

© 1984 ISIJ

電縫鋼管溶接部の温度パターン計測と 溶接入熱制御

技術報告

達脇 正雄*・高間館千春*²・堀田 一之*²

Temperature Pattern Measurement and Weld Control in Electric Resistance Welded Tube Mill

Masao TATSUWAKI, Chiharu TAKAMADATE, and Kazuyuki HOTTA

Synopsis:

In order to realize highly reliable quality of electric resistance welded (ERW) tubes, it is indispensable to grasp precise heat condition of weld portion. Out of such need, the pattern thermometer (PT) have been developed as a sensor which can directly measure temperature pattern of weld portion, and it can also pick out the temperature of the position which is necessary for weld control in its measuring view. Following results have been obtained by installing the PT in the ERW tube mill.

- (1) The temperature of the portion just before weld V point is suitable for the index to control heat input for weld, because it can be measured stably and well corresponds to heat condition of weld portion.
- (2) The highly stabilized weld control system have been achieved by combining feed-back control of weld temperature measured by the PT with feed-forward control for compensation of wall thickness fluctuation.

1. 緒 言

電縫鋼管は、より高級な用途へその製造範囲を拡大しつつあり、最近では油井管や火力発電用ボイラ管にも使用されるようになってきた。

このような高級化を推進するためには、信頼性の高い製造技術の確立が不可欠であり、特に溶接部の品質を高位に安定させることが必須となってくる。

これにこたえるべく、著者らは、溶接部の品質を決定する上での重要な要素である溶接入熱状態を正確に把握できるセンサの開発を進めてきた。

その結果、電縫溶接部の温度分布が測定できる温度パターン計を開発し、これを用いることにより制御性に優れた溶接入熱制御システムを実現した。

本報告では、温度パターン計を中心に、溶接入熱制御システムについても言及する。

2. 温度パターン計の開発

2.1 開発のねらい

電縫鋼管の入熱状態を測定するものとしては2色温度計があるが、これは電縫溶接部のように微小な部位を測温する場合、以下のような問題がある。

- (1) 測温している部位が正確に把握できない。
- (2) ある程度の測定視野を必要とし、その視野内の平均的な温度を測定することになる。

このため、2色温度計を用いる場合には、溶接点近傍のビード温度を測温することになり、必ずしも溶接部の入熱を正確に測定しているとはいいがたい。

以上の理由により、従来の2色温度計に代わる新センサを開発することとし、以下の基本仕様を決めた。

- (1) 電縫溶接部が直接測温できること
- (2) 測温部位が外部からモニタリングできること
- (3) 測定視野内の温度分布がわかり、視野内の任意の部分の温度が制御用に出力できること

2.2 温度パターン計1号機

2.2.1 概要

前記基本仕様を満足すべく、Fig. 1 に示す電縫鋼管溶接部測定用の温度パターン計1号機（以降、PT-1 とする）を設計、製作した。

PT-1 の特徴は、以下のとおり。

- (1) 測定視野内の任意の方向の温度パターンを測定できるようにするため、温度測定用素子として、ランダムアクセス可能な二次元撮像素子を用いた。
- (2) 溶接部の雰囲気を考慮し、水や水蒸気の影響を

昭和 58 年 11 月 16 日受付 (Received Nov. 16, 1983)

* 住友金属工業(株)制御技術センター (Instrumentation and Control Technology Center, Cumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

