

フェイズドアレイ方式超音波探傷システムの開発

Development of the Phased Array System for Angle Beam Testing

山田 裕久^{*(1)}
Hirohisa YAMADA

矢野 嘉孝^{*(2)}
Yoshitaka YANO

宇田川 建志^{*(3)}
Tateshi UDAGAWA

抄 録

溶接部の品質保証をする手段として、超音波斜角探傷法が広く適用されており、これを自動化することで検査の再現性や記録性を高めようとする取り組みが進んでいる。斜角探傷に適した階段状アレイプローブを用いた256チャンネルフェイズドアレイ探傷システムを開発した。本システムはフェイズドアレイ方式の高速性と柔軟性を有するのみでなく、きず高さを定量的に評価可能なTOFD法も同時に実行し、フェイズドアレイ方式による斜角探傷法と縦波斜角プローブによるTOFD法の2つの探傷結果を複合的に解析可能である特徴を有する。

Abstract

The angle beam technique is commonly applied to assure the quality of the welds. Usually this technique is manually performed, but recently the automatic ultrasonic testing instruments has been developed to decrease the inspection time and to increase the reliability. For this purpose, we have developed an array probes with a step shaped wedge. Our system can execute not only the angle beam technique but also the TOFD technique.

1. 緒 言

溶接部の品質保証をする手段として、超音波斜角探傷法が広く適用されている。従来マニュアルで行われてきた斜角探傷を自動化することで検査の再現性や記録性を高めようとする取り組みが進んでいる。超音波自動探傷装置としてはマルチプローブ方式の装置が主に開発されてきた¹⁾が、近年、フェイズドアレイ方式の装置が開発され、検査の高速化と高精度化を達成する試みがなされている²⁻⁶⁾。

フェイズドアレイ方式自動超音波探傷装置は、従来の機械的なプローブ走査をリニアスキャンと呼ばれる電子的な走査で置き換えることが可能であるため、検査時間を大幅に短縮可能である。また、セクタスキャンにより超音波進行方向を自在に制御可能であり、柔軟で高精度な探傷が可能である。しかし、本方式は主として医療目的に開発されており、工業分野ではまだ普及しているとはいえない。

著者らは斜角探傷に適した階段状アレイプローブを用いた256チャンネルのフェイズドアレイ探傷器を試作した。本システムはフェイズドアレイ方式の高速性と柔軟性を有するとともに、きず高さを定量的に評価可能なTOFD (Time Of Flight Diffraction) 法も同時に実行可能であり、フェイズドアレイ方式による斜角探傷法とTOFD法の結果を複合的に解析するシステムである。

2. フェイズドアレイ超音波探傷システム

2.1 アレイプローブ

斜角探傷用のアレイプローブの形状は通常の斜角プローブの延長線上で、図1に示すようなりニアアレイ型にくさびを装着したタイプが試作されている⁴⁾。このタイプでは前後走査方向を電子走査できるため高速化に向いている。また、超音波入射角度を可変にできること、および超音波ビームを板厚方向で集束できるメリットがある。しかし、一番左側と一番右側ではくさびの長さが異なるため感度差が生じ、受信波の合成にあたっては減衰補正が必要となる。

著者らは図2に示すようにくさびの形状を階段状としたアレイプローブを開発した⁶⁾。本方式では各振動子から入射点までのくさび内距離を一定にできるため、減衰補正の必要はなく、さらに、チャンネル数を大きくすることも可能である。本方式のアレイプローブ

