

# マトリクスアレイによる高精度探傷技術の開発

神代 修平<sup>\*1</sup> 引地 達也<sup>\*2</sup> 長沼 隼人<sup>\*2</sup>  
Koujiro Shuuhei Hikichi Tatsuya Naganuma Hayato

フェーズドアレイ法による超音波探傷検査は、発電設備の保守点検や鉄道・航空宇宙・鉄鋼製造ライン・橋梁構造物など幅広い分野で適用されているが、現行のフェーズドアレイ法（リニアアレイ）を含む一般的な UT 技術でのきず寸法測定は、実際のきず長さに対して過大評価となっている。一方、マトリクスアレイは超音波ビームの点集束が可能であり、検出性能・識別性能の向上による高精度なきず寸法測定が見込める。そこでリニアアレイとマトリクスアレイの性能比較試験を実施した結果、マトリクスアレイの方が指示長さ測定・識別性能において優れていることを確認した。

キーワード：超音波探傷試験、フェーズドアレイ法、リニアアレイ探触子、マトリクスアレイ探触子、欠陥寸法測定

## 1. はじめに

超音波フェーズドアレイ技術（Ultrasonic Phased Array）の適用範囲は、1980 年代の初頭に医療分野から産業分野へと拡大し、主に原子力容器・大型鍛造シャフト・蒸気タービン部品等の比較的高い精度を要するものに適用されていた。近年には、製造・電子・コンピュータ技術の進歩とそれに伴うソフトウェアの開発によりフェーズドアレイ技術は飛躍的に発展し、大容量データの高速処理能力が向上したことにより小型携帯タイプの探傷装置も登場している。

現在では、発電設備の保守点検の他、鉄道・航空宇宙・鉄鋼製造ライン・橋梁構造物など適用分野が広がっている。また、今後普及拡大が見込める FRP 材に対する健全性検査の適用例も出てきており超音波フェーズドアレイ法の一般化が進んできている。

当社では、原子力プラントの SCC（応力腐食割れ）部の寸法測定、火力・水力発電所の保守検査、その他溶接部検査、腐食検査、裏面の形状計測など多岐にわたり超音波フェーズドアレイ法を適用しているが、現行のフェーズドアレイ法を含む一般的な UT 技術でのきず寸法測定は、超音波ビームの拡がりによる影響で実際のきず長さに対し過大評価となっている。また、火力発電所用ボイラの主要耐圧部溶接部の経年変化に対する健全性確認検査において検査精度の向上が求められている。

マトリクスアレイは、超音波ビームの点集束が可能であり検出性能・識別性能の向上による高精度のきず寸法測定および、より微細なきずの検出が見込める。

本稿では、現行のフェーズドアレイ法（リニアアレイ）とマトリクスアレイ（Matrix Phased Array）の性能比較試験の実施結果を報告する。

\*1：検査事業部 第一検査部 品質管理グループ

\*2：検査事業部 技術部 NDE グループ

## 2. 超音波フェーズドアレイ法の概略

超音波フェーズドアレイ法は、一つの探触子内に複数の微小振動子を配し、各振動子の励振タイミングを電子的に制御することにより超音波ビームの方向と集束位置を任意に設定することが可能な超音波探傷試験の手法である。また、ビーム方向・集束位置を複数設定することが可能であり、探触子位置を固定したままの電子走査による所定領域全体の探傷ができる。

もう一つの特徴として、収集した波形データを画像化することができ、探傷画像を見ながらの走査が可能である。エンコーダ等で体積データを収集すれば任意の位置での上面・側面・断面の各方向の画像データを取得できる。

