

送受信分割型マトリクスアレイ超音波探触子による ステンレス鋼溶接部欠陥深さ測定技術の開発

Development of Depth Measurement Technique for Flaws
in Stainless Steel Weld Zones
with A Twin Matrix Array Ultrasonic Transducer

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)* 黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)* 藤井 登 (Noboru Fujii)*

要約 超音波の散乱減衰が顕著であるオーステナイト系ステンレス鋼溶接部において、溶接金属を通過した側から深さ測定が可能な、送受信分割型マトリクスアレイ超音波探触子によるステンレス鋼溶接部欠陥深さ測定技術を新たに開発した。

この方法は、アレイ振動子を2行16列のマトリクス状に配列したマトリクスアレイ探触子2個1組を用いて、それぞれが送信と受信を別々に行なう方式のフェーズドアレイ法である。これによりステンレス鋼溶接部配管試験体の欠陥の深さを測定する実験を行い、以下のような結果を得た。

(1) 板厚25mmまでの範囲のステンレス鋼溶接部において、従来は探傷が困難とされていた溶接金属を通過する側から、疲労き裂と応力腐食割れ (stress corrosion cracking : SCC) のコーナーエコーの検出のみならず、端部エコーを検出することができた。(2) 欠陥の深さ値との誤差は、最大2.6mm、平均値は -0.9mmであった。また、母材側および溶接金属側からの測定値の差は、最大1.5mmであり、良好に一致した。(3) 隣接して存在する複数のSCCの位置を、両方向からの探傷により識別することができ、その深さ測定が可能であった。(4) 溶接部の両側からのSCCの深さ測定により、割れ破面のプロファイルの推定が可能であり、両方向からの測定値の最大誤差は2.6mmであった。

キーワード 超音波探傷試験, フェーズドアレイ法, 送受信分割型, マトリクスアレイ探触子, ステンレス鋼, 溶接部, 疲労き裂, SCC

Abstract Depth measurement technique with a twin matrix array ultrasonic transducer has been developed newly. This technique makes possible to measure flaw depth from a position through a weld of austenitic stainless steel in which region ultrasonic waves scattering is hard

This method is an ultrasonic phased array technique with two matrix array transducers which perform as transmitter and receiver and have array elements arranged in 2 lines and 16 columns respectively. With this method depth measurement testing for stress corrosion cracking (SCC) and fatigue cracks on stainless steel weld pipe specimens were performed.

As the results: (1) Corner echoes and tip echoes from SCCs and a fatigue cracks could be detected from the side through the weld of 25mm thickness stainless steel pipe specimens. (2) The largest error of measurements from crack depth was 2.6mm, the mean error was -0.9mm. And the depth measurements through the weld corresponded to those in base metal with the largest error of 1.5 mm. (3) The locations of three SCCs parallel to each other could be discriminated and crack depth could be measured from both the sides of the weld. (4) Depth measurements for SCCs from both the sides of the weld made possible to draw a profile of a crack, and the largest error from both the sides was 2.6mm

Keywords ultrasonic testing, phased array method, twin transducer, matrix array probe, stainless steel, weld zone, fatigue crack, SCC

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

原子力発電所の設備、機器に対して、健全性評価制度が2003年に導入され、そのために設備の維持に関する規格が制定されている⁽¹⁾。これによると、供用期間中検査において容器や配管などで欠陥が検出された際に、その設備の継続使用の可否を評価するためには、欠陥の深さを同定することが必要である。

加圧水型原子力発電所の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。オーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接部の欠陥に対して、超音波探傷試験によりその深さを測定する際、溶接金属部の柱状晶組織による超音波の散乱と曲がりによって⁽²⁾⁽³⁾、欠陥の深さ測定に不可欠である欠陥の端部エコーとノイズエコーの識別が容易ではない。

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の欠陥深さ測定の方法として、端部エコー法、TOFD (time of flight diffraction) 法、フェーズドアレイ法などの適用と、これらの複数の方法または複数の測定条件により測定を行ない、総合的に評価することが規定されている⁽⁴⁾。

しかし、ステンレス鋼溶接部において、探傷方向すなわち超音波を入射させる方向として、欠陥に対して母材側から超音波を入射させる方法と溶接金属部を通過する側から入射させる方法のうち、後者の方法による測定は、フェーズドアレイ法を用いても困難である⁽⁵⁾。実機配管の必ずしも両方向から探傷ができるとは限らないような多様な環境を想定すると、探傷方向に関わらず深さ測定ができるような技術が望ましいと考えた。

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼配管

溶接部において、母材側からだけでなく溶接部を通過する側からも欠陥の端部エコーを的確にとらえ、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による欠陥深さ測定技術を開発した。国内外の超音波探傷試験に係る技術者の資格試験の判定基準を目安に、真の欠陥深さに対して4.4mmを超えて過小に測定されないこと⁽⁶⁾、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⁽⁶⁾⁽⁷⁾を欠陥の深さ測定精度の目標とした。

開発したフェーズドアレイ法による欠陥深さ測定手法は、(1) 送受信ビームの交束範囲でのエコーのSN比向上を図るために、アレイ探触子を送信用と受信用に別個に使用すること、(2) 超音波入射方向に対してアレイ振動子を前後左右方向に配列したマトリクスアレイ探触子を使用すること、を特徴としている。

2. 試験装置

2.1 フェーズドアレイ法の原理

フェーズドアレイ法による超音波ビームの制御の原理を図1に示す。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使用して、各エレメントの励振の時期を電子的に制御することにより、各エレメントからの超音波を合成して種々の超音波ビームの発生が可能である。1列に配列されたエレメントを、図1の(1)に示すようにエレメント配列の一方の端から順番に一定の時間間隔でずらして励振する場合、それぞれのエレメントからの超音波を合成することにより、あたかも1個の斜角探触子から発生するような超音波ビー

