

# 原子炉格納容器鋼板埋設部の腐食測定技術の開発（第3報） —マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムの開発—

## Development of an Ultrasonic Testing Technique to Inspect Corrosion on a Containment Vessel Plates Embedded in Concrete of a Nuclear Power Plant (III) —Development of a Multi-Channel Probe Synthesis System—

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)\*

**要約** 本研究の目的は、原子力発電所の原子炉格納容器下部のコンクリート埋設部鋼板を対象とした、直接接近することが困難な構造物の超音波検査技術の開発である。

これまでに、3個のSH波振動子を組み合わせた大型探触子を開発し、表面腐食減肉の検出性能と遠距離位置までの超音波伝播性能を有することを見出した。

さらなる性能向上のために、これらの複数個の振動子を用いた探傷技術の改良を試みた。振動子数を5個とし、これを個別の探触子として分割し、5チャンネル超音波送受信装置により、個別に駆動する方法とした。さらに、5個の探触子により得られた受信信号に対して個別に受信時刻を調整し、これらを合成してより振幅の大きい受信信号を得ることが可能なマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムを開発した。

その結果、5個の探触子による受信信号の合成処理により、受信信号強度が、合成処理のない場合に比べて3.9-4.6dB向上し、本システムの有効性が認められた。

**キーワード** 超音波探傷試験, 原子炉格納容器, SH波, 多チャンネル振動子, 受信信号合成

**Abstract** The purpose of this study is to develop of an ultrasonic technique for the testing of structures such as nuclear containment vessel plates embedded in concrete to which direct access is difficult.

We have already developed a shear horizontal (SH) wave transducer combined with three active elements and confirmed that this transducer has excellent detectability for corrosion on a surface and ability to propagate ultrasonic waves in a long distance.

A further improvement of testing technique with multi channel elements has been carried out. We have developed a "Multi channel probe synthesis system" which uses 5 transducers with 5 elements excited by 5 channel pulser/receiver capable adjusting transmitting and receiving times individually. By synthesis of the originating signals from 5 transducers with adjusting time of receiving, we can get a high amplitude signal.

As a result, 3.9 - 4.6dB higher signals than those without signals synthesis was gained by synthesis of the received signals. The effectiveness of the detectability with the developed Multi channel probe synthesis system was confirmed again.

**Keywords** ultrasonic testing, reactor containment vessel, shear horizontal waves, multi channel probe, received signal synthesis

### 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、その内部に原子炉圧力容器、原子炉冷却系など

を格納し、事故時に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おり、PWRの原子炉格納容器鋼板は、現在まで

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所



(a) 上面



(b) 底面（超音波入射面）

図1 大型（3連振動子）探触子の外観写真

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<sup>(1)</sup>。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。したがって、コンクリート埋設鋼板に腐食の無いことを確認し、将来腐食、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の評価を可能にする検査技術を用意しておくことが望ましい。

コンクリート埋設鋼板部の検査には、接近が可能な位置から距離約 25m の範囲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<sup>(2)(3)</sup>、磁わい効果を利用する magnetostrictive sensor (MSs) 法<sup>(4)(5)</sup>、および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、コンクリート埋設鋼板部の長距離範囲の検査技術として、実機適用に至るような完成されたものは未だ存在しない。

これに対して、著者ら<sup>(6)(7)</sup>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を応用し、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 (shear horizontal 波, SH 波) を用いた、低周波数の大型探触子を新たに製作した。すなわち、振動子材料である圧電素子と

しての製作が可能な振動方向における幅 40mm (奥行き 40mm) の SH 波振動子を 3 個組み合わせる使用することによって、1 個の振動子としては製作が不可能な幅 120mm に相当する大型の探触子を実現した。すなわち、全体で幅 120mm (奥行き 40mm) 相当の振動子とし、これを 1 つの筐体に納めている。図 1 に大型 (3 連振動子) 探触子の外観写真を示す。

コンクリートによって覆われた厚さ 38mm の鋼板試験体を用いた試験によって、探触子からの距離約 1.5m の位置の鋼板表面上の深さ 19mm および 9.5mm の腐食を模擬した人工減肉 (くぼみ) からの反射波の検出、距離 0.7~1.7m の位置の鋼板表面に溶接されたスタッドボルトからの反射波の検出、さらに鋼板の端面間の 0 多重反射波の検出による約 12m の距離範囲までの SH 波の伝播を確認した<sup>(8)</sup><sup>(9)</sup>。探触子の発信超音波の指向角の測定によって、3 個の振動子を組み合わせる大型探触子から伝播する超音波が、伝播方向のより狭い範囲に集中していることを確認し、これにより超音波伝播性能が向上したものと評価した。

さらなる性能向上のために、本研究では、より強度の大きい受信信号を得ることを目的に、(1) 複数個の振動子を分割して個別の探触子とすること、(2) 複数個の探触子を個別に駆動すること、(3) 複数個の探触子の受信信号を合成処理すること、を特徴とするシステムの開発を試みた。今回は、5 個の振動子 (探触子) とこれに接続する 5 チャンネルの超音波送受信器を使用したシステムにより、受信信号強度向上の可能性を検討した。

