

## エルボテーパ部の軸方向欠陥に対する 超音波探傷試験条件の検討

Study on Ultrasonic Testing Conditions for an Axial Flaw  
in a Taper of an Elbow on Weld Piping

市来 隆一 (Ryuichi Ichiki) \*<sup>1</sup>      遠藤 賢 (Ken Endoh) \*<sup>2</sup>  
堤田 正一 (Shoichi Tsutsumida) \*<sup>3</sup>      石田 仁志 (Hitoshi Ishida) \*<sup>1</sup>

**要約** 加圧水型原子炉 (PWR) の一次冷却材管等に使用されている casting ステンレス鋼は、その結晶構造により超音波の散乱や減衰が大きいため超音波探傷試験は困難であるとされていたが、INSSは大型2振動子探触子を用いた自動超音波探傷装置を開発した。しかし、この探触子では、探触子を走査できないエルボ傾斜部直下にある軸方向欠陥面の正面からは探傷できない。そこで、フェーズドアレイ技術を用いて、配管溶接部の走査不可範囲下部にある軸方向欠陥面に斜めから超音波を入射した場合の欠陥の検出の可能性について、超音波探傷シミュレーションおよび casting ステンレス鋼試験体を用いた超音波探傷試験により検討した。その結果、探傷試験では欠陥からのエコーと判断できるような受信信号は得られなかった。しかし、シミュレーションでは欠陥からのエコーと判断できるような解析結果を得た。また、凹凸のある欠陥面からのエコーは平坦な欠陥面からのエコーより振幅が大きいことがわかった。このことから、走査不可範囲下部にある軸方向欠陥面に斜めから超音波を入射し欠陥を探傷できる可能性と、 casting ステンレス鋼の疲労き裂のような凹凸のある欠陥面からの散乱波により欠陥を検出できる可能性を見いだした。

**キーワード** 超音波探傷試験, casting ステンレス鋼, フェーズドアレイ技術, 走査不可範囲, 超音波探傷シミュレーション

**Abstract** Ultrasonic testing has been thought to be difficult to apply to cast stainless steel which is used for reactor coolant pipes or other components in pressurized water reactors (PWRs), because of the large scattering and attenuation of ultrasonic waves caused by the material crystal structure. Therefore, an automatic ultrasonic testing system using a twin crystal transducer was developed in INSS. However, axial flaws in a surface directly under the slant of elbows cannot be scanned head on with this probe. Therefore, the possibility of detecting axial flaws in this impossible-to-scan zone on weld piping is studied in the case that ultrasonic waves are incident at an angle to the surface with the flaws with a phased array technique. An ultrasonic testing simulation and some experiments with cast stainless steel were carried out. The experiments did not provide received signals that could be judged as an echo from flaws. However, in the ultrasonic testing simulation, analysis results that could be judged as an echo from flaws were got. In addition, it was found that the echo from the uneven flaw surface had a larger amplitude than the echo from the flat flaw surface. From this, the possibility was found that ultrasonic waves could be obliquely incident on an axial flaw surface in the impossible-to-scan zone and the flaw could be tested, and there was a possibility that the flaw could be detected by scattered waves from an uneven flaw surface such as a fatigue crack in cast stainless steel.

**Keywords** ultrasonic testing, cast stainless steel, phased array, inaccessible zone, ultrasonic testing simulation

\*<sup>1</sup> (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所  
\*<sup>2</sup> 非破壊検査(株) 元 技術本部 現在 大阪事業本部  
\*<sup>3</sup> 非破壊検査(株) 技術本部

### 1. はじめに

加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) の原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する 1 次冷却材管等の溶接部は、供用期間中検査として体積試験の実施が要求されている<sup>(1)</sup>。1 次冷却材管等の配管溶接部の体積試験としては超音波探傷試験が広く用いられている。

1 次冷却材管やポンプケーシングなどに使用されている鍛造ステンレス鋼は、図 1 に示すように鍛造ステンレス鋼と比較して非常に大きな結晶粒と異方性を有している。大きな結晶粒の結晶粒界では小さな結晶粒と比較して超音波を激しく散乱、減衰させ、その散乱により戻ってくる超音波がノイズとして現れるため SN 比 (signal-to-noise ratio) が低下し、欠陥検出性が低下する。また、結晶異方性が超音波の伝搬方向を偏向させ欠陥位置の誤認等を発生させる。このため、鍛造ステンレス鋼に超音波探傷試験を適用するのは困難であるとされていた。そこで、原子力安全システム研究所 (INSS) では、鍛造ステンレス鋼を対象とした超音波探傷技術の開発に着手し、実機適用可能な大型 2 振動子探触子を用いた自動探傷システムを開発した<sup>(2)~(9)</sup>。

