実用講座

超音波フェイズドアレイの基本原理*

山本 優一郎**

Radical principle of Phased Array*

by YAMAMOTO Yuichiro**

キーワード 超音波フェイズドアレイ, リニアスキャン, セクタースキャン

1. 緒言

超音波フェイズドアレイは、原理的にはフェイズドアレイレーダー、フェイズドアレイソナーなどと同様に波動の物理的な特性を応用するものです。

超音波フェイズドアレイは、超音波探傷が適用される市場に限られていたことや、短い波長、モード変換、さらには使われるコンポーネントが複雑なため他の応用分野より開発が遅れていました。

実用的な観点から見れば、超音波フェイズドアレイは単に超音波の発生、受信の方法です。しかし超音波は物質の中では発生のプロセス（ピエゾ現象、電磁超音波、レーザーあるいはフェイズドアレイ）とは無関係に超音波本来の挙動を示します。

従って、超音波検査に用いた場合も細部についてはいずれも同一結果を示します。すなわち、7.5MHzが従来の超音波探傷で最適な検査周波数であったとすれば、フェイズドアレイでも同じ周波数、焦点距離、および入射角が適切な選択となります。

フェイズドアレイでは、アレイを校正するすべての探触子エレメントにそれぞれ独立した配線を施し、時間差を設けてパルス駆動します。これらのエレメントは一般に4～32個のグループでドライブされ、パイプライン溶接検査では16エレメントが1つのグループとしてドライブされます。

的確で使いやすい探傷システムを構成する為に、セットアップをパルスタイミング（時間遅延値＝タイムディレイ）を計算してオペレーターが手動入力するか、あらかじめ用意されたファイルの内容を読み込んで入射角度、焦点距離、スキャンの要領を設定します（図1）。

タイムディレイは、探傷位置への超音波の露呈時間とスキャンの容量、ビーム焦点から定まる超音波の合成法則（Focal law）に基づいて決められます。

タイムディレイを作る電子回路は、フェイズドアレイに必要とされる精度を確保する為に、およそ2～2.5nsの正確度が要求されます。

最初のセットアップ準備には時間を要することがありますが、それらのセットアップ情報はファイルに記録され、簡単に再読み込みすることが出来ます。

また、これらのセットアップファイルの内容の変更訂正も容易です。

2. スキャンの方式

パルス送信と受信のタイミング電子制御で、さまざまな走行パターンを作ることが出来ます。

3. 電子制御のスキャン（リニアスキャン）

アレイに沿ってドライブパターンを移動させることによって、超音波ビームを横移動させるリニアスキャンが行えます（図2）。

アレイは128エレメントが一般的で、8～16のグループでパルスドライブされます。

リニアスキャンでは、焦点位置にあたる部位を高いビーム密度でカバーすることが出来ます。アレイ配置がフラットかつ直線の場合は、走行パターンは単純なBスキャンとなります。また、アレイが曲線状であると、走行パターンも曲線状となります。

リニアスキャンはプログラミングが容易です。例えばフェイズドアレイで45°と60°の横波を用いた従来の手動検査を再現して溶接部を検査するプログラムなどは作成が極めて容易です。

4. 電子制御のスキャン（セクトリアルスキャン）

セクトリアルスキャンは、リニアスキャンと同じセットのエレメントをしようしてもタイムディレイを変更

*原稿受付 平成17年4月20日

**アールディテック・アジア(株) R/DTECH ASIA, Inc

図1 フェイズドアレイのリニアスキャン及びセクトリアルスキャンの模型図

図2 リニアスキャンの説明図

図3 セクトリアルスキャンのタービンローターの適用例

し、ビームの入射角を変化させることで実現出来ます(図3)。

セクトリアルスキャンの特徴的な適用分野に、通常の手法なら探触子の配置が困難な部品たとえばタービンプレードの接合部の検査があります。

セクトリアルスキャンの角度は、アレイへ加える周波数とエレメント幅に関連しますが、 $\pm 20^\circ$ から $\pm 80^\circ$ まで振ることが出来ます。

5. フェイズドアレイプローブのビーム特性

フェイズドアレイの利点の一つとして、自由に入射角度を設定できることが挙げられる。しかしながら設定できる入射角度は個々の振動子特性に依存し、一定以上の角度は設定できず、(図4a)の数式にて算出されます。

また、ビーム径の算出方法は従来 UT の数式がそのまま適用されます(図4b)。

図4a 設定有効角の模型図・算出式

例：焦点50mm, 33 振動子, 0.6mm 幅
周波数 5MHz

$$d = 1.029 \frac{\lambda \cdot z}{A}$$

図4b ビーム径の模型図

6. スキャンの組合せ

リニアスキャン、セクトリアルスキャン、精密なフォーカシングの各機能を組合せることで多様なスキャンが可能で、実用的で理解しやすい検査結果の表示が可能になります(図5)。このように最適ビーム角を選び目的に合った機能的なスキャンを組合せることで溶接やコンポーネントの検査を高速かつ的確に行うことが出来ます。

このようにリニアスキャンとセクトリアルスキャンを組合せることによって、ある角度範囲(例えば $\pm 20^\circ$)で部品の超音波探傷を詳細に行うことも可能になります。この探傷方法は、従来の単純なビームによる検査が十分に機能しない場合、例えば欠陥が規則性を持たない航空

