

# 討16

## 電縫溶接のビード形状監視と温度分布制御法

日本鋼管(株)中央研究所 三原 豊○鈴木孝司 大川登志男  
 佐野和夫 山田健夫 渡部勝治郎  
 原田直樹  
 京浜製鉄所 居城三郎 榎本洋一

### 1. 緒言

電縫鋼管は近年高級化の傾向を強め、ラインパイプ、OCTG、ボイラー管では過酷環境で使用される製品が増加しつつある。このような高級電縫管では、冷接欠陥以外に溶接界面に残存する酸化物欠陥も溶接品質に影響を及ぼすため、溶接現象の解明<sup>(1)</sup>、溶接入熱制御法<sup>(2)(3)</sup>が検討された。筆者らは、電縫溶接が加熱・圧接の工程で構成され、固有の溶接特性を示すことから、通常の計測手法では総合的な溶接品質の管理に不十分と考え、ビード形状計測<sup>(4)</sup>による監視システムを開発した。また入熱制御に対しては通常の温度計測で有効な制御パラメータが得られないため、Siイメージセンサ(リニア・アレイ)による温度分布計測システム<sup>(5)</sup>を開発し、電縫溶接に適用した。これにより新しい制御パラメータによる温度分布制御が可能となった。本報告ではこれらの検討経過について述べる。

### 2. ビード形状計測による電縫溶接監視システム

ビード形状の変化は溶接作業者の目視判定の一つであり、溶接入熱と圧接品質の重要な情報と考えられるが、適切な計測手法がなく未検討であった。レーザー光線を用いた光切断法による計測からビード形状の幾何学的パラメータと溶接入熱、メタルフロー角度、突き合せの段差等の対応を調査し、ビード形状計測の有効性を確かめ、高速画像処理法を組合せた電縫溶接監視システムを開発した。

#### 2-1. 光切断法によるビード形状計測

電縫溶接直後のビードに対しFig.1に示すように斜め上から帯状のスリット光を照射して、これを上方よりITVカメラで撮像するとビード部の断面形状が得られる。本計測ではレーザー光線を用いることにより画像の鮮明度を向上させている。Fig.1に示す照明撮像系の仕様をTable 1にまとめて示す。電縫溶接近傍の計測では、光学系に対して冷却水、蒸気による外乱があり、撮像系に対しては誘導ノイズの問題がある。光学系にはエアバージ等十分な保護をおこない、撮像系には磁気シールド、狭帯域フィルタの導入で対処した。誘導ノイズに対してはイメージファイバーの使用も考えられるが、長尺のファイバーは高価であるため、採用していない。精度検定結果をTable 2に示す。パイプ上面に角ブロックを固定した場合、またビード付サンプルの静止画像と光切断位置の検鏡写真からの計測値を対比した場合でも同様に良好な精度を示した。次に述べるビード形状の幾何学的パラメータ特性の調査では、VTRからハードコピーをとり、Table 3のパラメータを求めた。

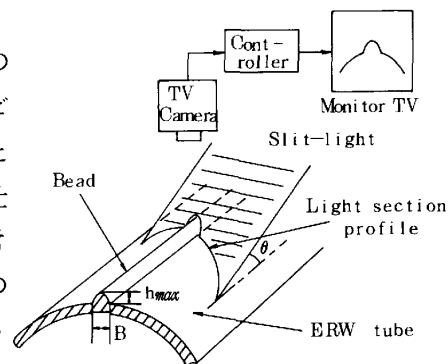


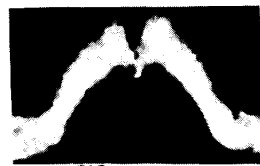
Fig.1 Principle of measurement of bead shape

Table 1 Specification of measuring device

Item	Specification
Laser	He-Ne, Red ( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ )
Cylindrical lens	Width of half maximum 0.4 mm
Incident angle	56 deg
Gap between the head and tube	10 mm

2-2 溶接入熱とビード形状の幾何学的パラメータの関係

溶接入熱と許容入熱範囲内のビード形状画像の対応関係を Photo.1 に示す。入熱が低い場合、溶鋼の排出がなく、中央にヒケ(凹み)を生じるが、適切な入熱領域では溶鋼が排出され、ヒケは生じない。このため幾何学的パラメータとして中央部ビード高さによりビード形状の変化を検出することができる。入熱が高い場合、溶鋼は母材の盛り上り部分にオーバーハングするようになりビード下幅が増加し、ビード高さが変動し始める。Fig.2ではこのようなビード形状の変化を幾何学的パラメータを用いて表現した。適切な入熱領域は中央部高さ、ビード下幅の2つのパラメータで容易に決定される。許容入熱範囲内のこのような関係はパイプサイズ及び溶接条件にほぼ無関係に成立し、本計測により溶接入熱状況を監視することが可能となった。