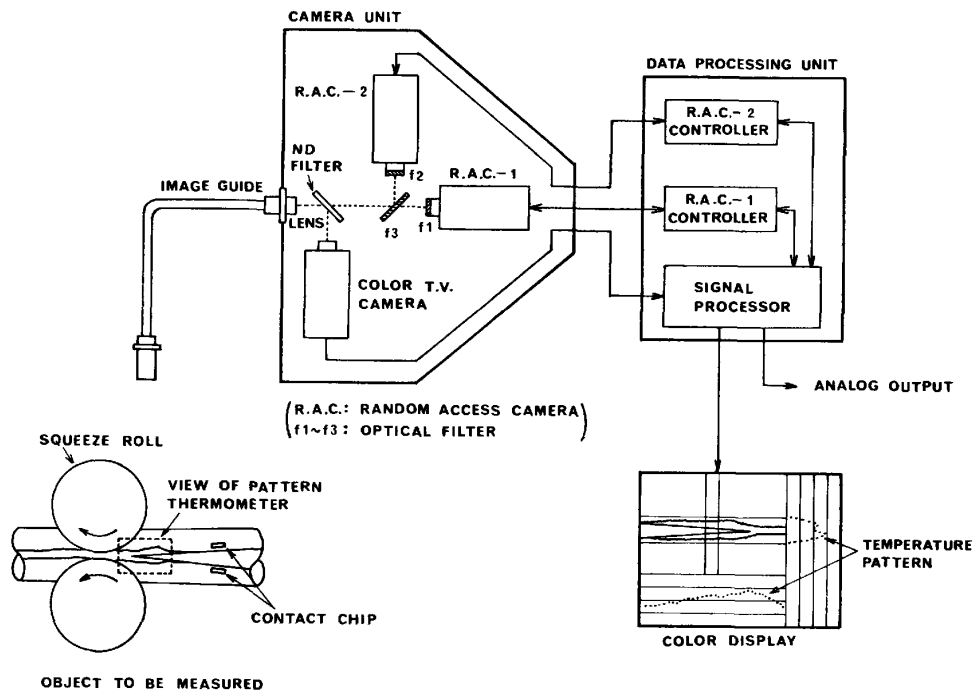


Fig. 1. Schematic diagram of the pattern thermometer "PT-1".

受けにくい2波長帯の放射エネルギー比による温度演算方式を採用した。

(3) 溶接部の近傍はセンサの設置スペースもないし、電磁ノイズの影響を受けやすいため、撮像装置を溶接機から離し、光ファイバ画素から成るイメージガイドにより、溶接部の情報を撮像装置に導く方式とした。

PT-1は、測定対象の画像と温度分布を同時にモニタ上に表示すると共に、制御用として測定視野内の任意の部位の温度を最大8点迄出力できるようにしている。

2.2.2 構成

PT-1は、Fig. 1に示すように、イメージガイド、撮像ユニット、信号処理ユニット、モニタテレビから構成されている。

(1) イメージガイド

長さ3.2mで、約4.8万本の光ファイバ画素から成るイメージガイドを使用した。

(2) 撮像ユニット

3台の撮像装置と光学系から構成されており、イメージガイドにより導かれた測定対象の像が、それぞれの撮像画面上に同時に結像するようになっている。撮像装置は2台が温度計測用、1台が画像表示用で、温度計測用には光路中に光学フィルタを配置し、それぞれに異なる2波長帯の光のみが選択的に入射結像するようにしてある。温度計測用の撮像装置としては、以下の理由により、イメージディセクタを撮像素子とするランダムアクセスカメラ(以降、RACとする)を採用した²⁾。

- ・ダイナミックレンジが大きい
- ・ランダムアクセスが可能である
- ・温度計測に使用する波長域(可視域)の分光感度が大きい
- ・光電変換特性が、光電面の照度に対しリニアである

(3) 信号処理ユニット

温度計測用撮像装置の制御部、温度演算部、画像合成部から構成されており、測定視野内の指定された領域の温度パターンを求め、測定視野の画像と合成してモニタ表示用の映像信号として出力すると共に、制御用として指定部位の温度を出力できるようになっている。

(4) モニタテレビ

信号処理ユニットの画像合成部から出力された映像信号を表示するもので、一般の工業用カラーモニタを使用した。

2.2.3 測定原理

温度 T の物体(対象)をレンズ、フィルタ、検出器等から成る測定系を通して観測した場合、波長 λ の分光放射輝度 $L_D(\lambda, T)$ は、(1)式で表される³⁾。

$$L_D(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \tau(\lambda) \cdot L(\lambda, T) \cdot F(\lambda) \cdots (1)$$

- ここで
- $\varepsilon(\lambda, T)$: 対象の波長 λ に対する分光放射率
 - $\tau(\lambda)$: 対象から放射された波長 λ の光が、検出器に達するまでの透過率
 - $F(\lambda)$: 測定系の分光特性によつて決まる関数
 - $L(\lambda, T)$: 完全放射体の分光放射輝度で、

(2)式で表される.