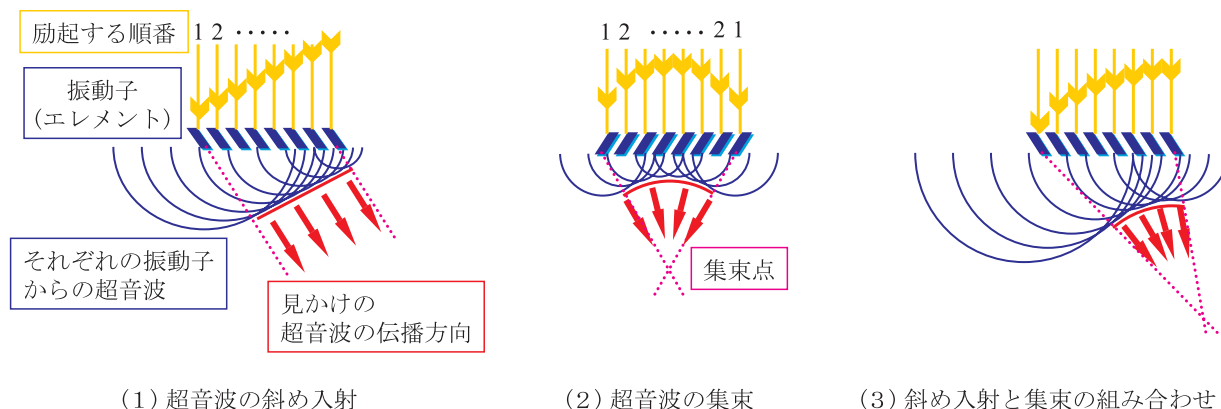


図1 フェーズドアレイ法による超音波ビームの制御の原理

ムとすることができる。次に、同じ図の(2)のように、エレメント配列の両端から順番に時期をずらして励振することにより、集束する超音波ビームにすることも可能である。さらに、これらを組み合わせて、超音波ビームを斜めに入射させての集束も可能である。すなわち、配列されたエレメントの励振する順番と時期を制御することによって、超音波ビームの任意の屈折角での入射と任意の深さ位置での集束が可能である。

フェーズドアレイ法による超音波ビームの走査方法の例を図2に示す。この図の(1)は、入射点を要とする扇形の範囲に、超音波ビームを異なる屈折角により移動させるセクタ走査を示す。同じ図の(2)は、一定の屈折角の超音波ビームを、入射点を移動させることにより平行に移動させるリニア走査を示す。

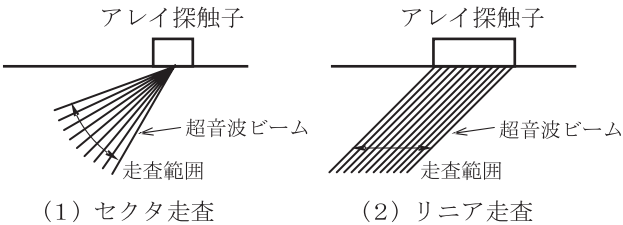


図2 フェーズドアレイ法による超音波ビームの走査方法の例

2.2 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。後述するように、本装置は、マトリクスアレイ探触子を送信用と受信用にそれぞれ使用して探傷が可能な条件設定機能も有している。このマトリクスアレイ探傷機能に関する基本仕様を表2に示す。

探触子には、エレメントを超音波入射方向に対して、前後左右方向に配列したマトリクス配列型と、前後方向のみの1行に配列したリニア配列型を使用することが可能である。エレメント数が32個までのマトリクス配列型アレイ探触子を使用可能で、32個までの範囲内であらかじめ設定された行数と列数によるエレメント配置を選択可能である。

走査方法としてセクタ走査が可能で、扇の広がりに対応する走査範囲を屈折角により設定し、さらに超音波ビームの集束点の深さの設定が可能である。これらの屈折角と集束点深さの設定を組み合わせることで、扇形のセクタ走査範囲内の網羅的な探索が可能である。

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 |
| 走査 | リニア走査, セクタ走査 |
| 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 μs (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 マトリクスアレイ探傷機能に関する基本仕様

| | |
|----------------|--|
| 使用可能探触子 | マトリクス配列型, リニア配列型 |
| 使用エレメント数 | 30, 32, 22個 (マトリクス型使用時) 1 ~ 128個 (リニア型使用時) |
| エレメントの行数 × 列数* | 2 × 16, 2 × 11, 3 × 10, 4 × 8, 5 × 6 (マトリクス配列型) 1 × 32 (リニア配列型) |
| 設定項目 | 屈折角, 集束点の深さ, 使用エレメントの位置と数 |

*: 超音波入射方向に対して左右方向のエレメント数 × 前後方向のエレメント数を示す

2.3 フェーズドアレイ探触子

本研究で対象としたステンレス鋼溶接部は、超音波の散乱減衰が著しいことから、超音波の送受信に別個の探触子を使用する送受信分割方式を採用した。これは、両探触子の超音波ビーム交束範囲において高いSN比による反射源の検出が期待できるためである。

送受信分割型マトリクスアレイ探触子の概念図を図3に示す。超音波入射方向に対して前後方向においては、この方向でのエレメント配列により、異なる屈折角 θ_1 と θ_2 および異なる集束点深さ d_A と d_B の、焦点 $A1, B1, A2$ および $B2$ に超音波ビームを集束させることが可能である。超音波入射方向に対して左右方向における超音波ビームは、異なる集束点深さ d_A と d_B に集束する場合に、左右方向での異なる屈折角 θ_A と θ_B により入射することになる。したがって、左右方向においても異なる深さ位置に超音波ビームを集束させるために、左右方向にもエレメント配列をもつマトリクスアレイ探触子を使用した。

