

溶接管理技術者の体験紹介

## フェーズドアレイおよび TOFD 超音波探傷法による 溶接部の検査

日鉄住金テクノロジー株式会社 計測・検査事業部  
馬場園 浩二

### 1. はじめに

製鉄所で使用される圧延機の自在継手溶接部、クレーン巻上げドラムの軸段付き部、鉄道用車両の推進軸、伝達軸等、さらに鋼構造物の溶接部を含む亀裂検査は、従来より超音波斜角探傷法による検査が一般的に行われている。しかし、この方法では複雑形状由来の形状エコーと、きずエコーとの峻別が困難であること、更にきずエコー自体の相対的エコー出力低下により、その検査は一筋縄ではいかず、熟練した超音波探傷技術者でもかなりの経験が必要であった。

これらの問題を解決するため、従来の超音波斜角探傷法にかわり、フェーズドアレイ (Phased Array) 超音波探傷法 (以下フェーズドアレイ UT 法と称す) を適用することにより、段差や嵌め合いを有し、しかも溶接が施工されている複雑形状部品でも的確な亀裂検査が可能になってきた。また溶接部の超音波探傷では、きずの回折波および表面波、底面反射波を利用した TOFD (Time of Flight Diffraction) 法もよく使われており、これらの技術について以下に概要を述べると共に、併せて溶接管理技術者としての取組みを報告する。

### 2. フェーズドアレイ UT 法の測定原理と特長 (従来法との比較)

#### 1) 従来法 (超音波斜角探傷法)

予め設定された屈折角 (70 度、60 度、45 度等) の斜角探触子を用い、きず位置やきずの大きさを推定する方法であるが、突合せ溶接部等単純形状であれば、探傷は比較的容易である。

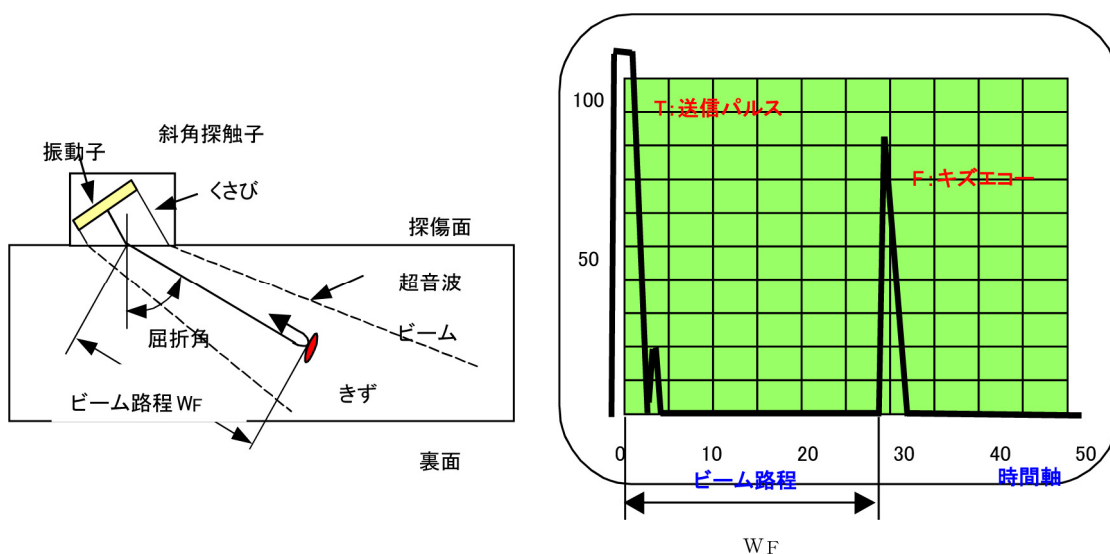


図1 超音波斜角探傷法によるきず探傷模式図

## 2) フェーズドアレイ UT 法

通常の超音波プローブは前述のように、1つの振動子（圧電素子、代表的なサイズ；10×10mm）で送受信が行われるが、フェーズドアレイ UT プローブは多数の振動子により構成される。探触子を構成する振動子を1mm程度の幅に細分化し、連続的に並べて（例えば64個の素子）、個々の素子（振動子）に加えるパルスのタイミングを電子的に制御している。これにより超音波ビームを任意の方向に偏向させたり、集束させたり、連続的に移動させたりすることができる。従ってフェーズドアレイ UT 法は、微小素子を電子制御することによって従来の超音波斜角探傷法では困難であった複雑形状部、狭隘部への適用を可能としている。

