

鑄造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の 大型探触子による検出性評価

An evaluation of detection ability of ultrasonic testing with a large aperture transducer for axial cracks in cast stainless steel pipe welds

西川 嘉人 (Yoshito Nishikawa)*¹ 石田 仁志 (Hitoshi Ishida)*¹ 黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)*²

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とされている。本研究では、これまでにINSSで開発した大口徑集束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に適用し、欠陥検出性について検証した。板厚69mmに対する目標き裂深さ6%のき裂は検出が可能で、目標き裂深さ10%以上のき裂は、全ての探傷条件でき裂の検出が可能であった。

キーワード 超音波探傷, 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 to apply to cast stainless steel which is the material of the main coolant pipes in pressurized water reactors, because of the large attenuation and scattering of ultrasonic waves caused by its macro structure. In this study, ultrasonic testing for progression of axial fatigue cracks of a welded area in the test piece of cast stainless steel pipe was performed using double big-size ultrasonic probes which were formerly developed in INSS. It was found that detection of defects that were over 6% of the target depth for the specimen thickness of 69mm is possible, and detection of defects with over 10% of the target depth is possible for all test conditions.

Keywords ultrasonic testing, cast stainless steel, big-size 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の著しい散乱を発生させるとともに、超音波ビームの方向を変更させるため、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発生させることから、鑄造ステンレス鋼の超音波探傷検査は困難であるとされている。

鑄造ステンレス鋼材に対して超音波探傷検査を行うためには、結晶異方性の影響を小さくするため縦波モードの超音波を使用すること、散乱減衰の影響を小さくするため0.5~1MHzの低周波数の超音波を使用す

ること、特定の深さの感度を向上させるため送受信振動子を分割配置すること、超音波を集束させることが有効であり、これまでINSSにおいて、送受信分割型とし超音波を集束させた大口徑集束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周方向疲労き裂の欠陥検出性を検証し、高い検出性能が確認できた⁽¹⁾⁽²⁾。

これまでに周方向溶接部の溶接線に沿った疲労き裂について検討を行ってきたが、本研究では先に述べた大口徑集束2振動子探触子を使用した自動超音波探傷法を、鑄造ステンレス鋼配管の溶接線に直交する軸方向疲労き裂に適用し、信号強度について評価した。

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在(株)原子力エンジニアリング

2. 試験体および試験方法

2.1 軸方向疲労き裂試験体

1次冷却材管セーフエンド溶接部を模擬したステンレス鋳鋼遠心鑄造管とステンレス圧延鋼管の周方向溶接部に軸方向き裂を導入した試験体を使用した。表1に軸方向疲労き裂試験体の仕様を、図1に試験体の概略図面および写真を示す。

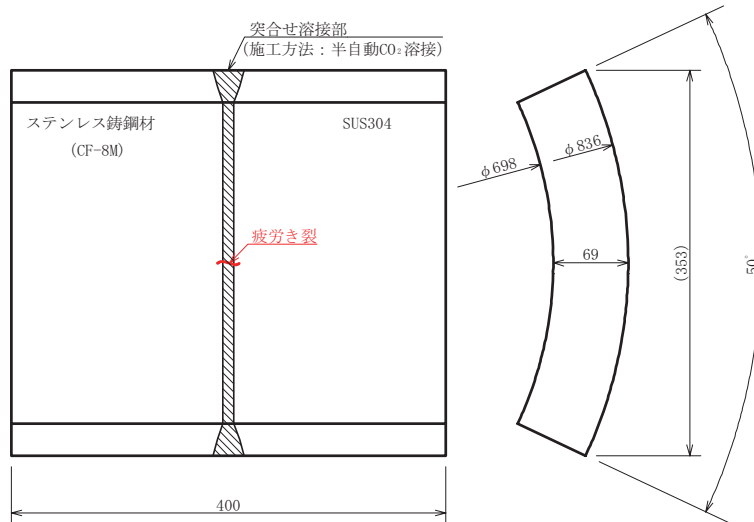
疲労き裂は、疲労試験機を用いて3点曲げにより、管内面の溶接部中央に溶接線に直交する軸方向に導入した。疲労き裂を導入するため、試験体に延長材を取り付けている。

