

新開発自動超音波探傷システムを用いた鋳造ステンレス鋼中の欠陥検出感度およびサイジング特性

Detection Sensitivity and Sizing Ability of Defects in Cast Stainless Steel with Newly Developed Automatic Ultrasonic Inspection System

本報告は、発電設備技術検査協会・旧高経年化技術センター殿の平成15年度高経年化関連安全対策技術高度化調査(SAT)の1テーマ「ステンレス鋳鋼(二相ステンレス鋼)配管等における健全性評価技術向上に関する研究」として、原子力安全システム研究所が請負事業として受託し、実施した成果をまとめたものである。原子力安全システム研究所が開発した超音波探傷装置を、国所有のモックアップ試験体に適用し、欠陥検出性、欠陥サイジング精度の検証を行い、その成果をまとめるとともに、今後の課題について整理した。平成15年10月 独立行政法人 原子力安全基盤機構の発足に伴い、国が発電設備技術検査協会に委託した高経年化対策関連技術調査に係る報告書著作権が独立行政法人 原子力安全基盤機構に承継されたことにより、本研究所が独立行政法人原子力安全基盤機構に許可を得てその報告書の内容を転載するものである。以下に、その成果を報告する。なお、使用した装置の仕様等については、一部追加(表123)している。

請負事業の実施者：黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)* 石田 仁志 (Hitoshi Ishida)*

要約 PWRの1次冷却材管等に用いられている鋳造ステンレス鋼中では、超音波伝播が結晶組織の影響を強く受ける。そこで、鋳造ステンレス鋼の超音波探傷では、粗粒構造による大きな減衰と散乱ノイズが欠陥の検出の障害となり、異方性による音速の変化とビームの曲がり、欠陥位置精度を不正確なものにする。本研究では、筆者が鋳造ステンレス鋼の超音波探傷を目的として、以前に開発した大型の2振動子探触子と専用の局部水浸治具を用いた自動超音波探傷法を実際の1次冷却材管と同規模で内部に模擬の疲労欠陥と放電加工スリット(EDMスリット)を設けた溶接試験体に適用した。その結果、全ての欠陥は良好な欠陥信号/ノイズ強度(S/N)比で検出できた。また、対象材厚さの10%を超える全ての欠陥の深さサイジングが可能であることもわかった。このうちEDMスリットの深さサイジング精度は、相関係数0.77, RMS誤差2.1mmであった。疲労欠陥に関しては、破断試験後に再度精度評価する必要があるが、製造記録による評価では、深さサイジング精度は、相関係数0.79, RMS誤差2.3mmであった。

キーワード 超音波探傷, 鋳造ステンレス鋼, 1次冷却材管, 遠心鋳造管, サイジング

Abstract It is well known that ultrasonic waves are deeply influenced by macro structure in cast stainless steel, which is used for the primary pipe or other components in pressurized water reactors (PWRs). Its complex crystal structure hinders accurate ultrasonic inspection. This is because the large attenuation and scattering noise due to the coarse grain structure interfere with defect detection, and the ultrasonic wave velocity variations and beam skewing resulting from the anisotropic crystal structure make the determination of defect locations inaccurate.

In this research work, a formerly developed automated ultrasonic inspection system for cast stainless steel including a large aperture twin crystal transducer with a local water immersing holder was applied to a full sized mock-up test assembly manufactured from cast stainless steel CF-8M in which fatigue cracks and electron discharge machining slits are introduced. As a result, all defects were clearly detected with an excellent signal to noise ratio. And it was found that all the defects were able to be depth-sized except for the defects that were smaller than 10% of the wall thickness. The depth sizing performance for EDM slit was good for cast stainless steel with 0.77 of correlation coefficient and 2.1mm of RMS error. As to fatigue crack, the depth sizing performance should be reevaluated. But according to the manufacture record, the depth sizing performance for fatigue crack was 0.79 of correlation coefficient and 2.3mm of RMS error.

keywords automated ultrasonic inspection, large aperture twin crystal probe, cast stainless steel, reactor coolant pipe, sizing performance

