

## 連携記事

# 超音波探傷試験の最近の進展と今後

—社会インフラの点検・診断に向けて—

Recent Development and Future on Ultrasonic Testing

— Toward Inspection and Diagnosis of Infrastructures

廣瀬壮一  
Sohichi Hirose

東京工業大学  
大学院情報理工学研究科  
情報環境学専攻 教授

## 1 はじめに

これまでの橋梁やトンネルなどの土木構造物の定期点検のほとんどは目視やハンマーによる打音検査を用いて行われ、非破壊検査は必要に応じて用いられるものであった<sup>1)</sup>。しかし、2012年12月笹子トンネル事故以来、社会インフラの適切な維持管理の必要性が大きく取り上げられ、点検や診断技術の重要性が再認識されるようになってきた<sup>2)</sup>。非破壊検査やモニタリングなどの新しい技術を積極的に導入し、劣化・損傷箇所の早期発見による維持管理の効率化、高度化の推進が進められようとしている<sup>3)</sup>。

土木構造物をはじめとする社会インフラの維持管理はまず点検・診断による現状把握から始まり、損傷劣化のメカニズムの解明、劣化予測、維持管理計画の策定、補修補強という手順で実施される。これらの内、非破壊検査は構造物の現状把握において重要な役目を担っている。特に、構造物の劣化は目に見える表面だけでなく、目視困難な裏面や内部においても発生する。そのような構造物部位の点検・診断には非破壊検査は欠かすことのできない技術である。

非破壊検査には様々な手法があるが、構造物内部の探傷試験方法としては弾性波や電磁波などの波動を利用した手法が用いられる。代表的な試験方法には、電磁波レーダ法、放射線透過試験及び超音波探傷試験などがある。電磁波レーダ法はコンクリート内部の鉄筋の検出によく用いられるが、構造物内部の材料自身の損傷にはほとんど適用されていない。放射線透過試験は医療でのレントゲン技術と同じ原理で、X線などの放射線を構造物に透過させてその内部構造を画像情報として記録するもので、適用範囲の極めて広い手法であるが、その安全管理には十分に留意しなければならないため、土木構造物への適用には制限を受けることがある。一方、超音波探傷検査はその取扱いにおいて安全管理上の問題はな

く、比較的深い構造内部の検査にも適用できる手法である。しかし、放射線と異なり、超音波は必ずしも波動の直進性が強くないために得られた波形あるいは超音波波形から作成された画像の解釈には注意を要する。また、医療分野では当たり前となっているフェーズドアレイ超音波探傷が工業分野においても普及してきた。多点計測技術によるきずの画像化が可能となり、超音波探傷の高精度化と定量化に期待が寄せられている。

以下においては、フェーズドアレイ超音波探傷を中心とした超音波探傷試験の最近の話題とともに、将来、土木構造物に対して期待できる超音波探傷法を紹介する。

## 2 超音波探傷試験の最近の話題

### 2.1 手探傷からフェーズドアレイへ

従来の超音波探傷試験では、単一の探触子を用いて構造物内のきずを検出する。例えば、図1の左側に示すように溶接部の検査では、探触子を前後左右にラスタ走査しながら探傷器上に表示されるエコー波形(Aスコープ波形という)を見て、きずの有無、位置並びに大きさなどを判定する。用いる探触子は単一であるので、検査技術者は検出すべききずに最適な探触子を選択する必要がある、場合によってはいくつかの探触子を交換して得た計測結果を総合的に考慮してきずの判定を行わなければならない。よって、探傷精度は検査技術者の技量に大きく依存する。

一方、フェーズドアレイ超音波探傷では、複数の振動子(素子と呼ぶ)からなるアレイ探触子を用い、各素子における超音波の送受信のタイミングを電子制御することによって超音波ビームを走査して探傷することができる。例えば、図1右側に示すように素子が一列に並んだ1次元リニアアレイ探触子を溶接部の検査に用いると、溶接線に直交する断面内では

電子的に超音波ビームの方向を変化させて走査(セクタ走査)することができる(詳細は次節で述べる)。したがって、溶接線に直角方向に探触子を移動する必要はなくなり、探触子の機械的な走査は溶接線に沿う方向のみとなるので探傷作業の効率を向上させることができる。また、得られた複数の超音波波形を用いて探傷結果を画像表示でき、それを保存することもできるので、高精度で記録性のある客観的な超音波探傷の実現が可能である。

