

フェーズドアレイ法による欠陥検出技術

芝田 三郎*

Saburoou Shibata

船戸 一寛**

Kazuhiro Funato

近年、構造材の新しい検査手法としてフェーズドアレイ法が注目されてきている。これは、プローブに組み込んだ多数の振動子を電子的に走査して任意の方向へビームを伝搬させることや、任意の位置に焦点を結ぶことが可能となり測定精度が向上できるためである。さらに、試験体にプローブを置くだけで内部を画像で見ることができるとも大きなメリットの一つである。本報では、フェーズドアレイ法の概要に加え、これまで行ってきた適用研究で明らかになったことを抜粋して技術を紹介する。

キーワード：超音波探傷法、フェーズドアレイ法、アレイプローブ、
リニアスキャン、セクタスキャン、垂直法、斜角法

1. はじめに

フェーズドアレイ法 (Ultrasonic Phased Array) は、一昨年来の諸般の原子力プラント事情によりマスコミで報道され非破壊的に欠陥を検出できる超音波探傷技術として広く知れ渡った。また、一般的には、医学の面で内科的な体内の健康管理や胎児の監視などに超音波エコー診断装置が広く用いられていることが良く知られている。

ここで紹介するフェーズドアレイ法は、そもそも医学の方面で進歩した技術を工業面に応用されたものであり、非破壊検査としては電子走査と称呼していたころを加えると歴史は古い。

最近では、データ処理技術の発展に伴って非破

壊検査機器も進歩しフェーズドアレイ装置として国内外の装置が出回り始めてきている。

当社では、平成12年に設備投資と同時に適用技術の開発に着手して以後、試験片レベルのデータだけでなく原子力発電プラントの配管等、実機レベルのデータも蓄積してきている。

本報では、フェーズドアレイ法の概要とこれまでの研究成果を加えて技術を紹介する。

2. フェーズドアレイ法の概要

2.1 パルス反射法とフェーズドアレイ法

パルス反射法 (JIS法) とフェーズドアレイ法との走査の違いを図1に示す。パルス反射法では1個又は2個の振動子を持つ探触子をX及びY方向

* 元検査事業部 技術部 課長 (現株式会社アデルコ)

** 検査事業部 技術部 課長

へ機械的に矩形走査して2次元の欠陥イメージを描写するのに対し、フェーズドアレイ法ではX方向は電子的に走査されているため、Y方向の機械的な走査だけでチャンネル数の範囲で欠陥イメージを描くことが可能となる。また、振動子毎の励振時間をコントロールすることによりビームの伝搬方向だけでなく、任意の位置に焦点域を変えることができるのが大きな特徴である。代表的なビームの走査例とその利点を図2に示すが、一般にリニアスキャンやセクタスキャン及びDDF

(Dynamic Depth Focusing) が多く用いられる。

2.2 フェーズドアレイ法の欠陥イメージ

図3にフェーズドアレイ法での斜角法の欠陥イメージを示しているが、通常の自動UT装置と同様に、試験片に対し側面視のBイメージ、上面視のCイメージ及び前面視のDイメージの3方向の描画 (Volumetric Merge 画像 (全波形を加算した画像)) が得られる。さらに、64 ch分の振動子毎の全波形を取り込んでおり各振動子のB, C, Dイメージの描画 (Non Volumetric Merge 画像 (加算し

