

新 UT (PhasedArray 法、TOFD 法) 技術の 実機適用状況

船戸 一寛 * 芝田 三郎 **
Kazuhiro Funato Saburoou Shibata

新 UT 技術と言われている PhasedArray 法や TOFD 法の実機工事への適用状況を紹介します。PhasedArray 法や TOFD 法は通常 UT とは表示方法が異なり、PhasedArray 法は多振動子を電子制御し受信した信号を画像化するので優れた描写力を有する。一方、TOFD 法は固定角探触子を対向配置して内部きずからの回折波を受信して特有の縞模様画像を得る、きずの長さ寸法測定に優れた手法である。当社ではさまざまな産業分野で客先からの多様なニーズに応じて、これら新 UT 技術の最適手法を提案している。

キーワード：プラント、産業機械、NDI、超音波探傷、PhasedArray 法、TOFD 法

1. はじめに

UT (超音波探傷) は発電プラント、化学プラント、航空/宇宙、船舶、橋梁、産業機械などさまざまな産業分野で製品の信頼性を高める技術として古くから適用されてきた。しかし、従来法 UT は、一般的に記録保存性に乏しく探傷波形および探触子の位置関係で判断するため専門知識や経験が必要であり、検出性や検査精度は検査員の技量に負うところが多かった。

近年、コンピュータの急速な発展に伴い、溶接金属内部のきずの描写性や検出精度に優れる PhasedArray 法や TOFD 法などの画像化 UT も数多く適用されるようになってきている。本稿では新 UT 技術と言われている PhasedArray 法や TOFD 法を用いて実施している実機工事への適用

状況を紹介します。

2. PhasedArray 法の概要

PhasedArray 法は、医療分野で結石や胎児の診断に使われているエコー診断装置の技術を工業分野に応用したものである。その原理は超音波の振動子を複数 (16 ~ 128Ch) ならべて配置した探触子に電子制御で時間差をつけて励起することによりビームの向きを制御し、受信した信号を画像化するもので、検出能力や精度は原子力配管の溶接部欠陥サイジング、その他構造物の検査などで実証済である。

装置は従来型 UT 装置と同等以下に小型化されており、かつ装置単体でデータ処理まで可能である。

従来の平板振動子を用いた探触子では、材料中を超音波が伝搬するに従って超音波ビームは拡散

* 検査事業部 技術部 課長

** 元 検査事業部 技術部 (現株式会社アデルコ)

してビーム幅が広がるため、きずを測定したとき探傷画像が明瞭ではないこともあり、高感度の探傷を行うと隣接するきずを分離できず、大きな一つのきずと過大評価する場合も生ずる。

また、従来 UT の通常の探傷感度での探傷は、選定した固定屈折角での探傷であるため、きずの傾きによっては十分な反射エコーがえられず、ま

た材料の減衰のばらつきの影響を大きく受けて過小評価となることも多い。

PhasedArray 法はビーム角度を電子制御したセクタスキャンと左右走査の組み合わせで画像化するので一軸のエンコーダなどを用いるだけでよく、装置が簡易になり、かつ複雑形状にも対応可能である。ダイナミックフォーカシングを用いる