## 2.2 フェーズドアレイにおけるビーム制御

図2に示すように、N個の素子が直線上に等間隔で並べた1次元リニアアレイ探触子を考えよう。便宜上、左端の素子を1番として、右方向に順に2番、3番、…とする。i番目の素子は座標 $x_i$ にあるとし、各素子からの超音波ビームをある点 $x_f$ に集束させたとする。また、N個の素子の内、基準となる素子を一つ選びその素子の位置を $x_0$ とする。座標 $x_i$ にあるi番目の素子と集束点 $x_f$ の距離 $d_{if}$ は、 $d_{if} = |x_i - x_f|$ であるから、基準素子に比べてi番目の素子を遅延時間

$$\tau_{if} = (d_{0f} - d_{if}) / c \dots\dots\dots (1)$$

だけ遅らせて励起したとする。ただし、 $c$ は波速であり、 $\tau_{if}$ が負となった場合には基準素子と比べてi番目の素子から $|\tau_{if}|$ の時間だけ早く超音波を送信することになる。式(1)で計算される遅延時間を与えて送信すると、すべての素子からの超音波の位相は集束点 $x_f$ において一致し、集束点において送信超音波の振幅が大きくなるのが期待できる。このように超音波ビームをある点に集束させる技術をビームフォーカシングという。

各素子における受信波を式(1)と同じ遅延時間だけずらして重ね合わせると、受信過程においても集束点 $x_f$ からの超音波の位相を一致させることができる。例えば、i番目の素子から超音波を送信し、j番目の素子において受信した波形を

$u_{ij}(t)$  とし、送信及び受信において与えた遅延時間をそれぞれ $\tau_{if}$ 、 $\tau_{jf}$ とする。ただし、 $x_0$ にある基準素子に送信電圧を与えた時刻を $t=0$ とする。このとき受信波形 $u_{ij}(t)$ に集束点 $x_f$ からの反射波が現れる時刻 $t_f$ は $t_f = d_{if}/c + \tau_{if} + d_{jf}/c + \tau_{jf}$ となるが、これに式(1)を代入すると、反射波の出現時刻 $t_f$ は $t_f = 2d_{0f}/c$ となり、送受信の素子番号 $i, j$ に依らないことがわかる。よって、すべての素子で受信された波形を遅延時間 $\tau_{if}$ だけずらして重ねあわせると波形の位相が一致して大きな振幅を得られることになり、超音波探傷における信号/ノイズ比(S/N比)が向上することになる。なお、送受信時に各素子に与える遅延時間や電圧の設定値、または、それらの設定方法をフォーカルロー(focal law)と呼ぶ。

上述のようにフェーズドアレイでは、超音波の送信時に遅延時間を与えて超音波ビームを制御することができるので、従来の超音波探傷のように探触子を移動することなくビームを走査して探傷を実施することができる。フェーズドアレイ超音波探傷において用いるアレイ探触子には図3に示すように様々なものがあるが、1次元リニアアレイ探触子を用いた超音波探傷における代表的なビーム走査は、リニアアレイ走査(またはリニアスキャン)とセクタ走査(またはセクタスキャン)である。リニア走査は、図4(a)に示すようにアレイ探触子に対するフォーカルローを変えずに、素子群を切替え

