

Fig. 1. Principle of multiple reflection.

…を求める。各反射点 P_1 から放射されるエネルギーは、求めた軌跡の逆を完全鏡面反射するものとする、測定される放射エネルギー E は(1)式で表される。

$$E = \epsilon_1^* \cdot Eb(T_1) + \epsilon_2^* \cdot Eb(T_2) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、鋼板及び反射板の(放射率, 反射率, 温度)をそれぞれ (ϵ_1, r_1, T_1) , (ϵ_2, r_2, T_2) , AB, AC 面上での反射回数を n, m , また、温度 T における黒体の放射エネルギーを $Eb(T)$ とすると、 ϵ_1^* , ϵ_2^* はそれぞれ(2), (3)式で表される。

$$\epsilon_1^* = \epsilon_1 \cdot \{1 - (r_1 \cdot r_2)^n\} / \{1 - (r_1 \cdot r_2)\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_2^* = \epsilon_2 \cdot r_1 \cdot \{1 - (r_1 \cdot r_2)^m\} / \{1 - (r_1 \cdot r_2)\} \dots\dots\dots (3)$$

E は、 $T_1 = T_2$ の場合(4)式で、 $T_1 \gg T_2$ の場合(5)式で表される。

$$E = (\epsilon_1^* + \epsilon_2^*) \cdot Eb(T_1) \dots\dots\dots (4)$$

$$E = \epsilon_1^* \cdot Eb(T_1) \dots\dots\dots (5)$$

2.1.2 実験及び結果

測定対象板で容器を作り、水を入れて沸点を保つまま ($T_1 = T_2 = 100^\circ\text{C}$)、焦電型放射温度計(波長 9~12 μm)を用いて放射率の角度依存性及びみかけの放射率の測定を行った。

Fig. 2 は測定角 θ を連続的に変えて測定した各種鋼板の放射率, Fig. 3 は反射板としてアルミ板を用いた場合の、カラー鋼板(薄緑)とブライト板のみかけの放射率 ($\epsilon_1^* + \epsilon_2^*$) の測定結果の一例である。実線が実測値破線は Fig. 2 の結果を用いて(1)(2)(3)式に従って計算した値である。また、Fig. 3 から、測定角 θ の減少にともない、みかけの放射率が向上することがわかる。計算値と実測値がよく一致しており、測定角 52° (B), 32° (C), 24° (D) 付近でみかけの放射率が不連続に増加しているのは、表面の反射特性が鏡面的であることを実証している。

2.2 カラー鋼板の温度・放射率同時測定

カラー鋼板製造ラインでは、塗料の塗布後の焼き付け温度は塗膜の性能(加工性・耐候性・防食性)を決定する重要な指標である。一方、品種による放射率の違いが大きく、放射率の影響を受けない測温法に対するニーズ

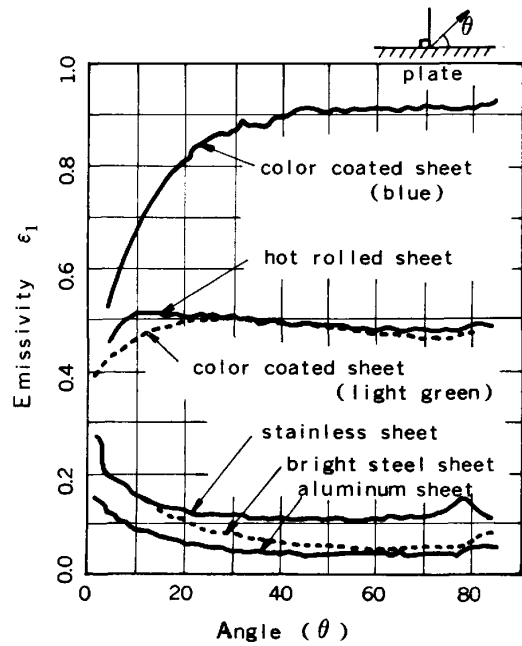


Fig. 2. Angular characteristic of emissivity.