## 2. マルチチャンネル・プローブ・センセライザシステム

### 2.1 大型（3連振動子）探触子を用いた超音波探傷試験システム

図2に、これまでに製作した大型（3連振動子）探触子を用いた超音波探傷試験システムの概念を示す。大型（3連振動子）探触子の3個のSH波振動子は、接続された1台の超音波送受信器によって同時に駆動される。探触子と欠陥の位置関係から生じる3個の振動子から欠陥までの伝播距離の差によって欠陥反射波の受信時刻に差が生じるが、3個の振動子からの出力信号は超音波送受信器においてそのまま合成される。

大型（3連振動子）探触子で送受信する超音波の種類は、SH波である。図3にSH波探触子からのSH波の送受信原理を示す。振動子である圧電素子への電圧入力によって生じるすべり振動によって発生したSH波は、探触子内のくさびを経て、試験体の表面から入射される。通常液体においては伝播し

ないSH波が、探触子の入射面と試験体表面の間隙間を通過して入射するように、この隙間を満たす粘度の高い水飴様の材料を接触媒質として使用する。（超音波の他の振動形態である縦波および振動方向が試験体表面に垂直な横波（shear vertical 波、SV波）を入射させる際には、振動子において発生した縦波が、探触子の入射面と試験体表面の間隙間を伝播するため、グリセリン等の通常の液体の使用が可能である。）

### 2.2 複数個振動子を使用したシステムの改良

従来の超音波探傷試験システムをもとに、さらなる性能向上のための課題と改良点を検討した。

振動子の大型化は、超音波を狭い領域に集中させることが可能で、超音波伝播領域における超音波強度を向上させる方策として有効であることを既報により確かめた<sup>(8)(9)</sup>。このことから性能向上の方策の一つとして、探触子のさらなる大型化を検討することとした。

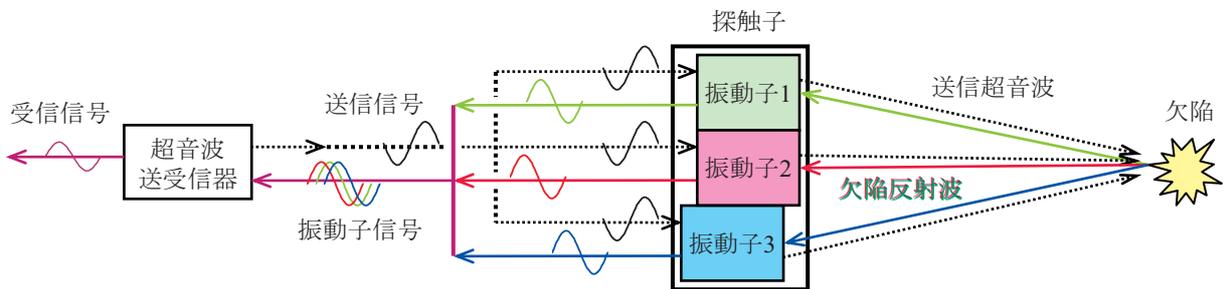


図2 従来の超音波探傷試験システム

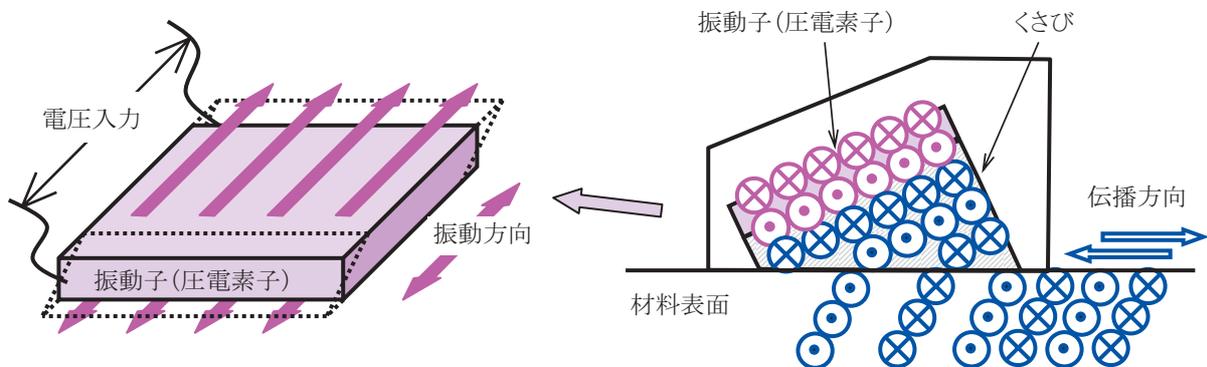


図3 探触子からのSH波送受信

SH波探触子から効率良くSH波を入射させるためには、探触子の超音波入射面と試験体表面の隙間を小さくすることが有効であり、探触子の試験体表面への圧着が必要となる。しかし、探触子を大きくすれば、より大きい圧着力が必要となる。従来の大型（3連振動子）探触子よりさらに大きな振動子を用いた探触子を試作したが、探触子の超音波入射面を試験体の表面に均一に圧着させることは容易ではなく、圧着により探触子が損傷することもあった。このことから、1個の振動子を1個の筐体の探触子として分離し、これを5個使用することとした。

