

超音波リニアアレイプローブによる鋼管内面モニタ

Inner Surface Monitor to Tubular Goods by Ultrasonic Linear Array Probe

川崎製鉄(株) 知多製造所 奥村 精*・近藤 廣章

1. 緒言

鋼管は鉄鋼の最終製品の一つであり、出荷された姿でお客さま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品質保証の中核を成す技術として位置付けてきた。しかし、鋼管内面の検査は従来の非破壊検査技術を用いた場合、特定の欠陥の検出が極めて困難であり人間の目視検査に依存していた。これを自動化された検査装置へ置き換えることが必要となり技術開発を行った。検査装置の目的は、鋼管内面の品質保証レベルの向上とサイズ替えの自動化である。これを実現するために、超音波リニアアレイ素子を適用し、従来は検出困難であった欠陥検出性能の向上が可能となった。また水槽の中にリニアアレイ素子を配置することでサイズ替えの自動化を実現した。本報ではリニアアレイ素子による内面欠陥検出原理、鋼管外面から内面の欠陥を高速探傷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. 検出原理の開発

周知の通りオンラインでの非破壊検査技術を大別すると、超音波の反射あるいは透過を利用する方法、直流あるいは交流磁界が欠陥から漏洩する現象を利用する方法、および渦流によるインピーダンス変化を検出する方法がある。これらの探傷技術は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を困難にしている。

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。しかし、Fig.1に示すように管面の緩慢な形状をした欠陥は超音波の反射源として機能しない。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検出が不可能である。また管表面に平行して存在する欠陥の場合、入射した超音波は管表面とこの欠陥の間で多重反射となり減衰していく。それゆえ超音波の反射源として機能しない。電磁気を利用する方法は漏洩磁束、渦流の両方法とも交流の表皮効果ゆえ内面の欠陥検出には不適當である。直流を利用する漏洩磁束法もあるが、厚肉材への適用は困難である。下記に管内面の欠陥を検出するための要件を整理した。

- (1) 鋼管のスキュー送りで全面探傷可能。
- (2) サイズ替えフリー。
- (3) 鋼管外面からの欠陥検出，装置挿入不可。

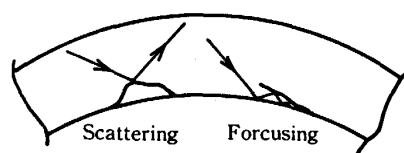


Fig.1 Propagation model of ultrasonic beam

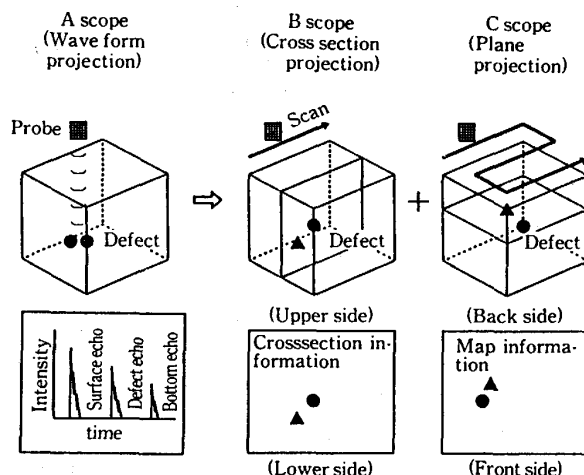


Fig.2 Presentation of ultrasonic scope

鋼管の非破壊検査法に関して検討を加えた結果、鋼管の外面から鋼管の内面の欠陥を検出するには超音波探傷法が実現性があり、その中でも Fig.2 に示すように B スコープと C スコープを併用する方法が最適であるとの結論を得た。しかし、従来技術により B および C スコープを得るには、プローブを機械的に走査することが必要とされるため、高速処理が要求される鋼管製造ラインへの適用は困難である。そこでプローブを静止させた状態で B+C スコープを得る方法を検討した結果、医療分野で利用されている超音波リニアアレイ素子を

