

Development of Multiprobe Type Weld Flaw Monitor for ERW Pipe Mill



近藤 広章
Hiroaki Kondo
知多製造所 設備部設備技術室 主査(掛長)

奥村 精
Tadashi Okumura
知多製造所 設備部設備技術室 主査(課長)

新司 修
Osamu Shinshi
知多製造所 製造部小径溶接管課 主任部員(掛長)

1 緒 言

電縫鋼管の製造技術、特にロール成形および溶接技術の進歩は著しいものがある。また、製鋼連铸技術の改善により電縫鋼管用鋼板の品質も向上し、管母材部の有害な欠陥は減少している。しかし、電縫鋼管の溶接部（シーム部）の欠陥を皆無にする製造技術は未だ完成されていない。そこで、電縫鋼管の溶接部の品質を保証するために、溶接部を非破壊検査する装置、NDI (Nondestructive Inspection) 装置が導入されてきた。この NDI 装置としては、溶接部断面のすべてを長手方向に連続してモニタできる超音波探傷技術が採用されている。中径電縫鋼管サイズでは、シーム UT (Ultrasonic Tester) が主流である。Fig. 1 に電縫鋼管の製造プロセスを示す。

最近、電縫鋼管製造ラインにおいても、生産性向上を指向した FA 化¹⁾が推進されており、知多製造所においても同様の試みがなされている。FA 化を実現するには、段取替えの自動化を含むシーム UT の完全自動化が不可欠である。しかし、この自動化を既存技術の組み合わせ、例えば超音波探触子を鋼管寸法にしたがって自動位置決めするとすれば、機構および制御装置が複雑となる。その結果、検出特性および信頼性が低下するので、この方法を採用することは困難である。

シーム UT の FA 化を阻害している要因は、①肉厚変更に伴う探触子の段取替え、②テストピースによる校正、③シームトラッキング、および④機構操作の 4 項目である。そこで、これらの阻害要因を同時に除去できる、新しいコンセプトに基づくシーム UT 技術を検討した。その結果、「マルチプローブ方式」を考案するに至った。マルチプローブ方式による溶接欠陥モニタは、既存のシーム UT と同等以上の欠陥検出特性を持ち、同時に FA 化の阻害要因をすべて除去した装置である。ここに初めて、FA 化に耐えられるシ

要旨

電縫鋼管の溶接部（シーム部）の品質を保証する装置として、従来、超音波探傷装置が導入されている。最近、製造ラインの FA 化が進行しているが、超音波探傷装置においては段取替時間の短縮およびシームトラッキングを必要としない完全に自動化された探傷装置が要求されている。検討の結果、新しいコンセプトに基づく探傷方法「マルチプローブ方式」を考案した。この方式の欠陥検出性能を調査したところ、従来方式と同等以上であることが確認された。マルチプローブ方式溶接欠陥モニタは、知多製造所中径電縫鋼管工場で実用化され FA 化に寄与している。

Synopsis:

Ultrasonic inspection system has generally been installed for quality assurance of a longitudinal weld line in the ERW pipe mill. Recently, manufacturing lines tend to change to fully automated factory. Accordingly, it is necessary to automate the conventional ultrasonic inspection system with regard to size arrangements, callibration, and to free the ultrasonic inspection line from tracking on the weld line. As a result of research, the authors have created a new-concept-based inspection method that is named the "Multiprobe method". And, the equivalence of inspection accuracy between this new method and the conventional method were confirmed experimentally. This new weld flaw monitor system by the multiprobe method is currently in operation at Kawasaki's medium diameter ERW pipe mills of Chita Works, thereby contributing to realizing a fully automated manufacturing system.

ンプルな NDI アーキテクチャが実現したと言える。

本報告は、マルチプローブ方式の技術的な根拠を実験的に示し、この新しいコンセプトに基づく溶接欠陥モニタの技術を実用化するために開発した周辺技術について述べたものである。

2 従来の超音波探傷技術³⁾

鋼管の超音波探傷には、斜角探傷法が用いられている。斜角探傷法は、被探傷材の中を超音波ビームが内部で反射を繰り返しながら伝播するので、管肉厚方向の探傷が可能である。また、被探傷部分から離れた場所に探触子を配置できるので、電縫鋼管の溶接部のように高温部分を持つ材料の探傷に利用されている。Fig. 2 に斜角探傷法における探触子の溶接部からの距離（探触子・溶接部距離）と、超音波反射源から得られるエコー高さを示す。

