

Adaptive TFM(ATFM)法を用いた溶接余盛上における超音波探傷法の適用検討

川崎 拓^{*1}
Kawasaki Hiraku

溶接線に対して直交方向に進展するきずを検出するため、フレキシブルウェッジを用いた溶接部の余盛上からの超音波探傷を検討した。超音波取得方法に FMC 法を、探傷画像の構築に Adaptive TFM 法を採用することにより、溶接部のきずに対して超音波を集束させることで探傷が可能であることがわかった。

キーワード：超音波探傷、Full Matrix Capture、FMC、Total Focusing Method、TFM、ATFM 法、フレキシブルウェッジ

1. はじめに

超音波探傷技術は、継手溶接内部を非破壊で検査する手法として広く用いられる。当社では、超音波フェーズドアレイ探傷(UPA: Ultrasonic Phased Array) 技術をはじめ、高精度な検査技術を開発し、各種配管の検査工事へ適用している⁽¹⁾⁽²⁾。配管の継手で検査対象となるきずは、溶接線に対して平行方向に進展するきずが主であるため、溶接部近傍の母材表面から超音波を入射する斜角探傷法を主体として開発してきた⁽³⁾。

一方、溶接線に対して直交方向に進展するきずを検出するためには、溶接線に対して平行方向に超音波を入射する必要があり、溶接線上から超音波を入射することが望ましい。しかしその場合、探触子の倣い性を確保するため、溶接余盛の研削作業などに時間を要することが多い。溶接余盛を研削せずに検査が可能であれば、検査作業の効率化が期待できる。

一般的に超音波探傷では、アクリル等を遅延材(ウェッジ)として用いる。しかし、凹凸を有する面での探傷には表面形状に合わせて変形するフレキシブルな遅延材(フレキシブルウェッジ)が必要となる。フレキシブルウェッジを適用した場合、探傷走査ごとに、探触子と試験体表面の距離や角度が変化するため、UPA 法のように任意の点にフォーカスを設定する方法は適用できない。この課題を解決するため、新たな超音波波形処理技術である FMC/TFM(Full Matrix Capture/Total Focusing Method)法を用いた、Adaptive TFM 法(以下、ATFM 法)が提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ここでは、本手法を用いた余盛上探傷の可能性を調査した結果を報告する。

2. ATFM 法

従来の UPA 法は、複数の振動素子をアレイ状に並べ、個々の素子の振動タイミングを電氣的に制御しながら送受信することで、超音波ビームを任

*1：元研究開発センター 研究開発グループ (現株式会社 IHI インフラ建設 鉄鋼事業部 鉄鋼管理部 DX 開発グループ)

意の方向に偏向、集束、連続的に移動させて探傷する技術である。一方、FMC/TFMは、アレイ状に並べた複数の素子を1つずつ個別に振動させてデータを取り、各素子の個別データを解析的に合成する技術である。解析時に合成条件を決めることができるため、より精緻な探傷画像を得ることができる。

今回は、表面形状に合わせて変形するフレキシブルウェッジを試行した。この場合、探傷走査ごとに探触子の角度や試験体表面までの距離が変化する。そこで、FMC/TFM法の特徴を活かし、まず試験体表面の形状と距離を把握し、その後、合成計算を補正する。それにより表面形状の影響が少ない探傷画像を得ることができる。

本研究では、FMC/TFMの探傷装置としてAOS(エーオーエス/アメリカ)社製OEM-PAを使用した。

3. 試験体

使用した溶接継手を有する試験体を図1(a)に示す。配管を模擬し、溶接方向に約300mmのRがついており、板厚は50mmである。図中赤線位置

の裏面、溶接部近傍に4カ所(①~④)、母材部に4カ所(①'~④')の計8カ所にEDMノッチを付与した。溶接部近傍のノッチ①②は図1(b)に示すように溶接部の中心に、ノッチ③④は図1(c)に示すように溶接部横のシーニングに付与した。ノッチの寸法は、幅1.0mm、長さ5.0mm、ノッチ高さは①③①'③'は2.0mm、②④②'④'は4.0mmとした。座標軸は、溶接線に対して平行方向をX、直行方向をY、板厚方向をZとする。

