

Application of Phased Array Ultrasonic Transducer to Pipe and Tube Testing Field



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



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

1 緒 言

鋼管は鉄鋼の最終製品のひとつであり、工場出荷された姿でお客様に使用されることが多い。それゆえ、従来より製品検査には細心の注意を払ってきた。特に非破壊検査技術は鋼管検査、品質保証の中核を成す技術として位置付けられてきた。したがって、非破壊検査装置はその時の先端技術を積極的に導入してきた経緯を持っている。最近、小ロット多品種化とともに鋼管の品質に対する要求が一段と厳しくなっている。これらのお客様の品質要求に対応する鋼管の製品検査システムの構築と製品検査の生産性の向上が重要課題となっていた。

知多製造所では新たな検査システム構築の一環として、従来は人間の目視による検査を余儀なくされていた鋼管の内面検査に着目し、これを非破壊検査装置化する技術開発に取り組んだ。この非破壊検査装置の目的は鋼管内面の品質保証レベル向上と自動化を志向したものである。また、この非破壊検査装置は先端技術である超音波フェイズドアレイ素子^{1,2,4)}(本文のリニアアレイ探触子とは同義語)を用いていることが特徴である。この超音波フェイズドアレイ素子を適用することにより、従来の非破壊検査技術では解決不可能であった欠陥検出特性の向上が可能となった。また、水槽の中にフェイズドアレイ素子を鋼管の長手方向に配置することで、サイズ替えフリーを実現した。

本報では、超音波フェイズドアレイ素子を用いた鋼管の内面非破壊検査装置の開発・適用した理由、フェイズドアレイ素子による欠陥の検出原理、鋼管内面全体の鋼管外部からの高速探傷を実現する機構およびオンラインでの適用結果について報告する。

2 従来の非破壊検査技術

周知のとおり、オンラインでの非破壊検査技術を大別すると、超

要旨

鋼管の内面検査は従来方式の非破壊検査装置を用いると特定の欠陥に対する検出が困難であった。筆者らは超音波のフェイズドアレイ素子を用いた非破壊検査装置を開発し、オンラインでの内面検査を可能にした。リニアアレイ探触子は128bitの振動子からなり、感度バラツキは0.4dB以下と高性能である。オンラインでは水槽中で鋼管をスキュー送りしながらリニアアレイ探触子を電子走査する。エコー信号はコンピュータで処理され、B+Cスコープにより表示される。本装置はステンレス鋼を含むシームレス鋼管に適用され、高S/N比で内面欠陥を検出している。

Synopsis:

Specific flaws or defects on the inner surface of pipe were unable to be detected by existing non-destructive methods. The authors have developed a modernized non-destructive tester using ultrasonic phased array elements, and this non-destructive tester can inspect the inner surface flaws or defects. Linear array probe consists of ultrasonic vibration elements sliced into 128 bits and its sensitivity characteristics are kept constant within 0.4 dB. The linear array probe is mounted in a bathtub at the site and pipes are arranged in a spiral on the bathtub. At that time, the pipes are scanned electrically by the linear array probe. Ultrasonic echo signals are processed by computer and displayed by the B+C scope. This advanced inspection method is applied seamless pipe including stainless steels fields and it is inspecting inner surface flaws at a high S/N ratio.

音波の反射あるいは透過を利用する方法、直流あるいは交流励磁による欠陥からの漏洩磁束を検出する方法および渦流によるインピーダンス変化を検出する方法等がある。いずれも物理的特性を十分究明した上で非破壊検査技術として確立し、鋼管の欠陥探傷に適用されている。

しかし、これらの探傷技術も以下に述べる問題点を含んでおり、特に鋼管内面の目視検査の自動化、非破壊検査装置化を困難にしていた。

超音波技術は鋼管の非破壊検査技術として最も汎用的に用いられているが、

- (1) ステンレス系の鋼材は普通鋼に比較して結晶粒が大きく、超音波の乱反射とこれによる減衰が顕著である。
- (2) Fig. 1 に示すように、鋼管表面の緩慢に変化する欠陥の場合、超音波の反射源として機能しないことがある。すなわち、反射エコーが得られないので極端な場合は欠陥の検出が不可能である。
- (3) Fig. 1 に示すように、鋼管表面にほぼ平行して存在する鋭利

