
電縫管シーム部の自動追従装置の開発

Automatic Seam Tracing System for ERW Pipe Mill

大出 文昭(Fumiaki Ode) 新玉 幹夫(Mikio Aratama) 近藤 広章(Hiroaki Kondo)
大橋 兼廣(Kanehiro Ohashi) 日和佐 淳(Atsushi Hiwasa) 銭場 敬(Takashi
Senba)

要旨：

電縫鋼管製造ラインの溶接部検出装置を開発した。溶接部の品質は母材部と異なることから、品質をチェックする探傷設備、溶接品質を改善する熱処理設備など、オンラインでシームに対する検査あるいは処理が必要であり、高精度でシームを検出する装置が求められてきた。シーム検出法は、溶接時の加熱残留熱を測定する方法で、絶対位置測定法と小型軽量の偏差法の 2 つの方式を開発した。開発のポイントはパターン温度測定技術を、溶接部を中心とする対称な低温温度分布を測定解析し、溶接部のビード処理後の放射率変動の影響を除去したことである。絶対位置測定法はシームアニーラシーム追従制御装置に、偏差法は超音波自動探傷設備に設置し、溶接部品質向上改善に寄与している。

Synopsis：

Kawasaki Steel has developed two types of new equipment to detect and trace the weld-seam of ERW on pipe, and installed them at the 26 inch ERW pipe mill of its Chita Works. In most ERW pipe mills, a longitudinal welded portion is submitted to the seam-annealing process and non-destructive inspection, and therefore, detection and tracing of the exact weld-seam position at these processes are indispensable. The newly developed systems can detect and trace seam positions automatically and contribute to good quality of welded portions. Principle and actual application of these weld-seam detectors - one type called the "absolute seam position detecting method" and the other the "relative seam position detecting method" - are described in this paper.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Automatic Seam Tracing System for ERW Pipe Mill



大出 文昭
Fumiaki Ôde

知多製造所 設備部設備技術室 主査(課長補)



新玉 幹夫
Mikio Aratama

知多製造所 設備部設備技術室 主査(掛長)



近藤 広章
Hiroaki Kondo

知多製造所 設備部設備技術室



大橋 兼廣
Kanehiro Ôhashi

知多製造所 第1造管部溶接管技術室 主査(課長)



日和佐 淳
Atsushi Hiwasa

三菱電機(株)鎌倉製作所 応用機器部技術第二グループ



錢場 敬
Takashi Senba

三菱電機(株)鎌倉製作所 応用機器部技術第二グループ 主幹

要旨

電縫鋼管製造ラインの溶接部検出装置を開発した。溶接部の品質は母材部と異なることから、品質をチェックする探傷設備、溶接品質を改善する熱処理設備など、オンラインでシームに対する検査あるいは処理が必要であり、高精度でシームを検出する装置が求められてきた。シーム検出法は、溶接時の加熱残留熱を測定する方法で、絶対位置測定法と小型軽量な偏差法の2つの方式を開発した。開発のポイントはパターン温度測定技術を、溶接部を中心とする対称な低温温度分布を測定解析し、溶接部のビード処理後の放射率変動の影響を除去したことである。絶対位置測定法はシームアニーラシーム追従制御装置に、偏差法は超音波自動探傷設備に設置し、溶接部品質向上改善に寄与している。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed two types of new equipment to detect and trace the weld-seam of ERW on pipe, and installed them at the 26 inch ERW pipe mill of its Chita Works. In most ERW pipe mills, a longitudinal welded portion is submitted to the seam-annealing process and non-destructive inspection, and therefore, detection and tracing of the exact weld-seam position at these processes are indispensable. The newly developed systems can detect and trace seam positions automatically and contribute to good quality of welded portions. Principle and actual application of these weld-seam detectors—one type called the "absolute seam position detecting method" and the other the "relative seam position detecting method"—are described in this paper.

1 緒 言

電縫鋼管は、成形ロールにより鋼帯を曲げ加工成形し、高周波誘導あるいは高周波抵抗加熱により接合部を溶融して圧接する。その直後溶融排出されたビード部の切削除去、シーム探傷、シーム熱処理など一連の工程を経て連続製造される。Fig. 1に電縫鋼管の概略製造プロセスを示す。溶接直後の溶接部分は他の母材部分と異なる熱履歴、加工経緯を持ち、組織も異なることから溶接部分の探傷が必要であり、また熱処理により組織改善を図る必要がある。とくに近年、電縫鋼管は使用場所が寒冷地であったり、高強度が要求される様になり、そのシーム部は母材部と同等の品質が要求されている。

