

**特集：非破壊検査技術の最新動向**

**超音波探傷試験の画像化の普及と最近の動向**

株式会社 I H I  
畠 中 宏 明

**1. はじめに**

非破壊検査は、構造物の製造時に要求される品質を満たしていることを確認する一手段として採用されるほか、構造物の供用中に生じる劣化の程度を評価するための手法として適用される。表面のきずに対しては浸透探傷試験(PT)や磁気探傷試験(MT)が、材料内部のきずに対しては放射線透過試験(RT)や超音波探傷試験(UT)等が広く用いられている。

UT 技術ではデジタル化が進み、コンピュータ技術や信号処理技術の発達に伴い、きず検出性の向上に関する検討が図られている。UT 技術の一つである超音波フェーズドアレイ(UPA: Ultrasonic Phased Array)法は探触子に含まれる複数の振動子の送信パルスタイミングを個々に電子制御することにより、様々な超音波ビームを送信することが可能であり、従来の UT ではきずの検出、評価が困難であった探傷への適用検討が進められている。

一方、溶接構造物・プラントでは安全性、信頼性を確保して、全交換することなく、損傷している箇所を特定、補修(部分交換)して長期間運用していくことが、社会的、経済的に求められてきている。そのためには、従来検出が困難であった損傷などを見落とすことなく検出し、精度良く評価を行うことが、構造物やプラントの維持管理のためには重要となる。

例えば、供用中の LNG 貯槽では、LNG の受入れ、払出しによって、内槽内側の側板×アニュラ板 T 継手などに繰り返し応力が加わるため、継手部の検査手法、健全性評価手法の確立が求められている。地上式 LNG 貯槽は二重殻構造で、断熱材が内槽と外槽の間に充填されているため、開放時でも内槽内側からしかアクセスすることができない。既設のアルミ合金製の貯槽では、表層きずに対しては浸透探傷試験、内部きずに対しては内槽内側からの超音波探傷試験によって非破壊検査が行われてきた。9%Ni 鋼製の貯槽の場合、溶接部には Ni 基材料が使用されているため、超音波の減衰・散乱が大きいことが課題であり、種々の検討がなされてきている<sup>1),2)</sup>。本稿では、9%Ni 鋼製貯槽の検査を対象とした超音波フェーズドアレイ法による探傷例について紹介する。

**2. 従来 UT と UPA 法**

溶接継手の UT で適用されている探触子は、単一の振動子から発せられる超音波を検査対象物に屈折させて入射させる。この場合、超音波の部材への入射角は固定され、超音波の伝搬方向と、きずの進展方向がなす角に依存した大きさのきず反射信号が得られる(図 1)。また、振動子から発せられた超音波ビームは拡散し、探触子から遠ざかった位置では超音波が減衰するため、きず反射信号の強度は低下する。

