

# 曲面を持つ配管ノズル部から探傷可能な フェーズドアレイ超音波技術の開発

## Development of Phased Array Inspection Technique for Nozzle Pipes with Curved Surface

(株)東芝	三浦 崇広	Takahiro MIURA	Non-Member
(株)東芝	山本 摂	Setsu YAMAMOTO	Non-Member
(株)東芝	落合 誠	Makoto OCHIAI	Non-Member
(株)東芝	三橋 忠浩	Tadahiro MITSUHASHI	Non-Member
(株)東芝	安達 弘幸	Hiroyuki ADACHI	Non-Member
(株)東芝	山本 智	Satoshi YAMAMOTO	Member
(株)東芝	末園 暢一	Nobuichi SUEZONO	Non-Member

Inspection technique for complex surface profiles has been required in order to ensure the reliable operation and high operating rate of nuclear power plants, because many parts due to inspection have complex geometry. We have developed Phased Array (PA) ultrasonic testing with immersion technique which suitable to complex geometry. In this paper, we developed precise inspection technique for curvature surface profile such as a nozzle of pressure vessel. For curved surface profile, Synthesis Aperture Focusing Technique (SAFT) is adapted to measure surface profile, and delay time calculation code for not only curved surface but also free-formed surface is developed. In addition, reconstruction of inspection result by surface profile is also developed. Furthermore, we substitute water with immersion technique for developed gel which suitable to in air. Foregoing method we developed, inspection technique for curved surface and swell parts is achieved.

**Keywords:** Ultrasonic, Phased Array UT, SAFT, Immersion Technique, Gel

### 1. 緒言

原子力プラントにおいては、構造物の応力腐食割れ (SCC) への対策が重要である。特に構造健全性の評価のためには、き裂の有無や寸法を検査することが必要である。一方、構造物には一部形状が複雑なものがあり、超音波の探触子を検査対象へ接触させることが出来ず、探傷が困難な箇所が存在する。例えば、ノズル管台の一部は、要求検査範囲である溶接金属近傍に曲率が存在する場合がある。このような箇所は、配管内面から探傷するなどの代替検査が必要になる場合もあり、定検工期の長期化が避けられない。そこで、ノズル管台の外面から探傷ができれば、定検工期への影響を低減することが可能になる。

しかし、当該箇所から超音波探傷を実施する場合、曲面から超音波を入射する必要がある。今まで我々が開発・適用してきたフェーズドアレイ (PA) [1]-[4] は水浸法を用いているため、接触が困難な形状に適用可能である。しかし、曲面を持つ検査対象では超音波の探傷屈折角が大きく変化するために、探傷が困

難になる問題があった。

そこで、検査対象面が曲面を有していても高精度で超音波の送受信が可能であり、かつ探傷結果を表面形状に応じて再構成する技術を開発した。また、検査環境が気中の場合に、局所的に水浸環境を製作することなく曲面から超音波の送受信を実現することが可能な超音波の減衰が低く、柔軟性を持ち、曲面に密着可能な遅延材を開発した。

これらの要素技術を活用し、ノズル管台を模擬した曲面付き試験体に対する探傷性能を確認すると共に、実機適用における課題として挙げられる耐放射線性の影響確認と、溶接金属部のうねりなどの As Build 形状に対する適用性の検証したので報告する。

### 2. 探傷原理

超音波を被検査対象へ入射する場合、入射角度に応じて探傷屈折角が変化する。探触子を被検査対象に直接接触させず、水浸法等の探傷方法を使用する場合、被検査対象である鋼材音速と水の音速差が大きいため、入射角の変化以上に探傷屈折角が変化する。そのため、正確に被検査対象の形状を計測し、形状に応じた入射角を計算する必要がある [5]-[7],[10]。そこで、Fig.1 に示すフローを提案する。

被検査対象上に PA プローブを設置した後、表面の形状を計測する。ここで、被検査対象が単純な表面

連絡先: 三浦崇広, 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8, (株)東芝, 電話: 045-770-2307, E-mail: takahiro.miura@toshiba.co.jp