疲労き裂を導入するための疲労試験は、図2に示すように3点曲げで繰り返し荷重を負荷した。表2に示

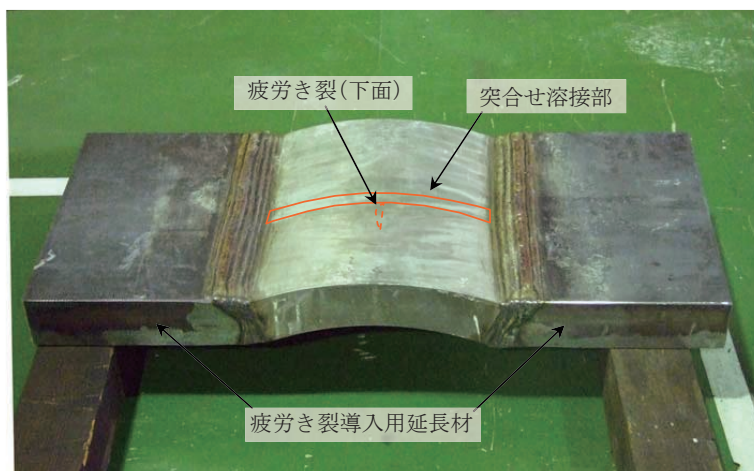
すき裂深さを目標値として設定し、5回疲労試験を実施し、各疲労き裂を付与した後超音波探傷試験を実施した。疲労き裂の深さは試験体を切断して破面観察しないと正確な値は得られないが、内面からの電位差測定法（EP法）およびフェーズドアレイ超音波探傷法（PA-UT法）でき裂深さを確認している。なお、本研究では、正確なき裂深さが得られていないため、

表1 軸方向疲労き裂試験体の仕様

| | |
|-------|---|
| 材質 | ステンレス鋳鋼(CF-8M)遠心鑄造材 ステンレス鋼圧延配管材(SUS304) |
| 形状・寸法 | 直管からの切り出し材(溶接接合) L353×W400mm×t 69mm (418mmR) |
| 欠陥種類 | 疲労き裂 |
| 欠陥方向 | 軸方向 |



(a) 試験体概略図 (延長材の部分は省略)



(b) 試験体写真

図1 軸方向疲労き裂試験体概略図および写真

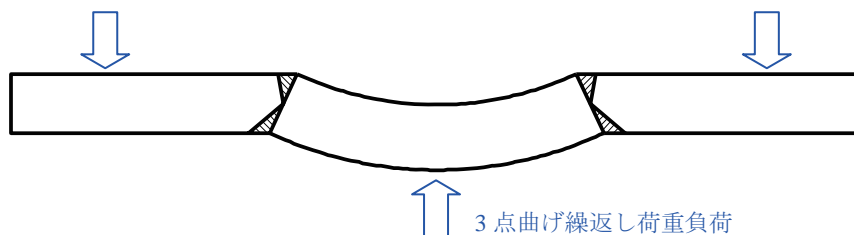


図2 疲労試験要領

表2 疲労き裂の目標深さ

| 項目 | 初回 | 第2回 | 第3回 | 第4回 | 第5回 |
|------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 目標深さ | 6%t (4.0mm) | 8.4%t (5.8mm) | 10%t (6.9mm) | 13%t (9.0mm) | 16%t (11.0mm) |

目標値である目標き裂深さに基づいて評価した。

今後疲労き裂破面の開放を予定しているが、各段階でのき裂深さを破面の開放後に確認するため、疲労き裂導入時にビーチマークを合わせて導入し、疲労の進展状況を確認できるようにしている。

2.2 超音波探触子

鑄造ステンレス鋼の超音波探傷検査を行うために、前述のように大口径集束2振動子探触子を用いた。表3および図3に探触子の仕様と写真を示す。本研究では、表3に示すように4種類の曲率をもった振動子と5種類の屈折角を変えたくさび（ウェッジ）を組み合わせた20種類の探触子を用いて試験を行った。