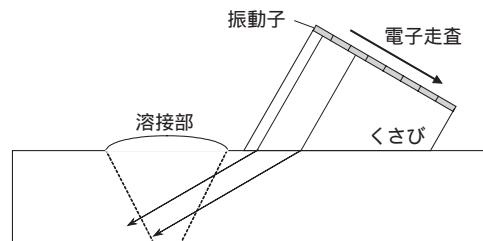


図1 一般的な斜角探傷用アレイプローブの形状

*⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2828

*⁽²⁾ エンジニアリング事業本部 相模原技術開発部 グループリーダー

*⁽³⁾ ㈱日鐵テクノリサーチ 技術主幹

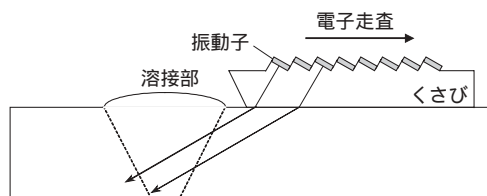


図2 階段状アレイプローブの形状

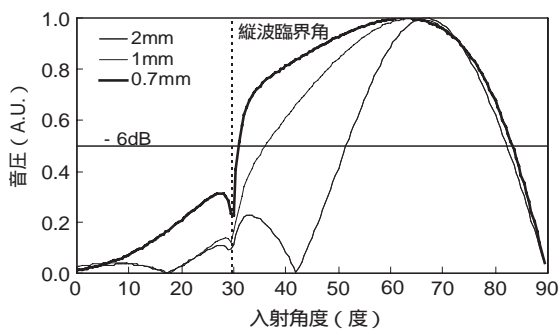


図3 振動子サイズによる音場の変化

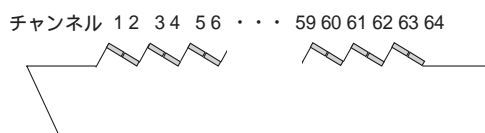


図4 2連式階段状アレイプローブ



図5 試作アレイプローブ

開発に際しては、その特徴である超音波ビーム入射角度の可変範囲を大きくするために個々の振動子から送信される超音波ビームが十分な広がりを持つことが必要とされる。振動子サイズを決定するために、電子走査方向の振動子幅を変化させたときの超音波ビームの音場を計算した結果を図3に示す。図中で30度付近の前後で音場が異なるのは、縦波臨界角の前後で横波音場も影響を受けるためである。振動子幅を0.7mm程度とすると音場が十分に広がっており、縦波臨界角付近までの音圧低下を6dB以内に押さえることが可能であることがわかった。

電子走査方向の振動子幅を0.7mm、これと垂直方向の振動子幅を

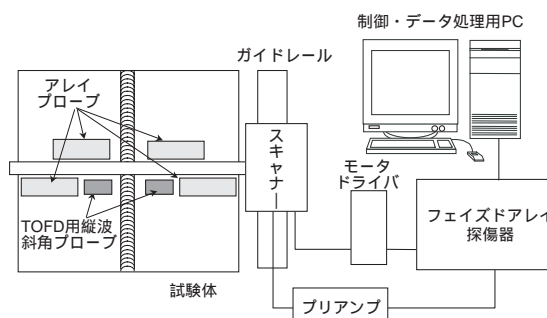


図6 システム構成

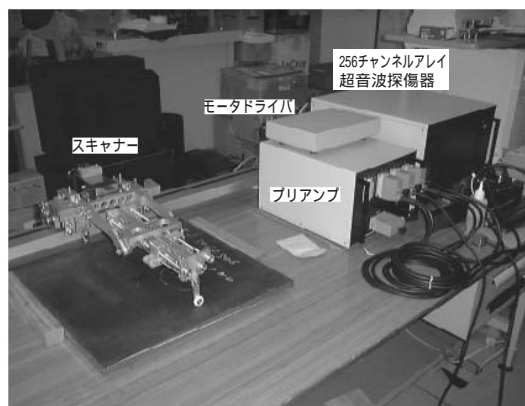


図7 開発システムの外観

表1 フェイズドアレイ探傷器の主要仕様

送受信部	
チャンネル数	256
同時駆動チャンネル数	16
遅延時間	0 ~ 22 μs
遅延時間可変単位	5ns
パルス印可電圧	50 ~ 400V
パルス立上り時間	10ns
最大利得	80dB
周波数特性	3 ~ 7MHz
A/Dコンバーター部	
周波数	100MHz
分解能	16ビット

通常用いられる斜角プローブと同じ10mmとした場合、階段状アレイプローブを製作するためには0.7×10mmという細い振動子をチャンネル数だけ階段状のくさびに接着しなければならず、製造ばらつきのために各振動子間の感度差を押さえることが困難となる。そこで、図4に示すように階段状くさびの各段に2つずつ振動子を設ける構造のアレイプローブを開発した。試作したアレイプローブの振動子寸法は0.7×10mm、設計角度62度、周波数5MHzであり、振動子数は64チャンネルである。試作アレイプローブを図5に示す。

