

## フェーズドアレイ非対称ビーム TOFD 超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の測定

Measurement of depth of SCC in Ni based alloy weldment by a Phased Array TOFD UT Method with asymmetrical ultrasonic beams

石田 仁志 (Hitohi Ishida)\*<sup>1</sup> 北阪 純一 (Junichi Kitasaka)\*<sup>2</sup> 遠藤 賢 (Ken Endoh)\*<sup>2</sup>

**要約** 2008年に大飯3号機原子炉容器出口管台異材継手部の内面に、軸方向に割れ面が走り、先端が尖鋭な応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) が発見された。この割れは、内面側からの探傷に使用されていた従来の超音波探傷法では深さ測定が困難であった。そのために、①フェーズドアレイ法を用いた非対称超音波ビームによる TOFD (Time of Flight Diffraction) 超音波探傷法および②異なる複数の屈折角条件による探傷結果を重ね合わせるマルチアングル合成法を開発し、さらに③これらを組み合わせた評価法を開発した。

①のフェーズドアレイ法を用いた非対称超音波ビームによる TOFD 超音波探傷法により、Ni 基合金溶接部に人工的に付与した SCC の深さを、割れの開口面側から測定する試験を行い、異なる屈折角条件による SCC の端部エコーの検出が可能となった。この探傷結果に②のマルチアングル合成法による処理を加えた③の評価法により、SCC の端部エコーを明瞭に識別することが可能となった。

Ni 基合金溶接部の SCC の深さを測定し、SCC 切断による深さの測定値 7mm と比較した。フェーズドアレイ法を用いた非対称超音波ビームによる TOFD 超音波探傷法により、7.4~9.6mm の深さ測定値を得た。

これらの開発手法は、Ni 基合金溶接部の SCC 深さ測定に対して有効であることを見出した。

**キーワード** フェーズドアレイ法, TOFD 法, フェーズドアレイ TOFD 法, マルチアングル合成法, Ni 基合金溶接部, SCC

**Abstract** In 2008, stress corrosion cracking (SCC) was found on the inner surface of a dissimilar metal weld of an outlet nozzle of the reactor vessel at the Ohi nuclear power plant Unit-3. The crack was running along the axial direction of the nozzle and had a sharp tip, which made it difficult to measure the depth of SCC using existing ultrasonic testing (UT) technique for the inspection from the inner surface.

Therefore we developed ① a TOFD UT method with asymmetrical ultrasonic beams by a phased array method to scan at different plural refraction angles, and ② a multi-angle synthesis method to synthesize measurement data with different plural refraction angles, and furthermore developed ③ a combined evaluation method incorporating both ① and ② methods.

We tried to measure the depth of SCCs made in a Ni-based alloy weldment using the TOFD UT method with asymmetrical ultrasonic beams by a phased array method ①, and it turned out that we can detect the tip echo by different refraction angle scanning of this method. The combined evaluation method ③ which processed the data acquired by method ① using the multi-angle synthesis method ② enabled us to distinguish the tip echo clearly.

We measured the depth of SCC made in a Ni-based alloy weldment and compared the result with the measured depth of 7mm obtained by a destructive test of the specimen. The measured depths were ranged in between 7.4 and 9.6mm using the TOFD UT method with asymmetrical ultrasonic beams by a phased array method.

We judged these newly developed UT methods to be effective and applicable to measurement of the depth of SCCs in Ni-based alloy weldments.

**Keywords** Phased Array method, TOFD method, Phased array TOFD method, Multi-angle synthesis method, Ni based alloy weldment, SCC

\* 1 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\* 2 非破壊検査株式会社

## 1. はじめに

2008年に大飯3号機原子炉容器出口管台異材継手部の内面に割れが発見され<sup>(1)</sup>、切削調査の結果、軸方向に割れ面が走り、長さ13mm、深さ21mmという、尖鋭な先端の応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking; SCC)であることが分かった。このような尖鋭な先端を持つSCCの割れの開口面側からの深さ測定が課題であると考え、これに対する超音波探傷法を開発することとした。

割れの開口面側からの探傷に有効で、原理的に精度の良い深さ測定が可能なTOFD(Time of Flight Diffraction)法に着目し、超音波の減衰が大きいNi基合金溶接部に適用するために、フェーズドアレイ探触子を用いて、フェーズドアレイTOFD法<sup>(2)</sup>の適用を選定した。

フェーズドアレイTOFD法を基に、従来の手法にはない特徴である以下のような改良を加え、新たな手法として開発した。①送信と受信の超音波ビームを屈折角および伝播経路が異なる非対称とすること、②屈折角と焦点深さの異なる条件の探傷結果を重ね合わせることで、③①により得られた探傷データを②により重ね合わせ組み合わせること。

開発した手法は、特徴①からフェーズドアレイ非対称TOFD法、特徴②からマルチアングル合成法と呼ぶこととした。

Ni基合金溶接部に加工付与したSCCの深さを、割れの開口面側から測定する試験を行い、測定試験後のSCCの切断調査結果と比較し、開発手法によるSCC端部エコーの識別と深さ測定値を評価した。

## 2. 測定手法の検討

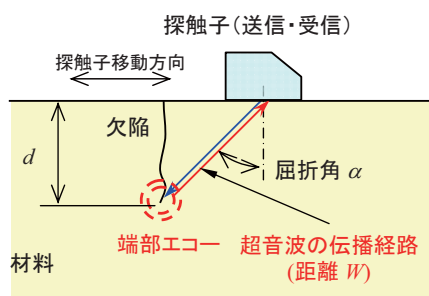
超音波探傷法による欠陥の深さ測定は、欠陥先端の端部エコーをとらえ、その位置座標を特定することによって行う。端部エコーは欠陥先端で超音波が散乱、回折して発生するもので、その強度は微弱であり、検出が困難とされている。深さ測定のための端部エコーを捕える方法として、斜角探傷法、TOFD法などがある。

### 2.1 斜角探傷法

図1に斜角探傷法を示す。図1の(1)に示すように、斜角探傷法では、欠陥の片側1方向から一定の屈折角で超音波を材料中に入射させる。超音波を送受信させながら、超音波探触子を移動させて、欠陥の端部エコーをとらえ、図中に示した式により深さを算出する。図1の(2)に示すように、SCCの屈曲する割れ面から反射波が生じるような場合には、これと割れ端部エコーの識別が必要であり、これを誤った場合に欠陥深さの過小評価の可能性がある。さらに、図1の(3)に示すように、割れの非開口面からの探傷においては、欠陥と表面と角からの反射波であるコーナーエコーをまずとらえて欠陥位置を特定した上で、その上方において端部エコーの探索がなされる。しかし、欠陥開口面からの探傷では、このようなコーナーエコーは得られないことから、検出が容易でない端部エコーの直接の探索が必要となる。

