

鑄造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の 大型探触子による深さサイジング性評価

An Evaluation of depth sizing ability of ultrasonic testing
by the large aperture transducer for axial crack in cast stainless steel pipe weld

西川 嘉人 (Yoshito Nishikawa) *1

要約 加圧水型軽水炉の1次冷却材管等に使用されている鑄造ステンレス鋼は、その結晶構造により超音波の減衰や散乱が大きいため、超音波探傷試験は困難であるとされている。INSSでは、大口徑集束2振動子探触子を用いた自動超音波探傷法を、鑄造ステンレス鋼中の溶接線を横切る疲労き裂の探傷に適用し、欠陥の検出性が良好であることを確認してきたが、本研究では欠陥の深さサイジング性について検証した。板厚69mmに対して約20mm以上の疲労き裂は、深さサイジングの可能性が高い。

キーワード 超音波探傷, 深さサイジング, 鑄造ステンレス鋼, 大型探触子, 疲労き裂, 1次冷却材管

Abstract Ultrasonic testing is difficult for cast stainless steel which is used as the material of main coolant pipes in pressurized water reactors, because of the large attenuation and scattering of ultrasonic waves caused by its macro structure. Ultrasonic testing for the axial fatigue crack on welding area in the test piece of the cast stainless pipe was performed, using the double large aperture ultrasonic probes. In this study, depth sizing of defects was performed under the positive result of the detection of defects in former study. As a result, sizing of defects with over 20mm target depth for the specimen thickness 69mm is highly possible.

Keywords ultrasonic testing, depth sizing, cast stainless steel, large aperture probe, fatigue crack, main coolant pipe

1. 緒言

加圧水型軽水炉の1次冷却材管等に鑄造ステンレス鋼が使用されている。鑄造ステンレス鋼は優れた耐食性、溶接性を有するが、製造時の冷却過程において非常に大きな柱状晶が成長し、この巨大な結晶粒とその異方性が超音波を著しく散乱させるとともに、超音波ビームが直進するのを妨げるため、欠陥信号のSN比の低下による欠陥識別性の低下や、欠陥位置の誤認等を起こさせることから、鑄造ステンレス鋼の超音波探傷試験は困難であるとされている。

このような性質を有する鑄造ステンレス鋼に対して効果的な超音波探傷試験を行うために、INSSは低周波数の超音波を集束させた送受信分割型大口徑集束2振動子探触子を開発し、1次冷却材配管を模

擬して製作した試験体の鑄造ステンレス鋼溶接部付近に導入した疲労き裂の測定試験を行ってきた。周方向疲労き裂については、検出性とサイジング性の検証を行い、高い検出性能があり、精度はASME Section XI Appendix VIIIに規定される超音波探傷試験の技量認定に係わる鍛造ステンレス鋼の合格基準は満たさないものの14.5mm(板厚の20%)のき裂の深さサイジングは可能であることを確認した。その後、軸方向疲労き裂について、検出性を確認してきた。(1),(2),(3)

これまでに鑄造ステンレス鋼配管周方向溶接部の溶接線に直交する配管軸方向疲労き裂に大口徑集束2振動子探触子を使用した自動超音波探傷法を適用し、信号強度について評価し約4mm以上のき裂を検出できる良好な結果が得られたが、本報では疲労き裂深さのサイジング(超音波探傷法によるき裂寸

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

法の測定) について評価した。

2. 試験体及び試験方法

2.1 軸方向疲労き裂試験体

試験体を図1に示す。試験体として検出性評価で使用した板厚69mmの1次冷却材管を模擬した鍛造ステンレス鋼と遠心鍛造鋼の配管を溶接したもの⁽³⁾を使用し、これに配管内面の溶接線を横切るように導入した疲労き裂に変動荷重を加えて進展させることにより深さが異なるき裂を付加し、それぞれの進展段階のき裂について試験を実施した。

き裂深さが板厚の50%となるまで段階的にき裂を進展させるとともに、各段階で破面からのき裂進展状況を確認できるよう繰り返し荷重の条件を変えることで、き裂の輪郭が判別できるようにした。最後に破面を開放し、実際の破面を測定して得られたき裂深さと超音波探傷結果から得られたき裂深さを比較評価した。