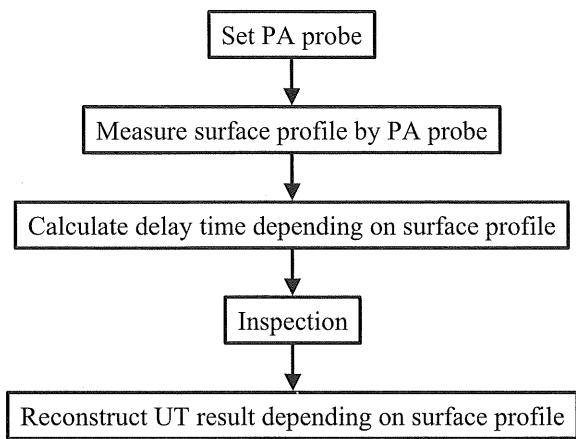


Fig.1 diagram for surface measurement

形状である場合は一般的な飛行時間法を用い、詳細な表面形状計測が必要な場合には、開口合成法(SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique)<sup>[8]-[9]</sup>を使用する。計測した表面形状に応じて、PAプローブの遅延時間を計算した後、探傷を行う。その後、表面形状に応じてB-scope等で得られる探傷結果を実際の形状寸法・位置に対応するように再構成する。更に、必要であれば次の探傷位置へ移動し、再度Fig.1のフローを実施する。

本手法により、表面が複雑な形状を持つ対象でも超音波探傷が可能になる。また、探傷結果を再構成することで、検査員の評価が容易且つ短時間で実施することが可能になり、定検工期短縮が可能になる。

## 2. 試験結果

試験体系図を Fig.2 に示す。ノズル管台を模擬した試験体を作製し、PA プローブを曲面上部設置した。ここで、PA プローブは周波数 5MHz、素子ピッチ 0.85mm、素子幅 10mm のものを使用した。試験体と PA プローブの間の空間には、水または開発したゲル状の遅延材(詳細は 2.4 項にて説明)をそれぞれ適用した。試験体の平坦部厚さは 20mm、曲率半径は 60mm とし、深さ d=5mm、8mm、11mm の EDM スリットをそれぞれ付与している。本構成により、表面形状計測、形状に応じた遅延時間計算、形状に応

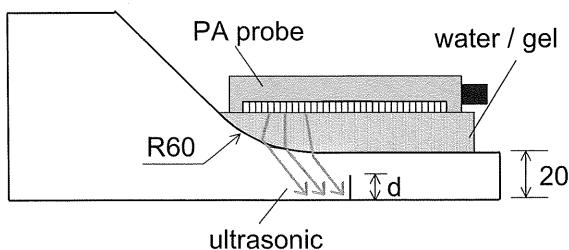


Fig.2 Experimental setup

じた再構成技術をそれぞれ実施した。

### 2.1 表面形状計測結果

曲面へ超音波を入射するためには、フェーズドアレイ探触子を用い、検査対象表面の形状を開口合成法にて計測した。飛行時間法と開口合成法のそれぞれの手法で計測した結果を Fig.3 に示す。飛行時間測定法では、曲面部分の誤差が大きくなるが、開口合成法では表面の形状を黒線で示した真値と誤差 0.04mm 以内で計測できることを確認した。

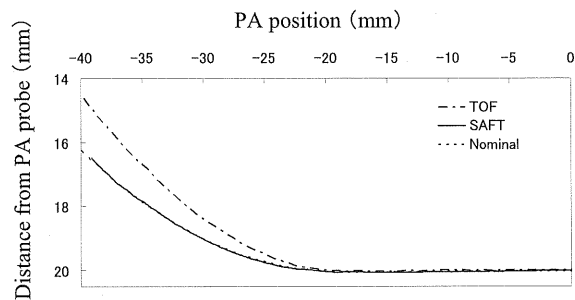
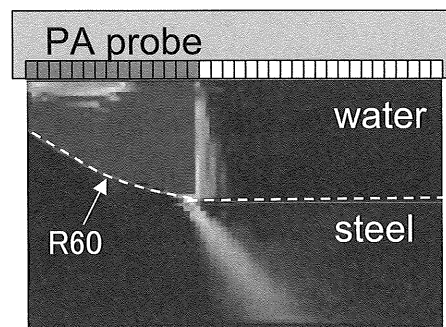


