

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3報）－フェーズドアレイ探触子の最適化検討－

Study on Ultrasonic Testing Conditions for an Axial Flaw in a Taper of Pipe Elbow on Weld Piping (III) – The phased array probe specifications –

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)*¹

市来 隆一 (Ryuichi Ichiki)*²

堤田 正一 (Shoichi Tsutsumida)*³

要約 加圧水型原子炉 (PWR) の1次冷却材管等を使用されている casting ステンレス鋼は、その柱状晶組織による超音波の散乱減衰、偏向が大きいため、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る。INSSは大型2振動子探触子および自動超音波探傷システムを開発し、実機適用に至っている。しかし、この探触子では、配置が制限されるエルボ管テーパ部の内面にある軸方向欠陥を探傷することが難しい。そこで、この軸方向欠陥に対して、探触子の配置可能な位置から超音波を斜めに入射するスキュー探傷に対応するフェーズドアレイ探触子の振動子の寸法と配列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、前後方向32列×左右方向8列の探触子による疲労き裂反射波の強度は、既存探触子（前後16列×左右4列）の約3倍となり、探触子の超音波波長に相当する深さ14mmの疲労き裂検出の可能性を見出した。

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, スキュー探傷

Abstract Casting stainless steel used for the primary coolant pipe of a pressurized water reactor (PWR) has large ultrasonic scattering attenuation and deflection due to material columnar structure, so it is difficult to perform an ultrasonic testing from the outer surface of the pipe. INSS has developed a large twin crystal probe and an automatic ultrasonic testing system, which has been applied to actual plants. However, it is difficult this probe to detect axial defects on the inner surface of the tapers of the elbow pipes that the placement of the probes is restricted. Therefore, the dimensions and arrangement of the elements of the phased array probe corresponding to the skew scanning for this axial defect with angle incident from the accessible position are determined by the ultrasonic testing simulation. As a result, it was found that the probes with 32 rows in the front-rear direction and 8 rows in the left-right direction can detect fatigue cracks with reflected waves that are about three times higher than the existing probes (16 rows x 4 rows). We evaluated the possibility of detecting a fatigue crack of 14 mm that corresponds to a wave length of ultrasonic waves used for the probe.

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

1. はじめに

加圧水型軽水炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) の1次冷却材管の溶接部は、供用期間中検査において体積試験として超音波探傷試験が要求される⁽¹⁾。この1次冷却材管には、casting ステンレス鋼が使用されている。casting ステンレス鋼は、鍛造ステンレス鋼と比較して非常に大きな結晶組織を持

ち、これによる超音波の散乱減衰、異方性と結晶粒界を超音波が通過する際の偏向によって、超音波探傷試験において、信号強度低下による欠陥識別性の低下や欠陥位置の誤認等を発生させる。結晶異方性と結晶粒における超音波の散乱と減衰への対処として、INSSは縦波、低周波数、送受信振動子の分割、集束型振動子を採用した大型2振動子探触子を開発した。この探触子と自動探傷装置からなる、casting ス

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 関西電力(株)

*3 非破壊検査(株)

ステンレス鋼の1次冷却材管の超音波探傷試験システムを開発し⁽²⁾⁻⁽⁸⁾、実機の検査に適用させるに至っている⁽⁹⁾。

配管系統を構成するために、直管とエルボ管が溶接され、その中にはエルボ管のテーパが溶接部に隣接しているものがある。図1にテーパのある配管溶接部の断面の例を示す。体積試験範囲は、断面において軸方向に溶接止端から両側にそれぞれ10mm、板厚方向に配管外面から内面までのA-B-C-D（赤線）で囲まれ、周方向に全周の範囲である。エルボ管のテーパ部などがあると、探触子を走査できない範囲（以下、走査不可範囲）が生じる。このような走査不可範囲があっても、欠陥面が周方向にある欠陥（以下、周方向欠陥）は、直管部に配置した探触子により斜角探傷が可能である。開発した超音波探傷システムは、このような周方向欠陥の検出が可能である⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