以下にフェーズドアレイ UT 法の特長を列記する。

### ① 超音波ビームの方向制御（セクターキャン）

複数の素子を1個の探触子とみなし、各素子のパルスを制御することにより、超音波ビームを斜めに傾けたり、扇状に振ることができる。

### ② 超音波ビームの移動（リニアスキャン）

多数の素子を並べた探触子とし、1回に複数の振動子（例えば10個）を駆動しながら、ビームを順次移動させる。

### ③ 超音波ビームの集束（DDF）

超音波ビームを任意の深さに集束でき、収束深さを任意に変更できる。厚手材、高減衰材の高感度探傷が可能となる。

### ④ 高速探傷

瞬時に広い範囲を全面探傷できる。多数の素子からなる幅の大きい探触子を使用し、リニアスキャン、セクターキャンすることにより、溶接部探傷でのジグザグ走査が不要になる。

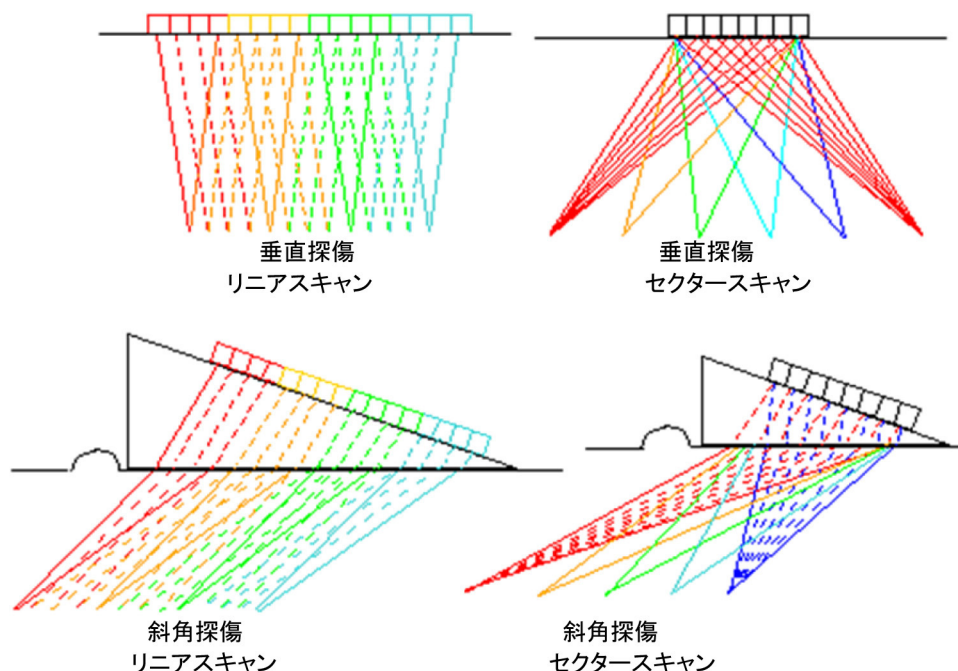


図2 フェーズドアレイ UT 法の電子制御方法  
(リニアスキャン、セクターキャン)<sup>1)</sup>

### 3. フェーズドアレイ UT 法の適用事例

#### 1) ボイラー配管溶接部へのフェーズドアレイ UT 法の適用

材料に持続応力が作用すると、時間の経過とともに歪が増大する。これをクリープ変形と称し、材料温度に依存する。火力発電所ボイラー大径管は、クリープ損傷発生リスクが高い。経年使用に伴い、溶接 HAZ 部の粒界にボイドが発生し、そのボイドの数が増加するとボイドが合体して長さが1つの粒界程度の微視亀裂となる。更に微視亀裂が増加すると、それら微視亀裂が合体連結して亀裂となり、その亀裂が伝播して最終的に貫通に至る。

