

エルボ管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（第2報）

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

市来 隆一 (Ryuichi Ichiki) *¹ 堤田 正一 (Shoichi Tsutsumida) *²
西川 嘉人 (Yoshito Nishikawa) *¹

要約 加圧水型原子炉 (PWR) の1次冷却材管等に使用されている casting ステンレス鋼は、その柱状晶組織により超音波の減衰が大きいため配管外面からの超音波探傷試験は困難であるとされていた。INSSは大型2振動子探触子およびこれを用いた実機適用可能な自動超音波探傷システムを開発した。しかし、この探触子では、走査することができないエルボ管テーパ部の配管内面にある軸方向欠陥を探傷できない。本報では、エルボ管テーパ部の配管内面にある軸方向欠陥に対して、探触子の走査可能な位置から超音波を斜めに入射して欠陥からのエコーの識別性を高める条件を超音波探傷シミュレーションにより検討した。その結果、探触子を欠陥方向に向ける Probe-skew 探傷が適しており、超音波を欠陥方向に斜めに入射する角度であるスキュー角は40°～60°で欠陥からの信号強度が高いことが分かった。

キーワード 超音波探傷試験, 铸造ステンレス鋼, 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, スキュー探傷

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 attenuation of ultrasonic waves caused by the material columnar structure. A twin crystal transducer probe and an automatic ultrasonic testing system using the probe were developed in INSS. This probe, however, cannot detect axial flaws on inner surfaces of the tapers of elbow pipes, as it cannot be scanned on outer surfaces of the tapers. In this paper the conditions to discern echoes from the axial flaws on inner surfaces of the tapers of pipe elbows were studied in the case that ultrasonic waves were incident at an angle from the possible-to-scan zone by ultrasonic testing simulation. As a result, it was found that the probe skew method in which the probe faced the flaw was suitable and the skewed angle between 40 and 60 degrees, which is the angle at which ultrasonic waves are obliquely incident in the flaw direction, had high signal intensity from the flaw.

Keywords ultrasonic testing, cast stainless steel, phased array, inaccessible zone, ultrasonic testing simulation, skewed beam method

1. はじめに

加圧水型原子炉 (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、供用期間中検査において体積試験が要求されており⁽¹⁾、手法として超音波探傷試験が用いられる。

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 casting ステンレス鋼は、優れた耐食性、溶接性

を有するが、製造時の冷却過程において非常に大きな柱状晶が成長する。その柱状晶組織により超音波の減衰が大きく、超音波探傷試験は困難であるとされていた。そこで、黒住らは、斜角探傷法による大型2振動子探触子およびこれを用いた1次冷却材管の検査に適用可能な自動探傷システムを開発した^{(2)~(9)}。

図1にテーパのある配管溶接部の体積試験範囲⁽¹⁾

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 非破壊検査(株)

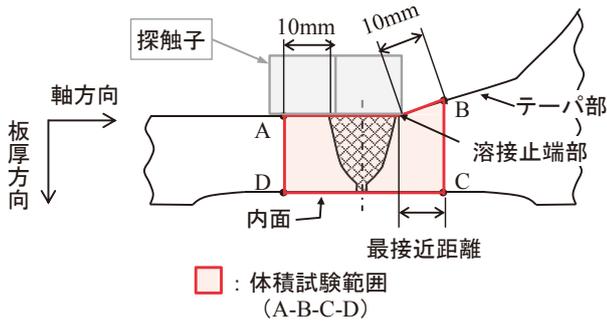


図1 テーパーのある配管溶接部の体積試験範囲

の例を示す。体積試験範囲は図のA-B-C-D (赤線) で囲まれた範囲で、軸方向に溶接止端部からそれぞれ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。

エルボ管テーパー部など探触子を走査できない試験範囲 (走査不可範囲) の配管内面にある周方向欠陥は、エルボ管と溶接で接続する直管側から探傷が可能であり、前述の超音波探傷システムで探傷できることが確認されている⁽⁴⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。一方、走査不可範囲の配管内面にある軸方向欠陥は幾何学的に欠陥面に正対して探触子を配置することができず、従来の斜角探傷法では探傷することができない。このような構造上の幾何学的形状等の理由で検査が困難な箇所⁽¹⁾の検査は免除⁽¹⁾されているが、記録を残し⁽¹⁾⁽¹⁰⁾、代替措置を講じることが要求⁽¹¹⁾されており、事業者は代替措置として評価等により健全性を確認している。しかし、原子力発電所の更なる安全性向上の観点から検査が困難な箇所を低減し、残余のリスクを小さくすることが望ましい。