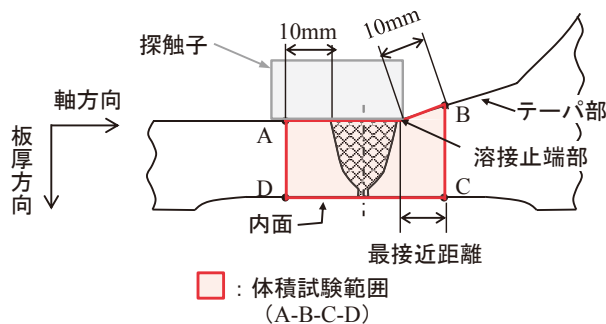


図1 配管溶接部の断面の例

一方、欠陥面が軸方向にある欠陥（以下、軸方向欠陥）は、周方向において斜角探傷を行う必要があるが、探触子を欠陥面に正対して配置することができれば、探傷が可能であり、開発した超音波探傷システムにより軸方向欠陥の検出も可能である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、軸方向欠陥が走査不可範囲にあるような場合、欠陥面に正対して探触子を配置することができず、開発した超音波探傷システムのような従来の斜角探傷法では探傷することができない。このような構造上接近または検査が困難な箇所の検査は免除⁽¹⁾されているが、記録を残し⁽¹⁰⁾、類似箇所の試験結果による評価等の代替措置を講じることが要求⁽¹¹⁾されている。原子力発電所のさら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⁽¹²⁾⁽¹³⁾。これまでに、超音波伝搬シミュレーションにより、スキュー探傷の方法として、探触子の向きはそのまま超音波のみ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て入射させるProbe-skew探傷が適していること、その際の探触子の最適な位置を明らかにした。しかし、既存のフェーズドアレイ探触子を用いた実験による検証では、欠陥の識別には至っていない。検出性を向上させるための方策の一つとして、探触子仕様の最適化がある。具体的には、欠陥に正対した位置から探傷する場合よりも、欠陥に対して超音波を斜めに入射させて探傷する場合に長くなる路程に必要な振動子の大きさを明らかにすることである。

そこで本研究では、斜め入射の路程に対して必要なフェーズドアレイ探触子の振動子の寸法と配列について、超音波シミュレーションにより検討した。

2. 検討対象

図2に、フェーズドアレイ探触子の仕様を検討したテーパのある配管溶接部を示す。軸方向欠陥の中心があると想定した体積試験範囲の境界を、超音波探傷のねらいとする位置とした。探触子は、想定する欠陥に最も近づき探触子ホルダがテーパに接触する位置で、探触子の向きを欠陥に向けるProbe-skew探傷とした。Probe-skew探傷のこれま

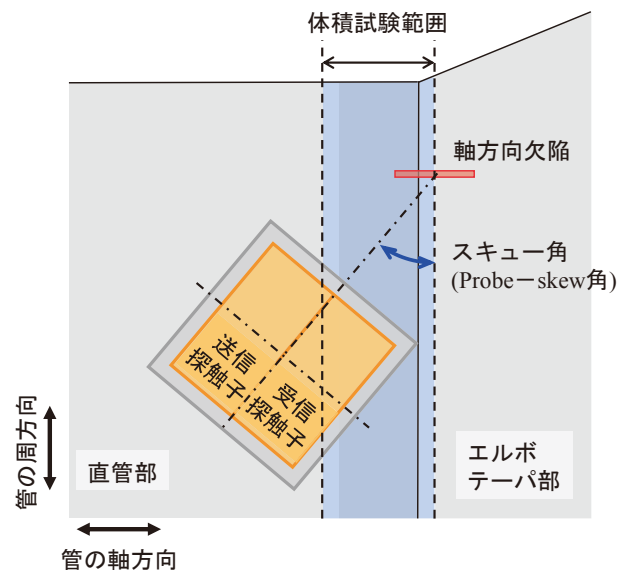


図2 検討対象とした探触子と欠陥の配置

で明らかにした最適な探触子位置範囲に相当する Probe-skew 角 40°, 50°, 60° の位置に探触子を配置し, 想定欠陥までのそれぞれの路程から, 探触子仕様である振動子の寸法と配列を検討した. 図中の探触子の中心と欠陥の中心を結ぶ線分を配管表面に投影した線と配管の周方向とが成す角を Probe-skew 角と定義した.

3. 必要な探触子寸法の検討

3.1 近距離音場限界距離

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, 任意の方向と距離に焦点を設定し, 超音波を集束させることが可能な技術である. フェーズドアレイ探触子の振動子で構成される全体寸法と使用する周波数から算出される近距離音場限界距離内に, 焦点を設定することが望ましい⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾.