図3に示すように、HAZ 部に発生したクリープ損傷による3箇所の割れが、フェーズドアレイ UT 法では1回の探傷で、同時に検出されることがわかる。

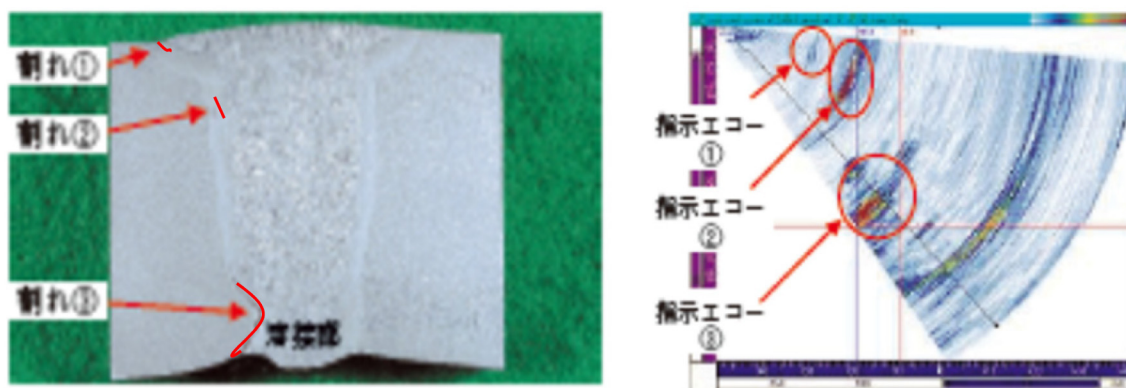


図3 試験体断面（割れ発生位置）（左）、フェーズドアレイ UT による断面像（右）<sup>2)</sup>

#### 2) 複雑形状部へのフェーズドアレイ UT 法の適用

車輪付き車軸および1mm深さの人工きずを加工した車軸へのフェーズドアレイ UT 法の適用例を図4に示す。上段は複数のフェーズドアレイ探触子を車輪付き車軸に適用した例であり、下段は探触子のセット位置が限られた場合、端部円周面からセクタースキャンにより探傷を行ったもので、1mm深さのノッチ列が右側の探傷画面に明瞭に現れている。

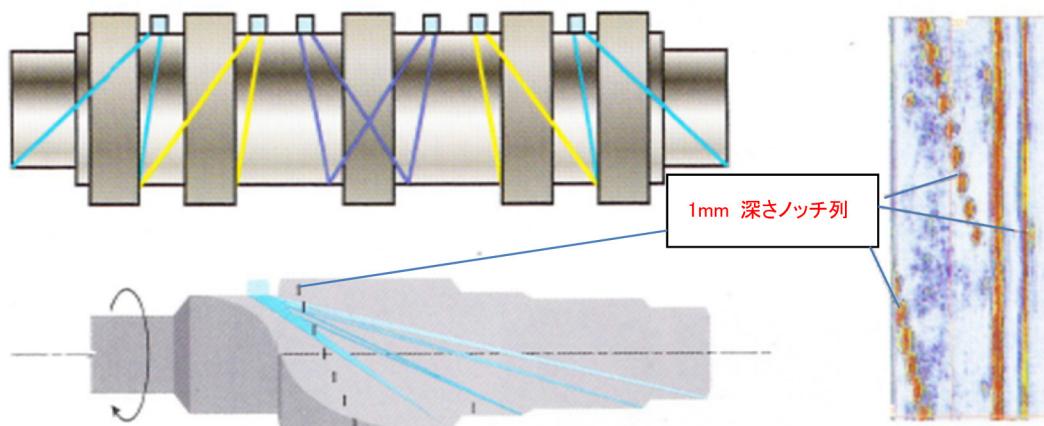


図4 車輪付き車軸（上）および端部円周面からの探傷状況<sup>3)</sup>

また、クレーンの減速機軸、電車の車軸および工場設備などに多く使用される動力伝達軸は、疲労亀裂の発生が懸念されるが、軸を解体せず軸端面からフェーズドアレイ UT を行うことにより、健全性を評価することができる。図 5 に車軸の亀裂検出事例を示す。

