

フェーズドアレイ法による異材継手の欠陥検出技術

芝田 三郎 *

Saburoou Shibata

近年、新しい検査方法としてフェーズドアレイ探傷法（Ultrasonic Phased Array）の実機への適用が注目されてきている。これは、リアルタイムで欠陥を画像化できることと任意の方向へビームを伝搬させ、且つ任意の深さに焦点を結ぶことで測定精度の向上が見込めるためであり、またコンピュータ技術などの著しい進歩で装置やプローブが小型化し、現場での適用が極めて簡便になってきたことによるところが大きい。当社でも、従来から本技術に着目し検討を進めており、原子力プラントでは SCC の検出と高さ測定等の実機に適用しその有効性を明らかにしてきている。本報告では、フェーズドアレイ探傷法の適用拡大の一つとして、異材継手への適用検討について述べる。

キーワード：超音波探傷法、異種金属溶接、柱状晶、音響異方性、フェーズドアレイ法、アレイプローブ、セクタスキャン

1. はじめに

沸騰水型原子炉圧力容器のノズル部は、低合金鋼の管台と SUS 配管との異材継手になっているものがある。

低合金鋼のノズル開先面及びノズル内面には予め SUS 系でバタリングされ、後に SUS 配管とオーステナイト系溶接金属で突合せ溶接される。オーステナイト系溶接金属には音速異方性^{1)~4)}があるために、超音波の直進性が損なわれ、かつ溶接部の組織が粗いために減衰も生じやすい。特にこの異材継手においては母材（低合金鋼）／バタリング部、バタリング部／突合せ溶接金属部や突合せ溶接金属／母材（SUS）の界面が複雑に入り混じっており、界面で超音波は屈折、反射や散乱な

どの複雑な現象を起す。

現在は、垂直法と斜角法を組合せた探傷法が慎重に適用されているが、この複雑な現象を探傷波形（A スコープ）より目視で判断する必要があるために、検査には高度な技量と経験を必要としている。このために、更なる検査精度の向上とともに、客観性のある探傷手法が強く望まれてきている。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼突合せ溶接部に発生する応力腐食割れ（SCC）の超音波探傷試験において、フェーズドアレイ探傷法が検査精度向上にも優れていることが確認されている。本報告では、このフェーズドアレイ探傷法を異材継手に用いたときの探傷結果を従来のパルス反射法と比較して報告する。

* 元検査事業部 技術部 NDE 技術グループ 課長（現 株式会社アデルコ）

2. 試験方法

2.1 試験体

試験に供した試験体の形状を図1に示す。炭素鋼の開先面および裏面に肉盛溶接（初層：WEL309、残層：WEL308）した肉盛材とステンレス鋼（SUS304）とを開先角度30度のV開先部で突合せ溶接（溶材：WEL309）した平板試験体（500L×250W×30t）に、溶接線方向へ平行に長さ10mmのノッチ（開口幅0.5mm）を裏面側に施した試験体を試験に供した。ノッチは、溶接線中心線よりSUS配管側に8mm離れて開口部がSUS配管に位置するAノッチ、溶接線中心から炭素鋼配管側に10mm離れて開口部が配管開先面上のバタリング部に位置するBノッチ及び溶接中心線より30mm炭素鋼配管側に離れて開口部が配管内面側バタリング部に位置するCノッチの3

種類とした。3種類の各ノッチに対してノッチ深さが1, 3, 5, 10, 20mmの5種類の一連のノッチを作製した。

なお、肉盛厚さは、開先面上で10～13mm、配管内面側で5～7mmとなるように溶接し、その後機械加工している。

2.2 超音波探傷試験方法

2.2.1 パルス式超音波反射法

従来の探傷手法として、周波数2.25MHz、屈折角45度、交軸深さは35mmとした広帯域形の二分割形縦波斜角探触子（Harisonic社製）を用いた。縦波斜角探触子を用いたのは、オーステナイト系溶接部の柱状晶の向きに対する音速の変化率が横波に比べて相当小さく、音速異方性の影響を軽減できることが知られているためである。広帯域形の二分割型探触子としたのはノイズを低減し、