さらに、5個の探触子（振動子）それぞれに超音波送受信器を接続して個別に駆動することによって、加振による入力エネルギーの増大を図ることを考えた。

また、図2に示したように振動子を複数個使用する場合、個々の振動子から欠陥までの距離には差が

生じる。さらに、複数個の探触子の使用によっても、探触子の位置のズレはさらに大きくなるものと考えられる。その結果、振動子から欠陥までの超音波の伝播時間の差による、各探触子の受信時刻のズレが生じる。そこで、探触子（振動子）ごとに超音波を送受信し、かつ送受信時刻を個別に調整することとした。これによって、これらの探触子（振動子）からの受信信号を合成し、より大強度の信号を得ることができると考えた。

図4に改良した超音波探傷試験システムの概念を示す。5個の個別の探触子に5チャンネルの超音波送受信器を接続し、個別に駆動し、送受信の時刻を個別に制御する。

図5に受信時刻の調整による受信信号合成の原理を示す。図5の(1)は、従来の3個の振動子の出力を1個の超音波送受信器で受信する場合を示している。各振動子からの受信信号の位相に差があり、超

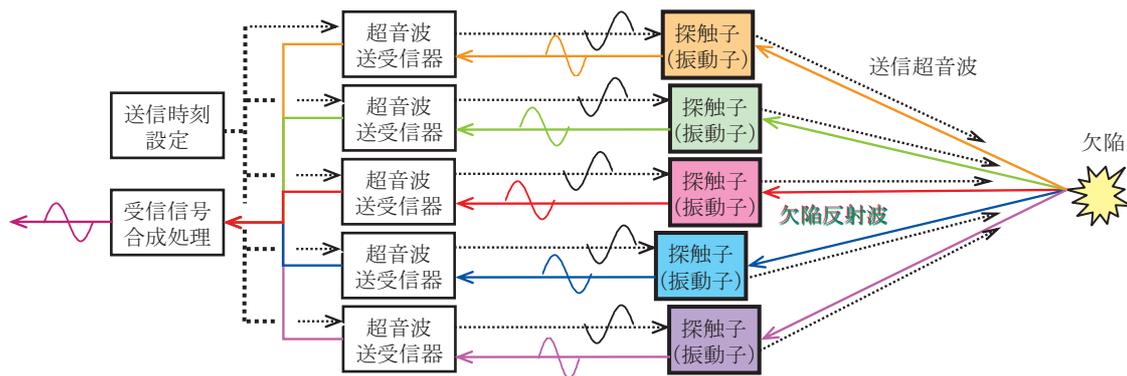
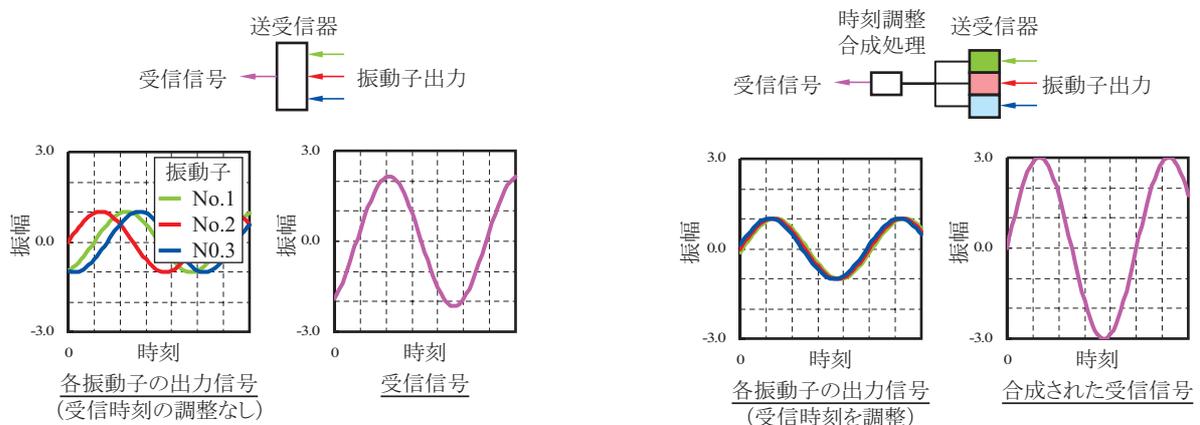


図4 改良した超音波探傷試験システム



(1)1台の送受信器による受信

(2)3台の送受信器による受信と受信信号の合成

図5 受信時刻の調整による受信信号の合成

音波送受信器の出力は各振動子の最大振幅の和として得られない。図5の(2)は、3個の振動子の出力を3個の超音波送受信器で受信し、受信時刻を調整して受信信号として得る場合を示している。各振動子からの受信信号の時刻を調整することによって、その位相を合わせ、受信信号は各振動子の最大振幅の和として得ることが期待できる。