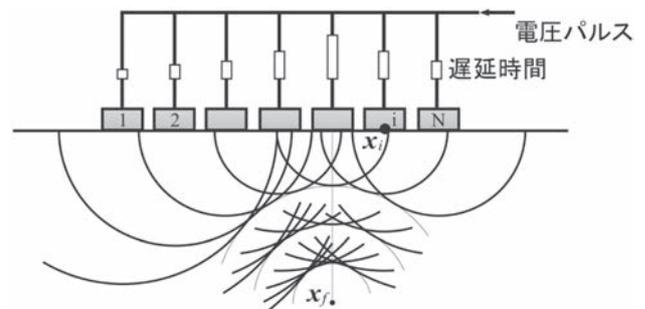


図2 1次元リニアアレイ探触子によるビームフォーカシング

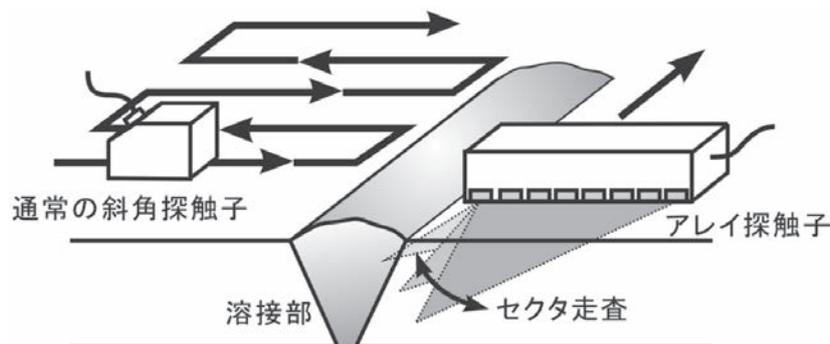


図1 溶接部の超音波探傷試験

てビームを移動する方法であり、従来の探触子を機械的に移動させた場合に相当する。一方、セクタ走査は、図4 (b) に示すようにアレイ探触子の素子群 (通常は8素子以上) は固定したままでフォーカルローを変えて超音波ビームの方向を変化させて走査する方法で、ビームを扇形に走査することが多いことからセクタ走査と呼ばれる。

2.3 ビーム制御における留意点

フェーズドアレイ超音波におけるビーム制御においてはいくつか留意すべき点がある。まず、水中や空気中を伝搬する音響波と構造物のような固体中の弾性波の違いについて触れておこう。アレイ素子から発せられる超音波は集中力による波動場の重ね合わせで表せることが分かっているので、以下においては簡単のために集中力による波動場を考える。音響波の場合、点波源から放射される波は縦波のみで、方向によらず同じ振幅を示す無指向性の波である。一方、固体中の波動は指向性を持つため、波面上の振幅の大きさは一様ではない。例えば、図5のように等方弾性体の表面上で鉛直方向の

集中力を作用させた場合、縦波 (P)、横波 (S)、ヘッドウェーブ (H)、表面波 (R) が発生する。縦波と横波の波面は半球となるが振幅は一様に分布するわけではなく、集中力から数波長以上離れた半球上では図5に示すような分布を示す。なお、臨界角を超えるとヘッドウェーブ (H) が出現し、横波の振幅値は複素数となるのでここでは示していない。このような弾性波の持つ指向性はフェーズドアレイ超音波におけるビームフォーカシングに少なからず影響を与える。

図6は、セクタ走査においてアレイ探触子中心から半径  $R = 17.54 \lambda_L$  ( $\lambda_L$  は縦波の波長) の半円上に集束点を設定して数値シミュレーションを行い、設定した集束点の位置とシミュレーションによって得られた集束点の位置の関係をそれぞれ鉛直下方からの角度  $\theta$ 、 $\bar{\theta}$  で示したものである<sup>4)</sup>。数値シミュレーションの条件は、アレイ素子数  $N = 20$ 、素子ピッチ  $p = 0.263 \lambda_L$ 、素子間ギャップ  $g = 0.088 \lambda_L$ 、素子幅 (奥行)  $W = 1.75 \lambda_L$  の1次元リニアアレイ探触子を対象とし、集中力の重ね合わせによって音響波と弾性縦波によるフォーカシングを計算した。図6より、音響波はほぼ設定した集束点