* 平成3年10月24日原稿受付

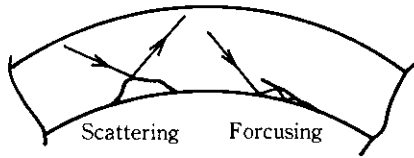


Fig. 1 Propagation of ultrasonic beam

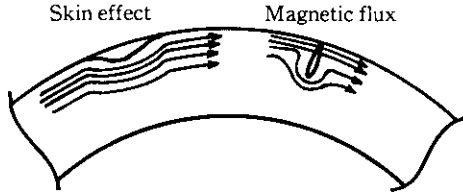


Fig. 2 Magnetic flux flow on magnetic leakage flux test

な欠陥の場合は、入射した超音波は鋼管表面とこの欠陥の間で多重反射を繰り返し減衰し、超音波の反射源として機能しない場合がある。

等の欠点も指摘されている。

漏洩磁束技術は非破壊検査技術として比較的新しい技術であるが、

- (1) オーステナイト系のように比透磁率が“1”の材料の場合は、原理的に漏洩磁束がなく欠陥検出ができない。
- (2) クロムモリブデン鋼材は微細フェライト組織の影響で、励磁した場合磁性材のような挙動を示しベースノイズが高くなり、良好な S/N 比が得られないことがある。
- (3) 超音波と同様、Fig. 2 に示すように鋼管表面の緩慢に変化する欠陥の場合、磁気ポテンシャルの急激な変化がないので鋼管表面に沿って磁束が流れてしまう。それゆえ、漏洩磁束はなく欠陥検出ができない。
- (4) 鋼管表面の極めて固く圧接されたような欠陥からは漏洩磁束は発生せず欠陥検出できない。
- (5) 交流励磁はもちろん直流励磁を利用しても、鋼管内面からの欠陥による漏洩磁束は減衰しやすく厳密な欠陥検出は困難である。

等の欠点が指摘されており、鋼管の内面検査には適用できない。

渦流技術は超音波技術よりも古くから実用化されているが、

- (1) 交流の表皮効果により漏洩磁束技術と同様、鋼管内面の小規模欠陥の検出には適さない。
- (2) 周知のとおり、鋼管の長手方向欠陥はインピーダンス変化が小さく欠陥の検出能力は低い。
- (3) 貫通型コイルを採用するとサイズ替えフリーは実現しない。また回転型プローブコイルを採用すると、交流の表皮効果により鋼管内面検査は不可能である。
- (4) 鋼管内挿型プローブコイルも実用化⁵⁾されているが、シャトル動作を要求され自動化が極めて困難である。

以上の検討の結果、鋼管内面の目視検査の自動化に最適な、新しい非破壊検査技術の開発が必要となった。

3 検出原理の開発

3.1 検出方法の検討

鋼管の内面に存在する欠陥を精度よく検出するため、下記の開発要件を満足する欠陥検出方法を検討することとした。

- (1) 鋼種選択フリー（炭素鋼およびステンレス鋼の探傷を可能にする）
- (2) 全面探傷（スキュー送りラインにて全面探傷を可能にする）
- (3) サイズ替フリー（外径・肉厚変更にとまらぬ設定調整を不要にする）
- (4) 鋼管の外側から欠陥検出（鋼管内部へ装置を挿入しない）
- (5) 欠陥のプロフィール化⁶⁾

鋼管の非破壊検査法には、前述した種々の方法がある。この中で、鋼管の外側からその内面に存在する欠陥を検出する方法を種々検討したが、その探傷原理および信号処理の容易さから超音波探傷法が最適であるという結論に達した。