超音波の入射方向に対して左右方向に2行、前後

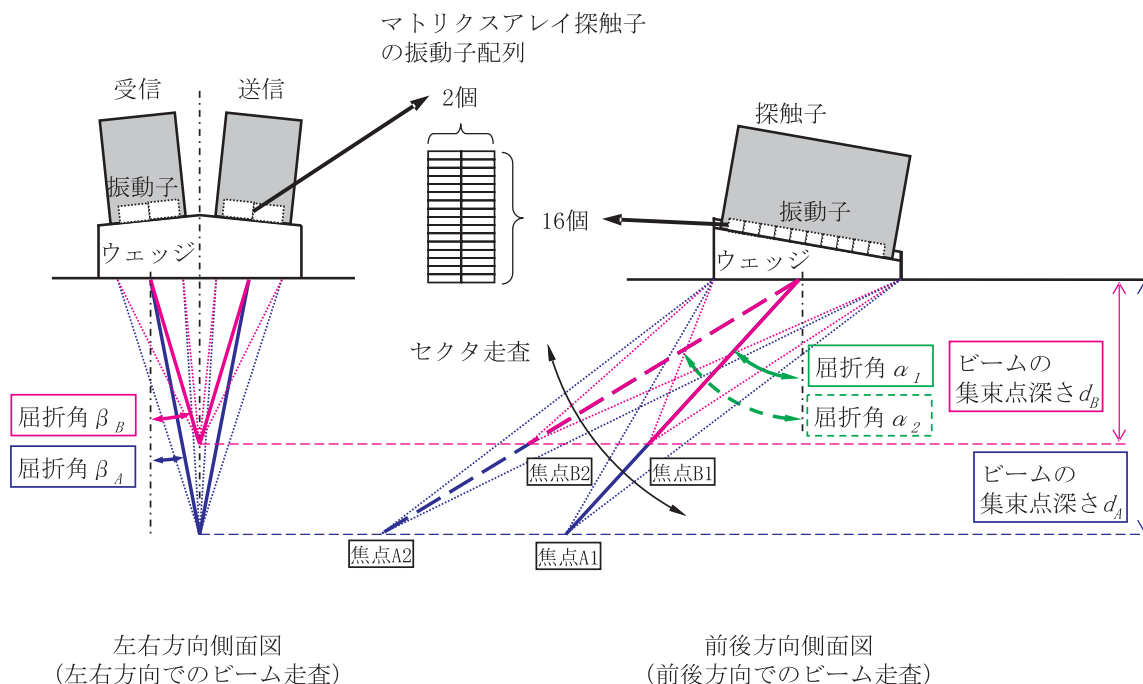


図3 送受信分割型マトリクスアレイ探触子の概念図

方向に16列の配置(以下 2×16)で、合計32個のエレメントを持つマトリクスアレイ探触子2個1組を、曲率のある探傷面に適合させたウェッジの上面に保持した。ウェッジは、前後方向には入射角に相当する傾斜を持ち、左右方向には送信と受信の超音波ビーム軸を交差させるために、中心線を峰とする屋根型の傾斜を持つ。また、試験体の曲率、板厚に合わせたウェッジを数種類用意し、選択して使用した。

送受信分割型マトリクスアレイ探触子の外観写真を図4に示す。



図4 送受信分割型マトリクスアレイ探触子の外観

2.4 試験体

ステンレス鋼溶接部配管試験体を図5に示す。この試験体は、軸方向中心位置で周方向に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。放電加工(electric discharge machining, EDM)スリット、疲労き裂およびSCCについて、それぞれ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である。

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用具を取り付け、高温高圧水ループに浸漬させることにより、SCCを

表3 ステンレス鋼溶接部配管試験体付与欠陥寸法

| 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) |

*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

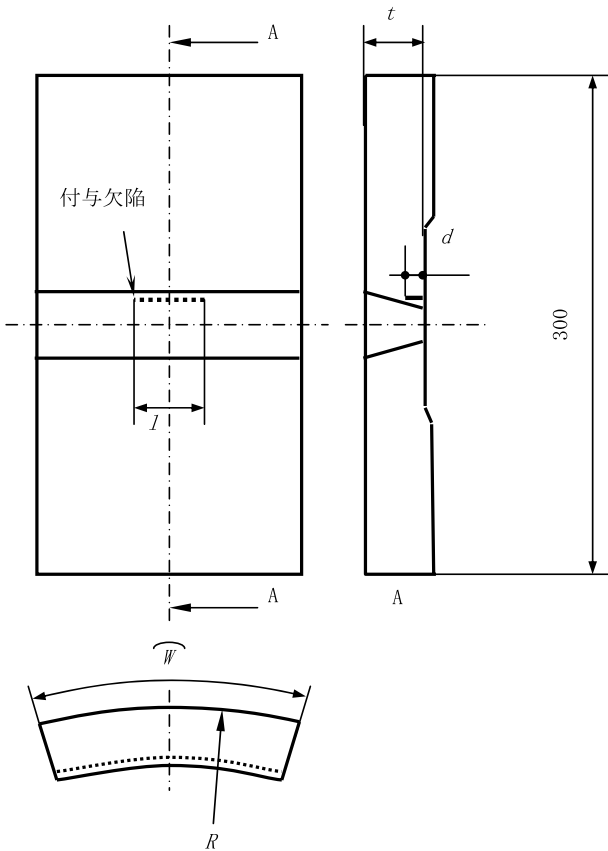


図5 ステンレス鋼溶接部配管試験体

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6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。

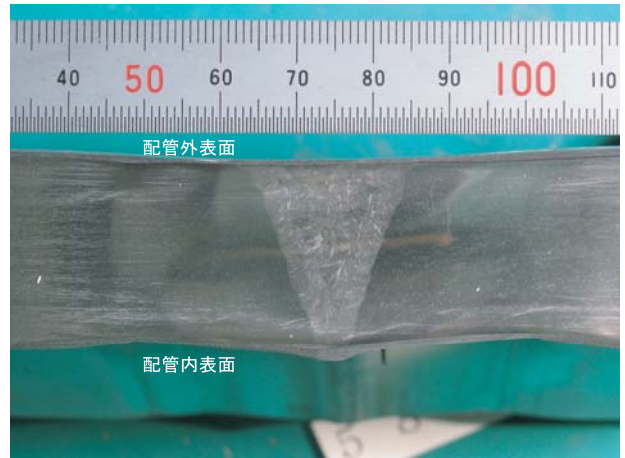


図6 ステンレス鋼溶接部配管試験体の溶接部断面

2.5 実験の方法

送受信分割型マトリクスアレイ探触子による深さ測定の実験条件を表4に示す。

表4 深さ測定条件

| | |
|-------------|---|
| 使用探触子 | 周波数 2.25 MHz, 縦波, 2行 x 16列マトリクスアレイ探触子 |
| 使用エレメント数 | 32個 |
| 屈折角 | 30度 ~ 60度 |
| 焦点深さ | 試験体の底面から欠陥先端位置を含む範囲 |
| 探傷方向 / 走査方向 | 配管軸方向に超音波入射 溶接部に対して両方向から探傷 軸方向または周方向に移動走査 |
| 探傷データ採取ピッチ | 軸・周方向ともに 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 |

2組のステンレス鋼溶接部配管試験体 (15t×300A, 25t×350A) のEDMスリット、疲労き裂およびSCCについて、深さ測定の実験を行なった。探触子として、周波数2.25MHzの縦波を使用する、エレメント配列が2行×16列のマトリクスアレイ探触子2個1組を使用した。

探傷方向すなわち超音波の入射方向は、周方向に付与された欠陥に対して直交する配管軸方向であり、探触子の移動走査も配管軸方向を基本とした。欠陥面と材料表面とで構成されるコーナーからの反射波と欠陥先端の端部回折波は、欠陥の長さ方向に探触子を移動しても連続して観察される。これにより、周方向への探触子の移動走査による探傷を実施することによって、周方向の欠陥からの反射波または端部回折波の識別を行なった。

3. 試験結果および考察

25t×350A試験体のEDMスリットNo.1に対するフェーズドアレイ探傷画面の例を図7に示す。この図のそれぞれの探傷画面において、左側の扇形の画像は、屈折角30度から60度までのセクタ走査の探傷画面である。この画面の中の赤い傾斜線は、屈折角45度の超音波ビームの軸に相当する。右側の画面の受信波形は、この屈折角45度の超音波ビームがとらえたものである。溶接部に対する探傷方向の説明を図7の(3)に示す。超音波を溶接部に対して母材側から入射させた条件がこの図の(1)であり、屈折角45度の超音波ビームがコーナーエコーをとらえた結果が(a)、端部エコーをとらえた結果が(b)である。同じ図の(2)は、超音波を溶接金属を通過する側から入射した条件であり、このうち(a)は、EDMスリットのコーナー近傍の溶接裏波からのエコーを、(b)は端部エコーをとらえた結果である。

