

# フェイズドアレイ超音波を用いた埋込金物検査手法の開発

## Development of Testing Technique on Embedded Plates Using Phased-Array Ultrasonic Testing

日本原燃(株)	三浦 進	Susumu MIURA	Member
日本原燃(株)	関口 昭司	Shoji SEKIGUCHI	
日本原燃(株)	服部 功三	Kouzou HATTORI	
原子燃料工業(株)	○ 匂坂 充行	Mitsuyuki SAGISAKA	Member
原子燃料工業(株)	小川 良太	Ryota OGAWA	Member
原子燃料工業(株)	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member

Non-destructive testing technique was developed for embedded plates using phased-array ultrasonic testing (PAUT). The bending angle of their studs was quantitatively estimated by using the sector scan of PAUT, which is usually difficult by using conventional UT. In addition, this technique is capable of visualizing the weld shape of the stud by using the linear scan of PAUT. Mockup tests were carried out in order to verify the effectiveness of the technique.

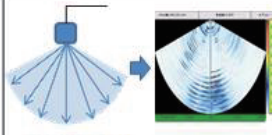
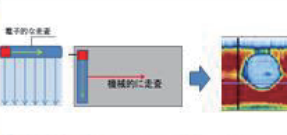
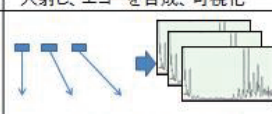

**Keywords:** Phased-Array, Ultrasonic Testing, Non-Destructive Evaluation, Plate, Welding, Bending

### 1. はじめに

埋込金物は、コンクリート構造物における機器、配管等の支持構造物の固定に広く利用されている。日本原燃では、2015年8月に一般共同溝内の埋込金物に浮き上がりを確認した事象を受け、目視による外観点検、超音波探傷試験(通常 UT 測定)による健全性確認等を実施している<sup>1)</sup>。このうち通常 UT 測定ではジベルが短い、曲げ過ぎ等と評価されたものを規格外と分類するが、ジベル曲がり角度の定量的把握には課題が残っている。また、隅肉溶接されたジベルに対する通常 UT 測定では、超音波がジベルに十分に入射しない場合があり、「ジベルが欠損している」と誤判定する可能性も考えられる。

筆者らは、フェイズドアレイ超音波(PAUT)によるセクタスキャン(広い角度範囲に超音波ビームを入射しエコーを合成、可視化)、又はリニアスキャン(広い領域に超音波ビームを入射しエコーを合成、可視化)を応用して(表 1)、通常 UT 測定では困難であったジベルの曲がり角度を定量する手法、及びジベルの溶接部形状を可視化する手法、の2つの測定手法を開発し、実機適用及び高度化を進めている。本報では、これらの測定手法の有効性をモックアップ試験により検証した結果を報告する。

表 1 PAUT の特徴

	セクタスキャン	リニアスキャン
概要	 広い角度範囲に超音波ビームを入射し、エコーを合成、可視化	 電子的位置量 機能的に走査 広い領域に超音波ビームを入射し、エコーを合成、可視化
通常 UT との比較	 ビーム角度は探傷子毎に固定	 機能的に走査 試験対象全面を機械的に走査し、大量のデータを手動で合成

### 2. ジベルの曲がり、欠損測定

#### 2.1 測定手法

本手法は、PAUT のセクタスキャン(表 1)を応用し、通常 UT では困難であったジベルの曲がり角度を定量する手法である。

曲がりの無いジベルに対し、埋込金物プレート表面からセクタスキャンにより超音波を入射する場合を考える(図 1 左)。入射した超音波がジベル底面で反射すると、ビーム路程に応じた位置に第一底面エコーが現れる他、底面エコーから一定の時間遅れを伴ってモード変換エコーが現れる。図 2 は、曲がりの無いジベルに対するセクタスキャン結果であり、濃淡が淡→濃となるに従いエコーの振幅が高いことを表している。曲がりの無いジベルに対するセクタスキャンでは、第一底面エコーの振幅は