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

鑄造ステンレス鋼は、優れた耐食性、溶接性を有することから、加圧水型軽水炉（pressurized water reactor, PWR）の1次冷却材管やポンプケーシングに使用されている。鑄造ステンレス鋼は、その冷却過程において非常に大きな柱状晶が成長することが知られている。この巨大な結晶粒とその異方性が、内部を通過する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シフトさせるため、本材料中の欠陥検出に超音波探傷法を適用する場合、欠陥信号のSN比の低下による欠陥識別性の低下、欠陥位置誤認等を発生させる。これにより、本材料に対する超音波探傷検査が困難とされている。⁽¹⁻¹⁴⁾

このような性質を有する鑄造ステンレス鋼に対し効果的な超音波探傷検査を行うには、超音波を集束させることにより散乱減衰を補償することや、結晶異方性の影響を受けにくい縦波モードの超音波を使用することが有効である。また、自動超音波探傷により探傷データを画像表示し、欠陥の識別を行うことも有効である。⁽¹⁵⁻³⁶⁾ 筆者の一人は両探触子の長所を組み合わせた大口径集束2振動子探触子を開発し、専用の自動走査機構を用いた自動超音波探傷法を開発し、鑄造ステンレス鋼溶接部にこれを適用した結果、非常に優れた欠陥検出性能を実証した。^(35, 36) 一方、平成15年10月に施行された「定期事業者検査」制度の下では、日本機械学会の「発電用原子力設備規格・維持規格」に基づく欠陥評価が必要になる。このため、超音波探傷検査においては、欠陥を検出するだけでなく、検出した欠陥を評価するために深さ、長さを精度よく寸法同定（サイジング）することが必要になった。この維持規格のベースとなった米国の規格ASME Section XI Appendix VIIIでは、検査対象部位および材料、寸法に応じて、欠陥検出性、欠陥サイジングの精度の要求事項が定められている。ただし、鑄造ステンレス鋼配管溶接部については、超音波探傷が非常に困難である現状から、この目標が定められていない。しかし、鍛造ステンレス鋼配管溶接部に関しては、欠陥検出性では、対象欠陥数が16個の場合、このうち12個以上を検出し、欠陥の誤識別が3箇所以内であること、深さサイジングではRMS誤差が0.125インチ（約3.2mm）、長さサイジングではRMS誤差が0.75インチ（約19mm）以内であることとされており、本研究では、この数値を目標とする。⁽³⁷⁾

本研究では、国が所有する実際の1次冷却材管と

同規模で内部の溶接部付近に疲労欠陥、EDM（Electronic discharge machining：放電加工）スリットを設けた鑄造ステンレス鋼製溶接モックアップ試験体に、筆者らが開発した自動超音波探傷システムを適用した。その結果に基づき、欠陥検出性ととも欠陥深さ、長さサイジングが可能かどうかの確認ならびにその精度を旧発電設備技術検査協会・高経年化技術センターが評価した。

2. 試験装置

2.1 超音波探傷装置

本自動超音波探傷システムは、配管の超音波探傷用に構成され、自動走査機構のフレーム上に探触子を配置し、配管の軸方向を往復する。同時に自動走査機構全体が配管周方向に移動する。高速データ処理装置/送受信器は、探触子への送受信を行うと同時に、各位置でのAスキャンデータ（振幅-時間データ）を探触子位置情報とともに採取し、システム制御用ワークステーションのハードディスクに保存する。保存された探傷データを画像表示し、欠陥の検出性、欠陥位置および長さのサイジング、欠陥深さのサイジング評価を行う。図1および図2に、それぞれ使用した自動超音波探傷装置の概略と写真を示す。表1に配管用自動走査機構、表2にデータ処理装置の仕様を示す。