シーム部の探傷は、超音波探傷設備により、溶接接合部と接合部近傍の母材変形部分を鋼管全長にわたって精密に行われる。超音波探傷設備は欠陥の存在する部位を弁別することも可能であるが、その為には、超音波探傷設備を正確にシーム部に追従させなければ実現できない。言い換えるとシーム部への追従性能が、探傷設備の探

傷性能に影響を与える。

シームアニーラ設備は、溶接部を鋼管外表面から誘導加熱方式で選択加熱することにより溶接部分のみの熱処理を行う設備で、通常複数段の加熱コイルをライン方向に配置し、局部加熱を繰返して溶接部に適正な熱履歴を与える。

シーム検出原理としては、従来からシーム部の特質をとらえる種々の方式がある。組織の違いから電気的性質の異なるシーム部を渦電流で検出する方法、溶接部直近の変形部分の影響を電磁超音波により音波の減衰で検出する方法、シーム部のビード処理により光輝のある部分を検出する方法などが試作されたり、実用化されたりしている。いずれの方法も十分な検出精度が得られなかったり、あるいは装置が大型で重量物になるなどの欠点があった。

我々は、シーム部分の特徴抽出法として溶接部分の溶接残留熱に着目し、残留熱分布からシームを検出する方法を開発した。

* 昭和61年2月18日原稿受付

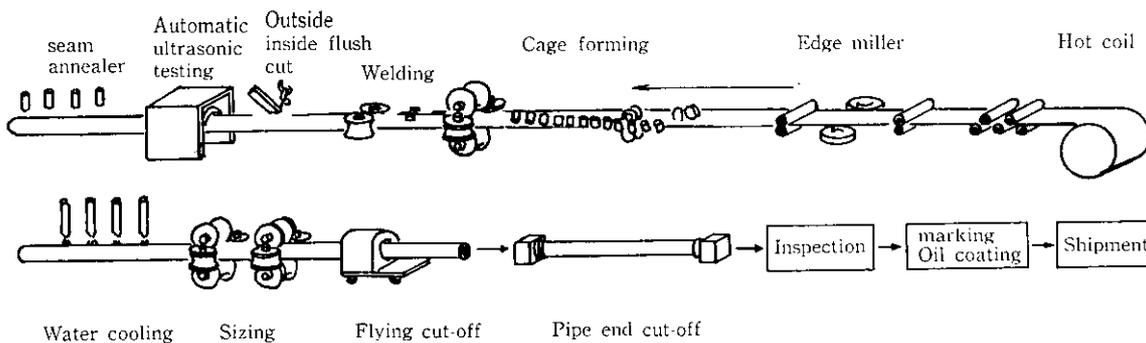


Fig. 1 Manufacturing process of ERW pipe

2 電縫管シーム検出法

2.1 溶接部の温度履歴

電縫鋼管は、高周波誘導加熱あるいは高周波抵抗加熱で鋼帯エッジ部を局部的に加熱溶融する。その加熱原理は、高周波電流の表皮効果と近接効果であり、加熱量は鋼帯両端面共に等しい加熱となる。溶融直後の圧接により溶融物が排出され、盛り上った HAZ とともに切削除去した後も加熱時の両端均等加熱の状況は維持され、溶接部を中心として管円周方向に対称な温度分布となる。

加熱直前から溶接後にかけて伝熱の状況を測定した例を Fig. 2 に示す。この例は、圧接前の鋼帯端部に熱電対を埋め込み加熱開始から溶接完了まで溶接接合部近傍の温度変化を測定したものである。溶接後に溶接点から 1 mm の位置となった部位の温度は、圧接完了近くまで急激に上昇してピーク温度を示した後再び急激に冷却する。一方、溶接後に溶接部から 3 mm の位置になった部位の温度は圧接前後から急激に上昇する状況が観測できる。さらにシーム部より離れた 12 mm の部位の温度は圧接まではほとんど上昇せずに、むしろ圧接完了後に上昇することが分かる。このように溶接の加熱は溶接部が急激に加熱された後、伝熱により管円周方向が昇温する。溶接後のある一定時間経過後も溶接部近傍に溶接残留熱があることが分かる。この温度分布は溶接部分の温度が最も高く、円周方向に離れるにしたがって徐々に低下している。またこの測定例は板厚方向のほぼ中央部分について示したものであるが、鋼管外表面