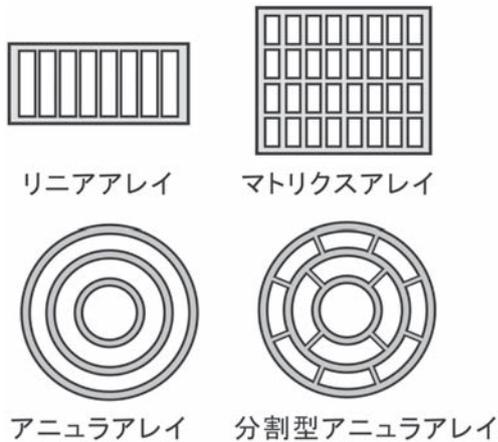


図3 様々なアレイ探触子

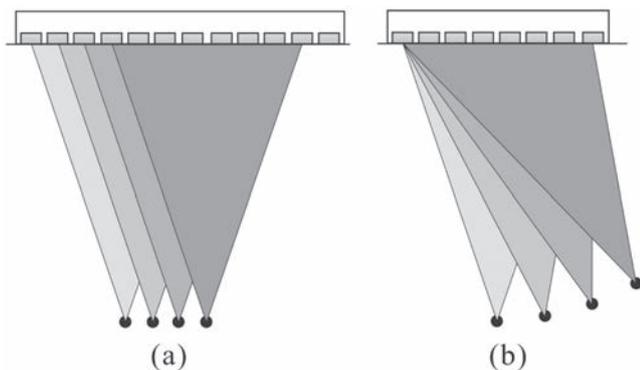


図4 (a) リニア走査と (b) セクタ走査

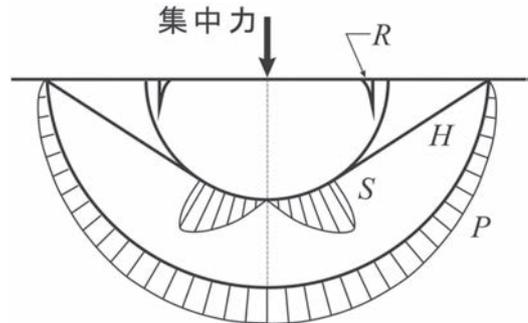


図5 表面上の集中力による超音波の波動場

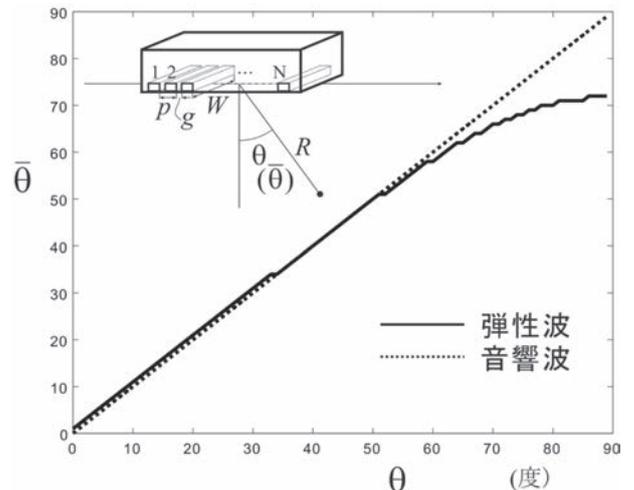


図6 設定した集束点の角度  $\theta$  と数値シミュレーションによる集束点の角度  $\bar{\theta}$  の関係

に集束しているのに対し、弾性波は集束点を60°以上の角度とした場合、実際の集束点が設定角度以下になって意図したフォーカシングが実現されていないことがわかる。このように、構造物のような固体に対するフェーズドアレイでは意図した点とは異なった所に集束している場合があるため注意が必要である。なお、リニアアレイ探触子に見られる集束位置のずれはマトリックスアレイ探触子を用いれば大幅に抑制されるという報告もある<sup>5)</sup>。

フェーズドアレイにおけるビームは各素子からの超音波の重ね合わせによって形成されるが、素子の配置によっては目標とするビーム方向以外にもビームが発生することがある。これがグレーティングローブである。グレーティングローブは素子ピッチ $p$ が超音波の半波長 $\lambda/2$  ( $\lambda$ :波長) よりも大きい場合に発生する。例えば、1次元リニアアレイ探触子のビームの集束点が鉛直真下から $\theta$ 方向にあるとき、グレーティングローブの発生する角度 $\theta'$ は、

$$\sin \theta' = \sin \theta - n \lambda / p \quad (n = 1, 2, \dots) \dots\dots\dots (2)$$

によって求められる<sup>6)</sup>。例えば、 $\theta = 45^\circ$ 、 $p = \lambda$ とすると、 $\theta' = -17^\circ$ となる。もし $\theta' = -17^\circ$ の方向にきずがあると、そのきずは $\theta = 45^\circ$ 方向のきずであると誤認することになる。このような事態を避けるためには、素子ピッチ $p$ が超音波の半波長 $\lambda/2$ よりも小さいアレイ探触子を用いなければならない。