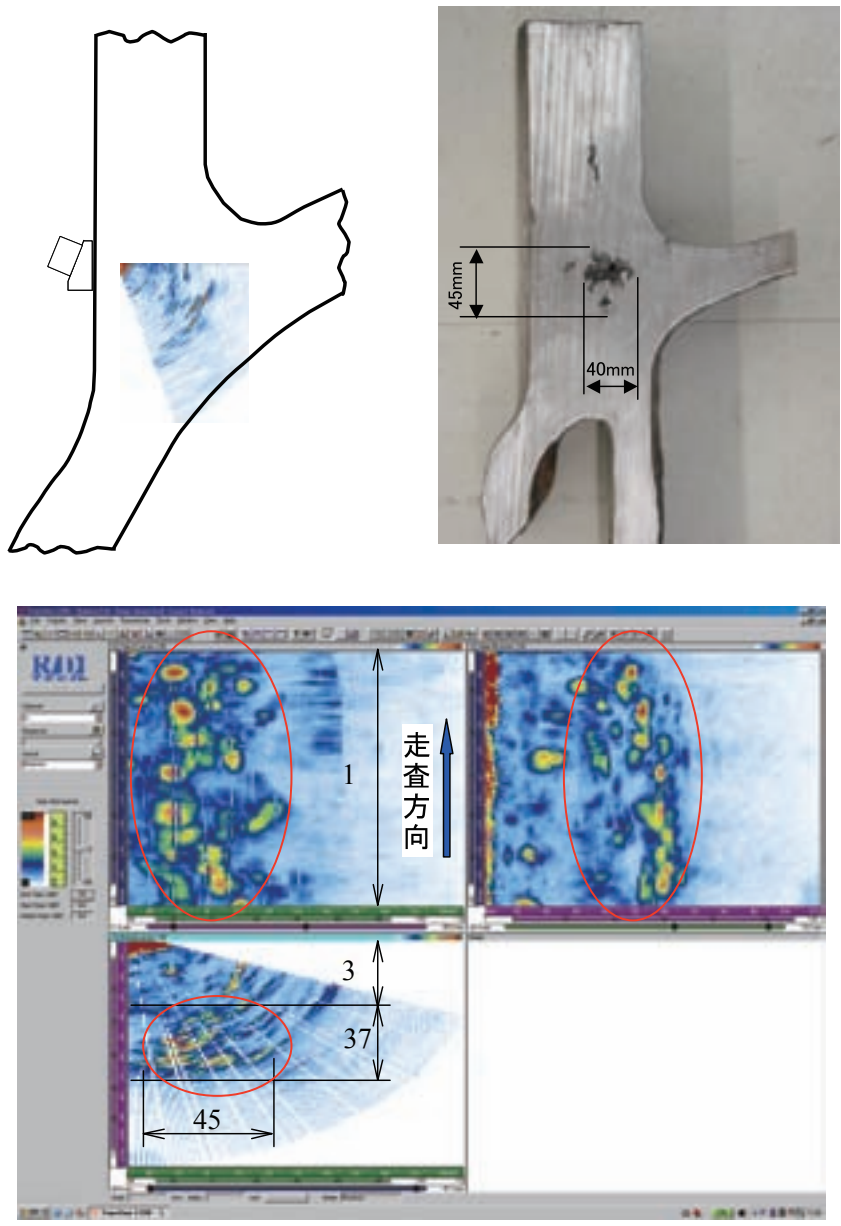


図1 超音波 PhasedArray 法の概要

ので、きずの深さに対して最も超音波ビームが細くなる条件で探傷し、きずの鮮明な像を短時間に得ることができる。従って、隣接するきずの分離が容易になり、欠陥全体像の把握ができ欠陥情報を精度良く測定できる。

3. TOFD法の概要

TOFD法は Time of Flight Diffraction（飛行時間差超音波探傷法）と呼ばれ1970年代に英国で開発された超音波探傷技術である。探傷要領は同一屈折角を持つ送・受信探触子を同一探傷面に探傷部を挟んで対向配置し、平行又は直交方向に走査してきずからの回折波（散乱波）を時間、あるいは

はエンコーダ位置信号と合成することによって、TOFD法特有の縞模様（円弧模様）画像が得られる。それら模様を検出された位置および時間から欠陥寸法を求める探傷法で圧力容器、配管、その他構造物の検査などで主に欠陥高さのサイジング要求がある部分に適用されている。

装置は当初、外国製であったが現在では国産品も開発されて低価格化も進み、TOFD法の適用範囲が拡大しつつある。検査要領、判定基準についてもBS、ASME、JISなどの規格が整備され一般的な検査技術となりつつある。