鍛造ステンレス鋼 溶接部 鍛造ステンレス鋼

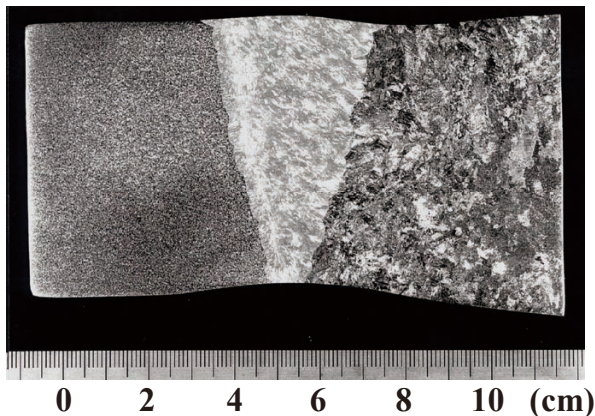


図 1 ステンレス鋼溶接部の組織

図 2 に供用期間中検査で実施するテーパのある配管溶接部の体積試験範囲<sup>(1)</sup>を示す。体積試験範囲は図の A-B-C-D (赤線) で囲まれた範囲で、軸方向に溶接部の両側の溶接止端部から 10 mm、板厚方向に配管外面から内面まで、周方向に全周の範囲である。しかし、エルボテーパ部上に探触子を配置して走査することはできない。一方、「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探

傷試験規程 (JEAC4207-2008)」<sup>(10)</sup>では、配管の周方向と軸方向の両方向から探傷することが要求されている。探触子を配置して走査できないエルボテーパ部すなわち走査不可範囲の下部の欠陥に対して、周方向欠陥を対象とする軸方向探傷は可能であるが、軸方向欠陥を対象とする周方向探傷は幾何学的配置により探傷することができない。以降でその理由を説明する。なお、このような、幾何学的形状等の理由で構造上検査が困難な箇所の検査は免除される<sup>(1)</sup>。

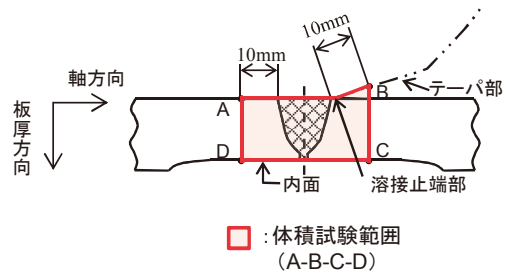


図 2 テーパのある配管溶接部の体積試験範囲

まず、超音波探傷試験による欠陥の検出方法を説明する。図 3 に超音波探傷試験の斜角探傷法を示す。欠陥は、探触子から送信され欠陥面と底面で反射した超音波を受信することで検出される。このように、反射を利用するため、探触子の中心線が欠陥面に垂

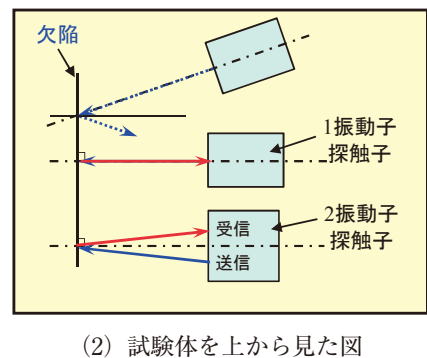
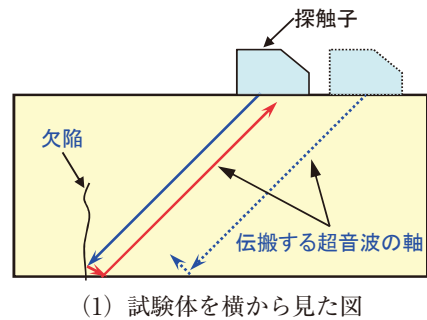


図 3 斜角探傷法による欠陥検出方法

直な欠陥以外、すなわち探触子の正面の位置にある欠陥以外はエコーを検出するのが難しくなる。

軸方向探傷では、探触子と欠陥の位置関係が図4のようになる。図4下部のエルボテーパ部と配管の境界の破線は、探触子がエルボテーパ部に接近できる限界の線（以下「接近限界線」という）である。探触子が接近限界線に接するときの入射点（接近限界時の入射点）から体積試験範囲のエルボ側境界までが探触子の走査不可範囲である。図4に示すとおり、周方向欠陥が走査不可範囲下部にある場合でも、欠陥の正面から探傷可能である。一方、周方向探傷では、探触子と欠陥の位置関係が図5のようになる。接近限界線に接する探触子の中心線上よりエルボ側の走査不可範囲下部に軸方向欠陥がある場合は欠陥の正面から探傷できない。

