

ポスト処理フェーズドアレイ UT による 鋳鋼内欠陥のサイジング精度向上

Sizing Accuracy Improvement of Defects in Cast Austenitic Stainless Steel
Using Post Processing Phased Array UT

株式会社 東芝	山本 撰	Setsu YAMAMOTO	Non-Member
株式会社 東芝	千星 淳	Jun SEMBOSHI	Non-Member
株式会社 東芝	菅原 あずさ	Azusa SUGAWARA	Non-Member
株式会社 東芝	土橋 健太郎	Kentaro TSUCHIHASHI	Non-Member
株式会社 東芝	安達 弘幸	Hiroyuki ADACHI	Non-Member
株式会社 東芝	日隈 幸治	Koji HIGUMA	Non-Member

Abstract

Phased array ultrasonic testing (PAUT) has performed an important role for plant maintenances. However, many parts of cast austenitic stainless steels are difficult to be inspected by UT owing to their noises from large grains. We have been noticing that depending on the PAUT conditions, (e.g. incident angles and focal depths), the tendency of echoes from defects are different from that of grain noises. Thus we have developed new PAUT system which can analyze the tendency of echoes from comprehensive PAUT conditions. Moreover, in order to minimize the inspection time on-site, we have combined the algorithms and the full matrix capture (FMC) data acquisition system which can obtain full pattern raw waveforms. By synthesizing raw waveforms, any PAUT conditions could be arbitrary constructed off-site. In this paper, principles and setup of the system would be shown. Furthermore, results of performance verification using slits which fabricated in thick cast austenitic stainless steels would be represented.

Keywords: Ultrasonic testing, Phased array UT, Post processing, Cast austenitic stainless steel,

1. 緒言

原子力発電所等、高い安全性が要求されるプラント構造物健全性保証においては、非破壊検査技術として超音波探傷 (UT: Ultrasonic Testing) が広く用いられている。中でも、探傷位置や探傷屈折角、フォーカス深さなどを電子走査により可変なフェーズドアレイ超音波探傷 (PAUT: Phased Array Ultrasonic Testing) 技術は、機械走査や探傷条件に応じたプローブ入替えを要する単眼プローブに置き換わって、使用されるケースが増えてきている [1,2]。特に原子力発電プラントにおいては、シュラウド溶接線や制御棒駆動機構 (CRD: Control Rod Drive) ハウジング/スタブチューブ溶接部等に適用され [3]、実績を上

げてきた。しかしながら PAUT は、複雑形状表面をもつ対象には超音波の入射やプローブ設置が困難なこと、溶接部やステンレス鋳鋼の場合は粒界や溶金境界のノイズが欠陥と判別困難なことから、それらには十分な適用がなされてこなかった。

複雑形状部に対しては、対象形状にあわせて変形するフレキシブルプローブや [4]、対象にフィットするソフトシュー (ゲル等) と形状に合わせたビーム制御を用いることにより、その改善が図られてきた [5,6]。

溶接部やオーステナイトステンレス鋳鋼のような粗大化した粒界を持つ対象も、その改善のために様々な提案がなされてきた [7]。それらの多くは、対象に応じて最適なプローブを用いる、もしくは複数のプローブから得たデータを統合してノイズと欠陥エコーを識別したりサイジングしたりするものであり、各々に大きな効果が期待できる。一方で、対象に応じたプローブの作り込みや評

連絡先: 山本撰、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8、
(株) 東芝 電力・社会システム技術開発センター
E-mail: setsu.yamamoto@toshiba.co.jp