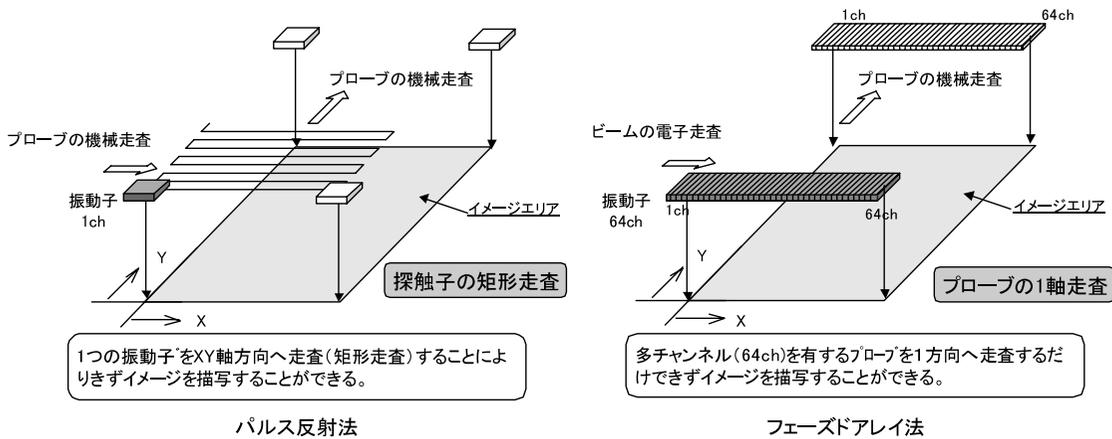


図1 パルス反射法とフェーズドアレイ法との走査

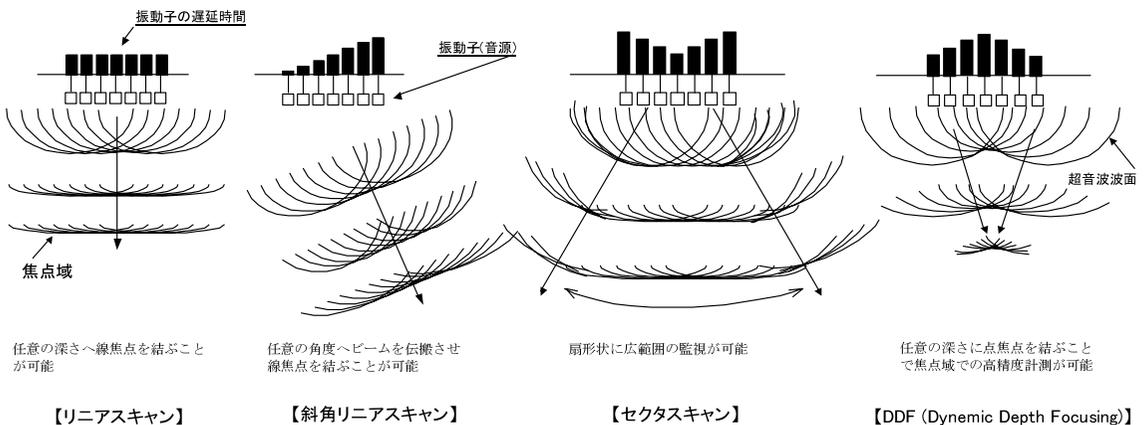


図2 ビームの走査例

ない振動子毎の画像)が可能である。これらはプローブを1走査するだけで採取できるため検査スピードは速いが、その反面、データの量はチャンネル数×走査距離(データ採取ピッチ)となりかなりの解析時間を要する。

3. 装置

装置の構成及びプローブの外観を図4に示す。装置は、①データ採取本体 ②データ解析用PC ③アレイプローブからなり、プローブの走査機構として簡易的な一軸走査機構(リニアエンコーダ)で構成されている。主な装置仕様を以下に示す。

- (1) フェーズドアレイ装置 (μ -Tomo Scan Focus R&D Tech社)
 外形寸法：520×420×200 重量：20 kg
 PFR：最大6887
 サンプリング周波数：100 MHz
 バンドパス周波数：0.5 MHz～15 MHz
 ゲイン：最大105 dB

- (2) アレイプローブ (IMASONIC社)
 外形寸法：72×38×45
 周波数：5 MHz
 CH数：64 CH
 振動子寸法：1×27 mm
 振動子ピッチ：0.25 mm
- (3) その他
 一軸走査機構
 各種屈折角のプローブシュー