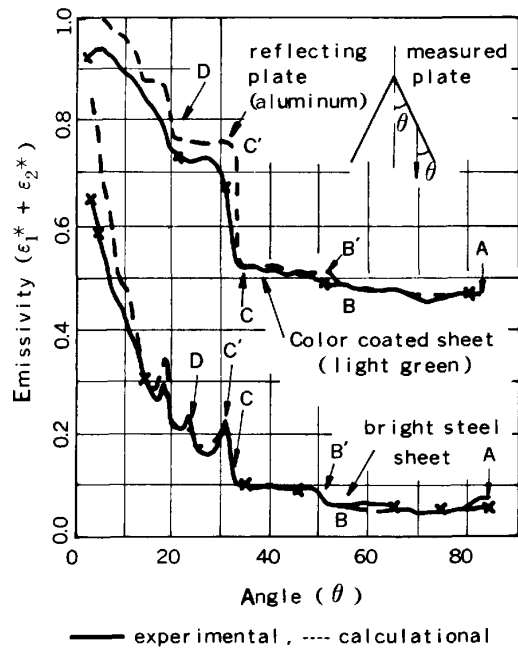


Fig. 3. Examples of emissivity ($\epsilon_1^* + \epsilon_2^*$) measurement.

が高い。今回、構造が簡単な平面反射板による多重反射を利用した温度・放射率同時測定法についてカラー鋼板製造ラインで検討した。

2.2.1 温度・放射率測定の原理

Fig. 4 に示すように鋼板に近接して反射板を設置し放射温度計で P_1 点, Q 点を測定する。 P_1 点で測定される放射エネルギー E_p は、反射板の温度 T_2 が鋼板の温度 T_1 に比べて十分低く、その放射エネルギーを無視で

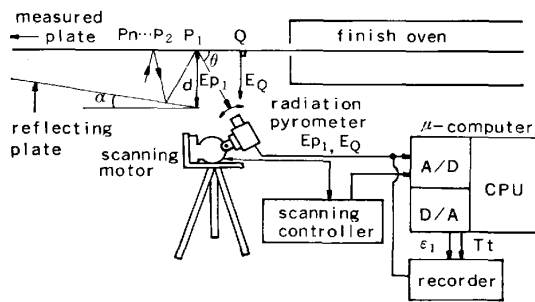


Fig. 4. Measurement system.

きるとすると、鋼板上の P_1 点から P_n 点までの各点から発する放射束が鋼板と反射板の間で多重反射した値で、(6)式で表される。Q点では、周囲雰囲気による雑音の影響を受けない放射温度計を用いれば、(7)式で表される。

$$E_P = \epsilon_1 \cdot \frac{1 - (r_1 \cdot r_2)^n}{1 - r_1 \cdot r_2} Eb(T_1) \dots\dots\dots (6)$$

$$E_Q = \epsilon_1 \cdot Eb(T_1) \dots\dots\dots (7)$$

(6) (7)式より(8)式が得られる。

$$E_P/E_Q = \{1 - (r_1 \cdot r_2)^n\} / (1 - r_1 \cdot r_2) \dots\dots\dots (8)$$

鋼板上の反射回数 n は、反射板と放射温度計の幾何学的配置 (α, θ, d) により決まる。従つて、反射板の反射率 r_2 、反射回数 n を既知とすれば(8)式及びキルヒホフの法則 ($\epsilon + r = 1$) を用いて鋼板の温度 T_1 、放射率 ϵ_1 が算出される。

2.2.2 実験及び結果

熱処理炉出側に、鋼板に近接 ($d=20$ cm) して、反射板 (アルミ板) を $\alpha=6^\circ$ 傾けて設置し、PbS 放射温度計 (分光感度 $1.5\sim 2.7 \mu\text{m}$) 及びモータとコントローラからなる走査装置を用い、 P_1 ($\theta=60^\circ$)、 Q ($\theta=90^\circ$) を測定した。温度計出力値 E_P, E_Q より、マイコンを用いて ϵ_1, T_1 を算出した。反射板反射率は基礎実験により $r_2=0.9$ とし、反射回数 $n=6$ として計算した。