前述の 1 次冷却材管の超音波探傷試験システムの大型 2 振動子探触子の配列した振動子の長さ 71.5mm, 幅 24.7mm を基準に, これまではフェーズドアレイ探触子の寸法を設定し, スキュー探傷の最適化の検討を行ってきた. この基準とした寸法のフェーズドアレイ探触子を, テーパのある溶接部に対する異なる Probe-skew 角条件で使用する場合は, 実際の材料中で有効な近距離音場限界距離 N_e (以下, 有効近距離音場限界距離という) を次式⁽¹⁶⁾により求めた.

$$N_e = \frac{k(L_c \cos \beta / \cos \alpha)^2 f}{4v_t} - \frac{L_w v_w}{v_t} \quad (1)$$

ここで,

k : 近距離音場限界距離補正係数

(矩形探触子の縦横比による補正)

L_c : 配列した振動子の前後方向の長さ (mm)
= 71.5

L_w : ウェッジ内の路程 (mm)

f : 周波数 (MHz) = 0.5

v_t : 試験体の音速 (m/s) = 5770

v_w : ウェッジの音速 (m/s) = 2350

α : 入射角

β : 屈折角

である.

(1) 式の第 1 項は斜角探傷および振動子が矩形の場合の近距離音場限界距離であり, 有効近距離音場限界距離は, 第 2 項により斜角探傷の際に用いるウェッジ中の路程を差し引く.

表 1 に, 超音波探傷システムとして開発した大型 2 振動子探触子 (以下, 既存探触子という) の Probe-skew 探傷の Probe-skew 角 40°, 50°, 60°, 周方向探傷, 軸方向探傷, 垂直探傷の屈折角, 有効近距離音場限界距離, 各条件での路程 W を示す.

probe-skew 角 40°, 50°, 60° での有効近距離音場限界距離は, それぞれ 26mm, 30mm, 35mm と路程の 1/3 以下であった. 欠陥位置で超音波が十分に集束していない可能性がある. しかし, 軸方向探傷の場合の有効近距離音場限界距離 45mm は路程の半分程度であるが, 開発した超音波探傷システムにより周方向欠陥の検出が可能である⁽²⁾⁻⁽⁵⁾. このことから, 有効近距離音場限界距離が欠陥までの距離より短くても, 欠陥を検出できる可能性があることが分かった.

3.2 必要な探触子寸法

欠陥位置に超音波を集束させるために, その路程が有効近距離音場限界距離以下となるような探触子の配列する振動子の前後方向の長さは, (1) 式から求められる.

振動子の寸法は, 既存探触子より大きくなり, テーパに接触しないように配置するため, 探触子と欠陥の幾何学的な位置関係が変化する. その結果, 路程はさらに長くなり, 必要な振動子の大きさも大きく

表 1 既存探触子の有効近距離音場限界距離

項目	スキュー探傷 (probe-skew 角)			周方向探傷	軸方向探傷	垂直探傷
	40°	50°	60°			
β [°]	57.5	55.5	52.7	36.4	47.6	0
N_e [mm]	26	30	35	66	45	110
W [mm]	166	141	124	91	102	69

なる。最も路程が短いprobe-skew角60°で、ウェッジを含むこの送受信探触子の寸法を長さ253mm×幅206mmまで大きくしても、有効近距離音場限界距離は欠陥までの路程に至らなかった。この寸法は、既存探触子(100mm×100mm)の2倍以上大きく、これを使用する自動超音波探傷装置の大きさは、実機への搬入・据付、配管での駆動という点で、実用に支障をきたす可能性が考えられる。

4. 振動子寸法と配列の検討

4.1 振動子の寸法

検討の前提とした装置に係る条件は、①振動子数はフェーズドアレイ装置の最大の接続、駆動数である256個、②周波数は既存探触子と同じ0.5MHzとした。

フェーズドアレイ技術は、探触子に配列させた振動子からの超音波の位相を制御することによって、超音波ビームを構成する。図3に示すように、ねらいとする超音波ビームとは異なる方向に、グレーティングローブと呼ばれる疑似的な超音波ビームが構成されることがある。これは、振動子から発せられる超音波の複数の波面のうち、隣り合う振動子からの異なる波面によって主ビームとは別の波面が構成されることによる。

