

# 超音波フェーズドアレイ TOFD 法による 厚肉ステンレス鋼配管溶接部の欠陥深さ測定技術の開発

## Development of Measurement Technique for Crack Depth in Weld Zone of Thick Stainless Steel Pipe with Ultrasonic Phased Array TOFD

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)\*

**要約** 超音波の散乱減衰が顕著であり、超音波探傷試験が困難な厚さ 25 mm を超えるようなオーステナイト系ステンレス鋼溶接部において、欠陥の端部回折波の識別と深さ測定が可能なフェーズドアレイ TOFD (time of flight diffraction) 法を新しく開発した。

この方法は、溶接部での超音波伝播経路を短くするために送信と受信の入射点間の距離の短縮が可能な 1 個のアレイ探触子を使用する。1 個のアレイ探触子からの送信と受信の超音波ビーム軸は、任意の深さ位置に交差および集束させることができる。さらに、この交差点と集束点の異なる深さ位置の設定を組み合わせた最大 16 通りの条件による探傷が 1 度に可能である。

厚さ 35 mm のステンレス鋼平板試験体母材部の放電加工スリットの深さ測定の結果、深さ測定の精度と端部回折波のエコー高さについて以下のことが明らかになった。(1) 底面反射波からラテラル波伝播時間を算出する方法により、欠陥深さに対して 0.2 mm の誤差で深さ測定が可能であった。(2) 欠陥の先端位置の深さに対して、超音波ビーム軸の交点深さが上下方向に 4 mm ずれた場合の深さ測定の誤差は最大で 0.3 mm であった。(3) 端部回折波は、欠陥先端の深さ位置に超音波ビーム軸を交差させた場合、最も高いエコー高さが得られ、欠陥先端の深さ位置に対して超音波ビーム軸の交点深さが 4 mm ずれた場合に -6.8 dB 低下した。

さらに、厚さ 35 mm のステンレス鋼溶接部配管試験体の放電加工スリット、疲労き裂および応力腐食割れ (stress corrosion cracking: SCC) の深さを測定した。得られた成果は以下のとおりである。(1) 疲労き裂および SCC の端部回折波を、SN 比 2.4 以上で検出することができた。(2) 疲労き裂に対して最大 0.2 mm の誤差、SCC に対して最大 1.6 mm の誤差で、深さ測定が可能であった。

以上から、アレイ探触子を用いたフェーズドアレイ TOFD 法が、高い深さ測定精度を有すること、35 mm までの厚板のステンレス鋼溶接部に適用可能であることを明らかにした。

**キーワード** 超音波探傷試験, フェーズドアレイ法, TOFD 法, ステンレス鋼, 溶接部, 疲労き裂, SCC

**Abstract** Phased array TOFD (time of flight diffraction) method which makes possible to detect tip diffraction echoes and measure crack depth in an austenitic stainless steel weld zone with a thickness of more than 25 mm to which region it was difficult to apply ultrasonic test due to scattering of ultrasonic waves has been developed.

The developed method uses a single array transducer to have a short distance between incident points of transmitter and receiver in order to propagate ultrasonic waves in shorter pass in the weld region. Transmitting and receiving ultrasonic beams from a single array probe can be set a crossing point and a focal point at desired depth. This method makes possible to scan with 16 kinds of combination of crossing points and focal points of ultrasonic beam at a time.

We have examined fundamental characteristics of depth measurement with electric discharge machining slits on base metal of a stainless steel with a thickness of 35 mm.

As the results: (1) We could measure the slit depth with 0.2 mm error from the slit depth with an estimating method of a lateral wave propagation time with back wall echo. (2) The largest error of the depth measurement from the slit depth with the ultrasonic beam crossing point set at the 4 mm different point from the tip of the slit was 0.3 mm. (3) The largest error of the depth measurements due to the difference of focal point depth of ultrasonic beam was 0.2 mm. (4) The highest tip diffraction echo could be observed with the ultrasonic beam cross point set at the tip of the slit. The difference of 4 mm between the cross point and the tip of the slit caused attenuation of tip diffraction echo height in -6.8 dB.

Furthermore We have measured a depth of electric discharge machining slits, fatigue cracks and stress corrosion cracking (SCC) on stainless steel welded pipe specimens with a thickness of 35 mm.

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

As the results: (1) We could detect the tip diffraction echoes which have a signal noise ratio with more than 2.4 from the fatigue cracks and SCCs. (2) The largest error of depth measurement from the fatigue cracks and SCCs were 0.2mm and 1.6mm respectively.

Therefore we have evaluated that this newly developed phased array TOFD method had ability of depth measurement with high accuracy and was applicable to depth measurement of cracks in stainless steel weld regions with the thickness of up to 35mm.

Keywords ultrasonic testing, phased array method, TOFD, stainless steel, weld, fatigue crack, SCC

## 1. はじめに

超音波探傷試験方法の一つである TOFD 法は、欠陥先端部での回折波の伝播時間を計測することにより、欠陥先端部の表面からの深さ位置を高精度で測定する手法であり、端部回折波を利用した測定手法の提案がなされた<sup>(1)~(3)</sup>後、実用的な手法として発展し、その適用方法について国内外で規定されるに至っている<sup>(4)(5)</sup>。TOFD 法は、伝播時間の計測による高精度での深さの測定が可能なることと、受信波形の信号強度を輝度により表示し、探触子移動に伴う輝度の変化をいわゆる TOFD 画像として記録することにより、回折波の視認性に優れていることを特長とする。TOFD 法は、原子力発電所の設備の維持に関する規格<sup>(6)</sup>の適用の際必要となる欠陥の深さを同定するための測定手法の一つとして位置づけられている<sup>(7)</sup>。

加圧水型原子力発電所 (pressurized water reactor: PWR) の 1 次系配管材料は、主冷却材管の鋳造 2 相ステンレス鋼を除くと、加圧器サージライン配管などのオーステナイト系ステンレス鋼がほとんどすべてである。このオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部においては、その柱状晶組織に起因する超音波の散乱による減衰、伝播経路の曲がりが見られ、超音波の伝播経路が溶接部を横切る TOFD 法は、25 mm を超える板厚のステンレス鋼での適用は困難とされており<sup>(8)(9)</sup>、通常の縦波斜角探触子を用いた TOFD 法による 25 mm を超える厚いステンレス鋼溶接部への適用例はない。フェーズドアレイ装置とアレイ探触子を用いた TOFD 法による測定を、ステンレス鋼およびインコネル溶接部に適用した例があるが、検査面から欠陥端部までの深さは 20 mm 未満である<sup>(10)</sup>。

欠陥の深さ測定において、TOFD 法が複数の手法を適用して総合的に判断するための手法の一つとされている<sup>(7)</sup>ことから、TOFD 法をステンレス鋼溶接部においても欠陥深さ測定が可能なる技術として確立しておくことが必要である。

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接部において、欠陥の端部回折波を的確にとらえ、その深さ測定が可能なることを目標に、フェーズドアレイ法を用いた TOFD 法を開発した。国内外の超音波探傷試験に係る検査員の資格試験の判定基準を目安に、真の欠陥深さに対して 4.4 mm を超えて過小に測定されないこと<sup>(11)</sup>、真の欠陥深さに対する測定値のばらつきを示す RMS (root mean square) 誤差が 3.2 mm 以下であること<sup>(11)(12)</sup>を欠陥の深さ測定精度の目標とし、さらに受信波形における欠陥端部回折波の信号強度が SN 比 3 以上で得られることにも留意した。

開発した手法は、(1) 超音波の送信と受信を 1 個のアレイ探触子により行うこと、(2) これにより超音波伝播経路が短縮されること、(3) 超音波ビーム軸を任意の深さ位置で交差と集束させることが可能なること、(4) 一度の探傷で最大 16 通りの交差点と集束点の組み合わせを設定可能なること、(5) TOFD 法本来の特徴である視認性に優れた TOFD 画像での解析が可能なることを、これまでにない特長としている。

## 2. 実験装置

### 2.1 TOFD 法の原理

TOFD 法の測定原理を図 1 に示す。この図の (1) に示すように、TOFD 法では、縦波探触子を送信用と受信用に別個に使用し、それぞれの超音波ビーム軸を対向させて一定の間隔で配置する。

材料中に欠陥のない場合には、両探触子間と材料板厚とで構成される空間内において最も短い伝播経路である表面を伝播するラテラル波、最も長い経路に相当する材料底面での反射波が受信される。すなわち図 1 の (1) で示す経路 TR と TBR により、図 1 の (2) で示す受信波形において、信号  $S_s$  と信号  $S_b$  が得られる。