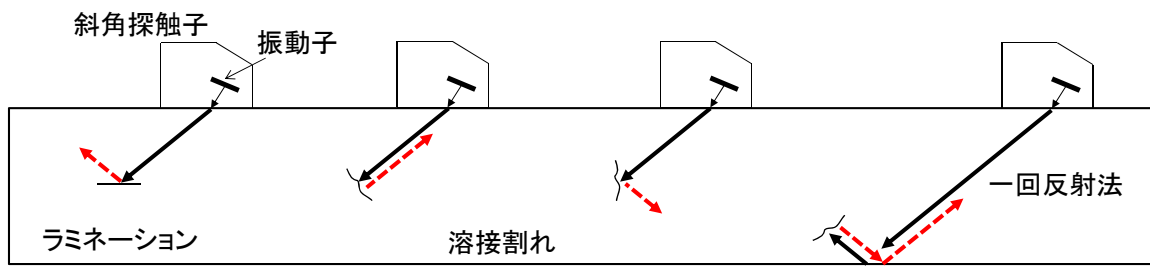


図1 斜角探傷法におけるきず方向に対する依存性

UPA 法では複数の振動子を有する探触子を使用する。複数の振動子が超音波を送信するタイミング(パルスタイミング)を個々に電子制御することにより、様々な超音波ビームを送信(ビームステアリング)することが可能となる。例えば、図 2(a)のように右側の振動子から順に超音波を発信させた場合には、超音波の波面を図の左下に伝搬させることができる。このパルスタイミングを変えることにより任意の方向に超音波を伝搬させることができる。また、図 2(b)のように両端の振動子から順に超音波を発信させた場合には、超音波を探触子の中心軸に集束させることができ、パルスタイミングを変えれば超音波を任意の深さに集束させることができる。したがって、UPA 法により任意の方向に超音波ビームを走査し、かつ任意の位置に超音波ビームを集束させることにより、従来 UT と比較して、きず検出性の向上が期待される。