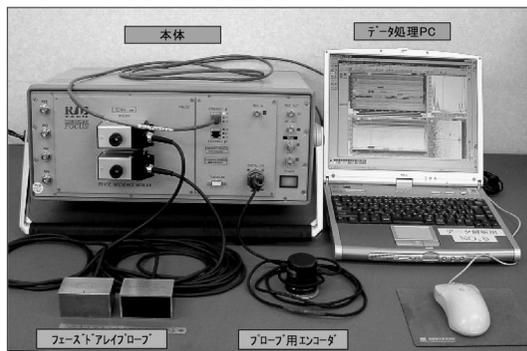


図4 フェーズドアレイ装置

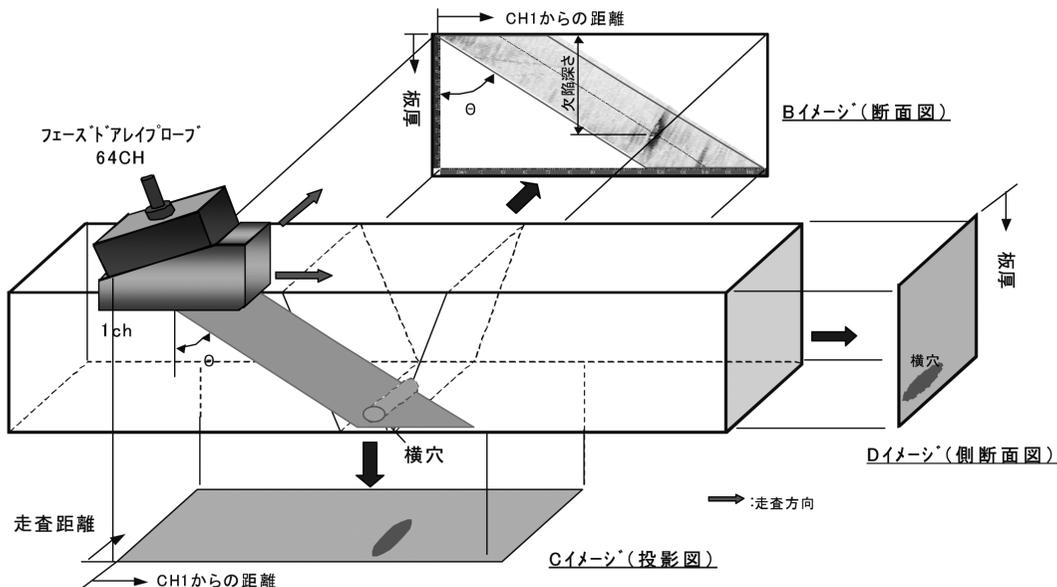


図3 フェーズドアレイ法の概要

4. 試験結果および考察

4.1 垂直法

(1) 欠陥検出性及び寸法計測

平底穴を裏面に付与した平板試験片（35 t, 65 t）を用い、周波数 5 MHz の垂直リニアスキャンにより走査ピッチ（データ採取ピッチ）を変えて検出性を検討した結果を図 5 に示す。平底穴は、底面から高さ 15 mm と一定にし直径を $\phi 0.5, 1, 2, 3, 4, 5$ mm の 6 種類とした。

いずれの走査ピッチも $\phi 0.5$ mm は不鮮明であったが $\phi 1$ mm 以上は鮮明に検出することができた。走査ピッチを 0.5、1 及び 2 mm としたが通常の画像では際立った優位性は認められなかった。しかし、0.5 mm ピッチではメモリの増大と走査に時間がかかり、2 mm ピッチでは拡大表示すると指示模様の輪郭が若干粗くなること等を考慮し 1 mm ピッチが妥当と考えた。

なお、走査ピッチは、検出すべき欠陥の大きさや走査距離等を考慮してその都度決定する必要がある。

平底穴の探傷画像から欠陥指示模様の寸法を読み取り、測定精度について検討した結果を図 6 に示す。欠陥指示の読み取りは、図中に示すように振動子の長さ方向を X、振動子の並び方

向を Y とし、欠陥指示の青色の輪郭を計測した。欠陥の指示模様は、X 方向及び Y 方向とも過大評価であるが、Y 方向は 1 対 1 に近いのに対し、X 方向はかなりの過大となることが判った。これは振動子の長さが 27 mm と長くビーム幅が広がっているためであり、欠陥がビーム幅よりも小さい場合に顕著となる。

このように振動子長さ方向の指示が大きく測定された場合は、プローブの向きを 90° 変えて欠陥の指示長さを確認したうえで適正な評価を行う必要がある。

(2) 欠陥指示の分解能

板厚 100 t の平板に表面から 50 mm 以降に長さ 5 mm の放電スリットを 3 箇所 (A, B, C) 付与した試験片を用い、周波数を 10 MHz とし DDF とセクタス