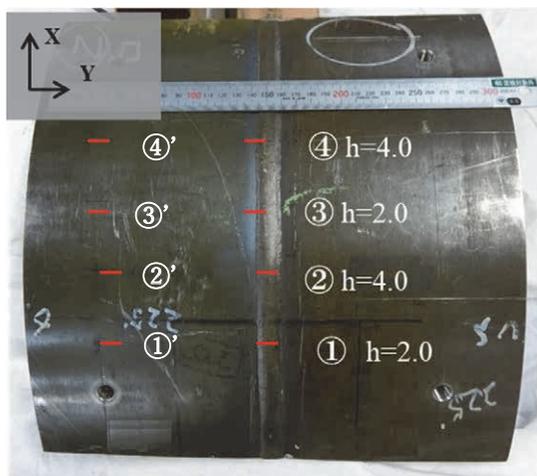
4. 水浸探傷試験を用いたATFM法の基礎的な特性調査

4.1 試験概要

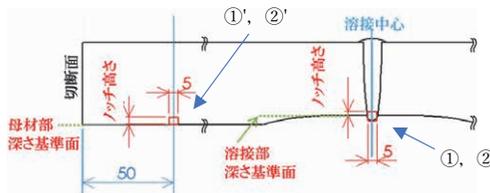
ATFM法の基礎的な特性を調査するため、水浸超音波探傷法を用いて、探触子の傾きや探触子と試験体の距離が固定された状態におけるきず検出性を確認した。

図2(a)に示すように、試験体を水槽内に設置し、XYステージに探触子を固定した。探触子は3MHz、128素子のリニアアレイ探触子を使用し、探触子中心と試験体表面の距離(水距離)はおよそ20mmに固定した。

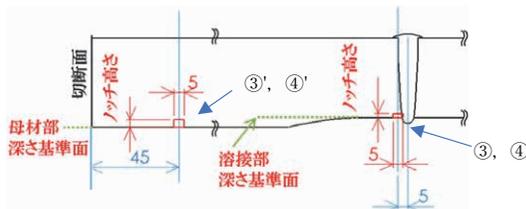
探触子は、長手方向を溶接線と平行にセットし



(a) 試験体写真



(b) ノッチ①'、②'、①、②付与位置

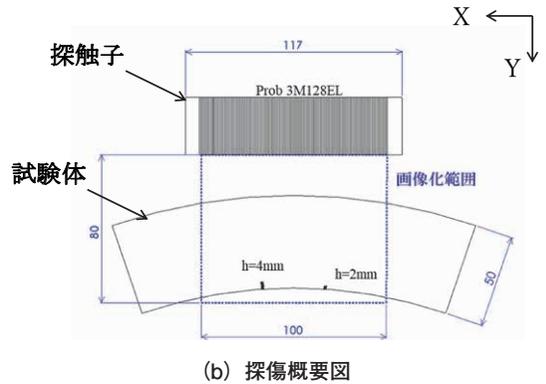


(c) ノッチ③'、④'、③、④付与位置

図1 試験体概要



(a) 探傷時の写真



(b) 探傷概要図

図 2 水浸探傷概要

た。試験体は図 2 (b) に示すように X 方向に R がついており、探触子表面から試験体表面までの距離は、各素子によって異なる。

TFM における画像化範囲は、探触子の直下 X 方向に 100mm、Z 方向に 80mm とした。この時、水距離が 20mm であることから、試験体内部における Z 方向の画像化範囲は 60mm となる。