価方法の検証が必要となる。

著者らは、鋳鋼内探傷技術の汎用化を目的として通常のアレイドープを用いて得られた複数のリニアスキャン結果からノイズと欠陥エコーを識別する技術を開発した。粒界ノイズと欠陥でエコー強度の探傷屈折角依存性が異なることに着目し、複数の探傷条件（例えば探傷屈折角）を連続的に解析し、強度の変化傾向を評価することで、同強度の指示であってもノイズと欠陥が識別可能となる。しかし、探傷条件を増やすことで現場の検査に要する時間も増加する問題が生じる。そこで、これまでナトリウム中の可視化技術等[8]で得た知見をもとに、全パタンの生波形を同時に収録しソフトウェア上で任意の探傷条件結果を得るポスト処理技術[9,10]と、上述の判定アルゴリズムを組合せた PAUT システムを構築した。これにより、現場での検査時間を増やすことなく、膨大な探傷条件の評価が可能となる。また、任意条件のデータが得られる特性を生かして、複数探傷屈折角条件ので得られた B-Scope を合成して SN 比の高い映像を得る手段も提案する。本論文では、システムの原理や構成を述べるとともに、オーステナイトステンレス鋳鋼内に導入した模擬欠陥（スリット）での性能検証結果を示す。

2. 測定原理

本技術のフローを Fig.1 に示す。本技術は、オンサイトにおける全パターン波形収録と、オフサイトでの波形処理の 2 段階が存在する。波形収録では、アレイドープを構成する n 個の素子のうち 1 つずつ用いて超音波を送信し、計測対象表面で反射した超音波を全ての素子（素子 1 ~ 素子 n ）で受信することにより、 $n \times n$ パタンの生波形を得る。ここで、超音波送信時に励起する素子数を複数にすることで、感度向上が図れることがわかっており[11]、本システムもその機能を実装している。オフサイトの波形処理は、(1) 指定した探傷屈折角に応じた遅延時間にしたがって生波形を合成することにより探傷屈折角ごとの B-Scope を得るステップ、(2) 指定領域におけるエコー強度の探傷屈折角依存性を算出するステップ、(3) 探傷屈折角のある範囲の B-Scope 画像を合成するステップから成る。オフサイトにおける波形処理について詳述する。(1) のステップにおいては、所望の探傷屈折角およびフォーカス深さに相当する遅延時間および送受信素子指定に従って、生波形を時間軸移動して位相整合し、B-Scope を得

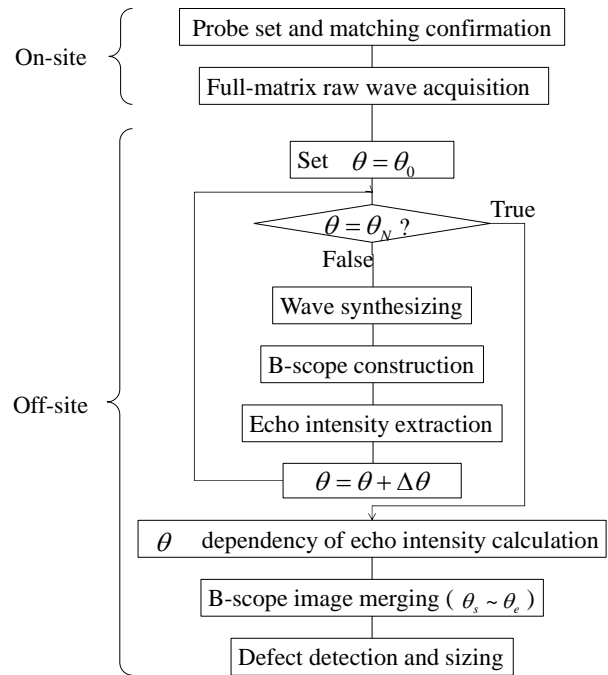


Fig.1 inspection flo chart

る。この時、探傷屈折角の範囲を θ_0 から θ_N に定め、増分を $\Delta\theta$ とする。(2) 上記ステップで得られた B-Scope における特定画像範囲に着目してそのエコー強度を抽出し、横軸を探傷屈折角、縦軸をエコー強度とした強度の探傷屈折角依存性が得られる。ここで、エコー強度の変化傾向を観察することで、ノイズと欠陥での強度変化傾向の違いが判別される。(3) 上述した探傷屈折角依存性を考慮し、任意の探傷屈折角範囲（ここでは θ_s から θ_e までとし、それぞれ θ_s と θ_e は、 $\theta_0 \leq \theta_e < \theta_s \leq \theta_N$ の範囲を満たす）を選択し、当該範囲の B-Scope を合成することで SN 比の高い合成 B-Scope が得られる。全映像化範囲に焦点を結んで映像化する開口合成法もしくはそれに類する TFM (Total Focusing Method) 等の映像化法と異なり、本技術は任意の角度範囲の情報を選択して合成可能である。そのため、従来の 45° 探傷や 60° 探傷といった探傷屈折角の情報を残したまま、SN 比の高い B-Scope を得られるのが特徴である。また、異方性材料等音速が異なる対象では、開口合成法のように全ての波形を合成する処理を行うと伝搬経路によって音速が変化し、必ずしも欠陥エコーが強め合わない場合がある。その観点からも、任意の探傷屈折角を選択して合成可能な本システムは、開口合