2.2 フェイズドアレイ方式探傷システム

開発したフェイズドアレイ方式探傷システムの構成図を図6に、外観を図7に示す。本装置は256チャンネルの送受信部を持ち、電子スキャン条件の設定、探傷時の走査コントロールなどは全てパーソナルコンピュータにて行う。探傷器本体とプリアンプ部は30m程

度のケーブルで接続されており、現場溶接部での検査を考慮した設計となっている。また、アレイプローブのほかに1対の斜角プローブを装着可能となっている。図6の構成はTOFD用縦波斜角プローブを装着することにより、アレイプローブによるパルスエコー法と縦波斜角プローブによるTOFD法の複合探傷が可能なシステム構成である。フェイズドアレイ探傷器の仕様を表1に示す。

3. 位相制御手法

フェイズドアレイ方式超音波探傷システムでは、各素子に印加するパルスに遅延時間を設けることにより、合成された波面の偏向方向や収束などを制御する。これを位相制御というが、効果的な位相制御を行うためには遅延時間の計算方法が重要である。ここでは階段状アレイプローブの遅延時間計算方法について説明する。

検査対象中に発生させようとする超音波ビームの入射角度を α 、収束深さをDとする。また、同時に駆動する素子数を $2N$ 、くさび材の音速を C_1 、検査対象の音速を C_2 とする。図8に示すように、同時に駆動する素子群の中心から、くさび内入射角度 θ で引いた線が検査対象との境界面にぶつかる点を原点としてX軸とY軸を定める。くさび内入射角度 θ は入射角度 α からスネルの法則を用いて、

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{C_1}{C_2} \sin \theta\right) \quad (1)$$

により求まる。境界面からの振動子中心の高さをh、X方向のピッチをpとすれば、振動子中心の座標 x_i, y_i は、

$$\begin{aligned} x_i &= h \sin \alpha - (i - N)p \\ y_i &= h \end{aligned} \quad (2)$$

である。

位相遅延時間を計算するには、収束点から各振動子までのビーム経路を計算する。この様子を図9に示す。簡単のために、振動子の中心から超音波ビームが1本の直線として進行すると考えると、ビームが境界面と交差する点のX座標を X_i とすれば、スネルの法則が成り立ち、

$$\frac{\sin \alpha_i}{C_1} = \frac{\sin \theta_i}{C_2} \quad (3)$$

である。これと、幾何学的な条件、

$$\begin{aligned} \tan \alpha_i &= \frac{x_i - X_i}{h} \\ \tan \theta_i &= \frac{x_i + D \tan \alpha}{D} \end{aligned} \quad (4)$$

とから、 X_i の値を計算することができる。

以上により、くさび内と検査対象内でのビーム路程は、

$$\begin{cases} r_{1i} = \sqrt{(x_i - X_i)^2 + h^2} \\ r_{2i} = \sqrt{(x_i - D \tan \alpha)^2 + D^2} \end{cases} \quad (5)$$

であるから、収束点から各振動子までのビーム到達時間 t_i は、

$$t_i = \frac{r_{1i}}{C_1} + \frac{r_{2i}}{C_2} \quad (6)$$

により求めることができる。実際の各素子の遅延時間は t_i のうち最大のものととの差により与えられる。

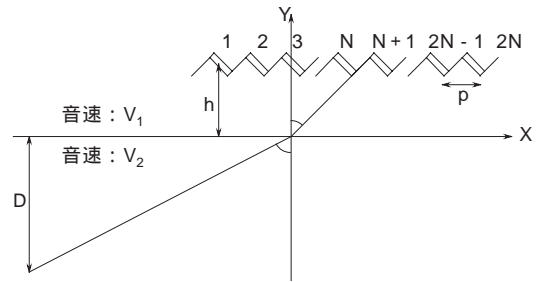


図8 振動子の幾何学的配置

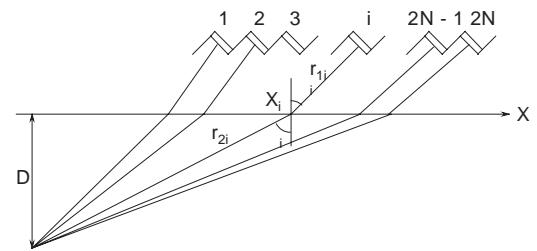


図9 位相遅延時間計算方法

4. 実験結果

4.1 試作アレイプローブの音場評価

横波電磁超音波セッチャー(EMAT)をSTB-A1試験片の100R面に沿って移動できる治具を作製し、図10に示すような構成でアレイプローブより送信された超音波ビームの指向性を測定した。