EDMスリットの端部エコーを、溶接金属部を通過する側からの探傷においても、明瞭に識別することができた。この端部エコーの識別性を、母材側からと溶接金属を通過する側からのエコー高さの比および端部エコー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。溶接金属部を通過する側から測定した端部エコーは、母材側からの探傷の場合に比べて、エコー高さは3.2dB低い、SN比は6.0であった。

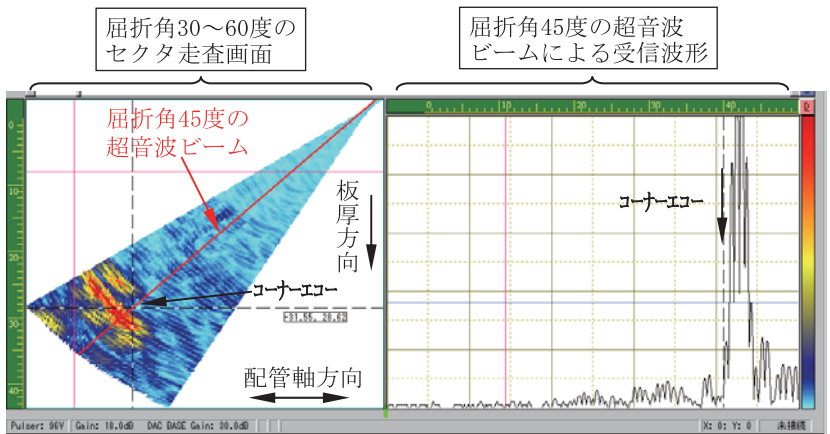
25t×350A試験体の疲労き裂No.1に対するフェーズドアレイ探傷画面の例を図8に示す。母材側から

の探傷した場合の疲労き裂の端部エコーは、図7の(1)に示したEDMスリットのものに比べて、エコー高さは、8.3dB低い。溶接金属部を通過する側から測定した疲労き裂の端部エコーの高さはさらに3.1dB低いが、SN比は4.2であり、十分な識別性があった。

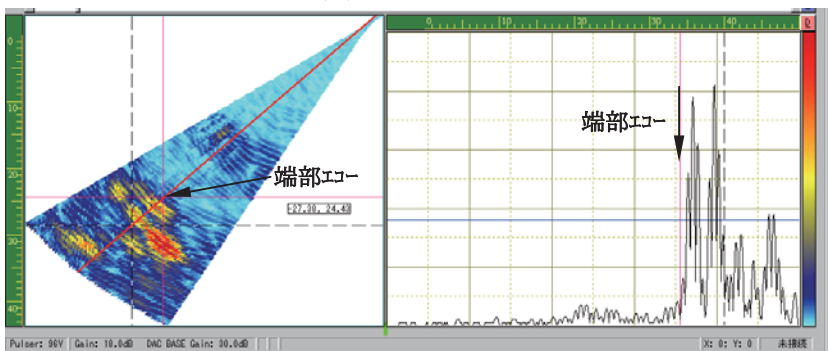
25t×350A試験体のSCC No.1に対するフェーズドアレイ探傷画面を図9に示す。溶接金属部を通過する側から測定したSCCの端部エコーは、図8の(2)に示した疲労き裂のものと同じエコー高さが得られた。SN比は2.5であった。

EDMスリット、疲労き裂およびSCCに対する深さ測定の結果を図10に示す。EDMスリットの深さに対する測定値の誤差の最大は、母材側から測定の場合1.8mm、溶接金属側から測定の場合1.9mmで、いずれも過小評価値であった。また、母材側と溶接金属側の測定値の差は、最大で0.2mmであった。疲労き裂に対しては、母材側から測定の場合1.7mm、溶接金属側から測定の場合2.6mmの過小評価値が測定された。また、母材側と溶接金属側の測定値の差は、最大で1.1mmであった。SCCの深さに対する測定値の誤差の最大は、母材側から測定の場合-2.0mm、溶接金属側から測定の場合2.1mmであった。また、母材側と溶接金属側の測定値の差は、最大で1.5mmであった。

深さ測定精度の目標である欠陥深さに対して-4.4mmとRMS誤差3.2mmに相当する線を、図10の中に示した。送受信分割型の周波数2.25MHz/2×16マトリクスアレイ探触子による深さ測定値の誤差は、最大2.6mm、平均値は-0.9mmで、これらの目標に相当する範囲内であった。