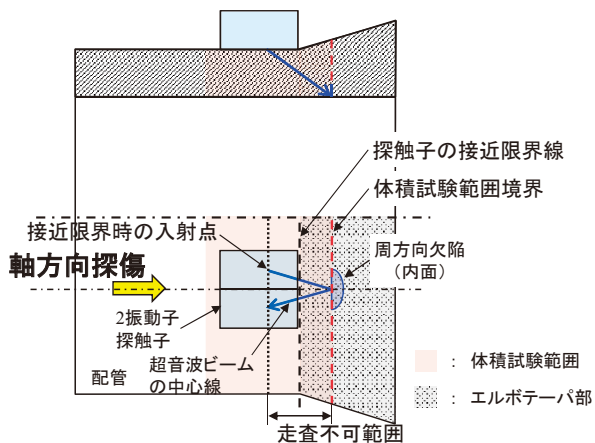


図4 軸方向探傷における探触子と欠陥の位置関係

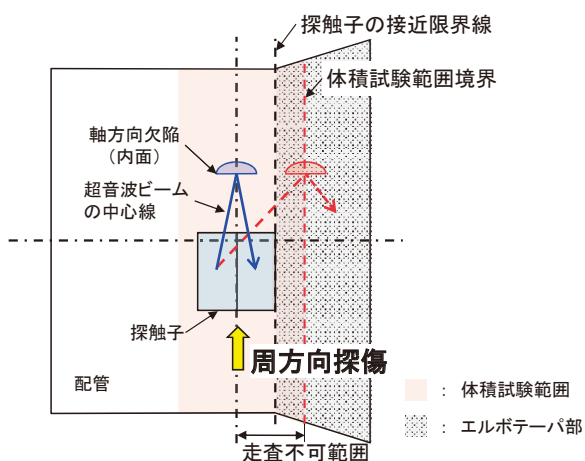


図5 周方向探傷における探触子と欠陥の位置関係

このような幾何学的形状等の理由で検査が免除されている箇所については、記録を残し<sup>(1)(10)</sup>、代替措置を講じることが要求されており、事業者は評価

等を行い健全性を確認している<sup>(11)</sup>。しかし、更なる原子力発電所の安全性向上の観点から検査が困難な箇所の低減を図り、残余のリスクを小さくすることが望ましい。また、超音波を欠陥面に対して斜めに入射したとき、欠陥面が平坦であれば、反射した調音波は探触子に戻らないが、実際の欠陥面には凹凸があり、その凹凸により散乱波が生じる。これらから、欠陥面の凹凸により生じる散乱波が探触子に戻る<sup>(12)</sup>ことを想定して、走査不可範囲下部にある軸方向欠陥に対して斜めから超音波を入射した場合の検出の可能性の追究に取り組んでいる。本報では、超音波を斜めに入射する方法として超音波ビームの焦点を任意の位置に設定できるフェーズドアレイ技術に着目し、超音波探傷シミュレーション及び鍛造ステンレス鋼を用いた超音波探傷試験により検討を行った結果を報告する。

## 2. 想定欠陥位置と探触子位置の選定

配管溶接部は、想定できる形状の中でエルボによる走査不可範囲が最も広がる、溶接止端部からエルボテーパ部が始まる形状とした。図6に配管溶接部の軸方向断面を示す。探触子がエルボに接近できる限界の位置（以下「接近限界位置」という）にあるとき、軸方向欠陥が探触子から最も遠い位置すなわち体積試験範囲のエルボ側境界上の内面にあると想定した。

想定欠陥と探触子位置の幾何学的関係を検討する。図6のように接近限界位置にある探触子の中心Oと欠陥の中心Pとの線分OPを送受信超音波ビームの中心線とし、このときの探触子中心Oを送受信超音波ビームの入射点とする。図7に周方向の探触子の軌道と欠陥との位置関係を示す。入射点Oを含む接平面上に投影した探触子の中心線と送受信超音波ビームの中心線とがなす角をスキュー角 $\eta$ と定義し、探触子位置がスキュー角 $\eta_n$ の場合の入射点を $O_{\eta n}$ とする。探触子を周方向に移動させて探傷するため、周方向の探触子中心の軌道上の各点で、入射点 $O_{\eta n}$ と欠陥中心Pまでの座標を幾何学的に計算した。

その中から探触子位置が欠陥からの反射波に与える影響を考慮して2つの入射点位置を選定する。表1に探触子位置が欠陥からの反射波に与える影響を示す。スキュー角が大きいほど超音波の路程が短くなり材料減衰の影響を受けにくくなる。一方、ス