フェーズドアレイを用いた探傷においては、固体中に縦波と横波の2種類の超音波が存在することにも留意しておく必要がある。固体中の縦波は横波よりも早く伝搬するので、実際には縦波のきずエコーを横波とみなしてしまうと、探触子により近い位置にきずがあると誤って判断をする可能性がある。このことはAスコープを用いた従来の手探傷による超音波探傷においても起こり得ることであるが、手探傷では熟練技術者が探触子を走査しながら経験的に縦波か横波かを判断している。しかし、フェーズドアレイ超音波探傷の結果は画像で得られるため、画像だけを見たのでは縦波か横波かを判断が困難な場合があり、弾性波動の特性を理解した慎重な判断が必要である。

## 2.4 スコープ画像からSAFT画像へ

従来の手探傷による超音波探傷試験では探傷器上に単一のAスコープ波形が表示されるが、フェーズドアレイ超音波探傷のように多点計測の場合、得られた複数の波形を二次元画像に並べ替えて表示することが一般的である。図4のようなリニアアレイ走査やセクタ走査においては、一走査毎にAスコープ波形が時間の関数として得られるが、時間に波速をか

けて距離の関数に変換したAスコープ波形をビームの進行方向に並べて表示する。例えば、リニアアレイ走査の場合、図7のようになる。このような波形表示方法をBスコープという。セクタ走査の場合にはAスコープ波形を各セクタ走査方向に並べて表示する。図8はセクタ走査によるフェーズドアレイ超音波探傷結果の一例である<sup>7)</sup>。3個の $\phi 3\text{mm}$ 横穴を有する鋼材に対して5MHzで16素子のアレイ探触子による縦波を用いたBスコープ画像で、波形の振幅を適度に補間して濃淡で表示している。3つの横穴に対する画像の内、一番左の横穴に対する画像の強度が弱くなっているが、3個の横穴の位置はほぼ特定できている。

フェーズドアレイ超音波探傷を用いればきずを画像によって容易に認識できるが、上述のように一般のフェーズドアレイによる探傷画像はBスコープであり、特に信号処理をした波形を表示させているわけではない。したがって、場合によっては探傷画像の解像度が低い場合がある。図9 (b) は同図 (a) に示すアルミニウム試験片に空けた5つの横穴に対して、5MHzで64個の素子から成る1次元リニアアレイ探触子によって得た各素子の波形をBスコープ表示した画像である。特にフォーカシングをしていないため、横穴の画像が左右に引き伸ばされ、横方向の解像度が悪いことがわかる。

このようなBスコープ画像の欠点を克服するために、アレイ探触子に電子的に遅延時間を与えてビーム制御する代わりに、すべての素子の送受信の組合せで波形を取得し、後に波形処理によって探傷画像を作成する方法(トータルフォーカシング法あるいは全波形サンプリング処理などと呼ばれる)が用いられることがある。その波形処理の基本は、開口合成法(SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique)である。

今、アレイ探触子のすべての素子の1対1の組み合わせで超音波の送受信を独立に行ったとする。送受信の素子の組み合わせに応じて遅延時間を設定することはなく、各々の送信素子に電圧を与えた時刻を $t=0$ とする。 $i$ 番目の素子から超

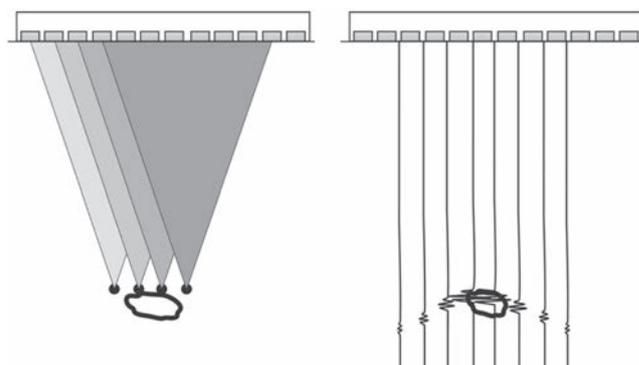


図7 リニアアレイ走査におけるBスコープ画像

音波を送信し、j番目の素子において受信した波形を $u_{ij}(t)$ とする。もし、材料内部の点 $x_R$ に反射源があるとすると、受信縦波波形 $u_{ij}(t)$ には $t=t_R \equiv d_{iR}/c + d_{jR}/c$ において反射源からの反射波が現れるはずである。ただし、 $d_{iR}$ はi番目の素子と点 $x_R$ の距離を表す。ここで、以下の式で定義される波形 $u_{ij}$ の絶対値の総和 $S$ を考える。