4.2 母材 EDM ノッチを用いた特性調査

図 2 (b) に示すように、高さ 4mm および 2mm のノッチが画像化範囲に入るように探触子を設置し、母材部のノッチを探傷した。図 3 に、同じ素子で送受信した際の 128 個の受信波形例を示す。横軸に素子番号 (CH)、縦軸に水の音速で計算した探触子から伝搬した距離を、信号振幅値をカラーマップで表示している。縦軸に示す水距離 20mm 近傍に取得された波形が試験体表面から反射した信号であり、試験体の表面 R に沿って、各素子からの到達時間が変化していることが確認できる。縦軸 35mm 近傍の信号が試験体底面からの反射波であり、画像化範囲は縦軸 20 ~ 35mm 近傍となる。なお、縦軸 40mm 近傍の信号は、探触子と試験体表面の間を 2 回反射して到達した信号となる。

次に得られた波形データから、内部状況を画像

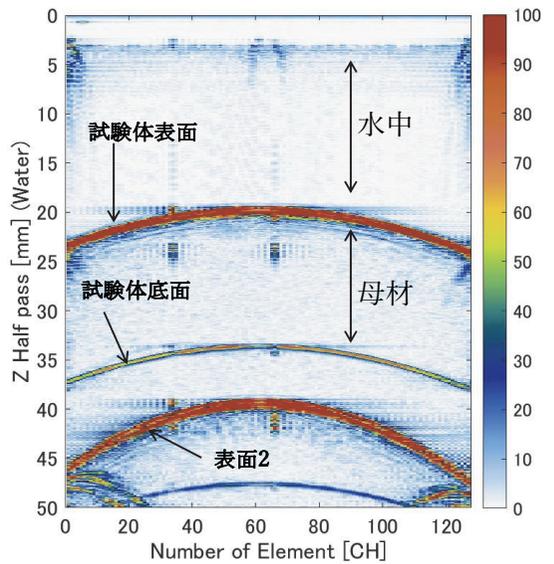


図 3 受信信号例

化した結果を図 4 に示す。画像は、縦軸に深さ Z、横軸に探触子長手方向 X、カラーマップに画像振幅値を示す。画像振幅値は底面反射を 100% として規格化した値となる。図 4 (a) に一般的な TFM 法で計算した画像化結果を示す。一般的な TFM 法では、表面形状を画像化計算に反映させないため、超音波の入射面である試験体表面を平面と仮定する。したがって、平面でない試験体では、探触子の中心以外は水から試験体へ超音波が入射する位置・屈折角が曖昧になる。全体に R を有し、

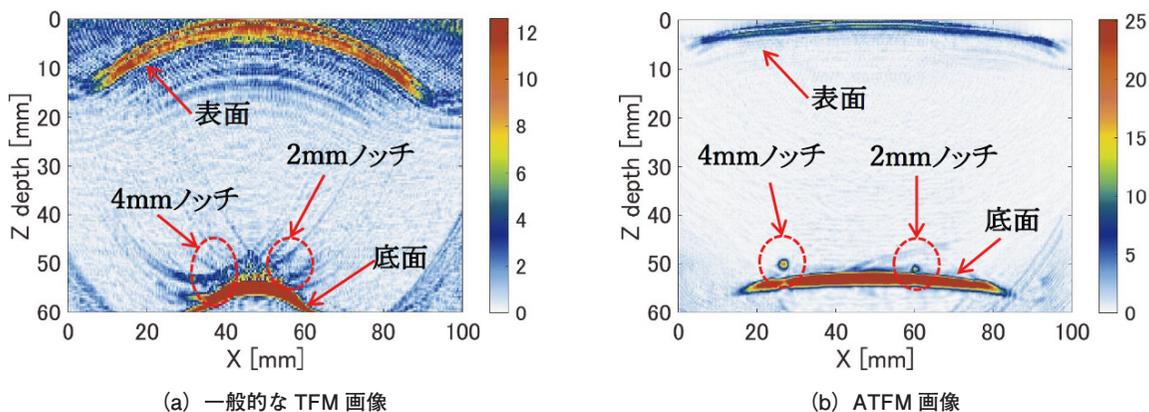


図4 母材部付与ノッチ画像化結果

溶接部の凹凸がある今回の試験体では、ノッチからの反射は集束せず円弧上に広がり、底面からの反射波も一部しか画像化できない。一方、図4(b)に示すATFM法の画像化結果では、試験体表面の形状と、探触子の各素子と表面の距離を反映させて画像化計算を行っているため、ノッチからの反射は球状に画像化されている。底面反射に着目すると、一般的なTFM画像では画像化した範囲がおおよそX:30~70mmだったが、ATFM画像ではX:20~80mmであった。