そこで、著者らは、欠陥面の凹凸により生じる散

乱波と欠陥端部に生じる回折波 (端部エコー) に着目し、軸方向欠陥の欠陥面に対して探触子の走査可能な位置から超音波を斜めに入射して探傷 (以下スキュー探傷という) する技術の開発を行ってきた。これまでに、超音波探傷シミュレーションではその可能性を見出すことができたが、⁽¹²⁾ 鑄造ステンレス鋼試験体を用いた探傷試験では、ノイズに対して欠陥からのエコーの振幅は小さく、識別できなかった⁽¹²⁾。

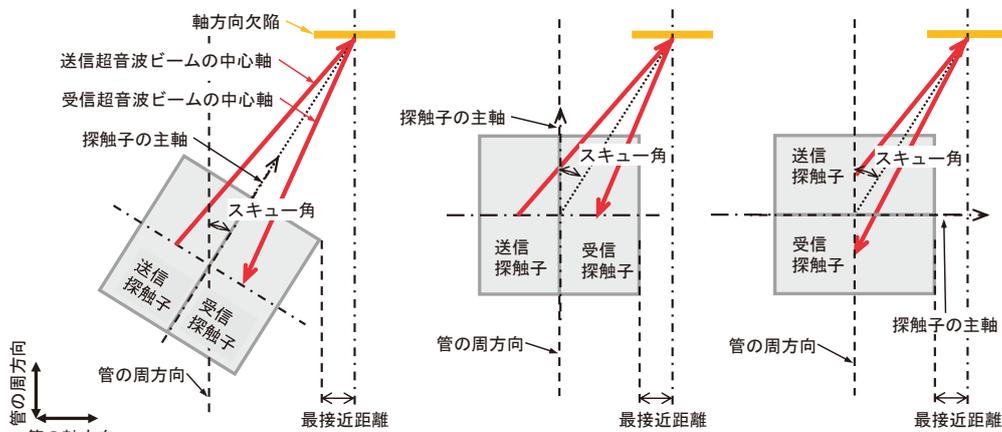
本報では、走査不可範囲の配管内面にある軸方向欠陥からのエコーの識別性を高める、スキュー探傷での最適な探触子の向きと、超音波を欠陥方向に斜めに入射する角度であるスキュー角を、超音波探傷シミュレーションにより検討した。

2. 探傷条件の検討

2.1 定義・原理

2.1.1 スキュー探傷, Probe-skew 探傷 および Beam-skew 探傷

スキュー探傷とは、欠陥に正対して探触子を配置できないとき、探触子の向きに関わらず、欠陥面に対して斜めから超音波を入射して行う探傷方法の総称と定義する。図2にスキュー探傷の概念を示す。スキュー探傷には探触子の向きが異なる二つの方法が考えられ、(1)探触子の長手方向の中心線 (以下探触子の主軸という) を欠陥の中心に向けるように配置する Probe-skew 探傷と、(2)探触子の主軸が



(a) 探触子の向き：周方向 (b) 探触子の向き：軸方向

(1) Probe-skew探傷

(2) Beam-skew探傷

図2 スキュー探傷

管の周方向または軸方向となるよう探触子を配置する Beam-skew 探傷とである。どちらも各々の探触子位置から送受信する超音波の交点が欠陥開口部の中心で結ぶよう超音波を任意の位置に集束させることが可能なフェーズドアレイ技術を採用した。ここで、探傷する接平面（探傷面）上で探触子の中心と欠陥の中心を結ぶ線分と配管の周方向とが成す角をスキュー角と呼ぶ。

2.1.2 フェーズドアレイ技術の原理

フェーズドアレイ技術は、複数の振動子を配列したアレイ探触子の各振動子の励振のタイミングを電子的に制御し、各振動子から発生する超音波を合成して、任意の方向で任意の焦点位置に超音波を集束させることが可能な技術である。図3にフェーズドアレイ技術による超音波伝播方向と焦点位置の考え方を示す。図3(1)に示すように1次元に配列した振動子の一端から順に一定時間間隔で励振することで、各振動子から発生する超音波の合成波は1個の斜角探触子から発生したように超音波を斜めに入射することが可能である。次に図3(2)のように、振動子の両端から順に励振することにより、超音波を集束させることもできる。さらに、図3(3)のように、これらを組み合わせることで超音波を斜めに入射し、2次元の任意の位置に集束させることもできる。これを拡張し、図3(4)のように2次元に配列した振動子をもつマトリクスアレイ探触子の振動子の励振のタイミングを制御することによって、3次元の任意の位置に超音波を集束させることが可能となる。本検討では、超音波を3次元の任意の位置で集束させることができるマトリクスアレイ探触子を用いた。

