

複雑形状をもつオーステナイト系ステンレス 鋳鋼部材への UT 適用検討

UT application examination for complicated shape part of
cast austenitic stainless steel

東芝エネルギーシステムズ(株)	山本 撰	Setsu YAMAMOTO	
東芝エネルギーシステムズ(株)	菅原 あずさ	Azusa SUGAWARA	
東芝エネルギーシステムズ(株)	千星 淳	Jun SEMBOSHI	
東芝エネルギーシステムズ(株)	落合 誠	Makoto OCHIAI	Member
東芝エネルギーシステムズ(株)	土橋 健太郎	Kentaro TSUCHIHASHI	
東芝エネルギーシステムズ(株)	山本 智	Satoshi YAMAMOTO	Member

Abstract

Recently, an application target of the phased array ultrasonic testing (PAUT) has been extended. However, it was known that PAUT was difficult to apply to components with complex and high damping materials such as cast austenitic stainless steel (CASS). The Authors have developed shape adaptive beam forming PAUT system for complicated shape parts and comprehensive PAUT conditions analysis system for CASS. Each PAUT systems based on full matrix capture (FMC) technique. In order to enhance an applicability of each system, we have combined them. For the verification of a detectability of combined system, joint part of CASS valve and piping which have axial thermal fatigue cracks was fabricated as a target. In this paper, principles and performance verification of the system would be represented.

Keywords: Ultrasonic testing, Phased array, Linear scanning, Complicated shape part

1. 緒言

高度な安全性が求められる原子力発電プラントでは、き裂等のサイジング手法として通常の超音波探傷試験 (UT) にかわって、フェーズドアレイ超音波探傷 (Phased Array Ultrasonic Testing: PAUT) 技術が適用されるケースが増えてきている[1,2]。通常の単眼プローブを用いた UT は探傷屈折角やフォーカス深さが固定されてしまうが、PAUT はそれらが電子走査により可変であり探傷結果の図示も容易なことから今後も適用範囲が拡大していくと考えられる。

しかしながら、PAUT であっても表面形状が複雑だったり、オーステナイト系ステンレス鋳鋼 (Cast austenitic stainless steel: CASS) 等の高減衰材で構成されていたりす

る対象には適用が十分に進んでこなかった。前者はプローブの安定した接触が困難なことや、超音波の予期せぬ反射や屈折のため探傷屈折角の制御が困難なことが原因であった。そのため形状にあわせたビーム制御や、柔軟性をもつプローブの開発等が提案されてきた[3-6]。後者は、粗大な粒界における超音波伝搬効率の低下や粒界からの散乱ノイズにより、検出対象である欠陥からの指示が十分な感度で得られないことが原因であった。これらに対しても、フォーカス型プローブや探傷屈折角等の条件を詳細に評価技術に開発により、探傷精度の向上が図られてきている[7-10]。

一般に、製造方法から鑑みても CASS で構成されている部材は、バルブや曲管部のように探傷面が曲面であることが多い。そのため、上記技術はそれぞれ単体ではなく、組合せて用いることで大幅に PAUT 適用範囲の拡大が見込まれる。著者らの開発した上記技術はいづれも全波形をサンプリングしポスト処理で様々な PAUT 条件を再現可能な Full matrix capture (FMC) をベースとしてい

る[5,6,8-11]。そこで、著者らはFMCをベースとして両技術を組合せたPAUTシステムを開発した。両技術を用いることで初めて探傷が可能なモデルとして、バルブ配管継手の軸方向疲労き裂を想定し、探傷性能検証を行った。本論文では、原理の解説および試作試験体で測定した探傷結果について述べる。

2. 原理

本技術を用いた場合の、ある1測定点におけるデータ取得から信号処理完了までのフローをFig.1に示す。step1として、FMCで知られているように送信素子を切り替えながら1素子または複数素子で超音波を送信し、全素子で受信することで全パタンの生波形を取得する。step2として、得られた生波形を元にして開口合成法等を用い表面形状を取得する。step3として、step2で得た表面形状を反映し、所望の探傷屈折角や焦点深さといった探傷条件での遅延時間を算出する (Fig.2)。step4でその遅延時間をもとに生波形を合成し、B-Scopeを得る。step3およびstep4をstep3に入力する探傷条件を変えながら所望の回数(ここで、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)繰り返すことで、鋳鋼内のノイズと欠陥の評価に必要な探傷条件を得ることができる (Fig.3)。ここ