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \dots\dots\dots (2)$$

(c_1, c_2 : 定数)

前記測定系により, 特定の2波長 λ_1, λ_2 に対する分光放射輝度を観測した場合, 両者の比 $R(T)$ は,

$$R(T) = C \cdot \frac{\varepsilon(\lambda_2, T) \cdot \tau(\lambda_2) \cdot L(\lambda_2, T)}{\varepsilon(\lambda_1, T) \cdot \tau(\lambda_1) \cdot L(\lambda_1, T)} \dots\dots\dots (3)$$

ただし, $C = F(\lambda_2)/F(\lambda_1)$ で, C は測定系によって決まる定数

ここで, 対象を鉄やタングステンとし, λ_1, λ_2 を可視域の限定した波長域から選ぶと, $\varepsilon(\lambda_1, T) \approx \varepsilon(\lambda_2, T)$ とできるし, 対象と検出器の間に水蒸気やガス等が存在しても, それらが着色していなければ, 可視域では $\tau(\lambda_1) \approx \tau(\lambda_2)$ とみなせるため, (3)式は

$$R(T) \approx C \frac{L(\lambda_2, T)}{L(\lambda_1, T)} = C \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^5 \exp\left\{\frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる. すなわち, $R(T)$ は, 対象の放射率や伝搬光路中の透過率に影響されず, 対象の温度と対応することがわかる. このため, あらかじめ温度のわかっている物体を用いて $R(T)$ を校正しておけば, $R(T)$ を計算することにより, 対象の温度が測定できることになる. さらに, 検出器に2次元撮像素子を用いて対象の微小部位ごとに $R(T)$ が求まるようにすれば, 対象の温度パターンが測定できる.

温度パターン計は, 撮像素子の前面に光学フィルタを配し, 対象から放射された特定の2波長帯の光を, それぞれ別々に入射結像させることにより, 対象の微小部位ごとに $R(T)$ が求められるようにしたものである.

2.2.4 温度パターン測定方法

電縫鋼管溶接部の管進行方向の温度パターン測定方法を以下に述べる.

- (1) あらかじめ RAC の走査領域を決めておき, その領域内に溶接部が入るように撮像する.
- (2) Fig. 2 に示すように, 走査領域を水平方向に n 等分し, その等分線上を2台同時に垂直方向に走査を行い, 走査中の RAC 出力値をそれぞれ積分する. この積分値の比を計算すれば, 次項に述べる校正方法であらかじめ作成しておいた温度への変換テーブルにより, 該水平位置の温度が求まる.
- (3) これを $1 \sim n$ まで順次繰り返すことにより, 溶接部の管進行方向温度パターンを求めている.

実際には, 精度を上げるために, RAC の暗電流補正を実施し, 温度への変換も同一場所を複数回走査するこ

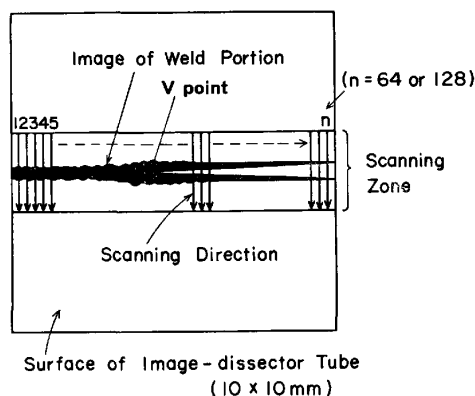


Fig. 2. Scanning direction for longitudinal temperature measurement.

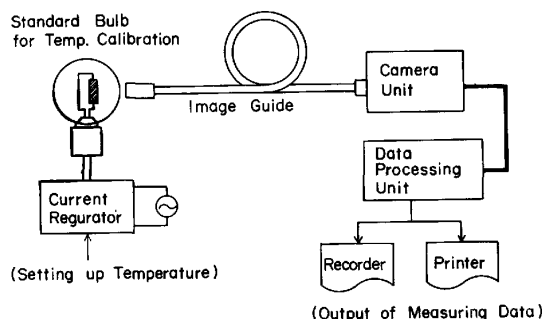


Fig. 3. Calibration method of the pattern thermometer.

とにより行っている.

2.2.5 温度パターン計の校正

温度パターン計の校正は, 光高温計の検定用標準電球を使用し, Fig. 3 の構成で実施した.

- (1) 前項の走査領域内に, 標準電球のフィラメントが入るように撮像する.
- (2) 定電流装置により一定の温度に維持されたフィラメントについて, 前項と同一の走査を行い, 各水平位置での両 RAC の積分値の比を計算する.
- (3) フィラメントの温度を変えて(2)の処理を繰り返すことにより, 各水平位置毎に, 両 RAC の積分値の比から温度への変換テーブルを作成した.