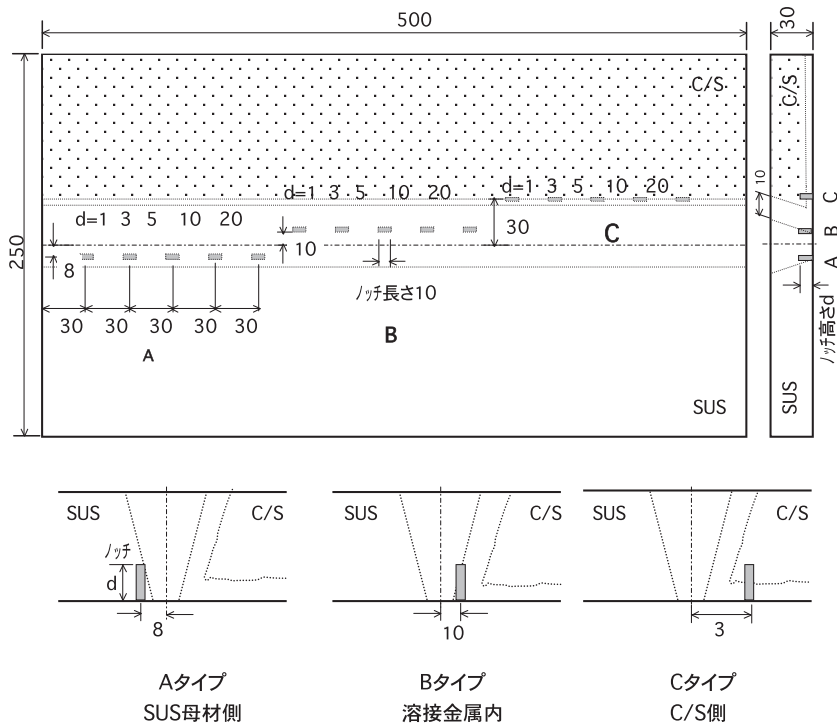


図1 試験に用いた試験体の形状

SN比の向上を計ることを目的としている。超音波探傷装置には、IR社製のScanMasterを用いている。

なお、走査方法は、方形走査により、手動にて探傷を行っている。対比きずには母材に加工したφ3.2横穴を用いており、これの距離振幅特性曲線を基準としている。

2.2.2 フェーズドアレー探傷法

フェーズドアレー探傷装置にはR/D Tech社のμ-Tomo Scan Focusを用い、探触子には5MHzで32チャンネルのリニアフェーズドアレー探触子（外形寸法：72×8×45）を用いている。装置の外観を図2に示す。



図2 フェーズドアレー探傷装置の外観

フェーズドアレー探傷とは、微小な素子を多数隣接して配置して各素子を励起させるタイミングをコンピュータで制御したもので、一定の数の素子を同時励起させ、後に励起する素子を一つ毎にずらして行うリニアスキャン、各素子の励起させるタイミングをずらすことで超音波の送信方向を順次変化させるセクタスキャン、同じく励起させるタイミングを調整することで任意の深さに集束

させるダイナミックフォーカシング及びこれらを複合して行う探傷方法など種々の使用方法がある。本試験においては、屈折角65度のくさびにフェーズドアレー探触子を設置し、フェーズドアレー探触子をセクタスキャンさせ、屈折角で0度～70度の範囲でのセクタスキャンを用いている。また、同時に裏面近傍に集束させるダイナミックフォーカシングを併せて使用した。

ノッチの検出の目的に対しては、溶接中心線より20mmの位置に探触子の入射点（垂直探傷における入射点）を一致させ、平行走査を行って画像化を行った。一方、きずの高さ測定の目的では、さらに前後走査に相当するリニアスキャンを併用して、得られた断面画像を重ね合わせて評価した。