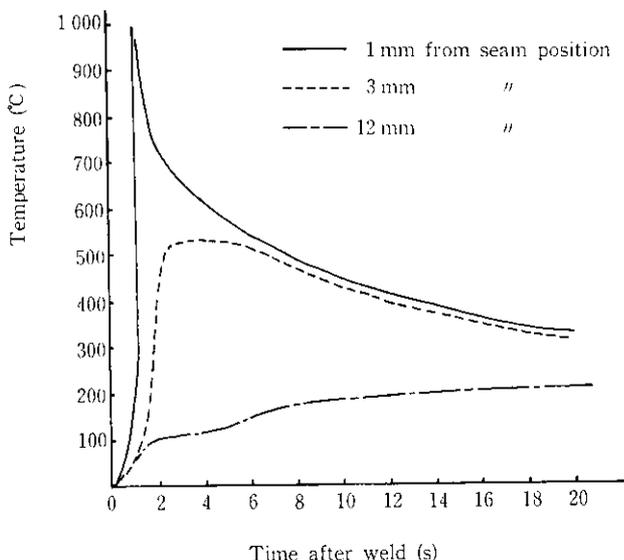


Fig. 2 Temperature of weld portion

も同様に溶接部を中心として左右対称であることは容易に推定できる。

2.2 溶接後の外表面温度分布

溶接部近傍の温度は、常温から急激に加熱され融点近傍の 1500°C~1600°C まで加熱され、加熱終了後急激に温度低下する。外表面温度も同様と考えられるが、放射温度計でこの部分の温度分布を測定すると次に示すような外表面の状況で異常値を示すことが分かった。

- (1) 溶融物が外部へ排出され内外面に溶融ビードが生成する。この溶融ビードは、外面内面ともに表面が円弧状に形成されるように切削され、切削幅は約 15 mm である。
- (2) 母材部は酸化物で覆われたままで、放射率 ≈ 0.8 に対して切削部は放射率 ≈ 0.2 程度となる。

この状況を示したのが、Photo 1 である。ビード切削した部分は真温度は高いが、放射率が低く不安定な状態で乱れた温度指示を示す。この切削部を除いた部分は左右対称で、なだらかな温度勾配を示している。放射温度計は一般に (1) 式に示す全放射エネルギーを検出するものである¹⁾。

$$E = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots\dots (1)$$

- E: 全放射エネルギー (W/cm²)
- ε: 放射率
- σ: ステファンボルツマン定数 (5.673 × 10⁻¹² W/cm²·deg⁴)
- T: 温度 (K)

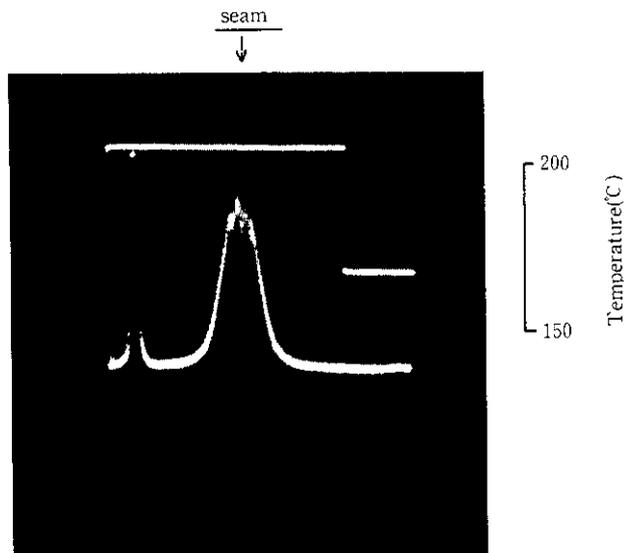


Photo 1 Temperature distribution

全放射エネルギーは物質の温度と放射率により定まる。とくに放射率とは比例関係にある。したがって放射温度計による測定では温度以外に放射率変動の影響を受け、放射率が小さい時には温度指示は真温度より低い温度を示すから、見掛け上の温度指示で母材部と切削部の真温度は比較できない。溶接の残留熱が伝熱によりシーム部を中心として左右対称に温度分布が広がったとしても、放射温度計では放射率の影響で中央部が逆に温度指示が低くなる。

この残留熱を放射温度計を用いて検出する手段として、放射率の影響をなくす黒体塗料を表面に塗付け放射率を等しくする方式も考えられるが、塗付工程の付加、ランニングコストが必要になるなど問題が多い。