しかし、超音波ビームは通常 4~5 mm であり、鋭い指向性を持たせている。したがって、欠陥と探触子間距離がわずかに変化しても、エコー高さは大きく変化するので、欠陥が存在してもエコーが

* 平成元年10月23日原稿受付

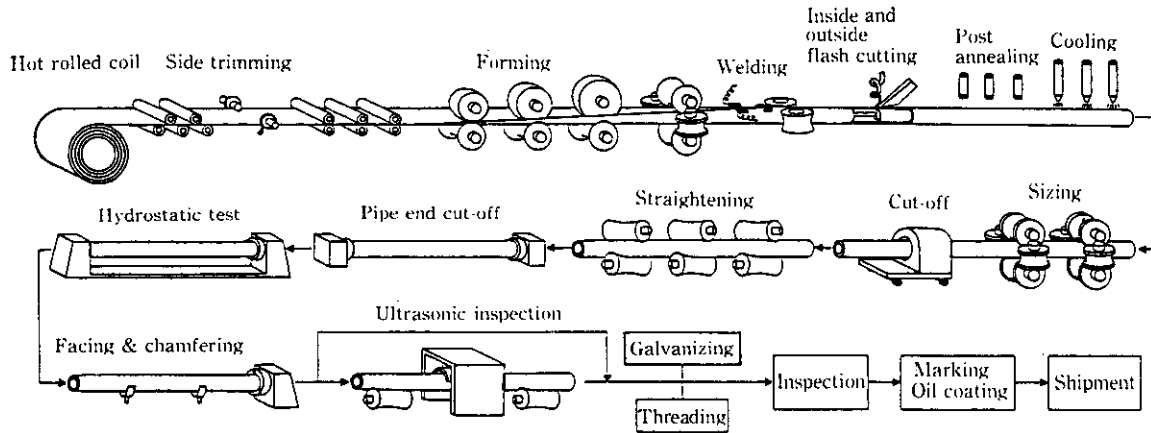


Fig. 1 Manufacturing process of 20-in. ERW pipe

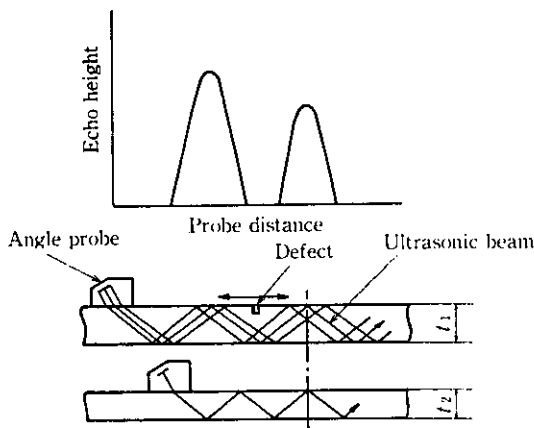


Fig. 2 Distance amplitude characteristic of conventional angle beam technique

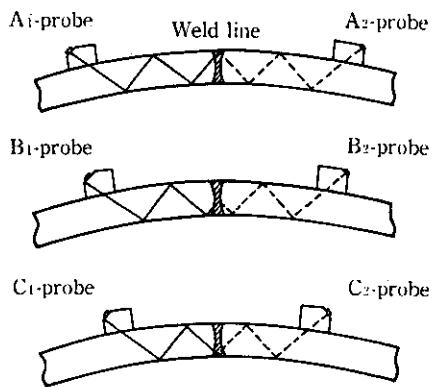


Fig. 3 Probe arrangement of conventional ultrasonic tester

ない場合が発生する。

それゆえ、電縫鋼管へ適用するオンライン用シーム UT は、Fig. 3 に示すような探触子配列を採用している。溶接部の肉厚方向の全断面に対し、外面、内質および内面と分割し、その各部分に超音波ビームが照射できるよう配慮されている。もちろん、肉厚が厚くなると、さらに探触子数を増加させなければならない。