TOFD法は固定角探触子の組合せで走査するため選定した屈折角にもよるが、一度の走査で探傷

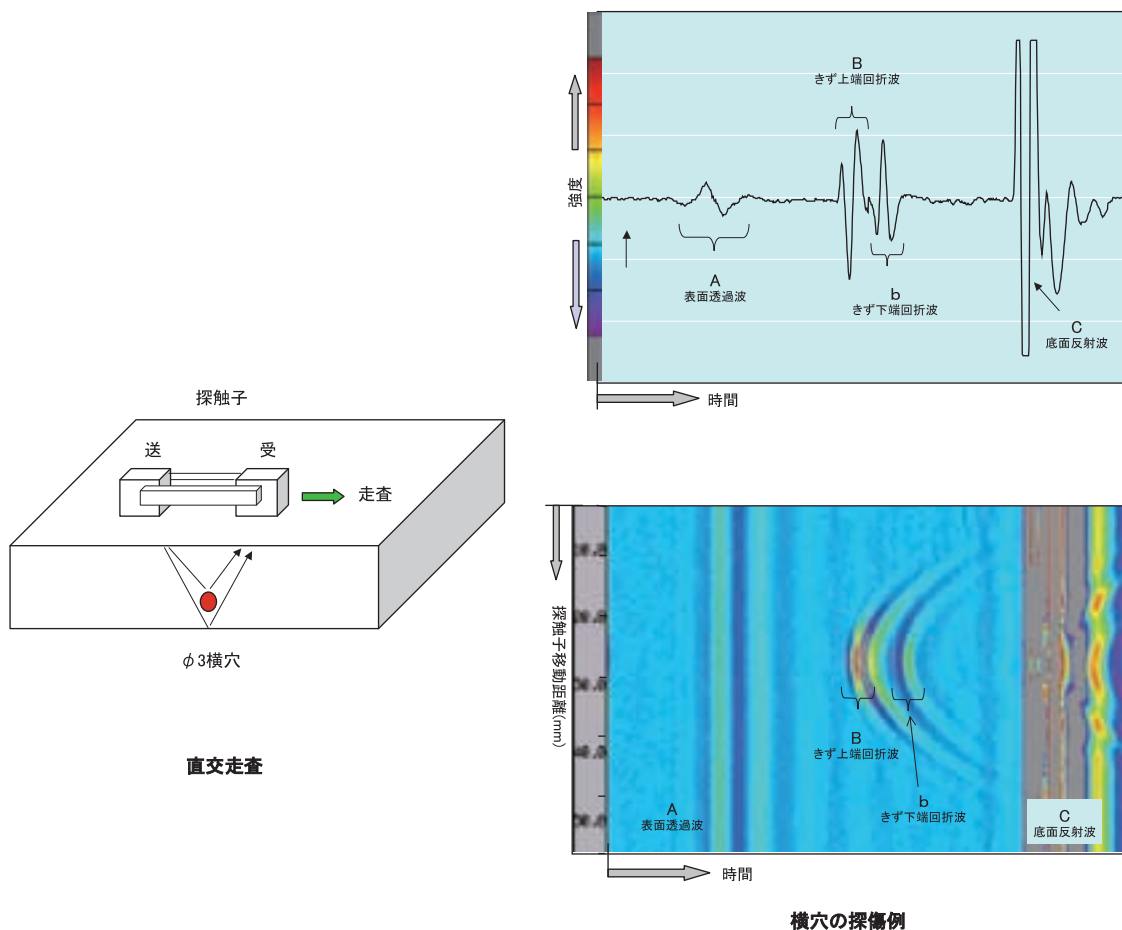


図2 超音波 TOFD法の概要

可能な検査範囲は概ね 50mm 程度であるため 100mm を超えるような厚板では交軸点（探触子間距離）を変化させて複数回走査しなければ全厚の検査範囲を探傷できない。また、きずからのエコーは面反射波ではなく回折波を受信するが、回折波は微弱信号のため高感度探傷となり金属組織の影響などでノイズが多く、識別困難な場合もあるので適用する場合は材質や金属組織に注意する必要がある。

4. 実機工事適用状況紹介

4.1 発電プラント分野

(1) 原子力発電

国内の原子力発電設備では安全性を重視するため定期的に供用期間中検査（ISI：Inservice Inspection）が行われ、超音波探傷法（UT）が主に適用されている。

