

フェーズドアレイ超音波探傷技術の開発

Development of Phased-Array Ultrasonic Testing Probe

技術本部 川浪 精一^{*1} 黒川 政秋^{*2}
神戸造船所 谷口 優^{*3} 多田 義久^{*4}

発電プラントの安全性を確保するための非破壊検査技術の一つとして超音波探傷（UT）が適用されている。近年、この UT 技術の高度化手法としてフェーズドアレイ UT 技術の研究が世界中で行われている。フェーズドアレイ UT は超音波ビームのスキanningやフォーカシングなどのコントロールが可能で、従来探傷が困難な部位への適用が期待される。そこで、フェーズドアレイ UT の実機適用を目指して高精度な振動子を製作し、数値解析を用いてプローブを設計・製作した。これらフェーズドアレイ UT プローブを用いて種々の部位への適用を推進している。

Phased-array ultrasonic testing was developed for nondestructive evaluation of power plants. Phased-array UT scans and focuses an ultrasonic beam to inspect areas difficult to inspect by conventional UT. We developed a highly sensitive piezoelectric composite, and designed optimized phased-array UT probes. We are applying our phased-array UT to different areas of power plants.

1. ま え が き

原子力発電所を始めとした各種発電プラントにおいてトラブルの未然防止は重要なテーマである。また、プラントの寿命延長に伴い、構成部位の余寿命診断も重要な課題となっている。

非破壊検査はプラントを安全に長期間運転するために必要な技術である。通常、プラントの配管や圧力容器の検査には超音波を用いた検査（UT）が適用されている。この UT 検査技術は超音波の透過性が良く、かつ形状が単純な部位では十分な欠陥検出性や欠陥定量性（欠陥の大きさ評価）が得られているが、超音波の透過性が悪いステンレス casting 材や、プローブ走査が困難な複雑な形状をした部位の検査は難しいのが現状である。

UT 高度化の一手法として、近年フェーズドアレイ UT 技術の研究が世界中で進められている。フェーズドアレイ UT は、超音波ビームの電子制御が可能であり、電子的にビームをスキanningさせることにより、従来探傷が困難な複雑形状部の探傷を可能とし、またビームをフォーカシングさせることにより空間分解能を向上させることも可能である。

本報ではフェーズドアレイ UT 技術のキーとなるプローブの要素技術として振動子製作とプローブ設計手法及び本技術を用いた探傷例を紹介する

2. フェーズドアレイ UT 手法

2.1 原理と特徴

通常の UT プローブの構造は 1 つの振動子から構成されるが、フェーズドアレイ UT プローブは複数の振動子から構成される。そして個々の振動子の送受信タイミングを独立に制御し、波形を合成することにより超音波ビームの制御を行っている。

表 1 の電子スキanningは右側の振動子の送信タイミン

表 1 フェーズドアレイの原理と特徴
Principle and feature of phased-array UT

手法	電子スキanning	電子フォーカシング
コントロール原理	遅延時間の設定 複数の圧電素子 遅 早 超音波伝ばイメージ 合成波面 超音波入射方向	遅 遅延時間の設定 圧電素子 超音波伝ばイメージ 合成波面 超音波集束位置
特徴	多数の屈折角探傷による探傷不可範囲の低減や、電子的に走査することによる高速な探傷	超音波ビームの集束化による、空間分解能（欠陥検出性）の向上

グを遅らせた例であるが、合成波面は図のように右側に傾き、通常の斜角探傷と同様のビーム送信ができる。また表 1 の電子フォーカシングでは、中央付近の振動子の送信タイミングを遅らせることにより、合成波面をある 1 点で集束し、集束型プローブと同様の効果を得ている。このように、フェーズドアレイの特徴は、プローブ各振動子の制御により、超音波ビームの入射角や集束位置を自由に変えることができることであり、その結果従来 UT では探傷が困難な部位への適用が期待される。

2.2 システム構成

図 1 にフェーズドアレイ UT のシステム構成を示す。基本的には①フェーズドアレイ UT プローブ、②フェーズドアレイ探傷器（プローブの送受信信号を制御）、③探傷器制御用パソコンから構成される。これに自動探傷などの際、プローブを走査させるスキャナとスキャナをコントロールするスキャナドライバが追加される場合もある。また、これらは比較的簡単に持運びが可能で、現地探傷にも十分適用可能な重量である。