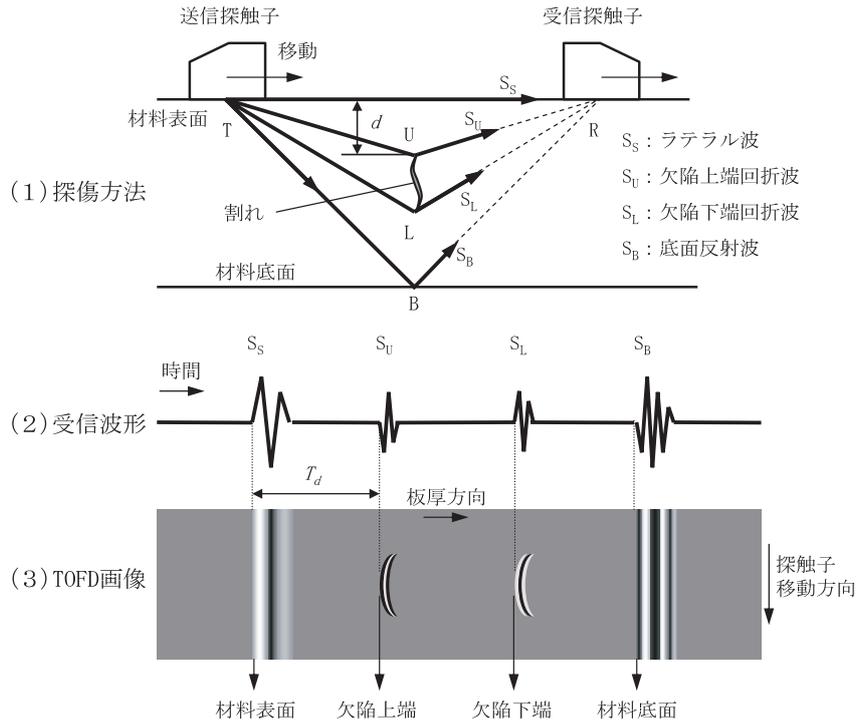


図1 TOFD法の測定原理

材料中に欠陥がある場合には、図1の(1)に示す経路TURとTLRによる欠陥の上端と下端での回折波が、図1の(2)に示す受信波形において信号 $S_S$ と $S_B$ の間に信号 $S_U$ と $S_L$ のように検出される。図1の(2)の受信波形について、信号強度により輝度に変換し、探触子移動に伴う変化を、図1の(3)のように画像として表示することによって、いわゆるTOFD画像が得られる。欠陥端部の回折波は、ラテラル波と底面波の間に円弧状の画像で識別される。

欠陥上端の位置は、ラテラル波との伝播時間差 $T_d$  ( $\mu\text{s}$ )を用いて、材料表面からの深さ $d$ は、次式により算出される<sup>(4)(5)</sup>。

$$d = \sqrt{\frac{C^2 T_d^2}{4} + C T_d S} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

ここで、 $C$ は縦波の音速(km/s)、 $S$ は送信探触子と受信探触子の入射点間の距離(mm)の1/2を示す。

## 2.2 フェーズドアレイTOFD法

ステンレス鋼溶接部での超音波探傷の困難さは、溶接金属部における超音波の散乱による減衰に起因する。このような部位で微弱な欠陥端部回折波の検出は容易ではない。そこで、送受信探触子の超音波ビーム軸を欠陥端部近傍で交差させ、集束させるこ

とが有効である。しかし、その深さのわからない欠陥端部を検出するために、何種類もの屈折角と集束点深さの異なる探触子と、異なる交点深さを設定するための何種類もの探触子配置が必要となる。

フェーズドアレイ法は、多数の微小な振動子(以下エレメント)を配列したアレイ探触子を用いて、その中のエレメントに対して励起する個数と順番、時期を電子的に制御することによって、見かけの探触子の大きさ、屈折角、集束点深さを任意に設定しての探傷が可能である。

したがって、探触子の交換と配置変更が不要となり、超音波ビーム軸を任意の深さ位置で交差させ、集束させることが可能な、フェーズドアレイ法を用いたTOFD法を新しく考案した。

## 2.3 フェーズドアレイ装置

フェーズドアレイ装置本体の基本仕様を表1に示す。本装置は、TOFD法による探傷機能を有する。このTOFD法探傷機能に関する基本仕様を表2に示す。

送信用と受信用に別個にアレイ探触子を使用する方法と1個のアレイ探触子により送信と受信を行う方法のいずれも設定が可能である。送信と受信にそれぞれ最大32エレメントまで使用可能とした。また、

表1 フェーズドアレイ装置本体基本仕様

同時使用エレメント数	32個
使用可能エレメント数	128個
周波数帯域	0.5 MHz ~ 15 MHz
ゲイン設定	0 ~ 60 dB/0.1 dB ステップ
遅延時間	0 ~ 5 $\mu$ s (5 ns ステップ)
サンプリング周波数	100 MHz/50 MHz/25 MHz/12.5 MHz

表2 TOFD法探傷機能に関する基本仕様

使用可能探触子	リニア型 2個 (送受信個別) 1個 (探触子内で送受信)
同時使用エレメント数	送受信にそれぞれ最大32個
設定項目	屈折角 焦点深さ 探触子間隔 (探触子2個使用の場合) 使用エレメント(数, 位置)

超音波ビーム軸の交点の深さと超音波ビームの集束点深さを組み合わせて、同時に最大16通りの条件が設定可能である。すなわち、異なる深さ位置に超音波ビームの交点と集束点を設定することによって、一度の探傷で欠陥先端位置を網羅的に探索することが可能である。さらに採取した16通りの条件の探傷データの中の個々の条件について、TOFD法の特徴である視認性に優れたTOFD画像により探傷結果の表示と解析が可能であり、このことによって欠陥端部を明瞭に識別できる結果を得ることができる。

## 2.4 フェーズドアレイ TOFD 用探触子

溶接部にTOFD法を適用する場合には、送信探触子から受信探触子に伝播する超音波は必ず溶接金属部を通過する。これに対する方策として、溶接金属部で伝播経路の短縮を図ることとした。そのためには、送信と受信の入射点間の距離を短くすることが必要である。このために、2個の個別の探触子では、その物理的な大きさにより接近距離に限界が生じることから、1個のアレイ探触子を使用することとした。1個のアレイ探触子を使用することによって超音波の送受信経路を短くすることは、溶接金属内での超音波の曲がり等によって生じる超音波送受信ビーム軸の交点、集束点のずれも低減できることが期待できる。

1個のアレイ探触子を用いるフェーズドアレイ

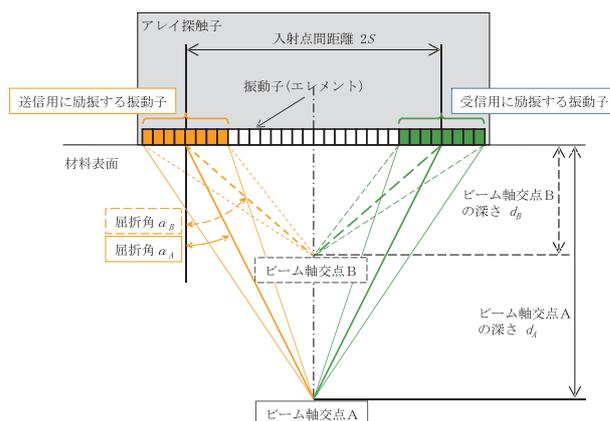


図2 フェーズドアレイ TOFD 法の原理

TOFD法の原理を、32エレメントのアレイ探触子の場合の例により図2に示す。32個のエレメントのうち、左端の8個を送信用に、右端の8個を受信用に使用し、ビーム軸交点Aに屈折角 $\alpha_A$ により超音波ビーム軸の交点および集束点を設定した場合とビーム軸交点Bに屈折角 $\alpha_B$ により超音波ビーム軸の交点および集束点を設定した場合を示している。

このように、送信用と受信用に使用するエレメントの励起の時期を制御することによって、異なる深さ位置に超音波ビーム軸の交点と集束点の設定を可能とした。

さらに、アレイ探触子のエレメント配列の中心を越えて相互に送信および受信範囲を設定することも可能とした。これにより、2個の探触子を用いる通常のTOFD法では不可能な、探触子の大きさより小さい入射点間距離の設定が可能となった。

また、式(1)により欠陥の端部深さ算出の際に必要な入射点間距離は、送信と受信の超音波ビーム軸の

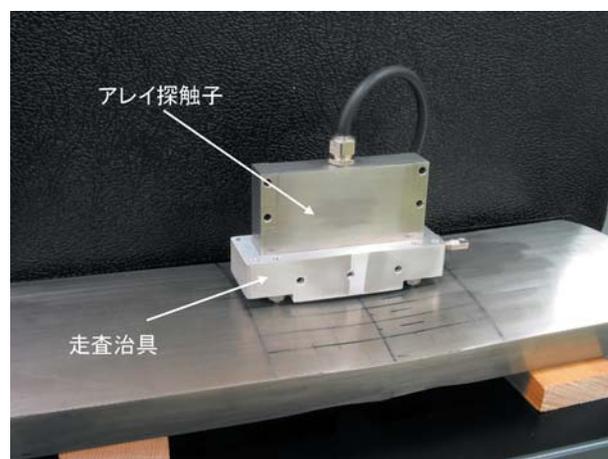


図3 フェーズドアレイ TOFD 法に使用したアレイ探触子と走査治具の写真

入射点間の距離として、使用するエレメントの数と位置、エレメントの配列間隔により設定または算出が可能である。したがって、2個の探触子を使用して配置する通常のTOFD法のように、入射点間距離の設定、読み取りの際に生じうるような誤差はない。

フェーズドアレイTOFD法に使用したアレイ探触子と走査治具の外観写真を図3に示す。1個のアレイ探触子により超音波を送受信させることからウェッジは使用しない。探触子の保護と平滑でない探傷面上での走査のために、探触子に袴状に取り付けその4隅で点支持する治具を用いた。

## 2.5 試験体

フェーズドアレイTOFD法によるステンレス鋼溶接部の欠陥の深さ測定を行なう試験体として、平板と配管の試験体を製作した。

ステンレス鋼溶接部平板試験体を図4(1)に、ステンレス鋼溶接部配管試験体を図4(2)に示す。ステンレス鋼溶接部平板試験体は、厚さ35mmのステンレス鋼平板であり、幅方向の中央部に長手方向の溶接部を設けた。溶接中心およびその近傍に、それぞれ3種類の深さの放電加工 (electric discharge machining, EDM) スリットを付与した。また、母材部にも3種

類の深さのEDMスリットを付与した。ステンレス鋼溶接部配管試験体は、軸方向中心位置で周方向溶接された、異なる口径と板厚の配管を軸方向に切断したものである。

EDMスリット、疲労き裂およびSCCについて2種類の寸法の欠陥を、試験体1体につき1個ずつ、溶接部近傍の熱影響部に付与した。欠陥の長さ方向は、配管の周方向である。ステンレス鋼溶接部配管試験体の付与欠陥の寸法を表3に示す。