超音波探傷法における探傷波形の表示方法には Fig. 3 に示すような A スコープ、B スコープおよび C スコープがある。A スコープは超音波探傷法における最も基本的な表示方法であり、縦軸にエコー高さを横軸に時間（距離）をとり、探傷波形を表示する方法であり、エコーの高さと反射源までの時間（距離）の情報が得られる。B スコープは被探傷材に対し探触子を平行走査し、A スコープにて得られる情報を基にして横軸に走査距離を、縦軸に反射源までの距離をとり、エコー高さを輝度変調して被探傷材の断面像を得る方法である。また、C スコープは被探傷材に対し探触子を方形走査し、A スコープにて得られる情報を基にして被探傷材の平面（透過）像を得る方法である。この B スコープと C スコープを併用することにより被探傷材に存在する欠陥のプロフィール化が可能となる。しかし、従来技術により B スコープおよび C スコープを得るには、超音波探触子をメカニカルに走査することが必要とされるため、鋼管の製造ラインのような高速処理を要求されるラインに適用することは困難であった。

最近、医療分野においては、超音波探触子のメカニカルな走査なしに B スコープ像を得るためにリアアレイ探触子が利用されている。リアアレイ探触子とはミリメートルにスライスした圧電素子を多数整列配置した探触子である。この複数個の圧電素子すなわち

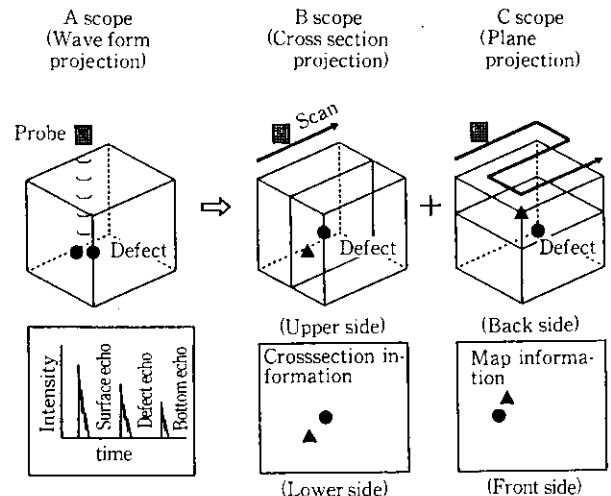


Fig. 3 Presentation of ultrasonic scope

振動素子を一群とし励振することにより、所定の強度の超音波ビームを得るとともに、励振対象の振動素子群を電子的に順次切り換えることにより、リニアアレイ探触子直下のBスコープ像を得ることができる。しかしながら、医療用装置はその検査対象が人体でありほぼ静止状態での利用であることから、その送信パワーおよび検査速度(繰り返し周波数)が低く、鉄鋼用としてそのまま利用することはできない。特にステンレス鋼のように結晶粒が大きい材料の場合は送信パワーが低いことは致命的である。そこで、従来のリニアアレイ素子の送信パワーを向上させ、さらに周波数的に広帯域の超音波が得られるようにリニアアレイ素子を改良した。

3.2 検出原理

リニアアレイ探触子による鋼管の内面欠陥検出原理を Fig. 4 に示す。鋼管と平行にリニアアレイ探触子を配置し、鋼管の長手方向に対し、電子的にリニアスキャンしリニアアレイ探触子の長さ範囲を瞬時に走査するとともに、被検査鋼管をリニアアレイ探触子の長さ間隔でスキュー送りすることにより、鋼管の全面を走査することができる。また、超音波ビームを鋼管表面に対して垂直に伝播させることにより、鋼管の表面エコーおよび肉厚方向の欠陥エコー・底面エコーを得ることができる。これらのエコーと走査条件とをパーソナルコンピュータを用いてデータ処理することにより、BおよびCスコープ表示が可能となる。