2.2 これまでの研究課題

探触子の走査不可範囲の配管内面にある軸方向欠陥に対して走査可能な位置から超音波を斜めに入射して探傷（スキュー探傷）する技術を開発するため、欠陥からの信号強度を高める条件を検討してきた。前報⁽¹²⁾では、周方向または軸方向探傷用として開発したマトリクスアレイ探触子を用いて、前述の自動超音波探傷システムへの実装が容易な Beam-skew 探傷（探触子の向き：周方向）におけるスキュー角を 30° と 80° として検討した。その結果、減衰の無い等方均質材としたモデルでの超音波探傷シミュレーションではスキュー探傷による欠陥検出の可能性を見出すことができた。しかし、 casting ステンレス鋼試験体を用いた探傷試験では、放電加工（electric discharge machining, : 以下 EDM とする）スリットを識別できなかった。また、スキュー角が大きい 80° では受信探触子の下を通過する送信波の一部が直接受信探触子で受信されることにより生じたと考えられる大きなノイズ（以下回り込みによるノイズという）が生じた。

以上から、 casting ステンレス鋼を対象とした探傷試験においては、欠陥からの信号強度を高め、回り込みによるノイズを低減することによって、欠陥からのエコーの識別性を高める探傷条件を追究する必要があると考えた。

2.3 検討目的と条件

走査不可範囲の配管内面にある軸方向欠陥に対して、回り込みによるノイズを低減し、欠陥からのエコーの信号強度が高くなるような Probe-skew 探傷と Beam-skew 探傷におけるスキュー角を超音波探傷シミュレーションにより調べた。

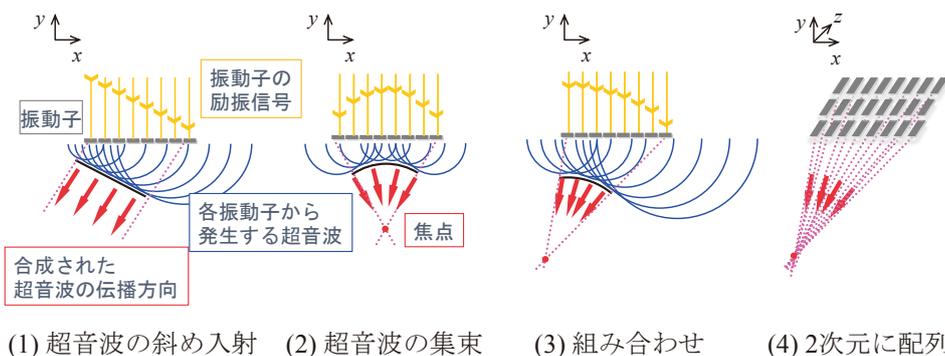


図3 フェーズドアレイ技術による超音波伝播方向と焦点位置の制御

2.3.1 Probe-skew 探傷と Beam-skew 探傷の比較

図2に示す各探傷方法の超音波ビームの中心軸の長さが超音波の伝搬距離（ビーム路程）であり，探触子の大きさ，探触子がテーパ部と干渉せずに欠陥に最接近できる距離（最接近距離）およびスキュー角が同じであれば，Probe-skew探傷に比べBeam-skew探傷のビーム路程は短くなり，信号強度が高くなることを期待される。

また，使用する送受信分割型探触子の各探触子は，探触子の主軸方向すなわち前後方向に長く左右方向に短いため，Beam-skew探傷では，探触子面を左右方向に傾けて超音波を送受信すると超音波の一部が探傷面に到達する前にウェッジ（超音波ビームを所定の角度で屈折させるために振動子と試験体間に設置するくさび）の側面で遮断される。これにより信号強度が低下すると考えられる。さらに本検討で使用したマトリクスアレイ探触子は，前後方向で超音波を集束させるよう設計しており，左右方向への集束には適していない。また，Beam-skew探傷では，受信探触子の下を通過する送信波を減らし回り込みによるノイズを低減するために，小さいスキュー角では主軸を周方向にしたBeam-skew探傷（周方向）にて，大きいスキュー角では主軸を軸方向としたBeam-skew探傷（軸方向）にて検討した。

Probe-skew探傷では，探触子の前後方向に超音波を入射させるため，回り込みによるノイズの影響は小さいと考えられる。

以上から，Probe-skew探傷が有利と考えたが，自動探傷システムへの実装が容易なBeam-skew探傷もシミュレーションで解析し，比較することとした。

2.3.2 スキュー角

表1にスキュー角が欠陥からのエコー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い。一方，スキュー角が小さいほど送受信超音波ビームの中心軸の欠陥面に対する角度が垂直に近づきエコーは戻りやすい。前報⁽¹²⁾ではスキュー角が30°と80°のBeam-skew探傷による探傷試験を行い，EDMスリットを検出できなかったが，これは欠陥面に対して超音波ビームが垂直に近いスキュー角30°では路