次式に示す条件で、グレーティングローブの波面が構成される

$$\sin \beta_g = \left(\frac{m\lambda}{p}\right), \quad m = \pm 1, \pm 2, \quad (4)$$

ここで、 β_g はグレーティングローブの主ビームからの角度、 m は振動子間の波面の位相のずれ、 λ は波長、 p は振動子の配列ピッチを示す。

図3に示すように、 $\beta_g < 90^\circ$ で、グレーティング

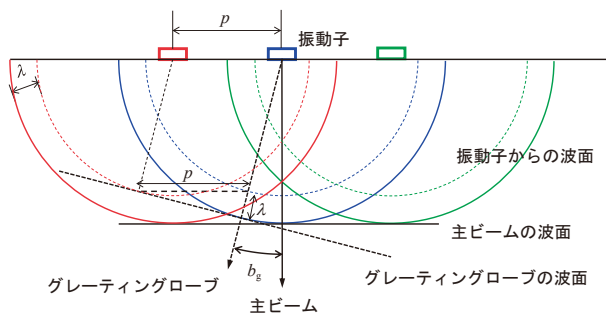


図3 グレーティングローブの発生

ローブは現れる。位相が一つずれた $m=1$ の場合、 $p \geq \lambda$ の時、 β_g は90°以下となり、グレーティングローブが発生する。 $p < \lambda$ では、式(4)を満足するような β_g はなく、グレーティングローブは発生しないが、超音波ビームの走査角度によって発生することがあることから、一般的に $p < 0.67\lambda = 7.7\text{mm}$ が推奨されている⁽¹⁷⁾。

既存探触子の振動子ピッチは走査角度が大きい長手(前後)方向で $p = 4.5\text{mm} \leq \lambda/2 = 5.7\text{mm}$ を、走査角度が小さい短手(左右)方向で $p = 6.3\text{mm} \leq 0.67\lambda = 7.7\text{mm}$ を満足していることから、振動子ピッチおよびギャップは、既存探触子と同じとした。

4.2 振動子の配列

既存探触子の振動子と同じピッチ(前後方向4.5mm, 左右方向6.3mm)およびギャップ(0.5mm)で、個数は既存探触子の64個以上、フェーズドアレイ装置の最大チャンネル数256個以下とし、異なる振動子配列を検討した。

表2に、検討した振動子配列を示す。前後方向と左右方向の振動子数すなわち開口幅/長さ比の異なる組み合わせ8種類を検討した。既存探触子No.0の振動子の開口幅/長さ比0.35と同じで、振動子数が異なる探触子No.1~4を選定した。さらに、振動子配列の前後方向と左右方向における振動子数の影響を調べるために、開口幅/長さ比の異なる場合として探触子No.5~7を選定した。

探触子に使用する探触子ウェッジは、既存探触子の開口寸法(71.5mm×24.7mm)とウェッジ外形

表2 振動子配列の検討

振動子数 (振動子開口寸法[mm])	左右方向(開口幅)				
	4 (24.7)	5 (31.0)	6 (37.3)	7 (43.6)	8 (49.9)
前後方向 (開口長さ)	16 (71.5)	No.0 0.35	/	/	/
	20 (89.5)	/	No.4 0.35	/	No.7 0.56
	24 (107.5)	No.6 0.23	/	No.3 0.35	/
	28 (125.5)	/	/	No.2 0.35	/
	32 (143.5)	No.5 0.17	/	/	No.1 0.35

上段: 振動子配列番号, 下段: 開口幅/長さ比

寸法 (100mm×100mm) の関係と同じとした。最も大きい振動子配列番号No.1のウェッジ外形寸法、長さ172mm×幅151mmは、既存探触子の1.5倍程度である。この探触子の大きさであれば、必要な自動探傷装置は実機で使用可能な大きさになると考えられる。

5. 超音波探傷シミュレーションによる検討

5.1 探傷条件

外径836mm、厚さ69mmの直管の外表面に、前章で選定した8種類の探触子を、既存探触子と同じ幅の探触子ホルダを保持し、テーパ部に最も近接できる位置に配置した。探触子は、探傷方向に向かって左側を送信用、右側を受信用とする左右分割型である。周波数は0.5MHz、波のモードは縦波とした。ウェッジのウェッジ角および屋根角は、探傷条件毎に探触子と欠陥の位置から幾何学的に算出した。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。