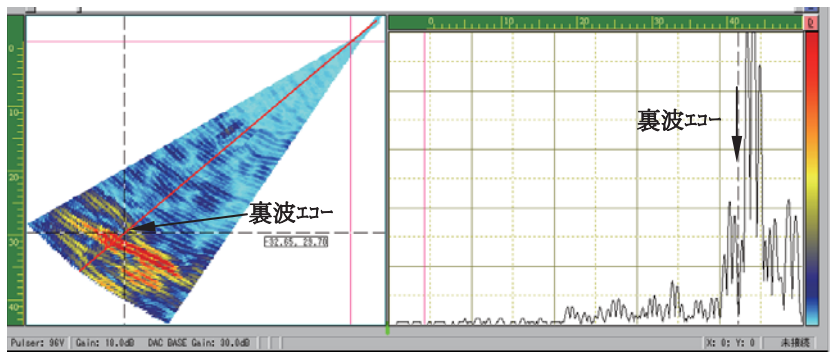


(a) コーナーエコー

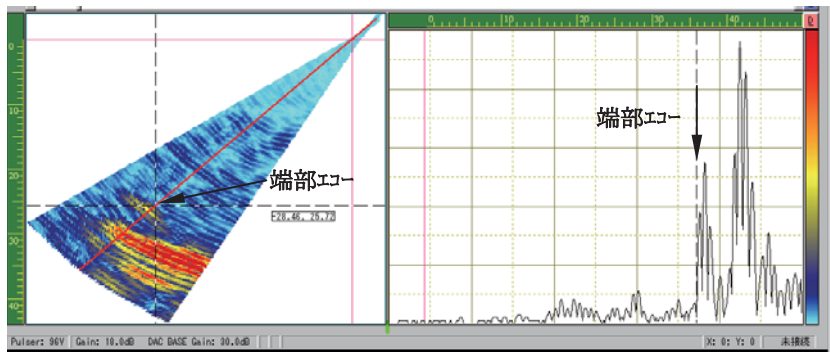


(b) 端部エコー

(1) 母材側からの探傷結果

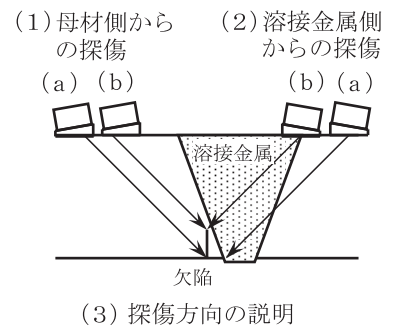


(a) 裏波エコー



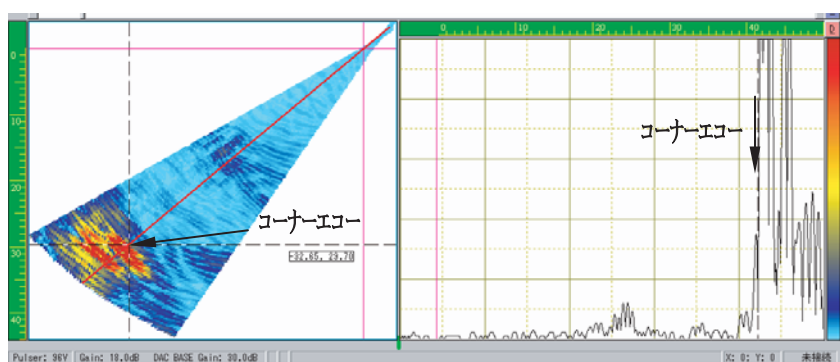
(b) 端部エコー

(2) 溶接金属側からの探傷結果

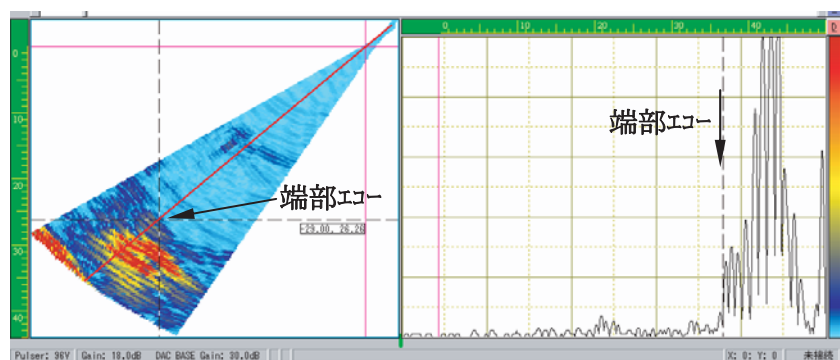


(3) 探傷方向の説明

図7 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面
(25t×350A試験体/EDMスリットNo.1)

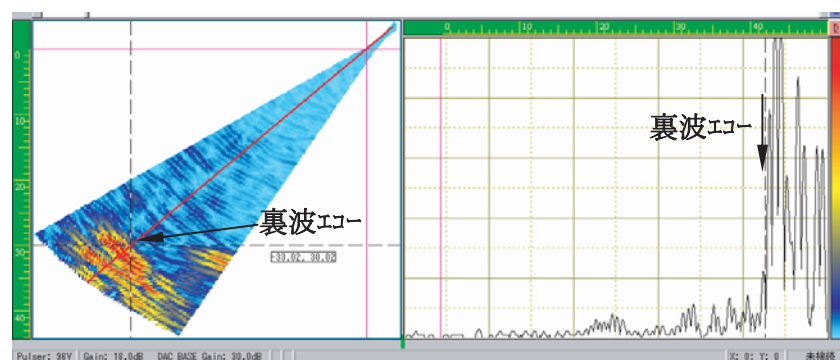


(a) コーナーエコー

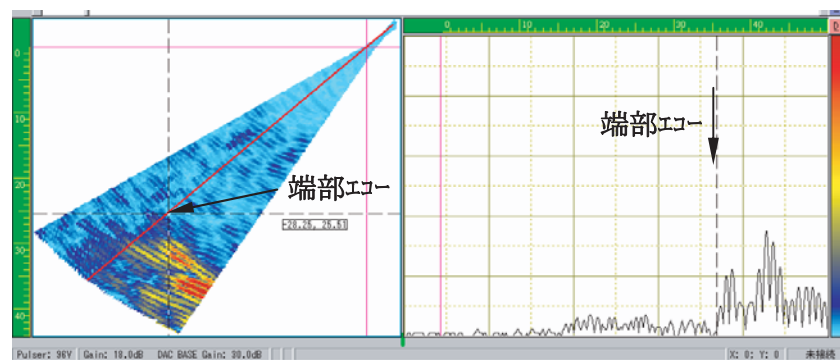


(b) 端部エコー

(1) 母材側からの探傷



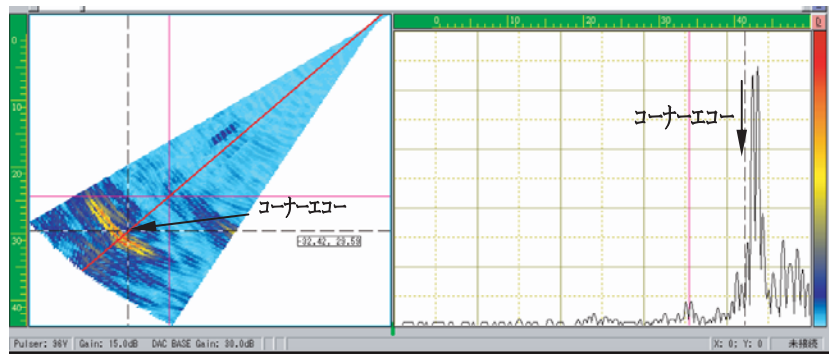
(a) 裏波エコー



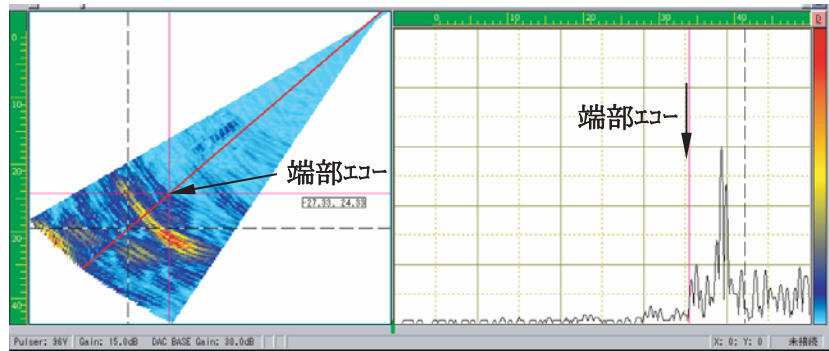
(b) 端部エコー

(2) 溶接金属側からの探傷

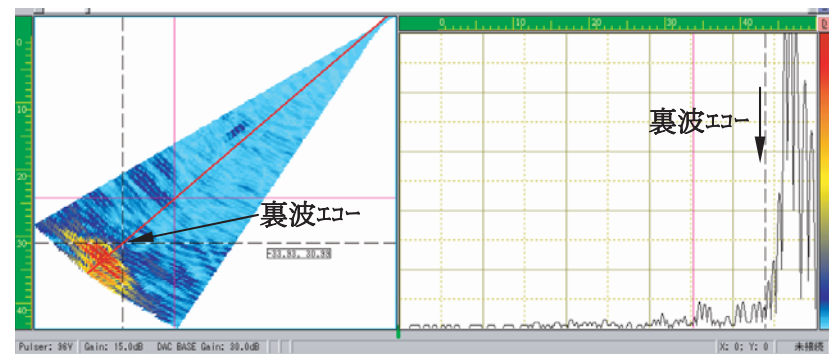
図8 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面
(25t×350A 試験体/疲労き裂 No.1)