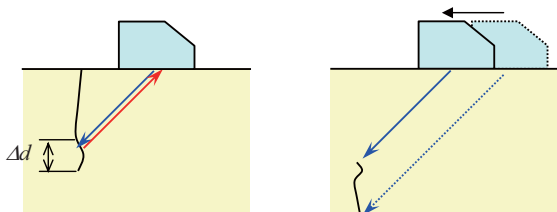
### 2.2 TOFD 法

図2にTOFD法を示す。TOFD法は、送信と受信が別個の超音波探触子を一定間隔で向い合せに配置して移動させることによって、材料中の欠陥端部エコーをとらえる方法である。TOFD法では、送信探触子から発せられ受信探触子で受信された超音波は、必ず欠陥先端を通過するため、この超音波を捕えることが



$$d = W \cos \alpha$$

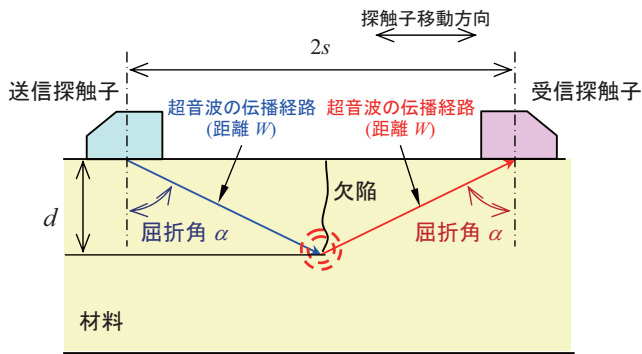
(1)測定方法



(2)屈曲面の誤認識

(3)非開口面の探傷

図1 斜角探傷法



$$d = \sqrt{W^2 - s^2}$$

$$= \sqrt{\frac{C^2 T_d^2}{4} + C T_d S}$$

C : 超音波伝播速度  
 S : 送信と受信の探触子の入射点間距離/2  
 T<sub>d</sub> : 材料表面(2s)と欠陥端部伝播経路(2W)の超音波伝播時間差

図2 TOFD法

できれば、図中に示した式により精度良い深さ測定が可能である。

このことから、SCCの割れ開口面からの探傷においては、欠陥の両側に送信と受信の探触子を配置するTOFD法が有効であると考えた。しかし、TOFD法は送信と受信の探触子を別々の位置に配置することから、溶接部の探傷においては、送信または受信の超音波の経路のいずれかは必ず溶接部を通過することとなり、Ni基合金溶接部に適用する場合には、超音波の減衰が必至である。

### 2.3 フェーズドアレイ TOFD 法

減衰の大きい材料への適用のために、フェーズドアレイ探触子を用いるフェーズドアレイ TOFD法の採用を検討した。図3にフェーズドアレイ TOFD法を示す。送信用のフェーズドアレイ探触子の中の複数の振動子からの超音波を材料中の焦点とする位置に集束させるように、振動子の送信時刻を制御して、送信の超音波ビームを構成する。焦点に欠陥端部があれば欠陥端部で発生する端部エコーを受信用のフェーズドアレイ探触子の中の複数の振動子で同時に受信するように受信時刻を制御して、受信の超音波ビームが送信の

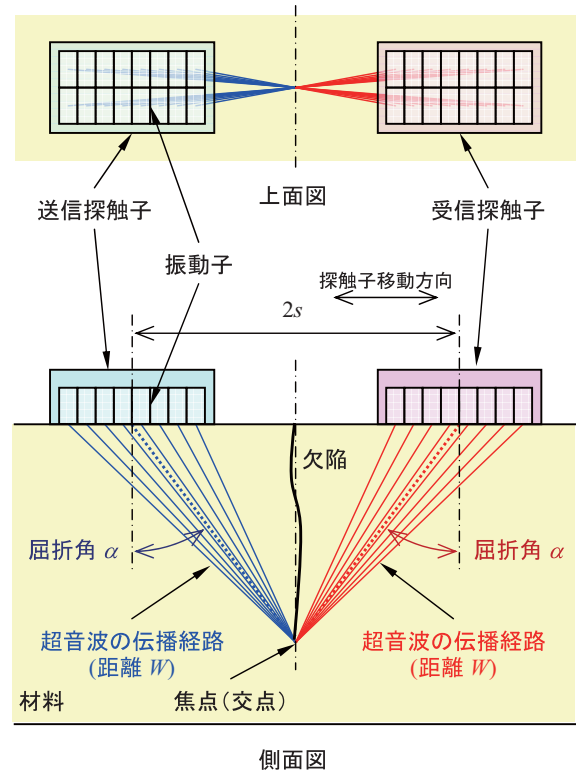


図3 フェーズドアレイ TOFD 法

場合と同様に構成される。TOFD法と同様に、送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を一定間隔で向い合せて配置して移動させることによって、複数の異なる焦点条件により材料中の欠陥端部エコーを探索する。

材料減衰が大きく、散乱波ノイズの大きい材料においては、欠陥先端に対する方向によって端部エコーの強度の異なる可能性があることから、複数の異なる屈折角条件により探傷データを得ることが、より確からしい探傷結果の判断のために有効である。しかし、本手法では、検出すべき反射源に対して異なる屈折角にて探傷を行うためには、探触子間距離の変更が必要である。すわわち、送信と受信のフェーズドアレイ探触子の間隔が一定で、送信と受信の超音波ビームの屈折角が同じである限りは、ある深さ位置に超音波を集束させるための送信と受信の超音波ビームの屈折角は1条件のみで、その方向は変わらず、異なる屈折角条件による探傷結果を得ることはできない。

そこで、送信と受信の超音波ビームの屈折角を同じではない、非対称なものとすることによって、検出すべき反射源に対する屈折角を変えることを考えた。

### 2.4 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

図4に新たに考案したフェーズドアレイ非対称 TOFD 法を示す。2.3項のフェーズドアレイ TOFD 法では、送信と受信の超音波ビームが対象であるのに対して、送信と受信とで異なる屈折角を持つ送信と受信の超音波ビームを構成し、異なる深さに加えて、さらに異なる方向の任意の位置に焦点(交点)を設定することが可能とするものである。TOFD 法およびフェーズドアレイ TOFD 法と同様に、送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を一定間隔で向き合せに配置して移動させる。フェーズドアレイ探触子には、2次元状の行と列による配列をもつマトリクスアレイ探触子を使用することとした。