*1 高砂研究所電子技術研究室

*3 原子力保全技術部計画課

*2 高砂研究所電子技術研究室主席 工博

*4 品質保証部原子力サービス品質管理課

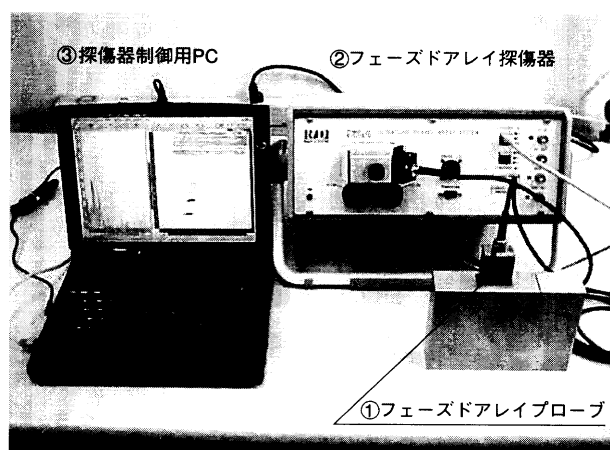


図1 フェーズドアレイシステム構成 フェーズドアレイ UT 探傷を行うのに必要な装置を示す。
Composition of phased-array UT system

2.3 フェーズドアレイ UT の適用先

フェーズドアレイ UT の主な適用先として、まず複雑形状部が挙げられる。これは通常 UT では探傷の際、検査範囲をカバーするためにプローブの走査が必要となるが、部位によってはストレート部が短く走査不可能な部位が存在する。このような部位は従来では探傷不可領域として探傷が行われていなかったが、フェーズドアレイ UT を用いてビームスキャンニングを行うことにより、プローブの走査なしに探傷が可能となる。

2つ目の適用先として高雑音材の探傷が挙げられる。これは SUS 铸造材や SUS 溶接部など、粗大な結晶粒の影響により、超音波が屈折、散乱させられ、超音波の透過性が悪い部分である。このような部位には超音波のビームをフォーカシングすることにより、欠陥エコーレベルが大きくなり、また SN 比の改善が図れる。

また、その他にも、フェーズドアレイの振動子をいくつかのグループに分け、それぞれを電氣的に切換えることにより、プローブの走査が不要となり、高速探傷が可能となる。

3. フェーズドアレイ UT プローブの高性能化

フェーズドアレイ UT は先に挙げたように従来探傷が困難な部位への適用が期待される。しかし、フェーズドアレイ UT のプローブは超音波ビームのスキャンニング範囲やフォーカシング範囲など従来の UT プローブにはないパラメータがあり、振動子数や振動子サイズなどによりプローブ性能は大きく異なってくる。そこで、以下に当社にて開発したフェーズドアレイ UT プローブの要素技術を示す。

3.1 高精度振動子の製作

フェーズドアレイ UT の高精度化の手段として、まず超音波振動子の特性向上が考えられる。従来使用されている振動子の場合、PZT (チタン酸ジルコン酸鉛) 等の圧電セラミックスが用いられているが、これを図2に示すような圧電セラミックスの微細な柱を林立させ、柱間に樹脂を充てんしたコンポジット型振動子にすることにより次のような効果が期待できる。

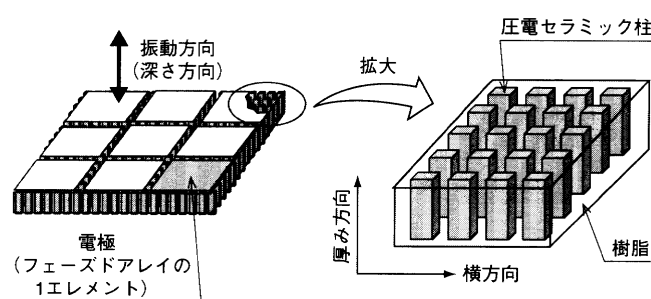


図2 コンポジット振動子の構造 フェーズドアレイ UT プローブ中のコンポジット振動子の構造を示す。
Structure of piezoelectric composite

- (1) 圧電セラミックス間の樹脂がダンパ材として作用し、超音波パルスの短縮化により、深さ方向の分解能が向上
- (2) 厚み方向への振動が主となり、横方向への共振が小さくなるため不要なふく射が減り、指向性が向上
- (3) 音響インピーダンスの低下によりマッチングが向上し、SN 比が向上
- (4) 機械的 Q 値 (振動子のダンピング特性を表す指標) の低下による広帯域化