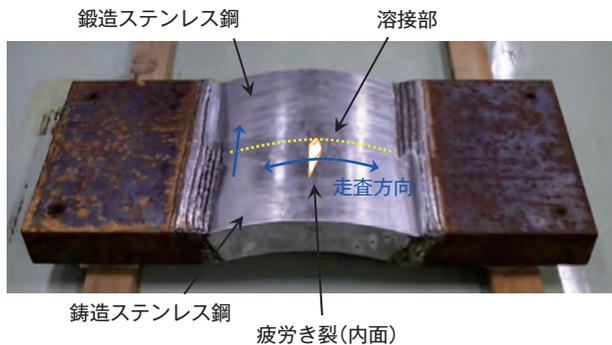


図1 試験体

2.2 超音波探触子

鍛造ステンレス鋼の超音波探傷検査を行うために、大口径集束2振動子探触子を用いた。サイジング性評価においても検出性評価で使用した探触子を用い、そのうち特に検出性に優れる表1に示す探触子条件を採用した。

表1 探触子条件

形式	縦波斜角2振動子
外形寸法	100×100×80mm
周波数	0.5MHz
振動子形状	球面型
屈折角	36°

2.3 試験方法

本研究においては、疲労試験体の自動超音波探傷を行うため、試験体探傷面を水没させることで水を接触媒質とし、XYスキャナーを用い探触子を配管の周方向に往復させながら軸方向き裂を走査し、往復するごとに一定間隔で軸方向に移動させる縦方形走査を行い、配管内面に導入したき裂を配管外面から探傷した。

送受信器およびデータ処理装置としてZetec社製の超音波探傷装置DYNARAY⁽⁴⁾と制御・データ収集ソフトUltraVision⁽⁵⁾を使用した。探触子を介して超音波信号の送受信を行うと同時に探傷位置情報も採取し、各位置での受信波形(振幅-時間データ)をパーソナルコンピュータに保存した。保存した探傷データを制御・データ収集ソフトで画像表示し、探傷結果を評価した。

図2にデータ表示画像のB,C,Dスコープの概念を、図3に探傷データ表示画像の例を示す。

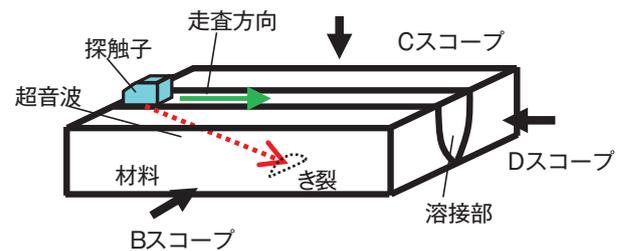


図2 データ表示画像のB,C,Dスコープの概念

2.4 深さサイジング方法

き裂の深さサイジングを行うために、図4に示すように、き裂面と内面から構成されるコーナー部から反射し戻ってきた受信信号(コーナーエコー)とともに、き裂先端で反射した受信信号(端部エコー)を採取し、測定位置と2つの受信信号の位置関係からき裂深さを推定する端部エコー法により深さサイ