なお、送信と受信の屈折角が異なることから、本手法による探傷条件において、送信および受信探触子の中点と焦点(交点)を結ぶ線の中点における材料表面の法線との角度を走査角と呼んで表示することとした。

### 2.5 マルチアングル合成法

次に複数の異なる屈折角条件による探傷結果の重ね合わせを考えた。超音波探傷試験における受信信号には、欠陥位置から得られる欠陥エコーと材料中のラン

ダムな位置に生じる散乱波ノイズがある。複数の異なる屈折角による探傷データを重ね合わせることによって、欠陥エコーは重畳して強調され、散乱波ノイズは相殺されて低減すると考えた。図5にマルチアングル合成法を示す。材料中のある位置について、異なる屈折角条件で得られた探傷データを重ね合わせるものである。

本手法は、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法に限らず、複数の異なる屈折角条件による探傷を行うフェーズドアレイ探触子による斜角探傷法などとの組み合わせ

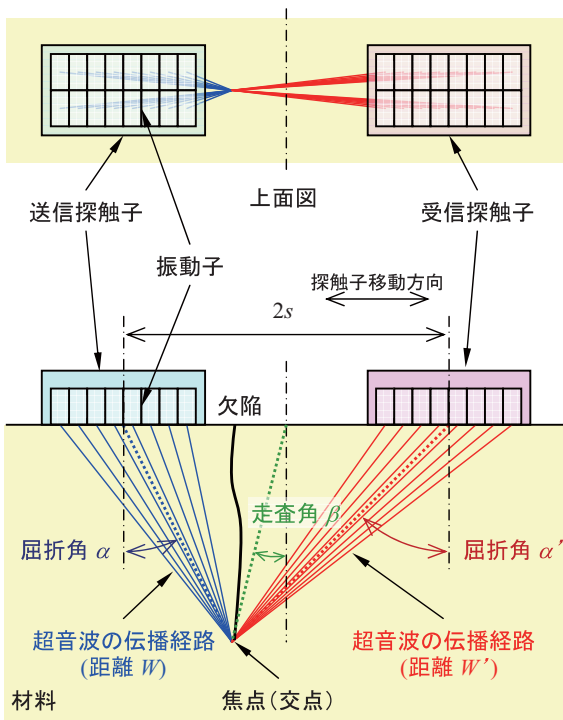


図4 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

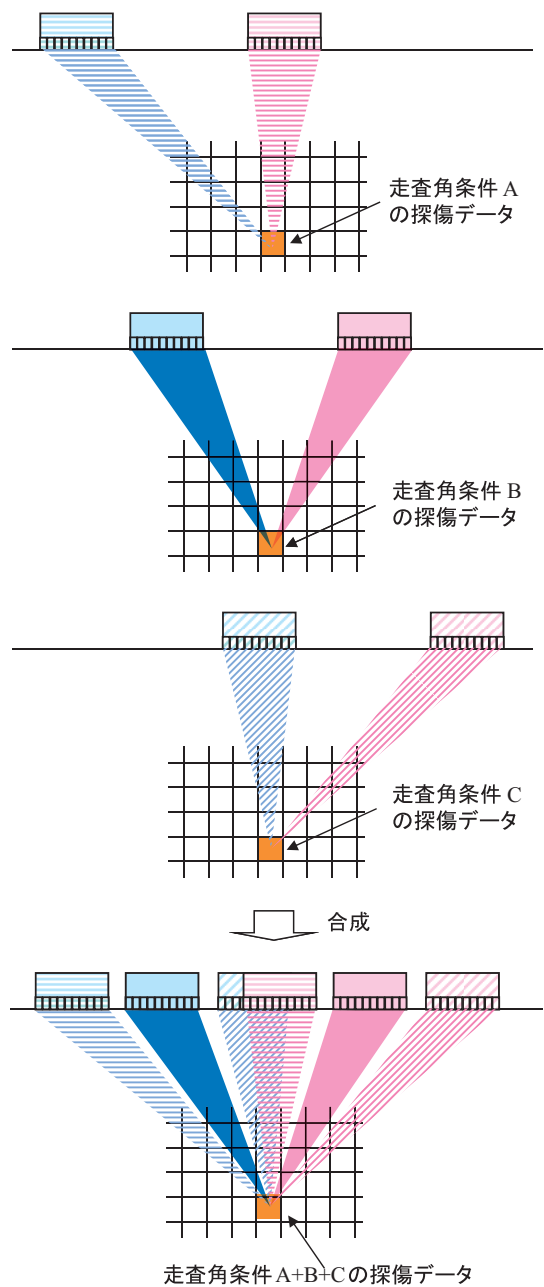


図5 マルチアングル合成法



わせが可能である。

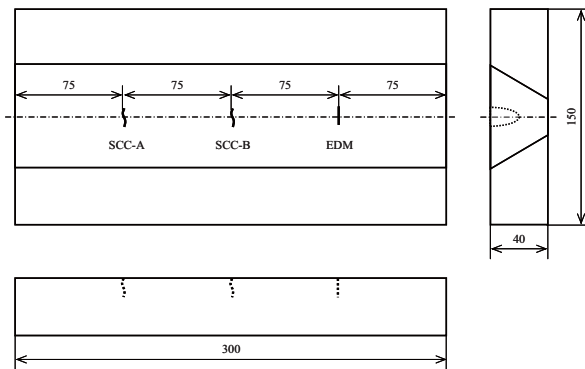
本研究では、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法により得られた探傷データをマルチアングル合成法により重ね合わせることで、これを新たな評価法として適用を試みた。

### 3. 試験方法

#### 3.1 試験体

図 6 に Ni 基合金溶接部 SCC 試験体を示す。厚さ 40mm のステンレス鋼 SUS316 平板をインコネル 600 溶接材により突合せ溶接したものである。溶接部に溶接線と直交方向に 2 個の SCC (SCC-A, SCC-B) および加工放電加工 (Electric Discharge Machining ; EDM) スリットを加工付与した。

次の方法により SCC を付与した。突合せ溶接部の SCC を付与する領域の表面を削除し、SCC が発生、進展しやすくさせるために高炭素量のインコネル 600 溶接材を用いて肉盛、再溶接を行い、起点となる EDM スリットを加工した。肉盛溶接部に加工した