成で得られない欠陥の検出に有効である可能性がある。

3. 試験装置

3.1 装置構成

開発した PAUT システムの概念図を Fig.2 に示す。探傷器は東芝製 3 次元 UT 装置 (T-PA256 (3D)) を用いた。T-PA256(3D)は、256ch のパルスレシーバを有し、最大 256ch のアレイプローブを同時励起した探傷が可能である。また、全波形収録機能を有しており、256ch×256ch の受信波形をアウトプットできる。その際、全波形データ量が 500MB を超える大容量となる場合があるため、光ファイバ伝送を備えた高速データ伝送回路を設けることで PC へのデータ伝送速度 500MB/s を実現した。PC には受信信号をオフライン処理する GPU ユニット 4 枚から成る高速信号処理システムを実装した。

通常ポスト処理を行う場合、超音波の送信時は 1 素子のみを用いるが、本システムでは送信時に同時に駆動する素子数を 1ch から 256ch まで任意に定められる。本論文では、励起に 1ch を用いた場合と、3ch を用いた場合で結果を比較した。また、3ch を同時駆動する場合は平面波となるよう、遅延時間は設けなかった。

プローブには、128ch のリニアアレイ (中心周波数 2 MHz、ピッチ 0.85 mm、奥行幅 25 mm) を使用した。アレイプローブと試験体の間は 45mm の隙間を設けて水を充填し、水浸法による探傷を行った。

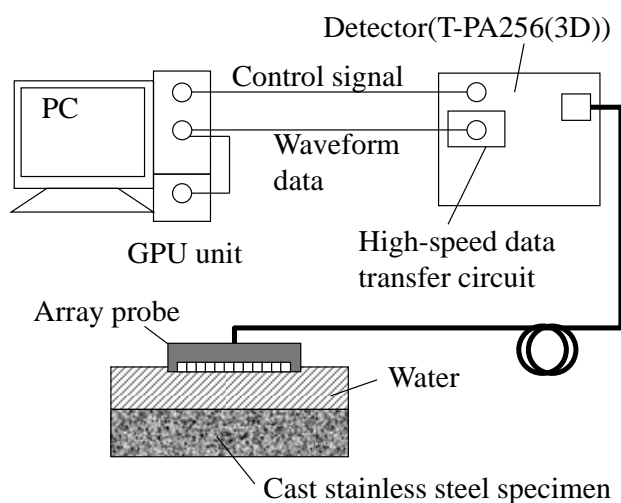


Fig.2 xperimental setup

3.2 試験体

本技術の検証で用いた模擬欠陥を導入した試験体の模式図を Fig.3 に示す。試験体材料は SUS316L 系ステンレス鋼とし、試験体形状は板厚 51 mm、長さ 250 mm、奥行幅 40 mm とした。EDM スリットは、深さ 8.5 mm、奥行幅 20 mm、開口幅 1 mm 以内の条件とし、試験体中心から長手方向に 5 mm ずれた位置に導入した。探傷面となる試験体表面 (上面) は、サンドブラスト加工を施しただけの、鋳肌面とした。

