

大型探触子超音波探傷法によるコンクリートで覆われた原子炉格納容器鋼板の腐食測定技術の開発 (第2報)

Development of Ultrasonic Testing Technique with a Large Transducer to Inspect the Containment Vessel Plates Embedded in Concrete for corrosion on Nuclear Power Plant (II)

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)*

要約 加圧水型原子力発電所の原子炉格納容器のコンクリート中に埋設された鋼板は、直接接近して検査を行なうことが不可能なため、今後腐食等の懸念が生じた場合に、その有無や程度を遠隔測定することが可能な技術を開発しておくことが望ましい。

本研究は、原子炉格納容器の接近可能な位置から、広範囲のコンクリート埋設部鋼板を検査することが可能な超音波探傷手法を開発することを目的としている。3個の低周波数(0.3, 0.5MHz)振動子を3個使用した幅120mm相当の大型の振動子を持つ屈折角90度のSH波超音波探触子を新たに試作し、外表面をコンクリートで覆った炭素鋼板試験体を用いて、表面の腐食減肉を模擬した人工のくぼみ、表面に溶接されたコンクリート型枠固定用スタッドボルトを検出する実験を行った。実験の結果、(1)距離約1.5mの位置の深さ19mmおよび9.5mmの人工くぼみ、距離約0.7~1.7mの位置の直径8mmのスタッドボルトからの反射波を明瞭に識別できた。(2)試験体端面間を3回往復する伝播距離約12mに相当する多重反射波を識別できた。(3)大型(3連)振動子を持つ探触子の超音波ビームの指向角および-6dB指向角は、それぞれ約7度、約3度であった。(4)深さ9.5mmの人工くぼみを試験体端面反射による距離3.6mの位置から検出することができた。(5)直径8mmのスタッドボルトの検出限界距離は、約2.9~3.6mと推定された。したがって、大型振動子SH波探触子により、格納容器埋設部最下部までの距離の約半分の位置まで超音波が伝播することを確認でき、距離約3.6mまでの範囲の腐食減肉を検出することができる可能性を見出した。

キーワード 超音波探傷, 原子炉格納容器, 炭素鋼, 腐食, SH波, コンクリート埋設, 大型振動子

Abstract The containment vessel plates embedded in concrete on Pressurized Water Reactors are inaccessible to inspect directly. Therefore, it is advisable to prepare inspection technology to detect existence and a location of corrosion on the embedded plates indirectly.

The purpose of this study is establishment of ultrasonic testing technique to be able to inspect the containment vessel plates embedded in concrete widely from the accessible point. Experiments to detect artificial hollows simulating corrosion and stud bolts which hold the mold of concrete on a surface of a carbon steel plate mock-up covered with concrete were carried out with newly made low frequency (0.3MHz and 0.5MHz) 90 degrees refraction angle shear horizontal (SH) wave transducers combined with three active elements, which were equivalent to a 120mm width element.

As the results: (1) The echoes from the artificial hollows with a depth of 19mm and 9.5mm at a distance of 1.5m and the stud bolts with a diameter of 8mm at a distance of 0.7~1.7m could be discriminated clearly. (2) The multiple echoes bouncing three times between the front side and the back side of the plate, which was equivalent to a distance of about 12m, could be discriminated. (3) A divergence angle and a -6dB divergence angle of the large element (combined three elements) transducer were about 7 degrees and about 3 degrees. (4) The echoes from the hollows with a depth of 9.5mm could be detected at a distance of 3.6m with a reflection at the side wall of the mock-up. (5) It was estimated that the maximum distance of detection of the echo from the stud bolt with a diameter of 8mm was about 2.9~3.6m.

Therefore we evaluate that the large element transducer can propagate the SH wave to about a half of a distance to the bottom of the embedded containment vessel and it is possible to detect the defects such as corrosion to a distance of 3.6m.

Keywords ultrasonic testing, reactor containment vessel, carbon steel, corrosion, shear horizontal waves, embedded in concrete, large active element

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

加圧水型原子力発電所 (pressurized water reactor, PWR) の原子炉格納容器 (以下格納容器) は, その内部に原子炉本体, 冷却系などを格納し, 事故の場合放射性物質が外部へ放出することを防止する機能を有する重要な設備である. そのため格納容器は, 定期検査毎に漏洩率試験によって, 耐圧バウンダリとしての機能を確認することになっている. PWRの原子炉格納容器鋼板は, 現在までのところその機能に影響するような腐食が発生する可能性は, ほとんどないと考えられている⁽¹⁾. しかし, 格納容器の下部はコンクリート構造物中に埋設されており, 接近して目視することは不可能である. 従って, 今後万一このような部位で腐食, 減肉等の懸念が生じた場合にも, 的確にその位置および程度を評価できる検査技術を用意しておくことが望ましい.