以上から、① 複数個の振動子を個別の探触子として分離して駆動する、② 探触子毎に超音波を送信させ、その送信時刻を調整する、③ 探触子毎に超音波を受信し、その受信時刻を調整する、ことを改良点とした。

図6に改良システムの構成を示す。複数 (multi) の別個 (channel) の探触子 (probe) を用いて、これらを個別に駆動することが可能な超音波送受信器に接続し、これに接続したコンピュータによって超音波の送受信時刻の制御と受信信号の合成 (synthesis) を行うものである。このことから、本システムをマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザーシステムと呼ぶこととした。

### 2.3 探触子および超音波送受信器

まず探触子が5個の場合のマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザーシステムを試作した。図7に試験体表面に固定治具により取り付けられた状態の超音波探触子の写真を示す。5個の個別の筐体の探触子を試験体表面に、SH波専用の接触媒質を塗布して密着させ、超音波伝播方向に対して探触子の位置をアルミ製の枠と鋼製のボルトからなる治具で固定している。探触子は、SH波、周波数0.3MHz、屈折角90度、幅40mm×奥行き40mmの振動子を1個持つ。

図8に5チャンネル超音波送受信器の外観写真を示す。図8の写真の上段の超音波送受信器の5個の端子に5個の探触子を接続する。

### 2.4 受信信号の合成

図9に、受信信号の時刻調整と合成の処理を、コンピュータ (PC) 画面のビットマップ画像により示す。5個の探触子からの受信信号が、図9の①のグ

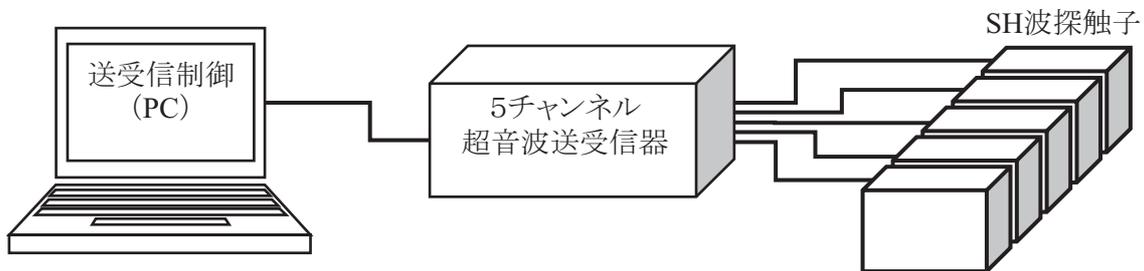