この変換テーブルを用いて標準電球を測定した時の再現性を Fig. 4 に示す. PT-1 の再現性は, 1500°C で $\pm 15^{\circ}\text{C}$ に入っており, 温度が高くなるほど良くなっているが, これはイメージディセクタの S-N 比が, 光電面の照度が大きくなるにつれて良くなるためである²⁾.

2.2.6 電縫溶接部の測定

材料寸法, 材質, 製管速度等, 入熱以外の溶接条件を一定とし, 入熱を段階的に変化させることにより, PT-1 と2色温度計の測定値を比較した.

Fig. 5 に PT-1 の測定視野と2色温度計の测温位置

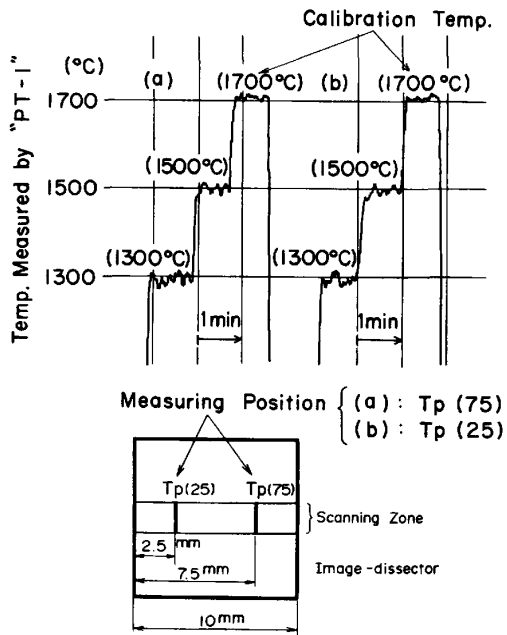


Fig. 4. Calibration results of "PT-1".

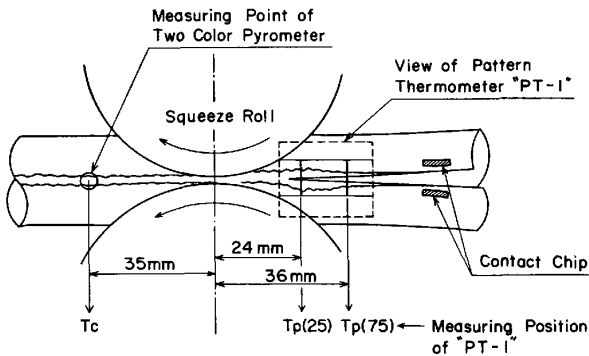


Fig. 5. Measuring view of "PT-1".

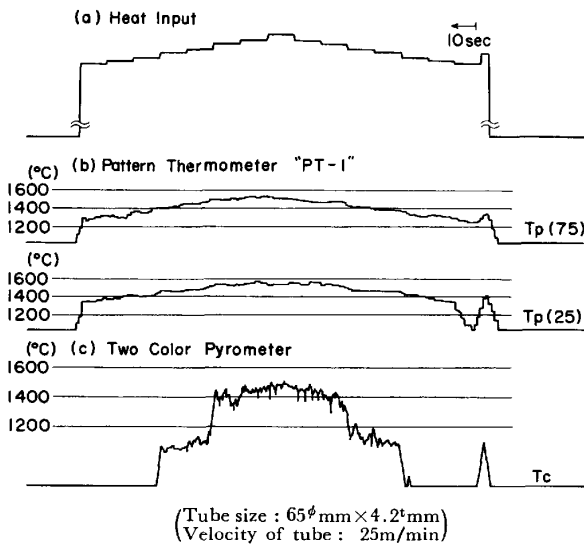
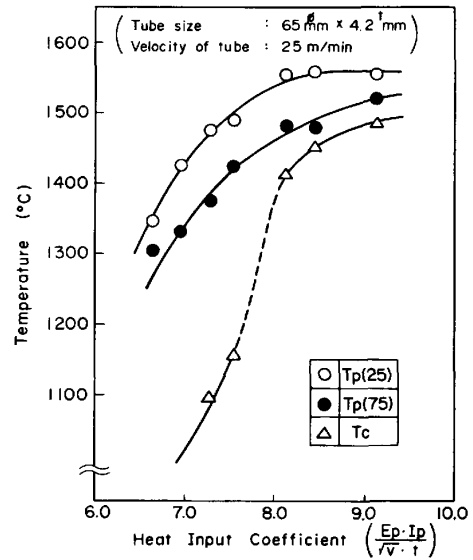


Fig. 6. Temperature measured by "PT-1" and the two color pyrometer when heat input changed step by step.