供用期間中検査とは、通常の運転休止期間中に実施する非破壊検査で、機器に要求される安全上の機能の確認を行うものである。

ISI で欠陥が検出された場合は欠陥の進展状況を解析することにより残存寿命を検討した上で運転継続の可否を判断する。この寿命評価を行うためには欠陥寸法を正しく把握することが必要であり、超音波探傷による欠陥の検出性に加えて、欠陥寸法の測定精度とその信頼性が重要である。欠陥の検出性と寸法測定能力を担保するための手法として検査技術の認証試験 PD（Performance Demonstration）があり国内では 22 名（H20.3）の有資格者が存在する。一般的に PD は ISI に適用される超音波探傷の装置、要領書、および検査員の技能が十分な能力を有していることを証明するためのシステムであり、当社では寿命評価の初期データとなる欠陥寸法を高精度に測定するため PD 資格者が PhasedArray 法を適用して実施しており、高い信頼を得ている。また、適用技術の開

発、検証試験などにも積極的に取り組み PhasedArray 法の適用範囲を拡大している。

(2) 火力発電

火力発電用ボイラは、高温高圧下で長時間使用されることからクリープ損傷の発生に注意しなければならない。主に、主要配管の溶接継手を対象として微視的損傷にはノイズ分析法を、巨視的損傷には TOFD 法を適用し、適用実績は多い。

中でも TOFD 法は、微視的損傷が連結して面状きずとなった損傷が大きく成長する前に検出する手法として位置づけて実施しているが、これまで面状きずが検出された例はない。

また、大口径の高温高圧配管だけでなく小口径管の損傷にも TOFD 法を適用している。小口径管でもクリープ損傷の検出に適用されるが、その他に、内面に生じる腐食・ピット腐食などへの適用も多い。この場合、管の肉厚が薄いため機構を工夫したセンサーを試作しながら対応しておりこれまでの実施例は多い。

このように、ボイラでは、TOFD 法が活発に適用されており、今後も適用範囲が拡大されると考えられる。

また、クリープ損傷計測法として PhasedArray 法の適用性を検討してきたが、適用できる見通しを得ていることから今後は、実機データを蓄積しボイラへの適用を図る所存である。

(3) 水力発電

水力発電所主要設備の余寿命解析の初期条件となる欠陥情報を精度良く測定する目的で PhasedArray 法を適用している。

水力発電所の水車ケーシング・ステーバーンは昭和初期に製造され現在も使用されているものが多く、従来 UT 法では保守的（安全側）に評価するため余寿命は短くなる傾向があった。その結果、設備更新が予防保全的に行われ、工事も大規模となり費用負担も大きかった。

一般的に応力が集中し、き裂が発生しやすいステーパー付根部分に UT を適用する場合、形状が複雑で材料の成分が不均一なため検出性／識別性や探傷感度の設定が困難である。これらの課題を改善し、残存寿命評価精度の向上を図るために、欠陥全体像の描写性に優れ、欠陥情報を精度良く測定できる PhasedArray 法を適用して残存寿命評価精度の向上をはかることにより水力発電所主要部位の設備更新時期の延伸ができ、発電原価の低減に寄与している。

4.2 化学プラント分野

Reactor など大型厚肉容器は板厚 100mm 以上、容器直径が約 5 m 以上で重量が 1000 TON を超えるものも製作されている。このような超大型容器では既存の放射線透過試験 (RT) の代替として超音波探傷法 (UT) を実施する RT 代替試験の適用が必須条件となる。

この試験では検査結果の自動記録が必要となるため、通常の規格検査 (パルス反射式超音波探傷法) に加えて、きず検出能力およびきずの寸法評価精度に優れた TOFD 法を併用して、きずの有無、欠陥サイズを評価・記録している。

TOFD 法による RT 代替検査は検査要領、判定基準についても規格整備され一般的な検査技術となりつつあるが PhasedArray 法で RT 代替検査が可能か、その検出性、精度および規格要求事項などについても研究しており、適用技術を開発中である。