$$S(x_R) = \sum_i \sum_j |u_{ij}(t_R(x_R))| \dots \dots \dots (3)$$

開口合成法ではフェーズドアレイにおけるビームフォーカシングのように遅延時間を設定しないが、その代わりに、超音波の伝搬時間 $t_R$ に応じて波形振幅を重ね合わせていることに注意されたい。すなわち、開口合成法では点 $x_R$ において超音波が集束するように波形をずらしながら重ねているのであ

る。点 $x_R$ は画像領域内の任意の点であるとみなせるので、開口合成法では画像領域内の点ごとに超音波ビームをフォーカシングしていることになる。したがって、式(3)で定義される総和 $S$ を点 $x_R$ の関数として図示すると、反射源のある点 $x_R$ では大きな値となり、反射源のない領域では小さい値を示すことになる。これによって、きずの画像化が可能となる。

図9(c)は1次元リニアアレイ探触子の64個の素子の内、連続する16個の素子によって得たデータから作成した複数のSAFT画像を合成した画像である。まず左端から連続する16個の素子を用いてデータを取得し、その後、一素子分ずつ右に移動させて得た49通りのデータを用いている。SAFTを用いると横穴の画像が穴周辺だけに集中していることがわかる。ただし、SAFTによる画像化の前に波形処理はしていないので、各探触子から放射される超音波が持つおよそ2周期