このような優れた性能を持つコンポジット振動子の設計を行うため、まず有限要素法による振動特性評価を行った。

コンポジット振動子の設計において、PZT 占積率及び樹脂のヤング率が重要なパラメータとなる。また、PZT の形状も横方向の相互干渉に影響を与えと考えられる。

解析は過渡応答解析とし、コンポジット振動子にインパルス状の電位を印加し、振動子の振動過渡応答を解析して、ダンピング特性を評価した。

解析の結果以下のことが分かった。

- (1) コンポジット率 25 % で機械的 Q 値 (Q_m) が最小となり、 Q_m は従来型 PZT 振動子の約半分である。
- (2) アスペクト比 10 以上で Q_m 一定となり、5 MHz 程度の振動子を製作するためには高さ 200 μm 、幅 20 μm 程度の三次元微細加工技術が必要である。

Q_m が低いと送受信する超音波パルスが短縮できるため、優れた振動特性となる。

先の解析結果よりコンポジット振動子の PZT 柱は幅数十 μm 、高さ数百 μm と高アスペクト比の微細構造物であるため、従来のダイシング等の技術では製作が困難である。そこで今回 LIGA プロセスによる高精度微細加工技術によりコンポジット振動子を製作した。

LIGA プロセス (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) は 1980 年代初期にドイツのカルスルーエ原子核研究所において開発された微細加工製作技術であり、深い溝を掘る X 線リソグラフィ (露光)、電鍍 (めっき)、モールドを組合せたものである。X 線源として使用する SR (シンクロトン放射光) は高強度で優れた指向性を持つため、深さ数 100 μm 、加工幅は数 μm の高アスペクト比の三次元構造を形成することが可能である。

図3にコンポジット型振動子の製作プロセス概略を示す。SR 光を用いてレジスト (感光材) に PZ 柱に対応する溝を掘

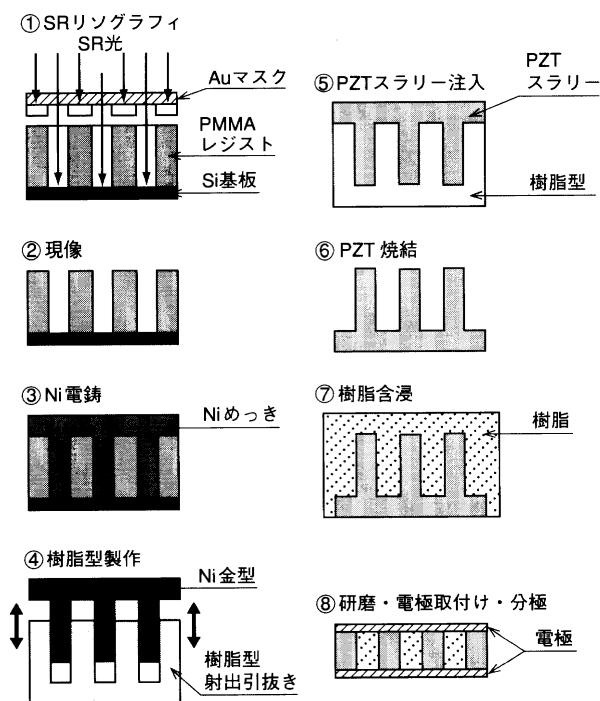


図3 製作プロセス コンポジット振動子を製作するプロセスを示す。図中①から④までを合せて LIGA プロセスと呼ぶ。

Production process of piezoelectric composite

り、それをめっき処理することにより金型を製作する。この金型を用いて樹脂型を製作し、樹脂型に圧電セラミックスの粉末を流し込み固め、焼結することにより圧電体を形成する。さらに圧電セラミックス柱のすきまに樹脂を流し込み硬化させることによりコンポジット型振動子が完成する。

本研究では立命館大学理工学部ロボティクス工学科杉山進教授の指導の下、立命館大学のSR光源施設 (AURORA) を用いて LIGA プロセスを用いたコンポジット型振動子を開発した。図4に LIGA プロセスにより試作したコンポジット振動子の金型を示す。

試作したコンポジット型振動子は PZT 単体の振動子の振動特性と比較すると Q_m 値が約 50 % 程度にまで低減しており、コンポジット型振動子の振動特性が優れていることを実験的にも確認している。