2.3 試験方法

本研究で使用した装置の概要および写真を図4に示す。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接触媒質として水を使用し、XY スキャナーを用い探触子を配管の周方向に往復させることで軸方向き裂を周方向に走査し、往復する毎に一定間隔で軸方向に移動させる縦方形走査を行い、周方向 140mm × 軸方向 120mm の範囲で、配管外周から内周のき裂を探傷した。

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 と制御・データ収集ソフト Ultra Vision を使用した。これにより、探触子との超音波信号の送受信を行うと同時に探触子位置情報も採取し、位置情報とともに各位置での受信波形（振幅

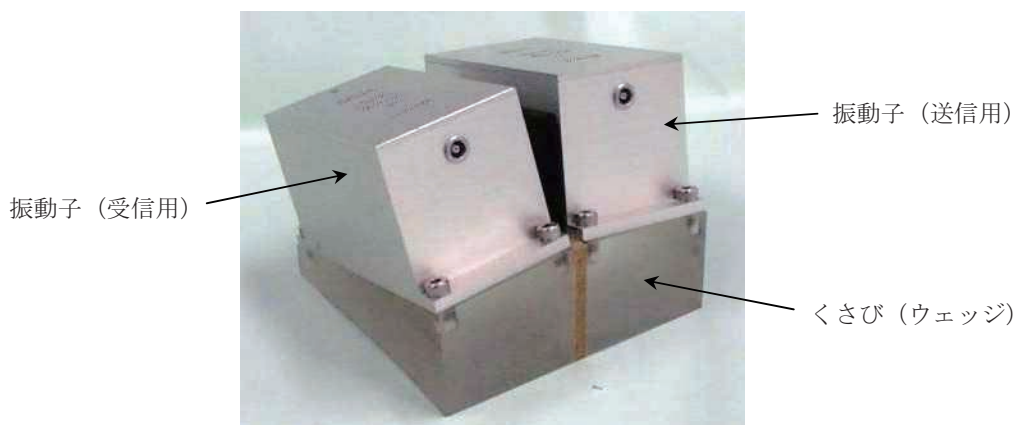
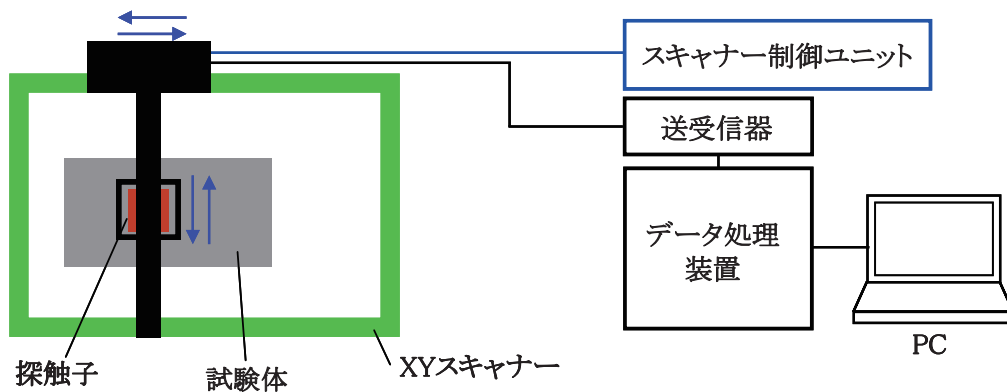


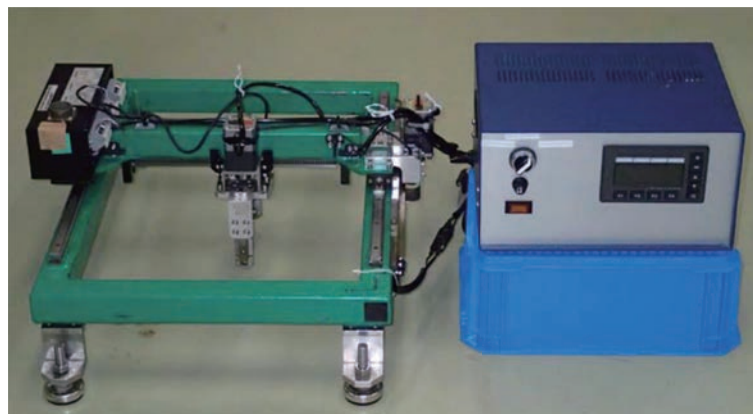
図3 探触子写真

表3 探触子の仕様

| | |
|-------|------------------|
| 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（曲率は4種類） |
| 屈折角 | 33~40° の5種類 |