Fig.3 に示すような超音波プローブとして用いることが適当であることが判明した。

超音波リニアアレイプローブによる鋼管の内面欠陥検出原理を Fig.3 に示す。鋼管の管軸と平行にリニアアレイプローブを配置する。次に、鋼管の管軸方向にリニアアレイ素子を、その長さ方向に瞬時に電子走査しながら、同時に被検査材である鋼管をリニアアレイプローブの長さの間隔で、スクュー搬送する。その結果、鋼管の内面はリニアアレイプローブの電子走査により展開される B+C スコープ像が得られる。

3. 実用化への試作実験

この技術を鋼管の内面検査へ適用するためには ① 超音波送信出力の増加、② 広帯域の周波数 ③ ビット間の特性バラツキの圧縮 ④ 10KHz 以上の送信繰り返し周波数の達成 等の問題点が上げられた。そこでプロトタイプの超音波リニアアレイプローブとして 64bit (2mm slice × 16mm width) 5KHz を試作し、鋼板に加工した人工欠陥の B スコープ像を静的状態で検出できるか否か調査した。結果の一例を Fig.4 に示す。リニアアレイプローブの電子走査は 8 bit を一群として 1 bit 単位の電子走査で行った。その結果、へゲの状態の人工欠陥 ($\theta = 20^\circ$, 深さ = 2mm) の断面形状、すなわち B スコープ像を得ることに成功した。この事実はリニアアレイプローブを用いることにより鋼管内面の欠陥の検出がプロフィールで可能であることを示している。

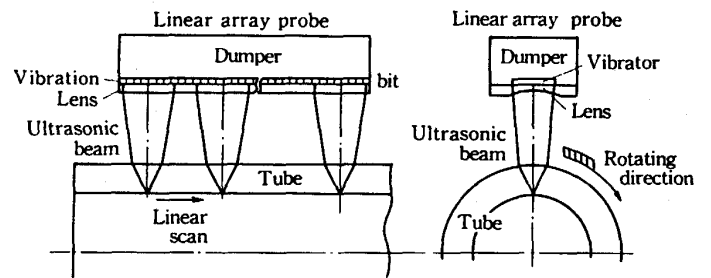


Fig.3 Inspection principle by linear array probe

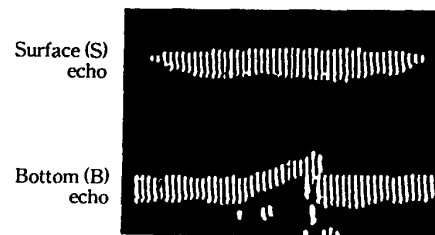
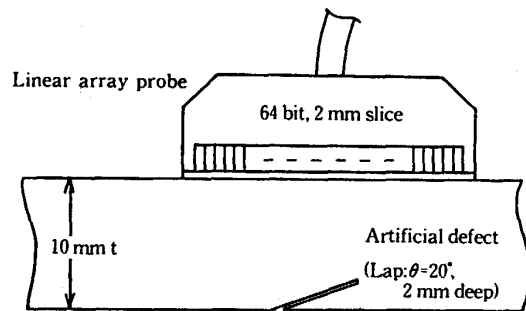


Fig.4 An example of B-scope projection (Scan mode: 8bit group, 1bit shift)

Table 1 Specifications of actual linear array probe

Type	5C2-161J-128ch
Sensor material	Lead titanate
Dimentions	256mm ℓ × 16mm W
Elements	2mm × 128bit
Lens material	Polyether risin
Focal distance	60 mm in water

またこのプローブを検査ラインへ実装する場合、プローブを水槽に挿入し、鋼管を下方へ配置すれば鋼管の外径寸法に関係なく内面を探傷することが可能である。つまり、サイズ替えフリーのオンライン検査装置の構築が可能である。これらの実験結果をベースにオンライン用のリニアアレイプローブの詳細仕様を検討した。その結果を Table 1 に示す。このプローブの素子間の感度差は最大 1.5 db, 位相差は最大 20 ns であり、bit間の特性の差はほとんどないことが判っている。

同時に励振する素子 8 bit に遅延時間を与えフェイズドアレイ方式とした場合の超音波ビームプロファイルの特性を実測した。結果の一例を Fig.5 に示す。遅延時間の与え方で任意のビームプロファイルを得ることができる。