Fig.3 result of surface measurement

### 2.2 遅延時間計算

計測した表面形状に応じ、PA の遅延時間を計算するコードを開発した。平面と曲面が混在していても、被検査対象内における探傷屈折角および焦点位置が任意の位置に指定可能なコードとしている。ここで、本コードは単純な曲面形状だけでなく、自由曲面に対応することが可能であり、実機における余盛やうねりなどにも適用することが可能である。

計算した曲面对応遅延計算コードの結果の妥当性を確認するために、超音波シミュレーションソフトウェア CIVA を用い、音場の確認を行った。探傷屈折角 45 度、フォーカス深さ 12mm とした場合、曲面に非対応の遅延条件で入射した場合と曲面に応じた遅延条件で入射した場合の比較を Fig.4,5 に示す。Fig.4 では曲面部分から超音波が入射されていないが、Fig.5 に示す曲面を考慮した遅延計算の場合は曲面からも超音波が入射し、被検査対象内で音場が形成されていることが確認できる。



Delay without surface correction

Fig.4 Result of sound field simulation

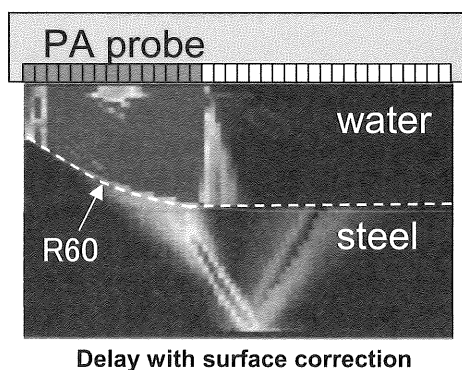
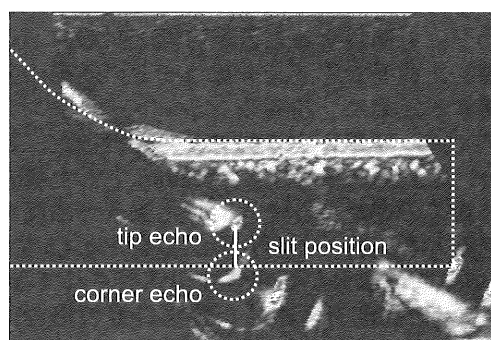


Fig.5 Result of sound field simulation

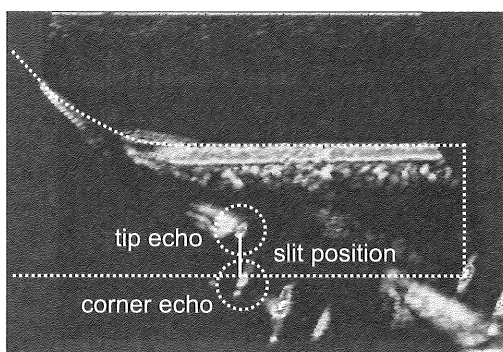
### 2.3 探傷画像再構成手法

曲面から超音波の入射を行った後、得られる指示エコーの解釈は重要である。一般的な探傷においては、表面形状の影響で生じる屈折率変化を音線追跡し補正しないと、正確な指示エコーの位置を特定することが出来ない。しかしこの解析評価は時間がかかる作業であった。そこで、形状に応じて探傷画面を再構成する技術を開発した。

表面の形状を考慮し超音波を入射した後、形状の補正を行わずに探傷結果 (B-scope) を表示させた結果を Fig.6(a)に、形状を考慮し再構成した結果を Fig.6(b)に示す。本試験体ではコーナーエコー部が曲面から探傷することになるが、Fig.6(a)ではコーナーエコー指示が広がりを持って検出されていること、



(a) Without surface correction



(b) With surface correction

Fig.6 Result of inspection for curvature

及びEDMスリットの位置に対して1mm以上外れていることが確認できる。そのため、従来は得られた指示を表面形状で補正し、指示位置の補正を実施していたため、解析に多くの時間を要していた。一方、Fig.6(b)ではコーナーエコー指示の広がり抑えられ、指示位置が明確になっていることが確認できる。EDMスリット位置とコーナーエコー指示の位置がほぼ一致しており、誤差は1mm未満である。