図6 マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザーシステム

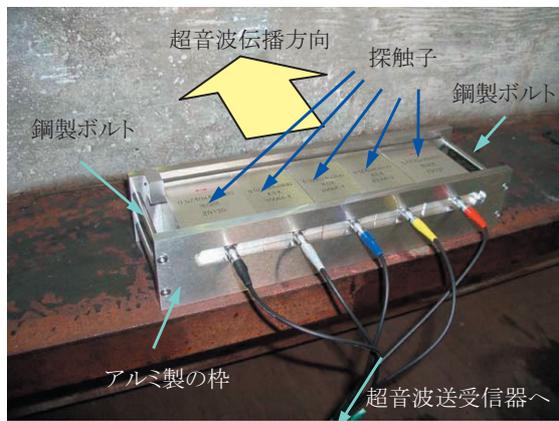


図7 治具で固定した5個の超音波探触子



図8 5チャンネル超音波送受信器

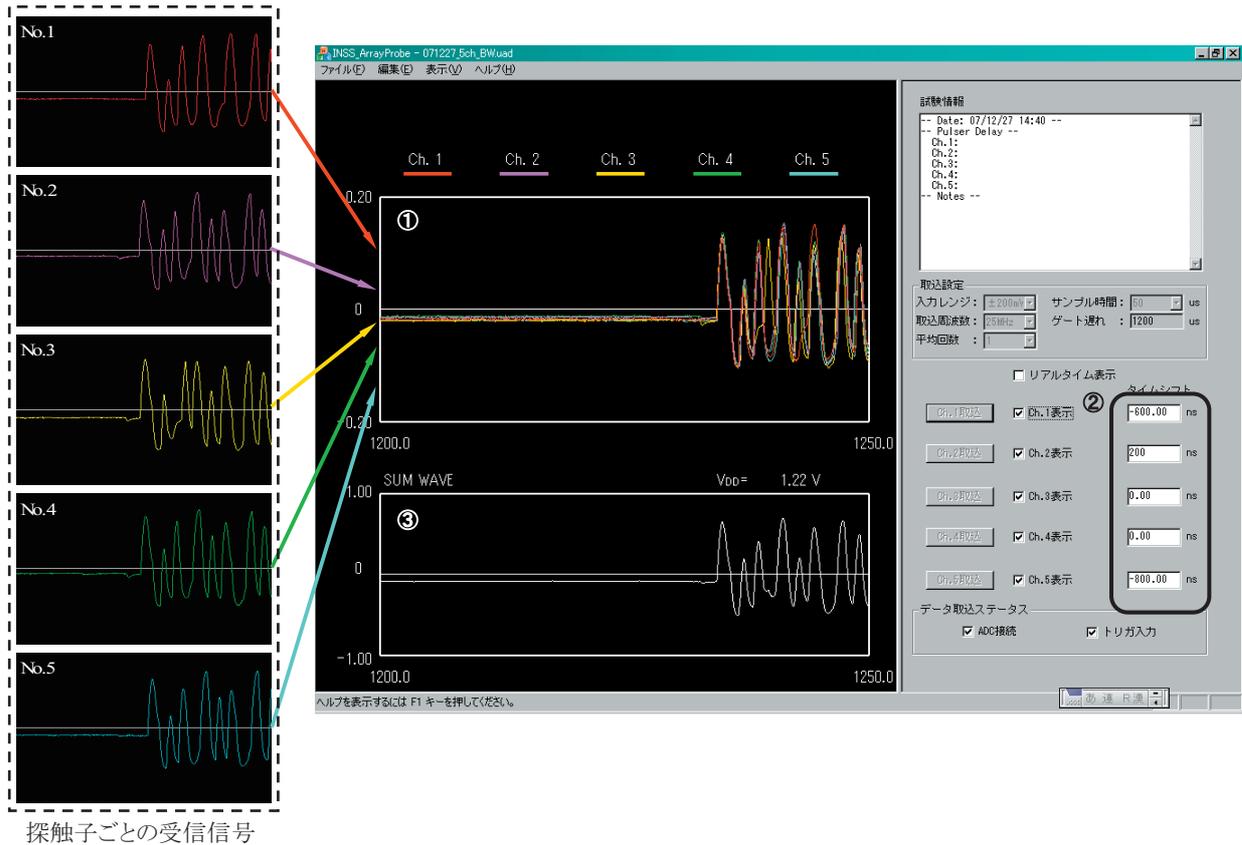


図9 PC画面上での時刻調整による受信信号の合成

ラフに5色で表示される。①のグラフにおいて各探触子の受信信号のピーク位置の時刻のズレに応じて、②の窓に各探触子の時刻の差を入力する。図9は、ch.3の信号の時刻を基準に受信時刻を調整した場合を示している。受信時刻の調整によって、PC画面を見ながら、①のグラフにおいて、それぞれの受信信号を時刻方向すなわちグラフの横方向に移動させて、それぞれの受信信号のピークが一致することを確認できる。各探触子からの受信信号を合成した結果が、③のグラフに表示される。

また、各探触子からの超音波送信に対して、同じコンピュータによって、それぞれの超音波送受信器の送信時刻の設定が可能である。

### 3. コンクリート埋設試験体による実験

#### 3.1 実験装置

実験には、既報<sup>(6)~(9)</sup>において用いた試験体と同じものを使用した。図10に測定試験に用いたコンクリート埋設試験体を示す。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、腐食減肉を模擬した、直径200mm、最大深さ19mm(1/2板厚相当)(以下、大きいくぼみ)と直径100mm、最大深さ9.5mm(1/4板厚相当)(以下、小さいくぼみ)の凹面状の人工のくぼみを設けた。くぼみの位置は、図10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。