EDMスリットは、深さと長さの比が0.15の半楕円面のスリットとしている。

疲労き裂は、配管試験体内表面に、き裂の起点となるEDMスリットを付与し、試験体両端と中心部の3点曲げ疲労試験により、所定の深さまでき裂を進展させた。その後起点となったEDMスリットを、内面の減肉加工により除去した。き裂の長さは、試験体内表面でのき裂開口部の実測値である。き裂の深さは、あらかじめ同条件で進展させた疲労き裂により求めたき裂の開口部の長さ値と深さ値の関係式によって、試験体のき裂開口部の長さ実測値から算出した。

SCCは、配管試験体内面に隙間治具を取り付け、高温高圧水ループに浸漬させることにより、SCCを発生、進展させた。き裂の長さは、試験体内表面でのき裂開口部の実測値である。き裂の深さは、溶接

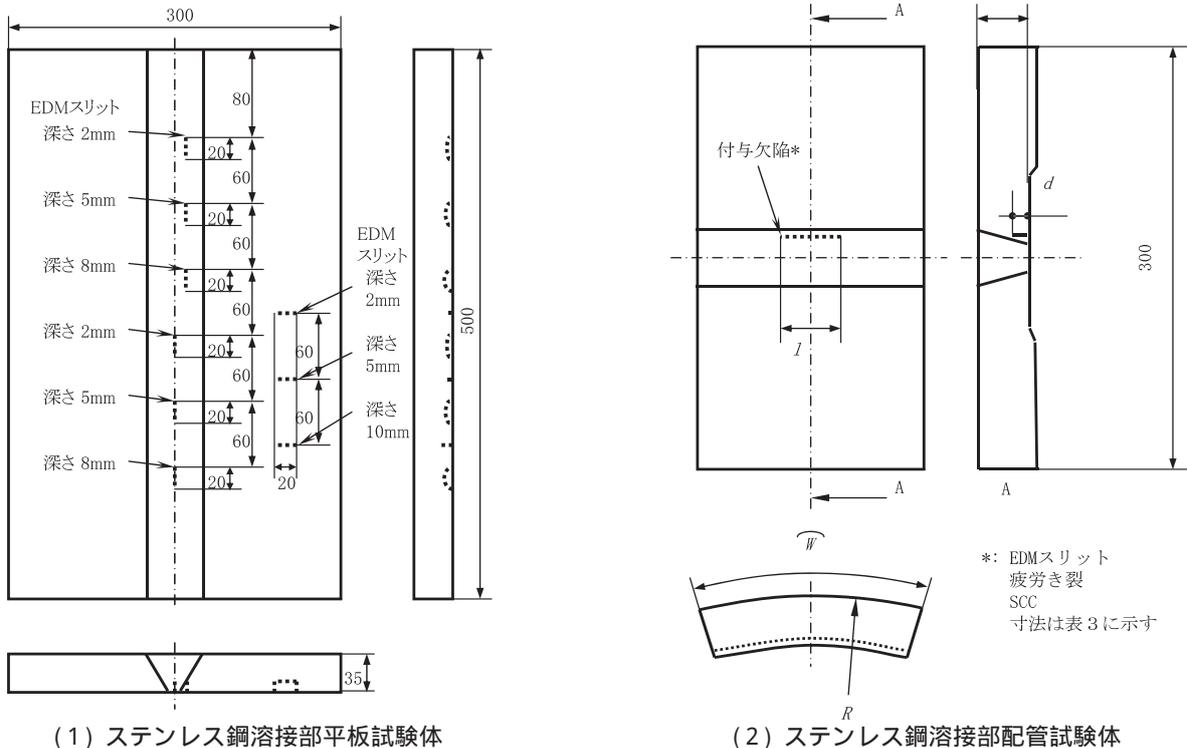


図4 試験体の構造

表3 ステンレス鋼溶接部配管試験体に付与した欠陥の寸法

曲率 $R$ (mm) [口径]	厚さ $t$ (mm)	試験体 外周長 $W$ (mm)	付与欠陥						
			EDMスリット		疲労き裂(*1)		SCC(*1)		
			深さ $d$ (mm)	長さ $l$ (mm)	深さ $d$ (mm)	長さ $l$ (mm)	深さ $d$ (mm)	長さ $l$ (mm)	
159.3 [300A]	15.0	80.0	No. 1	3.0	18.5	1.6	16.7	2.9	14.0
			No. 2	8.0	51.5	4.2	29.9	4.4	21.0
177.8 [350A]	25.0	100.0	No. 1	5.0	31.0	4.8	27.9	5.0	56.6
			No. 2	10.0	65.0	9.0	59.9	9.5	- (*2)
304.8 [600A]	35.0	150.0	No. 1	5.0	30.8	6.0	28.3	5.7	43.9
			No. 2	10.0	62.0	11.0	52.4	7.9	74.6

\*1: 試験体製造メーカーによる製造時測定値

\*2: 複数の割れが、周方向全長にわたり存在

部に対して母材側からの端部エコー法による測定値である。

図5に、ステンレス鋼溶接部配管試験体の溶接部断面写真を示す。溶接部の外表面側の肉盛りは除去し、母材部と平滑になるよう表面処理を行なったが、溶接時の変形による溶接部近傍外表面の落ち込みはそのままとし、軸方向において直線ではない外表面とした。

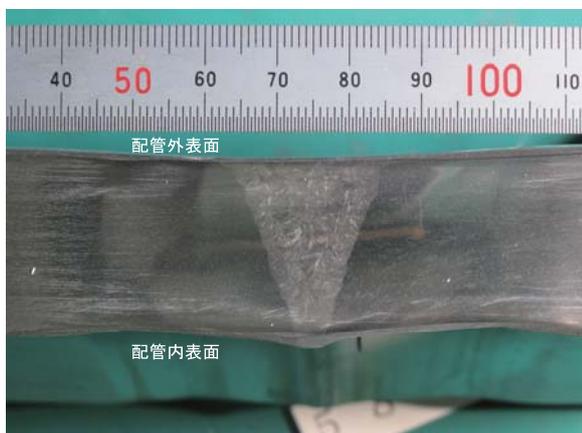


図5 ステンレス鋼溶接部配管試験体の溶接部断面

## 2.6 実験の方法

フェーズドアレイ TOFD 法によるステンレス鋼溶接部試験体欠陥の深さ測定の実験条件を表4に示す。使用エレメント数、入射点間距離、超音波ビーム軸の交点深さおよび集束点深さを変化させ、深さ測定を行なった。これらの条件の組み合わせによる、端部回折波の検出性と欠陥の深さ測定精度への影響を調べるために、まずステンレス鋼溶接部平板試験体の母材部の EDM スリットの測定を実施した。この測

定結果から明らかになった最適な深さ測定の条件により、ステンレス鋼溶接部配管試験体の欠陥の深さ測定を行なった。

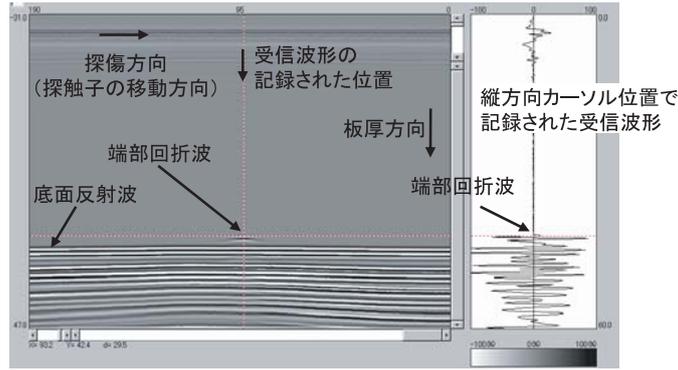
表4 深さ測定の実験条件

使用した探触子	5 MHz / 64 エLEMENT アレイ探触子 3 MHz / 64 エLEMENT アレイ探触子
使用振動子数	送信および受信にそれぞれ 10, 20, 30 個
入射点間距離	6 ~ 44 mm 使用した探触子の振動子配置において、送信および受信振動子が隣接する場合の最小値から送信および受信振動子を振動子配列の両端に設定する場合の最大値までの範囲に相当
ビーム軸交点深さ 集束点深さ	試験体の底面から欠陥先端位置を含む範囲において2つまたは3つの深さに設定して同時に探傷
屈折角	10 ~ 45 度 入射点間距離とビーム軸交点深さにより決定される屈折角範囲
探傷方向 / 走査方向	軸方向に超音波入射し移動走査
探傷データ採取ピッチ	1 mm ピッチ
探触子の走査駆動	手動走査
探触子位置情報	ワイヤ巻き取り式エンコーダにより採取

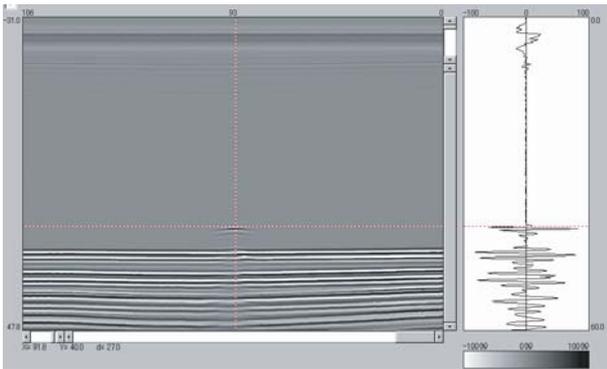
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フェーズドアレイ TOFD 法の基礎特性の実験