表1 スキュー角が欠陥からのエコーに与える影響

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	平行に近い	小
小	長い	小	垂直に近い	大

程が長く材料減衰の影響が大きくなったためで，またスキュー角80°では欠陥面に対して超音波ビームが平行に近くなり受信探触子方向への反射が少なかったためと考えられる。両者の間に最適な条件があると考え，スキュー角40°から65°の範囲を検討することとした。

3. 超音波探傷シミュレーション

3.1 解析方法

スキュー探傷による受信信号波形を得る超音波探傷シミュレーションを実施し，欠陥からのエコーの有無，エコーの最大振幅値およびノイズの大きさを各条件で比較・検討した。超音波探傷シミュレーションには，超音波伝播解析ソフトComWAVE⁽¹³⁾を使用した。ComWAVEは8節点立方体要素による3次元有限要素解析コードである。

3.2 解析条件

3.2.1 エルボ管テーパ部の形状と 想定する欠陥の位置

図4に軸方向欠陥のある配管溶接部の軸方向断面を示す。探触子が走査できない試験範囲が最も広くなる溶接止端部からエルボ管テーパ部となる形状を想定した。最も路程が長くなるよう，走査できる位置から欠陥が最も遠くなるエルボ管側体積試験範囲境界に欠陥開口部中心を想定した。

3.2.2 探傷条件

前述のとおり，スキュー角は40°～65°の範囲とした。図5にウェッジの傾斜角と屋根角を示す。図5(1)にProbe-skew探傷を，(2)に振動子面に傾き

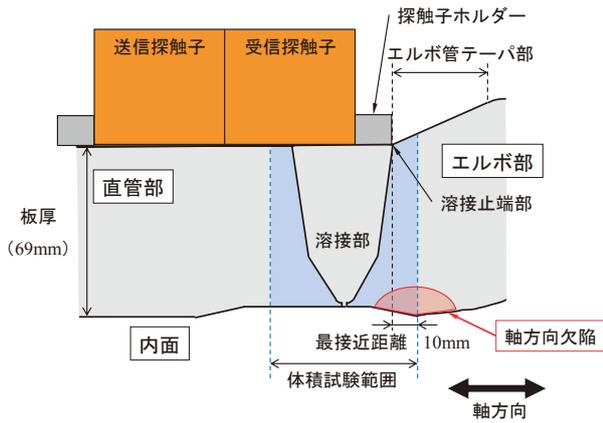


図4 配管溶接部の軸方向断面

を設けたBeam-skew探傷を示し、それぞれの探傷方法の(a)に探触子の前後方向断面への投影図を、(b)に探触子の左右方向断面への投影図を示す。Probe-skew探傷では、図5のように振動子面が超音波ビームに垂直となるようウェッジの傾斜角と屋根角を設定した。Beam-skew探傷では、ウェッジの傾斜角と屋根角をともに0°と設定して解析した後、その結果の中から欠陥からのエコーの振幅値が最大のものについて振動子面に傾きを設けて解析を実施した。また、マトリクスアレイ探触子の焦点位置は欠陥開口部の中心に設定した。