図5 上：セクタリスキャンとリニアスキャンを
組合せたスキャンパターン
下：探傷データを合成した超音波イメージ

図7 各画像の説明

図6a 一般のラスタースキャン

図6b リニアスキャン

機分野のチタニウム casting 品などに対し特に効果的です。

さらにこの方式の探傷は検査対象の溶接部に対し特定の入射角度が要求される場合に有用で、これらのアプリケーションでは超音波ビームが特定のビーム角で特定の位置にある溶接部に向かうようプログラムできます。

7. 溶接部のリニアスキャン

手動の溶接部の UT 検査では、1 個のトランスデューサーをオペレーターが前後にスキャンして検査領域をカバーします（図 6）。自動化された溶接検査システムでも大部分が手動探傷と同様の経路をたどったスキャンが行われますが、この方式ではスキャンのはじめと終わりにトランスデューサー移動の為のデッドタイムゾーンが生じ時間の無駄が生じます。

マルチトランスデューサーシステムやフェイズドアレイでは、手動より単純化されたリニアスキャンが一般的です（図 6b）。その場合、プローブホルダは溶接の周辺または溶接に沿って直線的に移動し、各トランスデューサーが検査域をカバーしてスキャンするよう動きます。

図8 画像処理の一例

リニアスキャンの最も単純な適用例は、数個のトランスデューサーによるパイプ製造工場の ERW（電気抵抗溶接）溶接の検査です。パイプ製造ラインで用いられる探触子部には、最大では24個のトランスデューサーが装着され、単独のトランスデューサーによる探傷に較べはるかに高速で検査出来ます。

直線溶接部検査用のフェイズドアレイは、マルチトランスデューサーと原理的に同じ動作です。しかしながらフェイズドアレイでは、従来の機械式の UT よりはるかにフレキシビリティがあります。フェイズドアレイではセットアップの変更はプログラムを変更するだけです。

セットアップの変更や別のセットアップへの積み替えも簡単です。

またフェイズドアレイでは、従来のトランスデューサーと同質のビームを所定の入射角で数多く発生させることが可能です。特殊な検査もあらかじめ作成したセットアップファイルをロードすることによって容易に実施できます。

8. 超音波データの画像化

従来の UT 検査では波形でのデータ解析が主流で、熟練者とそうでない者との評価が変わることもあります。フェイズドアレイは前項にて述べた様々な利点に加えて、波形の画像処理技術に優れている点も挙げられます。これは、全波形をコンピューター上に取込み画像化（可視化）する技術で、上面図（C スキャン）・側面図（B スキャン）・端面図（D スキャン）の画像化、さらには任意の点での断面図・横断面図の画像化が可能です（図 7）。

また、高度ソフトウェアを使用することにより、パイプの周溶接部をパイプ状に画像処理する技術（図 8）や、

3D 画像処理等も可能となります。

このような画像処理は、データ解析の大きな手助けとなりますし、解析者によるデータ解析の相違も極力小さくすることが出来ます。また、全波形を取込んで画像処理をしているので、任意の位置での波形もリアルタイムに表示することができ、従来の波形によるデータ解析ももちろん可能です。

9. 代表的な適用例

超音波フェイズドアレイは産業の各方面に適用されて、それぞれに有用に利用されています。

主な産業分野は、航空宇宙、原子力、製鋼所、パイプミル、石油化学プラント、パイプラインなどが各分野に広がり、それぞれにフェイズドアレイ=PA (Phased Array) の持つ特徴が効率的に発揮されています。

- ・速度：フェイズドアレイのスキャン速度は、より広い範囲をカバーしても従来のトランスデューサーを用いた機械的なスキャンにより一桁以上高速です。
- ・柔軟性：セットアップは数分で変更できます。さらに複雑な検査対象にもセットアッププログラムだけで柔軟に対応できる適用性に優れます。
- ・検査角度：広範囲の検査角度やマルチビームが要求される場合でも、アレイの配列とタイムディレイを考慮することによって容易に対応できます。
- ・プローブが小型：従来のプローブでは配置する位置の制限を受ける場合でも、フェイズドアレイではプロー

ブの位置の制限を受けることが殆どありません、またマトリクスアレイプローブなど小型のプローブ群が用意され、従来のトランスデューサーよりはるかにフレキシブルに広範囲の検査対象に対応できます。

- ・これらフェイズドアレイの特徴は、その特徴を必要とする検査分野で有用に活用されています、例えば「速度」は検査対象が大量にあるパイプアルミやパイプラインの溶接検査にとって重要です。
- ・「検査角度」はパイプライン、航空宇宙分野や原子力プラントのタービンブレードのような複雑形状部品を対象とする分野で特に重視されます。「プローブが小型」であることは、タービンローターやブレードの検査に有用であるのみならず、パイプラインの検査時には塗料剥離を必要とする面積を最小限にできます。
- ・超音波フェイズドアレイ探傷は、マルチトランスデューサーシステムよりはるかに優れますが、これらは新しく開発された技術なので一層の実施例の蓄積が必要とされる分野も多く、たとえば複雑な3Dアプリケーションへの適用などではセットアップに工夫の余地を残します。2Dパイプラインなどのセットアップは容易です。

参 考 文 献

Michael Moles, Andre Lamarre and Noel Dube.
"Ultrasonic Phased Arrays" (2002), pp1-5.