下記3種類の鋼板について実ラインで測定を行った。
 A: カラー鋼板 (灰色), B: カラー鋼板 (ベージュ),
 C: ジンクロメタルの冷延鋼板面

測定結果例を Table 1 に、記録例を Fig. 5 に示す。本方法によつて求めた温度 T_t と接触式温度計 T_s との差は、3種類の鋼板について $\pm 3^\circ\text{C}$ 内であり、放射率 ϵ_1 も信頼性が高いと思われる。

3. リニア・アレイによる温度分布計測

S_1 光検出素子を一次元に多数配列した S_1 イメージセンサ (リニア・アレイ) は、鉄鋼プロセスにおいても70年代の始めから熱間あるいは冷間鋼材の寸法計測に応用され効果をあげている^{8)~10)}。これらの応用がイメージ

Table 1. Results of measurement.

Sample	A	B	C
ϵ_1	0.62~0.66	0.52~0.55	0.27~0.31
T_t ($^\circ\text{C}$)	217~219	212~215	278~282
T_s ($^\circ\text{C}$)	215~220	215~217	278~280

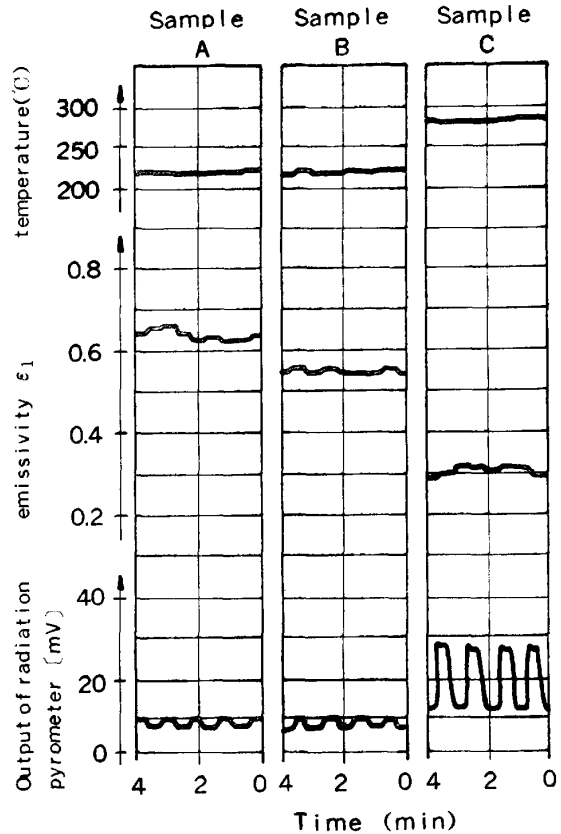


Fig. 5. Examples of recorder outputs.

センサのデジタルな機能を利用しているのに対し、最近アナログの機能に着目し温度分布計センサとして利用する研究開発が進められている^{11)~14)}。

今回、マイコンと組み合わせたシステムを用いて S_1 イメージセンサの温度分布計としての可能性について実験室及び圧延ラインでの計測実験を通じて確認した¹⁵⁾¹⁶⁾。その結果に基づき、電縫管溶接部温度測定システムの設備化を行い、現在順調に稼働している。

3.1 リニア・アレイの概要

リニア・アレイ素子の配列状況を Fig. 6 に示す。感度及び空間分解能は素子の大きさ、間隔及び素子数で決まる。素子の分光感度は $0.8 \mu\text{m}$ 付近にピークがある¹⁷⁾ ので放射温度計としての応用が可能である。試作した温度分布計の構成を Fig. 7 に、実験に使用した3種のリニア・アレイ・カメラ (MOS 型) の仕様を Table 2 に示す。測温対象の輝度分布をレンズ系を通してリニア・アレイ上に結像させる。放射輝度に比例した蓄積電荷が駆動回路により一定周期 t_s で電子的に走査され、

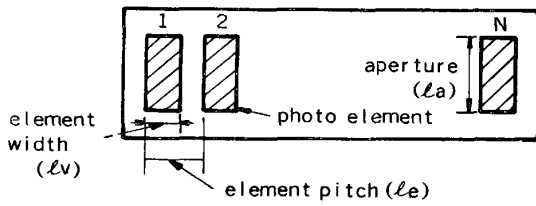


Fig. 6. Photodiode element.