試作したアレイプローブを用いて、位相制御による入射角度を60度と65度に設定したときの測定結果と、数値計算により求めた音場を同時にプロットした結果が図11である⁷⁾。位相制御により発生された超音波ビームの指向角はほぼ設定どおりであり、3章で述べた位相制御手法の妥当性を確認することができた。また、実際に測定された音場は数値計算結果とよく一致している。

4.2 平板試験体探傷結果

板厚19mmの鋼材に60度のV開先をとり溶接した試験体に、余盛中央部に径2.4mmと3.2mmの縦穴を加工し、裏側余盛部のサイドにスリットを作成した。スリットの深さは0.5~1.5mm、長さは10mmである。探傷は64素子のアレイプローブ1つを用いて行い、このうち16素子を同時に駆動し、探傷角度が60度になるような位相制御を送受信時に行った。したがって、一回の電子走査では49回の探傷を溶接線と垂直方向に実行する。

探傷結果は図12に示すような画像として表示され、深さ0.5mmのスリットが検出されていることがわかる。また、溶接部の斜角探傷では欠陥からのエコー以外にも、裏側余盛からの形状エコー(裏波

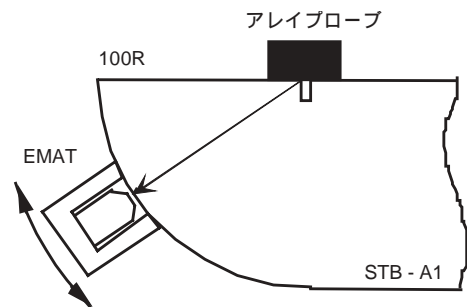


図10 EMATによる指向性測定法

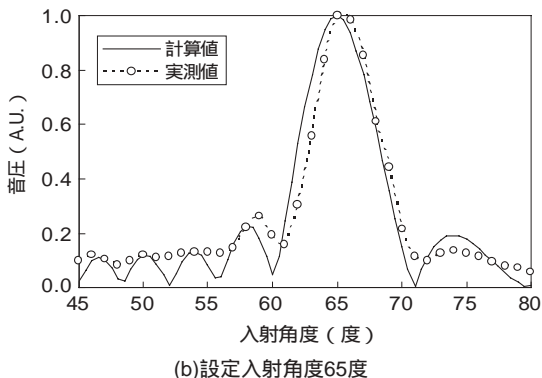
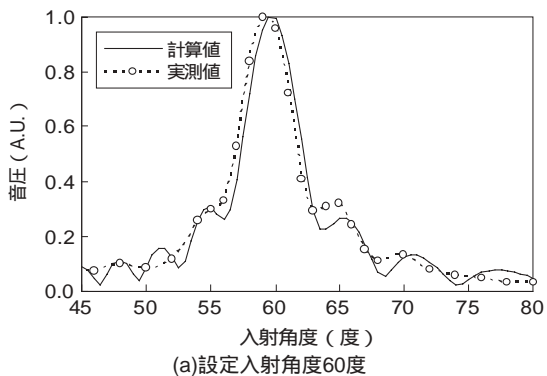


図11 EMAT測定結果と計算値の比較

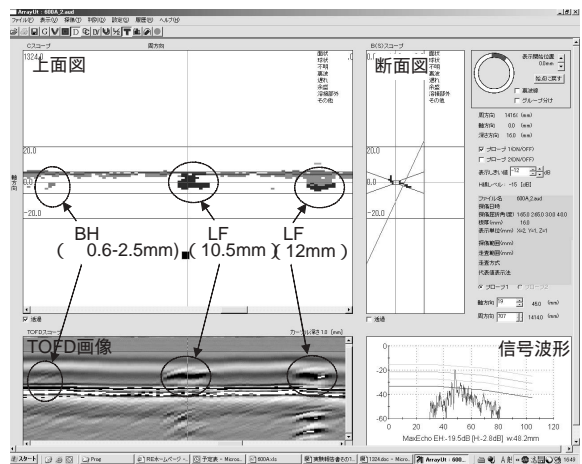


図14 鋼管溶接部探傷結果(一部)