CAD で作成した対象部断面形状を探傷用ソフト画面上に表示することが可能であるため、きずと形状エコーが容易に識別可能となる<sup>4)</sup>。

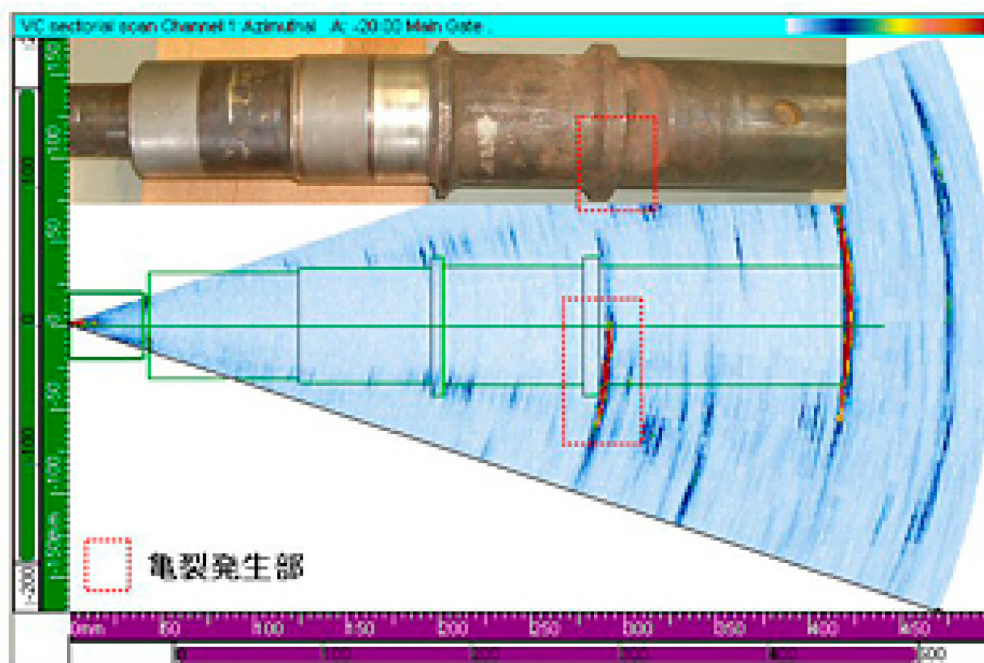


図 5 車軸の端部からのフェーズドアレイ UT と探傷画面<sup>4)</sup>

#### 4. TOFD 法による溶接部探傷

溶接部に発生する亀裂位置、亀裂高さを精度よく測定する超音波探傷法としては、図 6 に示す TOFD(Time of Flight Diffraction)法が使われている。図 6 に TOFD 法の原理を示す。

TOFD 法では超音波送信用探触子と受信用探触子とを一定距離を隔てて対向させ、送信用探触子から全厚さ方向に超音波を入射すると、図 6 上に示すように表面を伝搬した超音波（ラテラル波）と裏面に当って反射された超音波（底面反射波）とが受信される。もし、試験体内部に亀裂があると、亀裂上下端部での回折波が受信される。亀裂上端からの回折波と下端からの回折波では伝搬距離（時間）が異なるため、伝播時間の差から亀裂の板厚方向の寸法（亀裂深さ）および位置を測定することができる。

送受信探触子の間隔を一定にしたまま、溶接線に沿って平行走査（D 走査）をし、受信波の強度を連続的に図形表示させた結果を図 6 下に示す。探傷結果は自動的に画像表示されるので、きずの上端部、及び下端部エコーの識別が容易にできる。

製鉄設備、発電設備、圧力容器やパイプラインなどの溶接部の亀裂深さが測定でき、供用中設備の内面側に生じる SCC（応力腐食割れ）や局部腐食等、欠陥深さの検査に適している。