4.3 航空／宇宙機器分野

航空／宇宙機器分野では複合材料や特殊金属の接合部について信頼性を向上する目的で超音波探傷法を適用する機会が増えている。宇宙機器では試験段階から性能を優先して開発されることが多

く、材料も特殊なものが使用されていて寸法や形状も検査性を考慮したものになっていないことがある。実機適用例では宇宙機器部品への TOFD 法適用がある。これは特殊な材質、形状の接合部に合わせて専用 TOFD 探触子を開発し、適用を可能としたものである。部品形状は複雑で超音波を入射するための探触子接触スペースも限られた範囲しかなく、通常 UT のパルス反射式のように波形の判断では識別できないような微小な欠陥を対象としているため画像化による識別は必須であった。このように航空／宇宙機器に適用する場合は検査仕様が決まっているものを除き要求される検査精度、手法の選択、適用技術など、すべてに開発要素があり必要とされる結果を提供できるよう検討しながら対応している。

4.4 船舶分野

大型コンテナ船の厚板溶接部の検査には放射線透過試験 (RT) が義務付けられているが、近年、脆性き裂の引金になる可能性がある一定以上の大きさの初期欠陥を検出するための適用技術が検討されている。これは最新技術の UT 法で実用的な検査をするためのプラクティスであり、当社では TOFD 法および PhasedArray 法を適用して試験体に付与された自然欠陥、人工欠陥を探傷して手法の検出限界、検出精度の確認試験を実施した。今後、適用手法、許容欠陥、UT 検査標準／基準などについて NK などの船級協会でも検討される予定である。それに先立ち、溶接技量の安定化を図る目的で溶接士にフィードバック可能な方法として PhasedArray 法を用いて具体的適用方法の検討をおこない、眼に見える (判別し易い) 検査結果を提示できるようにした。

放射線透過試験 (RT) と PhasedArray 法 (UPA) を比較した場合、RT ではフィルムによる平面情報しか得られず欠陥の分布は確認できても開先内

部の位置や深さは測定できない。またフィルムの濃度差で識別するため体積の少ない欠陥の識別は難しく、厚板ほど識別可能な欠陥も大きくなる。UPA では RT と同等以上の検出性が確認でき、欠陥性状の推定に重要な開先内部の位置や深さも測定可能なため、PhasedArray 法を適用した検査技術は溶接技能教育だけでなく実機検査にも展開されていくと思われる。

その他、次世代船舶材料の研究では軽量化が図れ破壊靱性に優れる複合材料の検査で画像化 UT (B スコープ法) や PhasedArray 法を適用して欠陥の分布状況や剥離の範囲測定などを実施している。将来的には実機検査に適用すべく材料の開発段階から適用技術、検査手法、検査要領の開発を行ない適用範囲を拡大する計画である。

4.5 橋梁分野

鋼製橋梁への適用事例は少ないが TOFD 法の適用性については実験室レベルで検討し、実機の主桁ウェブおよび主桁フランジの溶接部において検証した例がある。本検討結果によれば、検査スピードは満足できたが、データ採取後の解析に時間がかかることや、介在物および無害な微小なきずも TOFD 法特有のきず指示 (縞模様) として表示されるため評価法の難しさから適用には至っていない。

PhasedArray 法も橋梁への適用事例としてあるものの極めて少ない。これまで、隅肉溶接部の止端部に開口しているき裂に対し奥行き寸法を計測した例では、寸法計測後に当該部位を切削して検証したところ、き裂の指示長さおよび深さとも実寸とほぼ一致した結果となり、PhasedArray 法の有効性を確認した例がある。しかし、箱桁の三線が交差する部位に対しては、ビームを伝搬させ難いため超音波法本来の適用が問題となっているが、PhasedArray 法で三線交差の部位探傷だけで