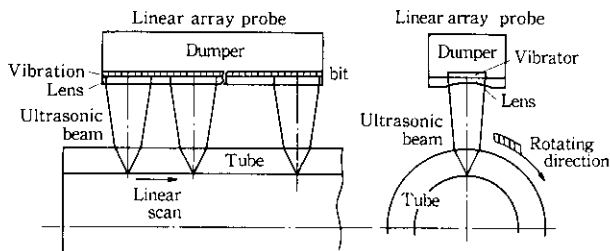


Fig. 4 Testing principle by linear array probe

3.3 実機化のための試作実験

鋼管の内面欠陥検出にリニアアレイ探触子が利用可能か否かを判断するために、探傷周波数 5 MHz、振動子寸法 2 mm×16 mm で 64 素子(振動子)のリニアアレイ探触子を試作した。この試作探触子を用いて鋼板に加工した種々人工欠陥のBスコープ像を調査した。その結果の一例を Fig. 5 に示す。リニアアレイ探触子の電子走査は 8 素子を一群とし 1 素子単位で実施した。その結果、へげ状の人工欠陥 ($\theta=20^\circ$ 、深さ=2 mm) の断面形状と同等のBスコープ像が得られた。これらの事実は、リニアアレイ探触子を用いることにより鋼管の内面探傷が可能であることを示唆している。

この探触子を生産ラインへ実装する場合、Fig. 4 にも示した配置となる。探触子を水槽に入れて鋼管の下方へ配置すれば、鋼管の外径寸法に関係なく探傷することが可能である。すなわち、装置を鋼管内部へ挿入することなく、サイズ替フリーのオンライン探傷装置の構築が可能である。

4 オンライン装置の概要

4.1 リニアアレイ探触子の静的特性

オンライン用に開発したリニアアレイ探触子の詳細仕様を Table

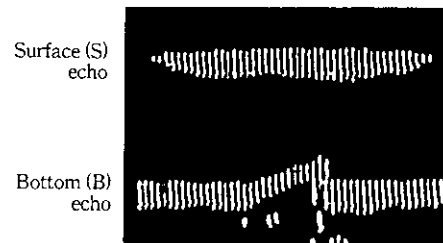
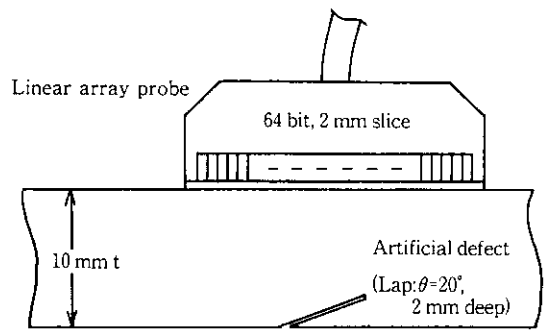


Fig. 5 An example of B scope projection (Scan mode: 8 bit group, 1 bit shift)

Table 1 Specifications of linear array probe

Type	5C2-161 J-128 ch
Sensor material	Lead titanate
Sensor dimensions	256 mm length × 16 mm width
Elements	128 bit
Lens material	Polyether resin
Focal distance	60 mm in water

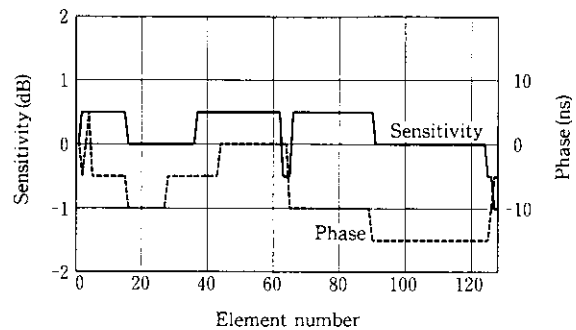


Fig. 6 Distribution of sensitivity and phase between sliced elements

1 に示す。2 mm×16 mm の振動素子を 128 個整列配置した 5 MHz のリニアアレイ探触子である。このリニアアレイ探触子の個々の振動素子の感度および位相を調査した。その結果を Fig. 6 に示す。個々の振動素子間の感度差は最大 1.5 dB、位相差は最大 20 ns であり、特性のそろった振動素子が得られている。また、8 素子を同時励振し 4 素子単位で電子走査(リニア走査)した場合の感度ばらつきを Fig. 7 に示す。感度ばらつきは 0.4 dB と非常に小さく、高性能のリニアアレイ探触子であることがわかる。