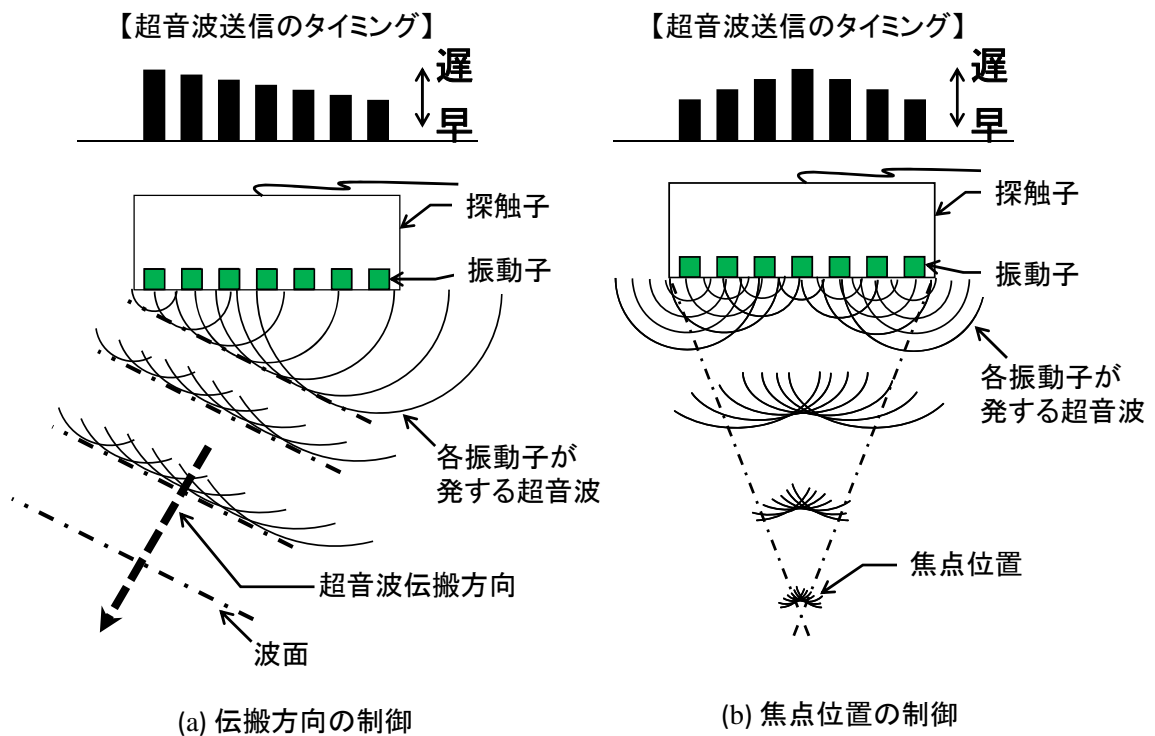


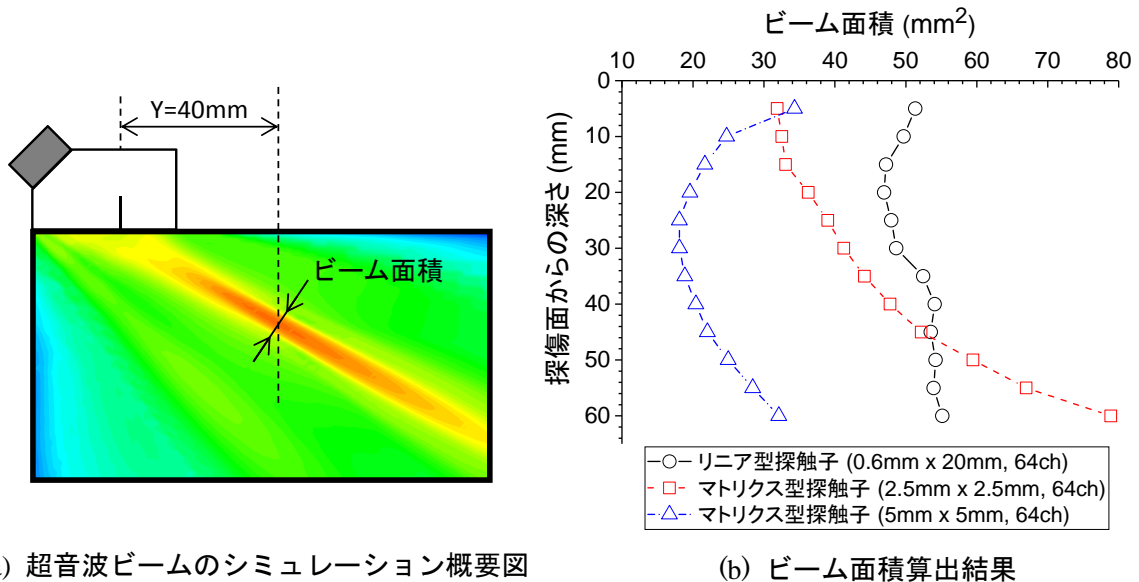
図2 UPA 法による超音波ビームステアリングの例

UPA 法は画像化が可能であり、従来の UT と比較して記録性に優れているため、発電プラントの配管などの検査に使用されている。また、配管エルボ部やノズル部などの複雑形状部の探傷や、ステンレス鋼溶接部やステンレス鋳鋼材など超音波の透過性の低い材料のきず検出性の向上など、従来の UT では困難な探傷への適用検討が進められている。

### 3. 数値シミュレーションの活用によるアレイ探触子設計

超音波ビームの幅は、送信される超音波の周波数、振動子の大きさ及び伝搬距離(ビーム路程)などに依存する。継手の超音波探傷において、高い検出性を確保するには、広範囲において超音波ビームを集束させながら探傷を行うことが望まれる。

探触子を配置した面から深さ方向にビームの集束点を電子走査できるようにパルスタイミングを設定し、シミュレーションによりビーム幅を計算した結果を図3に示す。



(a) 超音波ビームのシミュレーション概要図

(b) ビーム面積算出結果

図3 パルスタイミング設定による超音波ビーム幅の計算

超音波の入射点から集束点までの水平距離を 40mm とし、最大の音場強度から 1/2 になる範囲を求め、楕円近似でビーム面積を求めた。図3(b)では縦軸は深さを、横軸は入射点から水平距離 40mm において、計算上の集束点深さでのビーム面積を示している。

図3(b)のプロット○は周波数 2MHz、64 チャンネル(一素子 0.5mm×20mm)のリア型探触子を用いて、横波を送信した場合のビーム幅を示している。深さ 20mm 程度でビーム面積が最小となり、それ以後は緩やかに広がる結果となった。次に、集束性を向上させるために点集束が可能なマトリクス型探触子を採用し、同様の計算を行った。周波数 2MHz、64(8×8)チャンネル、一素子の大きさが 2.5mm×2.5mm、及び 5mm×5mm の二つの探触子でのビーム幅算出結果を、それぞれ図3(b)のプロット□と△に併せて示す。シミュレーションの結果、2.5mm×2.5mm の素子サイズの探触子では、浅い位置においてリア型探触子と比較して集束性が向上しているが、深くなるに伴い急激にビームが広がることがわかる。