以上二つの特徴により、複雑な形状部分の探傷においても内部状態の可視化ができることから、きずエコーと形状エコーの視認性・識別性が容易になっている。

### 2.1 リニアアレイ

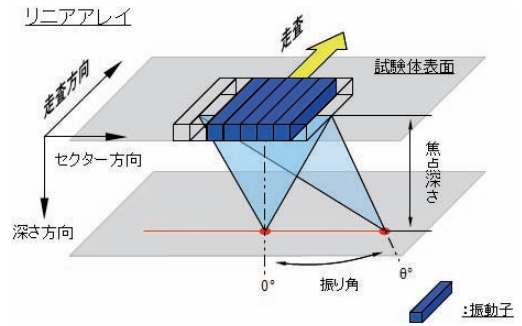
一般的なフェーズドアレイ（リニアアレイ）探触子は、振動子を直線上に配列したもので、ビーム方向（振り角）と集束位置を任意に設定することにより2次元の電子制御（制御例：図1-(a)）が可能となる。

### 2.2 マトリクスアレイ

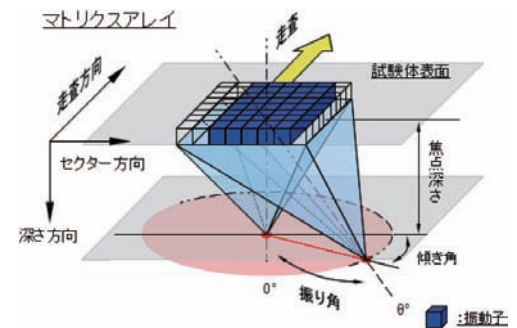
マトリクスアレイ探触子は、振動子を格子状に配列したもので超音波ビームの点集束が可能である。また、ビーム方向（振り角）と集束位置、さらに傾き角（首振り方向）を任意に設定することで3次元のビーム制御（制御例：図1-(b)）が可能である。

表1 探触子仕様

(a) リニアアレイ: 5MHz-16el
(b) マトリクスアレイ: 5MHz-8el × 8el



(a) リニアアレイ



(b) マトリクスアレイ

図1 超音波ビーム制御例

## 3. 検出精度試験

### 3.1 試験方法

本試験では、周波数5MHzのリニアアレイ探触子とマトリクスアレイ探触子を使用し、STB-A2試験片（超音波探傷試験用標準試験片）の平底穴φ8mm、φ4mm、φ2mmを屈折角 $-30^{\circ} \sim +30^{\circ}$ のセクタースキャンによる垂直探傷を実施した。