(a) 装置概略図



(b) 装置写真

図4 装置概要および写真

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、き裂の検出性の評価を行った。

き裂検出性を評価するため、き裂面と底面から構成されるコーナー部から反射した受信信号（コーナーエコー）の振幅やSN比を比較評価した。

図5に探傷データ表示画像例を、図6にデータ表示画像のB、C、Dスコープの概念を示す。探傷データは画像表示すると、図5のようにA、B、C、Dスコープで表示される。Aスコープは探傷位置において

探触子から発信され斜角で入射した後に、き裂等で反射され探触子で受信された超音波の時間（探触子からの距離）と振幅（信号強度）の関係を示す受信波形を示し、Bスコープは探触子移動方向から投影した信号強度を、Cスコープは上面から投影した投影した信号強度を、Dスコープは端面から投影した信号強度を示している。図6に各方向の関係を示している。

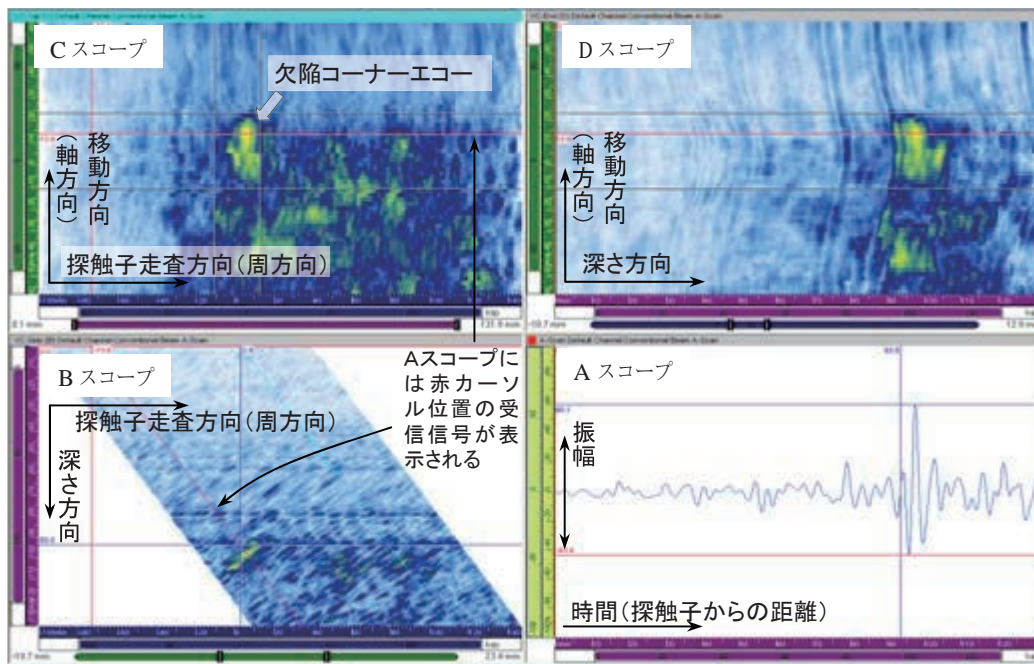


図5 探傷データ表示画像例

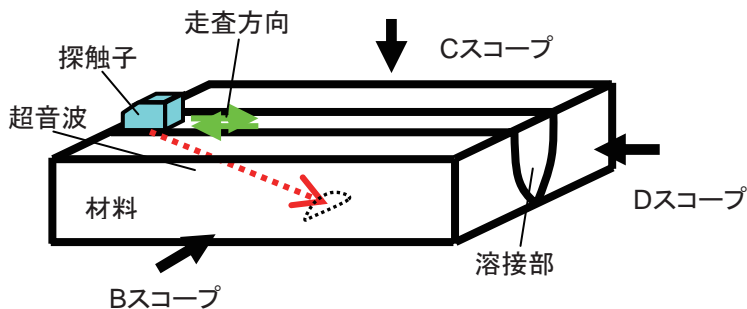


図6 データ表示画像のB, C, Dスコープの概念

3. 試験結果

3.1 試験結果概要

表4に目標き裂深さ6% tにおけるコーナーエコー検出可否の結果を示す。探傷試験の結果、目標き裂深