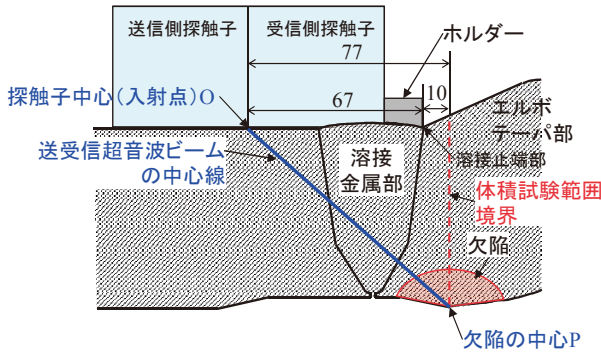


図6 配管溶接部軸方向断面

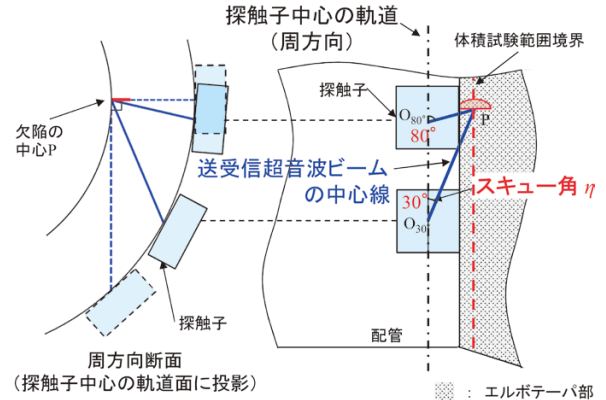


図7 探触子の軌道と欠陥との位置関係

表1 探触子位置が欠陥からの反射波に与える影響

スキュー角	超音波の伝搬距離 (路程)	材料減衰の影響の受けにくさ	欠陥面に対する角度	反射波の戻り易さ
大	短い	大	斜め	小
小	長い	小	垂直に近い	大

スキュー角が小さいほど送受信超音波ビームの中心線の欠陥面に対する角度が垂直に近づき反射波は戻りやすくなる。これらから、反射波に与える影響が両極端である①「欠陥面に対して垂直に近い条件」としてスキュー角30°および②「路程が短い条件」としてスキュー角80°を選定した。なお、図7に示すとおり、送受信超音波ビームの中心線が配管内面に接するとき欠陥面に対して最も垂直に近くなるが、路程が長すぎるため、過去の実験結果からスキュー角30°とした。また、最短の路程となるのはスキュー角90°であるが、欠陥面に対する角度が0°であり反射波が戻らないと予想されるため80°とした。

### 3. 超音波探傷シミュレーション

#### 3.1 超音波探傷シミュレーションの条件・方法

2つの入射点位置から欠陥面に対して斜めに超音波を入射し欠陥からの受信信号波形を得る超音波伝搬解析を実施した。表2に解析条件、図8に入力波形、表3に解析の探傷条件、表4にモデルの仕様、表5に材料モデルの物性値、図9に解析モデルの例を示す。超音波が欠陥まで送信され反射し探触子まで戻るかを確かめるため、均質等方材、材料減衰無し、ウェッジは入射角・屋根角とも0°とした。解析は市販の超音波伝搬解析ソフトウェアCom

WAVEを使用し3次元有限要素解析を行った。

欠陥の形状は半楕円、寸法は長さ50 mm、深さ14 mm、間隙0.5 mmとし、欠陥面が平坦なモデル(以下「EDMスリット」という)と2種類の欠陥面に凹凸があるモデルを作成した。図10に欠陥面に凹凸があるモデルのうちの一つである疲労割れ破面モデルを示す。これは、疲労き裂の割れ面の凹凸による反射を想定して、過去に疲労き裂を実寸法計測のために開放した疲労き裂面<sup>(12)</sup>を三次元計測して欠陥面を作成したモデルである。図11にもう一つの疲労割れ模擬スリットを示す。これは、疲労き裂の代わりに試験体に容易に付与する放電加工(EDM; electrical discharge machining)欠陥として、三次元計測した疲労き裂面の凹凸の山と谷の間隔と高さを模擬し欠陥面を屏風型にしたものである。

#### 3.2 解析結果および考察

解析の結果得られた受信信号波形より、欠陥からのエコーの有無を確認した。図12(1)に欠陥に対して垂直に近い位置に探触子を配置したスキュー角30°の場合のEDMスリット、図12(2)に疲労割れ破面モデル、図12(3)に疲労割れ模擬スリットの受信信号波形を示す。縦軸は振幅、横軸は時間(μs)を示す。その結果、全ての欠陥からのエコーを確認できた。しかし、振幅は小さかった。また、欠陥面が平坦なEDMスリットに比べ、欠陥面に凹凸のある

表2 解析条件

項目	内容
解析方法	・ 3次元有限要素解析 ・ 超音波伝搬解析ソフト ComWAVEを使用
解析条件	・ 8節点立方体要素, 要素寸法 0.25 mm (モデル要素数 約1.3億~2.2億)
入力波形	・ 実際の波形を模擬したパルス入力波 図8参照

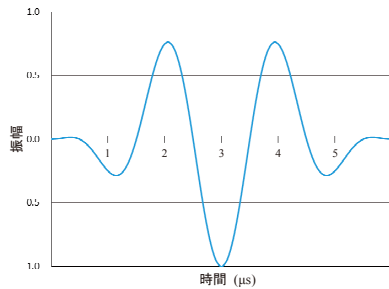


図8 入力波形

表3 解析の探傷条件

スキュー角 (°)	屈折角 (°)	焦点深さ (mm)
30	58.3	69
80	48.6	69

表4 モデルの仕様

項目	内容
モデルとしたフェーズドアレイ探触子の仕様	・ 周波数 0.5 MHz ・ 振動子配列 16 × 4 ・ 探触子寸法 71.5 × 24.7 mm
モデルとしたウェッジの仕様	・ 周方向探傷用 ・ 接触面の曲率 R418 ・ 入射角 0°, 屋根角 0° ・ 中央高さ 22.5 mm
鋳造ステンレス鋼試験体の仕様	・ 外表面の曲率 R418 ・ 厚さ 69 mm