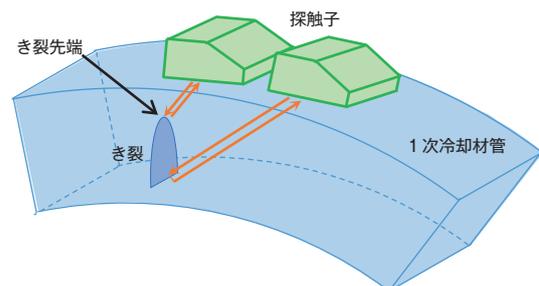


図4 端部エコー法による深さサイジング

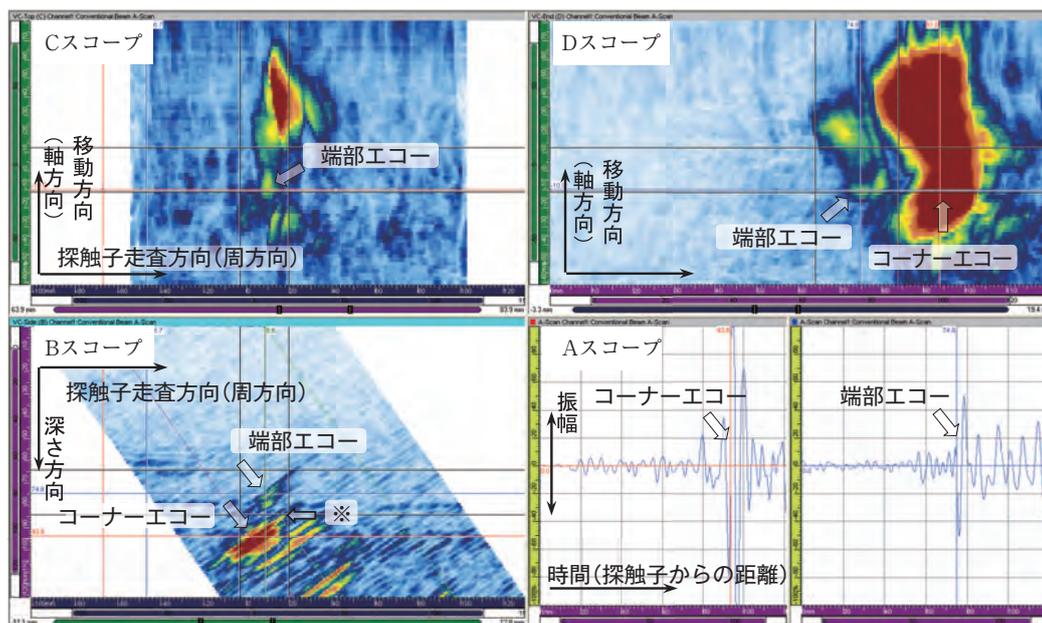


図3 探傷データ表示画像例

ジングを行った。具体的には、配管の曲率を考慮し、コーナーエコーと端部エコーの反射源の位置の距離からき裂深さを求めた。

3. 試験結果および考察

3.1 き裂深さのプロファイルと深さサイジング結果

図5 (a)～(g) に破面観察から求めた最大き裂深さ10.3mmから33.3mmまでの溶接部における疲労き裂探傷データ表示画像を示す。

最大き裂深さ15.7mmまでのき裂では、端部とコーナーが接近しコーナーエコーから端部エコーを分離して識別するのが困難であったため、コーナーの位置と実際のき裂深さから端部位置を推定し、推定位置から端部エコーを判定した。

最大き裂深さ18.5mmのき裂では、端部エコーは疑似エコーより若干信号強度が大きかった。

最大き裂深さ22.3mm以上のき裂になると、端部エコーはコーナーエコーと分離でき判別可能であったものの、き裂が深くなるほどコーナーエコーの信号強度に対する端部エコーの信号強度が小さくなった。

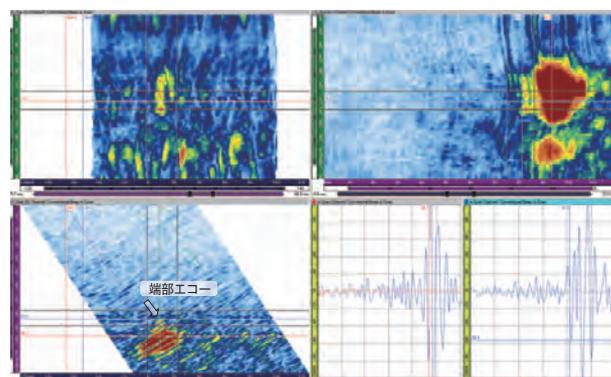


図5 (b) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ13.0mm)