また同時に励振する 8 素子間に遅延時間を与えてフェイズドアレイ法とした場合のビームプロファイルの変化を実測した。その結果の一例を Fig. 8 に示す。遅延時間を与えることによりビームプロファイルは変化し、適当な遅延時間を与えることにより、任意のビ

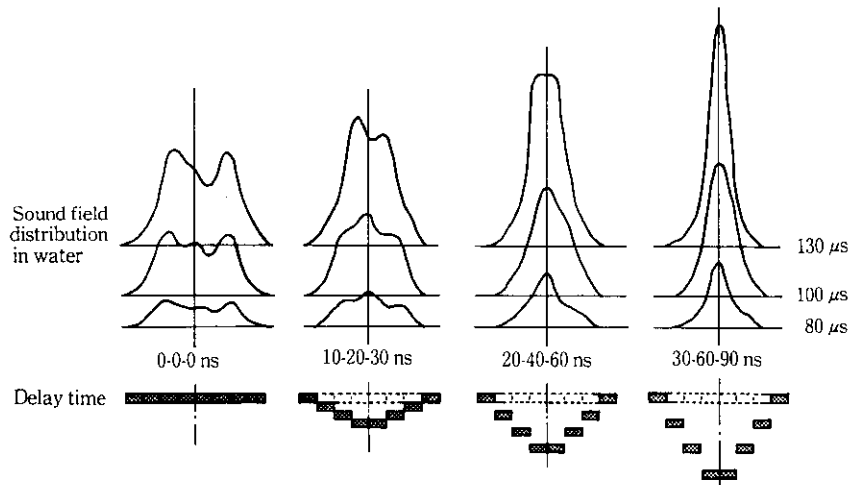


Fig. 8 Ultrasonic sound field distribution by phased array method

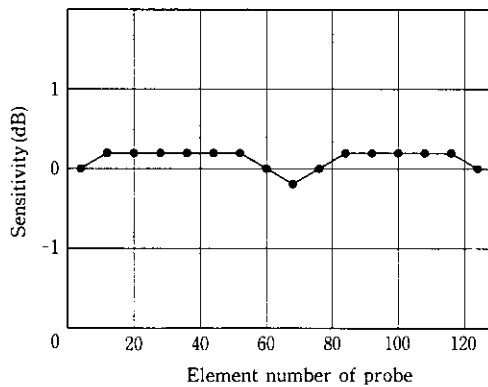


Fig. 7 Distribution of sensitivity in concurrent excitation of 8 elements

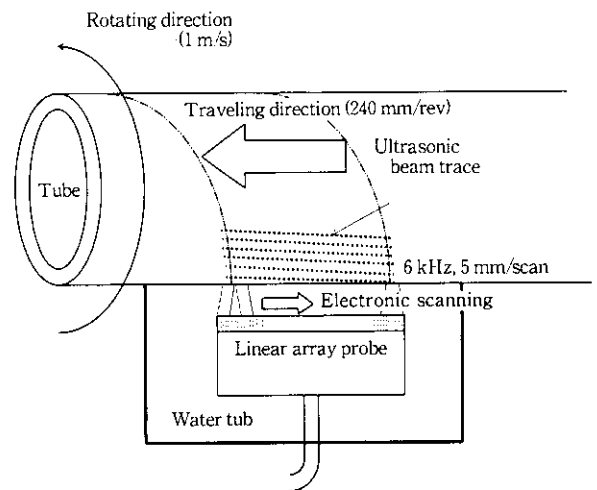


Fig. 9 Schematic structure of on-line apparatus

ームプロフィールを得ることができる。

4.2 オンライン装置の概要

リアアレイ探触子を用いた鋼管の内面非破壊検査装置における

Table 2 Conditions of inspection

Material	Seamless tube
Outside diameter	60.3~193.7 mm
Wall thickness	3.0~32.0 mm
Distance of scw	240 mm/rev max.
Rotating speed	1 500 mm/s max.