検出対象に疲労き裂を想定し、使用する周波数の波長に相当し板厚の20%となる深さ14mmのき裂とした。疲労き裂は超音波の路程が最も長くなるように、探触子位置から最も遠い体積試験範囲のエルボ側境界が中心となる位置に、割れ面を軸方向として配置した。

Probe-skew角は、既存探触子で最適と評価された範囲⁽¹³⁾の中間の50°とし、配管内面の欠陥開口部中心に焦点を設定した。

5.2 モデル化と解析方法

超音波伝搬解析を行い、スキュー探傷による欠陥までの超音波の伝搬状況と欠陥反射波の最大振幅値を調べた。解析には、超音波伝搬解析ソフトComWAVE⁽¹⁸⁾を使用した。

ComWAVEに認定する材料物性値として、振動子およびウェッジの縦波音速、横波音速および密度を、 2.35×10^3 m/s、 1.15×10^3 m/s、 1.05×10^3 kg/m³に、同じく配管について、 5.77×10^3 m/s、 3.15×10^3 m/s、 7.85×10^3 kg/m³とした。振動子配列の有効性を調べることを目的としたため、材料は減衰のない等方均質材とした。

疲労き裂は、切断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た凹凸を数値化してモデル化した。図4に疲労き裂のモデルを示す。形状は半楕円形で、長さ50mm、深さ14mm、間隙0.5mmとした。

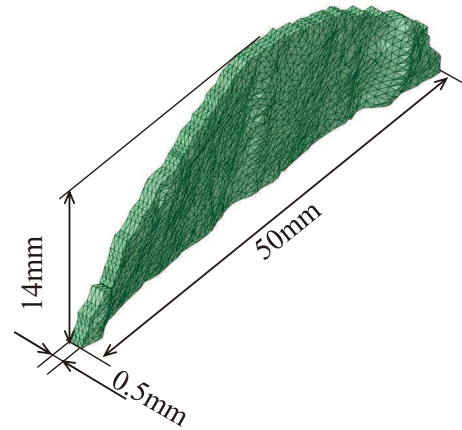


図4 疲労き裂のモデル

解析領域を1辺0.2mmの8節点立方体要素で分割した。図5に、解析モデルの例を示す。配置した探触子と欠陥の間を伝搬する超音波に影響のないことを確認して、解析領域を設定した。要素数は、最も解析領域の小さいNo.0で5.4億個、最も大きいNo.1で14.2億個であった。

初期条件として、図6に示す送信波形に相当する変位を送信振動子位置に、欠陥開口部中心位置に焦点化するように、振動子ごとの遅延時間に応じて入力した。超音波が送信振動子から欠陥で反射して受信振動子まで伝搬するのに十分な時間の解析を行った。

5.3 解析結果と考察

5.3.1 超音波の伝搬状況

図7に伝搬する超音波の分布を示す。送信探触子の中心と欠陥開口部中心と欠陥頂部の3点を結ぶ平面内の縦波を表す体積ひずみの最大振幅の分布を色で示しており、送信振動子からの超音波ビームの形状に相当する。既存探触子を含め、欠陥開口部中心まで超音波ビームが形成されている。