一方、5mm×5mm の素子サイズの探触子では、広い深さ範囲において他の二つの探触子と比較して集束性が確保される結果が得られ、板厚 20mm よりも厚い部材に対しては、この探触子が適していることがわかる。この結果を基にして素子サイズが 5mm×5mm のマトリクス型探触子を試作して探傷試験に供した。このようにシミュレーション技術は探傷前の事前の準備や条件の選定において非常に有用なツールであり、従来のトライアルアンドエラーの繰り返しと比較して、短時間に必要な検討を行うことができる。

### 4. 9%Ni 鋼製貯槽を対象とした適用検討

LNG 貯槽の内槽材として使用されている 9%Ni 鋼の溶接部には、Ni 基の溶接材料が使用されている。この 9%Ni 鋼の溶接部の検査には、一般には浸透探傷試験による表面検査や、突合せ継手の場合には放射線透過試験が適用されている。今日ではコスト低減などの理由からも貯槽は大型化、大容

量化していく傾向にあり、使用される材料の板厚も厚くなる傾向にある。当該部の検査として、厚板の非破壊検査に有効な超音波探傷試験を適用する機会が増加しているが、Ni 基の溶接金属はオーステナイト組織となるため、著しく成長した柱状晶組織によって溶接部の超音波探傷試験は制約を受ける。継手の例として、側板×アニュラ板の模擬継手の溶接部の断面写真を図 4 に示す。