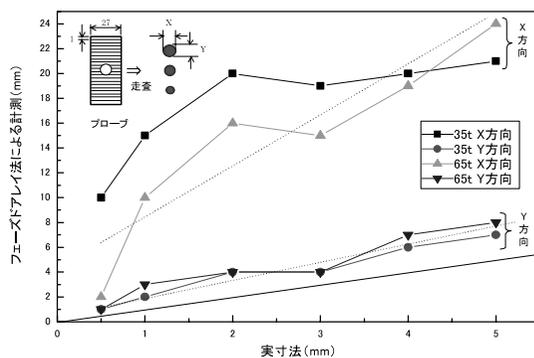


図 6 平底穴の直径寸法測定結果

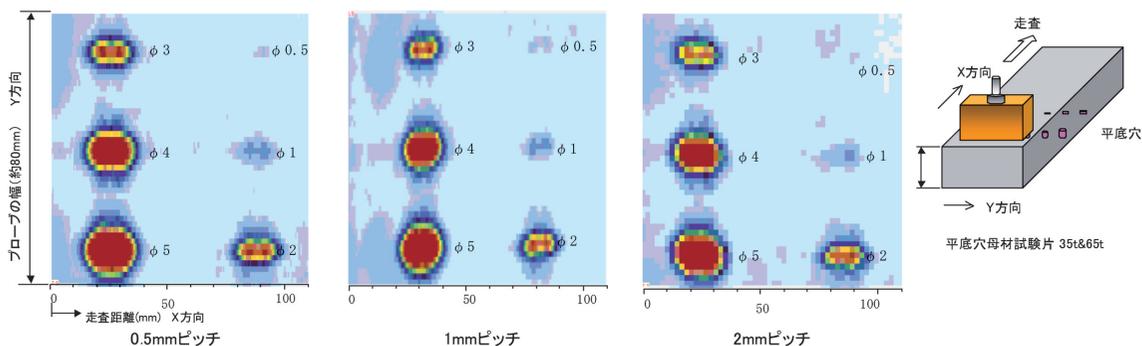


図 5 垂直リニアスキャンによる平底穴検出例（65 t）

キャンにより欠陥の検出性及び分解能について検討した結果を図7に示す。図中にスリットの位置と形状を示しているが、これらは実機部材に発生したき裂をモデル化したものである。各スリットの間隔はAとBが2 mm、BとCが10 mmとした。

DDF及びセクタスキャンともスリットの端部はほぼ同等に検出されたが、B及びCの下端部が検出性は低かった。いずれの走査ともスリットの面反射は得られず、画像ではあたかも単独の欠陥が数個内在しているとの判断となる可能性が示唆される。これは、面にあたったビームは底面方向へ反射されるためであり超音波の性質である。Aの下端とBの上端とは2 mmの間隔を空けているがDDF及びセクタスキャンとも明確に分離されているものの、指示の大きさや分解能の面でセクタスキャンの方が優位な画像が得られた。

4.2 斜角法

(1) モードの違い

縦波と横波との検出性について、深さ0.3, 4 mm

のノッチ付与試験体を用い周波数5 MHzにより検討した結果を図8に示す。図中の下側には開口部エコー高さに対する端部エコー高さを座標で示している。縦波及び横波ともいずれのノッチも鮮明に検出することができたが、縦波の方が寸法計測は容易であるのに対し、横波は開口部エコーの指示模様はかなり大きく、しかも端部エコーの指示も分離されず重畳するため寸法計測は困難であった。これは端部エコーと開口部エコーとの差が19 dBもあり、端部エコーを明確に描写されるまで感度を上げたことにより指示模様が大きくなり重畳したためである。一方、縦波は開口部エコーと端部エコーとの差がわずか8 dBであり、感度を上げなくても開口部エコーと端部エコーとが分離して明確に描写できるためである。

よって、板厚方向の欠陥寸法計測は縦波の方が優位であることが認められた。また、縦波の場合、プローブシューの外形寸法が横波よりも小さくなるため走査性の面でも優れていた。