#### 3.2 実験方法

図10に示す試験体の人工くぼみから遠い側のコンクリートに覆われていない位置に探触子を取り付け

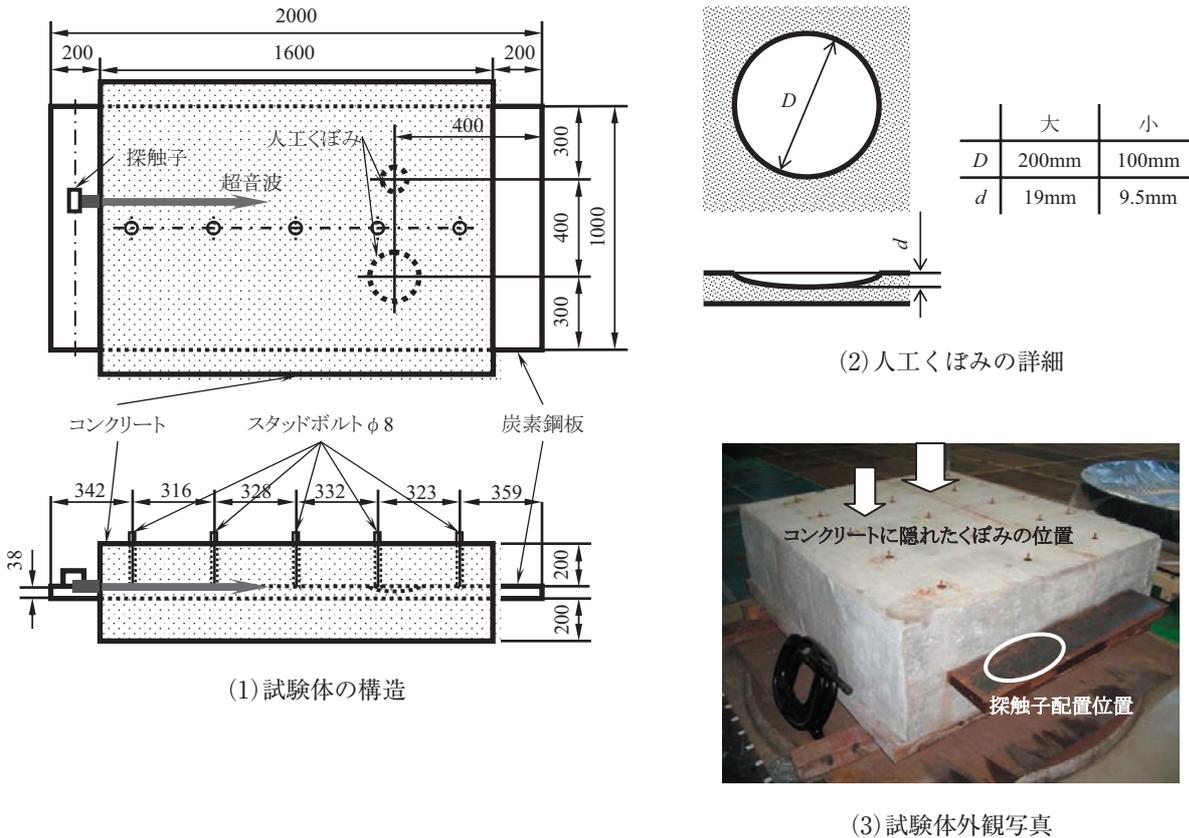


図10 コンクリート埋設試験体

て測定した。まず、試験体鋼板の端面からの反射波を測定することによって、各探触子から等距離とされる鋼板端面からの各探触子の受信信号について、受信時刻の差の有無を確認し、受信時刻の調整による受信信号の合成の効果を確かめた。次に、模擬欠陥として小さいくぼみからの反射波について、同様に測定を行った。探触子取り付け位置から試験体長手方向の距離は、それぞれ約1.9m、約1.5mである。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 鋼板端面測定結果

図11に、試験体鋼板端面の反射波の測定結果を示す。図11には、(1)に示す試験体鋼板上の探触子配置により測定された、(2)各探触子の受信信号、(3)受信時刻を調整しない場合の受信信号、(4)受信時刻の調整により合成処理された受信信号を、図9に示したPC画面上のビットマップ画像により示している。

PC画面上において、図11の(2)に示すような信号が、探触子位置から試験体鋼板端面までの距離の横波の伝播時間に相当する時刻近傍で、観察することができたことから、これを試験体鋼板端面からの反射であると判断した。なお、図11の(2)～(3)では、その受信時刻近傍の時間を拡大して示している。

図11の(3)に示すように、鋼板端面から等距離の位置に取り付けた各探触子の受信信号の受信時刻には差がある。このことは、図7に示した固定治具では調整できないような探触子の位置や探触子内部の振動子の配置の差があることを意味している。

次に、図11の(4)に示すように、各探触子からの受信信号の時刻を調整し、各探触子の受信信号のピークの位置を一致させることによって、図11の(3)の時刻調整の無い場合に比べて約4.6dB(約1.7倍)振幅の大きい合成信号が得られた。この場合の各探触子の受信信号において調整した時刻は、5個の探触子配列の真ん中のNo.3探触子を基準に-200~800nsであった。また、5個の探触子からの超音波の送信時刻は同じとしている。