Table 3 Specifications of outline tester

Frequency of sensor	5 MHz
Channels of sensor	128 channel
Repeat frequency	18 kHz max.
Amplifier gain	More than 30 dB
Driven element	8 elements at the same time
Delay time between each elements	0~300 ns
Duration of scan	From 1 to 4 elements
Display and presentations	Recorder and cross section profile display

被検査材仕様を Table 2 に、装置本体の仕様を Table 3 に示す。被検査材には、管端部を増肉したアプセット鋼管が含まれているとともに、被検査材の寸法も広い範囲を対象としている。また探傷装置は、リアアレイ探触子に対応して、128 チャンネルの送・受信部を有しているとともに、高速走査を可能とするため最大 18 kHz の繰り返し周波数が得られる。なおデータ処理装置にパーソナルコンピュータを用い、B および C スコープ表示機能をはじめ 2 値化、反転表示等の機能も備えている。

Fig. 9 にオンライン装置の概念図を示す。水槽の中にリアアレイ探触子を設置し、水槽を被検査鋼管に追従させる方式を用いている。鋼管を 240 mm/rev のスキュー送りにて搬送することによりその全面が探傷できる。なお水槽は、アプセット鋼管に対応するため、1 ビースごとにエアシリンダーにより接・離管するとともに、スキュー送りされる鋼管に対して精度よく追従させるために、シンバル機構、ばね機構および球面ガイドロールを採用している。

5 オンラインへの適用結果

開発したリアアレイ探触子を用いた鋼管の内面非破壊検査装置をオンラインに適用するにあたり、その走査ピッチを検討した。その結果を Fig. 10 に示す。横軸に繰り返し周波数を、縦軸に円周方

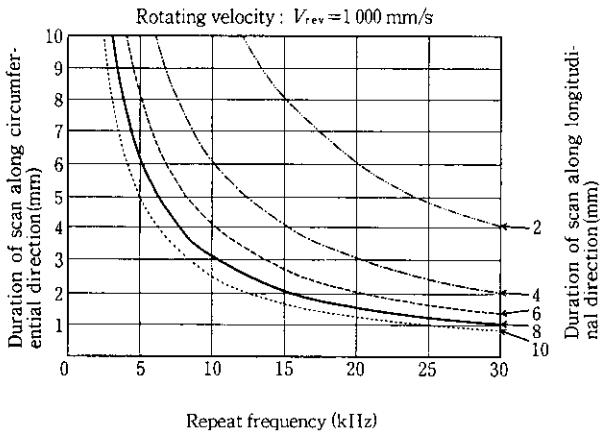


Fig. 10 Relationship between repeat frequency and duration of scan

向の走査間隔をとり、長手方向の走査間隔をパラメータとして表した。長手方向の走査間隔は、リニアアレイ探触子の振動素子幅の整数倍となり、今回開発したリニアアレイ探触子の振動素子幅が2 mmであるため、2, 4, 6, 8 および 10 mm という値となっている。この図から、繰り返し周波数 15 kHz を用いれば、周速 1000 mm/s においても、円周方向 4 mm × 長手方向 4 mm の密な走査が可能であることがわかる。

オンラインへの適用結果の一例を Fig. 11 に示す。13Cr 鋼の外径 139.8 mm × 肉厚 7.72 mm に存在した内面欠陥の検出例である。上段に底面エコーのアナログチャートを、中・下段にエコー高さを基にデータ処理された欠陥部の平面像および断面像を示す。検出された欠陥は外径 20 mm × 深さ 1 mm のへこみ状の内面欠陥であり、アナログチャート、平面像および断面像のいずれにおいても S/N よく検出されている。