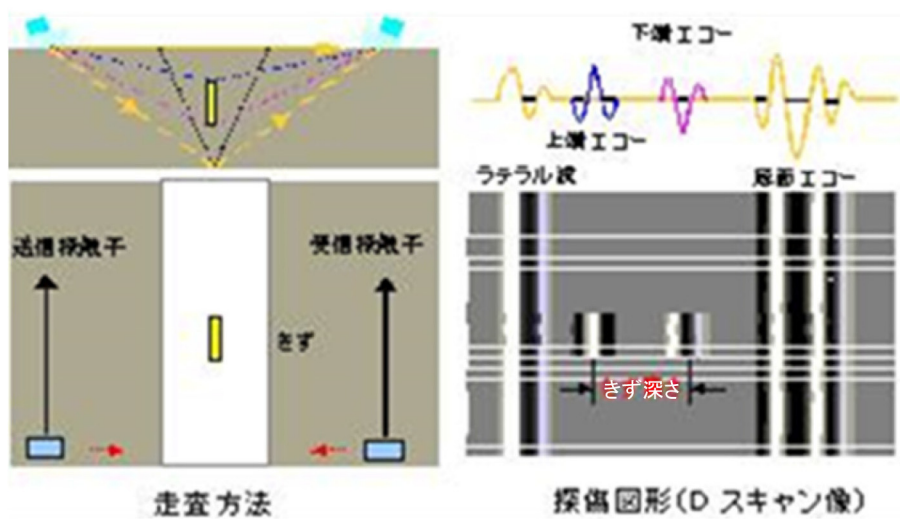
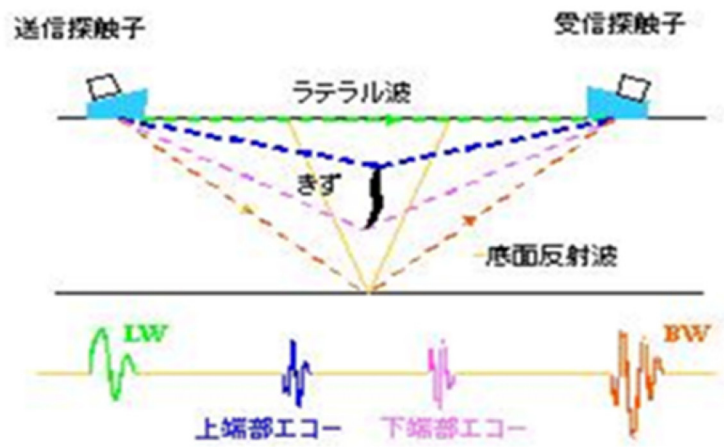


図6 TOFD(Time of Flight Diffraction)超音波探傷法<sup>1)</sup>

図7、図8に溶接部に生じる典型的なきずの TOFD 画像を示す。

図7に止端クラックの TOFD 画像を示す。この場合、ラテラル波（表面波）が分断され、クラックの下端が表示される。従って表面から図中の1までがクラックの高さとなる。

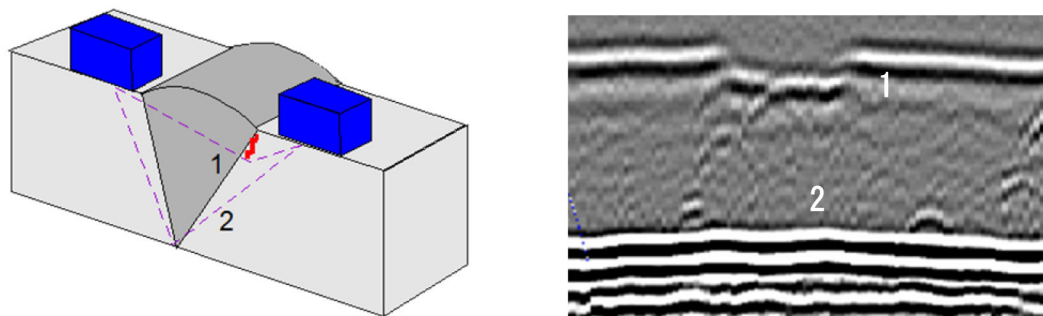


図7 止端クラックの TOFD 画像<sup>3)</sup>

図8に開先面融合不良の TOFD 画像を示す。ラテラル波（表面波）およびバックウォール（底面波）の乱れが発生しないことから、溶接部表面からではなく、クラックは内部にあることを示している。この場合図中の2~3間がクラックの高さとなる。