表5 材料モデルの物性値

材料モデル	種別	縦波音速 (m/s)	横波音速 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	減衰
探触子/ウェッジ	等方均質材	2.35 × 10 <sup>3</sup>	1.15 × 10 <sup>3</sup>	1.05 × 10 <sup>3</sup>	なし
鋳造ステンレス鋼試験体	等方均質材	5.77 × 10 <sup>3</sup>	3.15 × 10 <sup>3</sup>	7.85 × 10 <sup>3</sup>	なし

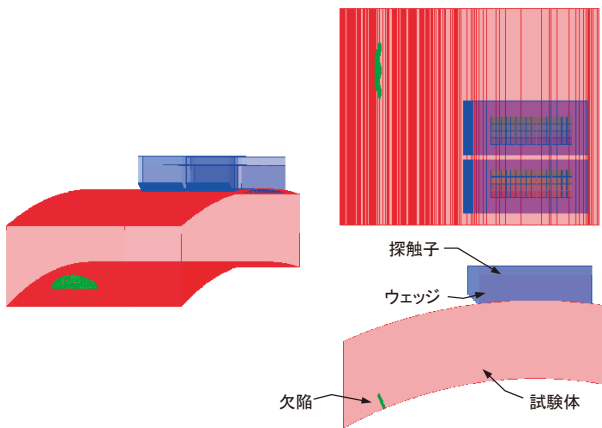


図9 解析モデルの例

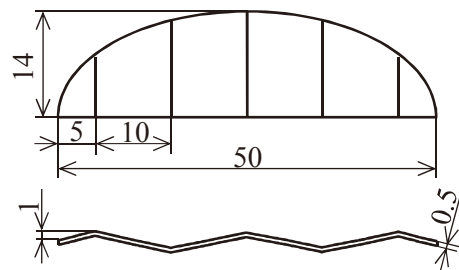


図11 疲労割れ模擬スリット

疲労割れ破面モデルおよび疲労割れ模擬スリットの振幅が大きかった。

図13(1)に路程が短い位置に探触子を配置したスキュー角80°の場合のEDMスリット, 図13(2)に疲労割れ破面モデル, 図13(3)に疲労割れ模擬スリットの受信信号波形を示す。縦軸は振幅, 横軸は時間(μs)を示す。その結果, 全ての受信信号波形に大きな振幅のノイズが確認された。そのため, 入射点から欠陥までの伝搬距離に相当する時刻に現れた信号を欠陥からのエコーと判断した。しかし, その振幅は小さかった。

これらから, 2種類のスキュー角の条件で, 3種類の欠陥からのエコーを確認できた。また, スキュー角30°では, 欠陥面が平坦なEDMスリットに比べ,

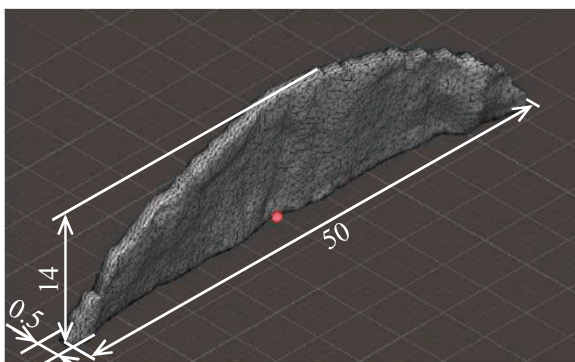
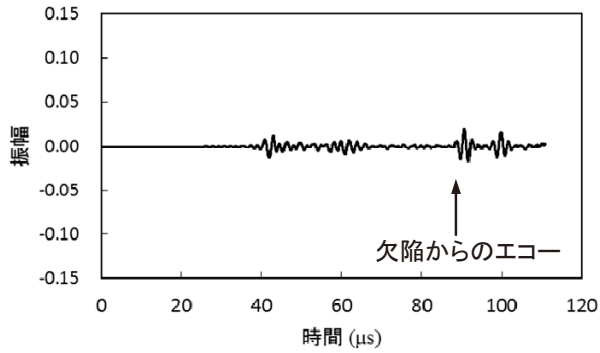
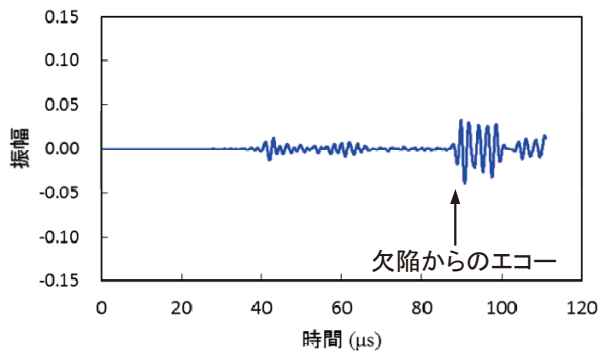