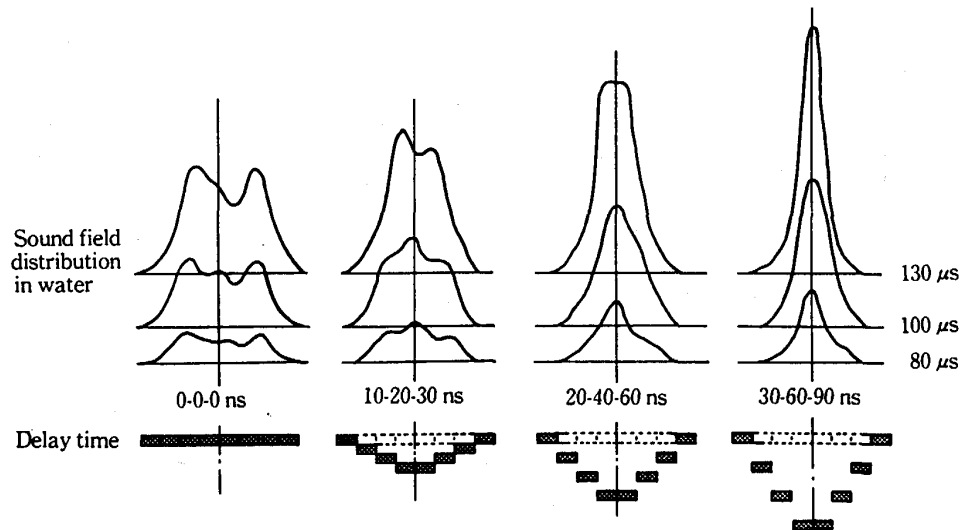


Fig.5 Ultrasonic sound field distribution by phased array method

4. オンライン装置の概要

リニアアレイプローブを用いた鋼管内面モニターにおける被検査材の仕様を Table 2

Table 2 Conditions of monitoring

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

Table 3 Specifications of online inner surface monitor

Frequency of sensor	5 MHz
Channels of senser	128 channels
Repeat frequency	18 KHz max.
Amplifier gain	More than 30 db
Driven element	Each 8 elements
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

に、また内面モニター本体の仕様を Table 3 に示す。被検査材には管端部を増肉したアップセット管も含まれており、広範囲の鋼管寸法を許容するように配慮した。内面モニター本体はリニアアレイプローブに対応して 128chの超音波の送信、受信装置を持っている。また高速で電子走を実現するために最大 18 KHz の繰り返し周波数が得られるように設計した。Fig.6 に超音波発信の繰り返し周波数と管円周方向の検査可能間隔の関係を、電子走査間隔をパラメータとして示す。リニアアレイ素子の幅は 2 mm ゆえ、走査間隔は 2 mm の偶数倍となっている。データ処理装置としては汎用のパソコンを用いており B+

C スコープ像の画像化を行っている。Fig.7 に鋼管内面モニターを検査ラインへ実装した概念図を示す。水槽の中にリニアアレイプローブを配置し、水槽を 240 mm/rev でスクュー搬送されて来る鋼管に、下方より追従させる方法を採用している。この方法により全面検査およびサイズ替えフリーを実現した。