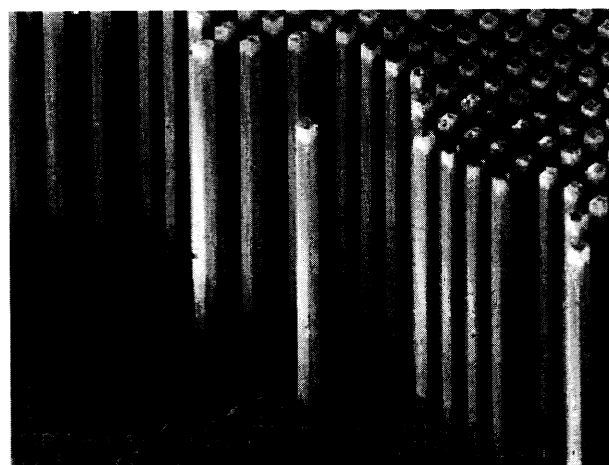


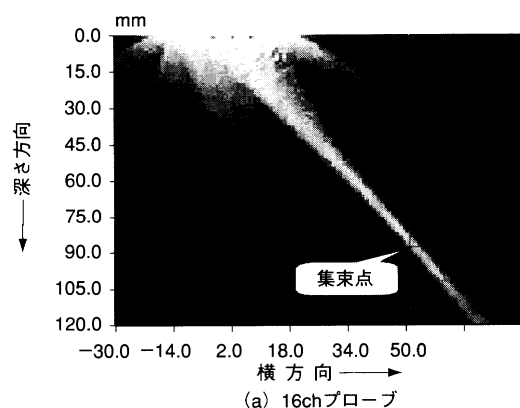
図4 コンポジット振動子の金型 SEM 写真 LIGA プロセスにより成形した Ni 金型 (一辺 20 μm , 高さ 500 μm の Ni 柱群) を示す。
SEM of piezoelectric composite Ni die

3.2 プローブ設計・製作

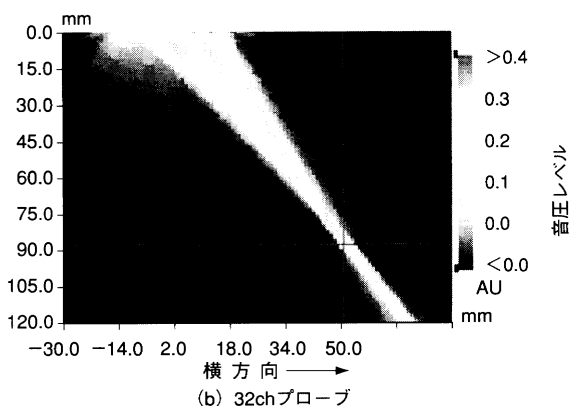
フェーズドアレイを実機に適用する際、その部位の探傷に適したプローブを設計することは重要である。そこで次に、フェーズドアレイプローブの設計手順を紹介する。

まず、対象となる部位を探傷するための探傷条件として超音波ビームの集束半径、集束位置及びスキニング範囲等を求める。これは簡単な形状のものであれば図面から、複雑形状などはレイトレースシミュレーションなどを用いて求める。探傷条件を基にアレイパラメータの算出式からパラメータ値を求め、その値を使ってフェーズドアレイの音場解析を行い、超音波ビームが適正であるかどうか評価する。そして、適正であれば、そのアレイパラメータを基に実際にプローブを製作する。

図5に音場解析の例を示す。これは入射角 30° で深さ 90 mm の位置に超音波ビームを集束させる条件下で、チャンネル数を一方は 16 ch に、他方は 32 ch にしたときの音場解析の例である。図5より 32 ch の方は適正な超音波ビームが形成されているが、16 ch の方は集束点での超音波ビームの強度も弱く、またサイドローブも現れており、適正な超音波ビームとはいえない。すなわち、このケースでは 32 ch のプローブを選定する。

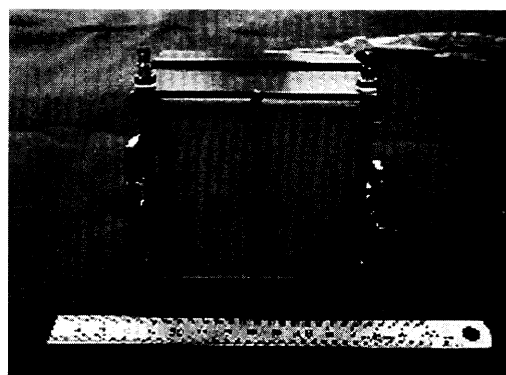


(a) 16chプローブ

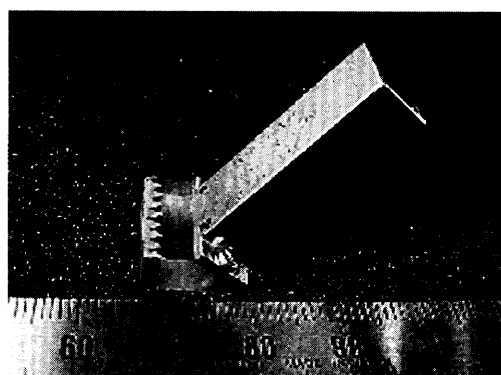


(b) 32chプローブ

図5 音場解析結果 チャンネル数の違いによる音場分布の違いを示す。
Results of acoustic numerical analysis



(a) SUS 鋳造材用



(b) 小口径配管用(シュー付)