さ6% tの一部条件でコーナーエコーの識別ができなかった(表中×印)が、その他では全ての条件で全ての探触子でコーナーエコーが識別でき(表中○印)、検出は可能であった。図7~図11に各目標深さにおける探傷データの表示画像の代表例を示す。

表4 コーナーエコー検出可否 (目標き裂深さ6%t)

| | 探触子曲率A | 探触子曲率B | 探触子曲率C | 探触子曲率D |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 屈折角A | ○ | ○ | ○ | × |
| 屈折角B | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 屈折角C | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 屈折角D | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 屈折角E | ○ | ○ | ○ | ○ |

※目標き裂深さ8.4%以上では、全ての探触子で検出可能であった。
探触子曲率および屈折角は、小さい値から順にA~E (D)としている。

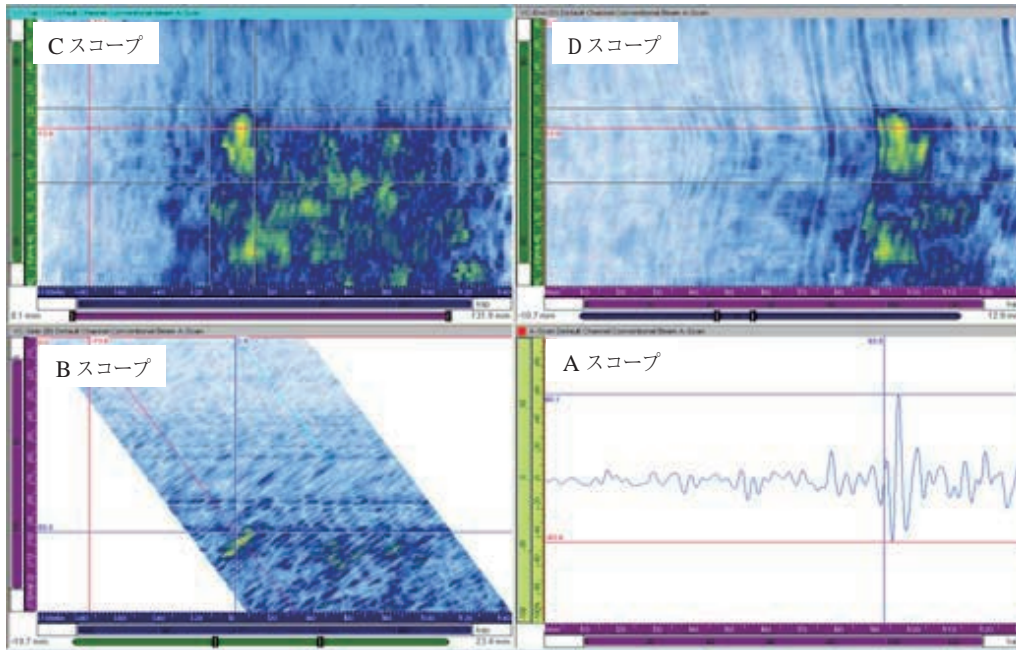


図7 目標深さ 6%t 疲労き裂探傷データ表示画像例 (探触子曲率 A, 屈折角 D, SN 比 2.7)