表1 開発した配管用自動走査機構の仕様（追加記載）

装置名	配管外周走行型2軸自動走査機構
外形寸法	400L × 290W × 190H (mm)
重量	16 kg
駆動方式	Y軸(配管軸方向): 歯付きベルト駆動 X軸(配管周方向): 歯付きベルト駆動, 車輪回転
駆動モーター	Y軸: DCモーター X軸: DCモーター
探触子ストローク	160mm
走査速度	Y軸: 5~80mm/sec X軸: 10~50mm/sec
走査ピッチ	X軸: 3~15mm
位置検出分解能	1mm
エンコーダ分解能	0.2mm

表2 使用したデータ処理装置の仕様（追加記載）

装置名	Tomoscan sv
パルサーレーザ	チャンネル数：16 ch, バンド幅：30MHz
デジタルイザ	12 bit(8 bit), 60MHz
フィルター	8 low pass, 8 high pass
最大データ取得間隔	20 kHz
データ取得速度	3 Mbytes/sec
Aスキャン最大データ取得数	30,000 point
画面表示機能	A,B,C, D scan, angle-corrected top view, side view, front view

表3 使用した探触子の仕様（追加記載）

探触子	A	B	C
型式	縦波斜角 2 振動子	縦波斜角 2 振動子	縦波斜角 2 振動子
外形寸法(mm)	100 × 100 × 80	100 × 100 × 80	100 × 100 × 80
周波数	1 MHz	1 MHz	1 MHz
振動子形状	球面型	球面型	球面型
入射角	45.7°	46°	46.4°
集束深さ(mm)	65-75	40-50	60-70

2.2 試験体

実際の PWR の 1 次冷却材管溶接部と同等の材料、形状および寸法で、その中に疲労欠陥と EDM スリットを有するモックアップ試験体に対し自動超音波探傷試験を行い、各欠陥の検出性、欠陥位置および長さのサイジング、欠陥深さのサイジング評価を実施した。表4と図3に、それぞれモックアップ試験体の仕様と概略図を示す。試験体は鍛造ステンレス鋼の遠心鍛造材および静鍛造材の直管が配管軸方向中央で突合せ溶接されたものである。溶接部の両側、すなわち遠心鍛造材と静鍛造材それぞれの熱影響部に、疲労欠陥、EDM スリットが設けられている。表5にモックアップ試験体中欠陥の個数、種類、位置、深さおよび長さを示す。欠陥は、溶接熱影響部に疲労欠陥、EDM スリットそれぞれ8個ずつ計16個を配管周方向に設けられている。なお、表5の中で欠陥位置が遠鍛側、静鍛側とは、それぞれ遠心鍛造管、静鍛造管側に欠陥が存在することを示す。なお、疲労欠陥の切断調査は実施していないことから、疲労欠陥の寸法は、試験体製造時記録による欠陥寸法値を用いた試算値とした。