コンクリートに埋設した鋼板部の検査には, 接近が可能な位置から約20m余りも離れた位置にある部材の検査が可能な技術が求められる. このような遠い距離までの部材の検査に適用可能な技術として, 長距離配管や大きな容器の減肉測定等を対象としたガイド波の適用に関する研究開発が近年活発になされている. ガイド波は超音波伝播モードのひとつであり, その発生方法として, 電磁超音波 (electromagnetic acoustic transducers, EMAT) 法⁽²⁾⁽³⁾, 磁わい効果を利用する magnetostrictive sensor (MSs) 法⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 通常の超音波探触子に用いる圧電素子を用いる方法がある. このうち, コンクリートの埋設した鋼板部の検査技術として, 実機での適用に至るものとして, 完成されたものは未だ存在しない.

したがって, 著者らは, 現状の超音波探傷試験において広く利用されている, 圧電素子を用いた探触子による手法に着目し, 前報⁽⁶⁾および既報⁽⁷⁾において, 表面の腐食減肉の検知に有効で, かつ鋼板からコンクリートへの超音波の透過が少ないと考えられる屈折角90度の振動方向が試験体の表面と平行な横波 (share horizontal 波, SH波) を用いた, 新たに試作した低周波数の大型 (3連振動子) 探触子によって, コンクリートによって覆われた鋼板試験体表面上の距離約1.5mの位置の腐食を模擬した人工減肉 (くぼみ) を検出し, コンクリート埋設鋼板の腐食減肉等に対する検出の可能性を見出した.

本報では, 鋼板表面上に溶接されたコンクリート型枠固定用スタッドボルトからの反射波を検出する

実験を行い, くぼみおよび試験体端面からの反射波と併せ, 定量的データの採取, 蓄積を図った. また, 試験体端面での反射を利用したさらに長距離でのくぼみからの反射波の検出と端面間を複数回往復する多重反射波の検出を試み, さらに, 距離の異なる複数のボルトからの反射波の減衰割合から, その検出限界を推定した.

2. 試験体

実験には, 前報および既報において用いた試験体と同じものを使用した. 用いた試験体を図1に示す. 試験体本体は格納容器鋼板を模擬し, 厚さ38mm, 長さ2000mm, 幅1000mmの炭素鋼板である. 鋼板には, いずれも腐食減肉を模擬した, 直径200mm, 最大深

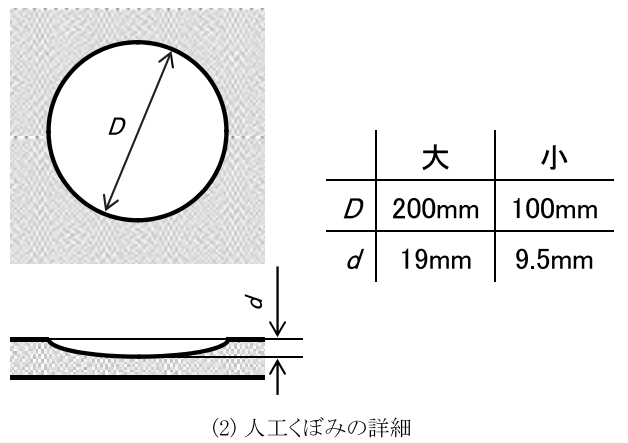
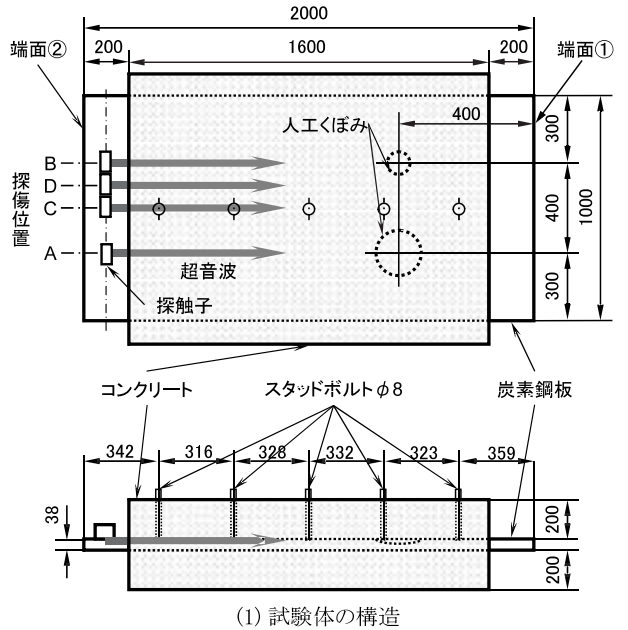


図1 コンクリートに覆われた人工くぼみのある試験体

さ19mm（1/2板厚相当）と直径100mm，最大深さ9.5mm（1/4板厚相当）の凹面状の人工のくぼみを設けた。くぼみの位置は，図1に示すように，試験体長手方向の一方の端面からの距離約400mmの片側表面上である。コンクリート埋設を模擬するために，その両面をそれぞれ200mm厚のコンクリートで覆った。人工のくぼみには，実際の腐食減肉の際に生じると考えられるコンクリートとの間隙を与え，またその表面は，平滑でないでこぼことしたものである。さらに，コンクリートで覆った試験体には，鋼板表面上にコンクリート打設時の型枠の固定用に直径8mmのスタッドボルトが溶接されている。