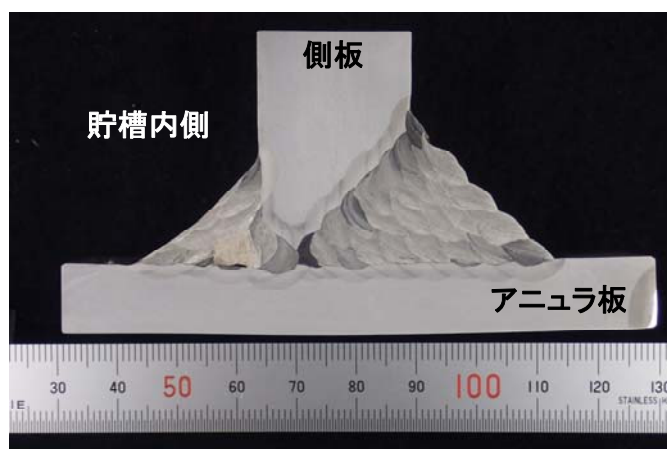


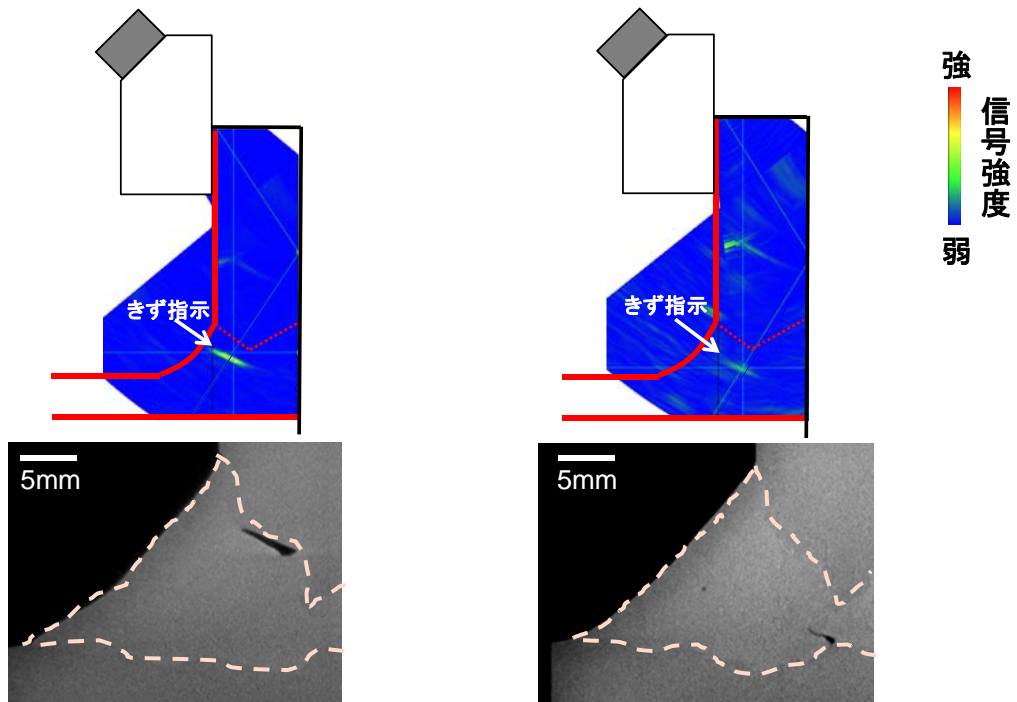
図 4 LNG 貯槽側板×アニュラ板、模擬継手の断面写真

この継手部は内槽の最下段に位置し、供用中に LNG の受入れ、払出しにより繰り返し応力が加わるため、疲労による損傷が生じることが懸念されている。地上式 LNG タンクは二重殻構造であり、保冷材が内槽側板の外側に充填されているため、開放時に検査を行う際には内槽内側からのみしかアクセスできない。ここでは、側板×アニュラ板 T 継手を対象として、模擬きずを挿入した溶接試験体（側板：25mm、アニュラ板：12mm）を製作し、フェーズドアレイ法によるきず検出性の検討を行った。図 5 にきずを挿入した供試体と探傷概要を示す。上述の周波数 2MHz、64(8×8)チャンネル、一素子の大きさが 5mm×5mm のマトリクス型アレイ探触子を使用し、側板を探傷面とした。また、貯槽内側の溶接部を対象としているため、一回反射法を採用した。



図 5 供試体と探傷位置

図 6 に UPA 法による探傷画像、及びきず指示が得られた位置の X 線 CT 結果を示す<sup>3)</sup>。図 6(a)は側板近傍の融合不良、図 6(b)はアニュラ板近傍の割れを模擬したきずである。どちらのきずも側板からの探傷により検出できており、開放検査時の一手法として適用できる可能性があると考えられる。