従来のUPA法やTFM法では、探触子表面の距離、探触子の傾き、試験体表面のRがわかっていると、超音波を集束することができない。ATFM法では、これらを探傷時に自動で補正することから、フレキシブルウェッジのような、探触子を固定できない探傷法や、表面形状が一様ではない試験体に対して有効である。

4.3 余盛上からのノッチ検出性確認

試験体裏面のシーニング部に付与したノッチに対して、余盛上から探傷した。

まず図5(a)に示すように、余盛の真上に探触子を配置し、図1に示すノッチ③④を探傷した。図5(b)に探傷結果を示す通り、余盛真上からの

探傷では、ノッチは検出できず、加えて底面エコーもほとんど検出されなかった。

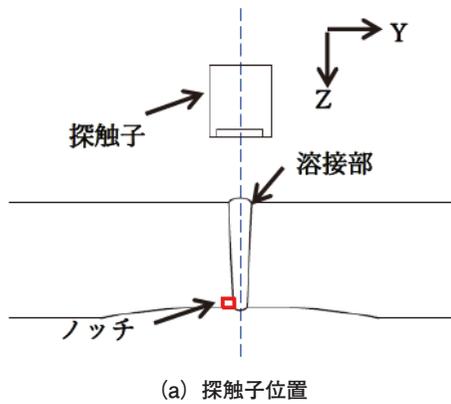
次に、図6(a)に示すように探触子位置を母材側にずらし、溶接部と母材部の境界に探触子の中心を設置してノッチ③④を探傷した。探傷結果を図6(b)に示す。本位置における探傷では、ノッチからの反射波が検出され、ノッチの画像化が実現できている。

これらの結果より、余盛真上からの探傷では、余盛表面の細かい凹凸が影響して超音波が試験体表面で拡散してしまい、内部に入射できなかったが、探触子を母材側にずらすことにより、超音波ビームの一部が凹凸のない母材表面から入射され、ノッチに到達したと考えられる。したがって、余盛上からの探傷で反射波が得られない場合は、探触子を母材側にずらして走査することが有効である。

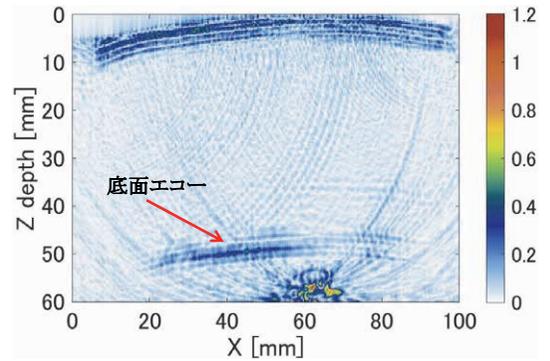
5. 接触式ATFM法の検討

5.1 探触子と治具

次に、探傷対象の形状に合わせて変化するフレキシブルウェッジを用いて手走査におけるATFM法の性能を調査した。今回は図7に示すハロゲンフリー材質のゴムに水を注入して使用するタイプ