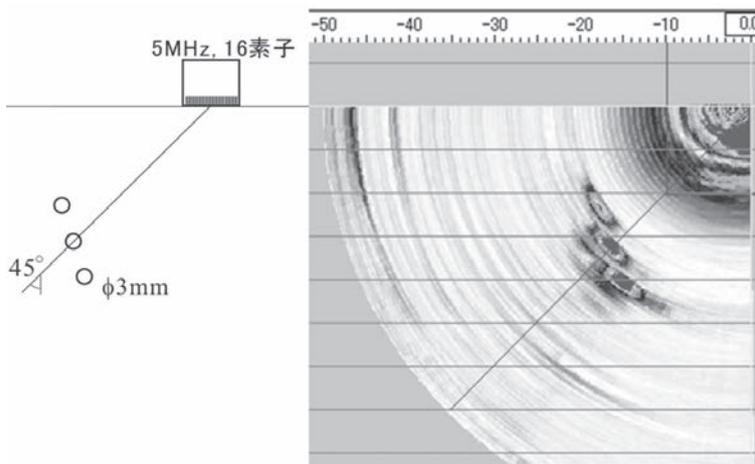


図8 セクタ走査によるフェーズドアレイ超音波探傷結果の一例<sup>7)</sup>

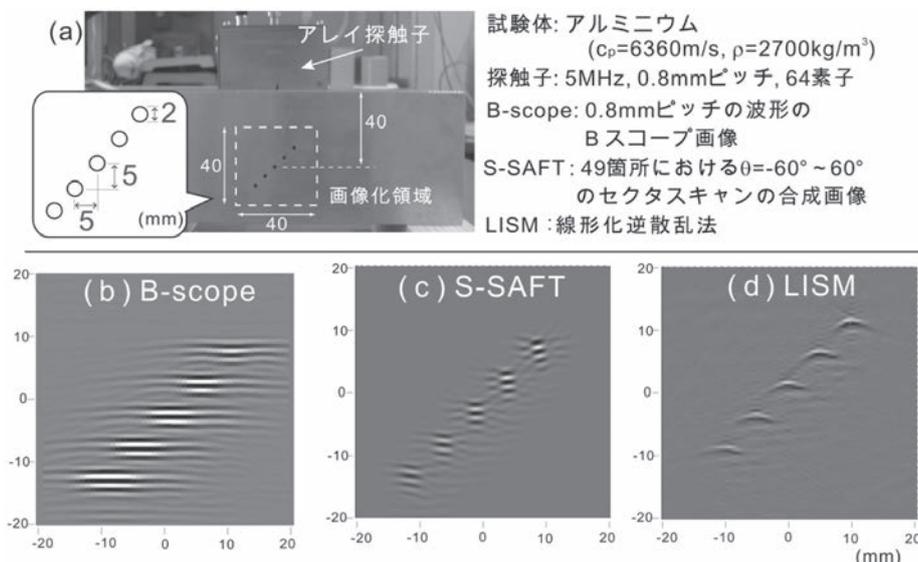


図9 (a) 横穴を有するアルミニウム試験片と (b) Bスコープ、(c) S-SAFT、及び (d) 線形化逆散乱法による画像

分の正弦波形がSAFT画像にも反映されて、深さ方向に画像が広がっていることがわかる。一方、図9 (d) はすべての素子の送受信の組合せで得た波形を線形化逆散乱法 (LISM : Linearized Inverse Scattering Method)<sup>8)</sup> と呼ばれる動弾性波動理論に基づいた手法によって信号処理をして作成した探傷画像である。図9 (c) のSAFT画像に比べると、横穴の上面に画像が集中し横穴の位置が明瞭になっていることがわかる。

以上のように、トータルフォーカシング法あるいは全波形サンプリング処理と呼ばれる手法は、すべての素子の送受信の組合せで得た波形を保存しているため、計測後に信号処理を施して様々な高度な探傷画像を作成することができる<sup>9-12)</sup>。

### 3 今後期待される超音波探傷法

橋梁やトンネルなどの交通インフラ施設は長大な構造物であり、その点検や診断には効率性が要求される。非破壊検査はこれまで標準的な方法である目視の結果をもとに必要な応じて損傷を詳細に評価する方法であるとの位置づけであったが、効率的な非破壊検査が提案されれば目視に代わる方法として用いられるかもしれない。すなわち、非破壊検査も簡易検査と詳細検査の2種類に分類されて実施されることも考えられる。

前述のフェーズドアレイ超音波探傷は構造物内部を高精度で検査を実施することができる。しかし、超音波探傷では通

常、構造物内部に超音波を効率よく入射させるために水やグリセリンなどの接触媒質を介して探触子を被検体表面に接触させなければならない。したがって、フェーズドアレイ超音波探傷を含めた通常の超音波探傷法は長大な構造物の全体を効率的に検査する手法には適さない。一方、最近、探触子を材料表面に接触させなくても検査が可能な非接触超音波探傷手法がいくつか提案されている。非接触超音波探傷手法では接触媒質の塗布といった作業が不要であるので、効率的な検査の実施が期待される。以下においては今後期待される手法として、空気超音波とレーザー超音波を紹介する。

空気超音波法は、探触子を被検体に接触させることなく空気を媒介として超音波を構造物に入射し検査を実施することができる。しかし、固体と空気の音響インピーダンス (密度と速度の積) の比は非常に大きいため、空気から固体への超音波の入射には大きなエネルギーと感度の高い探触子が必要とされ、これまでは空気超音波の工業分野への応用は音響インピーダンス比が比較的小さい複合材料などの検査に限られていた。しかし、計測技術が進歩し、現在では図10に示すように鋼管の円周方向に周回する板波の検出に成功<sup>13,14)</sup> しているほか、コンクリート内部の欠陥の検出に応用しようとする動きもある。

レーザー超音波法は、高出力のレーザーを構造物表面に照射して熱膨張あるいはアブレーションによって超音波を発生し、きずエコーによる表面での振動を別のレーザー干渉計によって計測するものである。この手法では構造物から数メートル以上離れた位置からレーザーの送受信が行えるので、