探触子の仕様を表1に、探傷イメージ図を図2に示す。

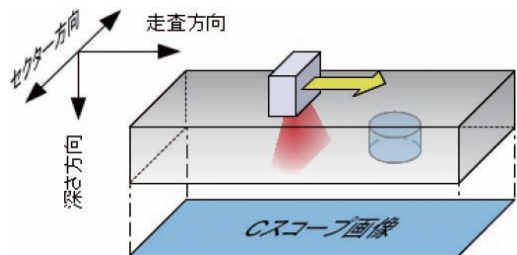


図2 垂直探傷イメージ図

### 3.2 試験結果

図3にリニアアレイ・マトリクスアレイの垂直探傷結果画像、図4にデシベルドロップ法による指示長さ寸法測定結果を示す。

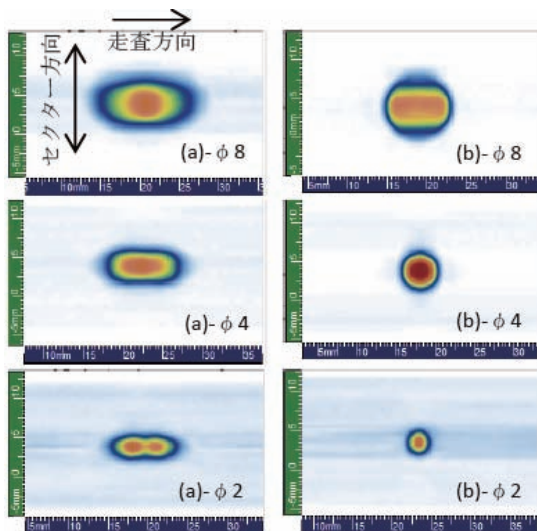


図3 垂直探傷画像 (Cスコープ)  
(a) リニアアレイ、(b) マトリクスアレイ

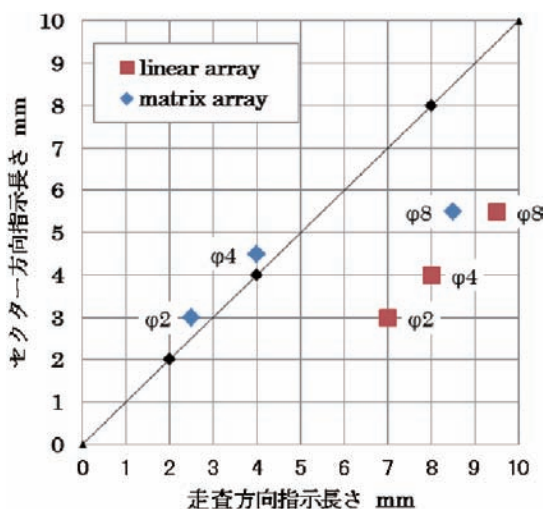


図4 指示長さ寸法測定結果

図3(縦軸:セクター方向、横軸:走査方向)では、セクター方向(振動子配列方向)の指示にほとんど差異は見られないが、走査方向ではビーム集束の有無の差が顕著に表れている。走査方向に振動子の配列がないリニアアレイでは、ビーム拡散の影響でマトリクスアレイの結果に比べ指示が長くなっている。また、平底穴φ2mmの指示ではピークエコーが分離してしまっている。

マトリクスアレイの指示形状(特にφ2、φ4)は均等な円形をしており、両方向でビームが集束していることが確認できる。

図4からセクター方向における指示長さ寸法測定結果は、穴径φ2、φ4、φ8の順にリニアアレイで3mm、4mm、5.5mm、マトリクスアレイで3mm、4.5mm、5.5mmとなった。走査方向はリニアアレイで7mm、8mm、9.5mm、マトリクスアレイで2.5mm、4mm、8.5mmとなった。

以上の結果から、セクター方向では計測精度にほとんど差異は見られなかったが、走査方向におけるリニアアレイの測定結果では、φ2およびφ4の穴径が2倍以上の過大評価となったのに対し、マトリクスアレイではいずれも設計値寸法との差は0.5mm以内であった。

平底穴φ8に対するセクター方向の測定結果は、両探触子とも5.5mmと過小評価となった。これは、穴径に対して探触子サイズ(セクター方向の開口幅)が小さかったため、平底穴端部への入射角が大きくなり、端部からの反射エコー強度が下がったことに起因するものと考えられる。

#### 4. 識別性能試験

##### 4.1 試験方法

本試験では、周波数 5MHz のリニアアレイ探触子とマトリクスアレイ探触子を使用し、試験体(材質：2.25Cr-1Mo、板厚：24mm) の  $\phi 0.3\text{mm}$  の密集した五つの平底穴群を屈折角  $-25^\circ \sim +25^\circ$  のセクタースキャンによる垂直探傷を実施した。試験体仕様を図 5 に、探触子仕様を表 2 に示す。