(1) 寸法図



(2) 外観写真

図 6 Ni 基合金溶接部 SCC 試験体

EDM スリットを起点に、試験体の溶接線と平行方向に引張荷重を加え、テトラチオン酸水溶液に浸漬させて SCC を発生、進展させた。

#### 3.2 試験装置

図 7 にアレイ探触子およびウェッジの外観を、表 1 にその仕様を示す。周波数 2.25MHz、配列 2 × 16 または 4 × 8 のマトリクスアレイ探触子である。アレイ探触子は試験体表面に直接接触またはウェッジを介して接触させて測定を行った。



(1) 2 × 16 マトリクスアレイ探触子



(2) 4 × 8 マトリクスアレイ探触子



(3) ウェッジ

図 7 フェーズドアレイ探触子

表1 フェーズドアレイ探触子の主要仕様

	2 × 16 マトリクスアレイ探触子	4 × 8 マトリクスアレイ探触子
周波数	2.25MHz	2.25MHz
振動子数	32	32
振動子配列数 (幅方向×長さ方向)	2 × 16	4 × 8
探触子寸法 (幅方向×長さ方向)	31.8mm × 14.9mm	15.8mm × 15.8mm

### 3.3 試験条件

フェーズドアレイ非対称 TOFD 法に使用する送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を移動させるために、走査スキャナを用いた。走査スキャナは、送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を一定間隔で保持して、試験体表面上を2次元方向に移動走査する。送信と受信のアレイ探触子の超音波ビームの方向および移動走査方向を、SCCの割れ面に対して垂直方向とした。

フェーズドアレイ装置として、Zetec社製フェーズドアレイ超音波探傷装置 Dynaray<sup>(3)</sup>と制御・データ収集ソフト Ultra Vision<sup>(4)</sup>を使用した。Ultra Visionには、筆者らが考案したフェーズドアレイ非対称 TOFD法の機能は備えていない。そこで、Ultra Visionの持つフェーズドアレイ探触子の振動子駆動時刻の設定機能により、フェーズドアレイ非対称 TOFD法の屈折角条件を設定して探傷データの収録と表示を行った。

マルチアングル合成法による処理は、数学計算ソフト MATLAB<sup>(5)</sup>を使用した。Ultra Visionにより収録した探傷データを、MATLABにより処理したものである。

探傷条件として設定した焦点深さは、8~24mm範囲の4mm毎とした。2.4項で定義した走査角は垂直方向を中心に±45度の範囲の1度毎とした。

## 4. 試験結果

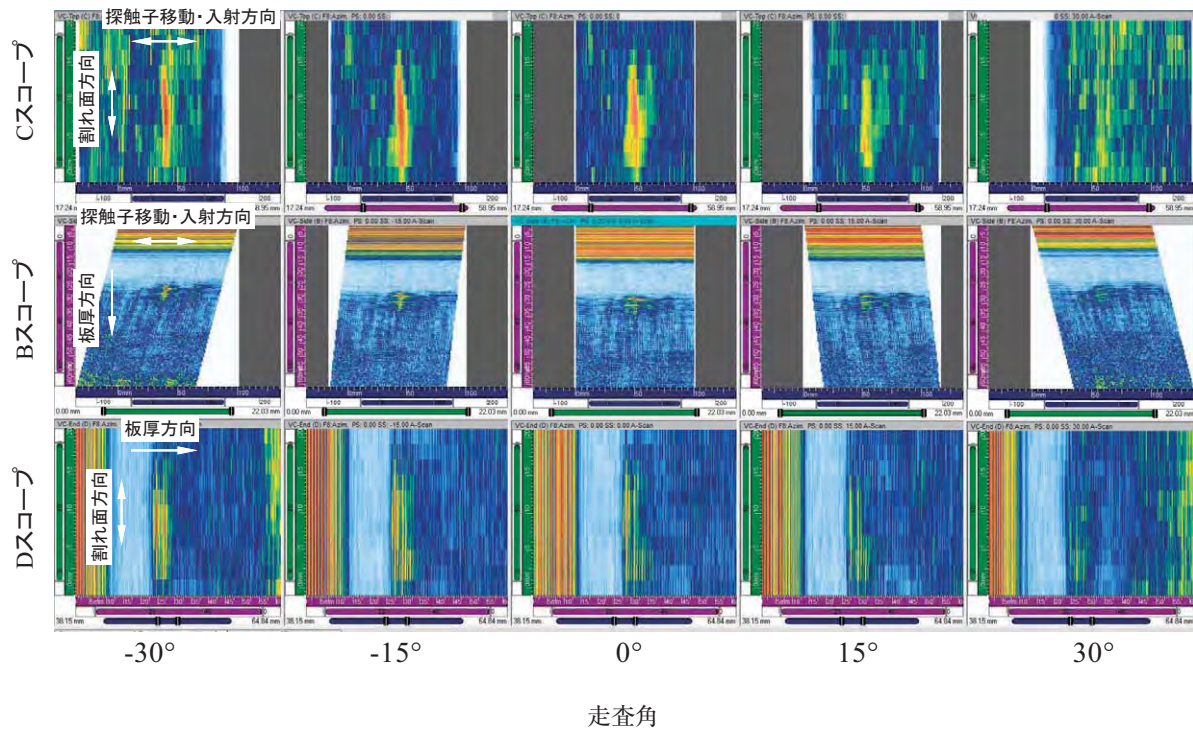
### 4.1 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

図8(1)~(4)に SCC-A のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による探傷結果を示す。4種の探触子条件として、図8(1) 2 × 16 マトリクスアレイ探触子のウェッジなし、図8(2) 同ウェッジあり、図8(3) 4 × 8 マトリクスアレイ探触子のウェッジなし、図8(4) 同ウェッジあり、の結果を示している。Ultra Visionにより描画した探傷画像であり、上段からCスコープ(試験体上面からの平面図)、Bスコープ(SCC割れ面に垂直方向における断面図)、およびDスコープ(SCC割れ面に平行方向における断面図)である。水平方向には、屈折角-30、-15、0、15、30度の探傷画像を示している。異なる焦点深さ条件で得られた探傷結果のうち、後述のSCC切断調査により測定されたSCC-A深さに近い、焦点深さ8mmの結果を示した。

表2にSCC深さ測定値を示す。屈折角0度条件の探傷結果から超音波の伝播距離を測定し、校正試験片の横穴を測定することによって得られた横穴の表面からの深さと伝播距離の校正結果から、SCC深さ測定値を算出したものである。4 × 8 マトリクスアレイ探触子のウェッジなしの条件では、校正結果によって深さ測定値を算出することはできなかった。