試験体鋼板の長手方向の両端のコンクリートに覆われていない位置に探触子を設置し，超音波を入射させることが可能である。

3. 探傷装置

探触子として，前報および既報において新たに試作した寸法40mm(D)×40mm(W)のSH波振動子を3個並列に使用した大型探触子および1個の寸法が同じ40mm(D)×40mm(W)のSH波振動子を1個有する探触子を使用した。表1に大型（3連振動子）探触子の仕様，図2に外観写真を示す。製作可能な幅40mmの振動子3個を入射方向に対して横一列に配置し，全体で40mm(D)×120mm(W)相当の振動子とし，これを1つの筐体に納めている。

本報では，探傷器として，菱電湘南エレクトロニクス社製デジタル超音波探傷器UI-25を使用した。探傷画面は，ビットマップファイルとして保存することが可能であり，各条件での探傷結果として，その探傷画面を記録した。

表1 3連SH波探触子仕様

超音波モード	SH波
周波数	0.3 MHz, 0.5 MHz
屈折角	90°
振動子	セラミック
	40mm × 40mm
	3個、並列

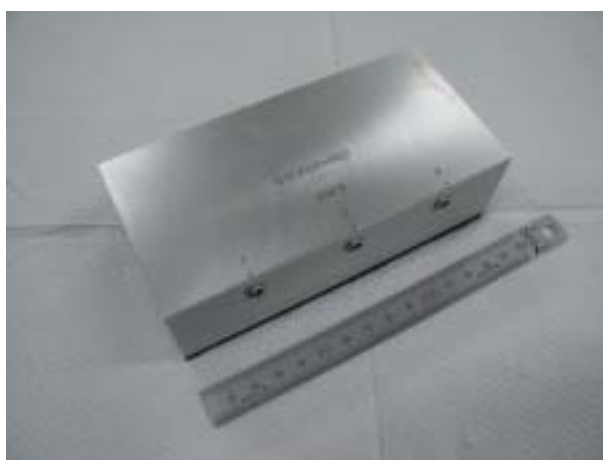


図2 振動子3個を組合わせたSH波探触子（屈折角90度）の写真

4. 検出結果

図1に示すように，試験体の端面②側のコンクリートに覆われていない鋼板部に探触子を設置し，約1.9m離れた端面①からの反射波および約1.5m離れたくぼみからの反射波，約0.3～1.7m離れたスタッドボルト溶接部からの反射波を検出する実験を行った。

周波数0.5MHzおよび0.3MHzの屈折角90度の大型（3連振動子）SH波探触子による，大小のくぼみ，スタッドボルトの位置およびくぼみのない位置，すなわち図1に示した探傷位置A，B，C，Dでの探傷結果を，それぞれ図3と図4に示す。探傷結果であるデジタル探傷器の探傷画面において，横軸は時間すなわち距離を表し，超音波の試験体への入射点から反射源までの距離に相当する。縦軸は受信された超音波の音圧を表している。また，それぞれの位置での探傷結果において，上段は端面①からの反射波について，下段はくぼみ等からの反射波について，それぞれのエコー高さを，探傷画面上において縦軸