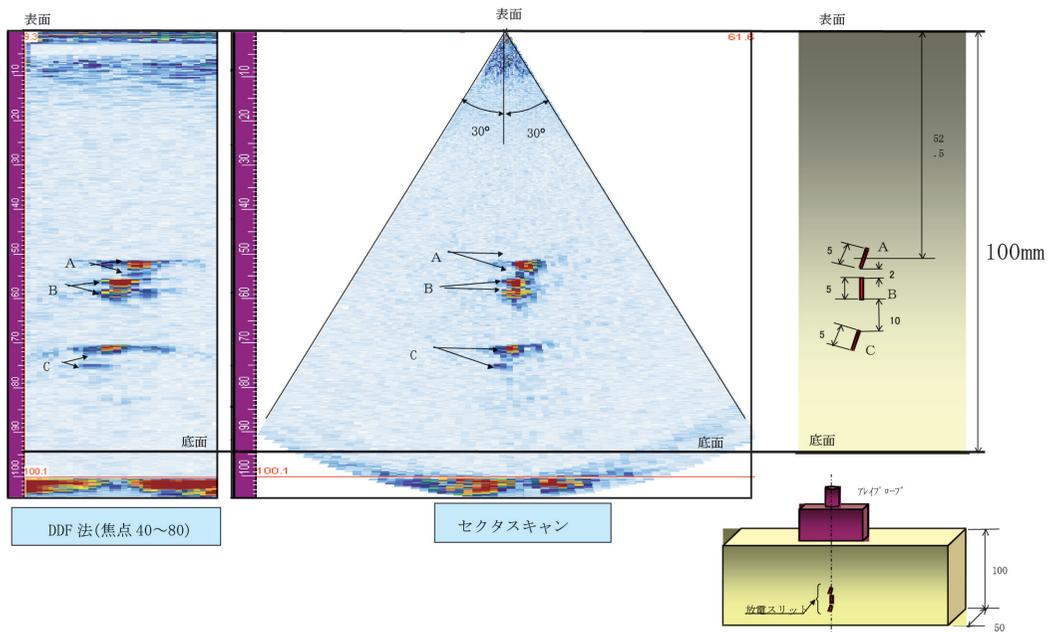
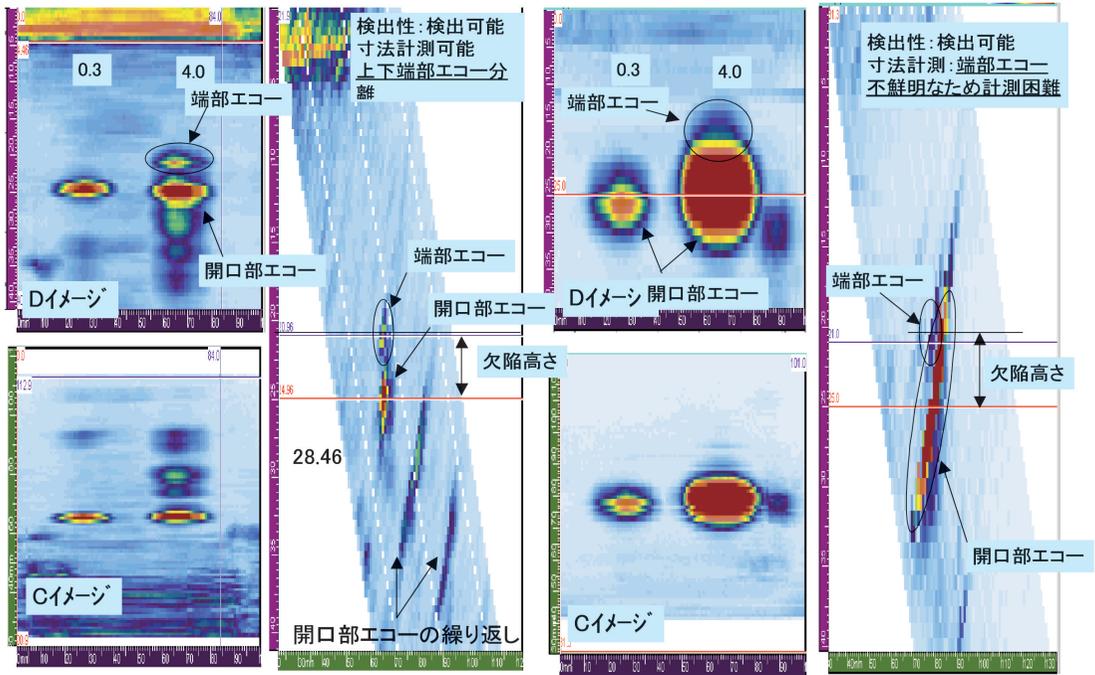