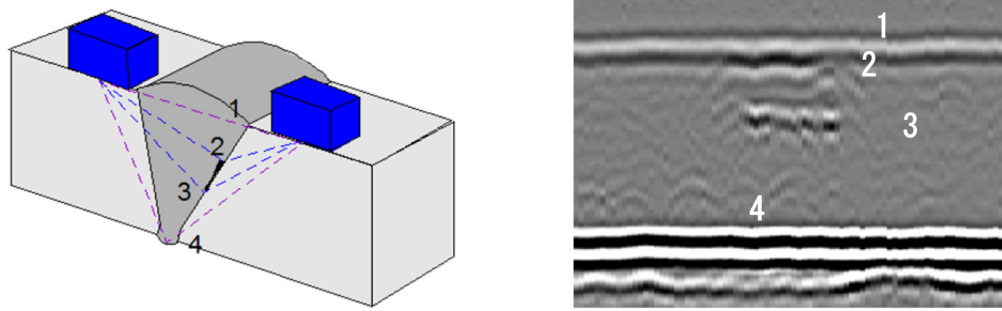


図8 開先面融合不良の TOFD 画像<sup>3)</sup>

## 5. 新検査技術を溶接構造物へ適用する際の溶接管理技術者としての取組み

現在 JIS および NDIS(日本非破壊検査協会規格)の中で、鋼材溶接部の超音波探傷規格は、JIS Z 3060/2002「鋼溶接部の超音波探傷委試験方法」、JIS Z 3070/1998「鋼溶接部の超音波自動探傷方法」、NDIS2423/2001「TOFD 法によるきず高さ測定方法」および NDIS2418/2005「端部エコー法によるきず高さ測定方法」が適用されている。また建築鉄骨溶接継手の超音波探傷については、日本鋼構造協会の検査ガイドラインや検査指針に基づいて行われている。

フェーズドアレイ UT 法については、NDIS2418/2005 にその一部が織込まれているが、TOFD 法と共に JIS 規格化は未だなされていない。JEAC4207/2008「軽水型原子力発電用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」((社)日本電気協会・電気技術規程)にはフェーズドアレイ技術とともに TOFD 法が規定された。また発電用火力設備の技術基準(火技解釈)では、フェーズドアレイ UT および TOFD 法ともに追加採用が検討されている。(2014年12月8日現在)

一方 ASME (アメリカ機械学会)では、ASME Code Case2235/2005「放射線透過試験の代替試験としての超音波探傷試験の適用 Sec.VIII Div.1 および 2」において、ベースは通常のパルス反射法であるが、種々の条件付きで、フェーズドアレイ、TOFD 法の適用も可能であることから、これらの適用報告が増加してきている。<sup>5)</sup>

上述のように、限定的ではあるが適用できる規格もあり、従来探傷法との整合性に関し、十分なバックデータと調整を行っていけば、今後フェーズドアレイ UT 法も TOFD 法も本格的に導入されるであろうと考えられる。

従って、規格、規程等でこれら新検査技術の適用が言及されていない場合は、顧客との仕様書に別途、新検査方法を織込む必要がある。溶接構造物の検査に携わる溶接管理技術者として、新検査技術の現場適用を可能にするため、具体的に以下の取組みを行っている。

- (1) 特に複雑形状を有する溶接構造物については、シミュレーションにより超音波ビームの伝播経路と探傷音場(\*)を条件を変えながら観察し、形状エコーときずエコーの識別が問題なく出来ることを確認する。

(注\*) 音波が伝播している場を音場という。超音波には指向性、ビーム幅、音圧、更に形状部やきずでの縦波、横波のモード変換、またアレイ探触子特有のグレーティングローブによる虚像ノイズの発生等の要素があり、これらをシミュレーションによって解析するもの。