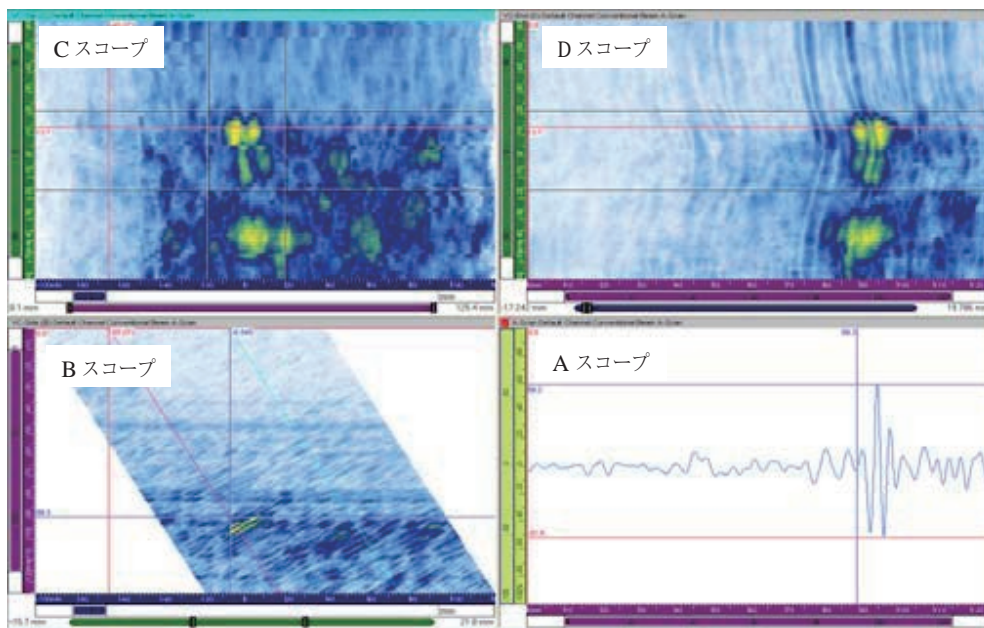


図8 目標深さ 8.4%t 疲労き裂探傷データ表示画像例 (探触子曲率 A, 屈折角 A, SN 比 4.1)