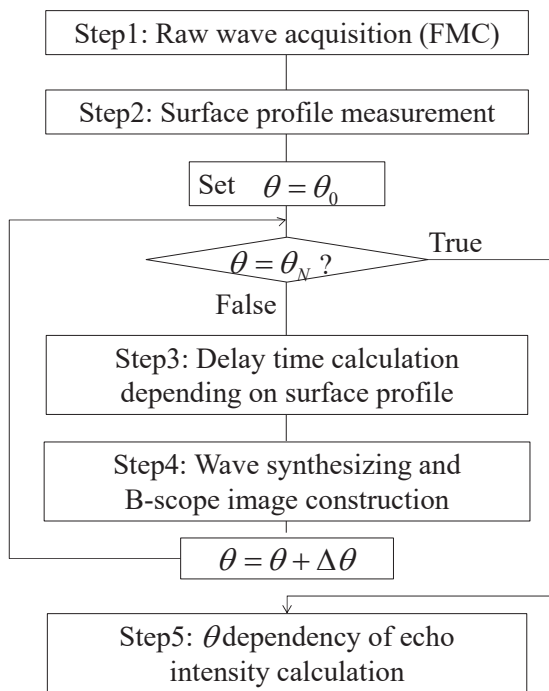
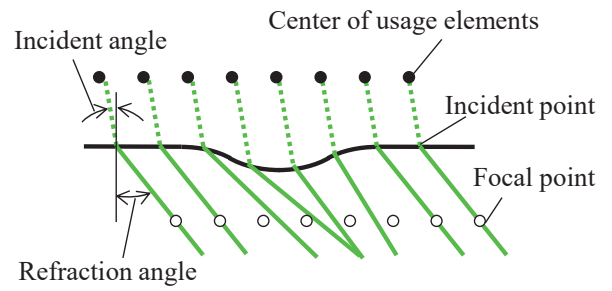
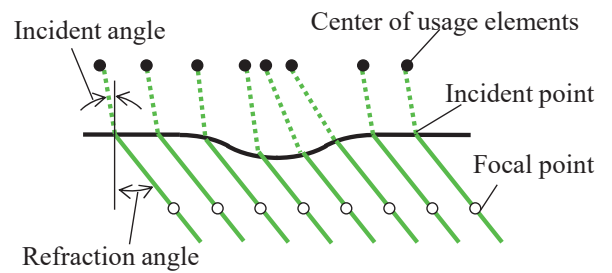


Fig.1 Measurement flow of this PAUT system



(a) Conventional PAUT



(b) Shape adaptive beam steering PAUT

Fig.2 Schematic diagram of sound beam of PAUT

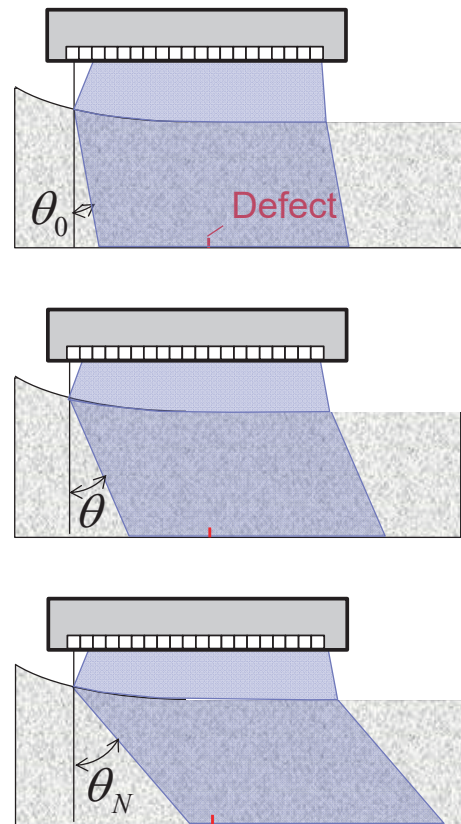


Fig.3 Schematic diagram of Refraction angle scanning from θ_0 to θ_N

で得た種々条件の探傷結果を用い、step5で各指示の θ 依存性を評価することで、欠陥とノイズの弁別を行う。このうちstep1のみがオンサイトで必要な工程であり、それ以降はすべてオフライン、ポストプロセスでの信号処理となる。