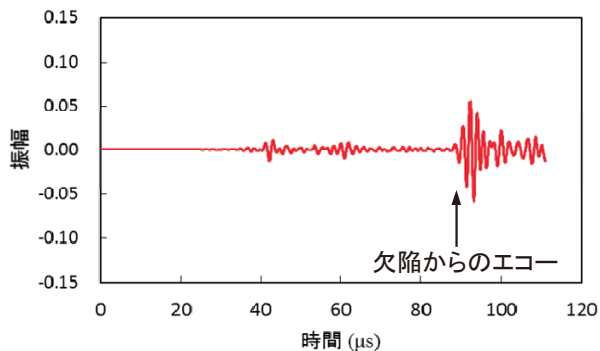
図10 疲労割れ破面モデル



(1) EDMスリット



(2) 疲労割れ破面モデル

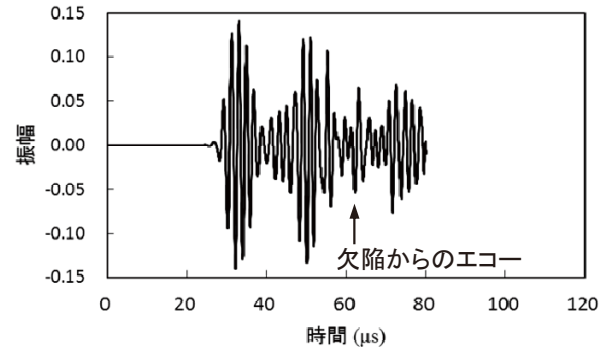


(3) 疲労割れ模擬スリット

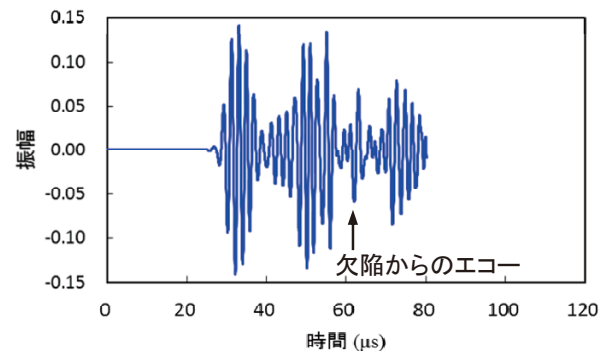
図12 解析結果 受信信号波形 (スキュー角30°)

欠陥面に凹凸のある疲労割れ破面モデルおよび疲労割れ模擬スリットの振幅が大きかったことから、欠陥と想定する疲労き裂のように欠陥面に凹凸がある場合、その凹凸による散乱波を検出できる可能性を見いだした。

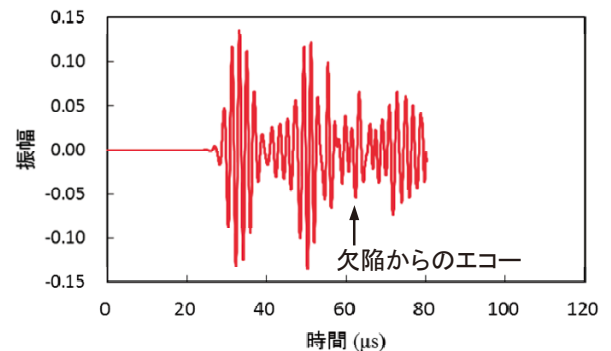
しかし、全ての欠陥からのエコーの振幅が小さいため、材料減衰や材料ノイズの影響がある鋳造ステンレス鋼試験体を用いた実験では、材料ノイズよりエコー高さが低くなることが予想される。また、スキュー角80°で確認されたノイズは、スキュー角が大きいと、受信側探触子の下を通る送信波の一部が直接受信側探触子で受信されることにより生じたノ



(1) EDMスリット



(2) 疲労割れ破面モデル



(3) 疲労割れ模擬スリット

図13 解析結果 受信信号波形 (スキュー角80°)

イズ（以下「周り込みによるノイズ」という）と考えられる。このノイズにより欠陥からのエコーの識別は困難であると予想される。以上から、探傷試験では欠陥の検出は困難であることが予想される。なお、スキュー角80°において、入射点から欠陥までの伝搬距離に相当する時刻に現れた信号を各欠陥からのエコーと判断したが、各振幅に差がないことから周り込みによるノイズであることを否定できないため、今後確認する必要がある。