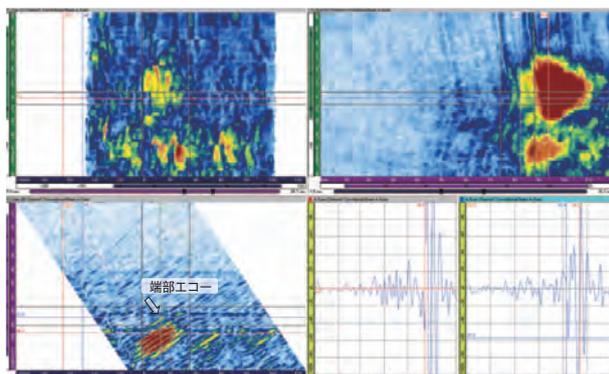


図5 (a) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ10.3mm)

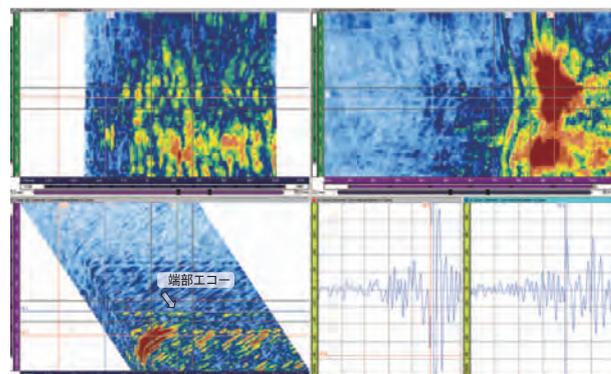


図5 (c) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ15.7mm)

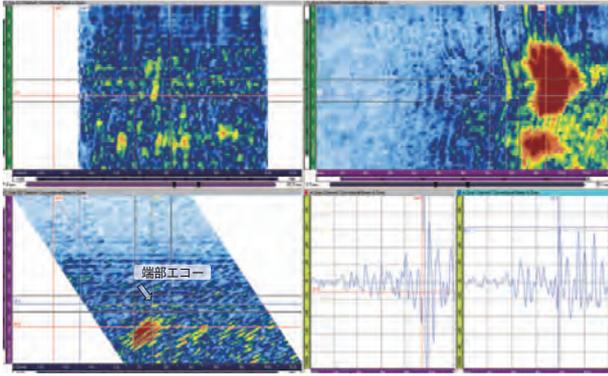


図5 (d) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ18.5mm)

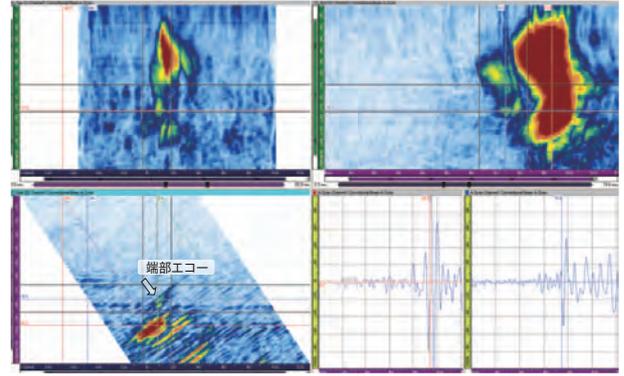


図5 (f) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ29.5mm)

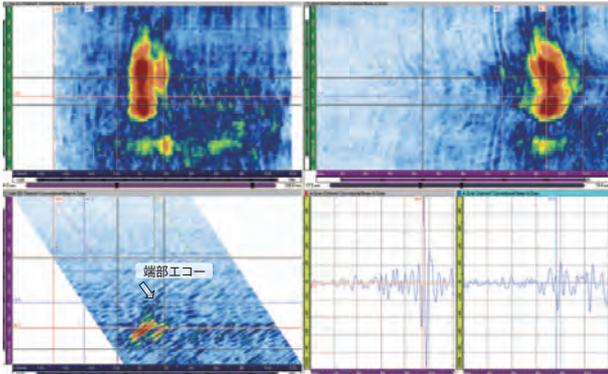


図5 (e) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ22.3mm)