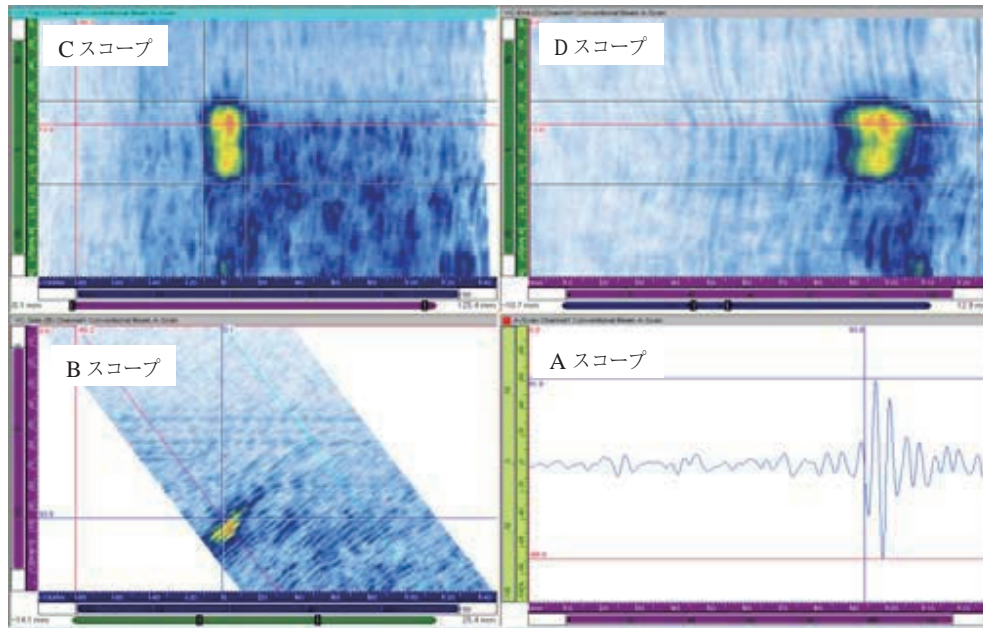


図9 目標深さ10%t疲労き裂探傷データ表示画像例（探触子曲率C, 屈折角E, SN比6.8）

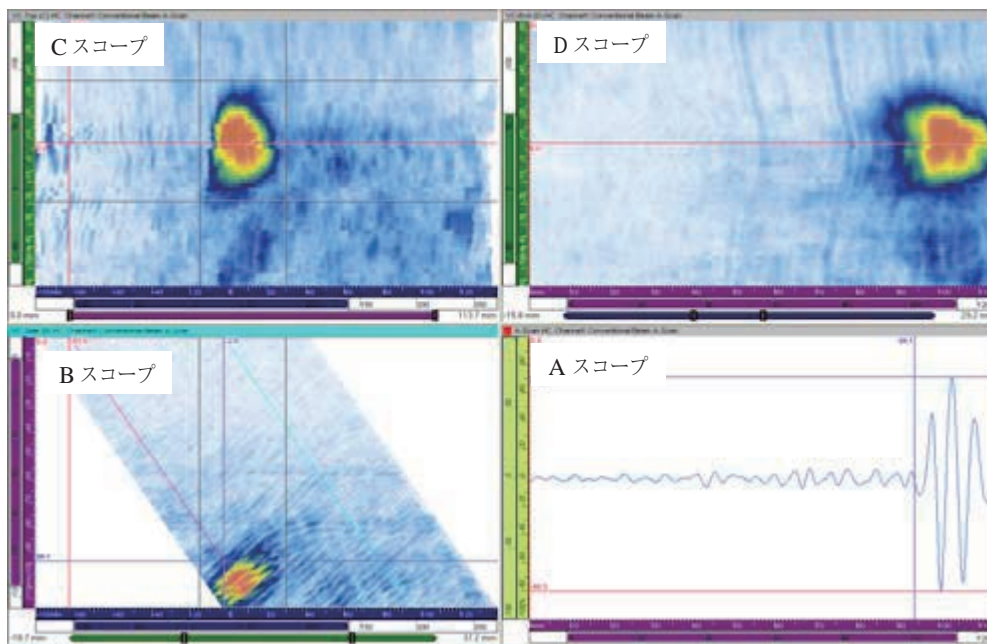


図10 目標深さ13%t疲労き裂探傷データ表示画像例（探触子曲率C, 屈折角E, SN比10.2）

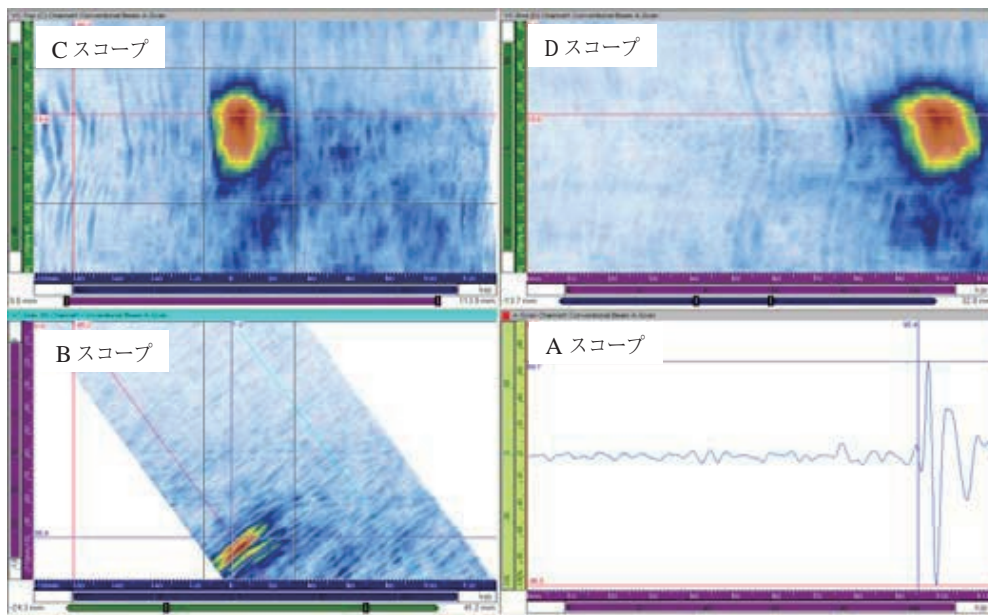


図 11 目標深さ 16%t 疲労き裂探傷データ表示画像例 (探触子曲率 C, 屈折角 E, SN 比 10.0)