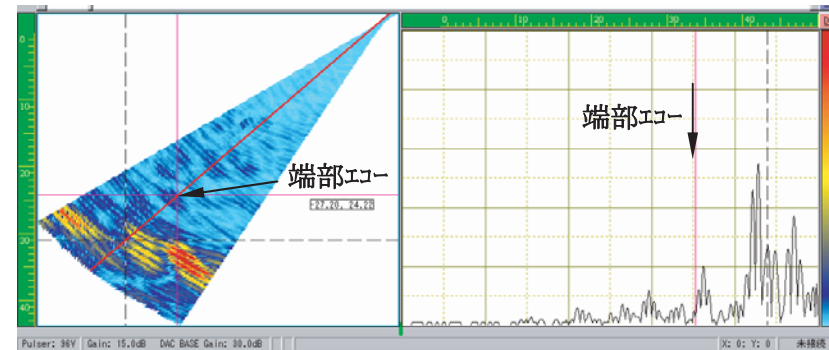
(a) コーナーエコー



(b) 端部エコー
(1) 母材側からの探傷



(a) 裏波エコー



(b) 端部エコー
(2) 溶接金属側からの探傷

図9 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面
(25 t x 350 A 試験体 / SCC No.1)

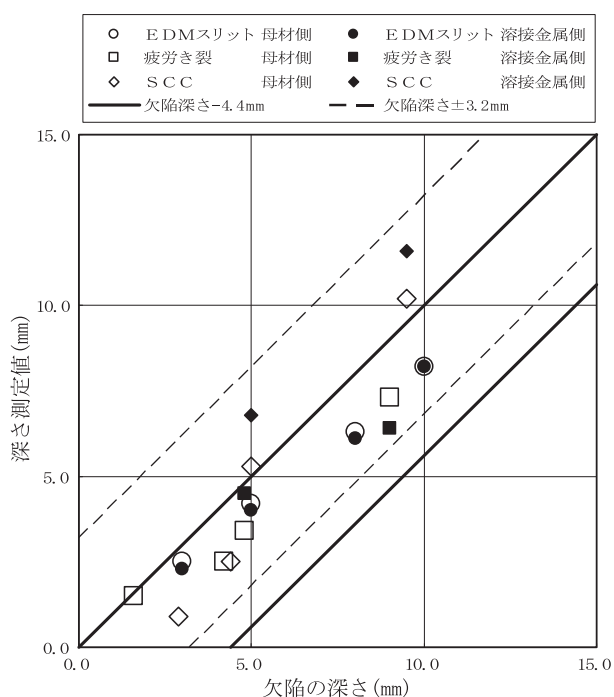


図10 ステンレス鋼溶接部配管試験体 深さ測定結果

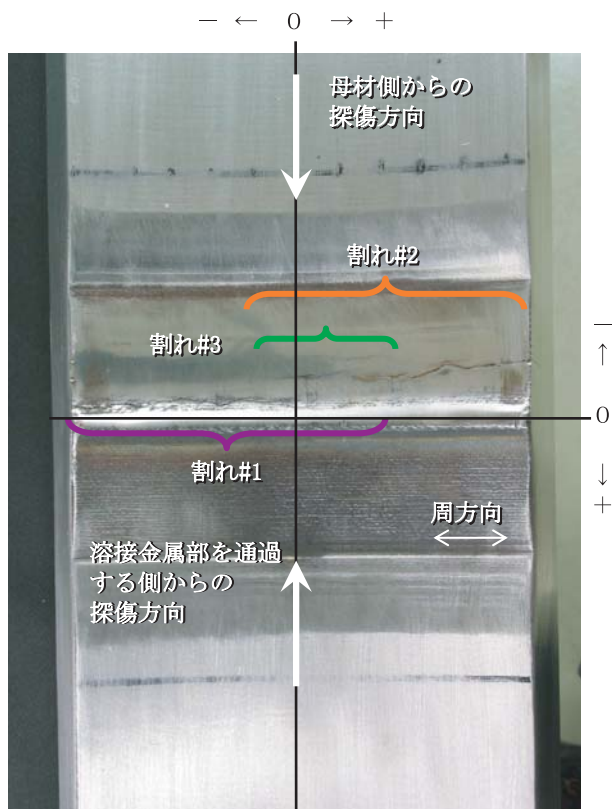


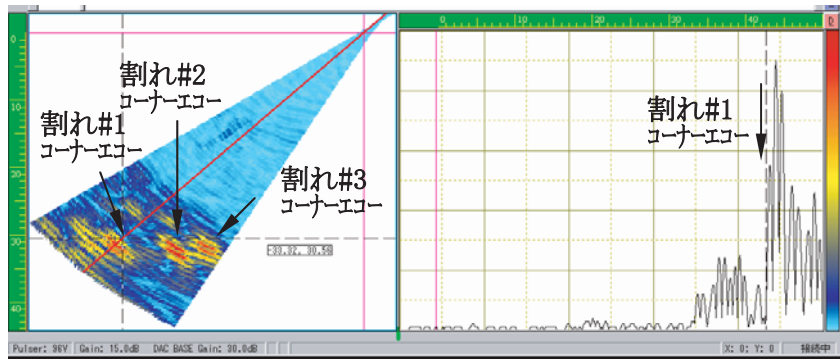
図11 25t×350A SCC No.2試験体 内表面外観

25t×350A試験体のSCC No.2は3個の割れが、試験体周方向全域に存在する。この25t×350A No.2 SCC試験体の内表面外観写真を図11に示す。裏波に最も近い位置の試験体周方向 - 側端面からの割れを#1, 周方向 + 側端面からの割れを#2, 最も裏波より遠い位置の周方向中心から + 側の範囲の、他の割れより短い割れを#3, とする。この試験体について、周方向に5mm間隔の位置で、軸方向走査により深さ測定を行ない、割れの周方向での深さ分布の測定を試みた。