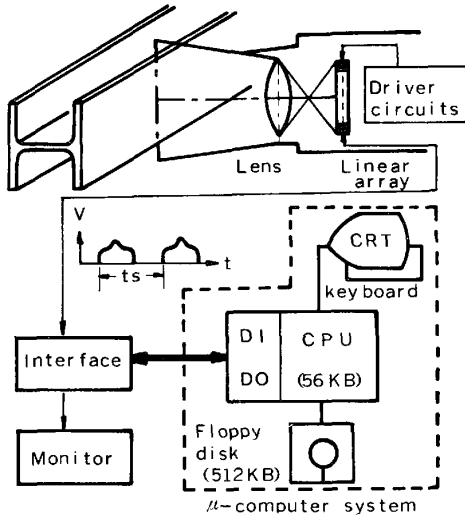


Fig. 7. Block diagram of the test system.

Table 2. Specifications of the linear array used in the test system.

Camera	1	2	3
Number of elements N	1 024	1 024	1 024
Aperture l_a (μm)	464	425	25
Element pitch l_e (μm)	28	25	25
Element width l_v (μm)	16	13	13

ビデオ信号として出力される。走査周波数の制御、出力電圧の読み取り、温度変換及び温度分布の解析のためにマイコン・システムを用いた。

3.2 リニア・アレイの特性

3.2.1 温度出力特性

リニア・アレイの出力電圧は走査周波数によつて制御することができ、電圧 V は走査周波数 f に反比例し(9)式で表すことができる。

$$V \propto 1/f \dots\dots\dots (9)$$

走査周波数をパラメータとして温度と出力電圧の関係を測定した結果を Fig. 8 に示す。走査周波数を 6 Hz から 800 Hz の間で選択すれば一定絞りの光学系で 500~1 100°C の広い範囲にわたつて測温できることがわかる。また、走査周波数の選択により、ビデオ・アンプ、A/D 変換器の特性の最良の点に出力電圧レベルを合わせることも可能である。

温度と出力電圧の関係はウィーンの式に実効波長の考

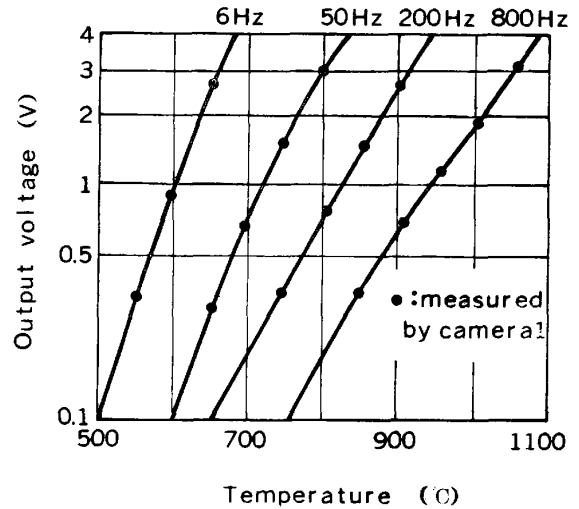


Fig. 8. Calibration curves of the linear array as a function of the scanning frequency.

えを導入し(9)式の関係を用いると基準化した電圧 V_r が(10)式で表される。

$$V_r = \frac{f_s}{f_r} \cdot V_s = A_0 \frac{c_1}{\lambda_0^5 \cdot \exp(c_2/\lambda_e \cdot T)} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 V_r , V_s : 基準化電圧, 測定電圧

f_r , f_s : 基準化周波数, 測定周波数

A_0 : 温度変換係数 λ_0 : 実効波長

A_0 , λ_0 の値を黒体炉検定で求めておくことにより、任意の測定周波数 f_s と、その時の測定電圧 V_s から(10)式を用いて測定温度 T を求めることができる。