従来の電縫鋼管用シーム UT には、以上述べた探傷方法が採用されているために、以下に述べる FA 化を阻害する問題点を持っている。

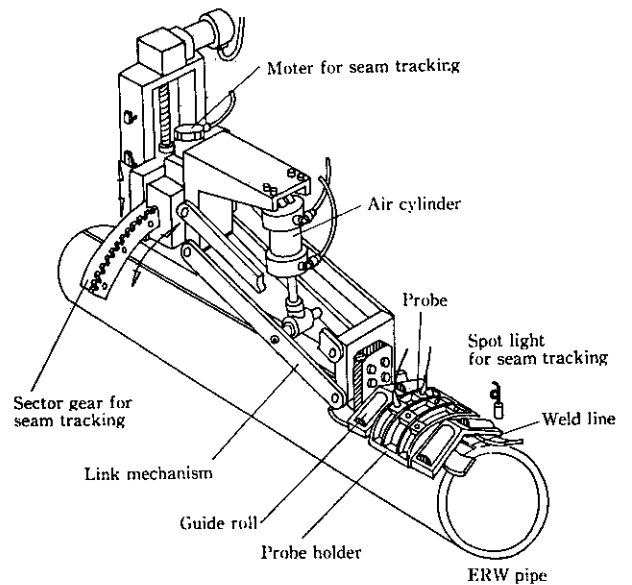


Fig. 4 Schematic mechanism of conventional ultrasonic tester for ERW pipe

- (1) 段取替えがあると、全探触子の位置を Fig. 2 に示すように、肉厚対応した位置へ変更しなければならない。この位置決め精度は、 $\pm 2 \text{ mm}$ といわれており、製造ラインの環境を考慮すると、かなり高い正確さが要求される。
- (2) シーム UT の段取替えが完了した後、人工欠陥が加工されているテストピースを用いて、超音波の距離による減衰特性を補正するための較正を実施しなければならない。全探触子にたいしてこの補正が必要であるから、通常 15 分から 20 分を必要とする。
- (3) 段取替え後、電縫鋼管は製造開始されるが、製造上の要因により溶接部は、 \pm 数 mm 程度変動することがある。このため、シーム UT は目視によるか、あるいは自動トラッキング⁹⁾のいずれかの方法により、 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内の精度で溶接部に追従させなければならない。

Fig. 4 に従来技術で構成されたシーム UT の概略機構を示す。

3 マルチプローブ方式の超音波探傷装置の開発

3.1 マルチプローブ方式の設計

従来、斜角探傷法における距離振幅特性上の欠点を補うために、シーム UT においては Fig. 3 に示したような多探触子法が採用されていた。この方式によれば、確かに探触子数の増加により距離振幅特性上の欠点が補完されるが、それに反して段取替え、較正作業負荷の増大を招く結果となっていた。なお、手動探傷においては、探触子・溶接部距離を変えながら探傷するジグザグ走査法を採用することにより距離振幅特性上の欠点を補っていた。

ところで、斜角探傷法における距離振幅特性は、斜角探触子の屈折角およびビーム幅によりほぼ決定される。しかし、電縫鋼管の溶接部探傷においては、電縫鋼管に特有な欠陥であるフッククラックの検出特性を考慮して、屈折角 45 度が一般に用いられている⁹⁾。したがって、屈折角を変更しなくて距離振幅特性を改善するには、ビーム幅を広げることが必要である。

ビーム幅を広げる方法としては、振動子寸法の拡大または振動子数の増加が考えられる。振動子寸法を拡大する方法は既に実用化されている⁹⁾。しかし、振動子寸法の拡大により振動子の各部位から送信された超音波ビームの音響くさび内での伝播距離に大きな差が必然的に発生する。音響くさびとして用いられているアクリル樹脂の減衰率が、約 3 dB/cm であることから、伝播距離差に伴い大きな減衰差を生じることになる。なお、振動子寸法を拡大する方法は被検査材の肉厚に比例した寸法拡大が必要とされることから、適用できる肉厚に限界がある。また、振動子寸法の拡大に伴う微小欠陥の検出特性低下も懸念される。

そこで、振動子数を増加することにより Fig. 5 に示すような「屈折角の等しい束ねた超音波ビーム」を得る発想に至った。この発想による距離振幅特性の改善効果をパーソナルコンピュータを用いた超音波シミュレーション¹⁰⁾により解析した。この結果、振動子寸法を数 mm 程度とし、少なくとも 1 スキップ相当の束ねた超音波ビームが得られる振動子数とすることにより、距離振幅特性が著しく改善されることがわかった。しかし、既存の斜角探触子ではその外形寸法が 20~30 mm もあるために、束ねた超音波ビームを得ることができなかった。このため斜角探触子を構成する上で最小限必要とされるのは、振動子（または垂直探触子）および音響くさびの両者であることに着目し、コンパクトな矩形垂直探触子および音響くさびを設計した。