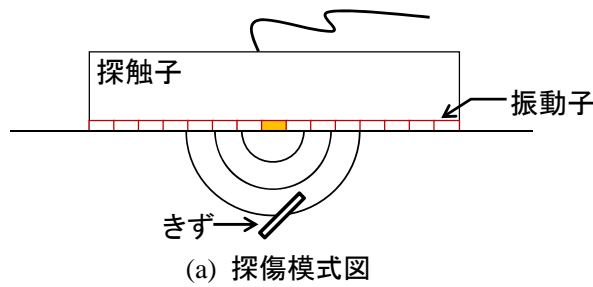
(a) 側板開先面近傍の融合不良

(b) アニュラ板近傍の割れ模擬きず

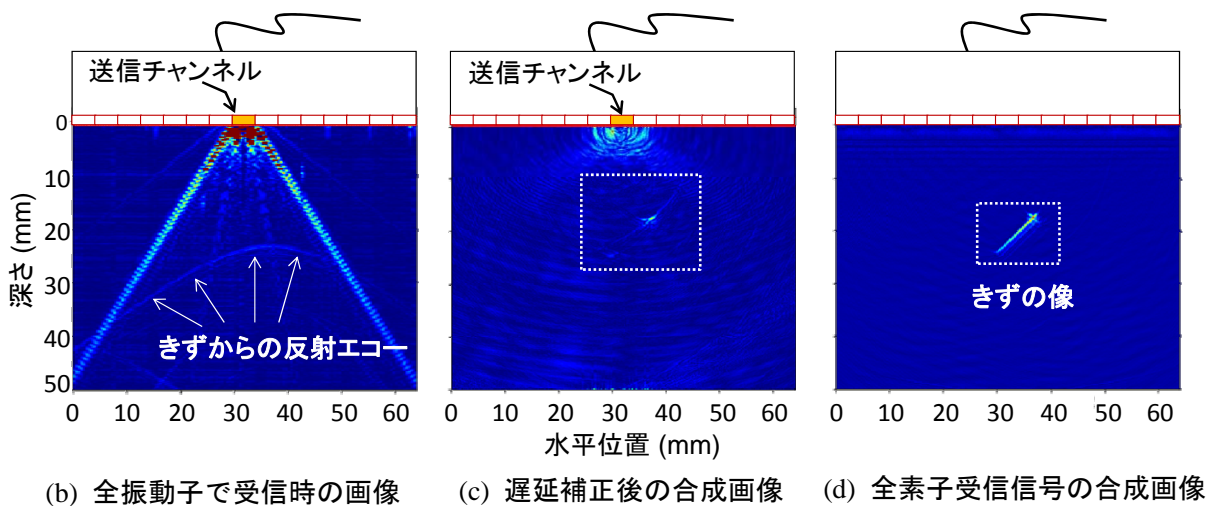
図6 側板×アニュラ板継手の探傷例と X 線 CT 画像

## 5. FMC/TFM

これまでに UPA 法の開発と適用事例について述べたが、近年ではコンピュータ技術の発達により、採取した信号の後処理技術が発達し、従来では工業的に実現できなかった計算が行えるようになってきている。ここでは、今後の展望として FMC(Full Matrix Capture) / TFM(Total Focusing Method)について触れる<sup>4)</sup>。