3. 性能検証

3.1 試験体設計

開発した PAUT システムの探傷性能を検証するため、軸方向、周方向両方に傾きを有するバルブ-配管継手部の形状を模擬した試験体を試作し、周方向探傷でしか検出できない軸方向の疲労き裂を導入した。Fig.4に試験体の概念図を示す。Fig.4(a)は、疲労き裂導入部の軸方向断面図、(b)は、A-A'面における周方向断面図である。図中数字の単位は全て mm である。本試験体はあくまで形状模擬試験体のため、溶接中心に相当する位置も含めて一体の CASS インゴットから削り出して加工した。疲労き裂導入位置は、溶接中心線に相当する位置から軸方向に定められた探傷範囲の中で、表面が最も軸方向に曲面を有する位置、すなわち軸方向にも周方向にも形状補正が必要な位置を選択した。き裂形状はアスペクト比 3:1 とし、観察可能なき裂長さが 9mm になるように管理して導入した。

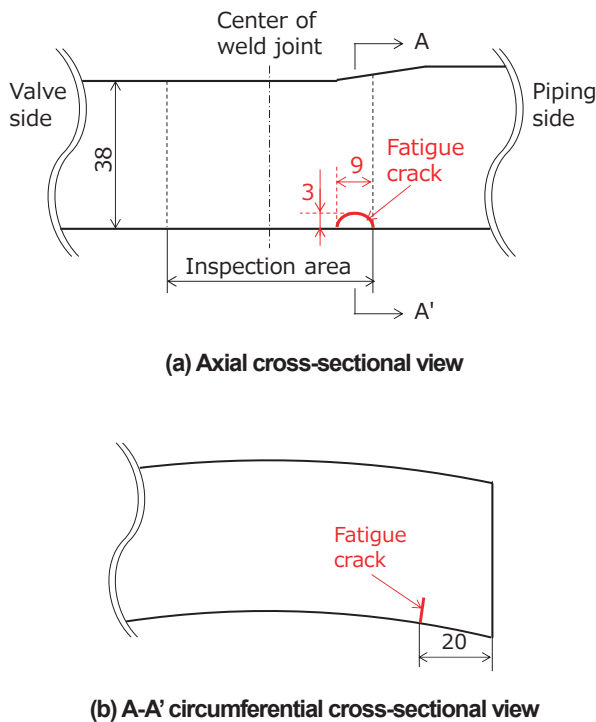
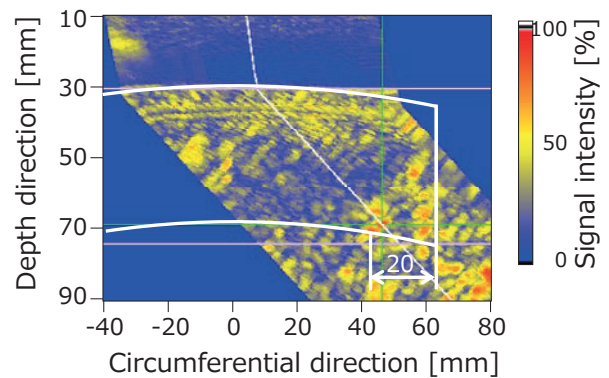


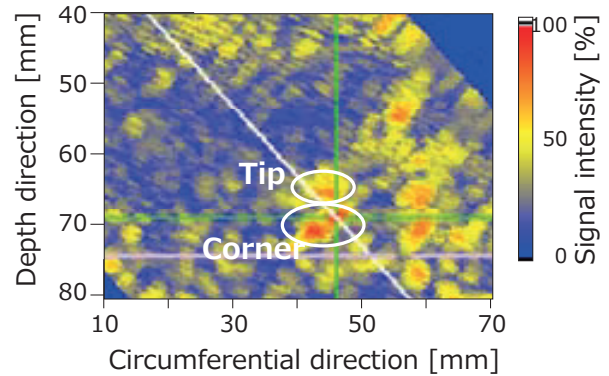
Fig.4 Schematic diagrams of specimen

3.2 探傷結果

探傷結果について述べる。プローブは中心周波数 2MHz、縦波、素子数 128ch のものを用い、プローブ下端と曲率部と先端の距離が 30mm となるようにギャップを設けて水浸法で測定した。Fig.5に探傷屈折角 45° での探傷結果 (B-Scope) を示す。縦軸は深さ方向、横軸は周方向を表しており Fig.5(a)は全体図、(b)は指示部の拡大図である。表面の曲率に合わせて超音波が試験体内に入射し、き裂コーナおよび端部の位置で指示が得られていることを確認した。Fig.6に探傷屈折角を 37° から 53° まで 2° 刻みに変化させて測定したときの B-Scope を示す。疲労き裂近傍の座標に着目してコーナおよび端部の指示が検出されているかを評価した。探傷屈折角 37° の時点でコーナの指示は得られており、 41° から分離した端部指示が得られるようになった。その後、 49° まで連続して分離した指示が得られ続けたが、 51° 以降は両指示とも識別が困難になった。このようにある探傷屈折角を中心に連続した角度で指示強度を有する指示を見出すことで欠陥と