#### 4. 鋳造ステンレス鋼試験体を用いた超音波探傷試験

##### 4.1 試験体および試験方法

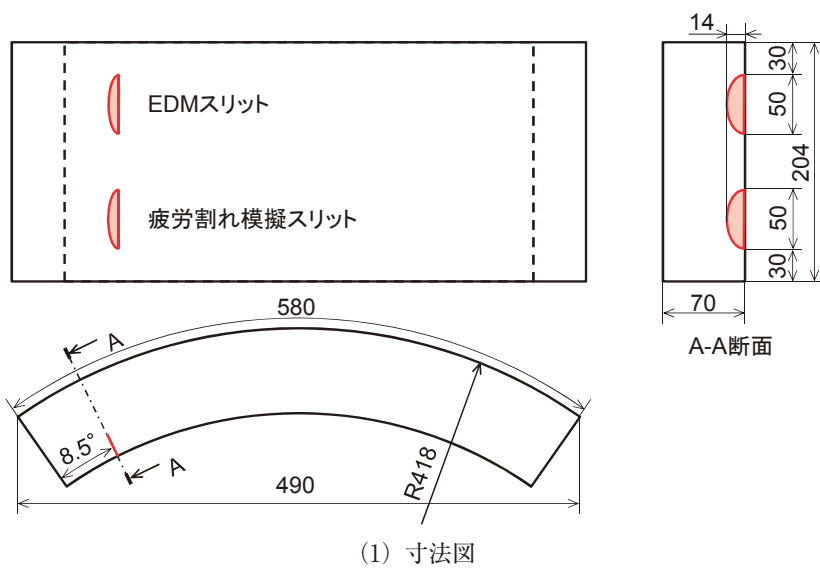
##### 4.1.1 試験体

図14に使用した鋳造ステンレス鋼試験体を示す。実機を模擬した外表面の曲率R418、厚さ70 mmの鋳造ステンレス鋼にシミュレーションと同じ形状のEDMスリットと疲労割れ模擬スリットの2個を放電加工によりスリットの長さ方向が軸方向となるよ

うに付与した。

##### 4.1.2 探触子とウェッジ

図15にフェーズドアレイ探触子の外観、図16にウェッジの外観、表6にフェーズドアレイ探触子の仕様、表7にウェッジの仕様を示す。シミュレーションと同じ周波数0.5 MHz、配列16×4のマトリクスアレイ探触子2個で構成される送受信分割型フェーズドアレイ探触子を使用した。また、シミュレーションと同じ入射角、屋根角0°のウェッジを使用した。



(1) 寸法図



(2) 外観写真

図14 鋳造ステンレス鋼試験体



図15 フェーズドアレイ探触子



図16 ウェッジ

表6 フェーズドアレイ探触子の仕様

項目	仕様
周波数	0.5 MHz
振動子数	64
振動子配列 (前後方向×左右方向)	16×4
探触子外形寸法 (前後方向×左右方向×高さ)	84 mm × 48 mm × 30 mm

表7 ウェッジの仕様

項目	仕様
寸法	100 mm × 100 mm
高さ (中央部)	22.5 mm
接触面の曲率	周方向探傷用 R418.5
ウェッジ入射角	0°
ウェッジ屋根角	0°

### 4.1.3 試験方法

表8に探傷条件を示す。シミュレーションと同様に焦点深さは69 mm, スキュー角 $30^\circ$ で屈折角 $58.3^\circ$ , スキュー角 $80^\circ$ で $48.6^\circ$ とした。探触子の走査には, 2次元方向に移動できる走査スキャナを用いた。走査方向は, 軸方向欠陥に対して垂直方向である周方向とした。測定には, Zetec社製フェーズドアレイ超音波探傷装置DYNARAY®と制御・データ収集ソフトUltraVision®を使用した。超音波信号の送受信を行うと同時に受信信号波形とその探傷位置情報をパーソナルコンピュータに保存した。保存した探傷データを制御・データ収集ソフトで画像表示した。

表8 探傷条件

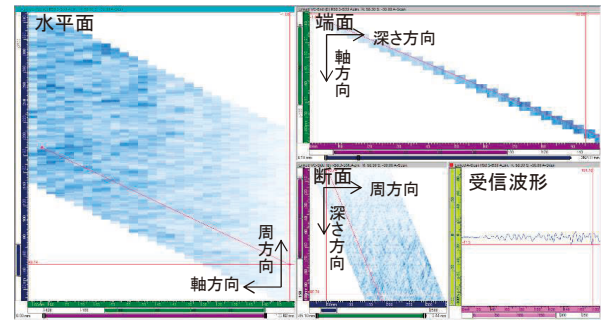
スキュー角 ( $^\circ$ )	屈折角 ( $^\circ$ )	焦点深さ (mm)
30	58.3	69
80	48.6	69

## 4.2 試験結果

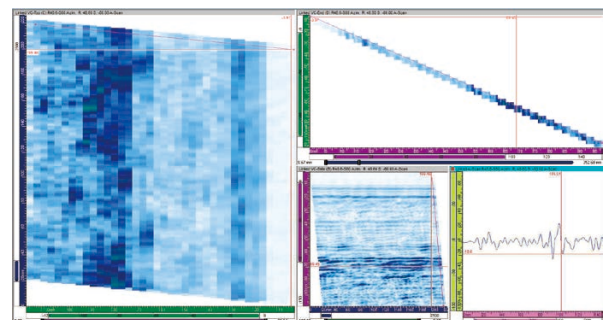
図17に疲労割れ模擬スリットの探傷試験の結果の例を示す。(1)がスキュー角 $30^\circ$ , (2)がスキュー角 $80^\circ$ の画像である。右下が, 横軸が時間, 縦軸が信号の強度を表した受信信号波形である。探傷位置情報と受信信号波形をもとに画像表示したものが左, 右上, 中央下の各図である。それぞれ水平面の信号強度の分布, 端面の信号強度の分布を, 断面の信号強度の分布を示している。シミュレーションで予想されたとおりノイズが確認され, ノイズの振幅を上回る欠陥からのエコーは検出できなかった。また, スキュー角 $80^\circ$ のノイズは, スキュー角 $30^\circ$ に比べ大きかった。これは, シミュレーションと同様に周り込みによるノイズと考えられる。