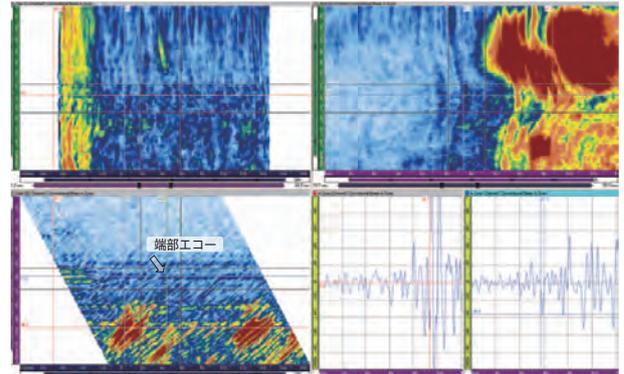


図5 (g) 探傷データ表示画像 (最大き裂深さ33.3mm)

また、いずれのき裂深さにおいても、 casting stainless steel part's end echo is not clear and many false echoes are seen, so it was not easy to distinguish.

Crack progression was observed on the broken surface, and the actual crack depth was determined by reading the crack profile from the broken surface every 5~10mm in the axial direction. The comparison of the actual crack depth and the depth sizing result is shown in Figure 6(a)~(g). Overall, the value obtained by depth sizing is smaller than the actual crack depth. This is because of the accuracy of the sizing, so it is necessary to check the cause.

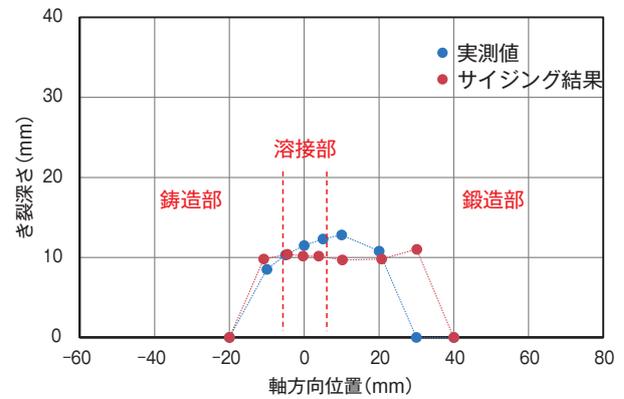


図6 (b) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ13.0mm)

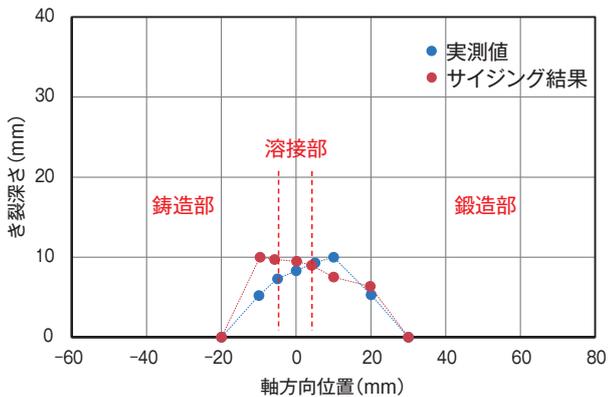


図6 (a) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ10.3mm)

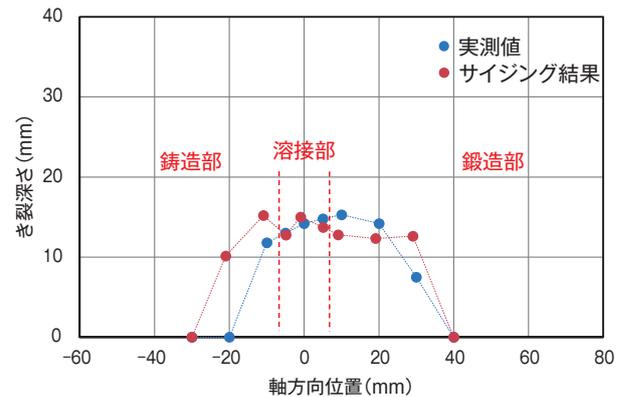


図6 (c) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ15.7mm)