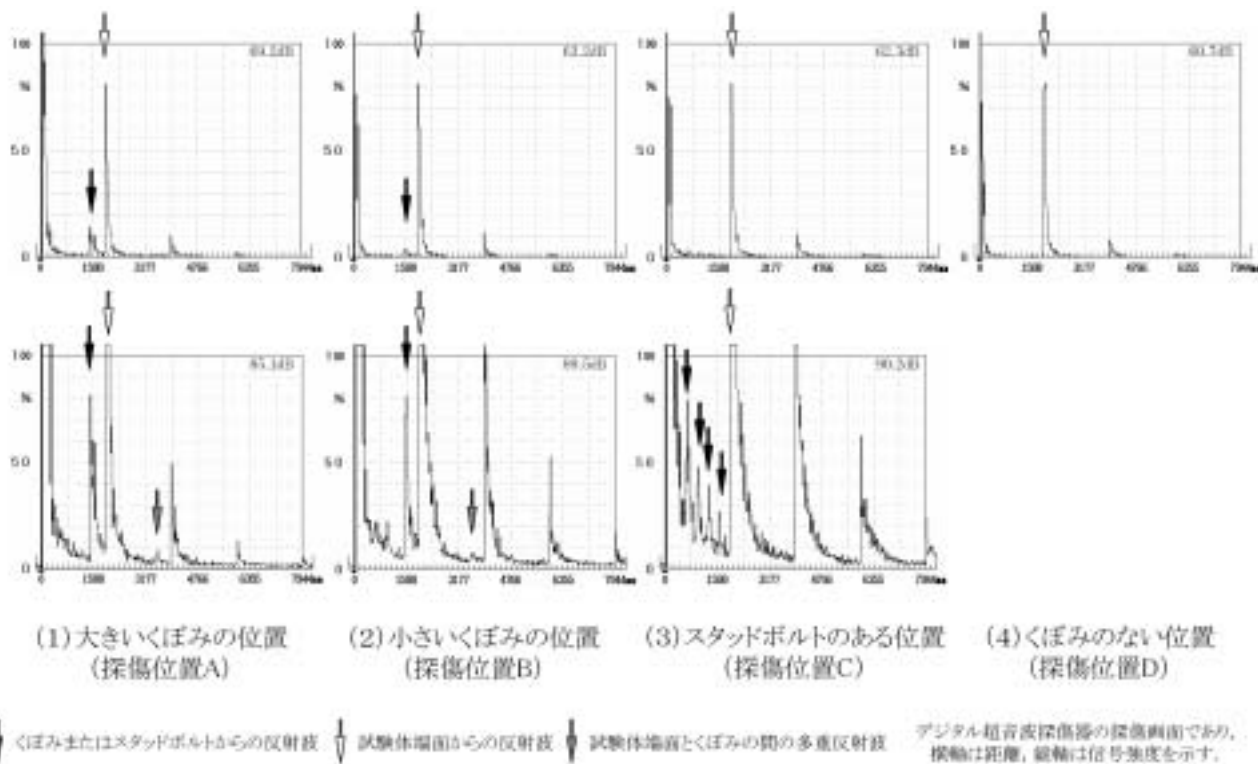


図3 大型振動子によるコンクリートに覆われた試験体での探傷結果 (0.5MHz, 屈折角90度 SH波探触子)

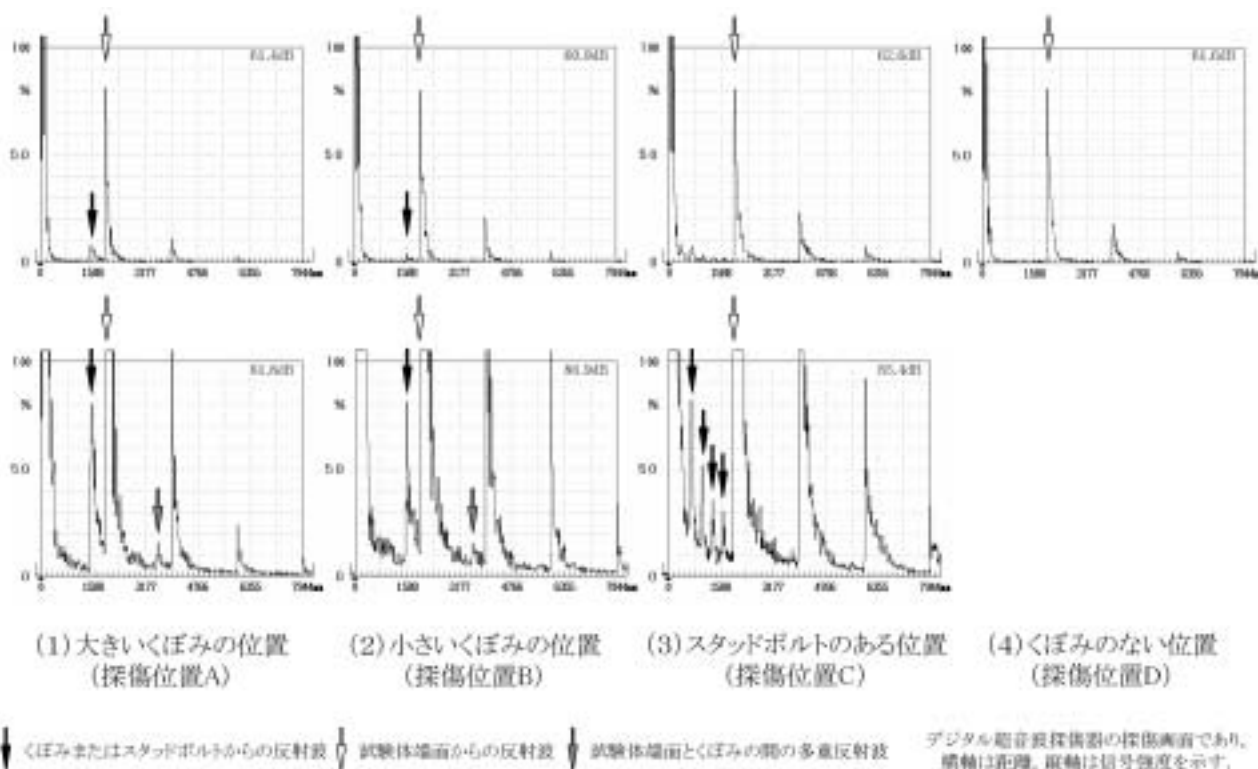


図4 大型振動子によるコンクリートに覆われた試験体での探傷結果 (0.3MHz, 屈折角90度 SH波探触子)

の80%になるよう探傷器のゲインを調整した結果を示している。

各図中の距離2m近傍の白い矢印は、試験体の端面①からの反射波を、黒い矢印は、くぼみ等の反射源からの反射波を示している。

図3と図4の(1)、(2)に示すように、いずれの周波数の探触子によっても、大小のくぼみからの反射波は、良好なS/N比で明瞭に識別可能である。

図3と図4の(3)に示すように、くぼみがなく、スタッドボルトがある位置での探傷結果では、5個のスタッドボルト溶接部のうち、探触子に最も近い距離約0.3mのものを除いて、距離0.7~1.7mの4個のスタッドボルト溶接部からの反射波が観察された。探触子に最も近い位置のスタッドボルト溶接部からの反射波は、送信パルスにより識別が困難であった。