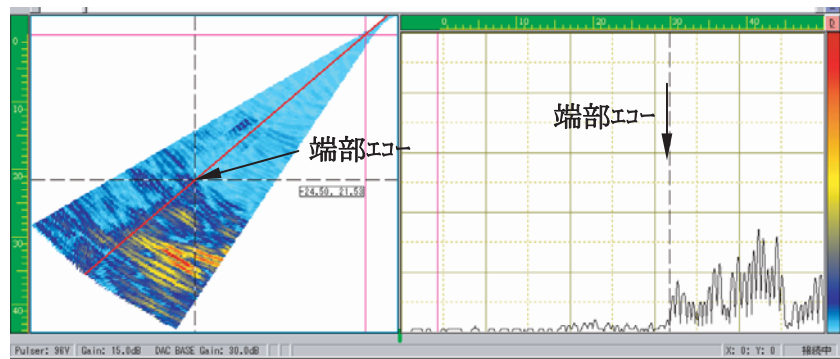
周方向中心位置での母材側および溶接金属側からの探傷結果をそれぞれ図12と図13に示す。図12に示すように、母材部からの探傷では、3個の割れのコーナーエコーと端部エコーが明瞭に検出され、識別できた。図13に示すように、溶接金属側からの探傷では、割れ#1, #2の割れについては、コーナーエコーと端部エコーの識別が可能であった。#3の割れの端部エコーは検出あるいは識別ができなかった。#3の割れは、母材側からの探傷においても、端部エコーのSN比は2.6であったことから、溶接部を通過する側からの探傷の場合には、さらに端部エコーは弱くなり、識別ができなかったものと考えられる。

周方向に5mm間隔位置で軸方向に探傷した場合の、割れ#1, #2および#3の深さ測定値の結果を図14に示す。この図は、それぞれの割れの周方向での割れの深さ分布を示している。図中には、それぞれの割れについて、内表面からき裂深度計(日本マテック製RMG4015)により測定した深さ値を目安として示している。なお、き裂深度計の測定において、端面近傍では電流が集中して抵抗値が増大し、過大な測定値が得られることから、周方向両端部近傍の±30mm ~ ±50mmの範囲の深さ値はこのような過大傾向のある測定値であると考えられる。

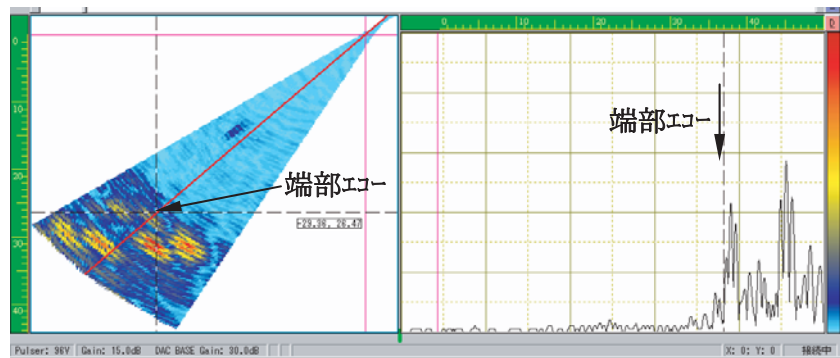
異なる周方向位置においても、母材側および溶接金属側からの深さ測定値は、誤差の最大値は2.6mm, 誤差の平均値は1.2mmであり、良く一致した。また、目安となるき裂深度計による深さ値との誤差の最大は3.3mm, 誤差の平均値は0.8mmであり、良く一致した。



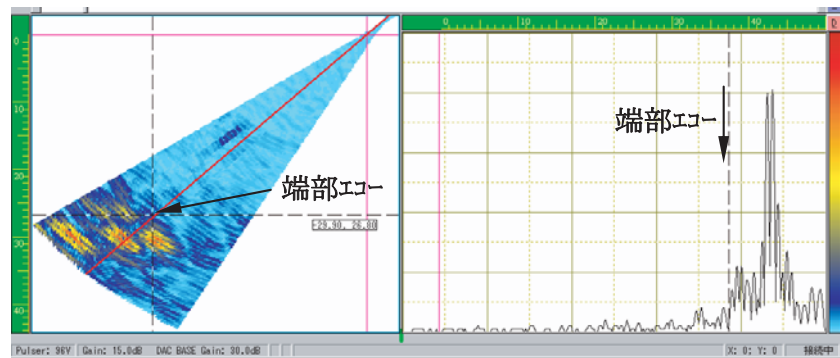
(a) 割れ#1～#3コーナーエコー



(b) 割れ#1端部エコー

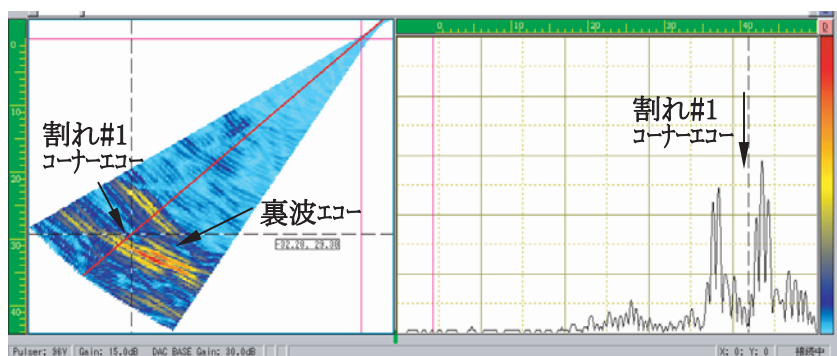


(c) 割れ#2端部エコー

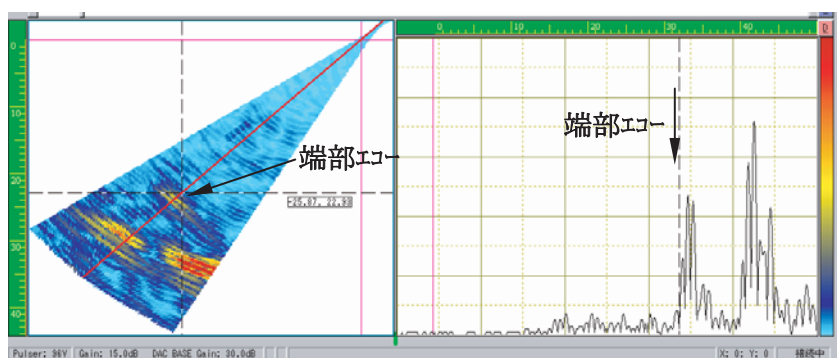


(d) 割れ#3端部エコー

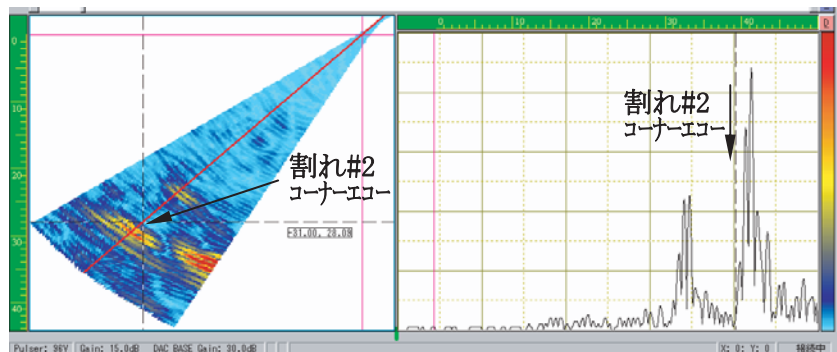
図12 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面
(25t x 350 A 試験体 / SCC No.2 / 母材側からの探傷)