我々は、この放射率の影響を受けず、かつ残留熱の対称性を利用するシーム検出法を開発した。

2.3 シーム絶対位置検出方法

溶接残留熱がシーム部を中心とした対称な温度分布を示すことから Fig. 3 に示す方法のシーム部検出装置を開発した。この方式は温度分布が乱れた中央部分の影響を防ぐために中央部分の見掛け指示温度よりも低い温度レベルでスライスした部分の中央の位置をシームとする方式である。また走査温度計の走査視野内に基準熱源を固定配置し、この基準熱源からの距離を測定することでシーム位置の絶対位置が測定できる。

シーム検出装置の内部構成図を Fig. 4 に示す。狭視野放射温度

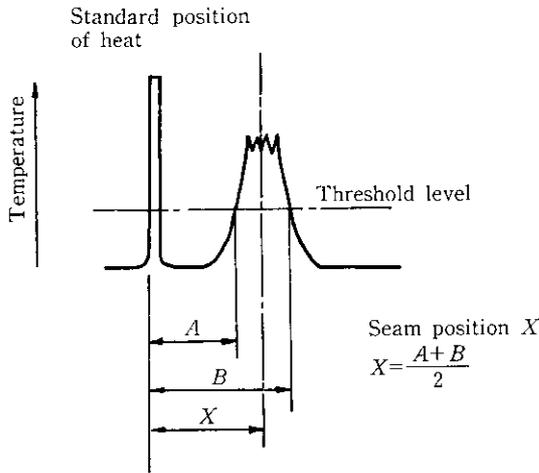


Fig. 3 Principle of absolute seam position measurement

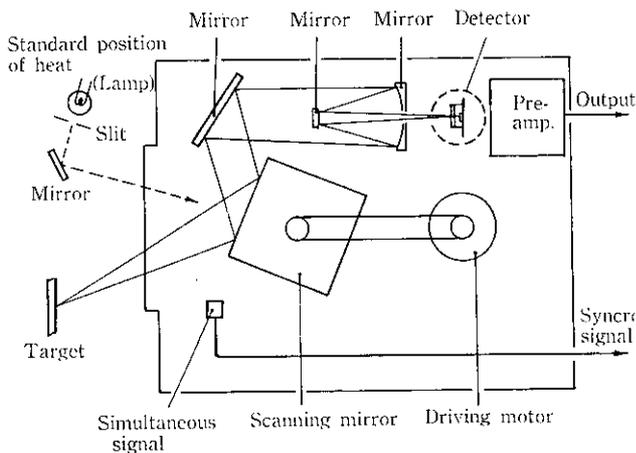


Fig. 4 Mechanism of absolute seam position measurement

Table 1 Absolute seam position detecting system

Item	Specifications
Temperature range	500°C max.
Sensitivity of temp.	4°C (at 150°C)
Range of measuring position	250 mm
Sensitivity of position	0.25 mm
Detector type	HgCdTe
Scanning method	Rotating mirror
Scanning cycle	1/30 s
Distance of measurement	500 mm

計の瞬間視野は回転ミラーにより鋼管表面上を走査し溶接近傍の温度パターンを線状に測定する。赤外線検出器は低温測定のため、電子冷却タイプの HgCdTe 素子を用いている。Table 1 にシーム検出装置の諸元を示す。

この方式の特徴は、シーム位置を基準位置熱源からの距離として得られることで、固定配備したシームアニューラ設備等に位置設定信号として出力する場合に有効である。しかし、回転ミラーを組込んだ大型な機構となる欠点がある。

2.4 シーム相対位置検出方法^{2,3)}

Fig. 5 に相対位置検出法の原理を示す。赤外線方式と可視光方式の組合せである。赤外線方式は、ビード切削部を除いた赤外線放射分布の対称性を利用するもので、図示のように1対の赤外線センサで受光する赤外線エネルギーが等しくなる位置を検出する。2つの赤外線センサの中心とシーム部が一致したときに赤外線エネルギーが等しくなり、2つの赤外線センサの差分出力が零になる。2つの赤外線センサの中心とシーム部がずれた場合には、差動出力はずれの方向により + または - の出力が得られる。したがって、この差動出力が零になるようにセンサの位置を動かすと、センサ位置とシームの位置は恒に対応のとれた位置になりシーム位置を追従できる。光学式検出も赤外線式と同様に2個のセンサを組み込み、ビード切削部の光輝部を照明による反射光で受光し、差動出力によりビード切削部を検出する方法である。