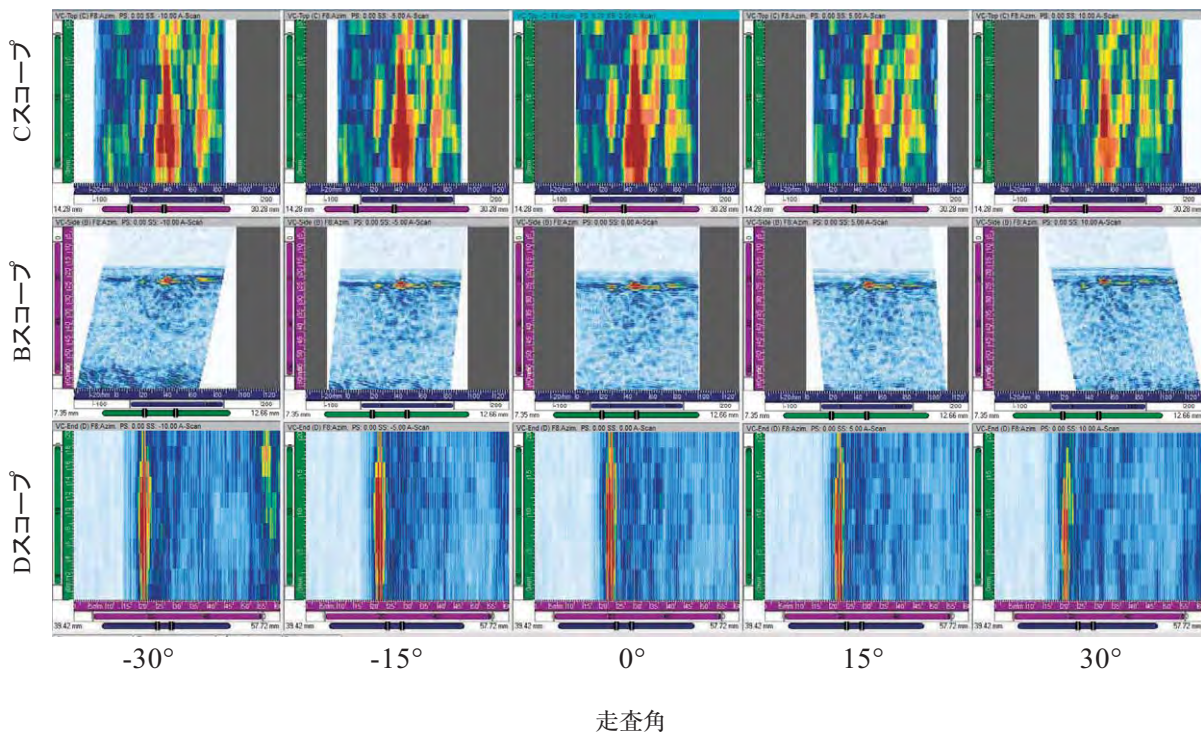
表2 SCC深さ測定値

探触子	2 × 16 マトリクスアレイ探触子		4 × 8 マトリクスアレイ探触子	
	ウェッジなし	ウェッジあり	ウェッジなし	ウェッジあり
深さ測定値(mm)	9.6	8.8	-	7.4



(1) 2 × 16 マトリクスアレイ探触子のウェッジなし(焦点深さ 8mm)

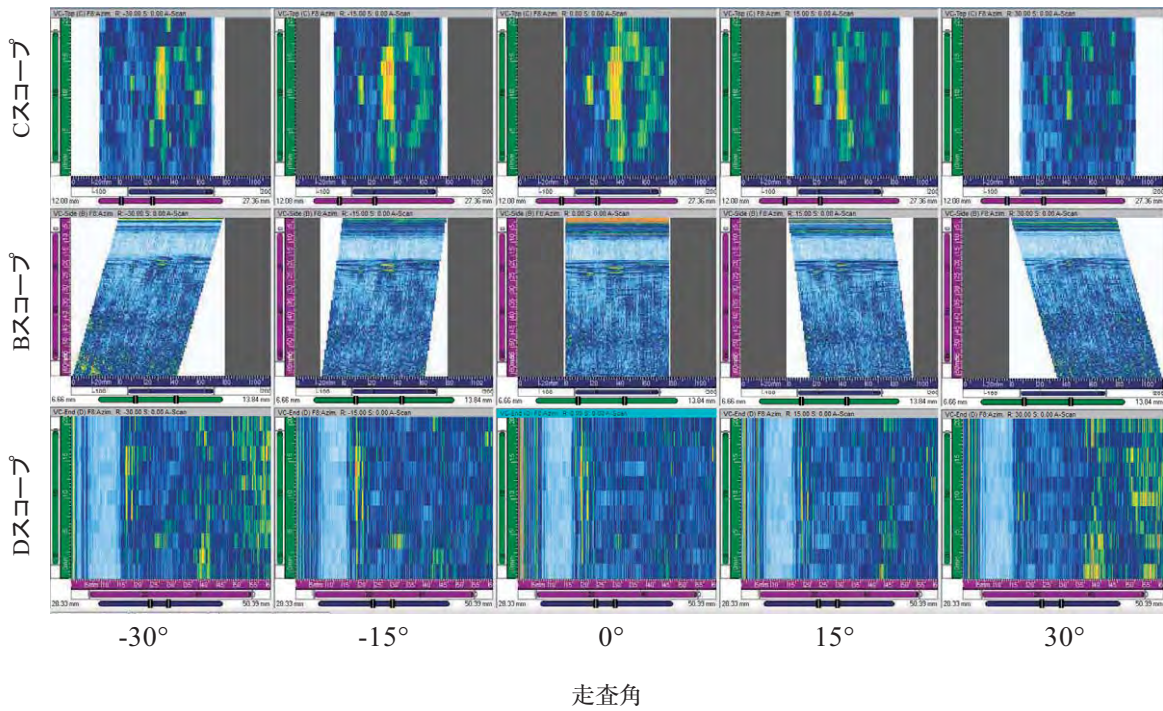
図 8 SCC-A のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による探傷結果