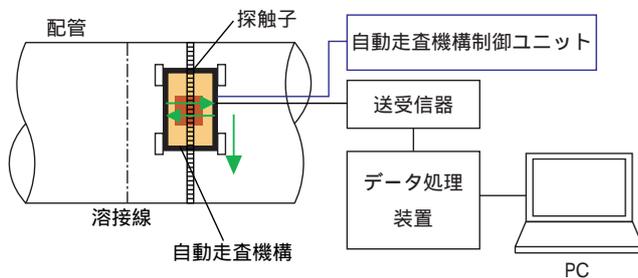


図1 配管用自動超音波探傷システム

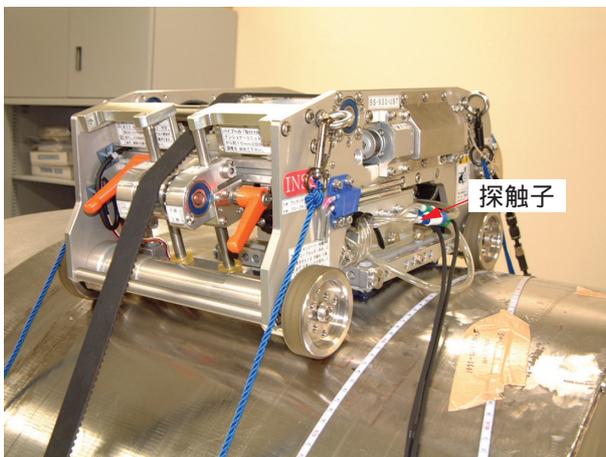


図2 配管(直径900mm)用自動走査機構の写真

鍛造ステンレス鋼のような粗粒材中においても散乱減衰、超音波ビームの偏向が比較的少なくなるよう、超音波モードと周波数をそれぞれ縦波斜角と低周波(1 MHz)とした。使用した探触子は、筆者の一人が開発した材料中に超音波を集束させる大型球面振動子を用いた2振動子探触子で、屈折角は約46°である^(35, 36)表3に、使用した探触子の仕様を示す。

表4 使用したモックアップ試験体の仕様

材質	鍛造ステンレス鋼(SCS14A) 遠心鍛造材, 静鍛造材
形状・寸法	直管 φ 943mm × 1000mm × 77.8mm
欠陥	疲労欠陥, EDMスリット

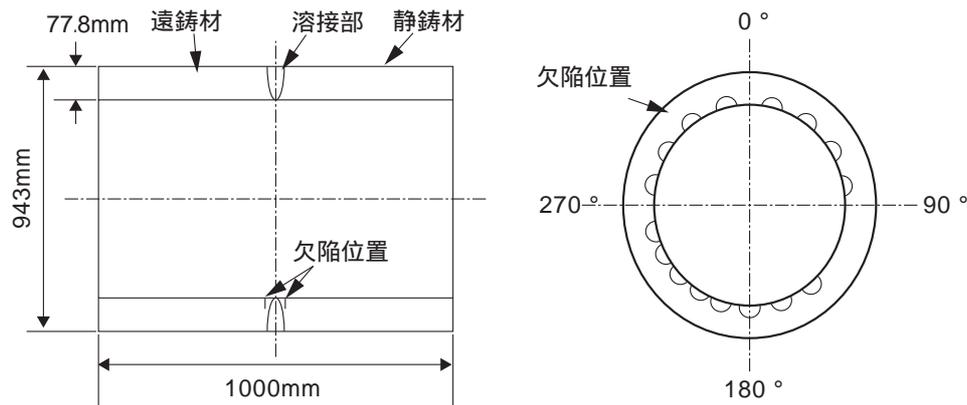


図3 使用したモックアップ試験体概略図

表5 使用したモックアップ試験体中に設けられた欠陥の仕様

番号	種類	位置	寸法	
			深さ (mm)	長さ (mm)
1	疲労欠陥	遠鋳側	8	65
2	疲労欠陥	遠鋳側	5	40
3	疲労欠陥	静鋳側	8	60
4	疲労欠陥	遠鋳側	10	105
5	EDMスリット	遠鋳側	5	30
6	EDMスリット	静鋳側	12	80
7	EDMスリット	遠鋳側	6	40
8	EDMスリット	静鋳側	9	60
9	EDMスリット	遠鋳側	9	60
10	EDMスリット	静鋳側	6	40
11	EDMスリット	遠鋳側	12	80
12	EDMスリット	静鋳側	5	30
13	疲労欠陥	静鋳側	5	40
14	疲労欠陥	遠鋳側	14	105
15	疲労欠陥	静鋳側	12	85
16	疲労欠陥	静鋳側	15	105

3. 試験方法

データ採取は、ブラインド試験として実施した。すなわち、試験体によるデータ採取、採取データの解析による検出性データの記録、同じくサイジングデータの記録の完了後、試験体製造者から試験体欠陥情報の開示を受け、データの分析評価を実施した。

探傷は、入射角約46°の縦波斜角2振動子を有する探触子にて実施し、配管用スキャナによる自動走査とTOMOSCANによって探傷データを採取した。表3に示す仕様の探触子を3個を使用し、一つの探

触子について1回ずつ、試験体の基準方位角0°から360°まで90°ごとに4つに分割して探傷した。得られた探傷データに対して、欠陥の検出に関するデータの解析、欠陥のサイジングに関するデータの解析を行い、それぞれ検出性試験結果、サイジング試験結果として評価を行った。