この結果、新しいコンセプトにもとづくマルチプローブ方式が開発された。マルチプローブ方式の概念を Fig. 6 に、またその外観を Photo 1 に示す。矩形垂直探触子の前面に音響くさびを取り付

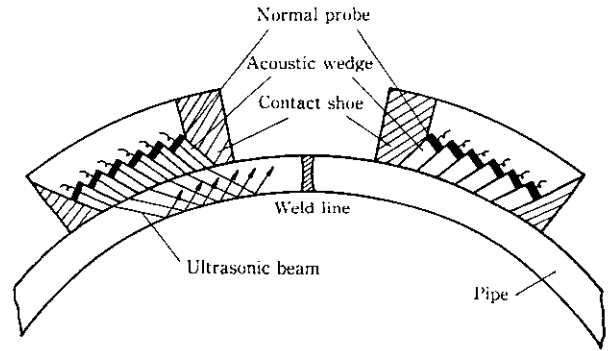


Fig. 6 Cross-sectional figure of multiprobe method

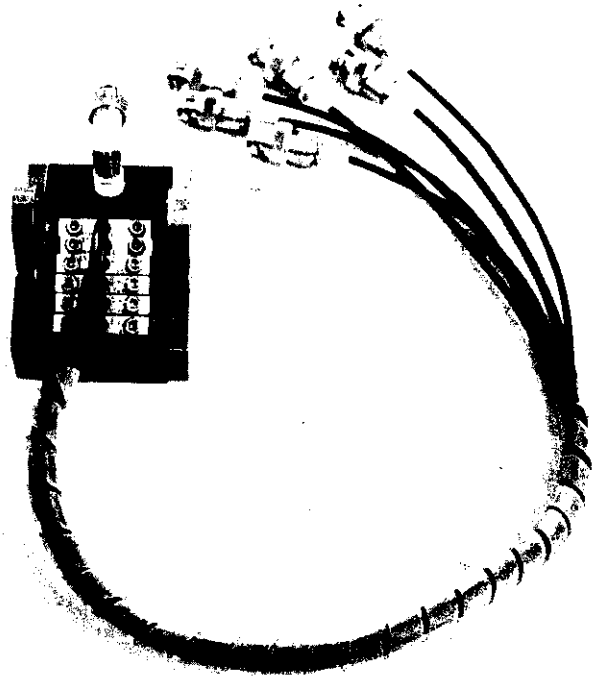


Photo 1 Appearance of multiprobe

けることにより、一個の斜角探触子として機能させている。このコンパクトな斜角探触子を被検査材円周上にアレイ状に配置することにより、「屈折角の等しい束ねた超音波ビーム」が得られる。

3.2 検出特性の評価

3.2.1 距離振幅特性

開発したマルチプローブを用いて外径(OD)406.4 mm×肉厚(WT)9.52 mm の外面に加工した N・10 ノッチ（肉厚の 10% 深さのノッチ）における距離振幅特性を調査した。その結果を Fig. 7 に示す。単一探触子での距離振幅特性は、前述したように斜角探傷法の特徴であるスキップ点におけるピークエコーが出現し、探触子距離 55 mm を基準とした場合 15 dB/±10 mm のエコー高さ変動が認められる。しかし、探触子数を増加するに伴い距離振幅特性における起伏が小さくなり、6 個の探触子を用いた場合のエコー高さ変動は ±1.4 dB/±10 mm となり、探触子・欠陥距離が変動してもエコー高さがほとんど変化しないことがわかる。