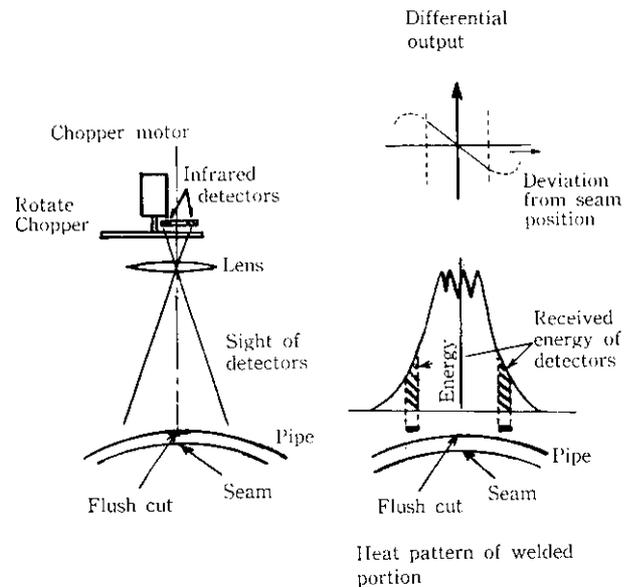


Fig 5 Principle of relative seam position detecting method

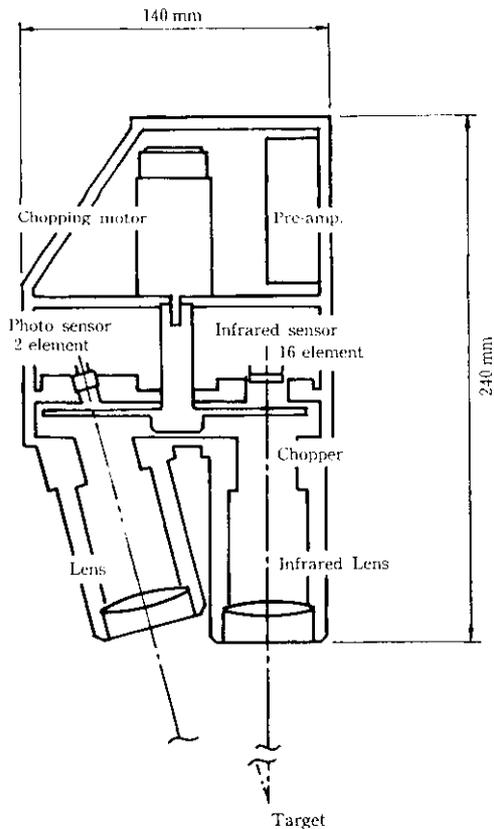


Fig. 6 Schematic of relative seam position detecting system

相対位置検出法の構造を Fig. 6 に示す。検出装置は前述の回転ミラー方式と比較して小型軽量であり、サーボ機構と組合せたシーム追従機構が容易に構成できる。光学式検出部には2つの素子が組込まれ、赤外線式は16素子の内、対称な2素子を用いる。

チョッピングモータにより各々の信号を交流出力として取出し、S/N を改善している。赤外線シームの検出の差動出力特性を Fig. 7 に、また光学式シーム検出の差動出力特性を Fig. 8 に示す。いずれの特性もシーム中心部近傍でリニアである。Table 2 にシーム検出装置の仕様を示す。

以上のように絶対位置検出法は、シームの位置を直接出力するこ

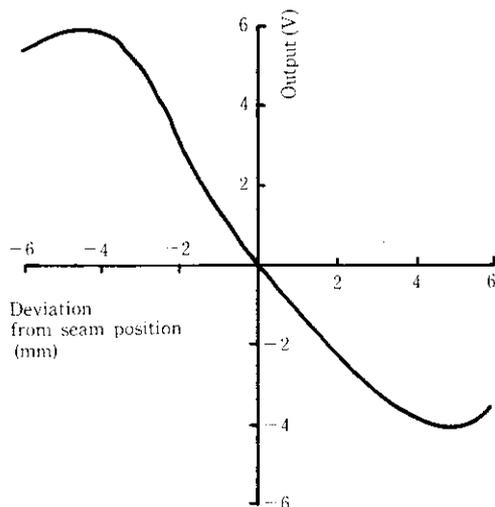


Fig. 7 Output by infrared method of relative seam position detecting system

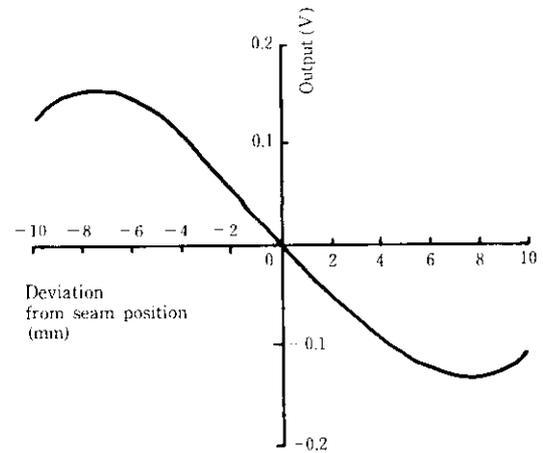


Fig. 8 Output by optical method of relative seam position detecting system

Table 2 Specifications of relative seam position detecting system

Item	Specification
Temperature range	150~700°C
Sensitivity of position	±0.7 mm
Response time	30 ms (90% rise time)
Output signal	DC 0~±5 V/0~±5 mm