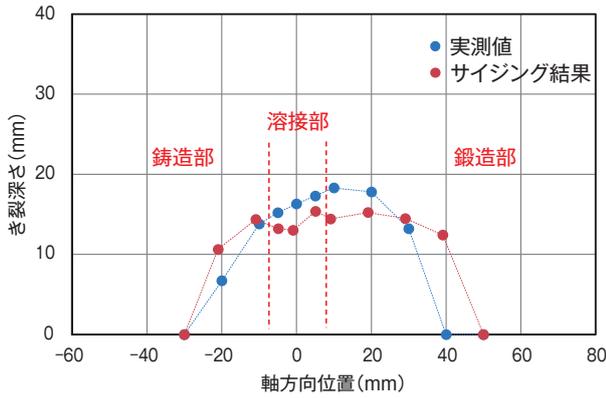


図 6 (d) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ18.5mm)

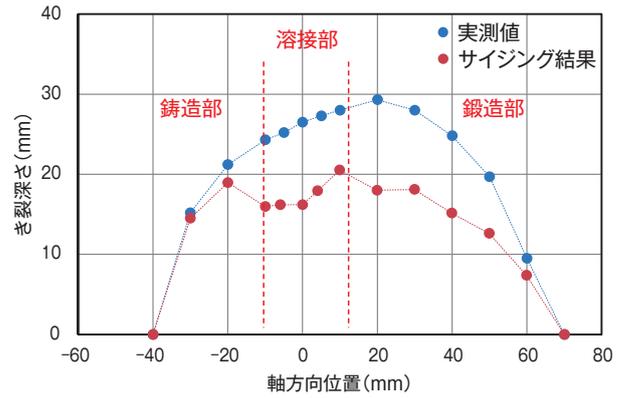


図 6 (f) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ29.5mm)

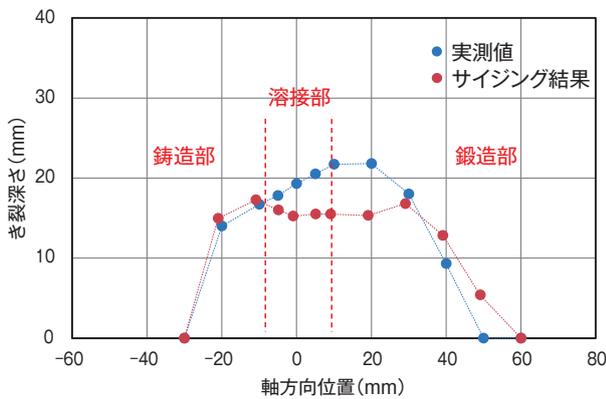


図 6 (e) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ22.3mm)

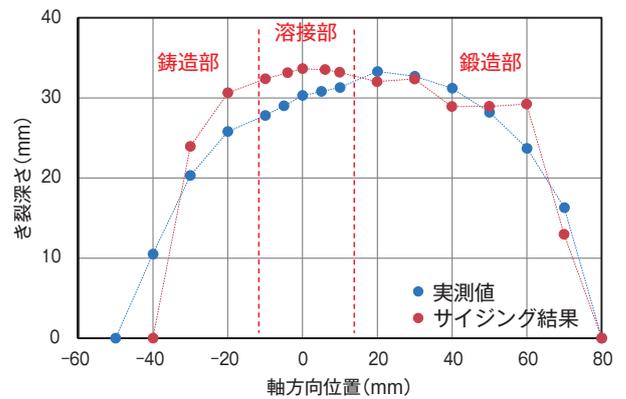


図 6 (g) き裂の代表位置での深さ (最大き裂深さ33.3mm)

3.2 各部位における深さサイジング結果

き裂の各進展段階における最大き裂深さと深さサイジング結果の最大値を比較したものを図7に示す。

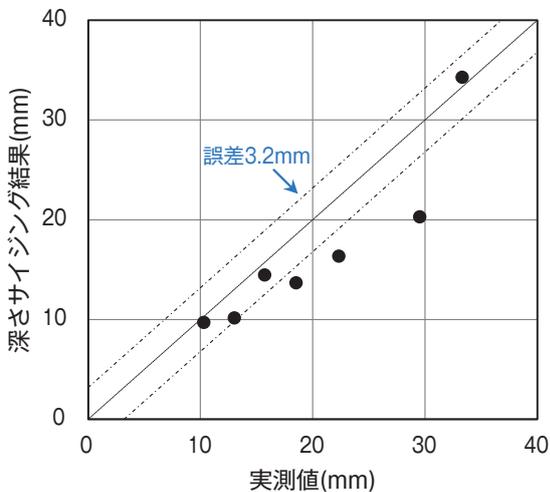


図 7 深さサイジング結果 (全体)