## 5. 考察

シミュレーションでは, 欠陥面に対して斜めから超音波を入射した場合でも, 欠陥面に対して垂直に近い角度(スキュー角 $30^\circ$ )と路程が短い(スキュー角 $80^\circ$ )2つの極端な入射点位置で, 欠陥からのエコーを確認できた。また, スキュー角 $30^\circ$ では, 欠陥面が平坦なEDMスリットに比べ, 欠陥面に凹凸のある疲労割れ破面モデルおよび疲労割れ模擬ス



(1) スキュー角 $30^\circ$  疲労割れ模擬スリット



(2) スキュー角 $80^\circ$  疲労割れ模擬スリット

図17 超音波探傷試験結果の例

リットからのエコーの振幅が大きかった。このことより, 走査不可範囲下部にある軸方向欠陥を斜めから探傷できる可能性と, 欠陥と想定する casting stainless steel の疲労き裂のように欠陥面に凹凸があれば, その散乱波を検出できる可能性を見いだした。

しかし, casting stainless steel 試験体を用いた超音波探傷試験では, 欠陥からのエコーを確認することができなかった。これは, 欠陥面に対して垂直に近い位置からの送信では, 路程が長く材料減衰の影響が大きくなり, 路程が短くスキュー角が大きい位置からの送信では, 割れ面に対する角度がなくなり欠陥からの反射が少なかったためと考える。このことから, 路程が長すぎずスキュー角が大きすぎない最適な位置を追究する必要があると考えられる。また, スキュー角が大きい場合, 周り込みによるノイズが生じるため, ノイズを減少させる探触子配置やウェッジの最適化が必要と考えられる。



## 6. まとめ

配管溶接部の走査不可範囲下部にある軸方向欠陥を、斜めから超音波を入射して検出する可能性について超音波探傷シミュレーションおよび鋳造ステンレス鋼試験体を用いた超音波探傷試験により検討した。その結果、走査不可範囲下部にある軸方向欠陥を斜めから探傷できる可能性と、欠陥と想定する鋳造ステンレス鋼の疲労き裂のように欠陥面に凹凸があれば、その散乱波を検出できる可能性を見いだした。

今後、走査不可範囲下部にある軸方向欠陥に対する斜めからの探傷に適した路程が長すぎずスキュー角が大きすぎない入射点位置およびその入射点位置からの探傷に適した探触子配置やウェッジを検討していく予定である。

## 参考文献

- (1) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012年版) (JSME S NA1 - 2012), 日本機械学会, (2013).
- (2) 黒住保夫, “鋳造ステンレス鋼の超音波探傷検査技術の開発”, INSS JOURNAL Vol.7, pp.159-171, (2000).
- (3) 黒住保夫, “鋳造ステンレス鋼の超音波探傷における結晶組織が超音波の入射角と欠陥検出感度に与える影響”, INSS JOURNAL Vol.10, pp.198-209, (2003).
- (4) 黒住保夫, 石田仁志, “新開発自動超音波探傷システムを用いた鋳造ステンレス鋼中の欠陥検出感度およびサイジング特性”, INSS JOURNAL Vol.11, pp.182-197, (2004).
- (5) 黒住保夫, “鋳造ステンレス鋼の超音波探傷技術: 鋳造ステンレス鋼試験片中疲労欠陥の深さ・長さ測定 - 端部エコー法による深さサイジング (寸法測定) -”, INSS JOURNAL Vol.12, pp.251-270, (2005).
- (6) 西川嘉人, 石田仁志, 黒住保夫, “鋳造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の大型探触子による検出性評価”, INSS JOURNAL Vol.20, pp.182-190, (2013).
- (7) 西川嘉人, “鋳造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の大型探触子による深さサイジング性評価”, INSS JOURNAL Vol. 21, pp.163-169, (2014).
- (8) 西川嘉人, “鋳造ステンレス鋼の超音波探傷技術の開発状況”, INSS JOURNAL Vol.22, pp.208-212, (2015).
- (9) 石田仁志, “ステンレス鋳鋼超音波探傷試験システムの開発と実機適用”, INSS JOURNAL Vol.25, pp.209-213, (2018).
- (10) 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程 (JEAC4207-2008), 日本電気協会, (2008).
- (11) “実用発電原子炉及びその付属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈”, 平成26年8月6日制定, 原規技発第1408063, 原子力規制委員会, (2014).
- (12) 遠藤賢, 吉田由紀子, 北阪純一, 石田仁志, “フェーズドアレイ探触子を用いたニッケル基合金溶接部における検査範囲拡大のための超音波探傷技術”, 日本非破壊検査協会 平成30年度秋季講演大会, 神戸商工会議所, 2018.11.15-16, pp.15-16, (2018).