3. 探傷結果及び考察

3.1 ノッチの検出性

パルス反射法とフェーズドアレー探傷でのノッチの検出性の比較を表1に示す。ノッチの開口部におけるコーナー反射によるきずの検出性とノッチの端部における端部エコーの検出性を区分して示している。なお、パルス反射法での検出性はエコー高さで表し、一方フェーズドアレー探傷では、得られた探傷図形よりSN比を読み取って表示している。

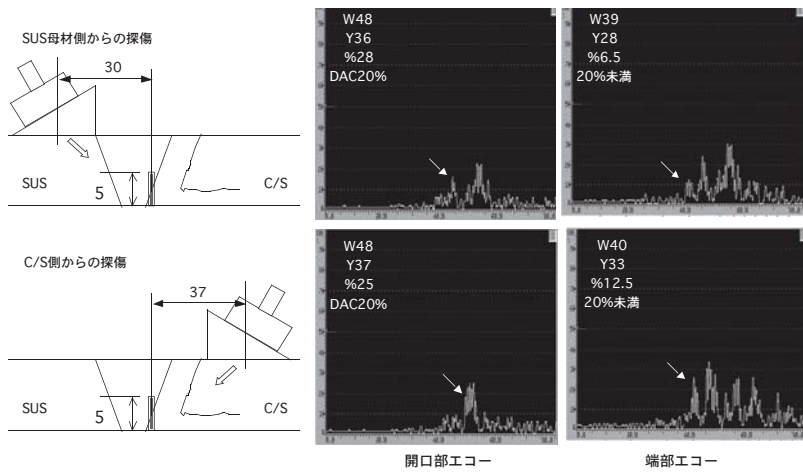
パルス反射法では、20% DACを検出レベルとしてきずを評価することも多い。20%未満のものを検出困難として網掛けしている。一方、フェーズドアレー探傷ではSN比が3dB未満のものを検出困難として網掛けしている。両者の検出性は概して同等か、あるいはフェーズドアレー探傷がやや優れていると考えられる。

図3は、深さ5mmの炭素鋼配管開先面バタリング部及び炭素鋼配管内面バタリング部に位置するBノッチ及びCノッチの探傷波形を示している。特に溶接金属内に存在するBノッチのエコー