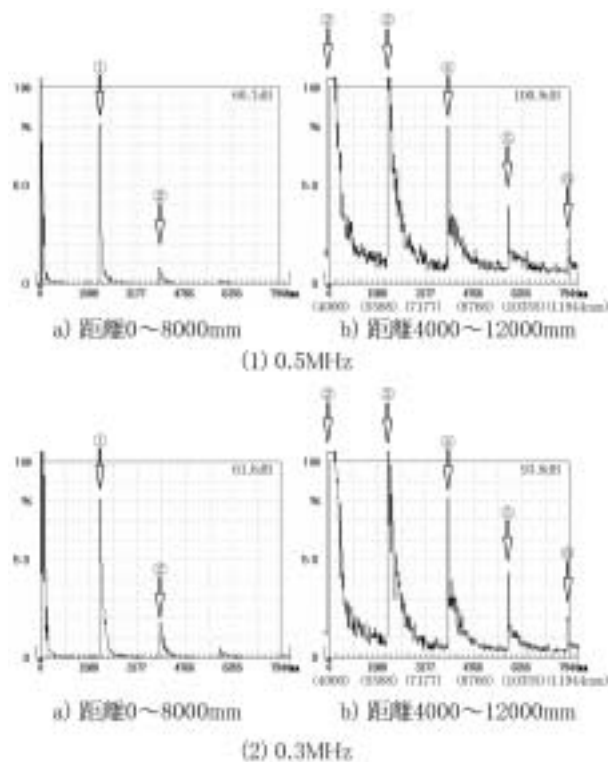
また、図3と図4の中に、灰色の矢印で示した位置に、何らかの反射源からのものと考えられるエコーが検出された。この位置は、試験体端面までの距離とくぼみまでの距離の和に相当し、7.において後述するような端面とくぼみの間の多重反射波と推定される。

5. 長距離範囲の探傷結果

図3と図4において、白い矢印で指示する試験体端面からの反射波よりさらに伝播距離の大きい位置に、端面①と端面②の間の多重反射波が観察された。そこで、探傷器の時間軸上の入射点位置を移動させることによって、さらに伝播距離の大きい範囲においても多重反射をとらえることを試みた。図5に、約12mまでの距離範囲の探傷結果を示す。同図中のa)は距離0~8m、b)は距離4~12mの伝播距離の範囲の結果を示している。図5の中で白い矢印①~⑥で示すように、試験体の長さに対応する約2m間隔の位置に、両方の端面間での多重反射波が観察された。試験体の長手方向の2回半の往復に相当する距離約10mの多重反射波⑤まで、S/N比が2以上で明瞭に識別することができ、距離12mの反射波⑥の存在も認めることができた。

6. 探触子のビーム特性

SH波、屈折角90度の1振動子および大型（3連）振動子の探触子の超音波ビーム特性を調べた。試験方法の概念を、図6に示す。ビーム特性を試験する



デジタル超音波探傷器の探傷画面であり、横軸は距離、縦軸は信号強度を示す。

図5 大型振動子によるコンクリートに覆われた試験体での遠距離探傷結果
(屈折角90度SH波探触子)