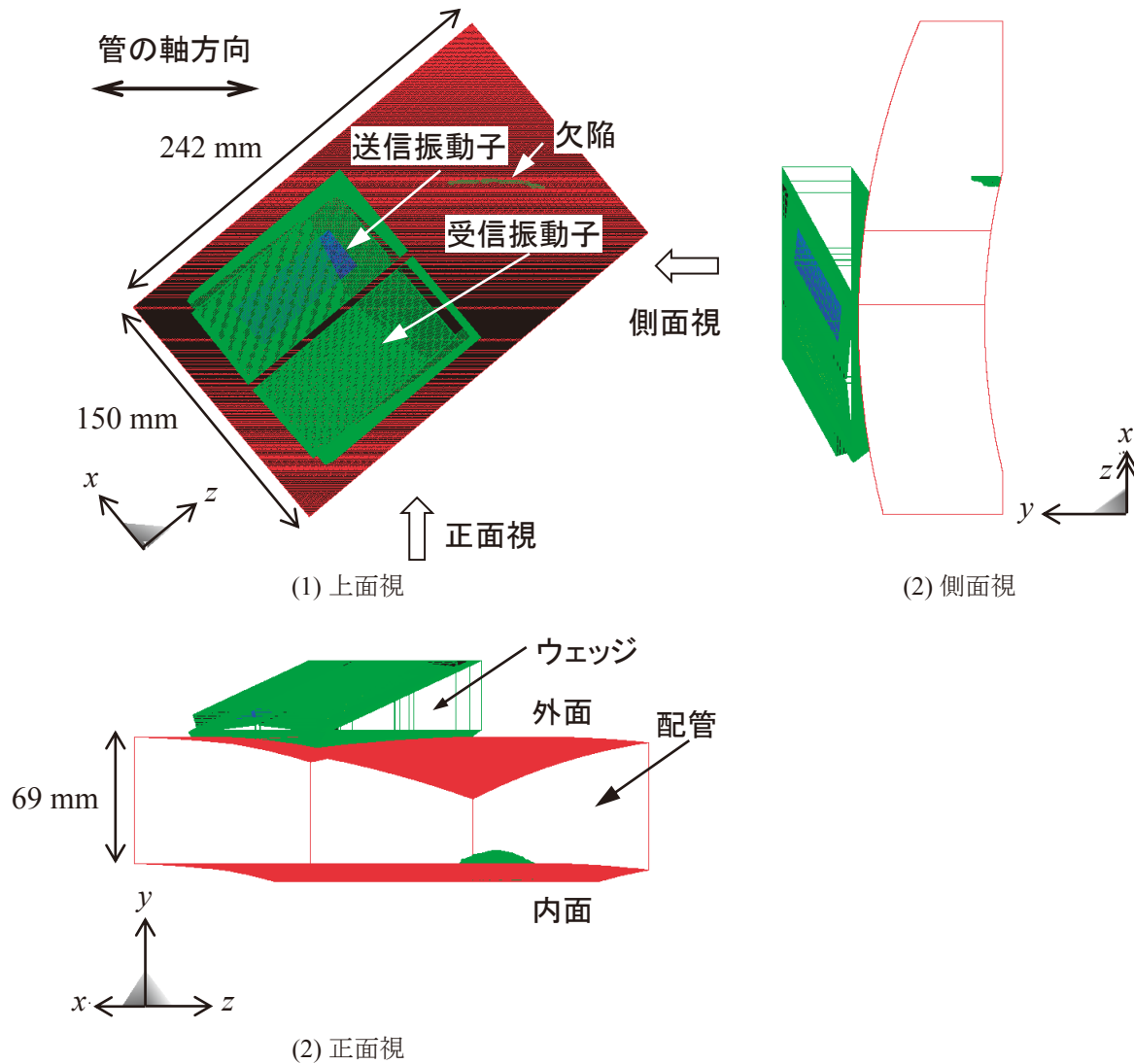


図5 解析モデル例 (No.0 (振動子配列16×4))

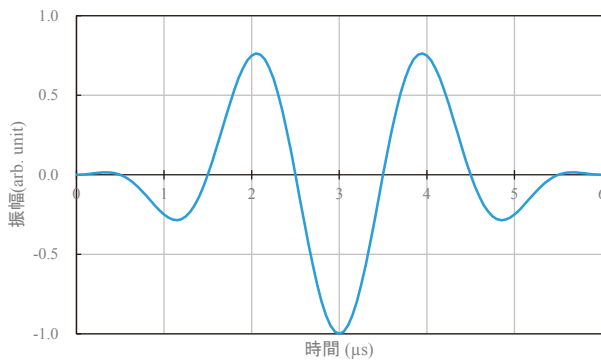


図6 送信波形

5.3.2 受信信号

図8に、探触子No.1 (振動子配列：前後方向32×左右方向8、以下32×8と記す。) および探触子No.0 (16×4) の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。受信信号波形において、入射点から欠陥開口部の中心までの伝搬距離に相当する時刻 (以下、欠陥中心の路程相当時刻という。) 付近の信号を欠陥反射波と判断した。全ての探触子の解析結果において、この欠陥反射波と判断される信号が得られた。