表 2 探触子仕様

(a) リニアアレイ: 5MHz-16el
(b) リニアアレイ: 5MHz-32el
(c) マトリクスアレイ: 5MHz-8el × 8el

##### 4.2 試験結果

探傷結果を図 6 に示す。

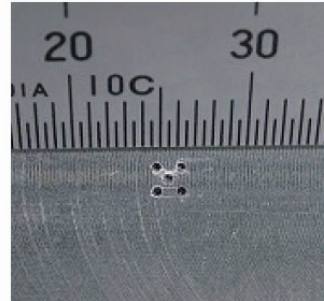
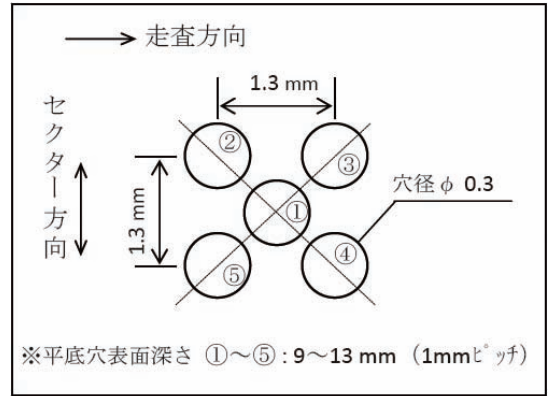


図 5 平底穴群寸法および試験体写真

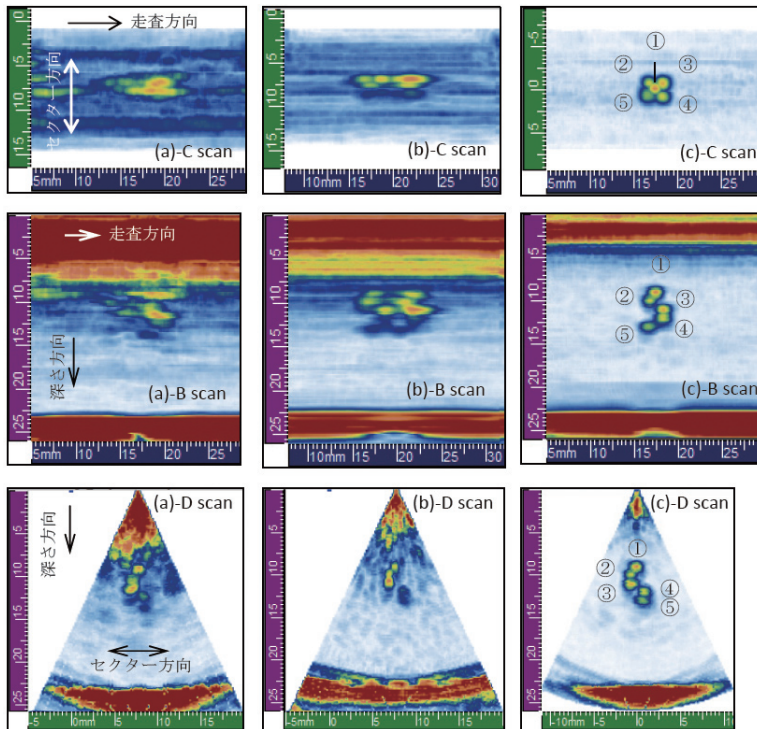


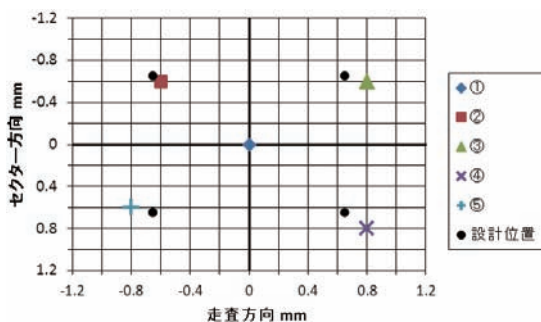
図 6 平底穴群探傷画像 (上から C スコープ、B スコープ、D スコープ)  
(a) リニアアレイ 16el、(b) リニアアレイ 32el、(c) マトリクスアレイ 8el × 8el