3.2 試験結果の評価

図 12 に疲労き裂の最大エコー高さを示す。エコー高さは、試験体には基準となる直径 4.8mm の横穴を設けており、鋳造ステンレス鋼の配管外表面から 3/4t の位置の穴からの最大エコー高さを 100 として規格化した相対値であるエコー高さを各探触子で求めたものとしている。図は探触子の屈折角ごとに記号を

変えて表示しており、値の小さいものから大きくなる順に A から E としている。目標き裂深さ 10% t 以上では規格化したエコー高さが 31.8 以上と高くなっている。屈折角 D と E の結果のばらつきが大きい。屈折角 B から E では屈折角が大きくなるに従い、エコー高さが高くなる。屈折角 A の結果は屈折角 B の結果よりエコー高さが高めで、他と異なる傾向がある。

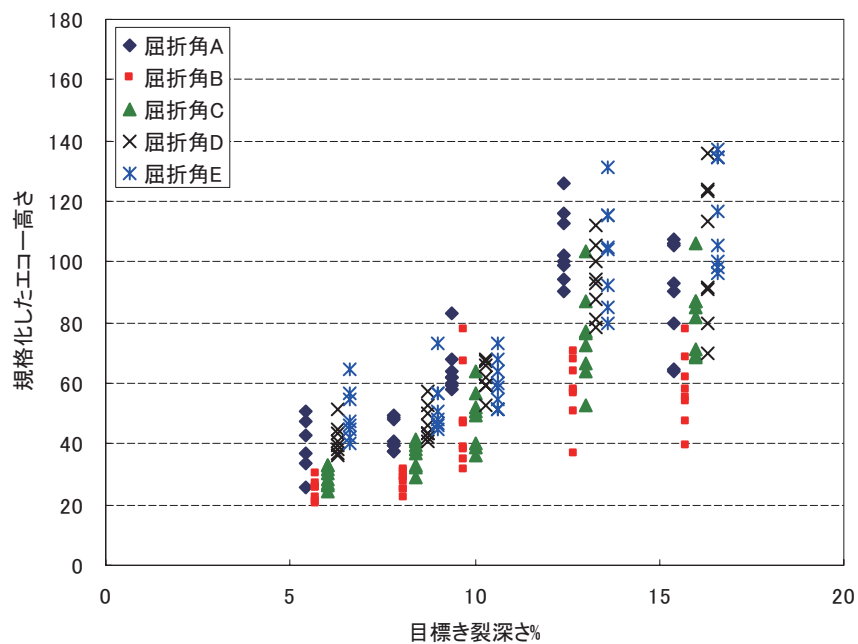


図 12 疲労き裂の最大エコー高さ

4. 結言

鑄造ステンレス鋼溶接部の軸方向疲労き裂に対し、大型2振動子探触子を用いた自動超音波探傷により検出性評価を実施した。

目標き裂深さ6% t (4mm) のき裂では、一部の条件で検出ができなかったが、その他の条件では全て検出ができた。

目標き裂深さ10% t (6.9mm) 以上のき裂では、規格化したエコー高さが31.8以上あり、全ての条件でき裂の検出が可能であった。

本研究ではき裂の検出性について評価したが、今後、引き続き疲労き裂を進展させ信号強度について評価していくとともに、疲労き裂破面の切断調査を行ったうえで、深さのサイジングについても検討を行い、長さのサイジングと合わせて評価を行っていく予定である。

参考文献

- (1) 黒住保夫, “鑄造ステンレス鋼の超音波探傷技術: 鑄造ステンレス鋼試験片中疲労欠陥の深さ・長さ測定—一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, “鑄造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).