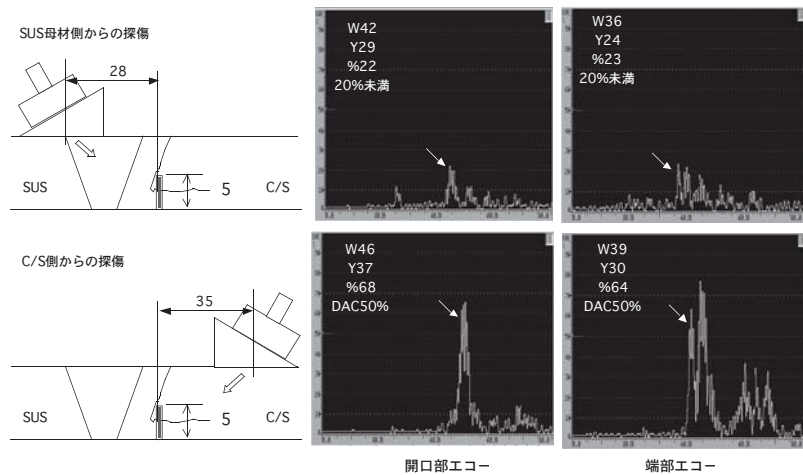
表1 異材継手におけるパルス反射法とフェーズドアレイ法の検出性評価結果

探傷方法&手法 ノッチ部位&高さ(mm)		SUS側探傷				C/S側探傷			
		パルス反射法(DAC%)		フェーズドアレイ法(SN比)		パルス反射法(DAC%)		フェーズドアレイ法(SN比)	
		開口部エコー	端部エコー	開口部エコー	端部エコー	開口部エコー	端部エコー	開口部エコー	端部エコー
SUS母材側 (A)	1	50DAC	50DAC	20dB	16dB	検出不可	検出不可	検出不可	検出不可
	3	50	20	20	17	検出不可	検出不可	2	7
	5	50	20	20	20	検出不可	20%未滿	0	7
	10	50	20	20	20	検出不可	20	0	7
	20	50	50	20	16	検出不可	20	2	9
溶接金属内 (B)	1	20%未滿	検出不可	検出不可	検出不可	20%未滿	検出不可	2	検出不可
	3	20%未滿	検出不可	検出不可	検出不可	50	20%未滿	8	4.5
	5	20	20%未滿	1	1	20	20%未滿	8	5
	10	20	20	3	10	20	20	8	5.5
	20	20	50	6	17	20	20	6	5
C/S側 (C)	1	20%未滿	検出不可	1.5	2	50	20%未滿	20	6
	3	20%未滿	20%未滿	5	3.5	50	20	20	20
	5	20%未滿	20%未滿	2	1.5	50	20	20	20
	10	20%未滿	20	3.5	3.5	100	20	20	20
	20	20	50	1.5	7	100	20	20	20