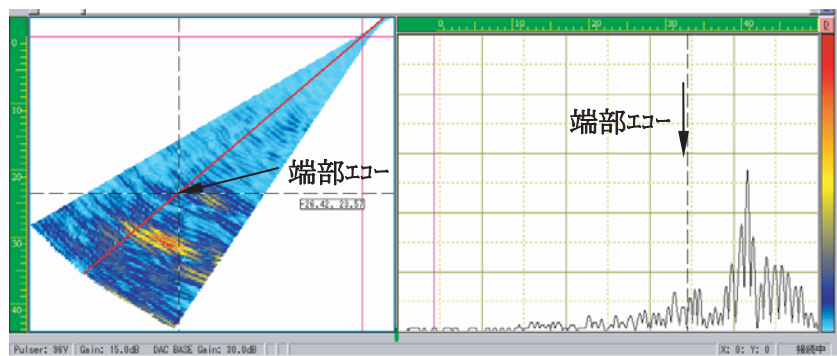
(a) 割れ#1 コーナーエコー



(b) 割れ#1 端部エコー



(c) 割れ#2 コーナーエコー



(d) 割れ#2 端部エコー

図13 ステンレス鋼溶接部配管試験体探傷画面
(25t×350A 試験体 / SCC No.2 / 溶接金属側からの探傷)

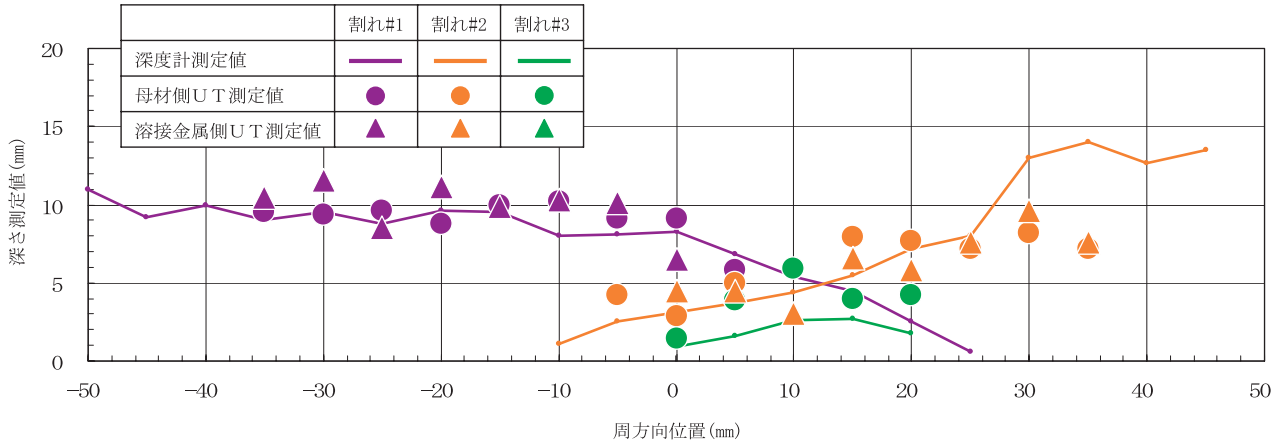


図14 ステンレス鋼溶接部配管 25t×350 A 試験体 SCC No.2 割れ深さの周方向分布測定結果

4. おわりに

超音波の入射方向に対して左右方向に2行、前後方向に16列の合計32個のアレイ振動子を配置したマトリクスアレイ探触子2個1組を使用し、それぞれの探触子が送信と受信を別々に行なう方式、すなわち送受信分割型マトリクスアレイ探触子を用いた欠陥の深さサイジング技術を新たに開発した。これ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実施した。得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 板厚25mmまでの範囲のステンレス鋼溶接部において、従来は探傷が困難とされていた溶接金属を通過する側からの探傷の可能性を示した。特に疲労き裂およびSCCについて、そのコーナーエコーの検出のみならず、欠陥先端からの微弱な回折波である端部エコーを検出することができた。
- (2) ステンレス鋼溶接部試験体の各欠陥に対して、欠陥の深さ値との誤差は、最大2.6mm、平均値は-0.9mmであった。また、母材側および溶接金属側からの測定値の差は、最大1.5mmであり、良好に一致した。
- (3) 隣接して存在する複数のSCCに対する両方向からの探傷では、割れの位置を識別ことができ、深さの小さい割れに対する溶接金属側から探傷する場合を除いて、端部エコーの検出の識別により深さ測定が可能であった。
- (4) 割れの長さ方向に複雑な深さ分布を持つようなSCCに対して、割れの長さ方向における深さ分布を溶接部の両側から測定することができ、その誤差の最大値は2.6mm、誤差の平均値は1.2

mmであり、良好に一致した。これにより、本方法は、割れ破面のプロファイル推定に有効である可能性を見出した。

新たに開発した送受信分割型マトリクスアレイ探触子を用いたフェーズドアレイ法は、欠陥が検出され、その欠陥評価を行なうための深さ測定を行なう際に、母材側からの測定に加えて、溶接金属部を通過する側からの測定を可能にしたものである。さらに、超音波探傷試験による深さ測定に関する技術者の資格試験の判定基準を満足する精度を有する2個の測定値を提供可能としたことで、欠陥の評価と判定において極めて有効である。

今後は、さらに厚板範囲への適用の拡大、端部エコーの識別性の向上および深さ測定精度の向上を図るとともに、PWR発電所での適用を念頭に自動探傷装置等の検討を進める予定である。

文献

- (1) (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).
- (2) J. A. Ogilvy, "Ultrasonic beam profiles and beam propagation in an austenitic weld using a theoretical ray tracing model," *Ultrasonics*, 24[11], 337-347(1986).
- (3) E. Holmes, "Ultrasonic behaviour in austenitic stainless steel," *Applied Material Research*, 2[3], 181 - 184(1963).
- (4) (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).

- (5) M. T. Anderson, S. E. Cumblidge, S. R. Doctor, "Through weld inspection of wrought stainless steel piping using phased array ultrasonic probes," 16th World Conference on Nondestructive Testing, TS2.11.2, Aug.30-Sep.3, 2004, Montreal, Canada (2004).
- (6) (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).
- (7) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Division 1, Appendix , Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems, (2004).