超音波が金物表面から垂直に入射した場合が最も強くなる。

一方でジベルに曲がりがある場合（図 1 右）、第一底面エコーの振幅は、一般に超音波ビーム角度がジベルの曲がり角度に近づくに従い、高くなる傾向がある。図 3 は 20° の曲がり角を有するジベルに対するセクタスキャン結果であるが、曲がり角度 20° に対応する超音波ビーム角度で第一底面エコー振幅が最も高くなっていることがわかる。従って、第一底面エコーの振幅が最も高くなる超音波ビーム角度から、ジベルの曲がり角度を定量する可能性がある。

本手法では、探傷子から底面までの距離を超音波の第一底面エコーから測定できるため、ジベルの欠損も併せて検出可能である。

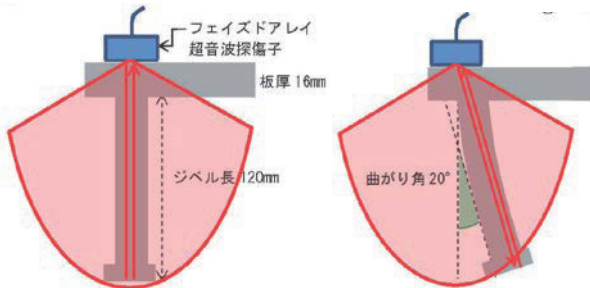


図 1 セクタスキャンによるジベルへの超音波入射 (左: 曲がりなし、 右: 20° の曲がり有り)

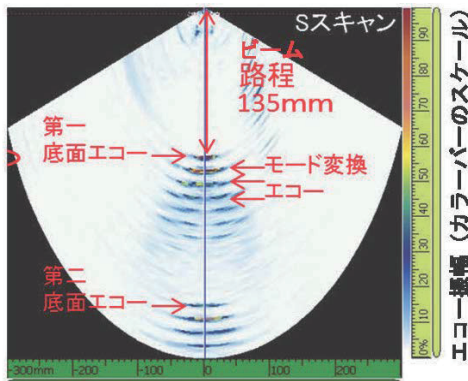


図 2 セクタスキャン結果 (曲がりなし)

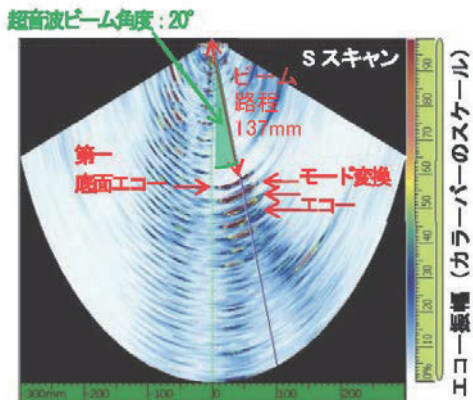


図 3 セクタスキャン結果 (20° の曲がり有り)

## 2.2 モックアップ試験方法

本手法の有効性を検討した例として、ジベルに曲がりを与えた複数のモックアップに対して本手法を適用した結果を示す。

本検討では、板厚 16mm、ジベル長 120mm の埋込金物においてジベルに 25、30、40、50、及び 60° の曲げを付与したモックアップを用いた。また本検討に対するジベル欠損の影響を確認するため、60° の埋込金物についてはジベル下端 25% を切断したものを併せて用いた。

測定方法を図 4 に示す。それぞれのモックアップに対して、ジベル内に超音波ビームが直接入射するように PAUT 探傷子を走査して (図 4 左)、セクタスキャン画面における第一底面エコーの振幅が最も高くなるビーム角度 (振幅最大ビーム角度) を求めた (図 4 右)。