とができ、1台の検出装置で複数の設備を独立して扱うシームアニーラ設備には有利であるが、超音波探傷設備のように軽量化が要求される設備には不向である。一方、相対位置検出法は軽量小型であり検出装置を超音波探傷設備に組込んで使うには有効である。

3 シームアニーラシーム追従制御⁴⁾

26" ミルのシームアニーラ設備に適用した例を Fig. 9 に示す。ここで使われているシーム位置検出装置は絶対位置検出方式であり、この模式図を Fig. 10 に示す。パイプ外径ごとに測定装置を上下する位置設定機構によりパイプ外表面との測定距離を一定 (500 mm) に合わせる。温度計視野が回転走査であり距離変化による測定物上での寸法分解能が変化するのを防いでいる。また検出装置はパスライン垂線を昇降し基準熱源は検出装置と一体化してあるので外径変更してもつねに一定の角度になる。

シームアニーラ設備は4台の誘導加熱コイルで構成され、計算機による全自動制御システムである。熱処理加熱温度を制御する温度制御、加熱コイルと鋼管表面との間隔を一定にするギャップ制御、加熱コイルをシーム状に位置決めするシーム追従制御など、シーム部を正確にかつ安定した温度で熱処理する機能がすべて自動化されている。これら制御項目のうちシーム追従制御の役割は、4台の誘導加熱コイルを各々独立して駆動しシーム部に位置決めする。誘導加熱コイルは X 軸、Y 軸、θ 軸の3軸駆動による円弧軌跡追従が可能で、各外径ごとに ±50 mm の範囲を円弧状に位置決めできる。計算機はアニーラ設備入側に設置したシーム検出装置の信号を取込み、4台の誘導加熱コイルのパスラインに対する位置を各々独立して算出し位置決め設定を行う。このようにシームのパスラインに対する位置から種々演算処理する場合、シーム検出装置は絶対位置検出法が有効である。