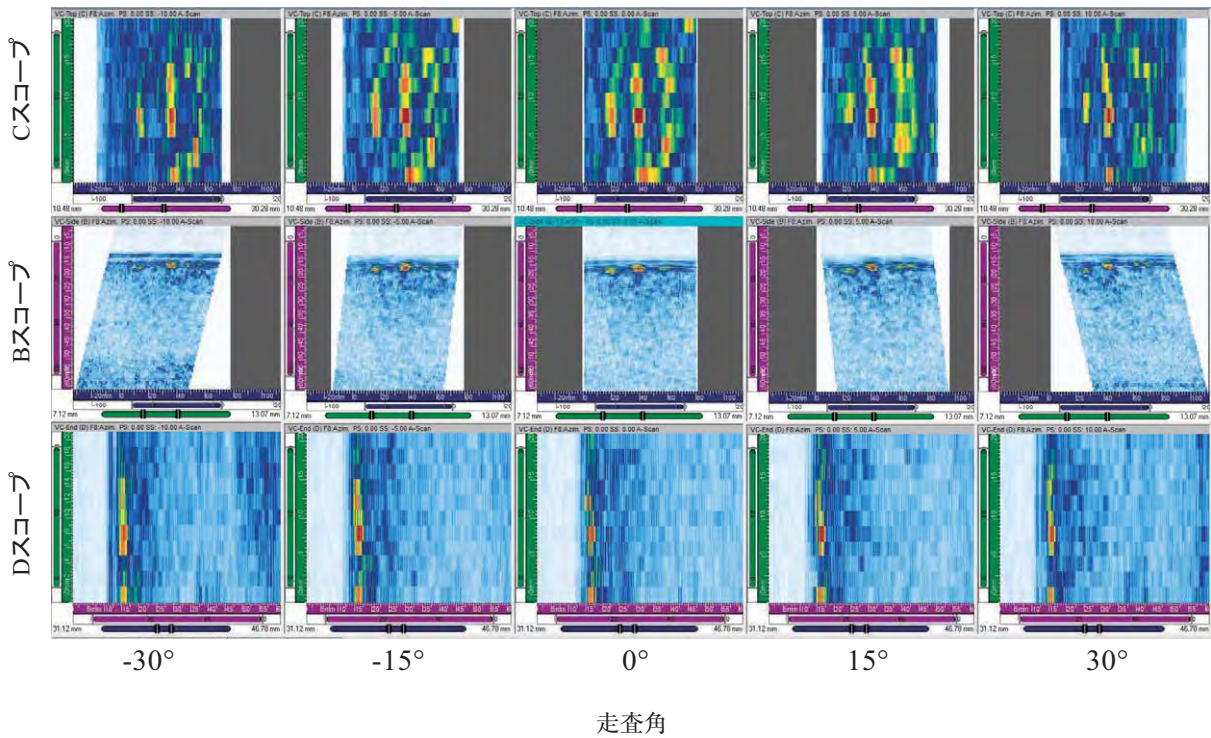
(2) 2 × 16 マトリクスアレイ探触子のウェッジあり(焦点深さ 8mm)

図 8 SCC-A のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による探傷結果





(3) 4 × 8 マトリクスアレイ探触子のウェッジなし(焦点深さ 8mm)  
 図 8 SCC-A のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による探傷結果



(4) 4 × 8 マトリクスアレイ探触子のウェッジあり(焦点深さ 8mm)  
 図 8 SCC-A のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による探傷結果



### 4.2 マルチアングル合成法

図9に、図8に示した焦点深さ8mmで異なる屈折角条件の探傷データを重ね合わせた結果を示す。異なる屈折角条件の結果が焦点深さ条件ごとに1枚の探傷画像として得られ、そのうち、焦点深さ8mmのものを示したものである。

図8の個別の屈折角条件の画像では、SCC 端部エコーの下方の溶接部における散乱波による模様が現れていたが、図9ではマルチアングル合成法による重ね合わせによって低減され、SCC の端部エコーが、高いSN比により明瞭に識別することができた。

### 4.3 SCC 切断調査

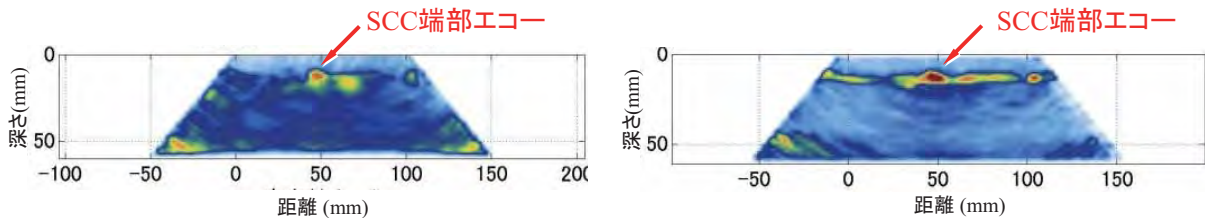
図10に SCC-A の破断調査結果を示す。割れ面に垂直方向に切断し、割れの断面を撮影したものである。割れは複数存在し、その深さは6~7mmであった。表2に示した深さ測定値7.4~9.6mmは、実際のSCC 深さによく一致している。

また、SCC 下方に、ブローホール、高温割れなどいくつかの溶接欠陥が存在した。これらは、3.1に述べたように SCC 付与のための肉盛再溶接の際に発生したものである。

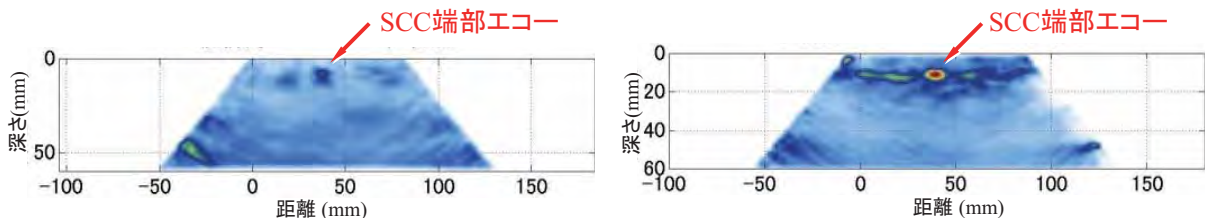
### 5. 考察

SCC 切断調査において発見された溶接欠陥は、図8とは異なる焦点深さ条件において検出されている。図11に、SCC-A のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による焦点深さ20mmの条件の探傷結果として、2×16マトリクスアレイ探触子のウェッジなしの条件による例を示す。SCC の下方に、複数の反射源が得られた。しかし、これはSCC のような表面からの割れではないと容易に判断できた。なぜなら、送信と受信の探触子が分割された探傷法においては、割れ面が複数ある場合には、割れ面が互いに障壁となっており、それぞれの割れの先端エコーを個別に検出することはないからである。切断調査によって、これらの判断が適切であったことが確かめられた。