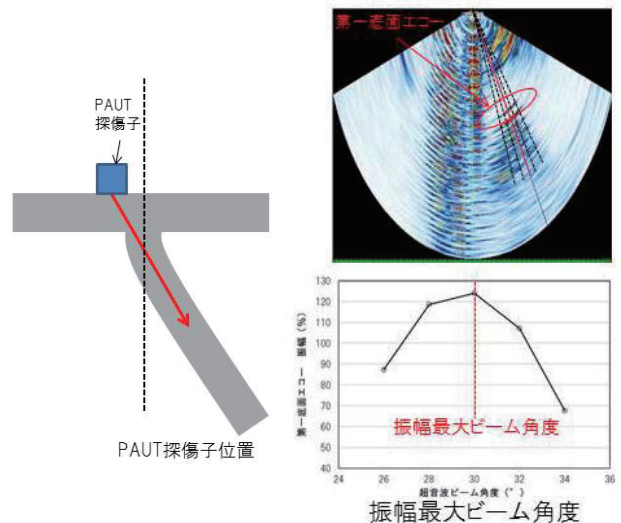


図 4 ジベルの曲がり測定

## 2.3 モックアップ試験結果

各モックアップに対して本手法を適用し、振幅最大ビーム角度を求めた結果を図 5 に示す。曲がり角度が 40° までの全てのジベルに対しては、振幅最大ビーム角度は曲がり角度を概ね 2~5° 上回った。一方で、曲がり角度が 50、60° (ジベルが 25% 欠損したものも含む) に対しては、振幅最大ビーム角度は曲がり角度を下回った。この理由は、ジベルに大きな曲がりがあることにより超音波ビームがジベル底面に直接到達する経路が阻害され、曲がり角度を下回る角度で入射した超音波ビームがジベル側面で反射して底面に到達するためと考えられる。なお曲がり角度 60° では第一底面エコーが観測されなかったため、モード変換エコーによる振幅最大ビーム角度を参考値として示した。

本モックアップ試験では、ジベルに欠損が無く曲がり角度が  $50^\circ$  までの範囲では、振幅最大ビーム角度は曲がり角度と  $3\sim 5^\circ$  の範囲で一致し、曲がり角度を定量する可能性を見いだした。

本手法における誤差要因の検討として、超音波ビームがジベルの曲がり方向からずれている場合 (図 6 左)、ジベルの中心からずれている場合 (図 6 右) について振幅最大ビーム角度への影響を確認した結果をそれぞれ図 7 及び図 8 に示す。いずれも振幅最大ビーム角度への影響は  $2^\circ$  の範囲であり、影響は小さかった。

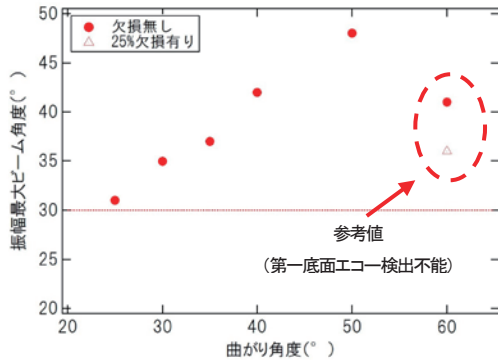


図 5 ジベル曲がり角度と振幅最大ビーム角度

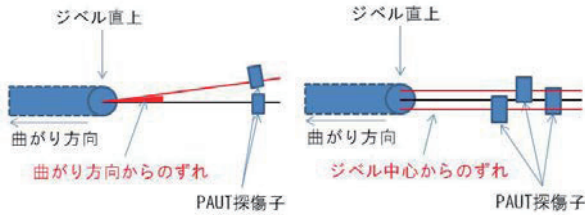


図 6 誤差要因検討 超音波ビームのずれ  
左: 曲がり方向からのずれ、右: ジベル中心からのずれ

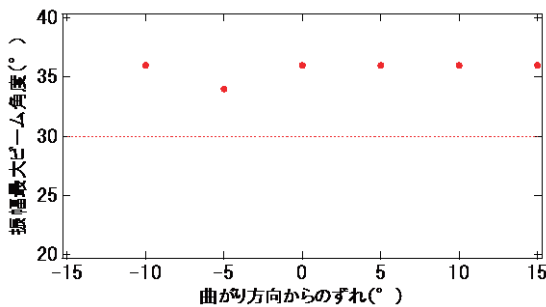


図 7 誤差要因検討試験結果 曲がり方向からのずれ

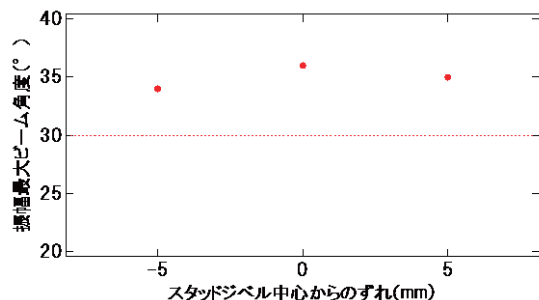


図 8 誤差要因検討試験結果 ジベル中心からのずれ

### 3. 溶接部形状測定

#### 3.1 測定手法

本手法は、PAUT のリニアスキャン (表 1) を応用し、埋込金物ジベルの溶接部形状を可視化する手法である。具体的には図 9 に示すジベル溶接部に対して本手法を適用することにより、同図 (右) のように溶接部の形状、位置を把握可能である。