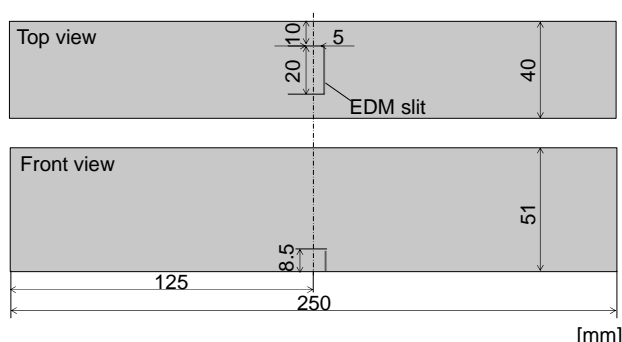


Fig.3 D slit fabricated specimen

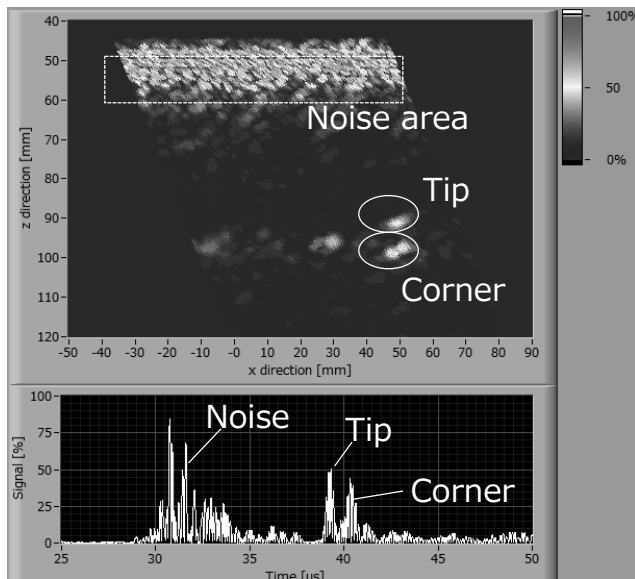
4. 試験結果

4.1 EDM スリット試験体の測定結果

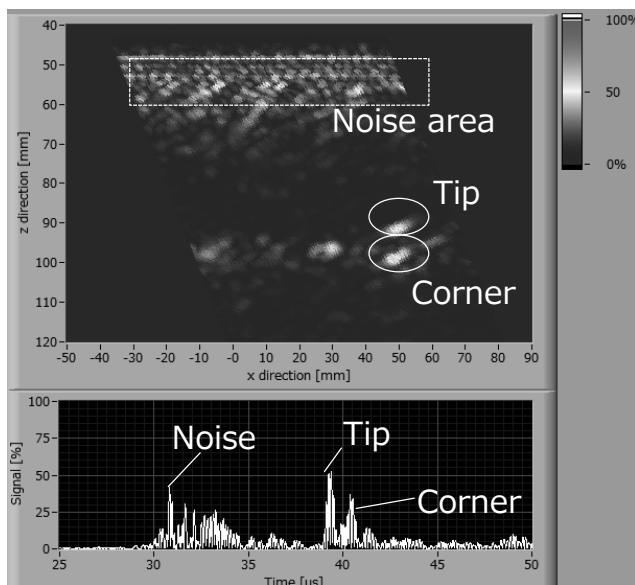
EDM スリットを導入した試験体の測定結果を Fig.4 に示す。ここで示すのは、全て得られた生波形をポスト処理して構成したリニアスキャンの B-Scope である。Fig.4(a) は送信に 1ch を用いた場合、Fig.4(b)は送信に 3ch を用いた場合であり、それぞれ B-Scope の探傷屈折角は 25°、同時駆動素子 (合成に用いる生波形数) 数は 32ch 分とした。ここで、それぞれの B-Scope におけるソフトゲインはスリット端部エコーの波高値が 50%となる条件で統一した。この結果、3ch 送信時のノイズ波高値が 1ch 送信時のそれに対し半分以下の値を示すことがわかった。

また、1ch 励起と 3ch 励起のそれぞれについて、スリット端部および粒界ノイズの探傷屈折角依存性を Fig.5 に示す。Fig.5(a)では、スリット端部エコー、Fig.5(b)にはノイズの探傷屈折角依存性を示す。スリット相当位置は B-Scope 中の実線、ノイズ相当領域は破線の内部とした。ここで、1ch 送信時の結果を示したのは塗りつぶしの実線、