探傷方向は軸方向で、遠心鋳造材側からの1方向のみ、探傷ピッチは軸方向1mm、周方向3mmとした。探傷感度は、ノイズと最大エコーが5-15%のレベル程度と100%になるように設定した。

データ採取完了後、探傷データを画像表示し、欠陥の検出性、欠陥位置および長さのサイジング、欠陥深さのサイジング評価を行った。図4に探傷結果評価用画面の例を示す。画面は、A、B、C、Dスキャンに4分割されている。図5にB、C、Dスキャンの概念を示す。Aスキャンは通常の超音波探傷試験で用いられるもので、縦軸が信号振幅、横軸が時間(超音波飛程)を表す。なお、Aスキャン横軸の目盛りは、板厚方向の深さに換算されている。Bスキャンは探傷箇所を溶接線に垂直な断面からみたイメージであり、画面上部が試験体表面を表す。Cスキャンは探傷箇所を上から見た平面図のイメージで、縦軸は配管周方向(0~360°方向)を表し、横軸は配管軸方向(左側:遠心鋳造管、右側:静鋳造管)を表す。Dスキャンは探傷箇所を溶接線に平行な断面からみたイメージであり、画面左端が試験体表面を表す。欠陥検出性については、検出した欠陥から反射したエコー最大値とノイズ強度のSN比による欠陥検出性と欠陥位置精度を評価した。