また、破面から求めた最大き裂深さの位置と深さサイジングで最大となる位置は一致していなかったため、試験体の鑄造ステンレス鋼、溶接部、鍛造ステンレス鋼の各部位それぞれのコーナーエコーが最大となる位置において、実際のき裂深さと深さサイジング結果を比較したものを図8 (a) ~ (c) に示す。

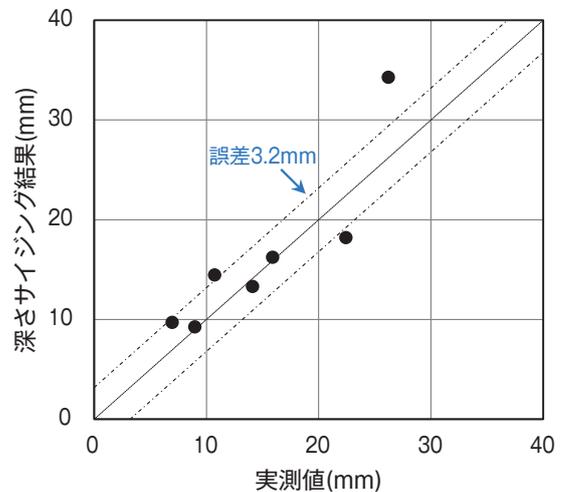


図 8 (a) 深さサイジング結果 (鑄造部)

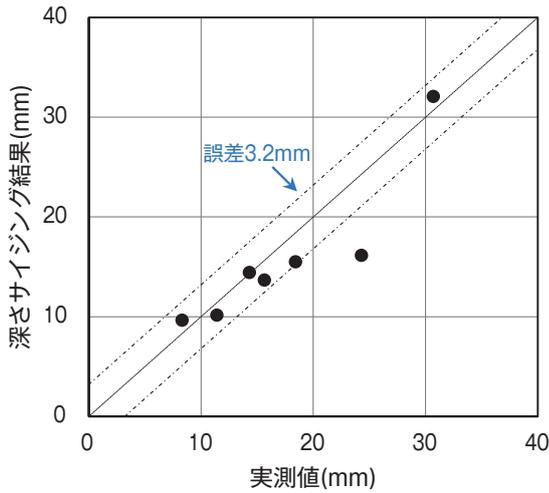


図8 (b) 深さサイジング結果 (溶接部)

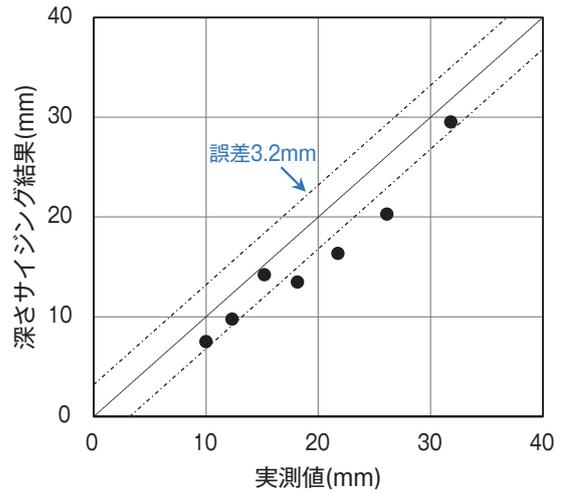


図8 (c) 深さサイジング結果 (鍛造部)

表2に各部位におけるサイジング結果の誤差のRMS値(2乗平均平方根)を示す。

表2 サイジング誤差のRMS値

	RMS値 (mm)
鑄造部	3.9
溶接部	3.5
鍛造部	3.9
全体	4.7

同じ部位で比較した深さサイジング結果の実際のき裂深さとの誤差は、ASME Section XI Appendix VIII (Performance Demonstration for Ultrasonic Examination) のUT検査員認証基準(鍛造鋼)として規定されるRMS値3.2mmと比べて劣るものではなかった。破面全体で評価すると、実測による最大き裂深さと深さサイジングの最大値では異なる位置を評価しており、RMS値は大きくなった。