表3に、8種類の探触子の受信信号の最大振幅値、路程および有効近距離音場限界距離を示す。路程に対する有効近距離音場限界距離は1以下であり、必要な路程以下であるが、欠陥開口部中心まで超音波が伝搬していることは、図7に示した通りである。

図9には、総振動子数と最大振幅値の関係を示す。既存探触子No.0と同じ幅/長さ比で、No.4, 3, 2, 1の順に総振動子数が増加すると最大振幅値は増加する。最も振動子数の大きい探触子No.1での

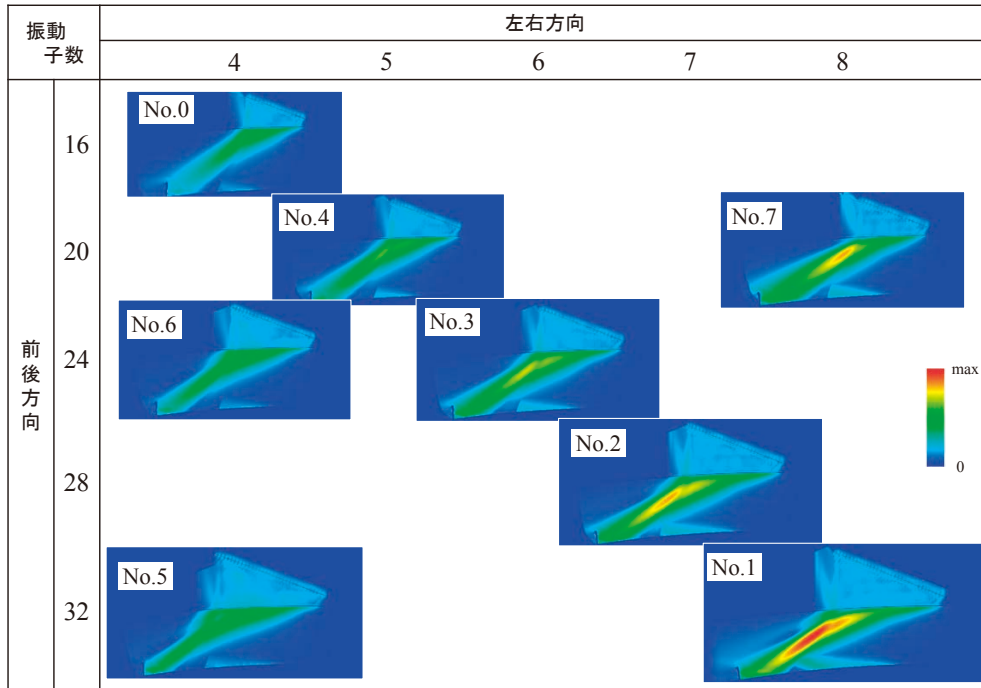


図7 超音波ビーム形状

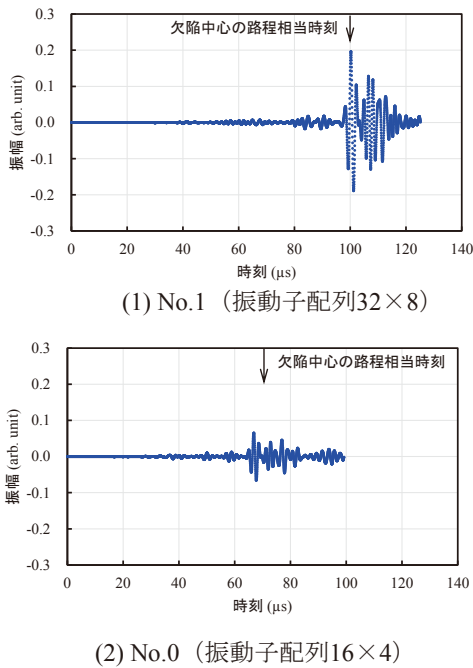


図8 受信信号波形

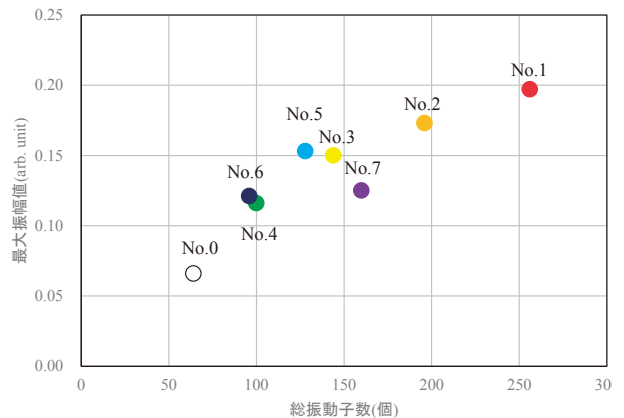


図9 受信信号振幅

最大振幅値0.197が最も大きく、既存探触子No.0より振動子数の多いいずれの探触子も、既存探触子No.0よりも大きな最大振幅値を得た。これらの値は、実際の試験体に導入した深さ14mmの放電加工(electric discharge machining: 以下 EDMとする)スリットを既存探触子No.0で検出できた探傷結果

表3 欠陥エコーの最大振幅値

探触子番号	No. 0	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
最大振幅値 [arb. unit]	0.066	0.197	0.173	0.150	0.116	0.153	0.121	0.125
路程 [mm]	141.0	196.4	179.5	167.8	155.9	166.4	155.2	176.2
有効近距離音場限界距離 [mm]	30.3	101.7	82.0	62.2	46.4	119.2	69.4	42.4
有効近距離音場限界距離/路程	0.215	0.518	0.457	0.370	0.298	0.717	0.447	0.241

を、解析した場合の最大振幅値0.108より大きい。このことから、既存探触子No.0より振動子数の多い探触子は、実際の鋳造ステンレス鋼試験体の深さ14mmの疲労き裂を、欠陥コーナーエコーによって検出できる可能性が推定される。

探触子No.4 (20×5) から左右方向に振動子数を増加させたNo.7 (20×8) の最大振幅値は、総振動子数がNo.7より小さいNo.3 (24×6), No.5 (32×4) よりも小さい。また、探触子No.0 (16×4) から前後方向のみに振動子数を増加させたNo.6 (24×4), No.5 (32×4) において、既存探触子No.0と同じ幅/長さ比で振動子数を増加させた場合と同等以上に増加している。このことは、探触子の開口寸法において前後方向の効果の方が大きいことを示している。自動探傷装置の制限がある場合などに、探触子開口の前後・左右方向の寸法を検討する際に、有効な知見となる。

6. おわりに

スキュー探傷の長い路程に適した振動子の寸法と配列の影響を、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有効近距離音場限界距離が路程以上となる探触子の大きさは、既存探触子の2倍以上大きく、これを保持する自動超音波探傷システムは、実用に支障をきたす可能性のある大きさにする必要があることがわかった。