3ch 送信時の結果を示したのが、白抜き破線の破線である。スリット端部はどちらにおいても 25° 付近で明瞭な強度の



a cope image of slit 1ch

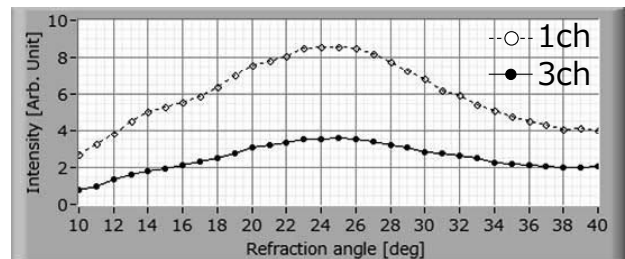


b cope image of slit 3ch

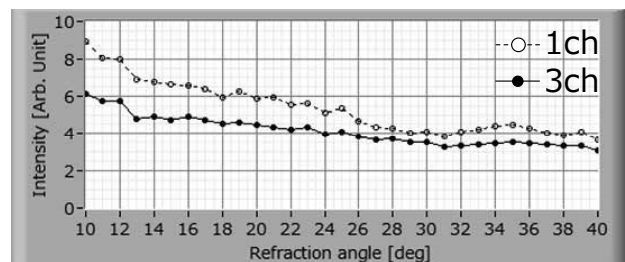
Fig.4 Measurement results of slit in cast austenitic stainless specimen

ピークが得られたが、ノイズはどちらの結果においても明確なピークを示さなかった。また、励起素子数で傾向を比較すると、1ch 送信、3ch 送信ともに端部エコーは明

瞭なピークが観察されたが、3ch の端部エコー強度の方が高く、1ch に対して 3.8 倍であった。一方で、ノイズ強度は 1ch 送信時でも 3ch 送信時でも大きな違いは得られず、最大でも 1.1 倍程度しか違わなかった。この結果より、探傷屈折角依存性で見ても、励起素子の増加が有効であることがわかった。



a refraction angle dependency of slit tip echo intensity

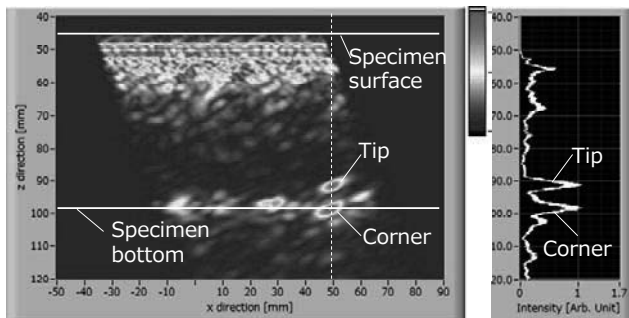


b refraction angle dependency of noise intensity

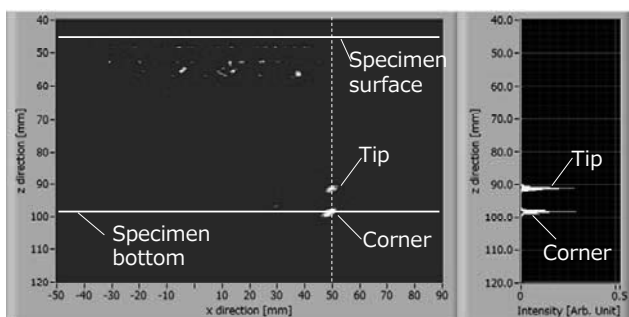
Fig. 5 Analyzing result of refraction angle dependency of echo intensity

次に、2章にて定義した B-Scope 映像の合成結果について述べる。ここでは 3ch 送信のデータを用い、それぞれ θ_s を 20°、 θ_e を 30°、 $\Delta\theta$ を 1° として探傷結果を合成した。Fig.6 にその合成結果を示す。Fig.6(a) は単純な加算平均の結果であり、Fig.6(b) は本システムを用いて得られた合成結果である。それぞれの B-Scope 横に示したのは、図中破線断面における強度波形である。加算平均結果では、スリット端部とコーナ部のエコーに加えて表面近くの粒界ノイズが高強度で検出された。その一方、本システムで合成した結果では、それらのノイズが低減されスリット端部とコーナ部のエコーのみが明瞭に映像化できた。