図7 スリットの検出性及び分解能



縦波

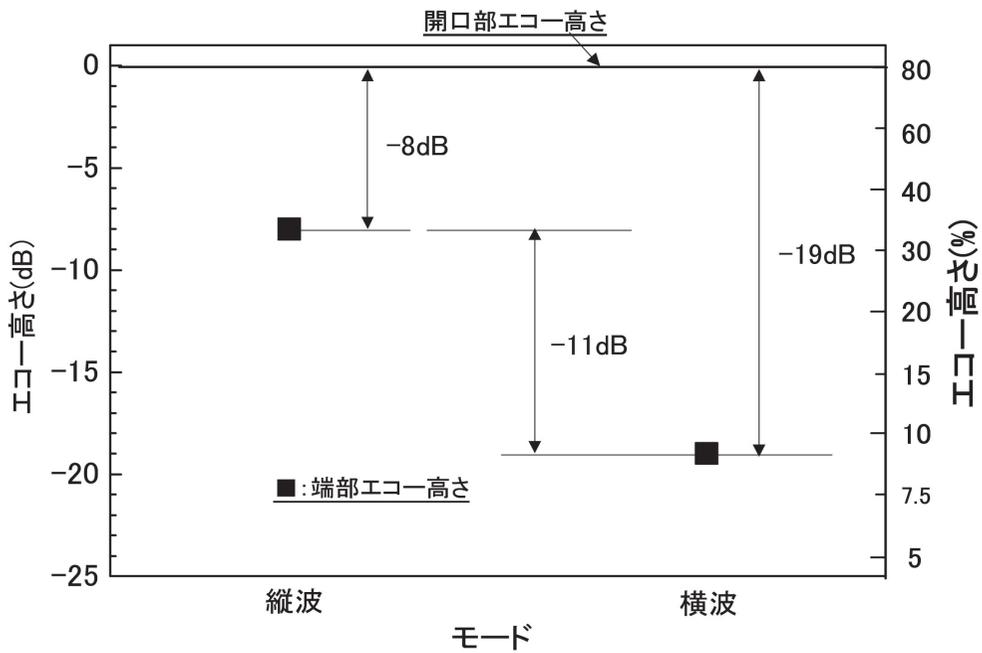
欠陥指示模様が横波よりは小さい

開口部エコー高さと端部エコー高さとの差が小さい(-8dB)

横波

欠陥指示模様が大きい

開口部エコー高さと端部エコー高さとの差が大きい(-19dB)



指向角=70λ/D
λ:波長, D:振動子直径

図8 モードの違いによる検出性

(2) 屈折角

縦波屈折角 45°, 60° 及び 70° の検出性検討結果 (Volumetric Merge 画像) を図9に示す。ビームの表示幅 (1 ~ 64 ch間) は屈折角が大きいほど狭くなるのが判る。これは図中に示しているように見掛けのプローブ寸法が小さくなるためである。したがって、屈折角が大きいほど監視範囲が狭くなり検出性の低下や欠陥の見落しの原因となることも考えられるため、プローブ走査は監視範囲に対し適切なプローブ位置 (Y) 及び走査範囲を考慮の上決定する必要がある。また、欠陥高さの大きい欠陥には 60° 及び 70° では欠陥に対し直交走査の距離を大きくする必要がある。

屈折角の違いによる板厚方向の欠陥指示の大きさについて、4 mm ノッチの Volumetric Merge 画像により検討した結果を図10に示す。欠陥

指示はピークから -6 dB の範囲としこれを比較した。欠陥指示は屈折角が大きいほど板厚方向へ大きめに描写され、特に 70° は大きい。これは、ビームの指向性に起因するためと、さらに、屈折角が大きいほど開口部エコーと端部エコーとの時間差が小さくなるため近接した画像になることなどが考えられる。したがって、ピークエコーが識別し難くなることでデータのばらつき要因につながるため、例えば面状欠陥の高さ計測においては十分注意が必要である。

(3) 寸法測定限界

NonVolumetric Merge 画像上による寸法の計測限界について検討した結果 (縦波) の代表例を図11に示す。検討方法としては、画像上で開口部エコーと端部エコーとが分離でき、しかもピークの位置が読み取れるかどうかで決定した。