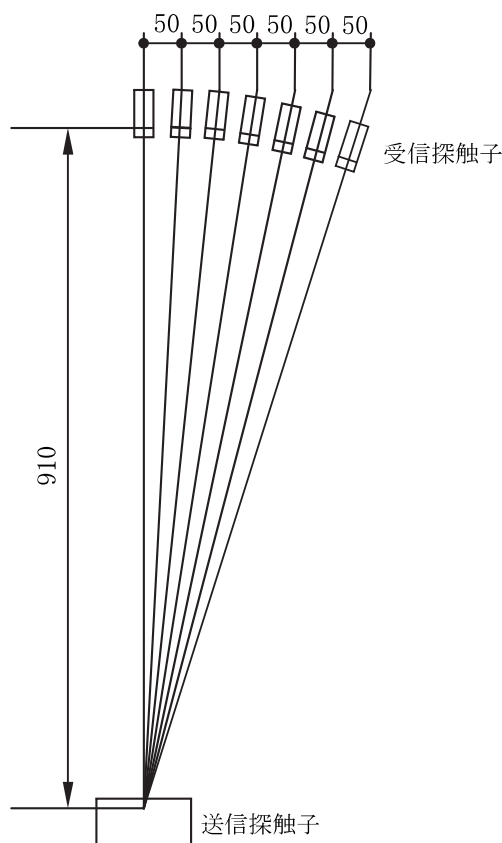


図6 探触子の指向角測定方法

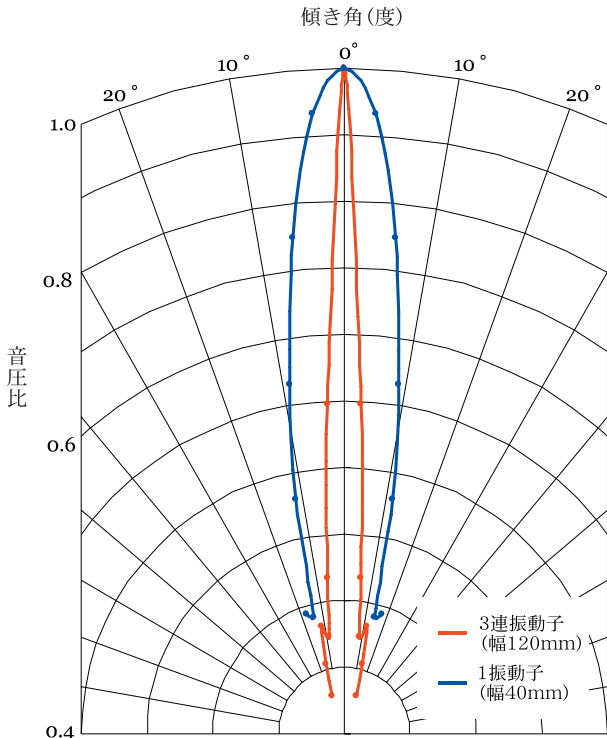


図7 探触子の指向角 (SH波, 屈折角90度, 0.3MHz)

送信探触子のビーム中心軸から50,100,・・・mm離れた位置と送信探触子入射点を結ぶ線上の距離910mmの位置に、受信用探触子として1振動子の屈折角90度SH波探触子を設置し、それぞれの位置で、受信信号強度を測定記録した。

0.3MHz, SH波, 屈折角90度の幅40mmの1振動子探触子と幅120mm相当の3連振動子探触子の超音波ビーム特性を、図7に示す。入射点からの距離910mmを半径とする円周上において、ビーム中心軸上のエコー高さを1として、ビーム中心軸から順に離れた位置でのエコー高さの相対値を表示して、超音波ビーム特性とした。

超音波ビームの指向角は、近距離音場限界距離より遠い範囲、すなわち遠距離音場における、超音波エネルギーの大部分が含まれる範囲を示す。近距離音場限界距離 x_0 は、次式によって表される⁸⁾。

$$x_0 = \frac{D_E^2 f}{4C} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

ここで、 D_E は、円形振動子の直径、 f は探触子の周波数、 C は音速を表す。直径120mmの円形振動子を垂直に試験体に接触させた条件での式(1)による近距離音場限界距離は、約335mmであり、実験に使用した矩形振動子をもつ斜角探触子の入射点からの距

離910mmは十分遠距離音場に相当し、図7に示す結果は超音波ビームの指向角を表すものであると言える。

図7から、ビーム中心軸からの傾き角の増加とともに低下するエコー高さが最小値となる角度を、ビーム指向角として求めた。また、エコー高さがビーム中心軸上のエコー高さの1/2となる角度を示す-6dB指向角を、音圧比が0.5となる角度を測定点から補完して算出した。その結果、振動子幅120mmの3連振動子探触子の超音波ビームの指向角は約7度で、1振動子探触子の約1/2、-6dB指向角は約3度で、1振動子探触子の約1/3であった。

矩形振動子の斜角探触子の指向角 ϕ_0 は、次式によって表される⁹⁾。

$$\phi_0 = 57 \frac{C}{D_{E2} f} \quad (\text{度}) \quad (2)$$

ここで、 C は音速、 D_{E2} は、振動子の幅、 f は探触子の周波数表す。

また、-6dB指向角 $\phi_{0.5}$ は、次式によって表される。

$$\phi_{0.5} = 25.5 \frac{C}{D_{E2} f} \quad (\text{度}) \quad (3)$$

SH波屈折角90度探触子の、指向角、-6dB指向角について、式(1)と(2)による計算値と実験による測定値を、表2にまとめて示す。3連振動子探触子の指向角および-6dB指向角は、1振動子探触子のもものより狭いことが、測定値および計算値において一

表2 SH波屈折角90度探触子の超音波ビーム指向角

探触子		指向角 ϕ_0	-6dB指向角 $\phi_{0.5}$
3連振動子 (幅120mm)	測定値	約7度	約3度
	計算値	5.1度	2.3度
1振動子 (幅40mm)	測定値	約15度	約10度
	計算値	15.3度	6.8度
3連振動子と 1振動子の比	測定値	約1/2	約1/3
	計算値	1/3	1/3

致している。特に、3連振動子探触子と1振動子探触子の-6dB指向角の比は、約1/3で測定値と計算値でよく一致している。また、ビーム中心軸上の3連振動子探触子と1振動子探触子のエコー高さの絶対値の比は、6.5dB (211%)であった。

以上のことは、幅120mm相当の3連振動子を探触子に使用したことが、1振動子より狭い指向角の範囲

にその超音波のエネルギーを集中させ、試験体のくぼみなどの検出に有効であったことを裏付けるものである。

7. 検出限界の推定

7.1 くぼみの検出限界

くぼみ等からの多重反射波を基にした距離によるエコー高さの低下度合いから、検出限界の検討を試みた。図3と図4において灰色の矢印で示したような大小のくぼみと試験体端面の間の多重反射波は、図8に示すような以下の2つの経路によるエコーが重畳しているものと考えられる。