S: Low  
(Heat input coefficient 3.14)



M: Optimum  
(3.40)



L: High  
(3.72)

Photo.1 Images of bead shapes (OD 114.3mm x WT 8.56mm)

2-3. メタルフロー角度の推定

メタルフロー角度は溶接部の扁平・押抜け試験と相関があり、重要な管理項目である。メタルフロー角度は圧接時の母材が盛り上がる変形によるものであり、ビード形状との相関が強い。従って、種々の溶接条件で溶鋼のオーバーハングが少なく母材の裾野が露出しているビード付サンプルを用いて調査した。幾何学的パラメータとして、①最大ビード高さ ( $h_{max}$ )、②最大ビード高さ/下幅、③平均傾斜角 ( $\bar{\theta}$ ) を検討した結果、①、②についても相関があると言えるが、③の相関が最も良好であった。Fig.3にメタルフロー角度の検鏡位置と同一位置にある平均傾斜角の対応結果を示す。オーバーハングが少なく適切な入熱領域よりも低入熱側にあれば、メタルフロー角度は  $\pm 10^\circ$  以内で推定可能である。

2-4. その他の計測項目

ビード形状計測により、ビード断面積からスクイズ量に相当するパラメータ、突合せ部の段差、ビードの傾き、ビード切削後の管形状が検出可能である。電縫溶接工程における一連の作業管理ではこのようなオンライン計測手法を必要としており、ビード形状計測の適用は大きな意義をもつものと考えられる。

2-5. ビード形状計測による電縫溶接監視システム

造管時のビード形状計測を円滑におこなうため、Fig.4の電縫溶接監視システムを開発した。本システムでは、従来の撮像

Table 2 Accuracy of measurement

Height of bead	$3\sigma = 0.20 \text{ mm}$ ( $n = 26$ )
Width of bead	$3\sigma = 0.36 \text{ mm}$ ( $n = 30$ )

Table 3 Typical geometrical parameters of bead shape

Parameter		$h_{max}$	$h_c$	$h_c = h_{max}$	$h_c = h_{max}$
Central bead height	$h_c$				
Maximum bead height	$h_{max}$				
Bottom width	$B$				
Foot angle	$\bar{\theta}$				
offset of plates	$\Delta y$				

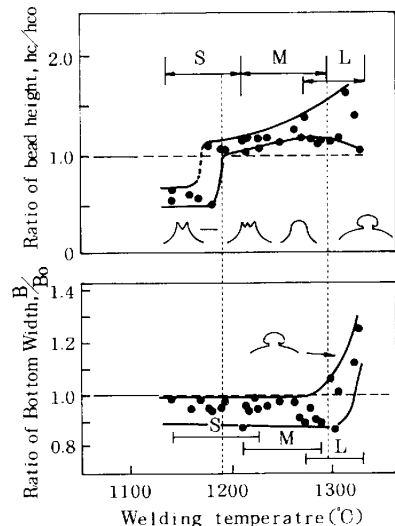


Fig.2 Variation of geometrical parameters (OD 60.3mm x WT 4.83mm)

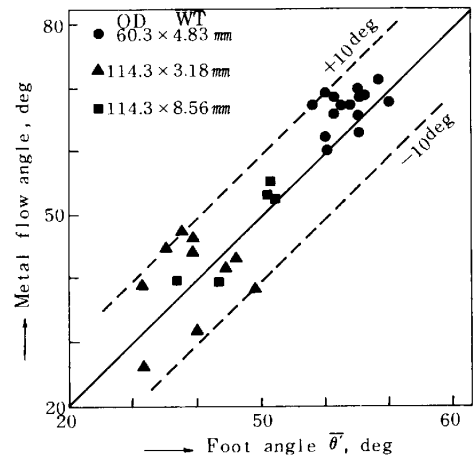


Fig.3 Correlation between foot angle and metal flow angle

照明部を更に小型化し、信号処理部に Table 3 の全パラメータを 1.5 秒で演算処理する高速画像処理装置を開発し適用した。画像処理による形状検出精度の劣化はなく、Fig.5 に示すように、VTR からのハードコピーと同一の精度が得られた。