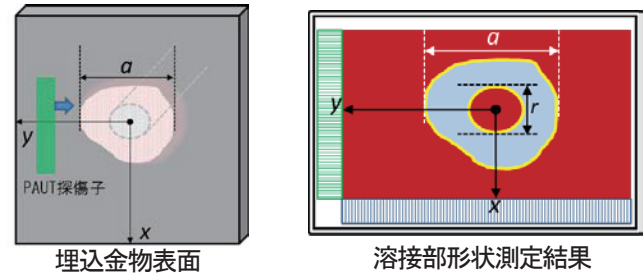


図 9 溶接部形状測定 模式図

本手法の原理模式図を図 10 に示す。板厚が既知である板材に超音波を入射すると、板厚に対応するビーム路程で第一底面エコーが観察される (図 10 左)。一方、この板材の裏面に溶接部がある場合には、板厚からのエコーが観察されなくなる (図 10 右)。従って、このエコーの有無から、その位置での溶接部の有無を判定できる。

この原理を用いて、PAUT のリニアスキャンを用いて板材表面を面的に走査することにより、溶接部の形状や位置を視覚的に把握可能である。

図 11 には、実機環境の埋込金物で使用されている溶接方法の一部としてスタッド溶接、隅肉溶接及びあと施工アンカーの溶接に対して溶接部形状測定を行った場合の、測定結果の違いを模式的に示した。隅肉溶接の場合、スタッド溶接と異なりジベルの周囲を溶接することから、ジベル軸中心部に溶接部が無く板厚のエコーが観察される可能性が考えられる。

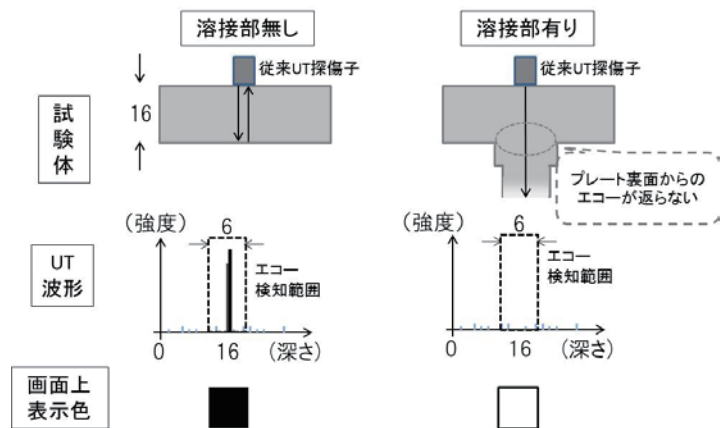


図 10 溶接部形状測定 原理模式図



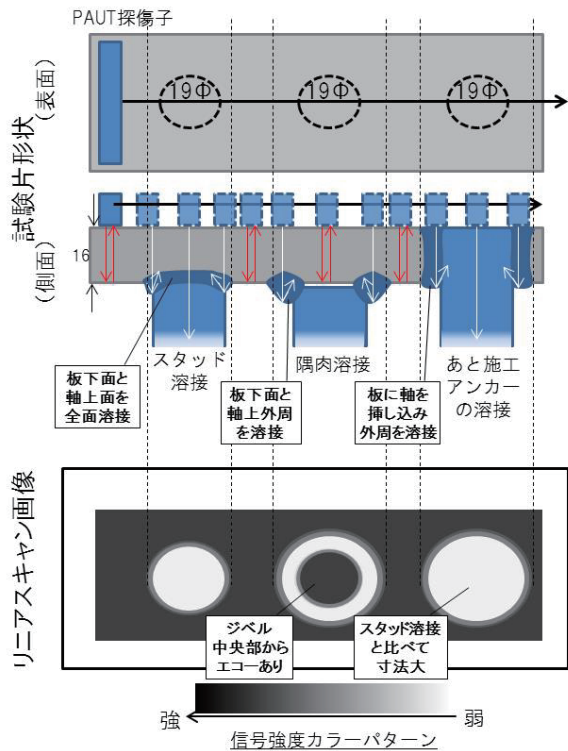
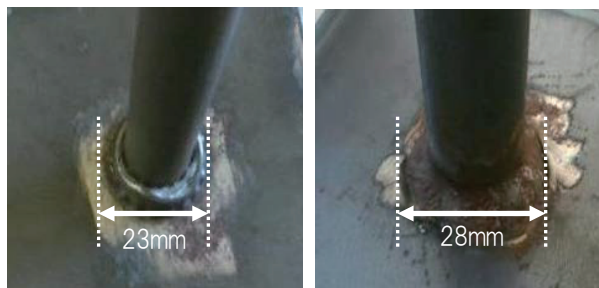


