率は温度の上昇とともに増大していくが、ある温度で逆に減少しはじめかなり低い値まで下がる。その後再び増大しはじめ、もはや減少しない。放射率のこの極値現象は、酸化膜の半透膜的性質と厚みとの関係などで生ずると思われるが、本測定原理はこの種の現象の発見ないし測定の新しい手法として活用され得る。Fig. 16 は光学用黒色塗料(Eppley-Parsons 製)の放射率の温度特性を測定したものである。この塗料は光学システムの完全吸収材として、また放射測温の近似黒体面として利用される材料であるが、350°

C以上では放射率が急激に減少し、再び温度を下げてももとに戻らない。すなわち、光学用黒色塗料としての性能は 350°C 以下に限られることがわかる。

## 6. 結 言

放射測温技術はもとより温度測定技術の研究開発は、今なお世界的規模で進められているが、本測定原理のように温度とともに放射率も同時に測定し、両者の情報が対等の重みをもつ方法を実プロセスのオンライン装置として実用化したこの種の計測機器に関する報告はない。測定原理の発想と研究開発により、次の諸点を明らかにした。

- (1) 温度と放射率を同時に測定する本測定原理は、新しい放射測温システムである。
- (2) 本測定原理に基づくオンライン実用装置は、十分な精度を有し、常時使用に耐える。
- (3) 従来の放射温度計の根本的な弱点（放射率）を克服した。
- (4) 放射率に関連する表面情報をオンライン的に測定できる計測手法を与えた。
- (5) 鉄鋼プロセス以外の数多くの分野にも応用できる。計測手法として一般性、普遍性がある。

実用装置システムの開発にあたり、東京光学機械(株)の専門技術力に依存するところが多かつた。紙面を借りて深甚の謝意を表する。

## 文 献

- 1) 井内 徹: 第 16 回 SICE, 学術講演会, 2503, (1977), p. 343 (計測自動制御学会)
- 2) 井内 徹, 大野二郎, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, 61 (1975) 8, p. 2076
- 3) M. D. DRURY, K. P. PERRY, and T. LAND: JISI, 169 (1951) 11, p. 245
- 4) 芝 亀吉: 応用物理, 27 (1958) 4, p. 212
- 5) D. KELSALL: J. Sci. Instrum., 40 (1963), p. 1
- 6) G. J. HECHT: Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry 3, part 2 (1962), p. 407
- 7) 日本特許: 特公昭 52-7954
- 8) T. P. MURRAY: Iron Steel Eng., (1971) Feb., p. 33
- 9) 井内 徹: 計測と制御, 投稿予定
- 10) 高藤 英生, 石田次雄, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, 62 (1976) 6, p. 679
- 11) 井内 徹: 私信 (1975)
- 12) 大野二郎, 井内 徹, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, (1974), S155