このように、形状を考慮して探傷結果を再構成すると、エコー指示が明確化することが確認できる。更に、B-scope上の指示位置がそのままエコー位置を反映するため、検査員の負荷低減および評価時間短縮となり、検査工期を短縮させることが可能となった。

### 2.4 曲面对応遅延材

検査対象が炉内等の水中環境下である場合は、水を遅延材とすることが可能なため、曲面形状でも超音波の送受信が可能である。しかし、気中環境下では局所的に水浸環境を形成する必要がある。これは、装置への負荷が大きく、また工期にも影響を及ぼす場合がある。一方、従来のアクリルやポリスチレンを用いた遅延材の場合、検査対象の表面形状に対して正確な形状を持つ遅延材を製作する必要がある。曲面に接触させるために、幾つかの手法が報告されているが<sup>[7],[11]</sup>、ここでは柔軟性を持ち、超音波の送受信が可能なゲル材を開発した。

ポリスチレン系ゲルを素材とし、Fig.1に示す形状に対応できる遅延材を製作した。外観写真を Fig.7に示す。ゲル材は平坦部で厚さ約20mmであり、R60の曲面に適用させるためにR形状を設け、全体として船形の形状を持たせている。Fig.7より、局所水浸無しで、曲面に密着できることが確認できる。本ゲル材を用いた場合と、水浸環境で計測した場合の探傷結果はほぼ同等であり、開発したゲル材により気中環境下で曲率を持った対象に局所水浸なしでも適用可能であることが確認できた。

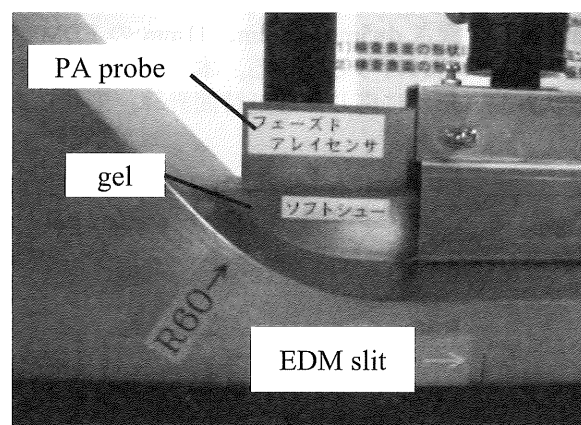


Fig.7 PA probe and gel

### 3. 実機適用へ向けた課題検証

#### 3.1 耐放射線確認試験

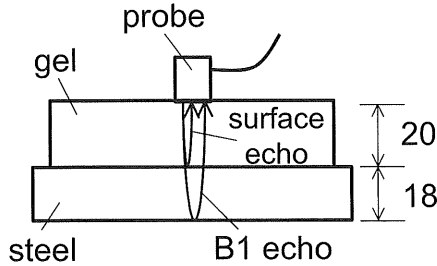


Fig.8 Experimental setup

開発したゲル材を原子力プラントで適用する場合、耐放射線性が問題になる。そこで、コバルト 60 を  $\gamma$  線源として照射試験を行ったゲル材に対して、超音波の伝播特性変化を確認した。ここで、ゲル材の厚さは 20mm、 $\gamma$  線照射は積算線量 0Gy、100Gy、200Gy、300Gy とした。

試験体系を Fig.8 に示す。ここでは周波数 5MHz、素子寸法  $\phi$  1/2inch の超音波探触子を使用し、菱電三菱製の超音波探傷器 UI-25 を用い、いずれのゲル材もゲイン 34.4dB にて計測した。板厚 18mm の試験体からの A-scope を Fig.8 に示す。また、0Gy 時の B1 エコーのピーク値にて規格化した B1、B2、B3 エコーの振幅変化を Table.1 に示す。今回開発したゲル材は、照射線量 300Gy のゲルでピーク値の低下が見られるが、200Gy までは大きな変化がないことが確認できる。また、300Gy 照射時は感度の低下が見られ