なく三次元で表示できれば適用拡大が見込めると考えられる。

4.6 産業機械分野

産業機械では一般的に構造物の製造時に溶接内部を検査する手法が用いられないことが多い。大量生産工場で使用されている大型プレス機などは稼働率を上げるため連続運転されているが、万一、構造部分になんらかのトラブルが発生して停止した場合、経済的損失も大きなものとなる。これらの損傷調査に PhasedArray 法を適用して検査結果の可視化画像を提供することにより専門知識がなくても溶接内部の欠陥状況を確認することができ、損傷に至る原因推定および損傷原因となり得る不具合を事前に把握してトラブルを未然に防止できれば稼働率の向上に寄与できる。

また、回転機械ではポンプなどの圧縮機に使用されるインペラ (羽根車) 接合部の健全性調査に PhasedArray 法を適用している。

インペラの形状は一对の円盤状ディスクに翼形状の羽根が内包されたもので、高速回転で使用するため許容欠陥の指定があり、全体はバランス修正されている。このインペラのディスク側から PhasedArray 法を適用して翼形状の描写、欠陥があればその位置や深さを測定している。

5. 今後の展開

TOFD 法および PhasedArray 法の実機適用状況を紹介したが、どちらの手法も一長一短があり今後も新 UT 技術の適用拡大をはかるために TOFD 法および PhasedArray 法それぞれの優れた能力を合体、発展させた改良 TOFD 法 (ArrayTOFD 法) の適用技術開発をおこなっている。

改良 TOFD 法とは TOFD 法の試験要領で PhasedArray 探触子を対向配置して探傷をおこなうもので PhasedArray 装置を使用する。探傷方法

は PhasedArray の機能であるビーム角度を電子制御したセクタスキャンで板厚全体を一度に探傷することが可能となりフォーカス効果で、きずの鮮明画像を得ることができる。さらに欠陥寸法測定精度に優れる TOFD 法を組み合わせることにより全体積を一度の走査で探傷でき、欠陥寸法を精度良く測定可能な手法である。

人工欠陥を付与した試験体の確認試験結果では従来 TOFD 法では軸点近傍のみ指示が明瞭であるのに対し、改良 TOFD 法はフォーカス効果が有効で全板厚範囲で明瞭に識別でき TOFD 法特有の円弧状の指示も小さく解像度が非常に良い。また指示がシャープで良好な検出性、識別性を有し、指示部の強度分布については従来 TOFD 法よりダイナミックフォーカシングを持つ改良 TOFD 法の方が優れていることが確認できた。

今後、改良 TOFD 法のデータ採取／解析に必要な機能、探傷システムの改善、測定精度の向上、TOFD 表示 Soft など周辺技術を開発して実機適用可能な範囲を拡大していく。

6. まとめ

新 UT (PhasedArray 法、TOFD 法) 技術は通常の UT 検査と異なり、要求されるアウトプットは多種多様である。PhasedArray 法はビーム角度を

電子制御したセクタスキャンやダイナミックフォーカシングにより得られる UT データを画像化、可視化することによって検査対象部の形状や欠陥全体像の優れた描写性、欠陥情報を精度良く測定する能力を応用した適用技術であり、医療用エコー診断装置のように立体表示が可能な装置もある。

TOFD 法は回折波 (散乱波) と位置信号を合成して特有の縞模様 (円弧模様) 画像から高精度に欠陥寸法を求める適用技術であり、いずれも表示法は異なるが欠陥情報の客観性に優れ、説得力のある検査結果が得られる。

PhasedArray 法は一般的に特殊な UT 法として適用される機会が多いが、原子力発電プラントの寿命評価に代表されるように定量的評価のため将来的に規格化は必須であり、各社、各機関で規格化の検討が進められている。

TOFD 法は RT 代替検査に適用可能な検査要領、判定基準について BS、ASME、JIS などの規格が整備され、一般的な検査技術となりつつある。

PhasedArray 法や TOFD 法に代表される新 UT 技術の実機適用状況を紹介したが今後も適用拡大を図るためさまざまな産業分野へ展開する所存である。



検査事業部 技術部
課長
船戸 一寛

TEL. 045-759-2163
FAX. 045-759-2146

元 検査事業部
技術部 (現株式会社アデルコ)
芝田 三郎

TEL. 045-759-2163
FAX. 045-759-2146