E_p : Plate voltage of welder (kV)
 I_p : Plate current of welder (A)
 v : Velocity of tube (m/min)
 t : Wall thickness of tube (mm)

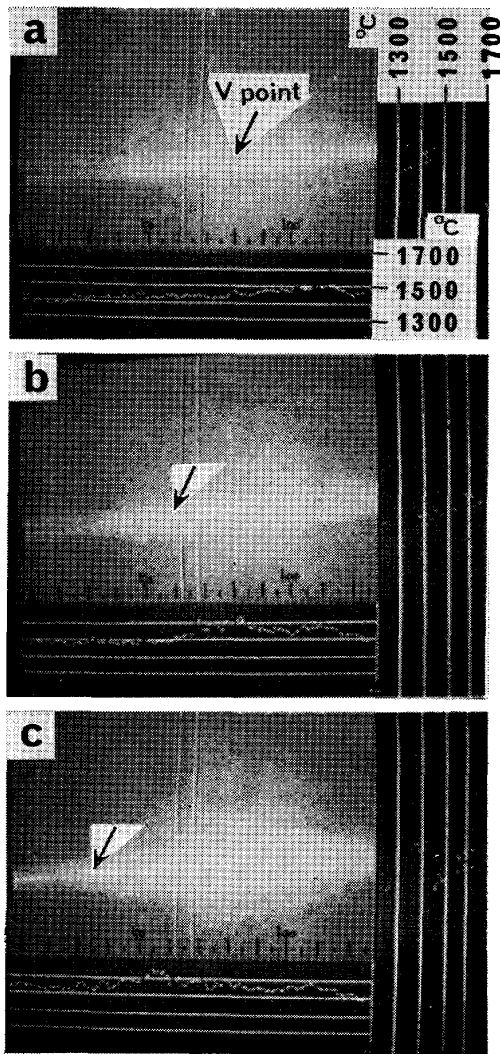
Fig. 7. Relation between heat input coefficient and the temperature measured by "PT-1" and the two color pyrometer.

を示す。PT-1 は、溶接部の温度パターンをモニタ表示すると共に、測定視野内の $T_p(25)$ 、 $T_p(75)$ の2ヶ所の温度を記録計に出力し、2色温度計は、溶接後のビード温度を測定するものとした。Fig. 6 に両者の記録計への出力結果、Fig. 7 に入熱量と Fig. 6 の各測定値との関係、Photo. 1 に3段階の入熱に対する PT-1 のモニタ表示をそれぞれ示す。

Fig. 6, Fig. 7 からわかるように、2色温度計の測定値はばらつきも大きいし、入熱を変えていくとある点で急激に変化しているが、これはこの点で溶鋼の排せつが増大し、ビード形状が変化するためと考えられる。一方 PT-1 の測定値、特に $T_p(75)$ の温度は、入熱量とよく対応している。Photo. 1 により、溶接部の温度は、上流側から溶接V点(以降、V点とする)へ向けて上昇していき、V点に達するとそれ以降は飽和することもわかる。また、入熱を増加させていくと、V点は上流側へ移動し、それにつれて温度パターンも変化している。入熱を増加していくと、 $T_p(75)$ の温度が上昇を続け、 $T_p(25)$ の温度が途中で飽和しているのは、最初 $T_p(25)$ より下流側にあつたV点が上流側へ前進を始め、途中で $T_p(25)$ に達し、さらに $T_p(75)$ の直前部まで移動したためである。

測定結果をまとめると、以下のことが言える。

(1) 従来の2色温度計による溶接ビード部の测温よりも、温度パターン計で直接溶接部を测温の方が、入



Heat input (a) poor, (b) moderate, (c) excess
Photo. 1. Weld portion and its temperature pattern displayed by PT-1 when heat input changed.