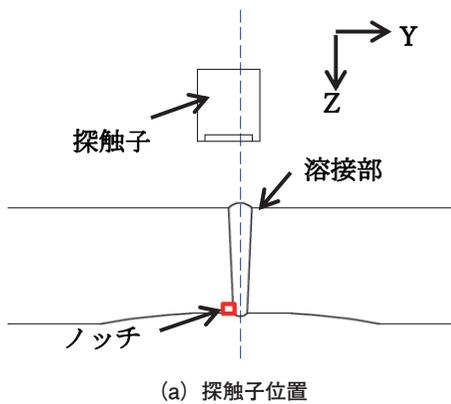


(a) 探触子位置

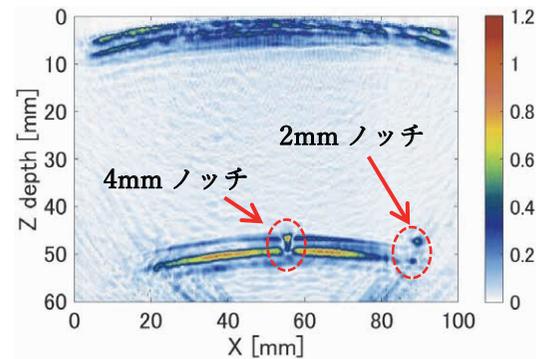


(b) ATFM 探傷結果

図5 水浸探傷 シーニング部ノッチ探傷結果 (余盛真上)



(a) 探触子位置



(b) ATFM 探傷結果

図6 水浸探傷 シーニング部ノッチ探傷結果 (母材側にシフト)

を採用した。

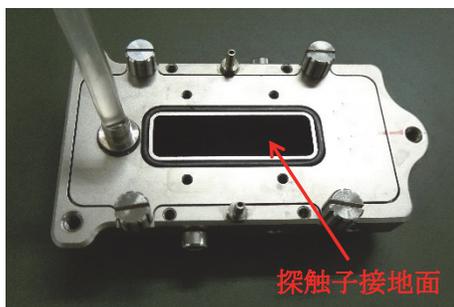
本タイプでは探触子から試験体表面までの主伝搬体は水となるため、超音波探傷法の種類としては、「局部水浸探傷法」となる。使用した探触子は図7(c)に示すように、探触子とフレキシブルウェッジを合わせても片手で走査できる。探傷方向はX方向とした。

5.2 UPA 法との比較

母材部に付与した、高さ4mmのノッチ(図1(a)②')を探傷した。探傷は糸引きのロータリーエンコーダを使用し、ノッチ真上よりX方向に±25mmを1mmピッチでラインスキャンした。ATFM法で画像化した結果を図8(a)(b)(c)に、UPA法で画

像化した結果を図8(d)(e)(f)に示す。UPA法における画像化方法は、FMCにて取得したデータを用いて再構成した。この時、フォーカスの条件は水距離20mm、フォーカスポイントX: -25 ~ +25mm (1mmピッチ)、Z: 50mmとした。図中の右方向がスキャン方向となり、図8(a)(d)はノッチからX: -10mm位置、図8(b)(e)はノッチ真上、図8(c)(f)はノッチからX: +10mm位置の結果となる。横軸をX方向とし、横軸の0mmおよび赤点線はノッチ位置を示している。

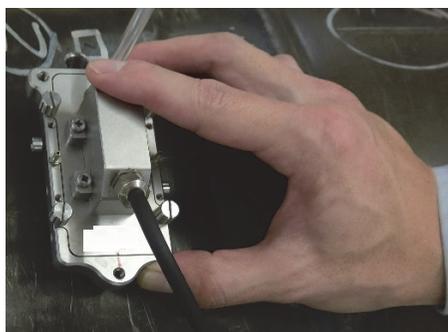
ATFM法の結果におけるノッチからの反射信号(ノッチエコー)は、どの位置においても球状に集束しており、位置精度が高い。加えて、底面エコーも直線状に描写されている。一方、UPA法に



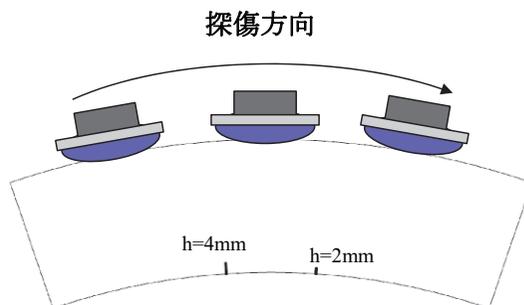
(a) ウェッジ写真 (上面)