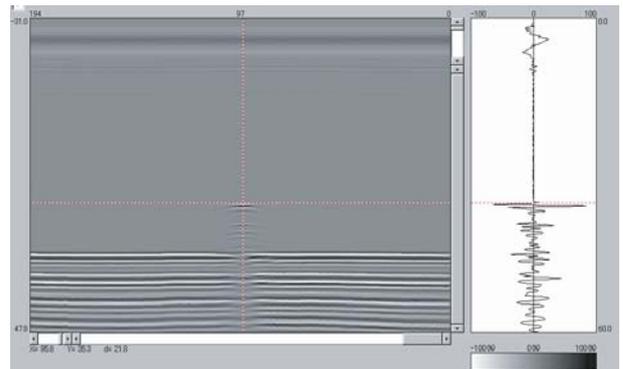
板厚 35 mm のステンレス鋼溶接部平板試験体の母材部の EDM スリットを用いて、探傷条件（使用エレメント数、ビーム軸交点深さ、焦点深さ）による深さ測定値と、端部回折波のエコー高さへの影響を調



(1) 2mm 深さ EDM スリット



(2) 5mm 深さ EDM スリット



(3) 10mm 深さ EDM スリット

図6 EDM スリットフェーズドアレイ TOFD 法探傷結果 (ステンレス鋼溶接部平板試験体母材部)

べた。アレイ探触子として、周波数 5 MHz、エレメント数 64 個のものを使用した。3 種類の深さの EDM スリットに対し、10 個および 20 個のエレメントを使用し、EDM スリット先端位置を中心にビーム軸交点を変化させた条件で、欠陥深さと端部エコー高さを測定した。

ステンレス鋼溶接部平板試験体の母材部 EDM スリットのフェーズドアレイ TOFD 法による探傷画面の例を図 6 に示す。各スリットに対する使用振動子数 20 個、ビーム軸交点深さおよびビーム集束点をスリット先端位置に設定した条件での結果である。図 6 の探傷画面において、左側の画面が受信波形の信号強度を輝度に変換した表示の、探触子の EDM スリット面に対して垂直方向での移動走査に伴う変化を表わしている。すなわち、画面の縦方向が板厚方向、横方向が EDM スリット面に垂直方向である探触子の移動走査方向に相当する。縦方向のカーソルで示した位置が、EDM スリットの位置に相当し、その位置で記録された受信波形が、右側に示されている。横方向のカーソルは、スリット先端での端部回折波の受信時刻に合わせている。

図 6 のフェーズドアレイ TOFD 法による探傷画面

には、材料表面を表わすラテラル波が識別できなかった。ラテラル波が識別できないのは、図 6 に示した探傷結果の場合の屈折角は 17 度から 21 度の範囲であったことから、ラテラル波が極めて微弱であったためと考えられる。表 4 に示した深さ測定の実験での屈折角範囲においても、ラテラル波は識別されなかった。

表面から欠陥端部までの深さは、式 (1) によってラテラル波の伝播時間と欠陥先端の端部回折波の伝播時間との差を計測して算出される。しかし、フェーズドアレイ TOFD 法によって得られる図 6 のような探傷画面においては、ラテラル波の伝播時期を特定しての深さ算出はできない。そこで、その深さが既知である底面反射波の伝播時間から、ラテラル波の伝播時間を算出した。式 (1) を用いてラテラル波の伝播時間  $T_L$  ( $\mu s$ ) は、以下により算出される。

$$T_L = T_B - \frac{2}{C} \left( \sqrt{t^2 + S^2} - S \right) \quad (\mu s) \quad (2)$$

ここで、 $T_B$  は、底面反射波の伝播時間 ( $\mu s$ )、 $t$  は、底面の深さ (mm) である。

式 (2) により算出されたラテラル波伝播時間と端部回折波の伝播時間との差を求め、式 (1) により端

部位置の深さを算出した。この方法によって、深さ測定値の校正が同時に行うことが可能である。

まず、EDMスリットの先端の深さ位置と超音波ビーム軸の交点の深さのずれによる、EDMスリットの深さ測定値と端部回折波のエコー高さの変化を検討した。20個または30個のエレメントを使用し、超音波ビーム軸の交点を、それぞれのEDMスリットの先端の深さ位置を中心に浅い側と深い側に2mm毎に2種類ずつの合計5種類の深さ位置に設定した条件による深さ測定値と端部回折波のエコー高さを測定した。超音波ビームの集束点は、ビーム軸の交点と同じ深さに設定した。

EDMスリット深さ測定値のビーム軸交点深さによる変化を図7に示す。図7の中の矢印で示すように、

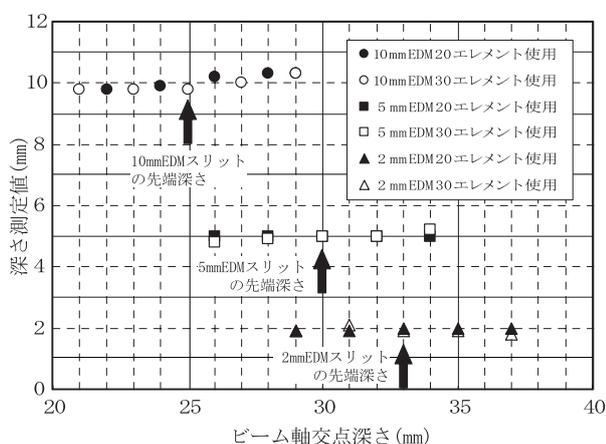
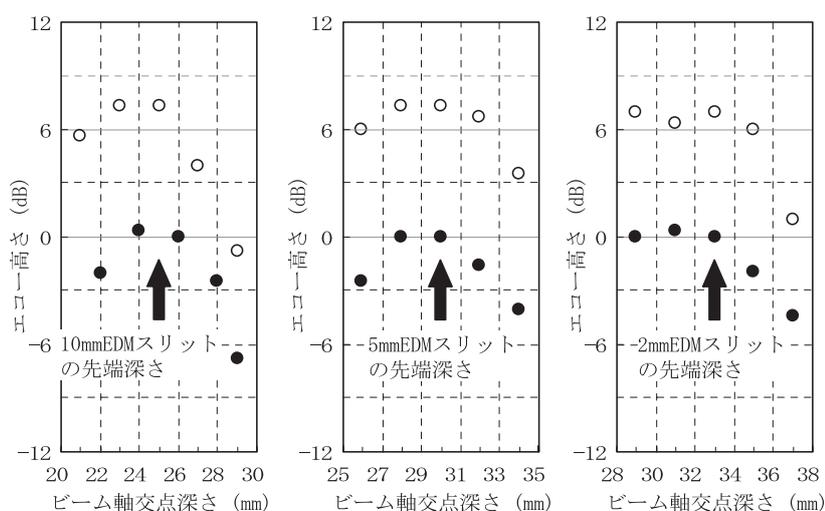


図7 異なった探傷条件によるEDMスリット 深さ測定結果 (ステンレス鋼溶接部平板試験体母材部)



(1) 深さ10mmEDMスリット (2) 深さ5mmEDMスリット (3) 深さ2mmEDMスリット

図8 異なった探傷条件によるEDMスリット 端部エコー高さ測定結果 (ステンレス鋼溶接部平板試験体母材部)

EDMスリットの深さ10mm, 5mm, 2mmに対して、ビーム軸の交点深さがそれぞれ25mm, 30mm, 33mmの場合が、それぞれのEDMスリットの先端の深さ位置にビーム軸の交点が設定された条件である。

このスリット先端の深さ位置にビーム軸の交点を設定した条件による深さ測定値は、EDMスリット深さとよく一致し、その誤差は最大で0.2mmであった。スリット先端位置からビーム軸の交点がずれた条件では、深さ測定値の誤差は少し大きくなるが、深さ10mmのEDMスリットの場合に、最も誤差が大きく0.3mmであった。また、使用エレメント数による深さ測定値に対する誤差は、最大で0.3mmであった。

端部回折波のエコー高さのビーム軸交点深さによる変化を図8に示す。各条件のエコー高さは、20個のエレメントを使用し、スリット先端位置にビーム軸交点を設定した条件でのエコー高さを基準として規格化している。

図8の中の矢印で示したスリット先端位置にビーム軸交点を設定した条件において、いずれのEDMスリットと使用エレメント数の場合でも、最もエコー高さが高い。ビーム軸交点のずれにより、最大-6.8dBのエコー高さの低下が生じている。欠陥の先端位置にビーム軸交点を合わせることが、端部回折波の検出に有効であることを示している。使用エレメント数が30個の場合は、使用エレメント数20個の場合に比べてエコー高さは約6dB高くなり、使用エレメント数を大きくすることが、端部回折波の検出に有効であることを示している。

次に、超音波ビーム軸の交点での超音波ビームの集束の程度による、深さ測定値と端部回折波のエコー高さの変化を検討した。深さ5mmのEDMスリットに対して焦点深さを、ビーム軸交点と同じ位置、交点より5mm深い位置、超音波ビームが集束しない条件にほぼ相当する深さ100mmの位置に変化させた。20個のエレメントを使用して入射点間隔を22mmとし、ビーム軸の交点深さは、深さ5mmのEDMスリットの先端の深さ位置30mmを中心に2mm毎に合計5種類の深さ位置とした。