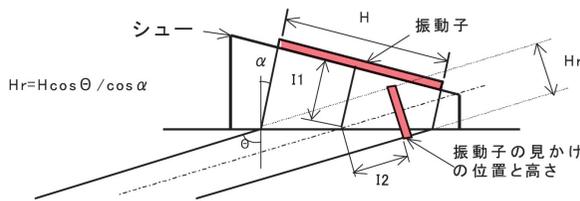
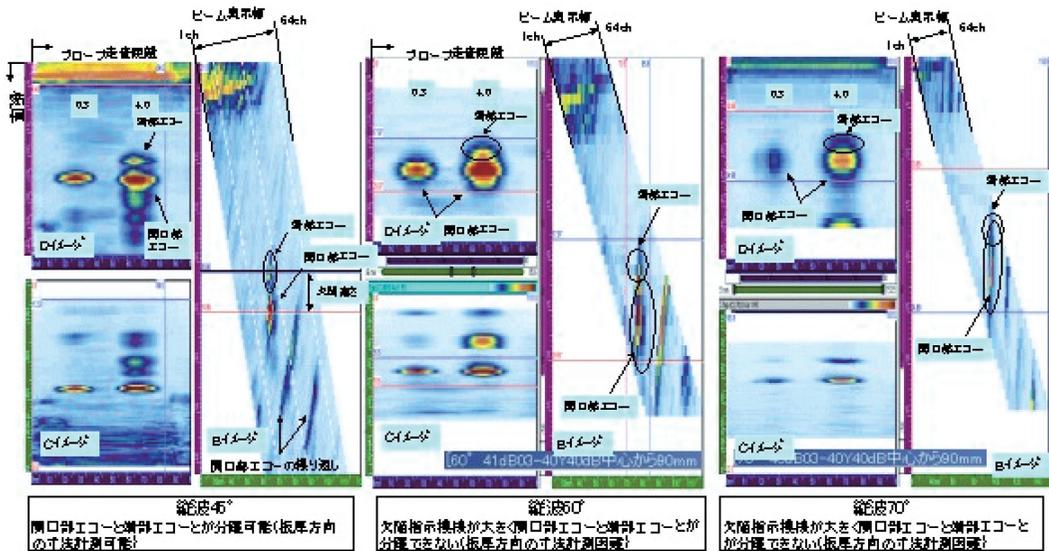
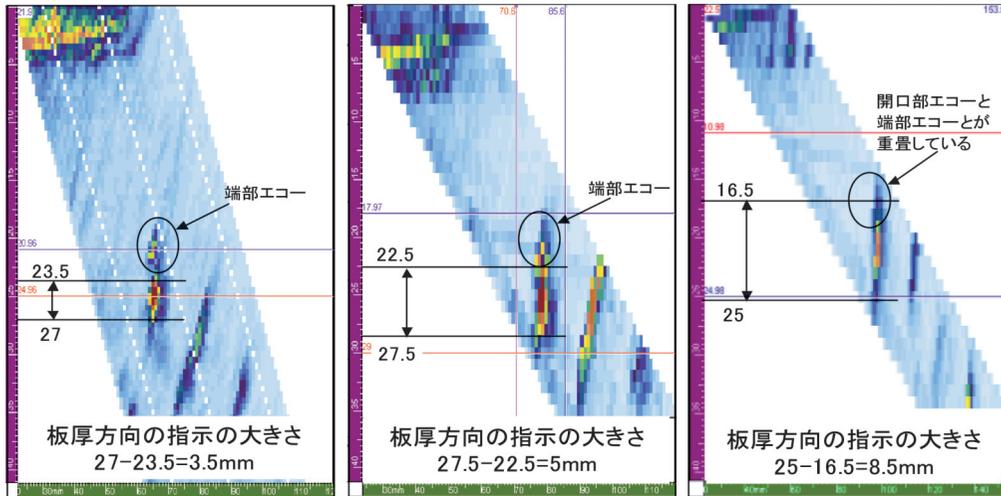


図9 屈折角の違いによる検出性 (縦波)