(b) ウェッジ写真 (側面)



(c) 探傷の様子



(d) 探傷方向

図7 フレキシブルウェッジ

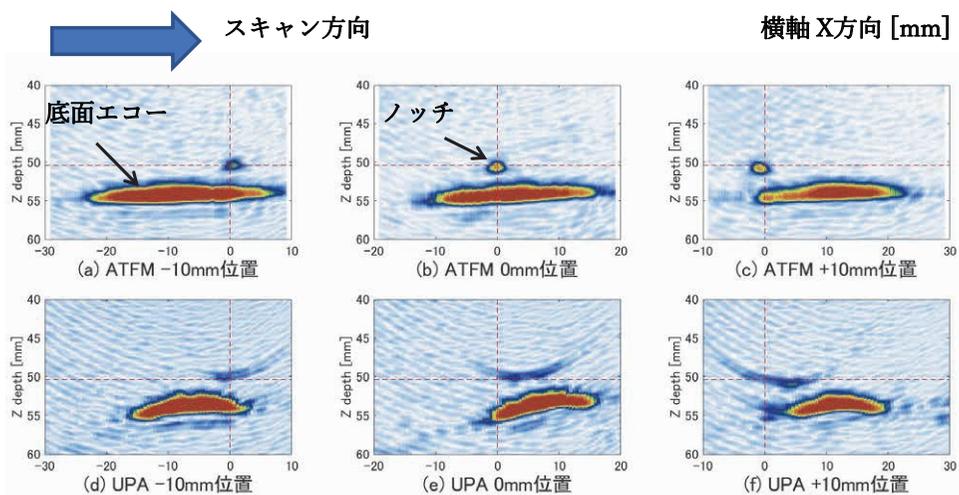


図8 母材部付与 4mm ノッチ

おけるノッチエコーは円弧状に発散している。特に、図8 (e) 0mm 位置では、反射信号が二つに分離して描写されており、底面エコーも斜めになっている。加えて、位置精度も低く、ノッチエコー

の位置は実際の位置より X 方向にずれている。これは、走査時にエンコーダの糸で引っ張られた探触子が、フレキシブルウェッジの影響で傾きを持って走査されていたことが原因と考えられる。

このようにUPA法はフレキシブルウェッジを用いた探傷には不向きだが、ATFM法は、探傷ごとに探触子の傾きを補正して画像化計算を行っているため、高い位置精度や集束性が得られる。

5.3 余盛上探傷

溶接部および溶接部近傍に付与した、高さ2mmのノッチ(図1に示すノッチ①、③)に対し、余盛上から探傷した。4章の水浸探傷試験で余盛真上からは超音波が試験体に入射されなかったことから、図9に示すように、探触子を母材側に5mmずらして探傷した。

探傷結果を図10に示す。シーニング部に加工

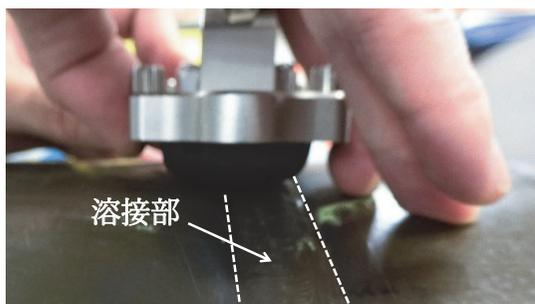


図9 探傷の様子

したノッチ③の結果を図10(a)(b)(c)に、溶接部に加工したノッチ①の結果を図10(d)(e)(f)に示す。図中の右方向がスキャン方向となり、図10(a)(d)はノッチから-10mm位置、図10(b)(e)はノッチ真上、図10(c)(f)はノッチ+10mm位置の結果である。各図の横軸はX方向の位置であり、横軸の0mmおよび赤点線および赤丸はノッチ位置を示している。