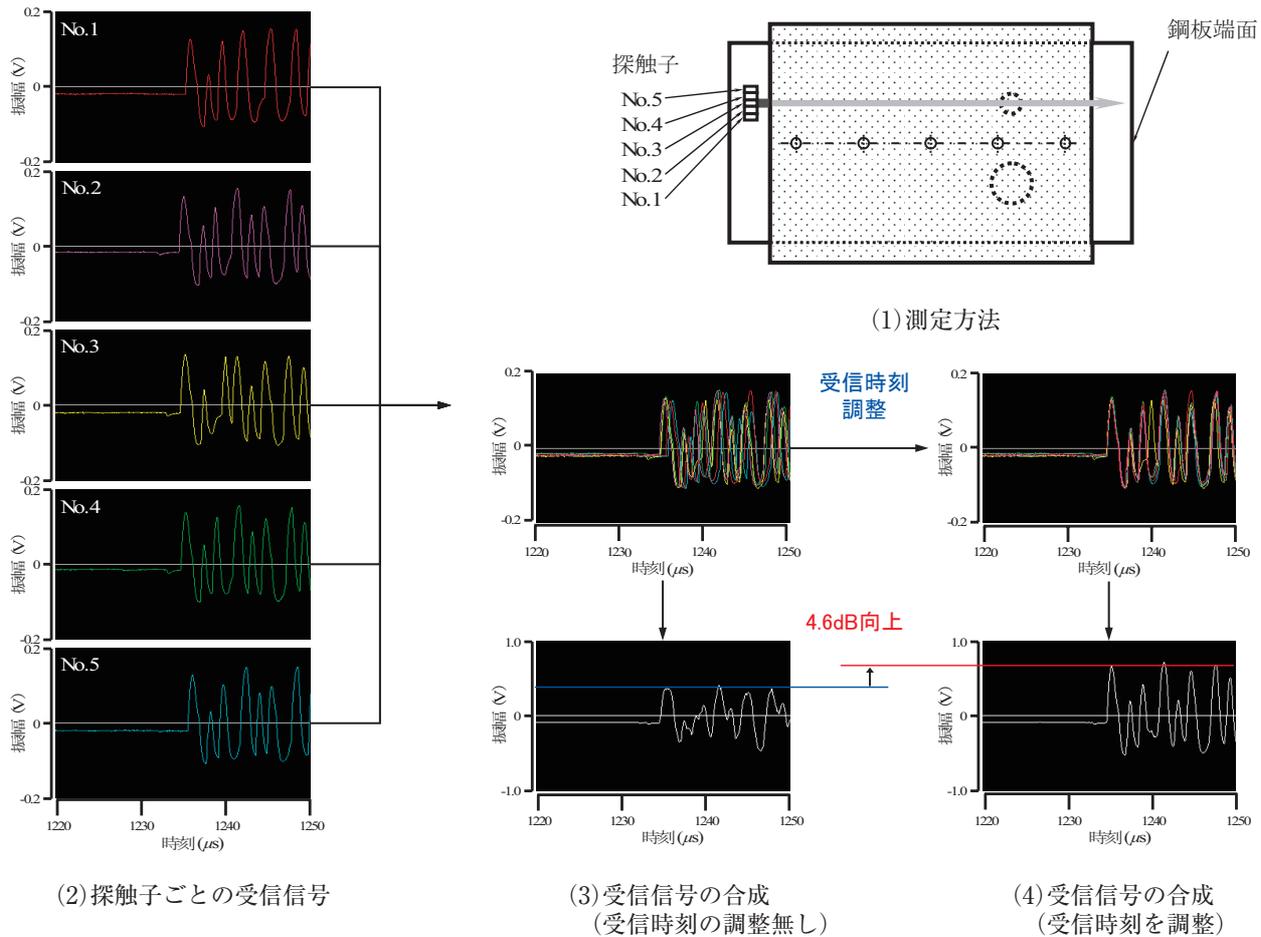


図 11 測定試験結果 (鋼板端面反射波)

次項に示すような、各探触子から目的とする欠陥位置までの距離が異なる場合には、あらかじめ求めることが可能な各探触子から欠陥位置までの距離により振動子毎の超音波の送受信時刻の設定が可能であるが、以上のような探触子配置に係る差異はあらかじめ計算することは困難である。本研究で開発したマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムを用いれば、実際の受信信号の時刻の差を見ながら調整することによって、そのような対応が困難な探触子の配置の差異に起因する受信時刻のズレを調整することが可能である。

#### 4.2 欠陥測定結果

図 12 に、試験体鋼板表面の小さいくぼみの反射波の測定結果を示す。同様に PC 画面上のビットマップ画像により、合成処理過程を示している。小さいくぼみからの反射波に対して、受信時刻を調整して

ピーク値を一致させることによって、約 3.9dB (約 1.6 倍) 振幅の大きい合成信号を得ることができた。受信信号の時刻調整範囲は、No.3 探触子を基準に 200~1400ns であった。この場合、5 個の探触子からの超音波は、それぞれの探触子から小さいくぼみまでの距離の差に基づき計算された時刻差を与えて送信した。

各探触子からの距離が異なる反射源からの反射波に対して、マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムによって、より振幅値の高い受信信号を得ることができた。

#### 5. おわりに

これまでに製作した大型 (3 連振動子) 探触子を基に、埋設鋼板の腐食測定システムとしての改良を行い、マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムの開発を試みた。その特徴は、次の通