屈折角45°

屈折角60°

屈折角70°

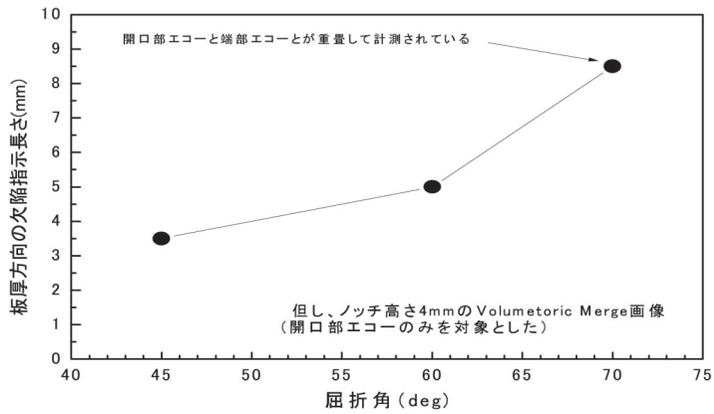


図10 屈折角の違いによる欠陥指示模様の違い (-6 dB 範囲)

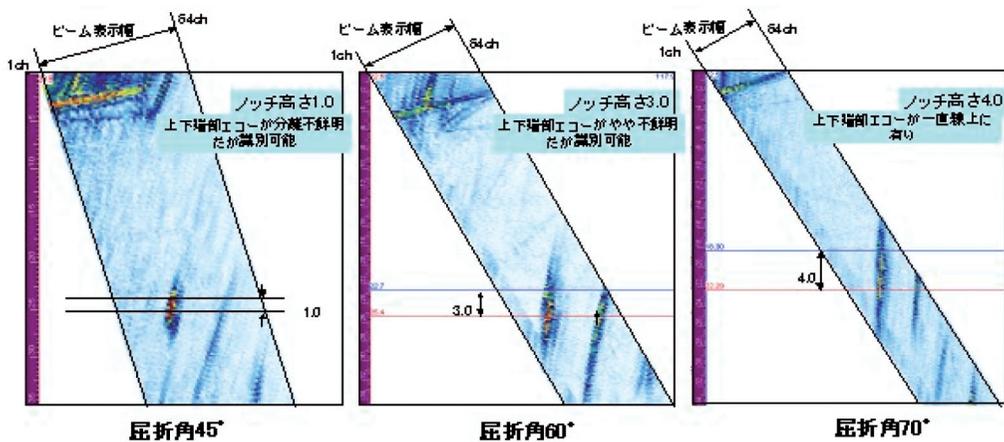


図11 屈折角の違いによるノッチ高さ計測限界

屈折角45°では1 mmノッチを、60°が3 mmノッチ、70°が4 mmノッチであり、45°が最も小さいノッチを分離して読み取ることができ45°の優位性が確認された。

5. まとめ

フェーズドアレイ法の適用拡大を図るため垂直法と斜角法について適用性を検討した結果、以下のことが判った。

5.1 垂直法

- ①本報では走査ピッチは1 mmが最適であったが、走査ピッチの設定は検出すべき欠陥の寸法や走査距離を考慮の上決定する必要がある。
- ②欠陥指示は過大評価されるが、特に、振動子の長さ方向の寸法は大きく計測されるので注意が必要である。
- ③DDF及びセクタスキャン画像とも近接した欠陥の上端部と下端部との2 mmの間隔を十分に分離できることが確認された。

5.2 斜角法

- ①画像上で端部エコー法により欠陥高さを計測する場合、横波よりも縦波の方が優位である。
- ②屈折角が大きいほど画像に表示されるビームの表示幅は狭くなる。

- ③屈折角60°及び70°よりも45°の方が検出性、寸法計測の面で優位である。
- ④屈折角が大きいほど板厚方向の欠陥指示は大きめに描写されるため、ピーク位置の決定には注意が必要である。

6. おわりに

フェーズドアレイ法は、通常のパルス反射法（JIS法）と同様に反射されてきた超音波信号を解析する方法であるが、多数の振動子をアレイ状に配列したことによりビーム走査やフォーカシング及び、欠陥の画像化等が容易になった点が手法そのものの大きな特徴である。今回、手法の概要とその優位性について代表例を述べ、優れた検査方法であることは確認できたが、しかし様々な機種に適用するにはクリヤしなければならないことも多い。特に、キャリブレーションの検討は重要であり、中でも感度設定は欠陥が画像として表示されてはじめて評価の対象となるためと、有害・無害を判断するうえでも重要なパラメータである。本検査法がオーサライズされるためには、これらキャリブレーションを充実することが急務でありこれにはデータの蓄積が必要となる。今後更なる検討を加え適用技術を開発していく考えである。