3.2.2 温度分布計の測温誤差

リニア・アレイを温度分布計測に用いる場合に測温誤差となる要因として、素子特性の不均一と、素子の空間分解能がある。

素子間の感度の不均一性はカタログ値で $\pm 10\%$ となっているが¹⁷⁾、(10)式を用いて温度誤差に換算した結果、1 000°C で $\pm 10^\circ\text{C}$ 、600°C で $\pm 4^\circ\text{C}$ 程度であり、実用上許容できる大きさである。これらの関係について実用定点黒体炉を用いて実測を行つた。銀点炉 (961.93°C) の例ではばらつきは $\pm 8^\circ\text{C}$ 内であつた¹⁸⁾。また、不均一性のパターンはカメラによつて異なるが経時変化がなく安定しているので感度分布の補正をすればこの影響を低減することが可能である。

リニア・アレイの空間分解能は S_1 基板内での光量子の浸透深さにより影響を受ける。可視領域でのクロストークの影響は 1~2 素子といわれているのに対し¹⁹⁾、700°C の黒体炉を用いて実測したところ約 7 素子と大きな値を得た¹⁹⁾。波長の長い近赤外領域ではクロストークが発生し空間分解能が低下するので材料端部の温度分布を詳細に計測するときはこの現象に留意を要する。

3.3 電縫管溶接部温度測定システムの概要

電縫管製造ラインにおいて、安定して高品質のものを製造するためには、溶接条件を管理する必要があり、溶接入力制御を行うための最も重要なパラメータの一つは溶接部の温度である。一方、溶接部は数 mm と細く、通常の放射温度計で安定した情報を得るのは困難であるばかりでなく、溶接加熱部の温度は高入熱側では融点に近づき温度は飽和する傾向を示し¹⁹⁾、定常溶接時は入熱の高低を判断するのは不可能である。

今回、リニア・アレイ温度分布計システムを溶接部の温度測定に適用した。造管の走行方向に対して垂直の温度分布を検出することにより、溶接部温度の安定した検出、及び飽和特性を補うための情報を信号処理により容易に求めることが可能となった。

本システムの構成を Fig. 9 に示す。Table 3 に本システムの仕様をまとめている。リニア・アレイからのビデオ出力信号は 8 ビット A/D 変換され、デジタル信号としてカメラ・インターフェースに送られ、温度変換テーブル (ROM に内蔵) を用いて温度が求められる。A/D 変換によるデジタル誤差を小さくするため 2 つの走査周波数を用い高温部と低温部を交互に検出し、合成により温度分布を得ている。溶接部の温度分布は TV 画面で常時モニターされるとともに信号処理によりピーク温度及び入熱量値に等価と考えられる基準温度以上の面積値が制御信号としてアナログ出力される。TV 画面の出力の一例を Photo. 1 に示す。

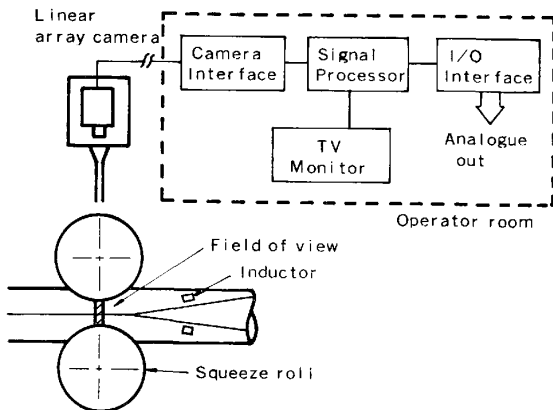


Fig. 9. Block diagram of Linear array System for ERW.

Table 3. Specifications of Linear array system for ERW.

Range (accuracy)	1100~1500°C (±10°C at ε=1)
Number of element	512
Temperature resolution	within 2.5°C
Field of view	30 mm (0.06 mm/element)
Sampling interval	Min. 0.08 s (Analog out) 0.5~5 s (TV display)

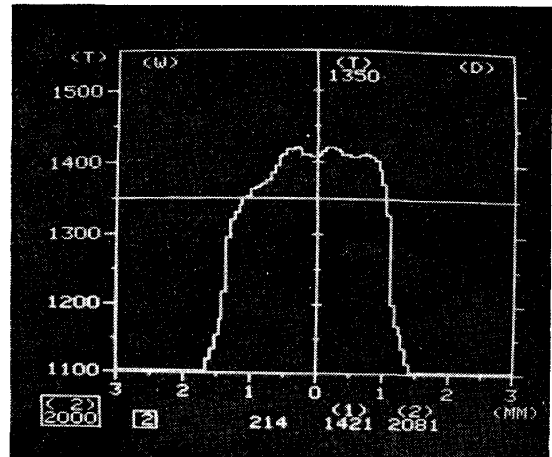


Photo. 1. An example of ERW's seam temperature distribution on TV display.