熱状態をより正確に把握できる。

(2) 温度パターン計で測定したV点の上流側狭小部分の温度は安定しており、入熱状態ともよく対応するため、入熱制御用の制御量として適している。

3. 溶接入熱制御

3.1 温度パターン計2号機

PT-1により、電縫鋼管溶接部の温度パターン計測の有用性が確認できたため、入熱制御用の実用機として温度パターン計の2号機(以降、PT-2とする)を製作した。PT-2の構成をFig. 8に示すが、PT-1に対する主な改善点は以下のとおり。

(1) イメージディセクタ相互間の撮像位置ずれや分光感度のばらつきを解消するため、RACを1台とし、前面に2種類の光学フィルタを組み合わせた回転フィル

タを配置した。

(2) 温度パターン表示用と制御用の測定タイミングを分けることにより、制御ポイントの測温周期をPT-1の1.0sから0.1sに短縮し、応答性を向上させた。

(3) 撮像ユニットの保守性を考慮し、石英ガラス系のイメージガイドを採用し、長尺化を図った。

測定方法についても、基本的にはPT-1と同じであるが、RACを1台としてフィルタを回転させることにより、入射する波長帯が交互に入れ替わるようにしたため、フィルタ位置に同期して走査を行い、両波長帯の同一位置に対する一垂直走査中の積分値の比を求めるようにしている。

PT-1の場合と同一の校正用標準電球を測定した時の再現性をFig. 9に示すが、1400°Cで $\pm 10^{\circ}\text{C}$ に入っており、RACを1台にしたことで、PT-1より再現性が向上していることがわかる。

Table 1にPT-2の仕様、Photo. 2に溶接部測定時のモニタ表示の一例をそれぞれ示す。

3.2 制御システムの構成と機能

小径電縫鋼管ミル(4"サイズミル、インダクション方式)に導入した溶接入熱制御システムの構成をFig. 10に示す。本システムは、温度パターン計(PT-2)、アップセット計、肉厚計、速度計の各センサと制御用ミニコンから構成されており、制御機能としては、PT-2で測定した制御ポイントの温度を所定の目標値に維持させるためのフィードバック制御と、材料の肉厚と製管速度の変動を補償し、制御性を向上させるためのフィードフォワード制御から成っている。

3.2.1 溶接温度制御

Fig. 11にPT-2の測定視野と測定ポイントを示す。PT-1のテストからもわかるように、測定ポイントはV点に近づきすぎると入熱変化に対する感度が低下するし、V点から離れすぎると温度が下がり測温範囲を外れてしまう。この点を考慮し、入熱制御用の制御ポイントとして⑤の位置を採用した。このポイントの温度目標値は、あらかじめ材質、肉厚、外径、規格別にテストを行い、適正値を決定してミニコンへ登録してあり、その時点の溶接条件に応じて自動的に選択されるようになっている。

3.2.2 肉厚と速度の変動補償

材料肉厚の変動は、入熱制御に対する大きな外乱要因であり、これを補償するため、成形スタンド前の肉厚計で測定した値を材料の進行に合わせてトラッキングし、溶接時点の肉厚変動分を補償するように、溶接機に対する設定電位をフィードフォワード的に変更している。

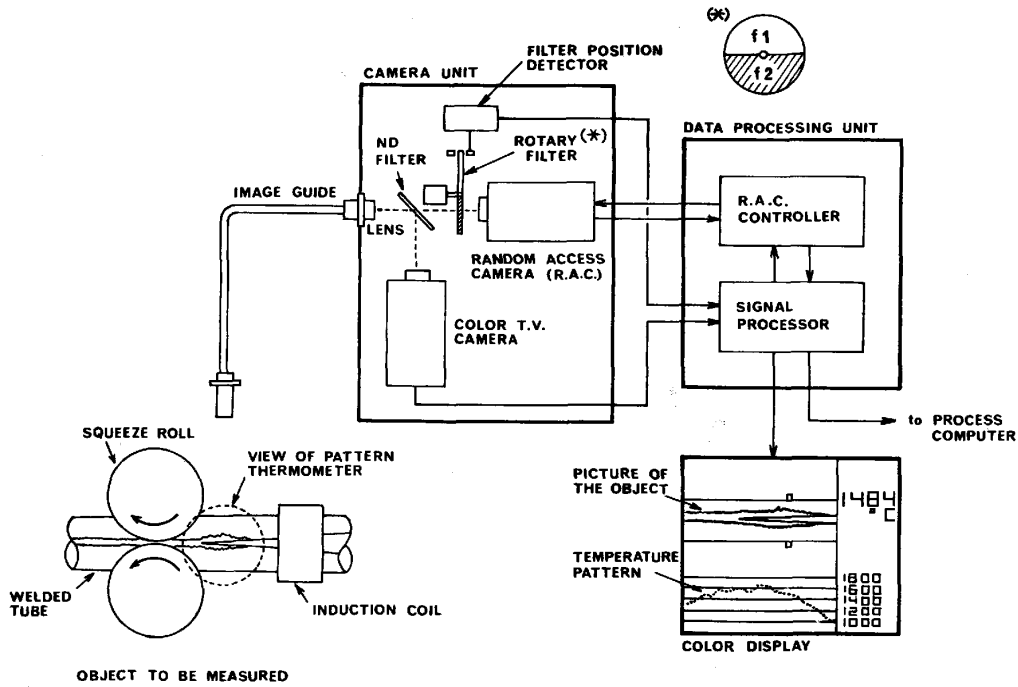


Fig. 8. Schematic diagram of the pattern thermometer "PT-2".