● 20エレメント使用  
○ 30エレメント使用

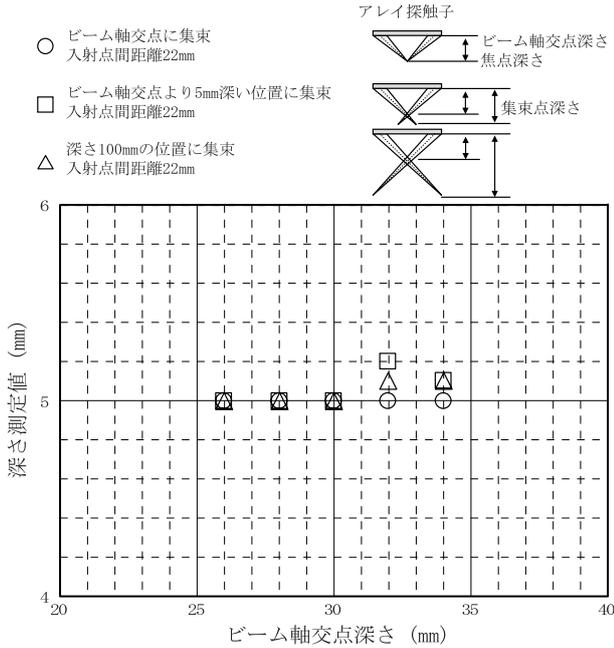


図9 異なった探傷条件による5mm深さEDMスリット深さ測定結果(ステンレス鋼溶接部平板試験体母材部)

焦点深さによる深さ測定値の変化を図9に示す。ビーム軸の交点深さが、EDMスリットの先端の深さ位置に一致する場合、すなわち30mmの条件では、いずれの集束条件でも、深さ測定値は5mmであり、EDMスリットの深さと一致した。ビーム軸の集束点深さをビーム軸の交点深さと同じとした条件(図9の印)では、いずれのビーム軸交点深さの条件でも、深さ測定値はEDMスリットの深さ5mmと一致した。ビーム軸の集束点深さを変化させた条件では、深さ測定値のEDMスリットの深さ値との誤差は、最大0.2mmであった。

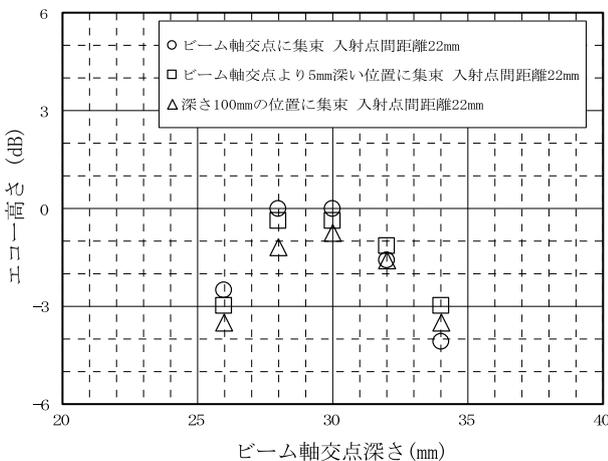


図10 異なった探傷条件による5mm深さEDMスリット端部エコー高さ測定結果(ステンレス鋼溶接部平板試験体母材部)

図10に焦点深さと入射点間隔による端部エコー高さの変化を示す。20個の要素を使用し、入射点間隔を22mmとし、30mmのビーム軸交点深さに焦点深さを設定した条件でのエコー高さを基準に規格化したエコー高さを示している。いずれの集束条件でも、EDMスリット先端位置すなわち深さ30mmの位置に、ビーム軸交点が設定された場合、最もエコー高さが高く、交点深さがスリットの先端位置からずれると、エコー高さが低下する。焦点深さの設定条件の違いによるエコー高さのばらつきは、0.4~1.2dBであった。交点深さがスリットの先端位置から2mmずれた場合のエコー高さの低下量は0~1.6dB、4mmずれた場合のエコー高さの低下量は2.5~4.1dBであった。このことは、超音波ビームの集束点深さの設定、すなわち集束の度合よりも、ビーム軸の交点深さをEDMスリット先端の深さ位置に設定することの方が、欠陥端部回折波の検出に有効であることを示している。

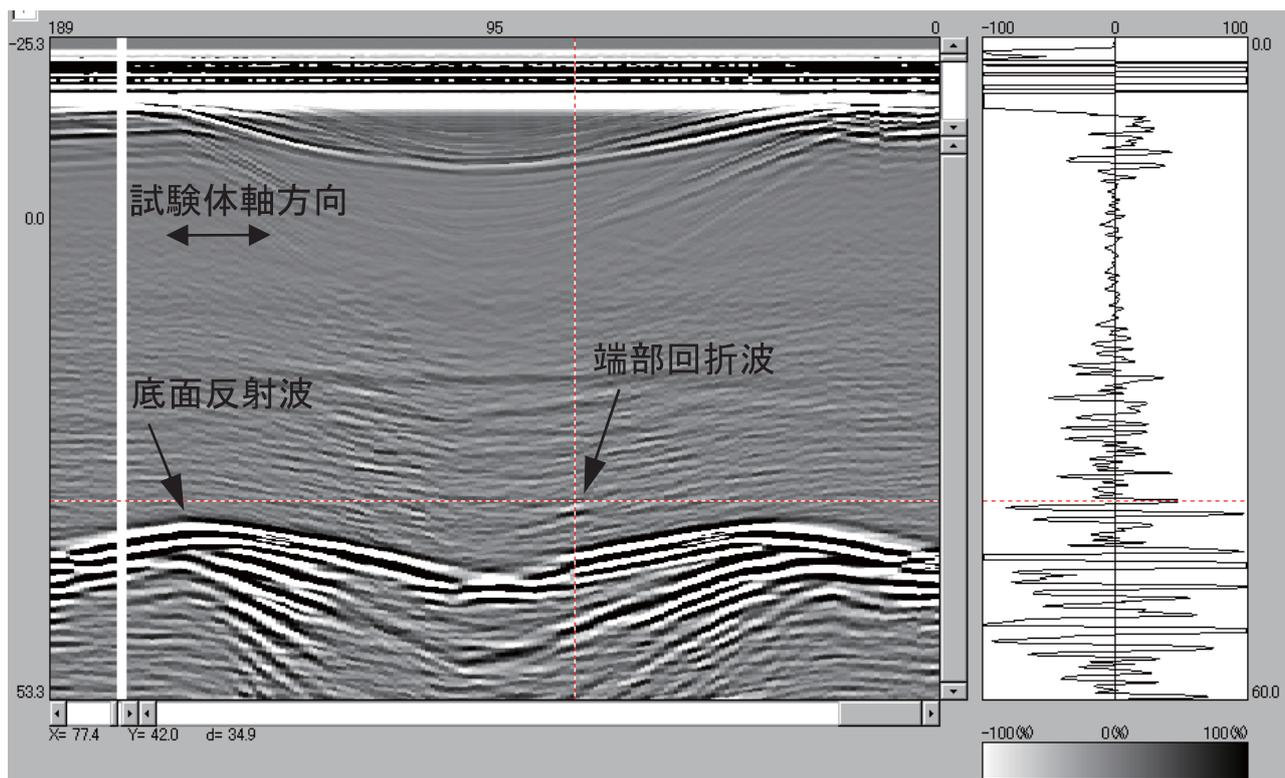
### 3.2 欠陥深さの測定

3種類のステンレス鋼溶接部配管試験体(15t×300A, 25t×350Aおよび35t×600A)のEDMスリット、疲労き裂およびSCCの深さを測定した。探触子として、周波数5MHz/要素数64個のもの、周波数3MHz/要素数64個のものを使用した。深さ測定値の校正は、シンニングおよび溶接による変形のない位置での底面反射波により行った。

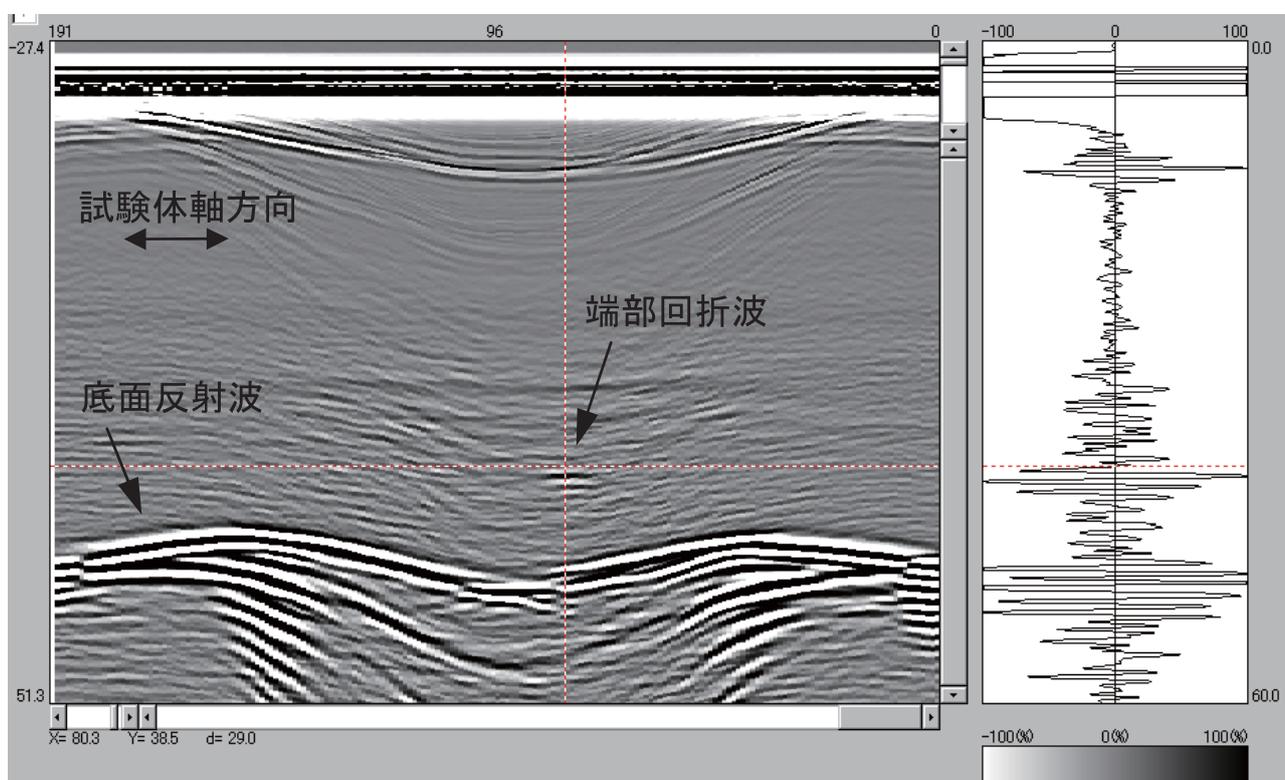
EDMスリットに対するフェーズドアレイTOFD法の探傷画面の例として、35t×600A試験体での結果を図11に示す。縦方向カーソルはEDMスリットの試験体軸方向での位置を、横方向カーソルは受信波形での端部回折波の位置を示している。