図 11 溶接部形状測定 各溶接方法に対する結果模式図

### 3.2 モックアップ試験方法

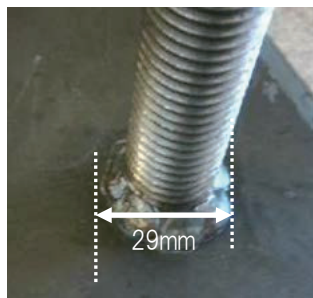
溶接方法による溶接部形状測定結果の違いをモックアップ試験により検証した結果を示す。

本試験では、スタッド溶接、隅肉溶接、あと施工アンカーの溶接、の3種類を選び、これらの溶接方法を用いて、16(mm)の板材に対して19mm径のジベルを取り付けたモックアップを製作した。モックアップの外観及び溶接部のおよその寸法を図12に示す。



スタッド溶接

隅肉溶接



あと施工アンカーの溶接

図 12 3種類の溶接方法によるモックアップ

### 3.3 モックアップ試験結果

各モックアップに対する測定結果を図13に示す。それぞれの測定結果において、中央部に淡色で表示されている部分は板厚からのエコーが現れていない領域であり、溶接部と推定される。図から、隅肉溶接ではジベル軸中央部における板厚からのエコーが現れていること、また、溶接部寸法測定値はスタッド溶接とあと施工アンカーの溶接とで顕著に異なっていること、がわかる。これらの特徴から3種類の溶接方法を識別する可能性がある。それぞれの溶接方法における「溶接部寸法測定値」と「軸部における板厚位置からのエコー有無」を表2に纏めた。

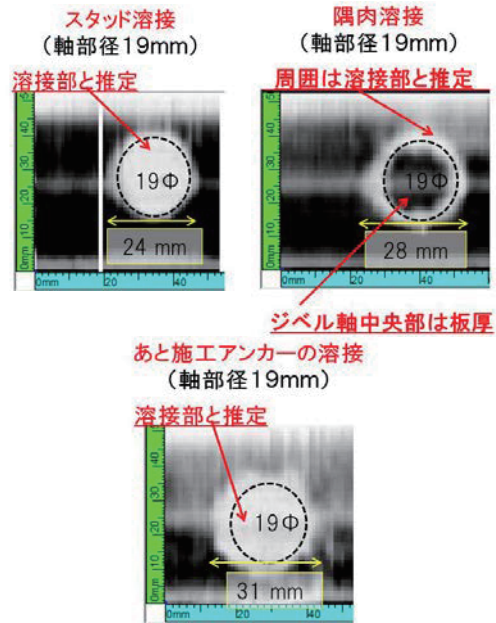


図 13 3種類の溶接方法によるモックアップ測定結果

表 2 溶接方法による違い

溶接方法	溶接部寸法測定値	軸部における板厚位置からのエコー有無
スタッド溶接	(ジベル径) + 5(mm)	無し
隅肉溶接	(ジベル径) + 9(mm)	有り
あと施工アンカーの溶接	(ジベル径) + 12(mm)	無し

### 4. まとめ

PAUTを用いて、埋込金物ジベルの曲がり角度を定量する手法、及びジベル溶接部形状を可視化する手法を開発し、1種類の埋込金物タイプについてモックアップ試験によりそれら手法の有効性を検証した。今後は、実機環境で使用されている様々なタイプの埋込金物に対する検証を進めるとともに、曲がり角度定量精度の向上等、高度化を図る予定である。

#### 参考文献

[1] 再処理施設 埋込金物の健全性確認の実施状況 (概要), 日本原燃プレスリリース, 2015.