また、OD 168.3 mm×WT 6.35, 9.52, 10.97 mm に加工した各種人工欠陥のマルチプローブにおける距離振幅特性を Fig. 8 に示

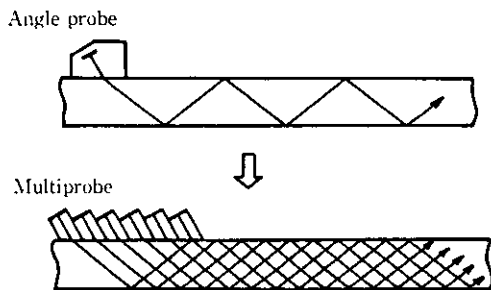


Fig. 5 Principle of multiprobe method

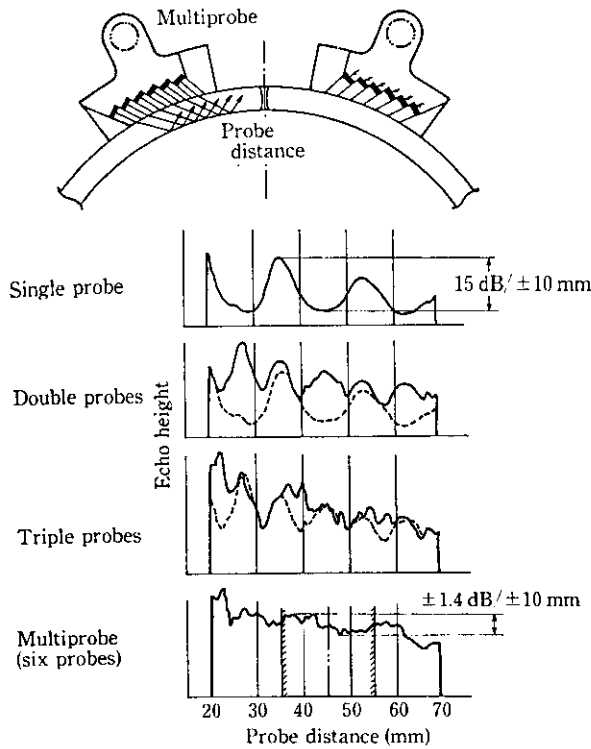


Fig. 7 Distance amplitude characteristics

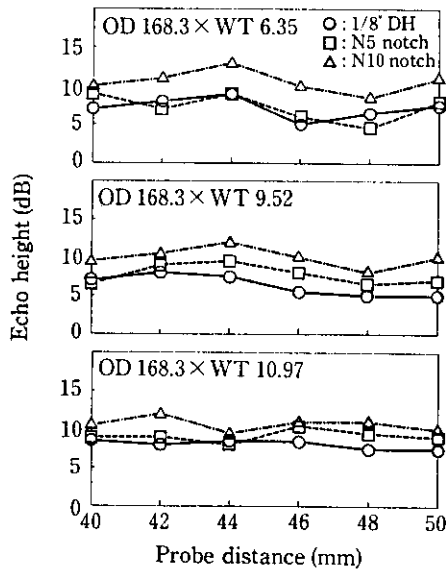


Fig. 8 Distance amplitude characteristic of multiprobe method

す。φ3.2 mm ドリルホール、N-5 ノッチ、N-10 ノッチのいずれの場合も距離変動に対するエコー高さ変化は ±2 dB 以内である。このことは、マルチプローブにより、「屈折角の等しい東た超音波ビーム」が得られていることに他ならない。したがって、マルチプローブを用いた場合、欠陥からのエコー高さにピーク現象がないことから、溶接部の位置変動に対しシームトラッキングする必要が全くないとともに、肉厚に関係なく、一定位置に探触子をセットすればよいことになる。この結果、段取替え作業時間の短縮およびシームトラッキング機能の削除が具現化できる。

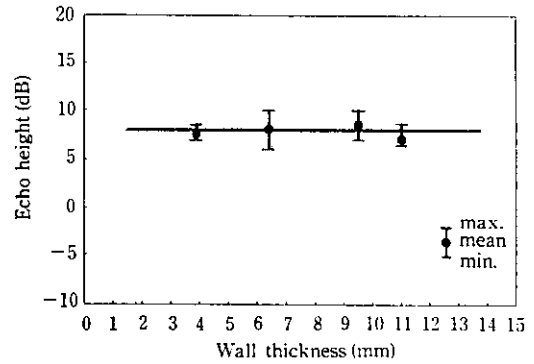


Fig. 9 Relationship between wall thickness and echo height from 1/8-in. drilled hole