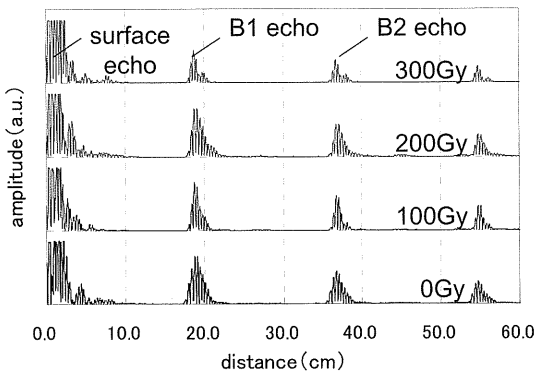


Fig.9 A-scope

	Table1 Bottom echo amplitude		
	Normalized Amplitude (%)		
	B1	B2	B3
0Gy	100.0	68.0	47.4
100Gy	101.0	71.1	50.5
200Gy	101.0	67.0	45.4
300Gy	69.1	47.4	34.0

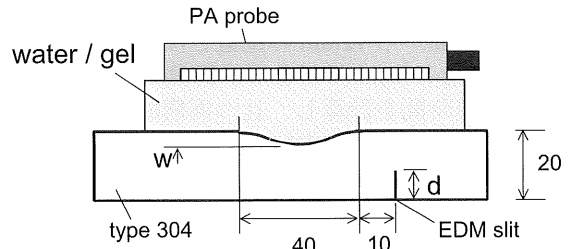
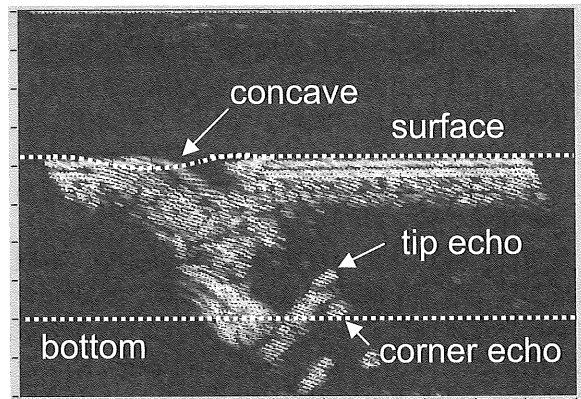


Fig.10 Experimental setup

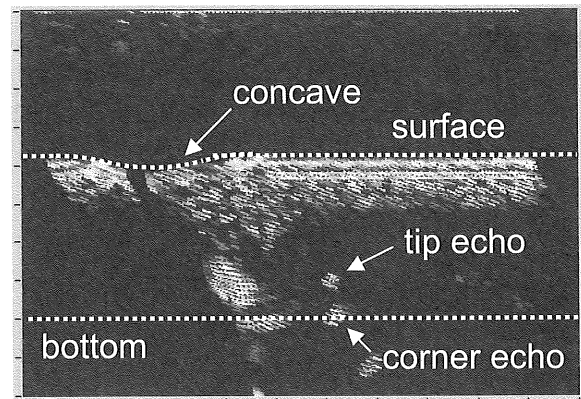
るが、探傷に問題が生じる程の影響は見られない。これらの結果から、適切な放射線環境下において、開発したゲル材の適用が可能であることが確認できた。

#### 3.2 溶接うねり影響確認結果

実機への適用において、検査対象となる溶接部は余盛や熱影響による歪などの形状変化が生じている可能性がある。そのため、Fig.10 に示す試験体を試作し、検出性を確認した。溶接部近傍に生じるうねりを模擬するため、幅 40mm、深さ  $w=1, 3$ mm の凹面を付与した。更に、図中に示すように欠陥深さ  $d=5, 8, 11$ mm の EDM を付与した。本試験体に対して、PA プローブを水浸法またはゲル材を遅延材としてそれぞれ計測を行った。深さ  $w=3$ mm、欠陥深さ  $d=8$ mm における探傷結果を Fig.11 に示す。Fig.11(a)