測定を行なった試験体のうち最も板厚が厚い35mm×600A試験体のNo.1とNo.2のEDMスリットを識別することができた。端部回折波の識別性を、受信波形における端部回折波の大きさとその直前のノイズの大きさから算出したSN比により評価した。No.1とNo.2のEDMスリットの端部回折波のSN比は、2.1と2.6であった。

疲労き裂に対するフェーズドアレイTOFD法の探傷画面の例として、35t×600A試験体での結果を図12に示す。周波数5MHzの探触子による探傷結果を図12の(1)と(2)に示す。No.1とNo.2の疲労き裂の端部回折波のSN比は、それぞれ1.7と4.3であった。

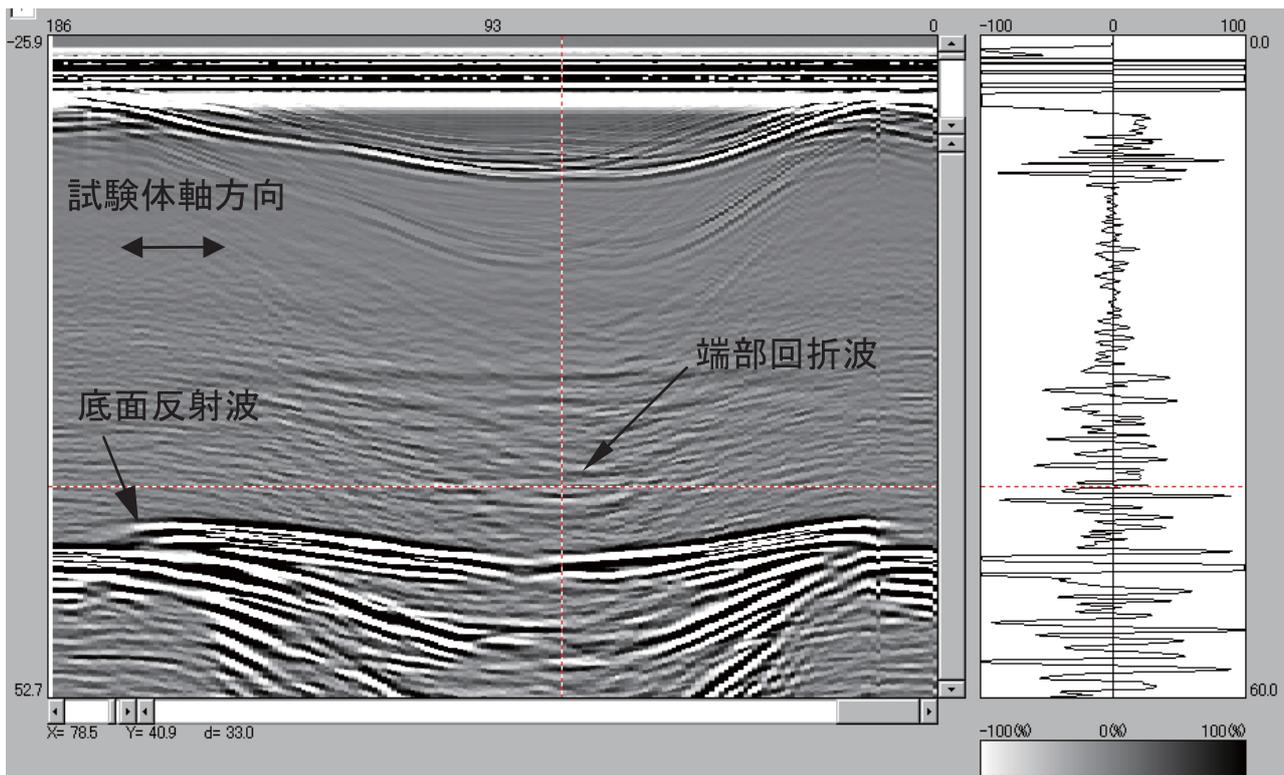


(1) 35t×600 A No.1 EDMスリット (5MHz / 64エレメント探触子)

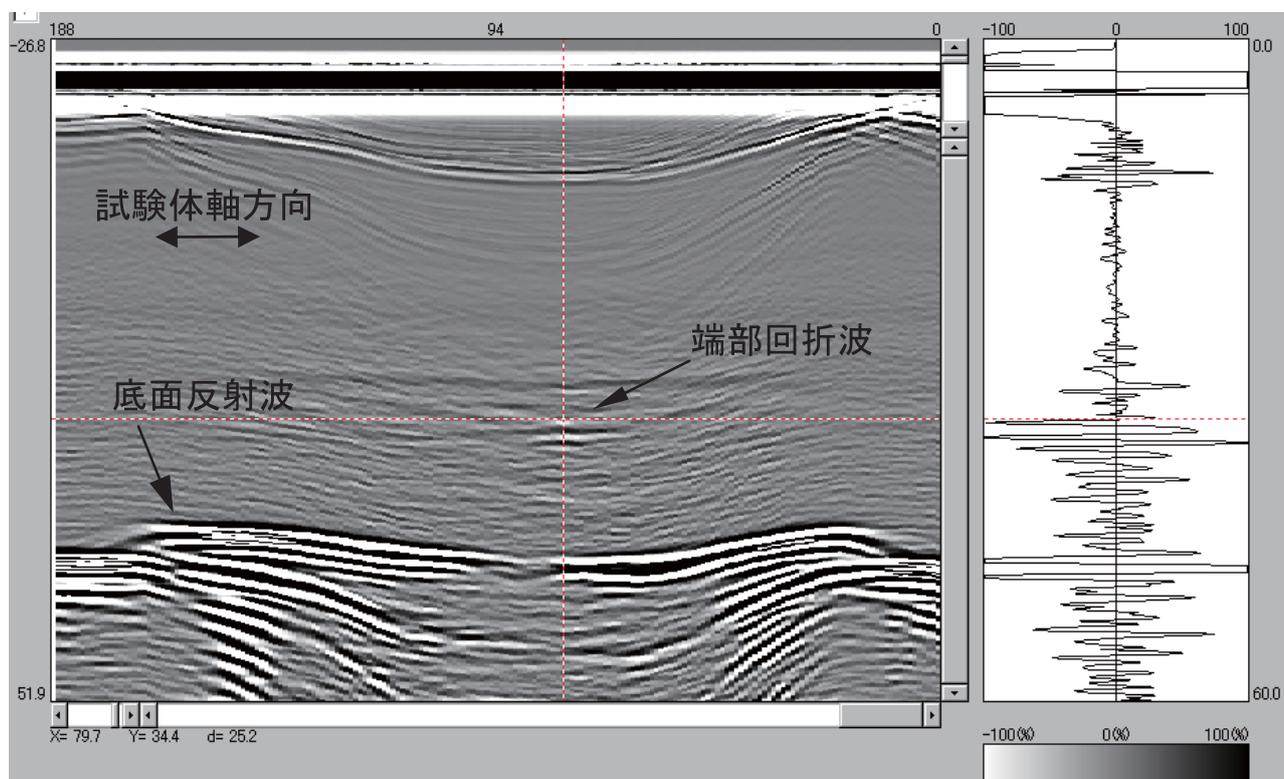


(2) 35t×600 A No.2 EDMスリット(5MHz / 64エレメント探触子)

図11 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面  
(EDMスリット)