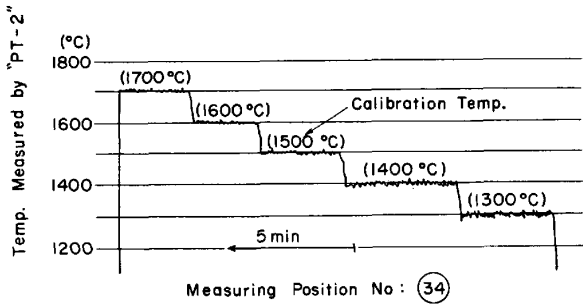


Fig. 9. Calibration results of "PT-2".

一方、製管速度の変動補償は、製管開始時の立ち上がり制御に威力を発揮するもので、速度計の実績速度に応じて設定電圧を変更するようにしている。

Table 1. Specification of the pattern thermometer "PT-2".

Measuring range	1 000~1 700°C
Number of measuring points	64
Accuracy	± 10°C (at 1 400°C)
Measuring interval	0.1 s (Analog output) 6.4 s (CRT display)
Image guide	a) 30 000 b) 11 m
Signal processing unit	a) CPU b) Memory

3.3 制御結果

Fig. 12 に手動時、Fig. 13 に自動制御時の肉厚変動と溶接温度の例を挙げている。手動時には、肉厚の変動に応じて溶接温度も変化しており、特にコイルの横継部

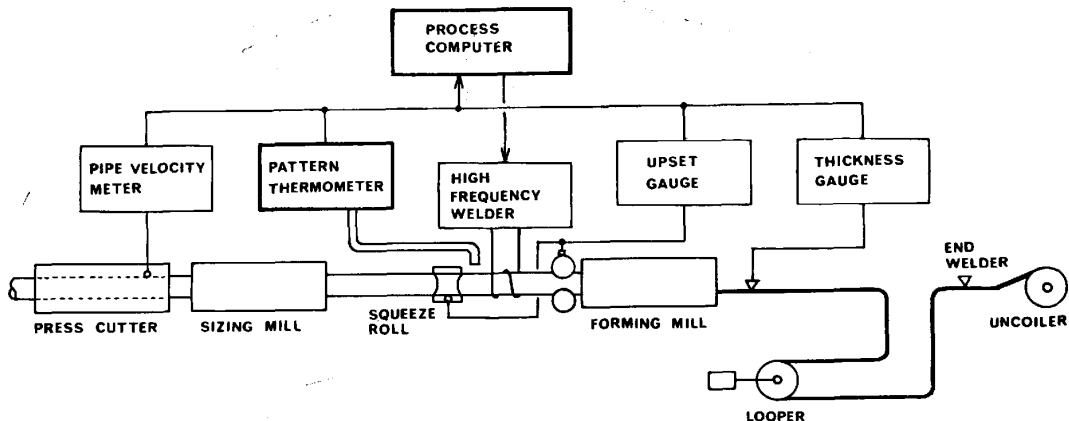


Fig. 10. Configuration of the automatic weld control system in the ERW tube mill.

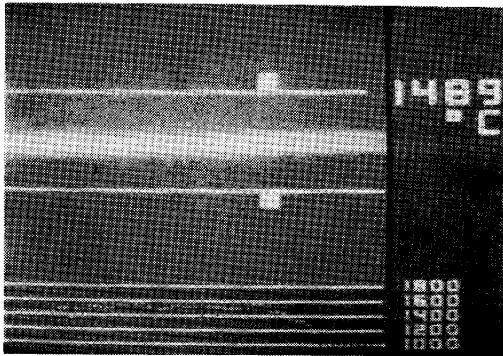


Photo. 2. The image of weld portion and its temperature pattern displayed by PT-2.