網掛け部 パルス反射法: DAC20%未滿のもの
フェーズドアレイ法: SN比が3dB未滿のもの



(a) B ノッチ (5mm 深さ) 探傷波形



(b) C ノッチ (5mm 深さ) 探傷波形

図3 パルス反射法での探傷結果の例

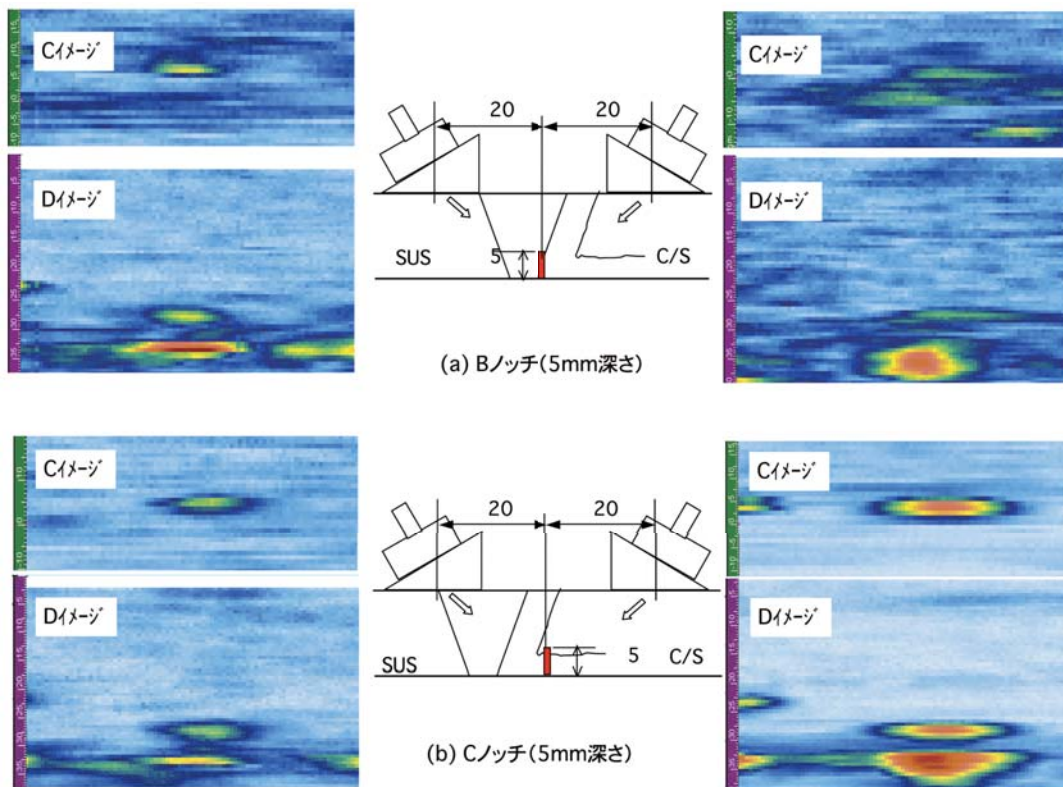


図4 フェーズドアレー探傷法での探傷結果の例

高さは低く、健全部での発生するノイズとの識別に、十分な知識と探傷技量が必要であるといえる。図4には、同じく深さ5mmのBノッチ、Cノッチのフェーズとアレー探傷結果を示している。探傷図形よりきずを識別する分、より客観的な判断が可能であるといえる。

パルス反射法での探傷では、方形走査により広い範囲を探傷しているのに対し、今回のフェーズドアレー探傷では平行走査の直線走査のみできずを検出している。このようにセクタスキャンを用いることで、探傷を迅速に行え、かつ検出性も方形走査を行ったパルス反射法と同等の検出性が確保されていることがわかる。

3.2 きず高さ測定精度

図5に、セクタスキャンに前後走査を組合せて

画像化したときのBスコープ(断面画像)を示す。最下段にはきずのない健全部での探傷画像も示し比較している。ノッチが深くなるにつれてノッチ先端部の端部エコー位置あるいは欠陥面の像が上部(探傷面側)に伸びてくる様子がよくわかる。

健全部においても裏面にいくつかの指示が得られているのがわかる。母材と溶接部で音速が異なり、またバタリング部と突合せ溶接の界面においても音速異方性のある柱状晶の成長の向きが異なるために、超音波の進行方向における音速が異なる。したがって、音速と密度の積で求められる音響インピーダンスも異なることによって界面で反射が生じ、特にコーナー反射となる裏面で指示を示す結果になると考えられる。