- ②Probe-skew角50°条件の超音波探傷シミュレーションにより、フェーズドアレイ超音波探傷装置で駆動可能な最大の振動子数である前後方向32列×左右方向8列の探触子を用いた場合、疲労き裂反射波の強度は既存探触子(16×4)の約3倍であることがわかった。
- ③鋳造ステンレス鋼試験体の深さ14mmのEDMスリットを用いた測定試験とその超音波探傷シミュレーションの結果から、既存探触子より振動子数を大きくすると、深さ14mmの疲労き裂を検出できることが推定された。

今後は、他のProbe-skew角条件の検討により、実用上も最適な探触子の大きさを選定し、疲労き裂を段階的に進展させることによって、深さ14mmまでおよびそれ以上の深さの疲労き裂に対する検証を行う予定である。

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, p.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, p.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, p.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, p.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, p.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, p.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, p.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, p.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, 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, p.164-172,

- (2019).
- (13) 市来隆一, 堤田正一他, “エルポテーパ部の軸方向欠陥に対する超音波探傷条件の検討 (第2報),” INSS JOURNAL, Vol.27, p.197-205, (2020).
 - (14) 超音波による欠陥寸法測定編集委員会, 超音波による欠陥寸法測定, 共立出版, p.167, (2009).
 - (15) 日本非破壊検査協会, 超音波探傷試験Ⅲ, p.71, (2017).
 - (16) OLYMPUS NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications Olympus NDT Guideline, p.50, (2006).
 - (17) OLYMPUS NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications Olympus NDT Guideline, p.112, (2006).
 - (18) 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>