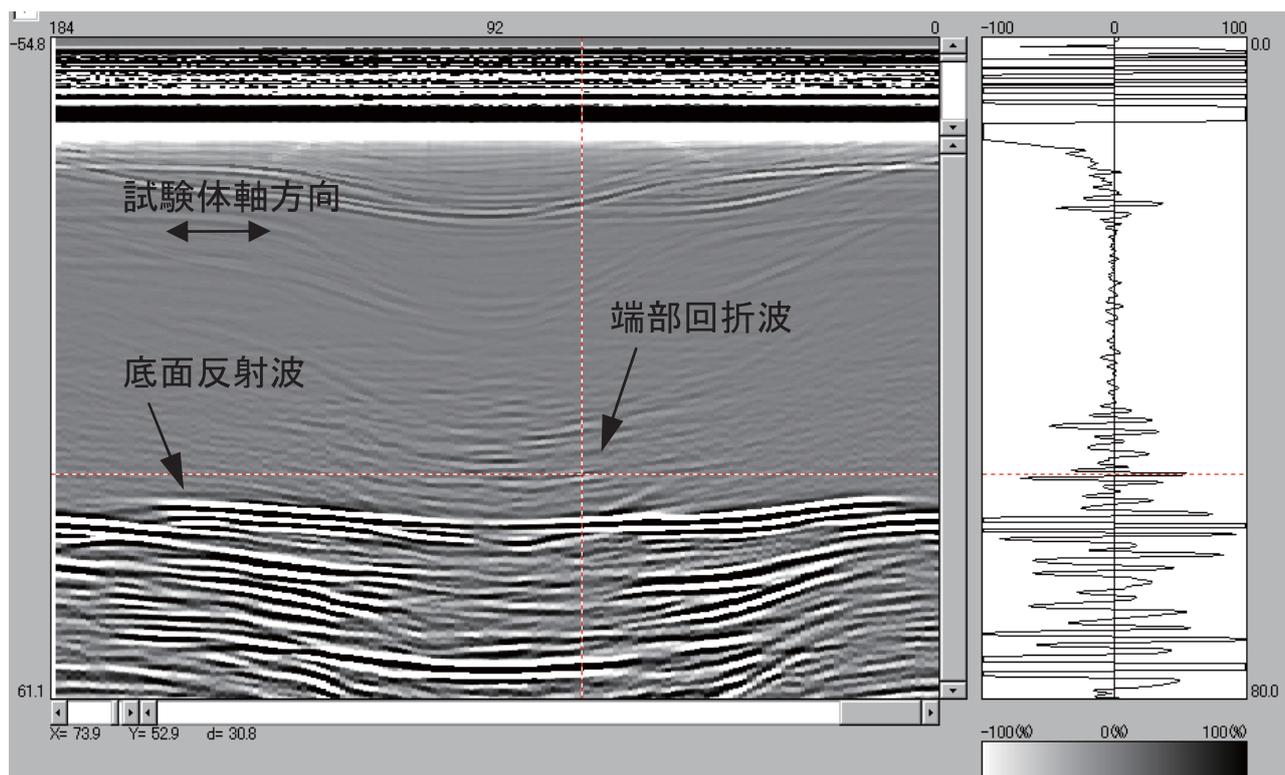


(1) 35t×600A No.1 疲労き裂 (5 MHz / 64 エLEMENT 探触子)

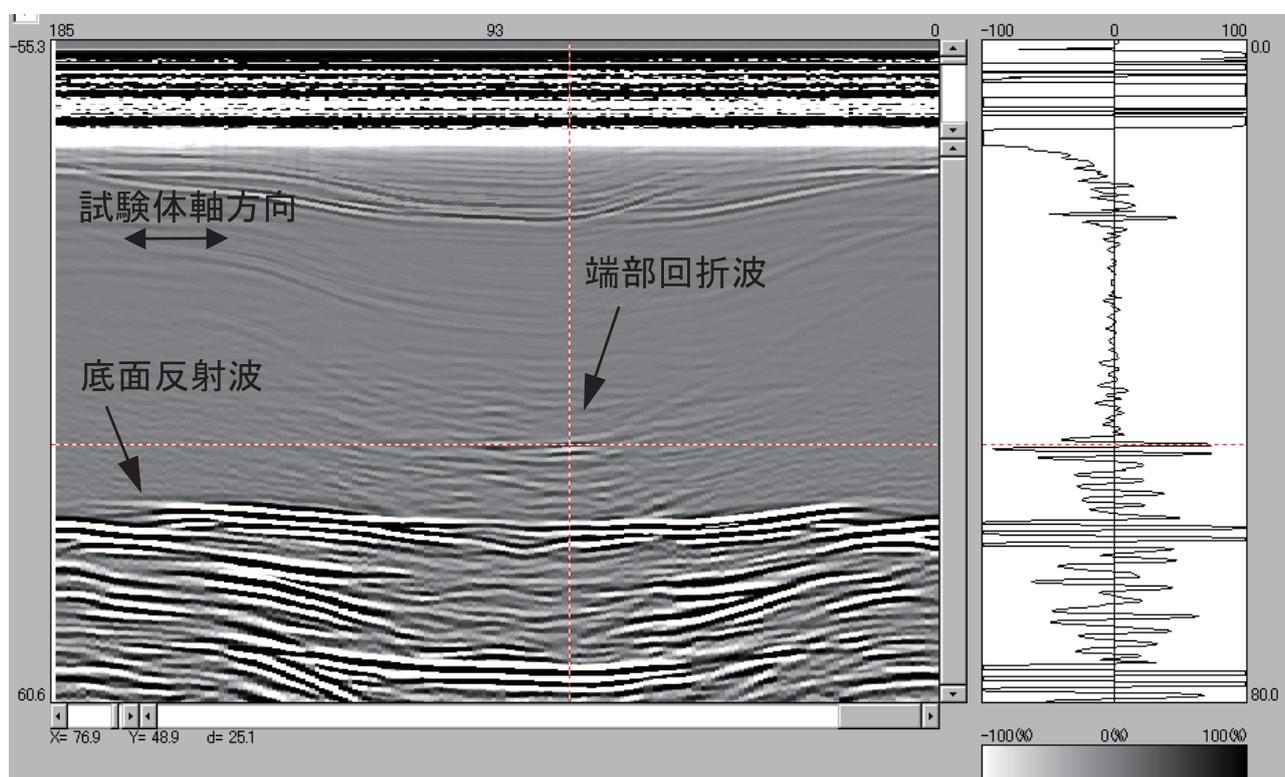


(2) 35t×600A No.2 疲労き裂 (5 MHz / 64 エLEMENT 探触子)

図 12 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面 (疲労き裂)

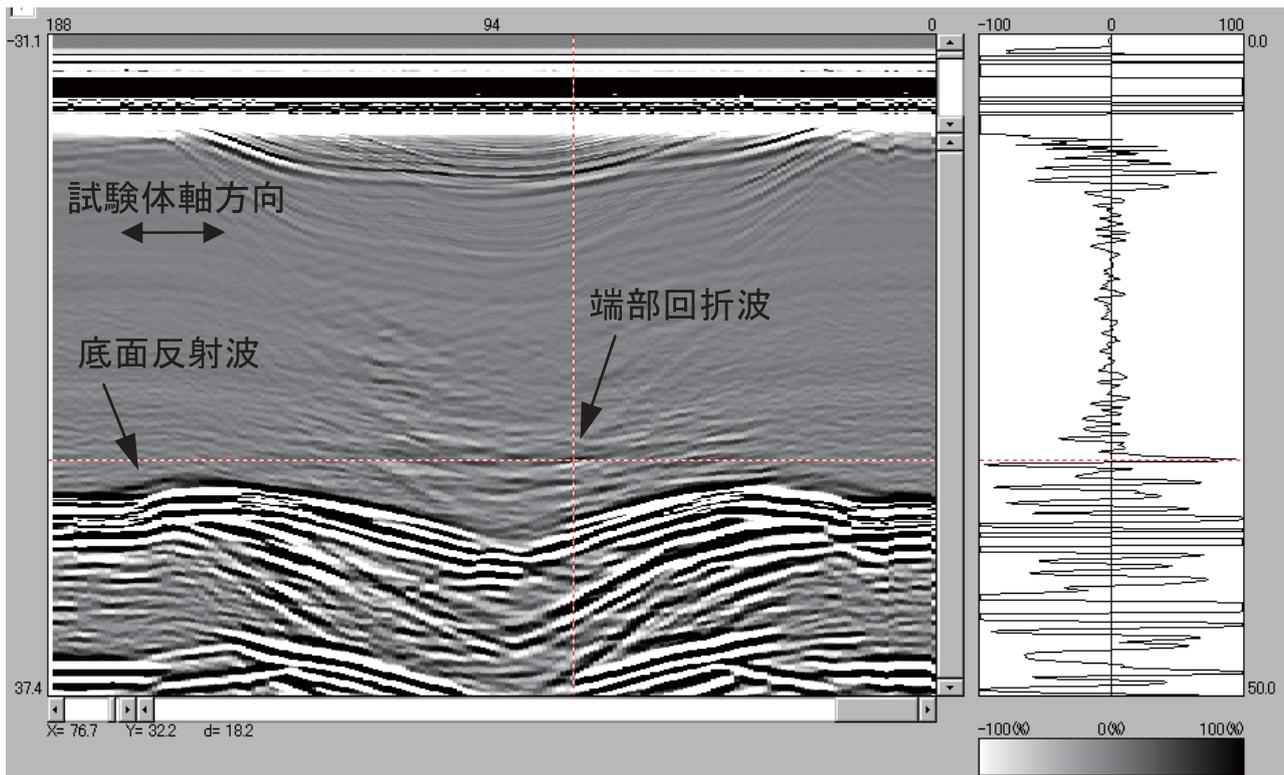


(3) 35t×600 A No.1 疲労き裂 (3 MHz / 64 エLEMENT 探触子)