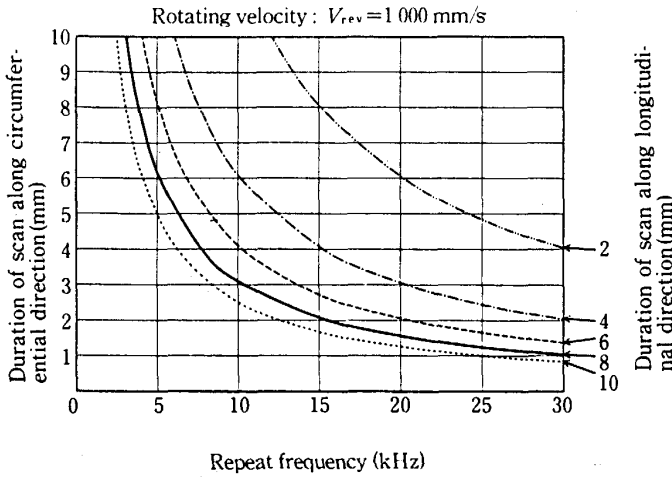


Fig.6 Relationship between repeat frequency and duration of scan

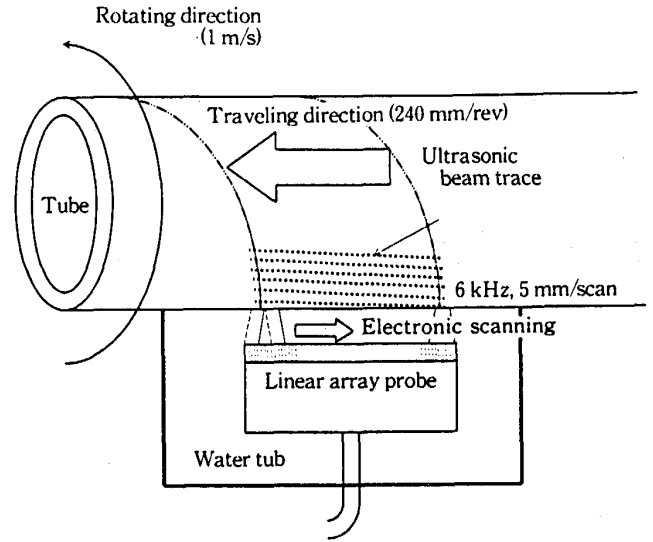


Fig.7 Schematic structure of online apparatus

5. オンライン結果

オンラインで鋼管内面をモニターリングした結果 Fig.8 に示す。13%Cr鋼で外径 139.7mm, 肉厚 7.72 mm の鋼管内面に存在したピット状の欠陥を検出した例である。図の上段に内面からの超音波エコーのアナログチャートを、下段に画像化した欠陥の平面図および断面図を示す。検出された欠陥は外径約 20 mm, 深さ約 2 mm のへこみ状の内面欠陥であった。

6. 結論

知多製造所の小径シームレス管向上へ超音波リニアアレイ素子を適用した鋼管内面モニターを開発し導入した。既存の超音波探傷装置と併用することにより、より完全な品質保証が可能となった。今後は非破壊検査技術へ画像化の技術を移植し、2値化の世界からプロフィール化が可能な技術へと展開し、より信頼性の高い探傷を指向して行く予定である。

Size: 139.7 mm OD × 7.72 mm t × 12 242 mm L
Defect: Necking defect ($\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ depth)

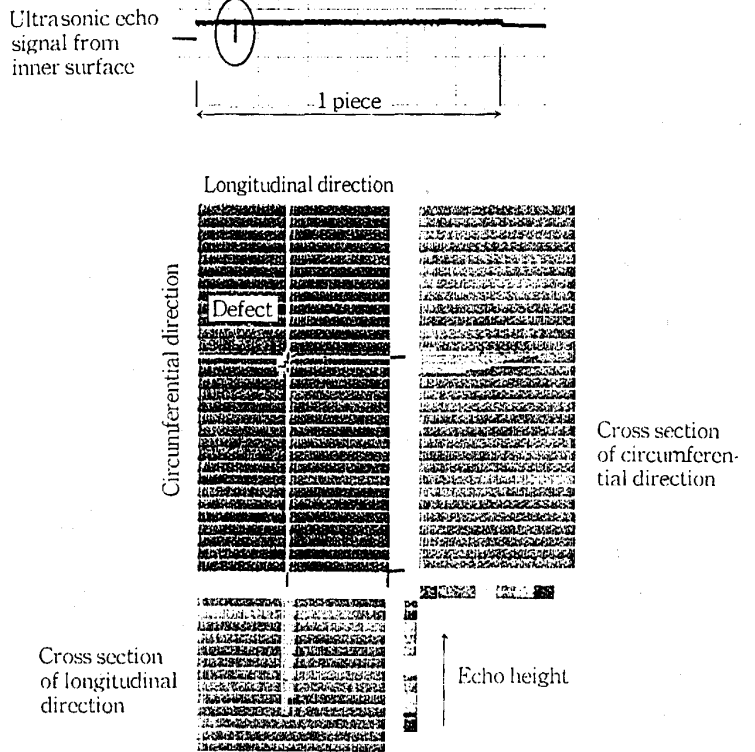


Fig.8 An example of detection result on necking defect of 13%Cr steel tube