さらに、異なる焦点深さ条件の探傷データについても、マルチアングル合成法による重ね合わせを行った。図12に、マルチアングル合成法により、異なる屈折条件に加えて、焦点深さ8~24mmの4mm毎の異なる焦点深さ条件の探傷データを重ね合わせた結果を示す。異なる深さ位置にあるSCCの端部エコーと再溶接部の溶接欠陥が、図10のSCC断面図に相当する断面図の形で、一つの画像として得ることができた。



(1) 2×16マトリクスアレイ探触子のウェッジなし(焦点深さ8mm) (2) 2×16マトリクスアレイ探触子のウェッジあり(焦点深さ8mm)



(3) 4×8マトリクスアレイ探触子のウェッジなし(焦点深さ8mm) (4) 4×8マトリクスアレイ探触子のウェッジあり(焦点深さ8mm)

図9 マルチアングル合成法による評価画像(屈折角-45~45度の合成)

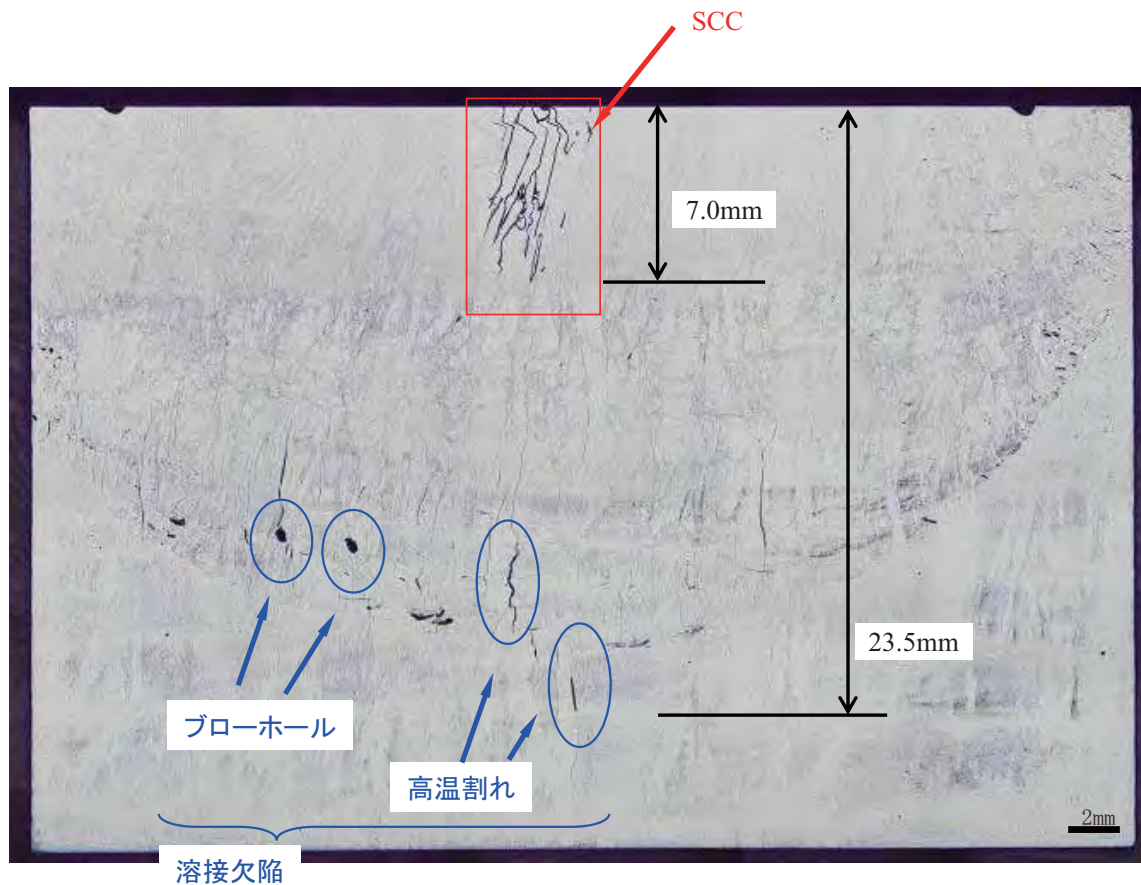


図10 SCC切断調査

フェーズドアレイ非対称 TOFD 法による深さ測定値は、切断調査結果による SCC 深さを下回るものではなかった。ウェッジのない場合には、適切な深さ値を得ることができない条件があった。ウェッジを使用する場合、SCC 深さとの誤差は 0.4~1.8mm であった。

さらに精度向上のためには、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法に使用する装置の条件として、フェーズドアレイ探触子の振動子配列、ウェッジ仕様、探傷条件として、屈折角範囲とピッチ、焦点深さ、についてさらに最適化が必要と考えられる。また、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法において、図 8 に示した屈折角  $\pm 30^\circ$  を超えると、探傷画像における端部エコーの

信号強度が低下したことから、マルチアングル合成法による処理に有効な屈折角範囲についても最適化が可能であると考えられる。

フェーズドアレイ非対称 TOFD 法とマルチアングル合成法は、Ni 基合金溶接部の管台の軸方向に割れ面が走る SCC の開口面からの深さ測定に対して有効であると判断される。しかし、これまでに試験し、切断調査した試験体の SCC は、本研究の対象とする先端が尖鋭なものではなかった。本研究の目的とする尖鋭な先端を有する SCC に対する適用性を検証することが今後必要である。