(a) 探傷模式図



(b) 全振動子で受信時の画像

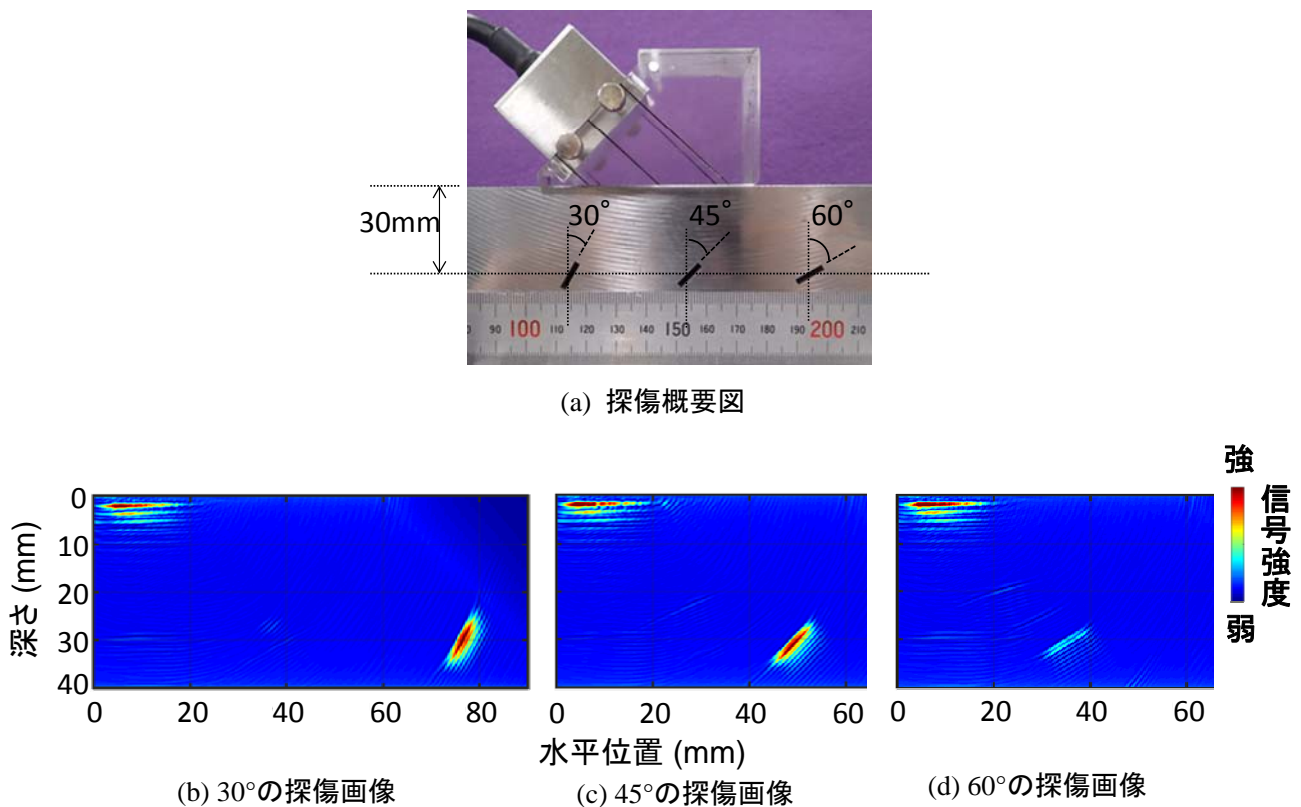
(c) 遅延補正後の合成画像

(d) 全素子受信信号の合成画像

図7 FMC/TFM の概略図

FMC/TFM では、**図 7**に概略を示すように一つの振動子が発信した超音波の反射信号を複数の振動子で受信する。これをすべての振動子で繰り返し行い、一連のデータ採取後に任意の位置にあたかも超音波ビームが集束されているかのように位相を調整して信号の合成を行う手法である。**図 7(a)**に示した模式図において、**図 7(b)**では単一の振動子から送信された超音波をリニアアレイ探触子のすべての振動子で受信した際の画像である。中央部に描かれている弧状の指示が反射源からの指示である。送信振動子 - 反射源 - 受信振動子の伝搬距離は各々の受信振動子において異なるため、この距離の分、各受信信号の遅延時間を補正した画像が**図 7(c)**となる。アレイ探触子には複数の振動子が含まれているため、すべての振動子を送信として繰り返し、得られた波形を合成することで、**図 7(d)**の画像が得られる。

探傷画像例を**図 8**に示す。鉄鋼材料に**図 8(a)**のように角度を持たせた放電加工スリットを導入し、2MHz、32ch のリニアアレイ探触子を用いて、データ採取と信号合成を行った。**図 8(b)~(d)**の TFM 処理後の探傷画像では、実際に導入されたスリットの角度とほぼ同じ傾きを持つ指示が得られた。この FMC/TFM が普及することにより、きず検出性の向上や高精度なきずの評価につながると考えられる。



**図 8 TFM による探傷画像例**

## 6. おわりに

本稿では超音波探傷試験、なかでも超音波フェーズドアレイ法による探傷技術の開発・適用事例について紹介した。これらの技術はインフラ・プラントなどの品質保証、今後の維持管理のためにさらに重要が高まることが予想される。一方で、超音波探傷を行うための周辺技術が大きく発展してきていることから従来ではリアルタイム化ができなかった技術が実現可能になってきている。超音波探傷技術は今後より広く工業分野に展開され、効率的な設備・機器の運用、ひいては社会に安心・安全を提供する技術としてさらに重要になっていくものと考えている。

## 参考文献

- 1) 上林正和 他, ”LNG 地上式タンク 9%Ni 鋼溶接継手への UT 法の実用化に関する研究”, 圧力技術, 第 43 巻, 第 2 号, pp.30-40, (2005).
- 2) 久保尚重 他, ”世界の LNG タンク動向と地上式 LNG タンクの最新技術”, 圧力技術, 第 38 巻, 第 3 号, pp.47-59, (2000).
- 3) 田村尚之 他, ”9%Ni 鋼製 LNG タンク溶接部の超音波探傷技術の開発”, 平成 28 年度秋季講演概要集, 日本非破壊検査協会, pp. 193-194, (2016).
- 4) 大島誉寿 他, ”FMC/TFM における溶接きず評価方法の検討”, 平成 29 年度秋季講演概要集, 日本非破壊検査協会, pp. 27-28, (2017).

<略歴>

### 畠 中 宏 明 (はたなか ひろあき)

1997 年 石川島播磨重工業株式会社 入社 生産技術開発センター 配属  
2011 年 博士 (工学) 取得 (東京工業大学)  
2011 年 技術開発本部 生産技術センター 生産基盤技術部 主任研究員  
現在に至る