- (2) シミュレーション結果に基づき超音波探傷条件を設定し、現物(モックアップ等簡易試験体)に人工きずを加工し確認試験を行い、条件を標準化する。

(3) 上記によって得られた知見を整理し、従来からの超音波斜角探傷法による探傷結果と比較することによって、新検査技術の優位性を顧客に理解して戴き、仕様に展開する。

また、筆者が所属する日本非破壊検査協会・九州支部では、超音波探傷技術者のスキルアップを図るため、毎年「UT まかせんしゃい大会」を開催している。超音波探傷技術者は、自らが検査した試験体を切断して内部を確認することは、一般にはできない。そこで自然きずを封入した試験体を、従来の斜角探傷法で検査し、フェーズドアレイ UT、TOFD 法 UT および放射線透過試験等の結果と比較することによって、超音波探傷技術者の技能向上を図るとともに、新検査技術の理解と普及に向けた活動を続けている。

## 6. まとめ

溶接部を含め構造物の内部きず検査には、従来から斜角 UT 法が適用されているが、探傷ビームが設定された屈折角で単一方向で送受信され、且つ A スコープと称す CRT 上に、距離に対応するエコー高さのみが表示される（図 1 参照）ため、そのエコーがきずであるか、形状からの反射エコーであるか、判断が難しいことが多い。

フェーズドアレイ UT では、多数配列した微小探触子を電子的にスキャンすることにより、溶接部の広い範囲が同時に B,C スコープと称す画像に表すことができ、特に複雑形状由来の形状エコー等疑似エコーときずエコーとの識別が容易となった。更にきずエコー自体の相対的エコー出力が上がることで検出能が改善され、信頼性が向上した。

TOFD 法は対向させた二つの探触子を送受信させることにより、検査対象物のラテラル波（表面波）と底面反射波、更にきずの上下端で発生する回折波の伝搬時間差を利用して、幾何学的にきずの高さ、指示長さを精度よく測定する方法である。

フェーズドアレイ UT および TOFD 法ともに、現状は規格整備段階にあり全面適用には障壁がある。しかし、限定的ではあるが適用できる規格もあり、従来探傷法との整合性に関し、十分なバックデータを基に顧客との調整を行っていけば、今後これら新検査法も本格的に導入されることになるであろうと考えられる。

超音波探傷をはじめとする非破壊検査装置の進歩にはめざましいものがある。今後は装置自体の改善もさることながら、信号処理、探傷技術の組合せ、複合化によって、検査の更なる高精度、高信頼性、高速化が図られていくものとする。

## 参考文献

- 1) 日鉄住金テクノロジー(株) : URL <http://www.nsst.nssmc.com/> , 計測検査ソリューション, 非破壊検査, 「フェーズドアレイ UT」, 「TOFD」
- 2) 松村 : 「フェーズドアレイ超音波探傷法」, エネルギア総研レビュー, URL <http://www.energia.co.jp/eneso/tech/review/> , Vol.2 No.28 (2012), P.10
- 3) オリンパス : Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, OLYMPUS (2006), PP.74-75, P.279
- 4) 住友重機械工業(株) : URL <http://www.shi.co.jp/products/service/test/index.html> , 製品ソリューション, ソフトウェア&サービス, 非破壊検査, -フェイズドアレイ超音波法
- 5) 小林, 大岡, 牧原 : 「超音波による欠陥寸法測定」, (2009), PP.143-146, PP.197-199

## 馬場園 浩二 (ばばぞの こうじ)

---

### <略歴>

- 1968年 久留米高専 金属工学科 卒業  
1968年 八幡製鐵株式会社 入社 八幡製造所圧延技術課  
1985年 新日本製鐵株式会社 八幡製鐵所 品質管理部 部長代理  
1992年 新日本製鐵株式会社 本社 条鋼技術部 部長代理  
1997年 株式会社日鐵テクノリサーチ 検査計測事業部 八幡センター 所長  
2012年 一般社団法人日本非破壊検査協会 九州支部 支部長  
2013年 日鉄住金テクノロジー株式会社 勤務 現在に至る
- 

### <資格>

- 2000年 溶接管理技術者 特別級  
2002年 技術士 (金属部門)  
JSNDI UT-3、RT-3、MT-3 (ASNT/ACCP UT-3、RT-3、MT-3)