(a) Normal B-Scope image



(b) Magnified B-Scope image

Fig.5 B-Scope images of circumferential flaw detection ($\theta = 45 \text{ deg}$)

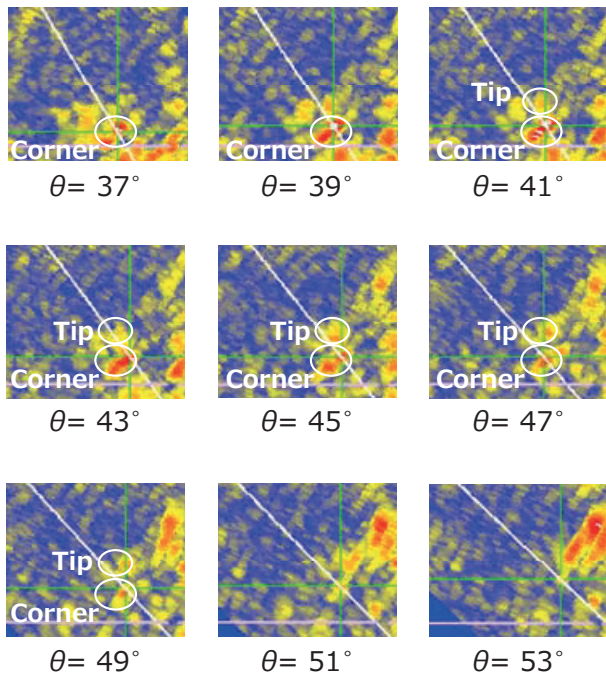


Fig.6 Sequential B-Scope images
 $(\theta_1 = 37 \text{ deg}, \theta_n = 53 \text{ deg}, \Delta\theta = 2 \text{ deg})$

ノイズを弁別できることが著者らの知見で得られており[8,9]、ここで得られた指示は疲労き裂のコーナと端部であると推定できることがわかった。両指示の距離を探傷屈折角 45° 時に A-Scope 指示位置から評価したところサイジング深さは約 3.5mm であり、設計深さである 3mm とよく一致した。

4. 結言

本論文では、複雑形状かつ高減衰な材料を対象として新たに開発した PAUT システムの原理および探傷性能検証結果について述べた。材料としてはオーステナイト系ステンレス鋼、形状としてはバルブ-配管継手の複雑形状部を探傷性能検証対象とし、軸方向に疲労き裂を導入した継手形状模擬試験体を試作した。開発した PAUT システムを用いて検証用試験体を測定した結果、深さ 3mm 疲労き裂の検出に成功した。また、本システムでのサイジング結果と疲労き裂設計深さの誤差は約 0.5mm であった。今後は測定に供するき裂の数や種類を更に増やしたり使用する周波数を変化させたりすることで、本システムの有効性および汎用性を検証していく。

参考文献

- [1] 森忠夫、柏谷英夫、内田邦治、古村一郎、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 and J. Takabayashi ; Water gap phased array UT technique for inspection of CRD Housing/Stub tube weldment, Proc. of 14th Int. Conf. on NDE in Nuclear Industry, 1996, pp.305-310
- [3] 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
- [4] R. Long and P. Cawley ; Phased Array Inspection of Irregular Surfaces, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation ,25, 2006, pp. 814-821.
- [5] 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
- [6] Toshiba corporation; Phased array ultrasonic testing for components with complex surface geometry, EJAM vol.5 No.1, 2013, NT55
- [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] S. Yamamoto J. Semboshi, A. Sugawara, M. Ochiai, K. Tsuchihashi, H Adachi and K. Higuma; Phased array ultrasonic inspection technique for cast austenitic stainless steel parts of nuclear power plant, Proceedings of ICONE 24, 2016, ICONE24-60256
- [9] 山本撰、千星淳、菅原あずさ、土橋健太郎、安達弘幸、日隈幸治：ポスト処理フェーズドアレイ UT による鋼内欠陥のサイジング精度向上、日本保全学会第 13 回学術講演会要旨集、2016、pp.253-258
- [10] 山本撰、菅原あずさ、千星淳、落合誠、土橋健太郎、山本智：大型素子アレイプローブを用いたフェーズドアレイ UT リニアスキャンの分解能向上、日本保全学会第 14 回学術講演会要旨集、2017、pp.528-531
- [11] 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