シーニング部の結果図10(a)(b)(c)は底面反射が明瞭に描写されている。一方で、溶接部の結果図10(d)(e)(f)では、底面反射が複数合成されている。これは、探触子を母材側から溶接部に向かって斜めに超音波を入射しているため、母材裏面と溶接部の裏波からの反射が混合されたことによる。

図10に示す通り、ノッチ①およびノッチ③いずれの探傷結果においても、きず指示が球状に画像化しており、きず位置も正確であった。このことから、余盛中心から探触子を母材側にずらすことにより、シーニング部、溶接部いずれでも高さ2mmのノッチが検出可能であることを確認した。

ここで、今回の探傷で取得した波形から、水距

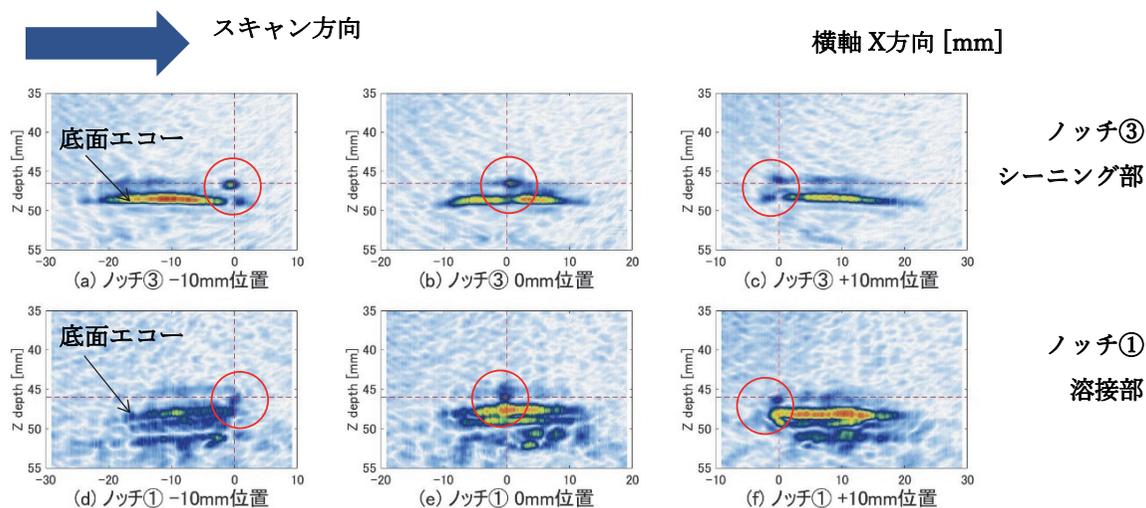


図10 溶接部近傍2mmノッチ

離(探触子と試験体表面との距離)と探触子の傾きの状態を計算した。水距離の計算結果を図 11 (a) に示す。横軸が X 方向の走査位置を示し、0mm がノッチ付与位置としている。縦軸は水距離を示している。グラフには、母材部 4mm を探傷した際の水距離の結果(図 8)と、同様にノッチ①、ノッチ③の結果を示している。走査距離 50mm 内における水距離の変動は 0.4mm 程度であり、変動が少ない、すなわち、フレキシブルウェッジでも水距離はほぼ一定に保たれることが確認できた。

次に、取得した波形より探触子から認識できる表面形状を再現し、探触子と試験体表面の傾きを計算した。探触子と試験体表面の傾きを入射角とし、式 (1) に示す、スネルの法則より試験体に入射される超音波の屈折角を求めた。

$$\frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} = \frac{V_A}{V_B} \quad (1)$$