(a) Without surface correction



(b) With surface correction

Fig.11 Result of inspection for curvature

は凹面を考慮せず、45度の探傷屈折角でフォーカスを試験体表面から12mmの位置となる条件で探傷した結果、Fig.11(b)は凹面を形状計測し、その結果に応じて遅延時間を計算し、且つ再構成を行った結果である。Fig.11(a)では、EDMからのコーナーエコー、および端部エコーの指示位置が傾いて検出されている。また、形状影響によるノイズがコーナーエコー近傍に出現し、端部エコーやコーナーエコーの指示部との判別が困難になっている。一方、凹面の補正を行ったFig.11(b)においては、形状影響のノイズは確認されるものの、端部やコーナーエコーには影響を受けないように抑制されていることが確認できる。更に端部とコーナーの位置および検出感度に関しても向上していることが確認できる。

以上の結果より、実機の検査対象で問題となる余盛やうねりによる凹凸変化に対しても、本技術が有効であることが確認できた。

#### 4. 結言

定検工期の短縮を目指し、ノズル管台のような曲面を有するために超音波探傷が困難な検査対象に対して、形状影響を補正し超音波を入射し、得られたエコーの評価を容易にするために探傷結果を形状に応じて再構成する技術を開発した。また、本手法を水中だけでなく気中環境下でも適用できるように、曲面に柔軟に適用可能なゲル材による遅延材を開発した。本ゲル材により、ノズル管台を模擬した試験体において、局所的な水浸環境を作製することなく曲面から探傷が可能であることを確認した。更に、ゲル材は耐放射線性に問題がないことを確認した。また、余盛やうねりなどのAs Buildな形状変化に対しても水浸法とゲル材の両手法で探傷が可能であることを確認した。

今後は、SCCを用いた探傷精度の検証や、実機形状における性能を検証していく。また、本開発システムで検査工期をより短縮するために、表面形状計測の高速化を行うと共に、検査可能な部位拡大のため、2次元のPAアレイを用い3次元形状への適用技術の開発を進めていく。

#### 参考文献

- [1] 古村一朗、平澤泰治，“多機能フェーズドアレイ超音波探傷技術の開発”，検査技術，(2002)  
 [2] 平澤泰治，原子力プラント用フェーズドアレイ

超音波探傷技術，東芝レビュー，60[10]，48-49 (2005)

- [3] 平澤泰治，湯口康弘，村上功治，千星淳，大坪徹，成瀬克彦，“フェーズドアレイ UT による炉内配管への適用”，日本保全学会 第 5 回学術講演会 予稿集，147-151 (2008)  
 [4] T. Hirasawa, Y. Yuguchi, J. Senboshi, K. Murakami and K. Naruse, “Application of Immersion Phased Array UT Technique on Austenitic Stainless Steel and Nickel Based Alloy Welds,” Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, 782-788 (2009)  
 [5] 川原田義幸、平澤泰治、長井敏、岩井修，“複雑形状部に対する超音波探傷技術の開発”，日本非破壊検査協会 第 13 回超音波による非破壊評価シンポジウム (2005)  
 [6] Y. Kawaharada, T. Hirasawa, S. Nagai, O. Iwai, K. Naruse, “Application of the Phased Array UT Technique for the Inspection of BWR Internals,” International Conference on Nondestructive Evaluation in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2006)  
 [7] R. Long and P. Cawley, “Phased Array Inspection of Irregular Surface,” Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.26, 814-821(2007)  
 [8] Busse, L.J., “Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique,” IEEE Transactions UFFC 39, 174 (1992).  
 [9] H. Karasawa, M. Izumi, T. Suzuki, S. Nagai, M. Tamura and S. Fujimori, “Development of Under-sodium Three-dimensional Visual Inspection Technique Using Matrix-arrayed Ultrasonic Transducer,” Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol.37, No.9, 769-779 (2000)  
 [10] R. Long and P. Cawley, “Ultrasonic Phased Array Inspection of Welded Pipes Using Wave Mode-Converted at the Inner Surface of the Pipe,” Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 766-773 (2009)  
 [11] J. Russell and P. Cawley, “Development of a Membrane Coupled Conformable Phased Array,” Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 774-781 (2009)