6 結 言

知多製造所の小径シームレス管工場⁶⁾へ超音波フェイズドアレイ素子を適用した鋼管内面非破壊検査装置を開発し導入した。既設超音波探傷装置と併設することにより、すべての小径シームレス管のより完全な品質保証が可能となった。特に、先端技術であるフェイズドアレイ素子を鉄鋼の検査ラインへ適用できたことは、今後さらに検討を加えることにより、より完全で、簡素化された非破壊検査装置へ展開できる可能性を持っている。この開発により得られた成

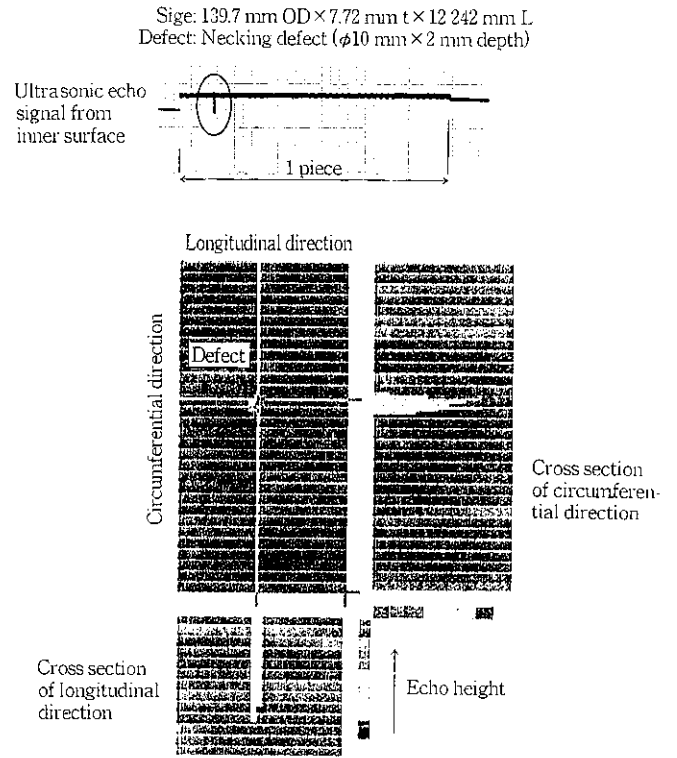


Fig. 11 An example of on-line detection result of necking defect of 13Cr stainless steel pipe

果は下記のとおりである。

- (1) 超音波フェイズドアレイ素子を鉄鋼の生産ラインの非破壊検査装置へ適用し実用化に成功した。
- (2) 鋼管の内面目視検査を効率化できる内面非破壊検査方法および装置を開発した。
- (3) FMS (flexible manufacturing system) に耐えられるサイズ替えフリー技術がフェイズドアレイ素子の配列を考慮することで容易に実現できる。

非破壊検査技術が欠陥の有無を検出する2値化技術から、プロフィール化可能な技術へ展開できることは、鋼材の欠陥を自動的に研磨し手入れする知能ロボットとリンケージをとれる可能性を示唆している。

最後に、この超音波フェイズドアレイ素子の開発に多大な協力をいただいた日立建機株式会社の各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編: 「継目無鋼管の超音波探傷法」, (1988), 163-168
- 2) 佐藤泰章, 菅井一夫, 佐々木莊二, 木野裕敏, 屋岡修一: 日立評論, 64 (1982) 3, 45-50
- 3) 野中寿夫: 日立評論, 68 (1986) 6, 53-58
- 4) 室田昭治, 川島捷宏, 藤懸洋一, 浅沼真二, 堀越清美, 玉木清英, 山岸須美子, 宇田川義夫: 非破壊検査, 38 (1989) 2, 177-178
- 5) 野田鏡二, 高木 淳, 栗田真一, 坂本清詩, 内藤紳司: 日立評論, 68 (1986) 10, 31-34
- 6) 奥村 精, 近藤廣章, 滝下利男, 稲満広志: 「リニアアレイプローブによる鋼管内面 NDI の開発」, 材料とプロセス, 4 (1991), 357