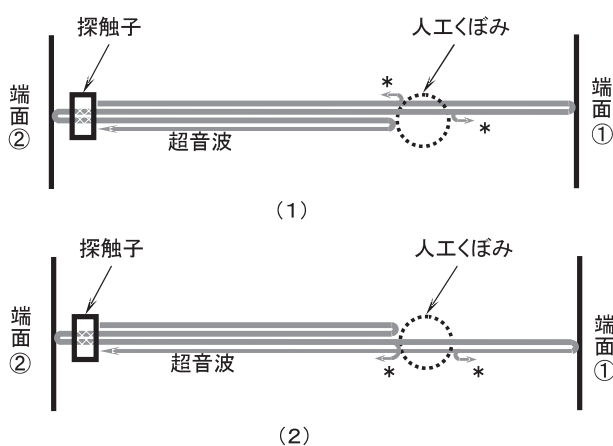


図8 端面とくぼみによる多重反射波の重畳

- (1) 端面①で反射した後、端面②で反射して、くぼみで反射してとらえられたエコー
- (2) くぼみで反射した後、端面②で反射して、端面①で反射してとらえられたエコー

さらに、図8の中ので示すように、上記2つの経路において、端面①を往復する経路上のくぼみで超音波の一部が反射により損失している。これらのことから、くぼみと端面による多重反射波から、エ

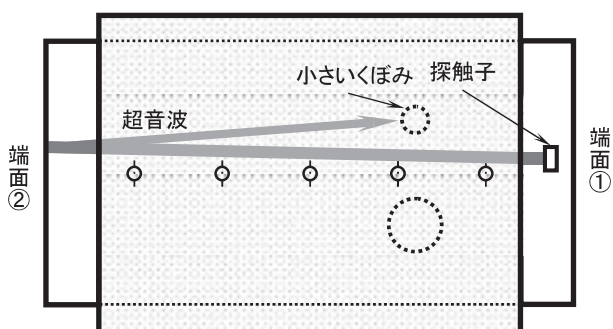
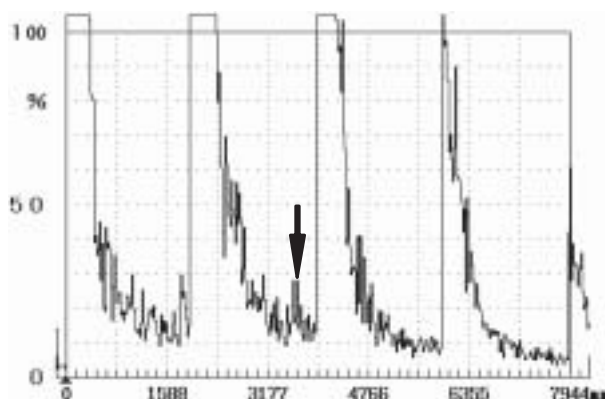


図9 試験体端面反射による小さいくぼみの検出



デジタル超音波探傷器の探傷画面であり、横軸は距離、縦軸は信号強度を示す。

図10 試験体端面反射による小さいくぼみの検出結果 (0.3MHz, 屈折角90度, SH波)

コー高さの低下度合いを分析することは適當ではない。しかしながら、約4mの距離の小さいくぼみの検出の可能性を示唆するものである。

このことから、試験体の端面①側のコンクリートに覆われていない位置に探触子を設置し、端面②で反射させて小さいくぼみの検出を試みた。試験体上の探触子の設置位置と超音波の経路を、図9に示す。探触子は、伝播経路上にくぼみおよびスタッドボルトのないような位置に設置した。図10に、検出結果を示す。黒い矢印で示す距離約3.6mの位置に、くぼみからの反射波を識別することができた。このことから、端面での反射を経ない直射法によっても、距離約3.6mの位置の小さいくぼみを検出することが可能であると考えられる。

7.2 スタッドボルトの検出限界

距離の異なるスタッドボルトからの反射波から、距離による反射波の低下度合いを検討した。図1に示す探傷位置Cに探触子を設置して、スタッドボルトからの反射波を測定した。表3に探触子位置に近い側から2～5番目のスタッドボルトからの反射波の低下量を示す。低下量は、距離500mmの位置にお

表3 スタッドボルト反射波のエコー高さの低下量 (屈折角90度, SH波, 3連振動子探触子)

単位: dB

スタッドボルト (距離mm)	2番目 (658)	3番目 (986)	4番目 (1318)	5番目 (1641)
0.5MHz	-39	-44	-48	-53
0.3MHz	-36	-42	-47	-49