この時、入射角を θ_A 、屈折角を θ_B 、 V_A を水、 V_B を試験体の音速とした。

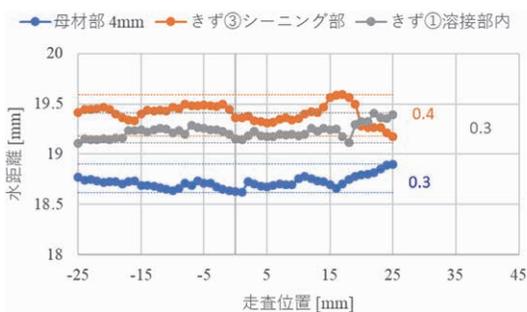
計算結果を図 11 (b) に示す。縦軸を屈折角、縦軸の括弧内は入射角(探触子と試験体の傾き)を表している。いずれの探傷でも探傷時の屈折角はおよそ 20deg 近く変動していることが確認できる。今回は探傷できたが、検出目標のきず位置が深いと、屈折角で 20deg 変動した場合、探触子から発生する超音波の主ビームが目標に到達しない可能

性がある。このことから、フレキシブルウェッジを使用する場合、傾きをおさえることが重要である。

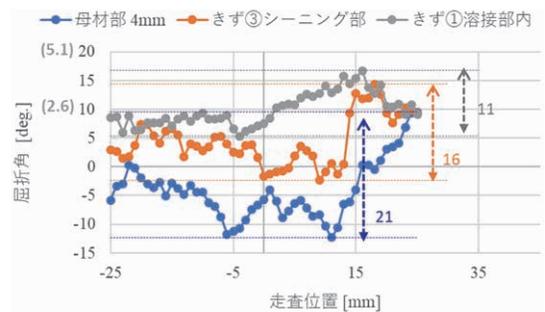
6. まとめと今後

本稿では、溶接線に対して直行方向に進展するきずの検出をするため、ATFM 法を用いた、溶接部の余盛上からの超音波探傷を検討した。水浸探傷法を用いた基礎的な検証試験より、表面が平面でない対象に対する ATFM 法の有効性を確認できた。しかし、溶接部余盛の中心から超音波を入射した場合、余盛表面の細かい凹凸によって超音波が試験体内部に入射されないことが判明した。この課題に関しては、余盛中心からわずかに(5mm 程度)母材側に探触子をずらすことにより、溶接部のきず検出が可能であることが確認できた。

フレキシブルウェッジを用いた、手走査における ATFM 法の検討では、走査方向に対して探触子が傾く傾向にあった。しかし、ATFM 法の特性上、探触子の傾きに対して、自動で位置情報が補正されるため、不安定な余盛上からの探傷においても、超音波の集束性の高いきず検出が可能であった。このことから、ATFM 法を用いれば、余盛上からシーニング部や溶接部に発生するきずの検出は可能であると考えられる。実機適用のためには、探触子の傾きを抑制するための治具開発が課題である。



(a) 水距離



(b) 屈折角

図 11 走査時における探触子の状態

参考文献

- (1) 畠中宏明、長沼隼人、菅井孝郎、荒川敬弘、柳原有紗、野瀬裕之、田上稔：高 Cr 鋼溶接部クリープ損傷評価の信頼性向上に関する検討、IIC REVIEW、No.47、2012/04、pp.25-30
- (2) 船戸一寛、芝田三郎：新 UT (PhasedArray 法、TOFD 法) 技術の実機適用状況、IIC REVEIW、No.41、2009/04、pp.17-23
- (3) 引地達矢、梶ヶ谷一郎、齋藤規子、中川博勝、塩田佳紀：フェーズドアレイ法を用いた高クロム鋼溶接部の余寿命検査技術、IIC REVIEW、No.57、2017/04、pp.12-17
- (4) M. Karaman, P.-C. Li, and M. O'Donnell : Synthetic aperture imaging for small scale systems,IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.42、No.3, 1995, pp.429-442
- (5) A. J. Hunter, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox : The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array, IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, 55 (11) , 2008, pp.2450-2462



元研究開発センター 研究開発
グループ (現株式会社 IHI イン
フラ建設 鉄鋼事業部 鉄鋼管
理部 DX 開発グループ)

川崎 拓

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547