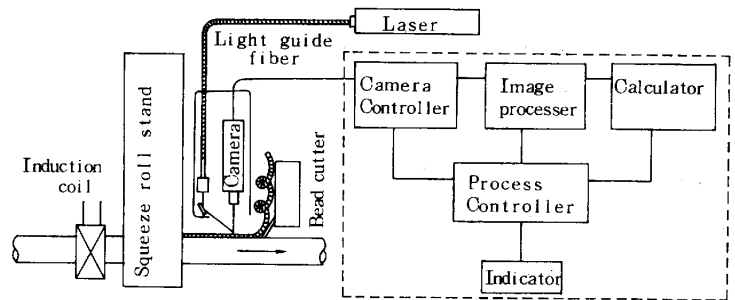


Fig.4 Schematic diagram of Bead Shape meter

### 3. 電縫溶接の温度分布制御法

電縫溶接の総合的な品質管理にビード形状計測が有効であることを前章に述べたが、溶接入熱の精密な制御には計測位置や演算時間の点で適用するのは十分でない。溶接入熱に対応する重要なパラメータとして溶接部の温度があるが、ビード加熱幅は数 mm と細く、通常の放射温度計で安定した情報を得るのが困難である。また溶接加熱部の温度は高入熱側

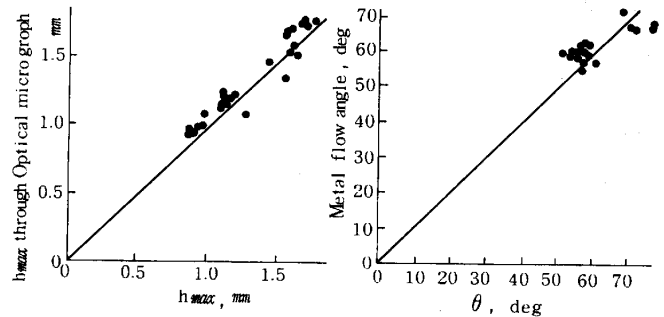


Fig.5 Accuracy of Bead Shape meter

では融点に近づき飽和する傾向を示すので、入熱の高低を判断するのは不可能である。そこでリニア・アレイ温度分布計測システム<sup>(5)</sup>を溶接部板幅方向温度分布計測に適用して、溶接部の温度分布特性及び温度分布制御について検討した。

#### 3-1. リニア・アレイの特性

リニア・アレイ素子の配列を Fig.6 に示す。感度、空間分解能は素子の大きさ、間隔、素子数により決まる。测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と、素子には放射輝度に比例した蓄積電荷が生じる。これを駆動回路により一定周期  $t_s$  で走査し、ビデオ信号として出力する。出力電圧は走査周波数により制御可能で、その温度特性を Fig.7 に示す。走査周波数を変更することにより、一定絞りで広い温度範囲を計測することができる。素子間の感度不均一は実用上問題ないことが確認されているが、更に必要な場合には演算器による補正も可能である。

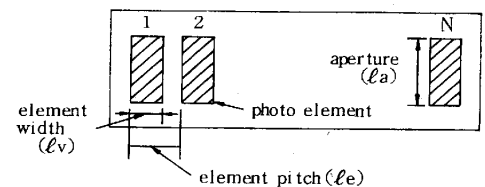


Fig.6 Photodiode element

#### 3-2. 電縫管溶接部温度分布測定システムの概要

Fig.8 に装置構成を示す。Table 4 に本システムの仕様をまとめて示す。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、ROM に内蔵された温度変換テーブル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少なくするために、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。