図6 各種フェーズドアレイプローブの外観 設計・製作したフェーズドアレイプローブの一例を示す。
Appearance of various phased-array probes

必要がある。このような手法によりアレイパラメータを決定し、プローブを製作する。図6に製作したプローブの一例を示す。SUS 鋳造材用、小口径配管用以外にも容器管台丸み部用、配管高速探傷用などのプローブを製作した。

4. 探 傷 試 験

試作したフェーズドアレイ UT プローブを用いてモックアップ試験片に対する探傷試験を実施した。対象は配管と管台の溶接部であり、この部分は管台側から溶接部を検査しようとする。管台部と溶接余盛によりストレート部が短いため、UT プローブの前後走査が困難で、従来は探傷ができていなかった。そこで、小型フェーズドアレイ UT プローブをこの部分に適用し、超音波ビームをスキャンニングすることにより検査範囲をカバーし探傷を可能とした。探傷条件としては焦点深さ 8.7 mm、集束径 2.0 mm、スキャンニング屈折角 35~71°である。図7に板厚の 10% 深さの EDM スリットを入れたモックアップに対する試験結果を示す。表示は S スコープと呼ばれる表示方法であり、フェーズドアレイの屈折角に対応した範囲を表している。この図に溶接の開先図を重ねると、溶接部付近の 10% スリットが明りょうに検出できていることが分かる。複雑形状部への適用としてはこれ以外にも加圧器管台丸み部を対象としたプローブの開発も行っている。

またステンレス鋳造材への適用例として 2 探型フェーズドアレイ UT プローブを開発した。ステンレス鋳造材は先に述べたように、結晶粒の影響によりノイズが大きい材料であるが、フェーズドアレイ UT による超音波ビームの集束化と送受信の 2 探型プローブにすることにより、ノイズ低減を図った。このプローブを用いて板厚 75 mm の鋳造材テストピース中に付与した板厚の 10% 深さの EDM スリットも明りょうに検出できるめどを得ている。

5. む す び

従来 UT で探傷が困難な複雑形状部や高雑音材の探傷を目的として、超音波ビームのスキャンニングやフォーカシングが可能なフェーズドアレイ UT 技術の高度化を図った。具体的な開発項目としては以下を実施した。

(1) 微細加工技術を用いた高性能なコンポジット振動子の製

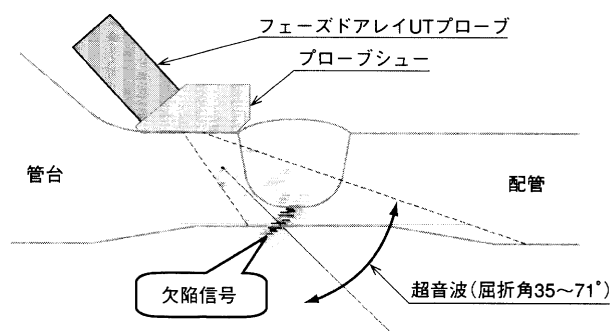


図7 欠陥検出波形例 EDM スリットが入ったモックアップに対するフェーズドアレイの探傷波形例を示す。
Result of mock-up test using phased-array UT

作

(2) 音場解析を利用したプローブの最適設計手法の確立

また、開発したプローブを用いて実際に配管の複雑形状部や SUS 鋳造材の探傷を行い、従来 UT で探傷が困難な部位の探傷めどが得られた。

現在、配管のエルボ部や管台溶接部等については既に実機に適用し、フェーズドアレイ UT の有効性を確認している。今後は各種配管や压力容器の仕様に合せたプローブを製作し、各種プローブの充実を図るとともに、フェーズドアレイの特徴を生かした探傷手法を開発する。これにより、フェーズドアレイ UT 技術の欠陥検出性や欠陥定量性を向上させ、更なる実機適用を推進していく予定である。

参 考 文 献

- (1) 杉山 進, マイクロマシーニングのセンサへの応用, J. IEEE Japan, Vol.117, No.12 (1997)
- (2) Bley, P. et al., The LIGA Process: A Microfabrication Technology, FED Journal Vol.5, No.1 (1994)
- (3) 実吉純一ほか, 超音波技術便覧 (新訂版), 日刊工業新聞社 (1985) p.368~369
- (4) Birks, A., Non Destructive Testing Handbook, second edition, v.7, Part 3: Tests with closely positioned transducers, ASNT publication