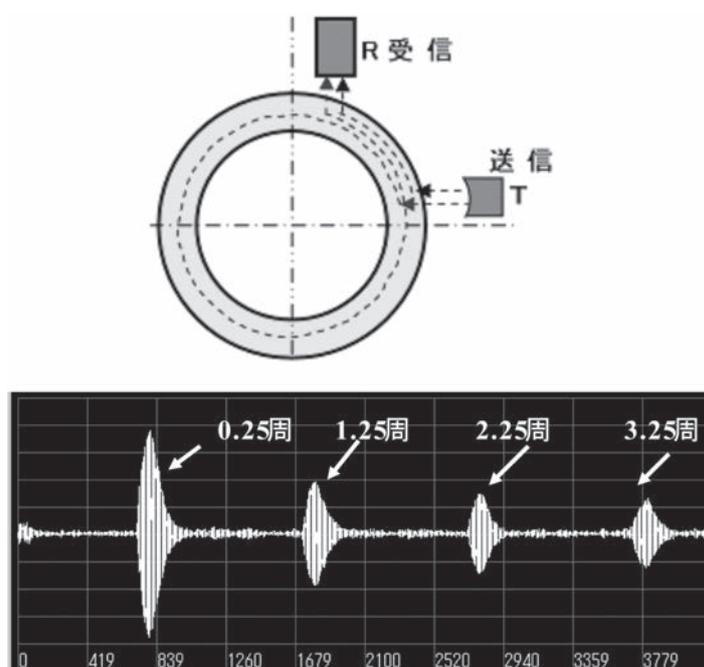


図10 空気超音波法によって得られた鋼管の円周方向に周回する板波の波形

レーザー光をスキャンする装置と連動させれば、遠隔から効率よい検査を実施することが可能である。島田ら<sup>15)</sup>はレーザー超音波法を用いてコンクリート内部の欠陥を検出することに成功し、現在、トンネルや高架コンクリート橋の健全度診断にも応用されている<sup>16)</sup>。さらに、現在、レーザー超音波法を補強橋梁床版欠陥部のリモートセンシングに適用するプロジェクトも進行している。

土木構造物はひとつずつ構造、特性、立地条件が異なる一品製品である。したがって社会インフラの検査には多様な検査方法が要求される。ここで紹介したフェーズドアレイ超音波、空気超音波、レーザー超音波はその一例に過ぎず、超音波に限ることなく様々な非破壊検査手法を開発して、来たるべき社会インフラの高齢化に備えることが必要であろう。

#### 参考文献

- 1) 玉越隆史, 大橋章, 中谷昌一: 国土技術政策総合研究所資料 ISSN 1346-7328, 196 (2004)
- 2) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書, (2013)
- 3) 例えば, 国土交通省 社会資本の老朽化対策会議ホームページ,  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sosei\\_point\\_mn\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sosei_point_mn_000003.html)
- 4) 藤原昌之, 木本和志, 廣瀬壮一: 応用力学論文集, 6 (2003), 1089.
- 5) 中畑和之, 河野尚幸: 非破壊検査, 62 (2013), 76.
- 6) R.J.Mailloux: IEEE Trans. Antennas. Propagat., AP-32 (1984), 1364.
- 7) 小島正: 電子情報通信学会技術研究報告(超音波), 111 (2011), 43.
- 8) 中畑和之, 松岡ちひろ, 廣瀬壮一: 土木学会論文集A, 65 (2009), 505.
- 9) C.Holmes, B.Drinkwater and P.Wilcox: Insight, 46 (2004), 677.
- 10) J.Zhang, B.W.Drinkwater, P.D.Wilcox and A.J.Hunter: NDT & E International, 43 (2010), 123.
- 11) 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壮一: 非破壊検査, 59 (2010), 277.
- 12) 中畑和之, 上甲智史, 廣瀬壮一: 土木学会応用力学論文集, 13 (2010), 89.
- 13) 高橋雅和, 星野秀和, 小倉幸夫, 北川秀昭, 渡邊肇, 楠元淳一, 金谷章宏: 第18回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, (2011), 135.
- 14) 高橋雅和, 高橋修, 星野秀和, 小倉幸夫, 田淵豊, 楠元淳一, 金谷章宏: 平成24年度春季講演大会講演概要集, 日本非破壊検査協会, (2012), 125.
- 15) 島田義則, 内田成明, 篠田昌弘, 御崎哲一: レーザー超音波法を用いた次世代コンクリート内部欠陥自動診断システムの研究, 平成20年度運輸分野における基礎的研究推進制度研究成果報告, (2006)
- 16) 篠田昌弘, 大村寛和, 御崎哲一, 島田義則, 内田成明: 鉄道総研報告, 23 (2009) 29.

(2013年8月27日受付)