Table 4. Specifications of fiber scanning type system.

Range (accuracy)	800~1300°C (±10°C)
Principle	Two color pyrometer
Wave length	λ ₁ =0.85 μm, λ ₂ =1.0 μm
Optical rod	1.3 mmφ, NA=0.28
Bundle fiber	core: 100 μmφ, crad=140 μmφ
Pulse motor	0.36°/pulse
Scanning cycle	15 s

4. 光ファイバ走査による連铸鋼片温度分布計測

光ファイバ走査式温度分布計は、近年ますます高品質化を志向する鋼の連铸プロセスにおいて、铸片の品質管理上重要な、铸型直下における铸片温度²⁰⁾²¹⁾を表面温度分布の形でとらえるために開発された²²⁾。従来、铸型直下部の测温は、铸片の顕熱やスプレー水、水蒸気の存在などの計測上の悪環境条件²³⁾と、検出器を設置するための十分な空間がないなどの設置上の制約から、実用的な方法が確立されていなかった。本温度計は、これらの問題を光ファイバを用いて铸片の熱放射光を連铸機外へ導き出すことで解決した。

4.1 原理と構成

本温度計の構成を Fig. 10 に、仕様を Table 4 に示す。アレー状に配列されたオプティカルロッドに入射した铸片の熱放射光は、バンドルファイバにより連铸機外に導かれる。オプティカルスキャナは、屈曲したオプティカルロッドをパルスモータで回転させることにより円周上に配列した入射光を 1 点ずつ機械的に走査し、測定点ごとの放射光を時分割的に次の二色演算系に入力する。二色演算系ではこの光信号をハーフミラーで二分した後それぞれ光学フィルタを通して単波長信号化し、S_i フォトセルで光電変換している。各波長の信号は増幅、A/D 変換の後にマイコンに入力されて二色演算され、多点温

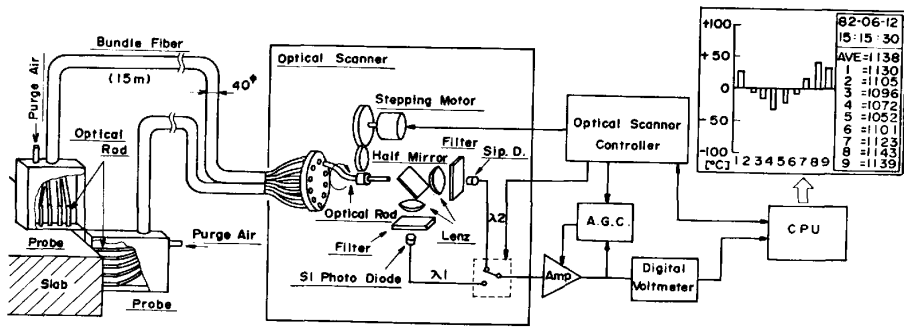


Fig. 10. Optical fiber scanning type surface temperature profile meter system.

度分布の形で CRT 及びプリンタに出力される。

光学系は先端に耐熱性をもたせるため、ファイバ構造の石英ロッドを用い、これに 15 m のバンドルファイバを固定給合させてオプチカルスキャナに導いた。800°C の鋳片からの放射光受光パワーが -30 dBm に対して、光電変換部への入射パワーは -46.5 dBm となり、本温度計に使用した受光素子感度が -50 dBm であるから、800°C 以上の測温が可能である。

オプチカルスキャナは、上部にバンドルファイバを接続するコネクタを 10 個円周上に配置し、屈曲した石英ロッドをパルスモータで回転させ、光学的走査を行う。パルスモータ・ステップにして ±2 ステップ以内の光軸のずれは、二色演算出力に影響を与えない。