深さサイジングには、欠陥先端エコー位置と欠陥コーナーエコー位置および探触子移動距離により評価する端部エコー法を用いた。長さサイジングにお

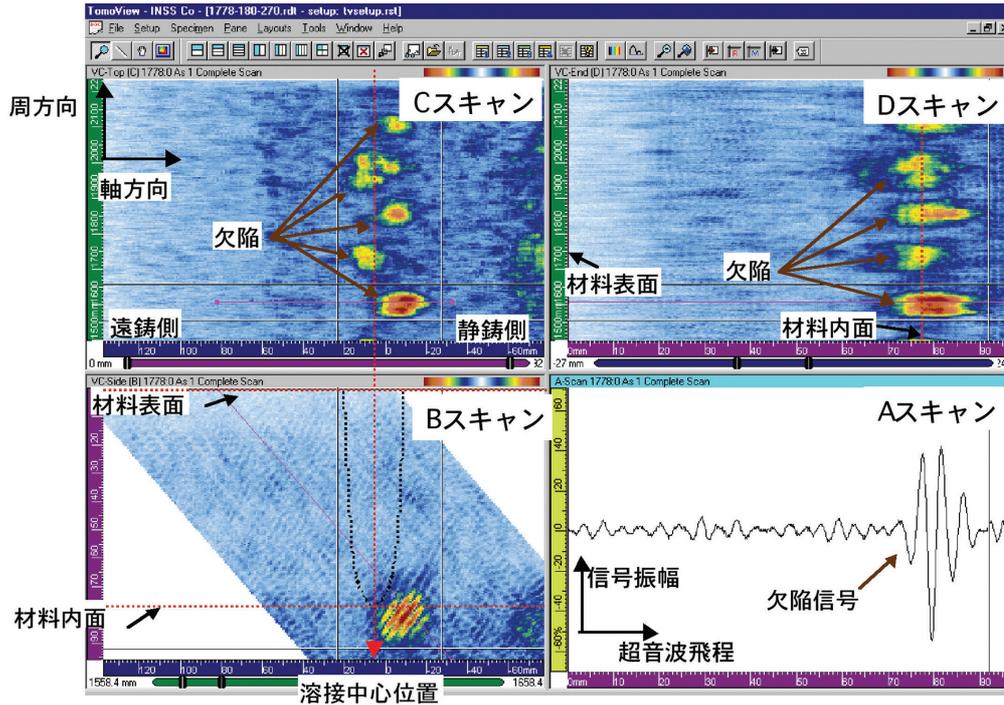


図4 探傷データ画像表示の例

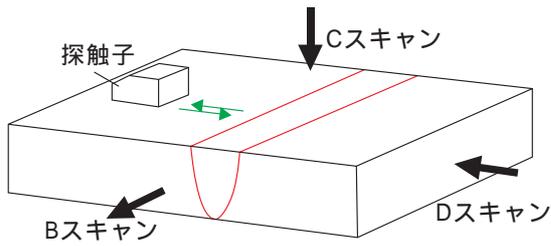


図5 B, C, Dスキャンの概念

いては、探触子の周方向移動に伴いCスコープ上に現れるコーナーエコーの長さを直接測定した。このようにして得られた欠陥信号に基づく欠陥長さ、実際の欠陥長さ、欠陥信号に基づく欠陥深さの測定の可否と実際の欠陥深さとの比較による精度評価を以下の統計値を用いて行った。

測定率 a: サイジング対象欠陥数 n_0 のうちサイジングできた欠陥数 n_1 の割合

$$a = \frac{n_1}{n_0}$$

相関係数 Rxy: 実際の欠陥寸法と測定された欠陥寸法間の相関係数

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

x_i : 欠陥寸法測定値, \bar{x} : 欠陥寸法測定値の平均

y_i : 実際の欠陥寸法, \bar{y} : 実際の欠陥寸法の平均

誤差平均 x_e : 欠陥寸法測定値と実際の欠陥寸法の差の平均

$$x_e = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}$$

誤差の標準偏差: 測定された欠陥寸法の誤差平均からのばらつき

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_e)^2}{n - 1}}$$

RMS 誤差 e: 測定された欠陥寸法の実際の欠陥寸法からの平均二乗誤差

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

4. 試験結果

4.1 検出性試験結果

モックアップ試験体に対する試験データのうち、欠陥の検出に係るデータについて検出性の試験結果として記録し、その後試験体欠陥情報の開示を受け、分析と評価を行った。

図6に検出性試験結果のCスキャン画像をまとめて表示した。試験体の基準方位角 0° から 90° ごとに4つに分割して得られたCスキャンデータを順に表示している。それぞれのCスキャンにおいて、 0° から順に検出された指示エコーが明瞭に識別できる。

表5に示すとおり、試験体中には疲労欠陥8個とEDMスリット8個計16個の欠陥が存在した。記録上の欠陥付与位置と照合した結果、周方向においては、欠陥指示範囲内に試験体製造記録での欠陥付与位置が含まれることが確認され、検出された指示エコーはすべて欠陥からの指示であることがわかった。また、付与位置以外において欠陥と判断されるような指示（欠陥以外の原因による反射エコー、以下「誤コール」と呼ぶ）はなかった。疲労欠陥では試験体製造記録による深さ6 mm以上、EDMスリットでは、5 mm

以上の欠陥がそれぞれ検出された。この結果は、ASME Section XI Appendix VIIIに定める鍛造ステンレス鋼配管の検査基準（16個のうち12個以上の検出、誤コール3箇所以内）を満足するものである。

欠陥検出性は、欠陥信号とノイズのSN比により評価した。表6に、欠陥信号のSN比を示す。いずれの欠陥に対しても探触子A、B、CでSN比3.7以上が得られた。これは、欠陥からの指示がノイズに対して十分な識別性を有することを示すものである。SN比における欠陥の種別、大きさ、探触子による差異は、特に見受けられない。

表7に、軸方向での欠陥検出位置を示す。3探触子による指示位置はよく一致している。欠陥指示位置と試験体製造記録の欠陥付与位置と照合すると、軸方向における3探触子による欠陥指示位置と試験体製造記録での欠陥付与位置の差は最大9 mmであった。

ASME Section XIでは検出位置誤差に関する規定はないが、ASME Section XIに基づいておこなわれたPISC IIIでは、欠陥検出に係わる誤差の許容基準を20 mmとしていることから、本結果は、欠陥の位置情報を与えるものとして、これを満足している。