なお、回り込みによるノイズの低減効果を確認するために、スキュー角80°についても解析した。

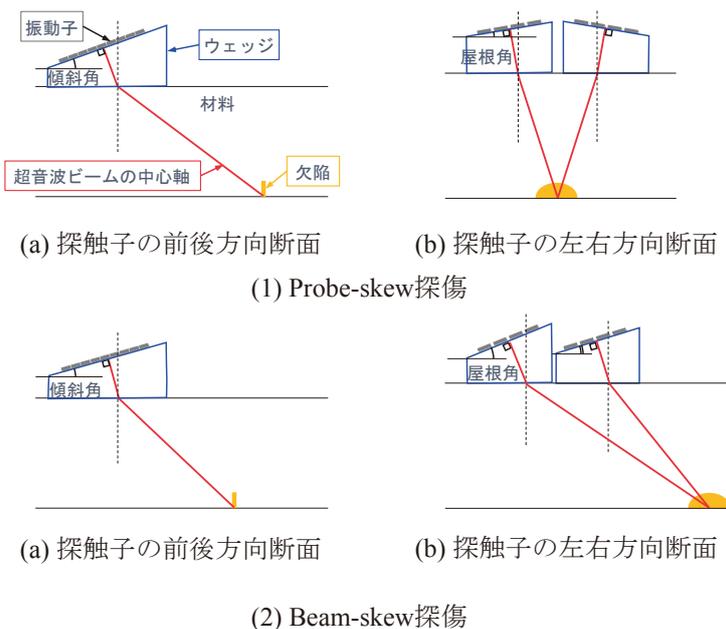


図5 ウェッジの傾斜角と屋根角

3.2.3 解析モデルと解析条件

モデル化した探触子は探傷方向に向かって左側を送信用、右側を受信用とした左右分割のマトリクスアレイ探触子とし、表2にモデル化した探触子とウェッジの仕様を示す。周波数は0.5 MHz、波のモードは縦波とした。ウェッジの傾斜角と屋根角は探傷条件に合わせて設定した。また、ウェッジの底面は配管表面に合わせた曲率を有する。表3にモデル化した配管の仕様を示す。モデルは外径836 mmの配管の一部とした。2種類の欠陥の形状はいずれも半楕円で、長さ50 mm、深さ14 mm (板厚の20%)、間隙0.5 mmとし、铸造ステンレス鋼の疲労き裂を模擬した欠陥面に凹凸があるモデル (以下疲労き裂という) と放电加工スリットを模擬した欠陥面が平坦なモデル (以下平面スリットという) とした。疲労き裂は、開放した铸造ステンレス鋼の疲労き裂面を3次元形状計測器により計測して凹凸を数値化しモデル化したものである。表4にそれぞれの材料物性値として音速等の値を示す。各材料モデルは、スキュー角の最適位置を探るため減衰がない等方均質材とした。

図6に解析モデルの例を示す。図6(1)がProbe-skew探傷 (スキュー角45°) のモデル、(2)がBeam-skew探傷 (周方向・スキュー角45°) のモデルの例である。配管内面の欠陥と振動子の位置関係から、モデルの端面による超音波の伝播への影響が

表2 モデル化した探触子・ウェッジの仕様

項目	仕様
周波数	0.5 MHz
波のモード	縦波
振動子数	64
振動子配列 (前後×左右)	16列×4列
振動子寸法 (前後×左右)	71.5 mm×24.7 mm
探触子の個数	2個
ウェッジの寸法 (前後×左右)	100 mm×100 mm

表3 モデル化した配管の仕様

項目	仕様
形状	配管の一部 外径 836 mm
溶接部	なし
厚さ	69 mm
欠陥	疲労き裂および平面スリットの2種類 半楕円形状 長さ50 mm, 深さ14 mm, 間隙0.5 mm 長手方向: 軸方向, 深さ方向: 半径方向

表4 材料物性値

材料モデル	種別	縦波音速 (m/s)	横波音速 (m/s)	密度 (kg/m ³)	減衰
探触子/ウェッジ	等方均質材	2.35×10^3	1.15×10^3	1.05×10^3	なし
配管	等方均質材	5.77×10^3	3.15×10^3	7.85×10^3	なし