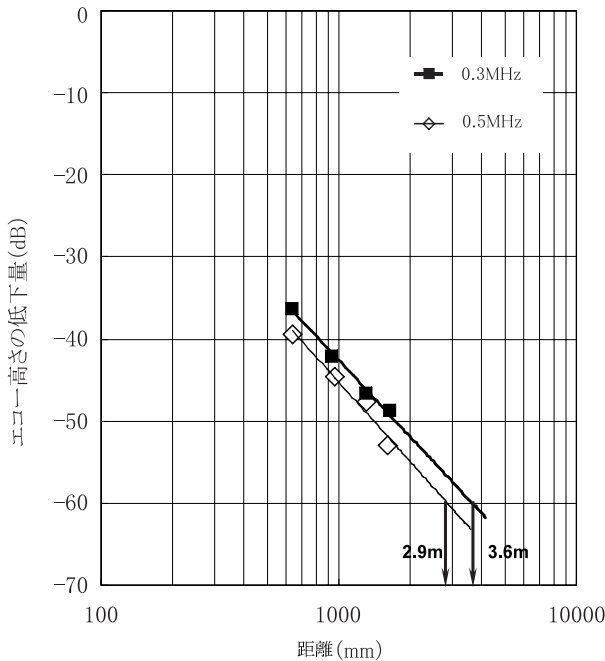


図11 スタッドボルト反射波のエコー高さによる検出限界の推定（屈折角90度，SH波，3連振動子探触子）

ける，厚さ38mmの鋼板端面からの反射波のエコー高さを基準とした．図11に，表3の低下量を横軸が距離を示すグラフで表した．探傷器のゲイン調整の限界，探傷波形のノイズレベルを考慮すると，基準となるエコー高さからの低下量約-60dBが，検出限界と考えられる．したがって，0.5MHz探触子の場合には，約2.9m，0.3MHz探触子の場合には，約3.6mが，コンクリートに埋設した鋼板表面上の直径8mmのスタッドボルトの検出限界として推定することができる．図1に示す探傷位置Cに探触子を設置したことから，探触子から2番目以降のスタッドボルトからの反射波は，それより近い側のスタッドボルトの影響により，直射した場合の反射波より小さく測定されていると考えられる．したがって，スタッドボルトをそれぞれ直射した場合には，検出限界距離として，さらに大きい値が期待できる．

8. おわりに

新たに開発した大型（3連）振動子（40mm(D)×120mm(W)相当）をもつ屈折角90度のSH波探触子を用いて，コンクリートに覆われた厚さ38mm，長さ2000mmの炭素鋼板試験体上の腐食減肉を模擬した人工くぼみ，コンクリート型枠固定用スタッドボルトからの反射波の検出について，実験を行った．得ら

れた結論を以下に示す．

- (1) 距離約1.5mの位置の深さ19mmおよび9.5mmのくぼみ，距離約0.7～1.7mの位置の直径8mmのスタッドボルトからの反射波を明瞭に識別することができた．
- (2) コンクリートに覆われた長さ2mの試験体の端面間を3回往復し，伝播距離約12mに相当する多重反射波を識別することができた．
- (3) 大型（3連）振動子を持つ探触子の超音波ビームの指向角および-6dB指向角は，それぞれ約7度，約3度で，1振動子探触子の1/2～1/3に相当し，3連振動子がくぼみなどの検出に有効であることの裏づけを確認することができた．
- (4) コンクリートに覆われた炭素鋼板上の深さ9.5mmの小さいくぼみを，試験体端面反射による距離3.6mの位置から検出することができた．
- (5) コンクリートに覆われた炭素鋼板上の直径8mmのスタッドボルトの検出限界距離は，約2.9～3.6mと推定された．

実際の格納容器における，その埋設部最下部までの距離20数mの約半分に相当する位置まで，屈折角90度のSH波が伝播することが確認でき，さらに距離約3.6mまでの範囲の腐食減肉等の表面上の反射源の検出の可能性を見出すことができた．今後は，さらに長距離部材を用いた実験により，検出範囲の確証とさらなる距離範囲の検出を試みる予定である．

文献

- (1) (社)日本機械学会，発電用原子力設備規格 維持規格（2004年版），解説2-1-16（2004）．
- (2) J. Li, J.L. Rose, "Guided Wave Inspection of Containment Structure," (2000)．
- (3) J. Li, J.L. Rose, "Guided Wave Testing of Containment Structures," *Materials Evaluation*, 59 [6], p.783 (2001)．
- (4) H. Kwun, "Feasibility of Magnetostrictive Sensor Inspection of Containments," ORNL/SUB/98-SZ272V, 64p (1999)．
- (5) H. Kwun, S. Y. Kim, "Guided Wave Inspection of Plates Using Magnetostrictive Sensors," 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, New

- Orleans, Louisiana USA, May 24-26 (2000).
- (6) H. Ishida, Y. Kurozumi, and Y. Kaneshima, "Development of ultrasonic testing technique to inspect containment liners embedded in concrete on nuclear power plants," 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, Aug.30 - Sep.3, 2004, T3.6.4 (2004).
- (7) 石田仁志, 黒住保夫, 金島慶在, "大型探触子超音波探傷法によるコンクリートで覆われた原子炉格納容器鋼板の腐食測定技術の開発," *INSS Journal*, Vol.11, p.198 (2004).
- (8) (社)日本非破壊検査協会, 非破壊検査技術シリーズ超音波探傷試験Ⅱ, p.15 (1990).
- (9) (社)日本非破壊検査協会, 非破壊検査技術シリーズ超音波探傷試験Ⅱ, p.18 (1990).