3.2.2 対比標準人工欠陥の検出特性

OD 168.3 mm の各種肉厚の鋼管を供試材として、マルチプローブ方式における API 規格および JIS 規格に規定されている各種対比標準人工欠陥の検出特性を調査した。調査結果の一例として φ3.2 mm ドリルホールの検出特性を Fig. 9 に示す。横軸に供試材の肉厚をとり、縦軸に φ3.2 mm ドリルホールからのエコー高さをとり、探触子距離 40~50 mm 間におけるエコー高さの平均値および変動幅を示した。φ3.2 mm ドリルホールからのエコー高さは、供試材の肉厚に関係なくほぼ一定の値を示す。この理由は、従来の斜角探傷法においては、肉厚によりピークエコーの得られるビーム路程が大きく異なることから距離減衰を無視できなかったのに対し、マルチプローブ方式においては、エコー高さのピーク現象がないため肉厚に関係なく一定のビーム路程で評価できることによるためと考えられる。またマルチプローブ方式においては、そのビーム特性上 φ3.2 mm ドリルホールを無限長さの横穴反射として仮想できることから、肉厚に関係なく一定の検出特性が得られたと考えられる。

したがって、マルチプローブを用いた場合肉厚に関係なく探傷装置の感度を一定にできることから、段取替え時の感度校正作業が不要となる。

3.3 実用化技術

マルチプローブ方式溶接欠陥モニタは、電縫鋼管製造における品質の作り込みの観点から、Fig. 10 に示すように溶接直後のオンラインに設置した。マルチプローブ方式溶接欠陥モニタの前後には、ウェルダおよびアニーラがあり、その設置環境は極めて厳しいものがある。

3.3.1 マルチプローブアセンブリの開発

マルチプローブアセンブリはその設置環境から、(1)耐熱性、(2)耐水性、(3)絶縁性、(4)耐摩耗性等が必要とされる。特に、斜角探触子を構成する重要な要素である音響くさびは、上記を満足する材質であることが必須条件である。従来、斜角探触子の音響くさびとしてアクリル樹脂(メタクリル酸メチル重合体)が多用されていたが、耐熱性および温度変化に対する音響安定性に問題があった。このためエンジンアリングプラスチック等の新素材をはじめとする種々の素材を調査した。その結果、マルチプローブ用の音響くさびとしては、音響透過性が優れ耐熱温度が 390°C と高いポリイミド樹脂(重合型含窒素耐熱樹脂)を採用した。なお、ポリイミド樹脂はアクリル樹脂に対して耐熱性だけでなく、耐水性、絶縁性、耐摩耗性においても同等以上であるとともに、温度変化に対する音響安定性および切削加工性においても優れている。