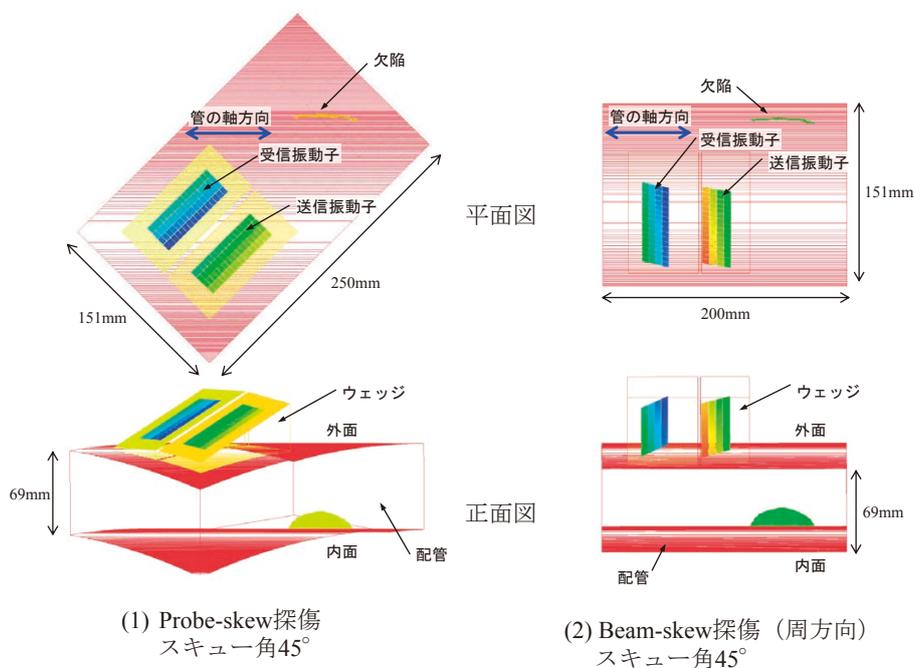


図6 解析モデルの例

表5 解析条件

項目	内容
要素	8 節点立方体
要素寸法	0.2mm
解析時間	送信振動子からは発信した超音波が、欠陥で反射し受信振動子に戻るのに十分な時間

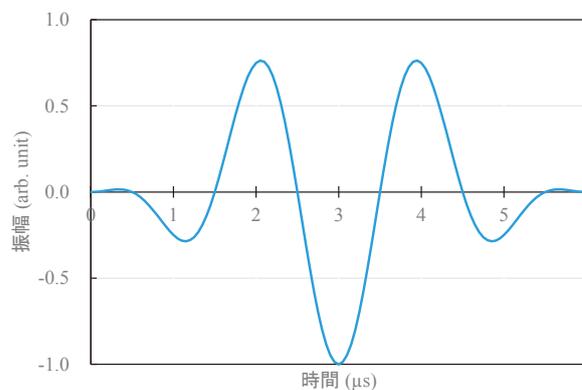


図7 送信波形

ないことを確認した。

表5に解析条件，図7に送信波形を示す。送信波形は送信振動子からの送信波形を模擬したパルス波である。

4. 解析結果

図8にProbe-skew探傷で得られた受信信号波形の例を示す。縦軸は縦波に相当する体積ひずみの振幅，横軸は送信波発信後の経過時間である。図8(1)はスキュー角 50° での，(2)はスキュー角 60° での受信信号波形であり，それぞれ(a)は疲労き裂を，(b)は平面スリットを欠陥とした場合の受信信号波形である。また，図9にBeam-skew探傷で得られた受信信号波形の例を示す。スキュー角に応じて変化する受信信号波形の入射点から欠陥開口部の中心までの伝播距離に相当する時刻（以下欠陥の中心時刻という。図中にも示す）付近に現れた信号を欠陥からのエコーと判断した。解析の結果，全ての探傷条件で欠陥からのエコーを確認し，回り込みによるノイズのような欠陥の識別に影響を与えるノイズは認められなかった。疲労き裂では欠陥の中心時刻前後の図8，9の青い矢印で示す時刻の範囲で広がりを持って信号が現れ，平面スリットでは欠陥の中心時刻では振幅が小さく，その前後の図8の赤い矢印で示す時刻で比較的振幅の大きな信号が現れた。また，その受信信号が現れた時刻もスキュー角が大きくなれば早まり，路程が短くなることに対応している。

また，図10に回り込みによるノイズの低減効果を確認するために解析したスキュー角 80° で疲労き裂の場合の受信信号波形の例を示す。図10(1)はProbe-skew探傷での，(2)は前報⁽¹²⁾で報告したBeam-skew探傷（周方向）での受信信号波形である。Beam-skew探傷（周方向）では，回り込みによるノイズが生じ，図8，9の疲労き裂のような欠陥の中心時刻前後に広がりを持った信号は識別できなかった。しかし，Probe-skew探傷では大きなノイズはなく，図8，9の疲労き裂のように欠陥の中心時刻前後に広がりを持った信号を識別できた。このように，Probe-skew探傷ではBeam-skew探傷（周方向）でみられた回り込みノイズのような欠陥の識別に影響を与える大きなノイズは認められなかった。

図11に欠陥からのエコーの最大振幅値のスキュー角による変化を示す。図11の縦軸は欠陥か

らのエコーの最大振幅値，横軸はスキュー角である。Probe-skew探傷による疲労き裂からのエコーの最大振幅値は，スキュー角 $40^\circ\sim 65^\circ$ でほぼ一定であり，その値はBeam-skew探傷より大きい。一方，Probe-skew探傷による平面スリットからのエコーの最大振幅値は，スキュー角 $40^\circ\sim 60^\circ$ でほぼ一定であり，その値は他の角度の値より大きい。また，Beam-skew探傷（周方向または軸方向）による疲労き裂からのエコーの最大振幅値は，スキュー角 $30^\circ\sim 60^\circ$ でほぼ一定であった。更に，Probe-skew探傷による疲労き裂からのエコーの最大振幅値は，Beam-skew探傷による疲労き裂の1.5倍以上，Probe-skew探傷による平面スリットの2倍以上と大きな値となった。

Beam-skew探傷（周方向）によるスキュー角 45° での疲労き裂からのエコーの最大振幅値のうち※印のついたものが超音波ビームに垂直となるよう振動子面に傾きを設けた場合の値である。Beam-skew探傷での振動子面の傾きの有無による疲労き裂からのエコーの最大振幅値の差は，Probe-skew探傷とBeam-skew探傷の疲労き裂からのエコーの最大振幅値の差と比べ小さかった。

5. 考察

Probe-skew探傷による疲労き裂からのエコーの最大振幅値は，平面スリットに比べて2倍以上であった。また，疲労き裂では欠陥の中心時刻前後に広がりを持って信号が現れ，平面スリットでは欠陥の中心時刻の信号の振幅は小さくその前後に振幅の大きな信号が現れた。これは，図8～10中に示すように，疲労き裂の欠陥面の凹凸による散乱波をとらえたが，欠陥面が平坦な平面スリットでは散乱波は少ないためと考えられる。また，疲労き裂及び平面スリットで欠陥の中心時刻前後の比較的振幅の大きな信号は，欠陥の楕円弧上の端部からの回折波（端部エコー）を受信したものと推定される。