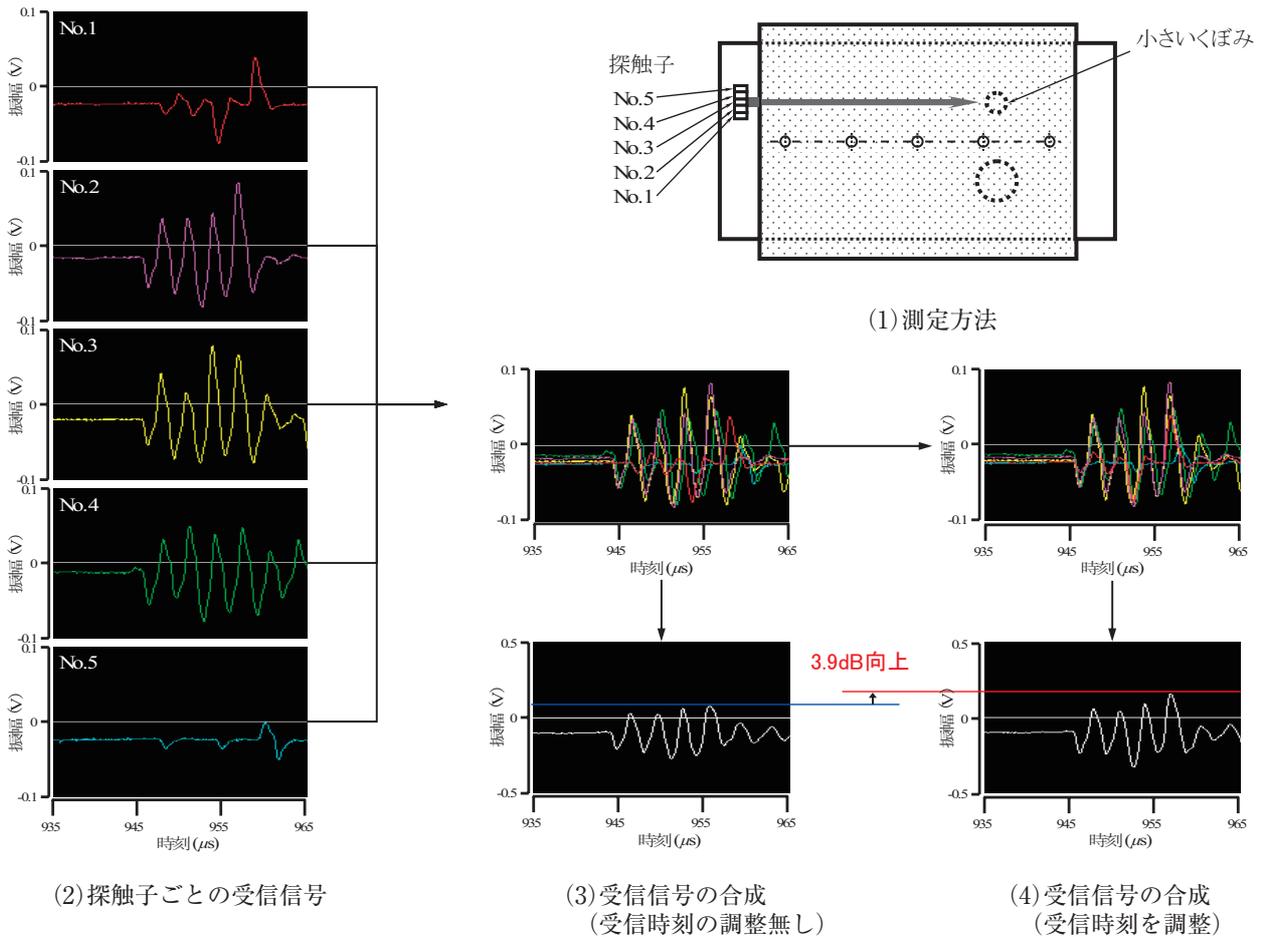


図 12 測定試験結果 (小さいくぼみ反射波)

りである。

- (1) 複数個の振動子を分割して個別の探触子に分割したこと。
- (2) 複数個の探触子を個別に駆動すること。
- (3) 複数個の探触子の受信信号を合成処理すること。

特に、受信信号の合成処理において、各振動子からの受信信号のピーク値を一致させる操作を、受信波形の合成の結果を見ながら実施することが大きな特徴である。

今回は、5 個の振動子 (探触子) を使用して、マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムによるコンクリート埋設鋼板の測定試験により、次の結果が得られた。

- (1) 各探触子から等距離とされる鋼板端面反射波について、その合成処理によって約 4.6dB 信号振幅が向上した。
- (2) 各探触子からの距離が異なる鋼板表面の人工くぼみからの反射波について、その合成処理によって約

3.9dB 信号振幅が向上した。

以上から、マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムによって、欠陥反射波などの受信信号強度の向上が可能であることが確認され、コンクリート埋設鋼板の表面欠陥の検出性向上が期待される。さらに、欠陥反射波の識別が困難な条件における実験と SN 比の検討により、このような条件における適用性の評価も今後必要である。

これらの結果を踏まえて、実機の埋設鋼板への適用を図るために、今後さらに曲率鋼板への適用性の検証および実機相当距離位置までの伝播に必要な超音波入力強度の評価を試みたい。

## 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), (社) 日本機械学会, 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, p.783, (2001).
- (4) H. Kwun, "Feasibility of Magnetostrictive Sensor Inspection of Containments," ORNL/SUB/98-SZ272V, (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) 石田仁志, "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)," *INSS Journal*, Vol.12, p.271, (2005).
- (9) H. Ishida, "An ultrasonic technique for the testing of nuclear containment vessel plates embedded in concrete," *Materials Evaluation*, 65, p.139, (2007).