図9に開放した疲労き裂の破面を示す。破面を観察すると、鑄造ステンレス鋼および溶接部では破面の表面が荒れたようになっており、超音波が散乱することにより端部エコーが明瞭に捉えられなかった可能性がある。



図9 疲労き裂破面 (破面開放後)

3.3 コーナーエコーと端部エコーの位置関係についての考察

超音波は拡がりをもって伝搬するため、端部エコーが最大となる探触子の位置においても、図10の破線のようにき裂のコーナーから反射するエコーを一部検出し、き裂先端やコーナー位置は探触子から超音波経路上の距離の違いとして認識される。軸方向き裂を周方向に探傷する場合は、端部エコーとコーナーエコーを検出するときの探触子の位置が配管の周方向に移動するため、探傷結果では配管軸方向の探傷と比べて両エコーが接近する(図3 Bスコープ内の※部は端部エコー検出時のコーナーからのエコー)。特にき裂深さが超音波の波長(0.5MHzの場合11.8mm)程度より浅い場合、伝搬させる超音波は1波だけでなく最大振幅となる波の前後の波の影響を受けるため端部エコーの判別が難しくなる。さらに超音波伝搬距離が長くなることからノイズの影響を受けやすくなり、周方向探傷においては軸方向探傷に比べて深さサイジングが難しくなったものと考えられる。さらに使用した2振動子探触子はコーナーエコーをより感度良く捉えるため配管内

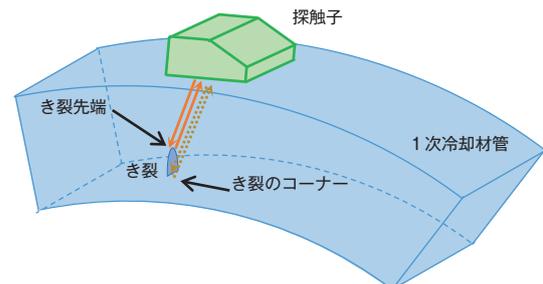


図10 端部エコー検出時の状況

周に焦点が当たるように調整しているため、配管内周から離れるほど端部エコーのレベルが相対的に小さくなることも深さサイジングを難しくしていると考えられる。

4. 結言

castingステンレス鋼溶接部の軸方向き裂に対し、大型2振動子探触子を用いた自動超音波探傷により、これまでに約4mm以上のき裂の検出が可能であることを確認したが、本研究では深さサイジング性評価を実施した。

端部エコーは全体的に明確には識別できず、多くの場合推定位置から端部エコーを探して識別した。

深さ約22mm以上のき裂では、概ね端部エコーが判別でき、深さサイジングの可能性が高い。

深さ約16mm以下の疲労き裂では深さサイジングは困難であった。これは端部エコーとコーナーエコーの信号の最大位置の間隔が超音波の1波長に近くエコー信号が近接することから、信号の識別が難しかったためと考えられる。

また、全体的に深さサイジング結果は実際のき裂深さより小さい値となった。この原因は今後検討していきたい。

参考文献

- (1) 黒住保夫, “ castingステンレス鋼の超音波探傷技術: castingステンレス鋼試験片中疲労欠陥の深さ・長さ測定 - 端部エコー法による深さサイジング (寸法測定) - ”, INSS Journal, Vol.12, p.251 (2005).
- (2) 黒住保夫, “ castingステンレス鋼の超音波探傷検査技術の開発 ”, INSS Journal, Vol.7, p.159 (2000).
- (3) 西川嘉人, 石田仁志, 黒住保夫, “ castingステンレス鋼溶接部における軸方向き裂の大型探触子による検出性評価 ”, INSS Journal, Vol.20, p.182 (2013).
- (4) Zetec, フェーズドアレイUT探傷装置 DYNARAY, <http://www.zetec.com/2010/06/dynaray-product-line/>
- (5) Zetec, 制御・データ収集ソフト UltraVision, <http://www.zetec.com/2010/06/ultravision/>