Probe-skew探傷によるスキュー角 $40^\circ\sim 60^\circ$ で疲労き裂および平面スリットからのエコーの最大振幅値はともに大きくほぼ一定であり，疲労き裂からのエコーの最大振幅値はProbe-skew探傷がBeam-skew探傷よりも1.5倍以上大きかった。また，Probe-skew探傷では，欠陥の識別に影響を与えるような大きなノイズは認められなかった。さらに，Beam-skew探傷では，超音波ビームに垂直となる

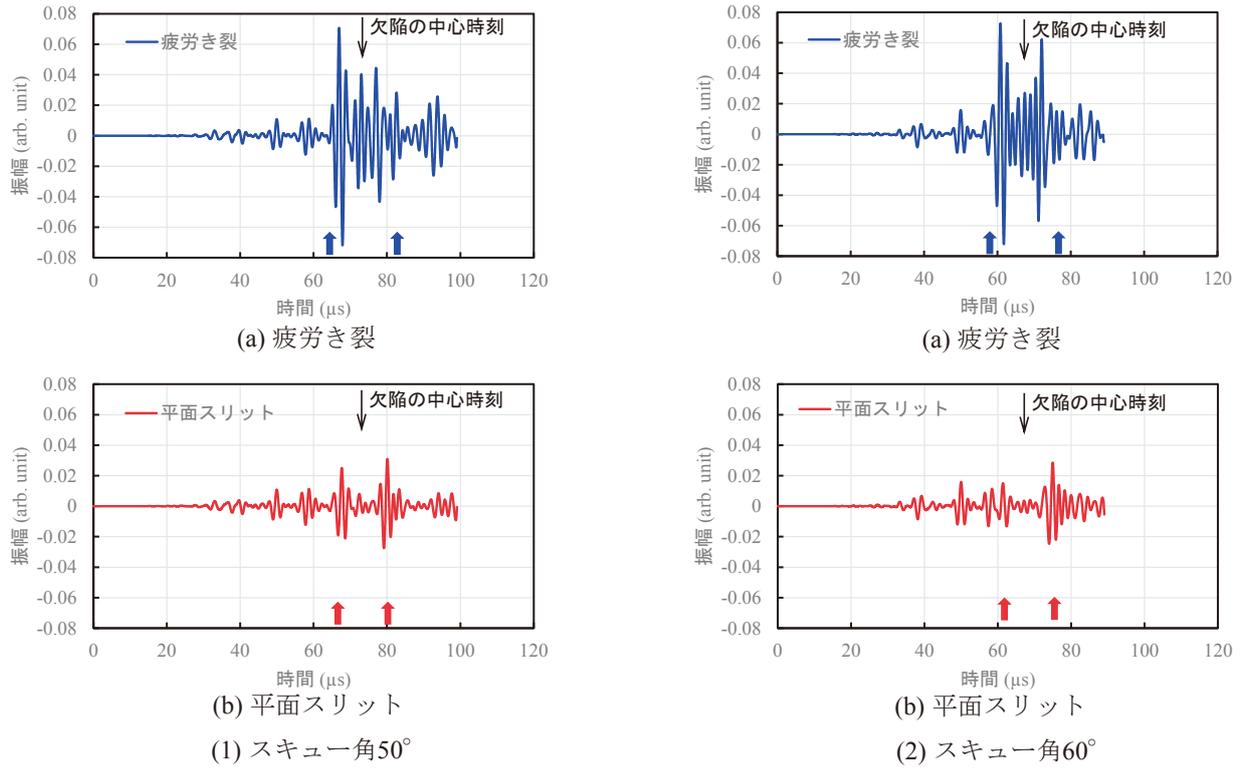


図8 受信信号波形の例 (Probe-skew 探傷)