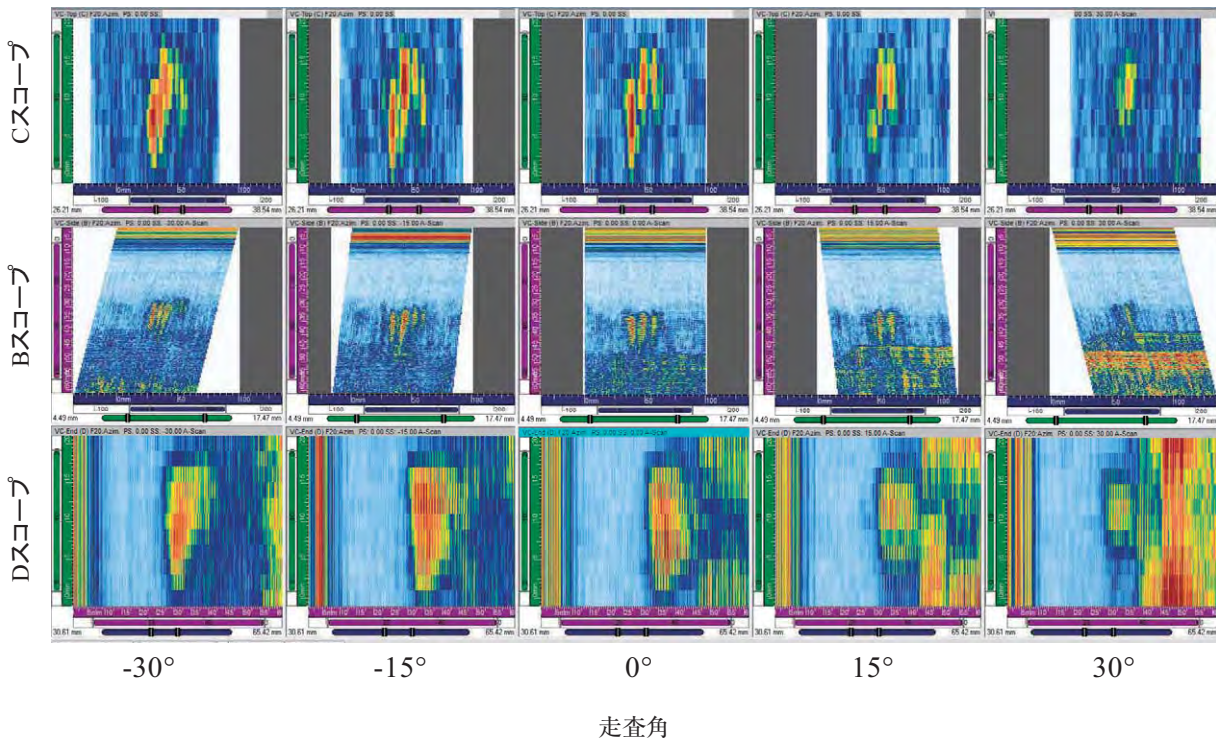


図11 SCC-Aのフェーズドアレイ非対称TOFD法による探傷結果 (2×16マトリクスアレイ探触子のウェッジなし(焦点深さ20mm))

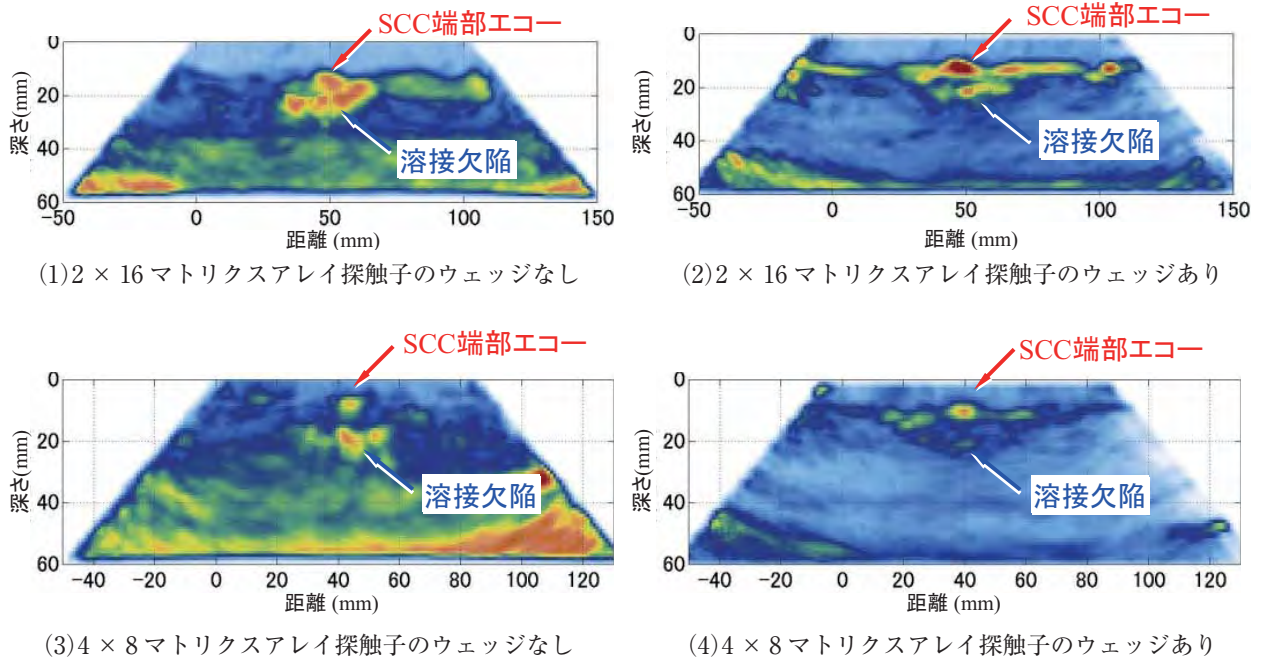


図12 マルチアングル合成法による評価画像 (屈折角-45~45度, 焦点深さ8~24mmの合成)



## 6. おわりに

管台セーフエンド異材継手溶接部の SCC の深さ測定のために、送信と受信の探触子にマトリクスアレイ探触子を使用するフェーズドアレイ非対称 TOFD 法、マルチアングル合成法およびこれらの組み合わせた探傷法を開発した。

本探傷法は、従来の手法にはない以下の特徴を有する。

- ① 送信と受信の超音波ビームの屈折角および伝播経路が異なり、非対称とすること、
- ② 屈折角と焦点深さの異なる条件の探傷結果を重ね合わせること

本探傷法によって、異材継手溶接部の SCC 深さを、割れの開口面側から測定する試験を行い、本手法の有効性を確認することができた。

今後は、尖鋭な先端を持つ SCC を含めてさらに多くの測定データを収集し、これによる探傷条件の最適化と深さ測定精度の向上を図り、曲率のある探傷面への適用、欠陥非開口面からの探傷への適用について検討を進める予定である。

## 参考文献

- (1) 関西電力, "大飯発電所 3 号機の定期検査状況について (原子炉容器 A ループ出口管台溶接部の傷の原因と対策)," <http://www1.kepco.co.jp/pressre/2008/0926-3j.html>
- (2) 石田仁志, "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," INSS Journal, Vol.13, p.246, (2006).
- (3) Zetec, フェーズドアレイ探傷装置 Dynaray, <http://www.zetec.com/2010/06/dynaray-product-line/>
- (4) Zetec, 制御・データ収集ソフト Ultra Vision, <http://www.zetec.com/2010/06/ultravision/>
- (5) MathWorks, 数値解析ソフト MATLAB, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>