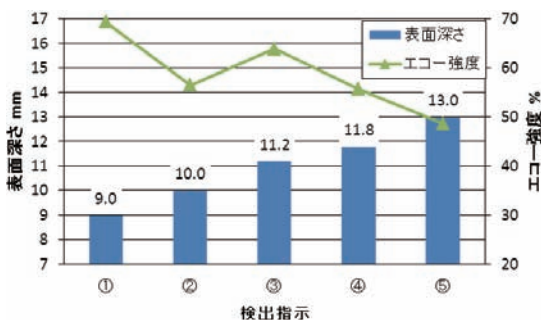
図6 (①~⑤:図5に対応) の (a) および (b) に示すリニアアレイの探傷結果では、ビームが集束するDスコープで指示が多少確認できるものの、送信波の影響により不明瞭である。また、B・Cスコープでは指示同士が重なり識別は困難である。一方、(c) のマトリクスアレイではB・C・D各スコープとも平底穴端部の指示エコー①~⑤が識別でき、指示個数の確認および検出位置の測定が可能である。

マトリクスアレイで検出した指示の位置測定および高さ測定の結果を図7に示す。

図7(a)では、指示エコー①の座標を(走査方向、セクター方向) = (0, 0) として、②~⑤の順に各穴の位置座標は(-0.6, -0.6)、(0.8, -0.6)、(0.8, 0.8)、(-0.8, 0.6)であった。設計値の座標は中心穴より両方向に0.65mmであり、エンコーダの計測精度が±0.5mmなので、すべて測定誤差範囲内で検出できることが確認できた。



(a) 指示エコー検出位置測定結果



(b) 指示エコー表面深さおよびエコー強度測定結果

図7 マトリクスアレイによる平底穴群探傷結果

図7 (b) では、指示エコー表面深さ測定結果が①~⑤の順に9.0mm、10.0mm、11.2mm、11.8mm、13.0mmであった。平底穴端部の設計表面深さは、9~13mmの1mmピッチなので最大誤差は③の-0.8mmとなった。また、エコー強度は表面から遠くなるにつれ減少傾向を示すことを確認した。指示②のエコー高度が低くなっているのは平底穴の端部形状によるものと考えられる。

## 5. まとめ

超音波フェーズドアレイ法におけるリニアアレイとマトリクスアレイの性能比較試験を実施した。平底穴φ2mm、φ4mmに対する測定結果では、リニアアレイで指示長さ7mm、8mmとなったのに対し、マトリクスアレイでは2.5mm、4mmであった。

また、2mm角範囲内にある最小間隔が約0.9mmのφ0.3mm平底穴群に対する探傷結果では、マトリクスアレイによる各スコープで検出・識別可能であるが、リニアアレイでは識別不可であった。

以上のことから、本試験ではマトリクスアレイは現行の超音波フェーズドアレイ法(リニアアレイ)を含む一般的なUT技術より検出性能・識別性能に優れ、より高精度の探傷ができることを確認した。

今回は、板厚30mm以下の鉄鋼材料における検証であったため、今後は板厚30mmを超える鉄鋼材や拡大普及が見込まれるFRP材等のデータを蓄積し、実機適用に向けた開発を進めることが重要である。

## 参考文献

- (1) Olympus NDT Guideline, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Canada Quebec, 2006.8
- (2) 小林英男・大岡起一・牧原善次、超音波による欠陥寸法測定 - 非破壊検査の新しい展開 - 、共立出版、2009.7
- (3) 中畑和之・石川千智・河野尚幸、超音波リニア・マトリクスアレイ探触子の3次元放射音場のモデル化とその性能比較、日本機械学会論文集（A編）75巻759号（2009-11）論文No.09-0438
- (4) 日本工業出版株式会社「検査技術」、超音波フェイズドアレイ技術 - フェイズドアレイの基礎からの応用 - 、2010年改訂版



検査事業部  
第一検査部  
品質管理グループ  
神代 修平  
TEL. 03-3778-7930  
FAX. 03-3778-7951



検査事業部  
技術部  
NDE グループ  
引地 達也  
TEL. 045-791-3523  
FAX. 045-791-3547



検査事業部  
技術部  
NDE グループ  
長沼 隼人  
TEL. 045-791-3523  
FAX. 045-791-3547