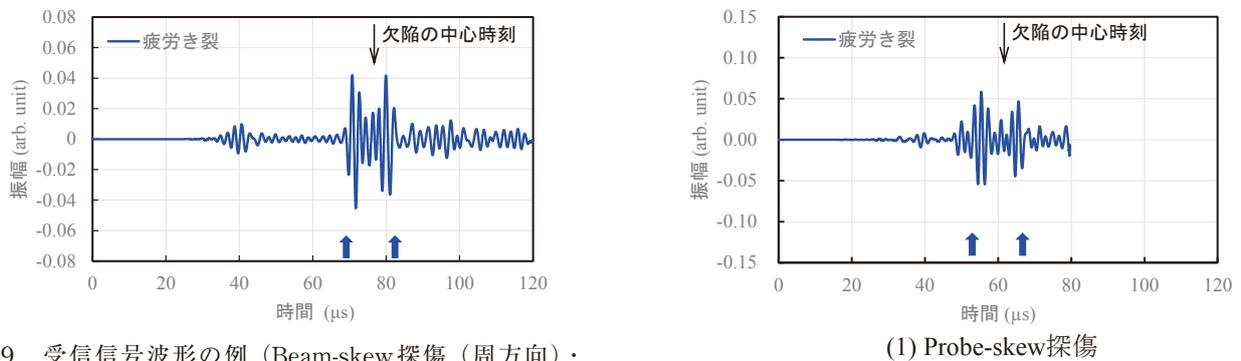


図9 受信信号波形の例 (Beam-skew探傷 (周方向)・スキュー角 45° ・疲労き裂)

よう振動子面に傾きを設けても欠陥からのエコーの最大振幅値は大きくならなかった。振動子面の傾きの効果を得るためには、ウェッジの側面で超音波が遮断されない大きなウェッジとする必要があり、自動超音波探傷システムへ容易に実装できるというBeam-skew探傷のメリットがなくなる。以上のことから、走査不可範囲の配管内面にある軸方向欠陥からのエコーの識別性を高めるためには、Probe-skew探傷の方が適しており、スキュー角については $40^\circ\sim 60^\circ$ が良好であることが分かった。

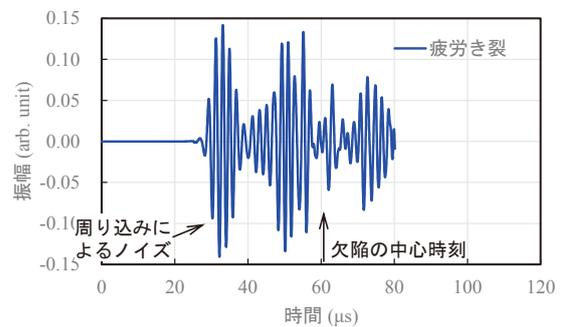


図10 受信信号波形の例 (スキュー角 80° ・疲労き裂)

(凡例)

探傷方法 探触子の向き	Probe-skew	Beam-skew 探傷	
	探傷	周方向	軸方向
疲労き裂	○	△	□
平面スリット	○	△	—

※：振動子面に傾きを設けたBeam-skew探傷

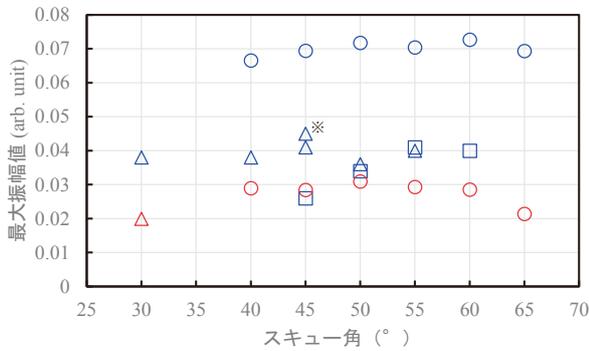


図11 欠陥からのエコーの最大振幅値のスキュー角による変化

6. 結論

本報では、走査不可範囲の配管内面にある軸方向欠陥からの信号強度を高めてノイズを低減し、エコーの識別性を高める、スキュー探傷での最適な探触子の向きと、超音波を欠陥方向に斜めに入射する角度であるスキュー角を、超音波探傷シミュレーションにより検討した。その結果以下のことが分かった。

- (1) 探触子を周方向または軸方向に向けたままで超音波を欠陥方向に入射するBeam-skew探傷に比べ、探触子を欠陥方向に向けるProbe-skew探傷が適しており、その信号強度はBeam-skew探傷の1.5倍以上高い。
- (2) スキュー角は、40°～60°が欠陥からの信号強度が高く良好であった。
- (3) 鋳造ステンレス鋼の疲労き裂を模擬した欠陥面に凹凸があるモデルからの信号強度は、平面スリットより2倍以上高い。

今後は、シミュレーションで確認した有効な条件について、探傷試験で検証するとともに、欠陥からのエコーの識別性をより高める方策を検討する予定である。

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附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”, 令和2年1月15日改正, 原規技発第2001159号, 原子力規制委員会, (2020)
- (12) 市来隆一, 遠藤賢, 堤田正一他, “エルボテーパー部の軸方向欠陥に対する超音波探傷条件の検討” INSS JOURNAL Vol.26, pp.164-172, (2019).
- (13) 伊藤忠テクノソリューションズ, 超音波伝播解析ソフトウェアComWAVE, <http://www.engineering-eye.com/ComWAVE/index.html>