今回の探傷では、裏面近傍で集束させるダイナミックフォーカシング機能を用いているため

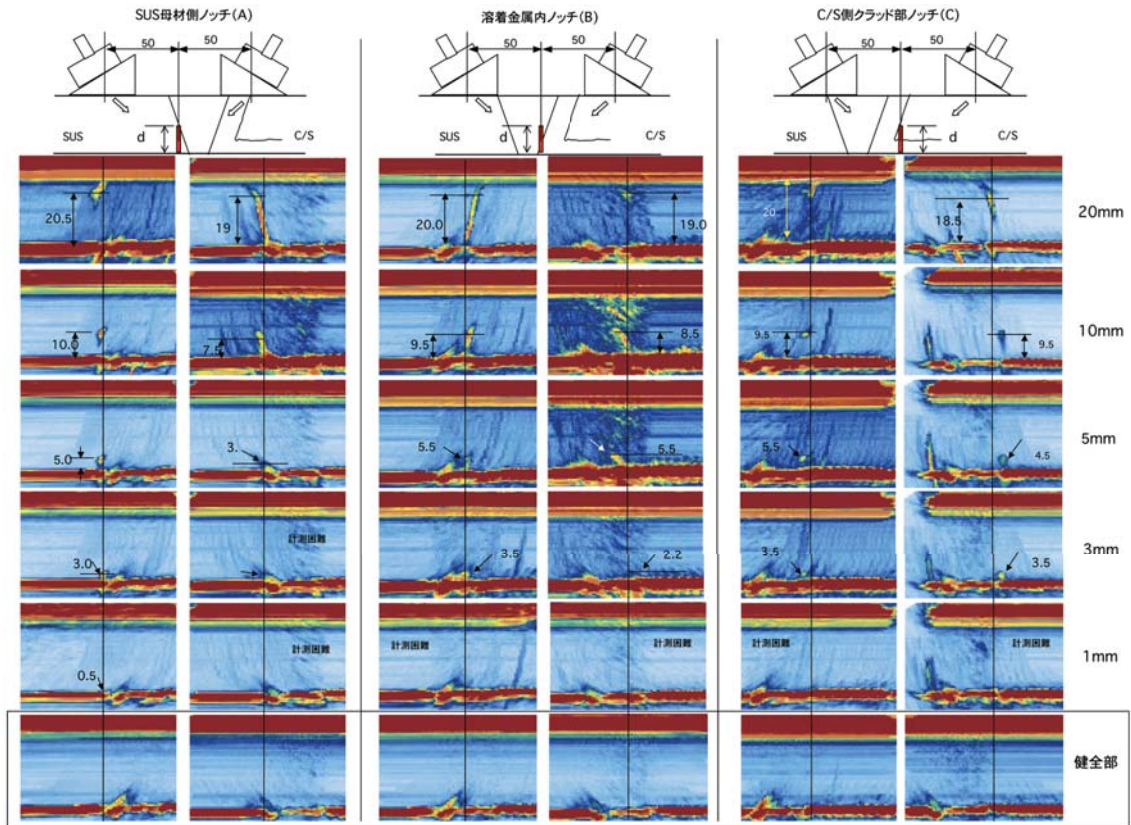


図5 セクタスキャンに前後走査を加えたきず高さ測定結果

に、このノイズの指示を小さくできたことがきずの検出や高さ測定をより容易にしている一つの要因と考えられる。

図6にパルス反射法とフェーズドアレー探傷法を比較して、きず高さ測定精度を比較している。これらの結果に特に際立った差異があるとはいえないが、図5に示すように、前後走査をも加味したフェーズドアレー探傷では、きずの断面像を明確に表示できるので、より客観性に優れた信頼性の高い結果が得られると考えられる。

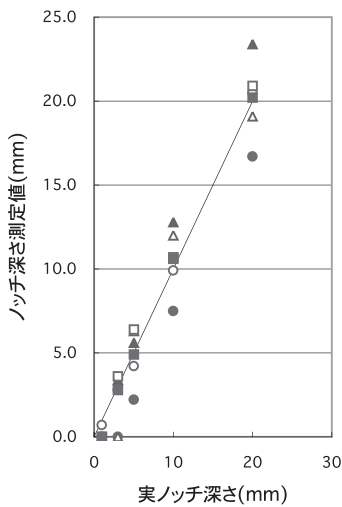
3.3 その他

きず高さ測定における誤差の要因に、音速異方性を有する溶接金属部での超音波のビームの湾曲をあげることができる。このことは、きずの端部

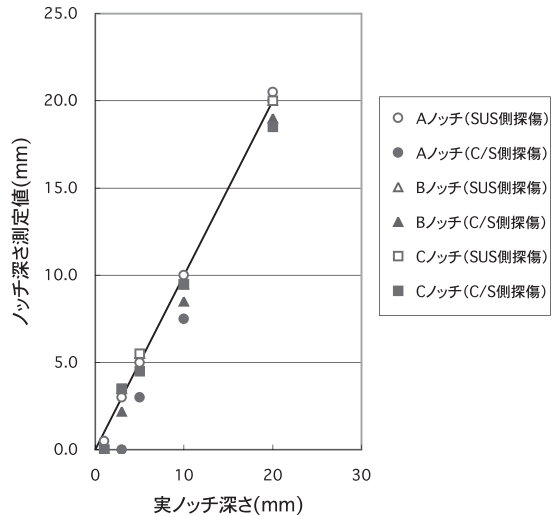
位置の溶接線直交方向の測定精度にも影響を及ぼす。図7に、溶接線直交方向におけるきずの端部位置の測定誤差をパルス反射法とフェーズドアレー探傷法で比較して示す。両者の誤差の程度はほぼ同等であるが、きずの深さ測定誤差以上に溶接線直交方向の位置のずれが大きいといえる。

4. まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部は音速異方性を持ち、超音波の直進性が損なわれるほか、組織が粗く減衰が大きいことなどより低合金鋼や炭素鋼の溶接部に比べてはるかに超音波探傷試験が困難になる。著者らは従来からこの問題を定量的に検討し、柱状晶の向きに対する音速変化率が横波に比べてはるかに小さな縦波を用い、かつ

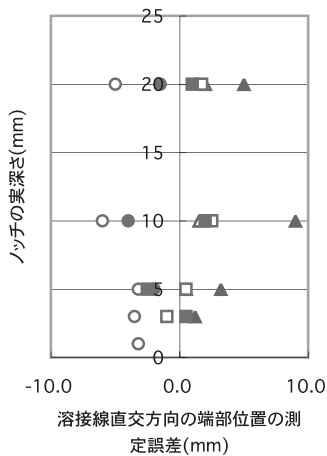


(a) パルス反射法

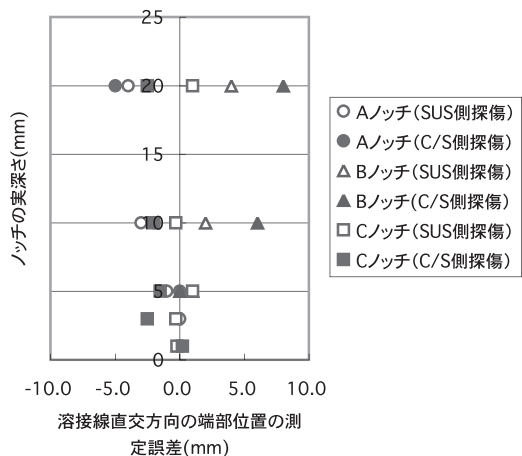


(b) フェーズアレイ探傷法

図6 きず高さ測定精度の比較



(a) パルス反射法



SUS側へのずれを-, C/S側へのずれを+で表記

(b) フェーズアレイ探傷法

図7 きず端部の溶接線直交方向の位置測定誤差の比較

SN比を改善するために広帯域形の二分割形探触子を用いることで検査精度改善を大きく改善できることを提言している。

今回は、この検討結果に基づく探傷法を従来型パルス反射法として用い、近年注目されているフェーズアレイ探傷との異材継手における超音

波探傷精度の比較検討を行った。この結果、縦波のセクタスキャンを行うことで、直線状の平行走査のみで従来のパルス反射法と同等あるいは同等以上の検査精度が得られることを確認した。

特に、従来のパルス反射法では方形走査（超音波が探傷範囲をカバーさせるための溶接線に対し

て直交方向と平行方向を組合せた走査法)を行う必要があるのに対して、フェーズドアレー探傷ではセクタスキャンによる平行走査で、探傷が極めて迅速に行え、かつ画像化により客観的に判断できる長所が確認できた。また、きずの高さ測定においても、更に前後走査をも併用して画像化することで、きずの断面像を明瞭に得ることができ、客観的な評価が可能になっている。これらより、フェーズドアレー探傷法が異材継手においても適用が有効であることを確認した。

参考文献

1) H.Yoneyama,S.shibata,M.kishigami:Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steel Weldments by

Means of Transmitter-Receiver Type Longitudinal-Wave Angle-Beam Probe,Materials Evaluation (April1982/Volume40/Number5)

- 2) 米山、芝田、岸上：オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷に関する一実験、(その1)、NDI資料2660(1978.1)昭和52年
- 3) 米山、芝田、岸上：オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷に関する一実験、(昭和52年度秋季大会講演概要集Ⅱ-5(1977). p275
- 4) 米山、芝田、岸上：各種縦波探触子を用いたステンレス鋼溶接部の超音波探傷、NDI資料2705(1978.11)

元検査事業部
技術部 NDE グループ
課長 (現 株式会社アデルコ)

芝田 三郎

TEL. 045-759-2163

FAX. 045-759-2146