これらの結果から、本技術は欠陥エコーと同等の強度をもつ粒界ノイズの低減が可能であり、ステンレス鋼の探傷精度向上に有効であることが確認できた。



a scope image Averaging



b scope image merging

Fig. improvement of scope using plural refraction angle conditions

5. 結言

本論文では、全パタンの生波形を同時に収録しソフトウェア上で任意の探傷条件結果を得るポスト処理技術と、探傷屈折角に応じて欠陥エコーとノイズで強度変化が異なることを利用した判定アルゴリズムを組合せた PAUT システムについて述べた。

本システムを用いてステンレス鋳鋼に導入したスリットで性能検証を行った。超音波送信時に同時励起する素子を 1ch から 3ch に増加させたことで、スリット端部エコー強度が 3.8 倍に向上することが確認できた。また、特にスリット端部エコー強度の卓越していた探傷屈折角 25° を中心に、B-Scope を合成したところ、粒界ノイズが大幅に低減され、スリット端部とコーナ部だけが高い SN 比で映像化された。

本システムは、エコー強度の探傷屈折角依存性を解析できる性能を有することから、単にステンレス鋳鋼における UT の SN 比を向上させるだけでなく、これまで検査員の経験や技量に基づいて識別していたノイズと欠陥を

客観的な傾向に基づいて判定できるポテンシャルを持っており、サイジング精度の向上に寄与できる可能性がある。

今後は、本システムを疲労き裂や応力腐食割れ等の実欠陥に適用し、その有効性を検証していく。

参考文献

- [1] 森忠夫、柏谷英夫、内田邦治、古村一朗、長井敏：電子走査形超音波探傷技術および装置、日本機械学会誌、87(793)、1984、pp.1341-1346
- [2] I. Komura, S. Nagai, H. Kashiwaya, T. Mori and M. Arii ; Improve Ultrasonic Testing by Phased Array Technique and its Application, Nuclear Engineering and Design, 87, 1985, pp.185-191
- [3] I. Komura, S. Nagai and J. Takabayashi ; Water gap phased array UT technique Technique for inspection Inspection of CRD Housing/Stub tube Tube weldmentWeldment, Proc. of 14th Int. Conf. on NDE in Nuclear Industry, 1996, pp.305-310
- [4] S. Mahaut, O. Roy, C. Beroni and B. Rotter; Development of Phased Array Techniques to Improve Characterization of Defect Located in a Component of Complex Geometry, Ultrasonics 40, 2002, pp.165-169
- [5] R. Long and P. Cawley ; Phased Array Inspection of Irregular Surfaces, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation ,25, 2006, pp. 814-821.
- [6] 三浦崇広、山本撰、落合誠、三橋忠浩、安達弘幸、山本智、末園暢一：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探傷技術の開発、日本保全学会第 7 回学術講演会要旨集、2010、pp.50-54
- [7] 安全研究年報（平成 24 年度）、独立行政法人原子力安全基盤機構、2013
- [8] M. Komai, M. Izumi, H. Karasawa, N. Satou, T. Suzuki, M. Maruyama, T. Shioyama, T. Terashima, S. Nagai, M. Tamura and S. Fujimori; Development of Under Sodium Inspection Techniques for FBR(3), Proceedings of ICON 6, 1997, ICONE6-6122
- [9] C. Holmes, B. Drinkwater and P. Wilcox: The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method, Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 64(11), 2004, pp.677-680

- [10] 中畑 和之, 平田 正憲, 廣瀬 壮一: 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成、非破壊検査 56(6)、2010、pp.277-283
- [11] H. Karasawa, T. Ikeda, S. Matsumoto, T. Hamajima and H. Isobe; 3D-SAFT ULTRASONIC INSPECTION EQUIPMENT “MatrixeyeTM”, JRC-NDE 2009, 2010