なお、マルチプローブアセンブリとしての耐摩耗性をさらに向

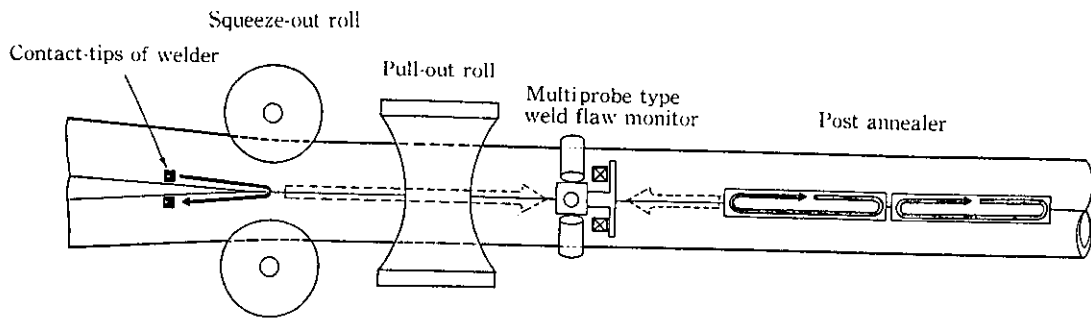


Fig. 10 Layout of multiprobe type weld flaw monitor

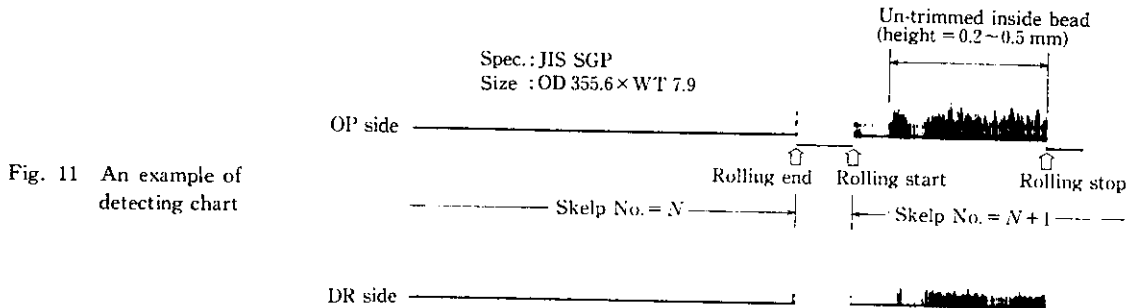


Fig. 11 An example of detecting chart

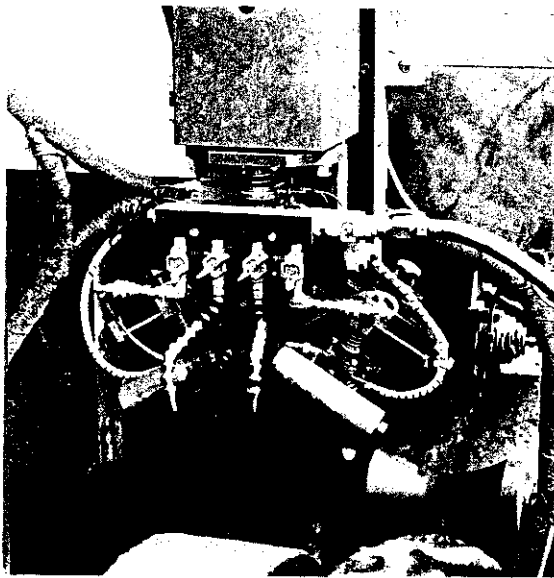


Photo 2 Appearance of multiprobe type weld flaw monitor

上させるために、前後シューには耐摩耗性材料である超硬チップを用いている。

マルチプローブ方式溶接欠陥モニタの機構装置の外観を Photo 2 に示す。機構装置は非常にコンパクトに設計されており、上下昇降機構、ガイドロール等を有しているにもかかわらず、ライン方向寸法が約 250 mm である。

3.3.2 ノイズ対策

マルチプローブ方式溶接欠陥モニタの前後には、高周波・ハイパワーのウェルダおよびアニーラがあるため、設置当初この両者を起因とするノイズが認められた。このため下記に示す種々のノイズ対策を実施した。

- (1) マルチプローブアセンブリの完全絶縁化
- (2) ノイズ理論に基づく接地

(3) 探触子のダンピング材料変更による送信パワーアップ

上記に示すノイズ対策の結果、ノイズの影響は極端に低減した。オンライン探傷チャートの一例を Fig. 11 に示す。高さ 0.2~0.5 mm の内面ビード残りを高 SN 比で検出していることがわかる。

4 結 言

新しいコンセプトに基づく電縫鋼管の溶接部探傷方法であるマルチプローブ方式を考案した。実験的に従来の超音波探傷方法との検出特性を比較したところ、同じ特性であることが確認できた。従来、シーム UT を自動化する上で阻害要因となっていた段取替え時間の短縮、テストピースによる較正、シームトラッキングおよび機構操作のすべてが、マルチプローブ方式により排除された。その結果、シーム UT の完全自動化が達成された。

マルチプローブ方式は、機構的にも信号処理的にも、装置を単純化できるので、欠陥検出の信頼性が大幅に向上した。さらに、装置の価格が既存技術の装置に比べて、約 1/4 と大幅に低廉化された。現在、電縫鋼管製造ラインの FA 化推進の有力なツールとなっている。

参 考 文 献

- 1) 小西和夫, 津久井孝史, 清野宏道, 川畑成夫, 榎本洋一, 井田充彦: 日本鋼管技報, 102 (1984), 33-42
- 2) 阿高松男, 渡辺 豊, 森 紘一, 鈴木典明, 茶野善作, 村山 博: 製鉄研究, 328 (1988), 1-8
- 3) 日本鉄鋼協会編, 「溶接鋼管の超音波探傷法」, (1988), 71, 86
- 4) E. Asano, H. Baba, S. Uemura, and H. Kondo: *Kawasaki Steel Technical Report*, 4, (1981), 116
- 5) 大出文昭, 新玉幹夫, 近藤広章, 大橋兼廣, 日和佐 淳, 錢場 敬: 川崎製鉄技報, 18 (1986) 2, 186
- 6) リバブリックスチール: 特開昭 57-500439
- 7) 新玉幹夫, 奥村 精, 近藤広章: 材料とプロセス, 2 (1989), 1450