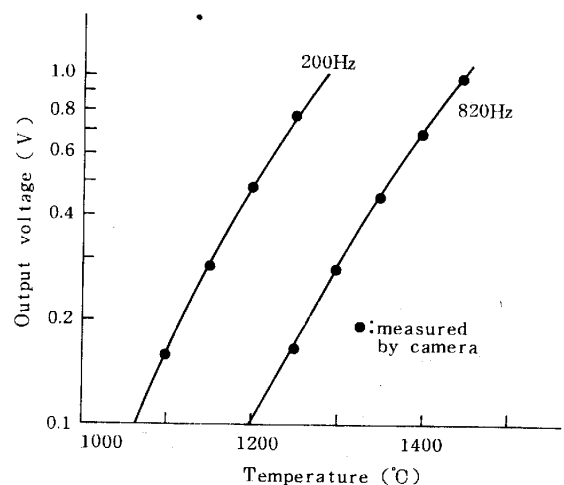


Fig.7 Calibration of the linear arrays

3-3. 溶接部の幅方向温度分布と制御パラメータ

温度分布の測定例をFig.9に示す。測定位置はV点後方7.5mm, 3.5秒間隔でデータ採取したものである。溶接部の温度分布は溶接入熱の変化に対応して変化し, その特徴は一定温度に対応する加熱幅の増加, 温度分布曲線で囲まれた面積値の増加で表現される。ピーク温度は, 従来の温度計測結果と同様に, 高入熱域で飽和または若干減少する傾向がある。Fig.10にこれらの関係をまとめて示す。加熱幅及び温度分布曲線の面積値は1200°Cをしきい値として表示した。2つのパラメータは, 溶接入熱に対し良好な相関関係を示す。このことから, 温度分布曲線で囲まれた面積値は溶接入熱とほぼ等価なパラメータであり, 加熱幅は簡易的なものと解釈することができる。2つのパラメータの計測位置はV点又はV点後方直後でおこなっている。Vスロート部における幅方向温度分布の計測も考えられるが, 中径管の厚肉溶接では表皮効果により板端面が過熱され, Vスロート部においても溶鋼が電磁力により排出される現象がある

ため, 計測値に不要な変動を生じることがある。上記のパラメータは厚肉, 低速溶接時においても安定した計測値が得られるため, フィードバック制御に直接適用することができる。また板厚・速度変動を補正するフィードフォワード制御を組合せることにより, 更に精密な制御系も構成できる。

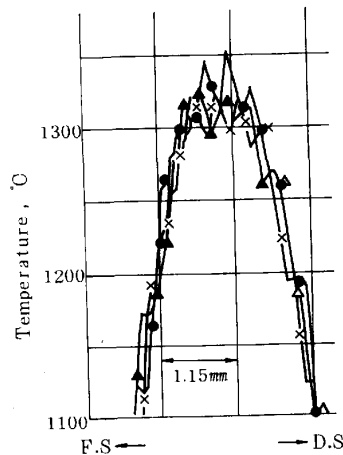


Fig.9 Temperature distribution (OD114.3xWT6.35mm)

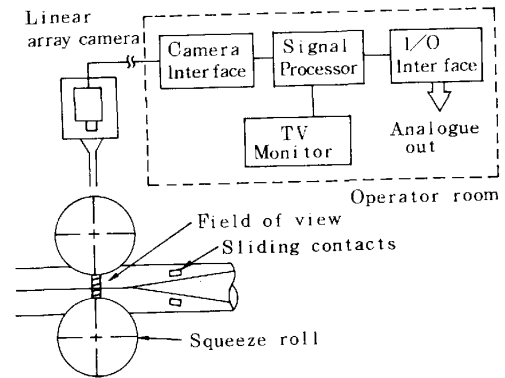


Fig.8 Block diagram of Linear array System for ERW

Table 4 Specifications of Linear array system for ERW

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

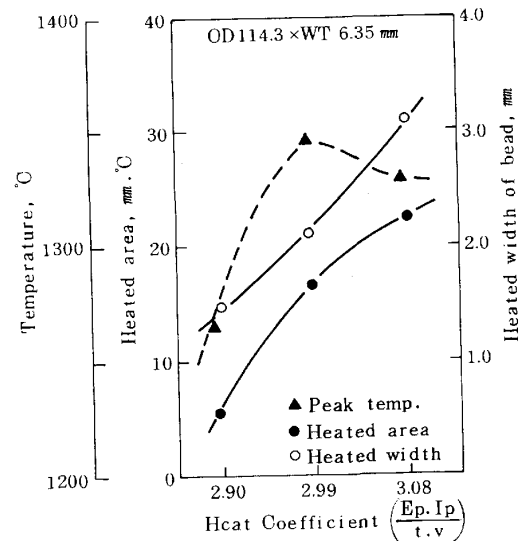


Fig.10 Characteristics of parameters for controlling (OD114.3xWT6.35mm)

4. 結 言

電縫溶接の総合的な監視装置としてビード形状計測による電縫溶接監視システムを開発し, 溶接入熱制御においてはリニア・アレイによる温度分布計測から得られる新しい制御パラメータを見出し, 温度分布制御を可能とした。これらの技術は新中径電縫管ミル, 大径電縫管ミルに適用される予定である。

(参考文献)

- 1) 芳賀他: 鉄と鋼, Vol 62, No. 4, P. 136
- 2) 芳賀他: 鉄と鋼, Vol 66, No. 4, S. 411
- 3) 達脇他: 鉄と鋼, Vol 70, No. 9, P. 1045
- 4) 三原他: 鉄と鋼, Vol 67, No. 13, S. 1063
- 5) 山田他: 鉄と鋼, Vol 70, No. 9, P. 1007