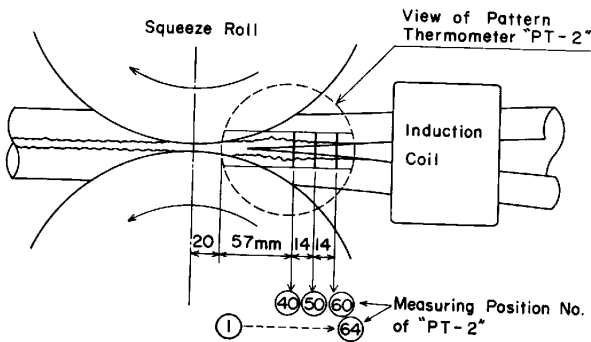


Fig. 11. Measuring view of "PT-2".

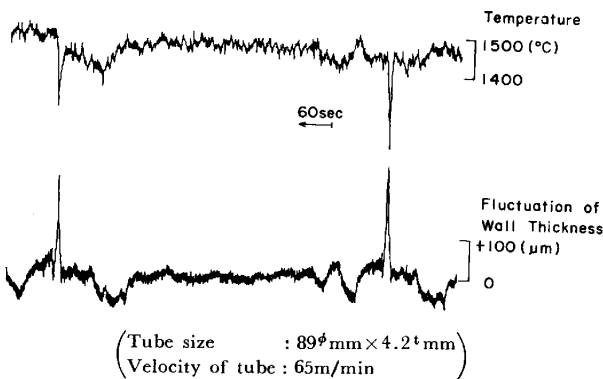


Fig. 12. Temperature of weld portion when the operation is done by manual adjustment.

(肉厚の急変部) 近傍で大きく変動している。一方、自動制御を実施した場合には、横継部も含めて溶接温度は $\pm 20^{\circ}\text{C}$ の範囲に収まっており、本入熱制御システムが有効に機能していることがわかる。

これにより、低合金鋼や高炭素鋼等の溶接条件の厳し

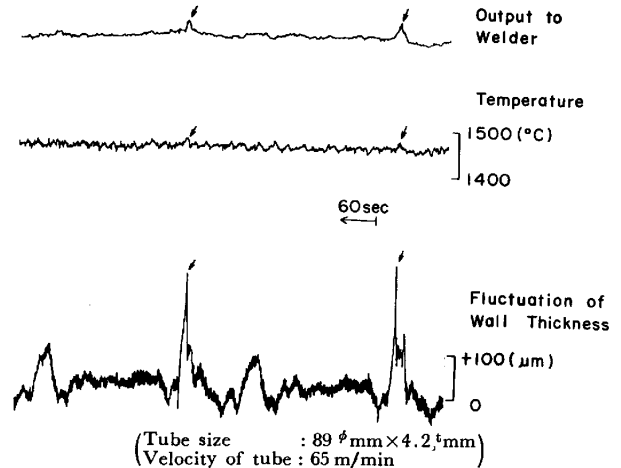


Fig. 13. Temperature of weld portion when the automatic weld control is done.

い(溶接適正範囲が狭い)鋼種についても、極めて信頼性の高い溶接が行えるようになった。

4. 結 言

電縫鋼管溶接部の画像と温度パターンがモニタ上に表示でき、かつ測定視野内の必要部位の温度が他装置に出力できる温度パターン計を開発した。

これにより、以下の結果が得られた。

(1) 温度パターン計で測定した溶接V点直前の狭小部分の温度は、従来2色温度計で測定していたビード部分の温度よりも安定しており、かつ溶接部の入熱状態ともよく対応している。

(2) この部分の温度を制御量としたフィードバック制御と、肉厚変動を補償するためのフィードフォワード制御を組み合わせることにより、極めて信頼性の高い溶接入熱制御システムを実現し、電縫鋼管の歩留り向上と品質安定化に大きく寄与することができた。

文 献

- 1) 京極哲朗, 高間館千春, 堀田一之, 達協正雄, 根本 新: 住友金属, 35 (1983), p. 193, 205
- 2) 浜松ホトニクス(株): ランダムアクセスカメラ, No. 79-58 (1979), p. 3, 9
- 3) 下間照夫, 菅野 猛, 高田誠二, 豊田弘道, 石井一宇, 小川実吉, 河野 充, 柏瀬安史, 木村 惇, 立花種則, 滝谷信昭, 二本久夫, 大野二郎, 服部晋, 菱刈 功, 大手 明, 山田健夫: 温度計測(温度計測部会編) (1981), p. 181 [計測自動制御学会]