本温度計の受光端部は二種類のタイプを開発した。Photo. 2 はアレー型のプローブで、100 mm のロッドを 15 mm 間隔で 6 本並列配置してある。このプローブを 2 組使うことで鋳片コーナー部 2 面の温度分布を同時測定できる。Photo. 3 はチューブ型プローブで 1000 mm のロッド 3 本をそれぞれステンレス・フレキシブルチューブに通してある。このタイプでは連鋳機内に入るのが 22 mmφ のチューブのみなので、わずかなすきまにも自由に設置できる利点がある。

信号処理系はマイコンを用い、二色演算、アンプゲインの調整、及びデータの平均化処理を行う。測温結果は CRT 及びプリンタに温度分布の形で数値及びグラフ表示される。また、鋳型直下のように、パウダーフィルムやミストなどの外乱要因の多い環境下では測定値は大きくばらつくが、10~20 周期分の測定値の移動平均をとることにより、これらの外乱成分を除去した。

4.2 実験結果

4.2.1 スラブコーナー部測温実験

2 組のアレー型プローブ (測定点数 6 点及び 3 点) をスラブ CC の出口に Fig. 11 のように直角に配置し、スラブコーナーの長・短辺面の温度分布を測定した。結

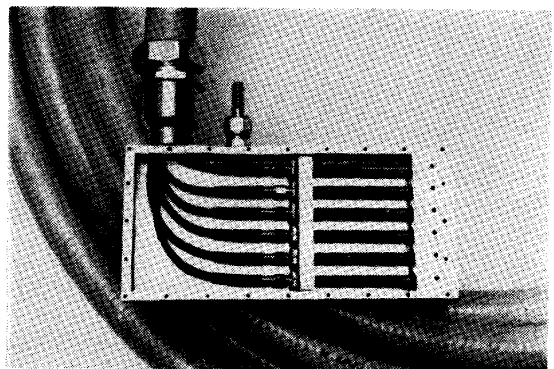


Photo. 2. Array type probe.

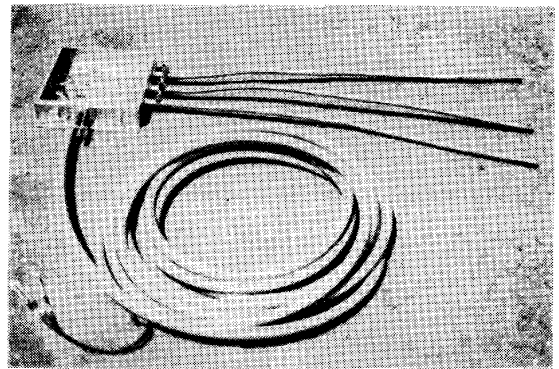


Photo. 3. Tube type probe.

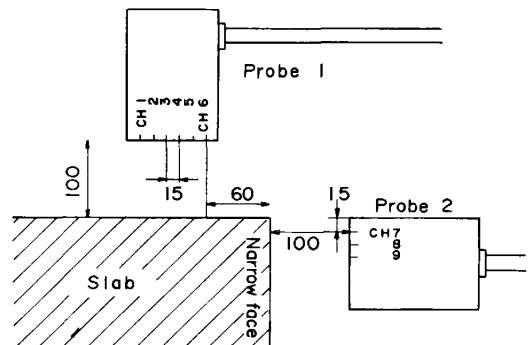


Fig. 11. Arrangement of testing probe at slab corner.

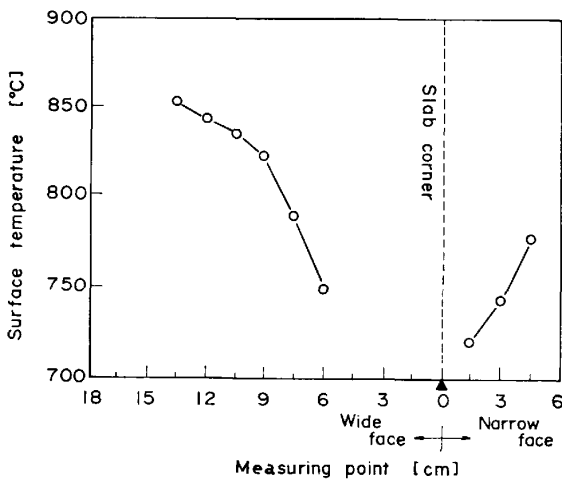


Fig. 12. Test result of temperature profile of C.C. slab corner.