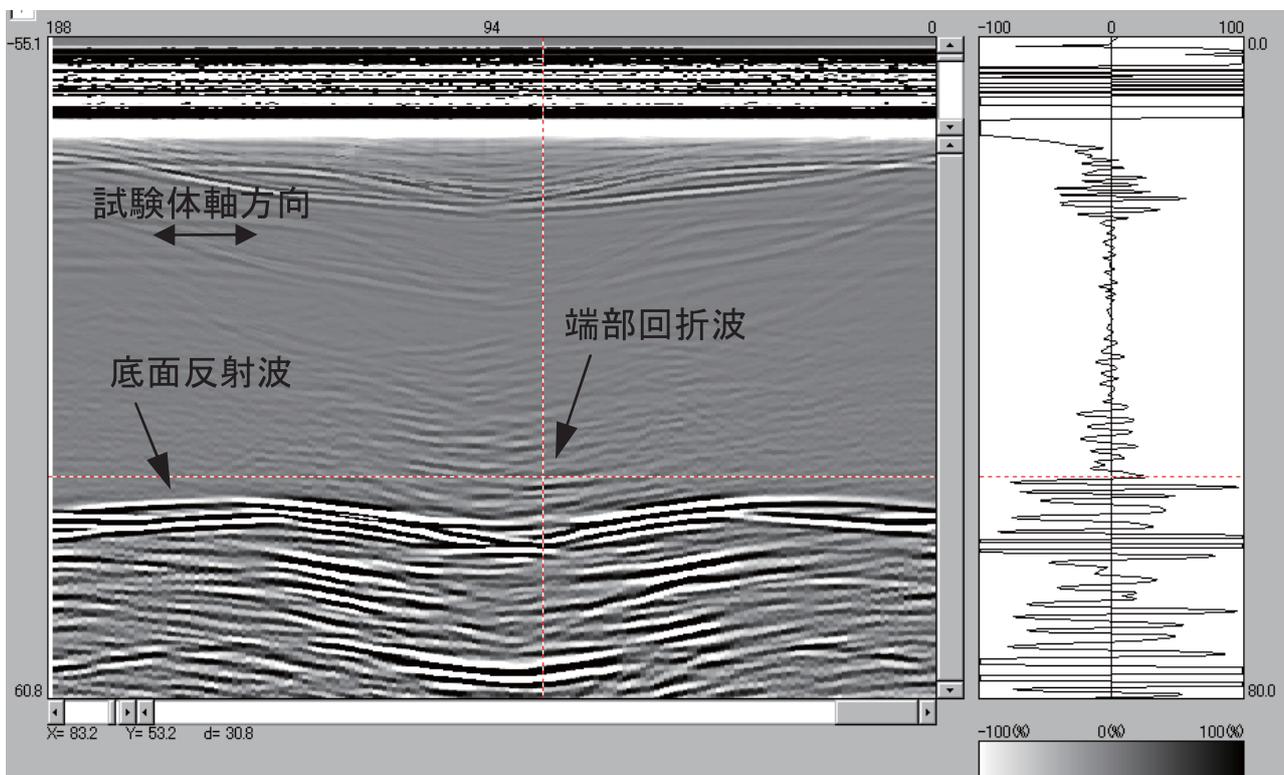


(4) 35t×600 A No.2 疲労き裂 (3 MHz / 64 エLEMENT 探触子)

図 12 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面 (疲労き裂)



(1) 25t×350 A No.2 SCC (5 MHz / 64 エLEMENT 探触子)



(2) 35t×600 A No.1 SCC (3 MHz / 64 エLEMENT 探触子)

図13 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面 (SCC)

周波数 3 MHz の探触子による探傷結果を図 12 の (3) と (4) に示す。No.1 と No.2 の疲労き裂の端部回折波の SN 比は、それぞれ 2.6 と 6.0 であった。減衰の影響を受けにくい低周波数の 3 MHz の探触子を使用することによって、SN 比が向上した。

SCC に対するフェーズドアレイ TOFD 法の探傷画面の例として、25 t × 350 A と 35 t × 600 A 試験体での結果を図 13 に示す。最も厚い板厚である 35 t 試験体の SCC に対しては、3 MHz 探触子により端部エコーを検出、識別することができた。25 t × 350 A 試験体の No.2 と 35 t × 600 A 試験体の No.1 の SCC の端部回折波の SN 比は、それぞれ 2.4 と 3.4 であった。

EDM スリット、疲労き裂および SCC に対するフェーズドアレイ TOFD 法による深さ測定値を図 14 に示す。EDM スリットの深さに対する測定値の誤差は、深さ 10 mm の EDM スリットに対する場合の 0.7 mm が最大であった。疲労き裂については、深さ 11 mm のものに対して、5 MHz 探触子の場合の誤差 2.1 mm が最大であったが、3 MHz 探触子の条件により誤差 0.1 mm の深さ測定値が得られた。SCC については、深さ 9.5 mm のものに対して、5 MHz 探触子の場合の誤差 2.6 mm が最大であったが、3 MHz 探触子の条件により誤差 1.6 mm の深さ測定値が得られた。

周波数 5 MHz 探触子に代えて 3 MHz のものを使用することによって、端部回折波の SN 比の向上と深さ測定精度の向上する結果が得られた。

これまで TOFD 法の適用が困難であった厚さ 35 mm の試験体について、周波数 3 MHz の探触子により、

疲労き裂に対して最大の誤差 0.2 mm、SCC に対して最大の誤差 1.6 mm の測定値が得られた。

深さ測定精度の目標である欠陥深さに対して - 4.4 mm と RMS 誤差 3.2 mm に相当する線を、図 14 の中に示した。フェーズドアレイ TOFD 法による深さ測定値は、これらの目標に相当する範囲内であった。

#### 4. おわりに

1 個のアレイ探触子により超音波の送受信を行なう、フェーズドアレイ TOFD 法を開発し、ステンレス鋼平板試験体母材の EDM スリットにより深さ測定に係る基礎的な特性を調べ、ステンレス鋼溶接部配管試験体による欠陥の深さを測定した。得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) ラテラル波が識別できないような場合に、底面反射波によりラテラル波伝播時間を算出することによる深さ測定値算出方法を考案し、欠陥深さに対して 0.2 mm の誤差で算出が可能であった。
- (2) 欠陥の先端位置の深さに対して、超音波ビーム軸の交点深さが上下方向に 4 mm ずれた場合の深さ測定値の誤差は最大で 0.3 mm、超音波ビームの集束程度による深さ測定値の誤差は、最大で 0.2 mm であった。
- (3) 端部回折波は、欠陥先端の深さ位置に超音波ビーム軸を交差させた場合、最も高いエコー高さが得られ、欠陥先端の深さ位置に対して超音波ビーム軸の交点深さが上下方向に 4 mm ずれた場合に最大 -6.8 dB 低下することがわかった。
- (4) PWR 発電所におけるオーステナイト系ステンレス鋼配管の最大板厚 35 mm に相当する厚さの溶接部に対して、疲労き裂および SCC の端部回折波を、SN 比 2.4 以上で検出することができた。
- (5) ステンレス鋼溶接部試験体の欠陥の深さ測定値の誤差は、最大で 1.6 mm であった。

アレイ探触子を用いたフェーズドアレイ TOFD 法は、TOFD 法が本来持つ特徴である高い深さ測定精度を損なうことなく、これまでその適用が困難とされてきた厚板のステンレス鋼溶接部に十分適用可能であることを明らかにした。このことは、ステンレス鋼配管溶接部で欠陥が検出された際に、その寸法評価を行うために適用すべき深さ測定手法として有

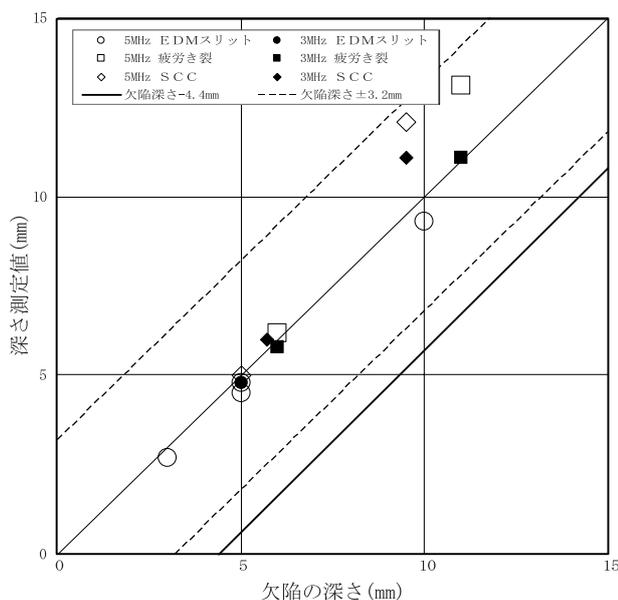


図 14 ステンレス鋼溶接部配管試験体 深さ測定結果

効なものである。

今後さらにSN比の改善による端部回折波の識別性を向上させるために、アレイ探触子の改良と探傷条件の最適化を図るとともに、PWR発電所の実機配管に適用可能な自動探傷装置の開発を進める予定である。

## 文献

- (1) M. G. Silk, "The role of ultrasonic diffraction in NDT," Proceeding of the 28th Annual British Conference in NDT, (1989).
- (2) M. G. Silk, "Sizing crack-like defects by ultrasonic means," Research Techniques in Non-destructive Testing, Vol. III, Academic Press, (1977).
- (3) M. G. Silk, "Defect sizing using ultrasonic diffraction," British Journal of Non-Destructive Testing, 21[1], p.12-15(1979).
- (4) British Standard Institution, "Guide to calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws," British Standard BS 7706, (1993).
- (5) (社)日本非破壊検査協会, 日本非破壊検査協会規格 NDIS 2423-2001 TOFD法によるきず高さ測定方法, (2001).
- (6) (社)日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格 (2004年版), (2004).
- (7) (社)日本電気協会, 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針, JEAG 4207-2004, (2004).
- (8) 河野克己, 井坂克己, 谷岡修二, 三原田八水, "配管疲労割れに対する超音波探傷試験の検査能力", 日本非破壊検査協会平成16年度秋季大会講演概要集, p.9(2005).
- (9) 河野克己, 井坂克己, 佐藤正俊, 三原田八水, "応力腐食割れに対する超音波探傷試験の検査能力", 日本非破壊検査協会平成17年度春季大会講演概要集, p.9(2005).
- (10) M. Tooma, N. Kouno, M. Koike, "A new ultrasonic inspection method using crossed active focus scanning for crack sizing," The 3rd International Conference on Non-destructive Testing of the Hellenic Society for NDT, Chania, Crete, Greece, 15-18, Oct. 2003, p.140(2004).
- (11) (社)日本非破壊検査協会, 日本非破壊検査協会規格 NDIS 0603-2005 超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証, (2005).
- (12) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Division 1, Appendix , Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems, (2004).