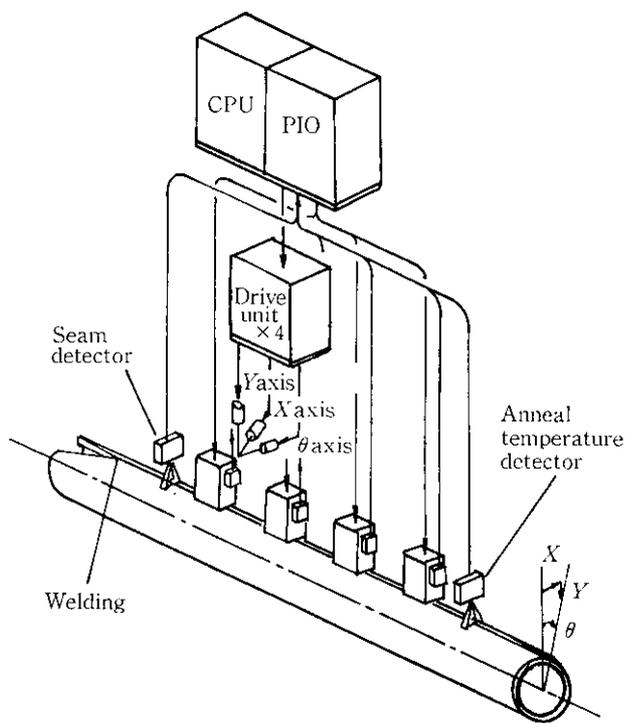


Fig. 9 Seam annealer control system using absolute seam position detector

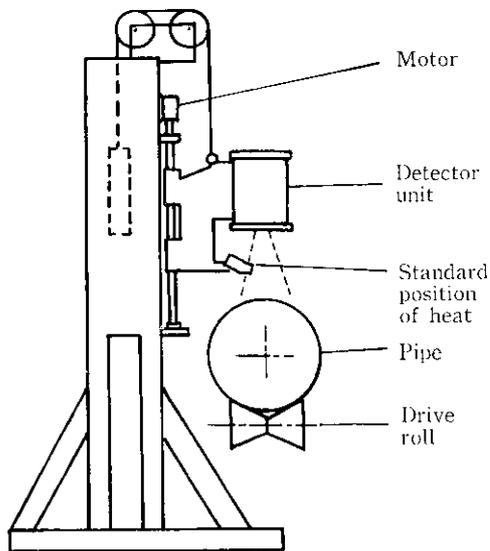


Fig. 10 Absolute seam position detecting system installed in 26" ERW mill

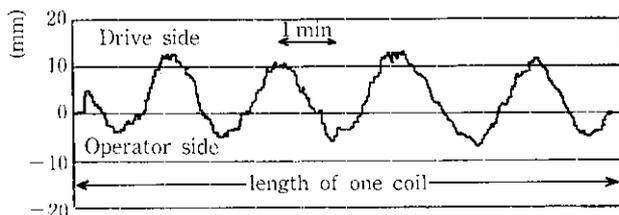


Fig. 11 Result of absolute seam position tracing at seam annealer (under worst case condition)

Fig. 11 にシーム検出装置の信号例を示す。この例は、造管条件の悪い例でシーム部が大きく蛇行している。各誘導加熱コイルに独立して位置決めできることから通常 ± 1.5 mm の追従精度が得られた。

4 超音波探傷用シーム追従制御

相対位置検出法を組込んだ超音波探傷装置の仕様を Table 3 に示す。

超音波探傷装置のシステム構成を Fig. 12 に示す。シーム検出装置は、センサヘッドの中心とシーム位置との偏差を検出し、その偏差に応じた電圧を位置に関する信号としてサーボアンプに印加する。サーボモータにはタコジェネレータを直結し、サーボアンプに回転速度に関する信号を印加してサーボループを形成し、センサヘッドは滑らかにシーム位置に追従する。超音波探傷の探触子は探触子保持機構内に収納し、探触子保持機構とセンサの中心が一致するように取付け、探触子もシームに正確に追従する。

4.1 シーム追従性能

シーム位置検出装置をシーム部自動超音波探傷装置に搭載して、探触子保持機構をシーム部に追従させた場合の総合的なシーム追従性能を以下に示す。ここでは、搬送設備で搬送される鋼管の表面に探触子保持機構の位置に対応したマークを付け、そのマークとシームとの距離を搬送設備の下流で実際に測定し、これを総合性能とした。

4.1.1 自動追従試験データ

26" 電縫管製造ラインで外径 20" の電縫管の製造時に測定した

Table 3 Specifications of ultrasonic testing system mounted in 26" and 6" ERW mill

Item	Specification	
Pipe size		
Outside dia.	267.4~660.4 mm	60.3~168.3 mm
Thickness	3.96~ 22.0 mm	1.2~ 11.5 mm
Seam twist of pipe	$\pm 20^\circ$	$\pm 20^\circ$
Pipe speed	60 m/min max	65 m/min max
Inspection area	$\pm 10 \sim 15$ mm (Seam area)	
Trace speed	6°/s	
Trace angle	$\pm 20^\circ$	
Tolerance	± 1.5 mm	

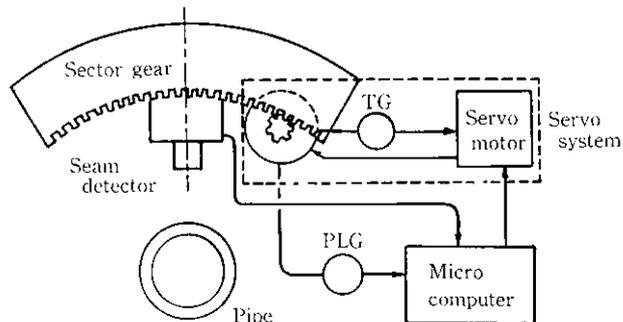


Fig. 12 Relative seam position tracer mounted on ultrasonic testing equipment

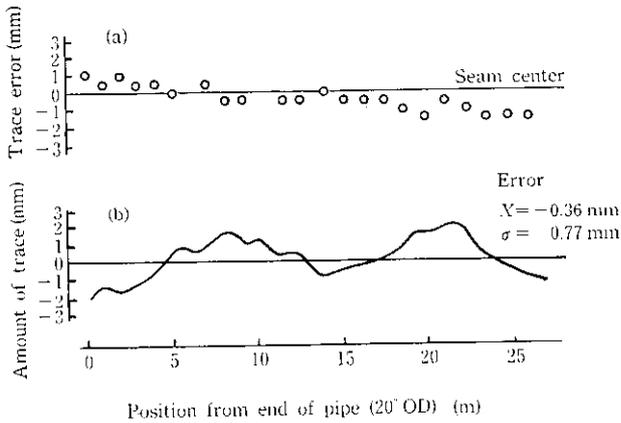


Fig. 13 Test data of relative seam position tracer mounted on ultrasonic testing equipment