エコー)や、モード変換エコーが検出されるが、開発システムではこれを半自動で識別した上で、きず種毎に色分けして表示することが可能である。

4.3 鋼管溶接部探傷結果

X-65鋼管(口径600mm, 板厚16mm)円周溶接部の探傷を行った。試験体にはいくつかの溶接欠陥(ブローホール, 融合不良, 溶け込み不良)を製作した。探傷の様子を図13に、探傷結果の一部を図14に示す。図14では側面図の代わりにTOFD画像を表示しているが、ブローホールや融合不良欠陥がパルスエコー法とTOFD法の双方で検出されていることがわかる。両者を統合した検査を実行することでパルスエコー法による従来検査への適合性と、TOFD法による定量性を実現することが可能である。

5. 結 言

階段状アレイプローブを用いたフェイズドアレイ方式探傷システムを紹介した。本方式は電子走査により高速に探傷可能であるのみでなく、超音波の入射角度が可変であるという特徴を有するため、音響異方性を有する材料のように探傷角度が設計角度と異なるような場合にも柔軟に対応可能である。また、開発システムは、フェイズドアレイ方式による斜角探傷と、別に装着した縦波斜角プローブによるTOFD法を同時に実行することで従来検査との整合性を保ちながら、優れたきず高さ測定精度を有するシステムである。

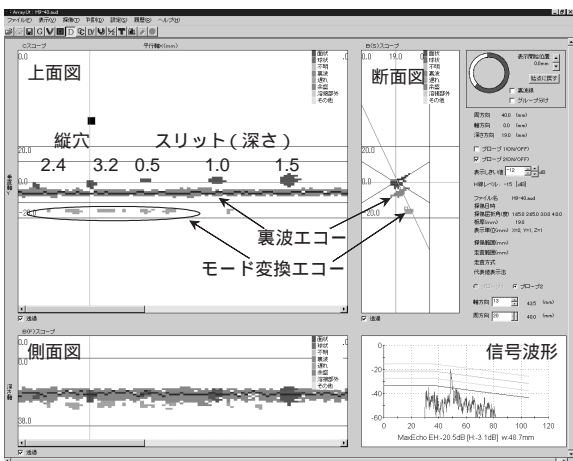


図12 平板試験体探傷結果

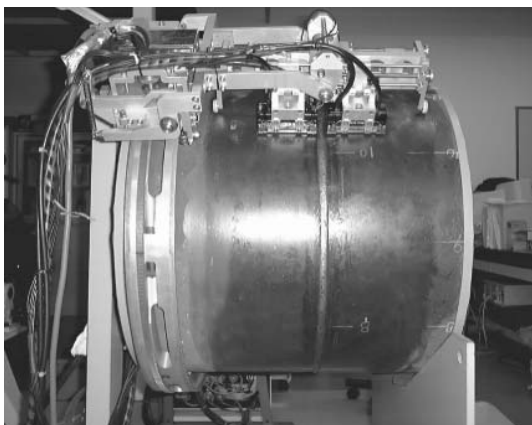


図13 鋼管探傷の様子

参考文献

- 1) Yamada, H. et al.: Nondestructive Characterization of Materials . 1996 p.799
- 2) 増田, 伊藤: 日本非破壊検査協会平成6年度秋季講演大会概要集. 1994 p.67
- 3) 増田, 伊藤: 日本非破壊検査協会平成7年度秋季講演大会概要集. 1995 p.385
- 4) 萩原 坂, 飯塚, 天野: 非破壊検査. 47(1), 45 (1998)
- 5) 星野 坂, 山口, 村山, 宮崎, 中嶋: 非破壊検査. 47(1), 34 (1998)
- 6) 山田, 宇田川: 日本非破壊検査協会平成8年度春季講演大会概要集. 1996, p.233
- 7) 福原: 非破壊検査. 29(10), 875 (1980)