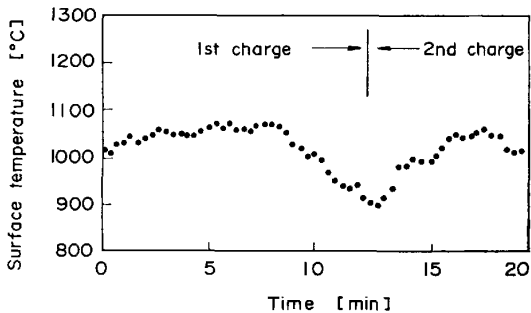


Fig. 13. An Example of C.C. slab temperature measured under mould.

果は Fig. 12 に示すようにスラブコーナーに向かう温度降下の様子がみられた。

4.2.2 鋳型直下測温実験

アレー型、チューブ型の両プローブについてスラブ CC の鋳型直下の測温テストを行った。鋳型直下にはサポートロール、スプレーノズル等が密集しており、据付自由度の大きいチューブ型プローブの方が容易に取り付けられた。いずれのプローブも 1 週間以上の連続使用に耐えた。Fig. 13 は測定結果例である。データのばらつきを 15 点 (5 min) の移動平均をとることで平滑化した。鍋交換による鋳片温度低下が明瞭に読みとれる。

5. 結 言

最近行つた放射による温度計測法の新しい技術につい

て 3 例を紹介した。いずれも基礎技術は確立したので、今後は改良応用技術の開発を推進したいと考える。

文 献

- 1) 井内 徹, 大野二郎, 草鹿履一郎: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2076
- 2) 井内 徹: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 97
- 3) 田村洋一: 計測自動制御学会第 46 回温度計測部会 (1981)
- 4) T. IUCHI and R. KUSAKA: 6th Symposium on Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry (1982) Mar.
- 5) 井内 徹, 田中富三男, 渡辺国俊: 鉄と鋼, 69 (1983), S 1156
- 6) 原田直樹, 今井清隆, 山田健夫: 鉄と鋼, 69 (1983), S 1223
- 7) 原田直樹, 今井清隆, 山田健夫: 鉄と鋼, 69 (1983), S 1224
- 8) D. L. BURK and N. F. SIMIC: Iron and Steel Engineer, 55 (1978) 7, p. 43
- 9) D. LARIN: Association of Iron and Steel Engineers Annual Convention (1978)
- 10) M. GUEGAN: Rev. Métall-CIT, 78 (1981), p. 309
- 11) P. BOHLÄNDER: Stahl Eisen, 97 (1977), p. 927
- 12) H. J. KOPINECK: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 267
- 13) 長坂浩安, 水野正志, 宇津野光朗: 電気製鋼, 52 (1981), p. 239
- 14) 菱刈 功, 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 (1983), p. 1616
- 15) T. YAMADA, N. HARADA and M. KOYANAGI: 6th Symposium on Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry (1982) Mar.
- 16) 山田健夫, 原田直樹, 小柳弥夫: 計測と制御, 21 (1982), p. 1050
- 17) EG & G Reticon: Catalogue (1981)
- 18) R. HOPWOOD: SPIE, 230, Minicomputers and Microprocessors in Optical System (1980)
- 19) 京極哲朗, 高間館千春, 堀田一之, 達脇正雄, 根本 進: 住友金属, 35 (1983), p. 61
- 20) 野崎 努, 松野淳一, 村田賢治, 大井 浩, 児玉正範: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1058
- 21) 原田慎三, 草野昭彦, 三隅秀幸, 射平由雄: 鉄と鋼, 62 (1976), S 545
- 22) 松村勝己, 寺尾精太, 手塚宏之, 井原 将, 吉村耕三, 板井靖生: 鉄と鋼, 68 (1982), S 852
- 23) 田村洋一: 計測と制御, 21 (1981), p. 1039