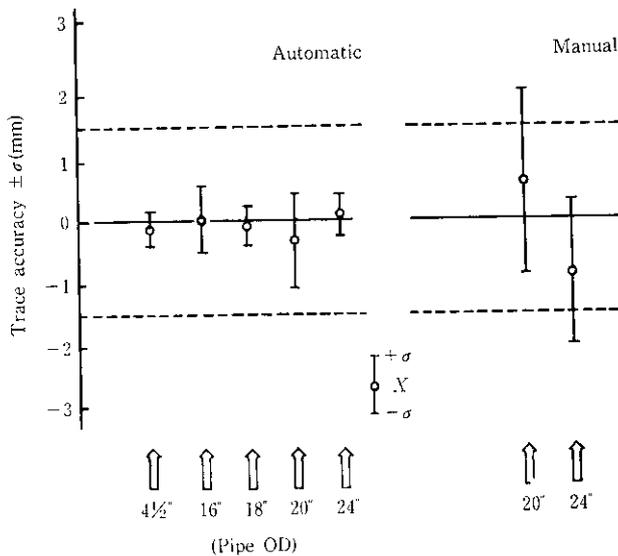


Fig. 14 Effect of automatic relative seam position tracer

例を Fig. 13 に示す。図において (a) は探触子保持機構の中心に対するシーム位置の変動の様子を示した図であり、横軸は電縫管の長手方向位置に対応する。また (b) は、その時の探触子保持機構の動きを示したものである。Fig. 13 は探触子保持機構の中心に対するシーム位置の変動が明らかに零付近に集中していることを示しており、その変動幅は測定誤差を考慮しても ± 1.5 mm 以内である。そのときの探触子保持機構の移動量は (b) から ± 2 mm 程度である。

4.1.2 自動追従制御の効果

Fig. 14 に、自動追従試験を各外径について実施した結果をまとめて示す。外径 16'' 以上は 26'' ミルに設置した超音波探傷装置で、16'' 未満は 6'' ミルに設置した同機種超音波探傷装置での結果である。図の縦軸は各サイズごとの変動幅を $\pm\sigma$ で示している。自動追従制御を実施しない場合には大きく変動するが、自動追従制御を実施することにより、その変動幅が大幅に小さくなっていることが分かる。また図中に探傷条件から定まる許容範囲 ± 1.5 mm を点線で示している。

5 結 言

電縫鋼管製造設備において、溶接部の溶接残留熱を利用したシーム位置検出装置を、絶対位置検出法と相対位置検出法の2つの方式で開発実用化した。各々の特徴を活用し、シームアニーラ設備の全自動システムには絶対位置検出装置を組み込みシーム追従制御を実現した。また、自動超音波探傷設備には、軽量の相対検出装置をサーボ系と組合せてシーム追従を実現した。シームアニーラ設備では通常 ± 1.5 mm の精度が得られ低温靱性のある鋼管の製造に寄与し、超音波探傷設備では追従精度 ± 1.5 mm を得て探傷装置の総合性能を保證している。

溶接残留熱は鉄鋼業においては比較的低温で測定の困難な領域にあるが、非接触温度測定技術と溶接残留熱のパターン特殊性の解析技術によりシーム位置検出装置が開発できた。今後さらにプロセスにおける微妙な変動の検出には、ここで示したパターン温度測定技術が活用されると思われる。

超音波探傷用シーム位置検出装置は三菱電機株式会社との共同開発であり、御尽力いただいた担当者に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 温度計測部会編：温度計測 (1981), 178, [計測自動制御学会]
- 2) 大橋兼廣, 大出文昭, 近藤広章, 銭場 敬, 本田邦雄, 内藤 博, 日和佐 淳: 「電縫管シーム位置検出装置」, 三菱電機技報, 59 (1985) 8, 42-45

- 3) 大橋兼廣, 船生 豊, 近藤広章, 新玉幹夫, 銭場 敬, 日和佐 淳: 鉄と鋼, 71 (1985) 5, S407
- 4) 田村寿恒, 細川泰利, 吉本勇三, 大出文昭, 黒崎雅夫, 杉本巖城: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 3, 143