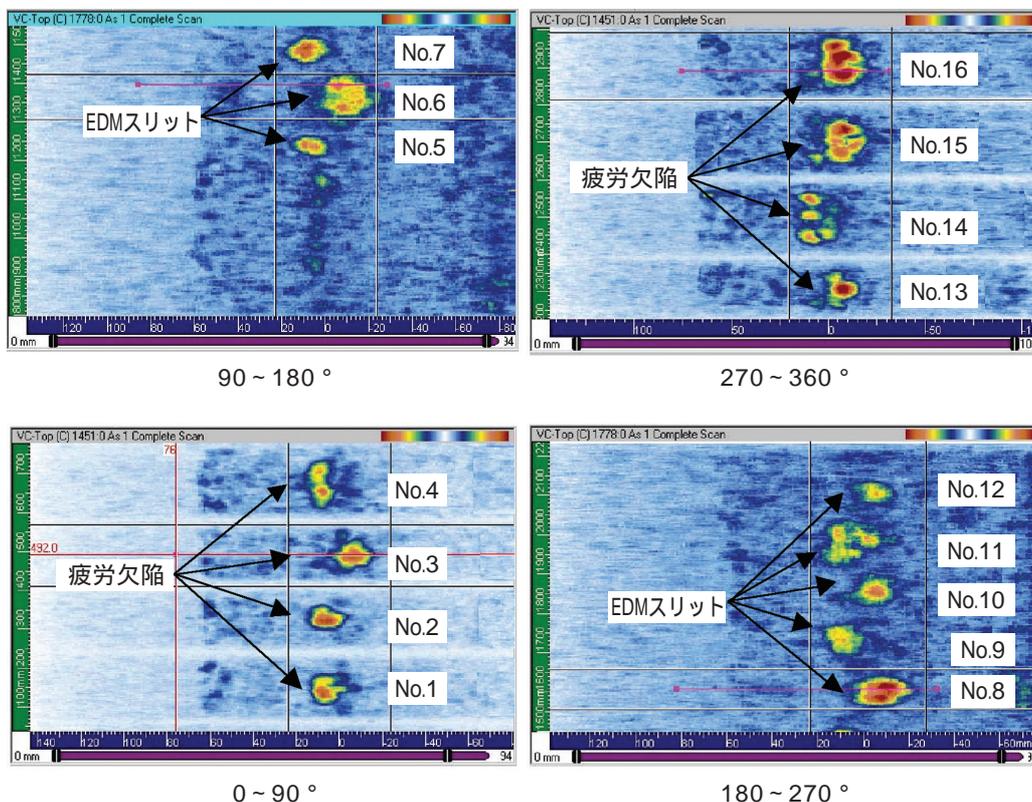


図6 検出性試験結果

表6 欠陥検出の可否とSN比

欠陥 番号	欠陥の 種類	欠陥寸法		検出結果 (S/N比)		
		深さ (mm)	長さ (mm)	探触子A	探触子B	探触子C
1	疲労欠陥	8	65	7.5	9.2	9.3
2	疲労欠陥	5	40	15.0	9.2	11.8
3	疲労欠陥	8	60	14.7	6.4	7.7
4	疲労欠陥	10	105	12.7	16.0	6.3
5	EDMスリット	5	30	12.0	5.3	7.7
6	EDMスリット	12	80	4.5	6.0	5.6
7	EDMスリット	6	40	7.8	8.7	5.2
8	EDMスリット	9	60	15.0	10.4	8.0
9	EDMスリット	9	60	9.0	6.9	7.4
10	EDMスリット	6	40	8.4	10.3	6.7
11	EDMスリット	12	80	6.8	5.5	4.9
12	EDMスリット	5	30	6.0	8.8	3.7
13	疲労欠陥	5	40	9.8	10.4	8.8
14	疲労欠陥	14	105	6.1	5.7	7.8
15	疲労欠陥	12	85	8.5	4.9	5.2
16	疲労欠陥	15	105	11.4	11.2	5.7

4.2 サイジング試験結果

表7 欠陥の軸方向指示位置

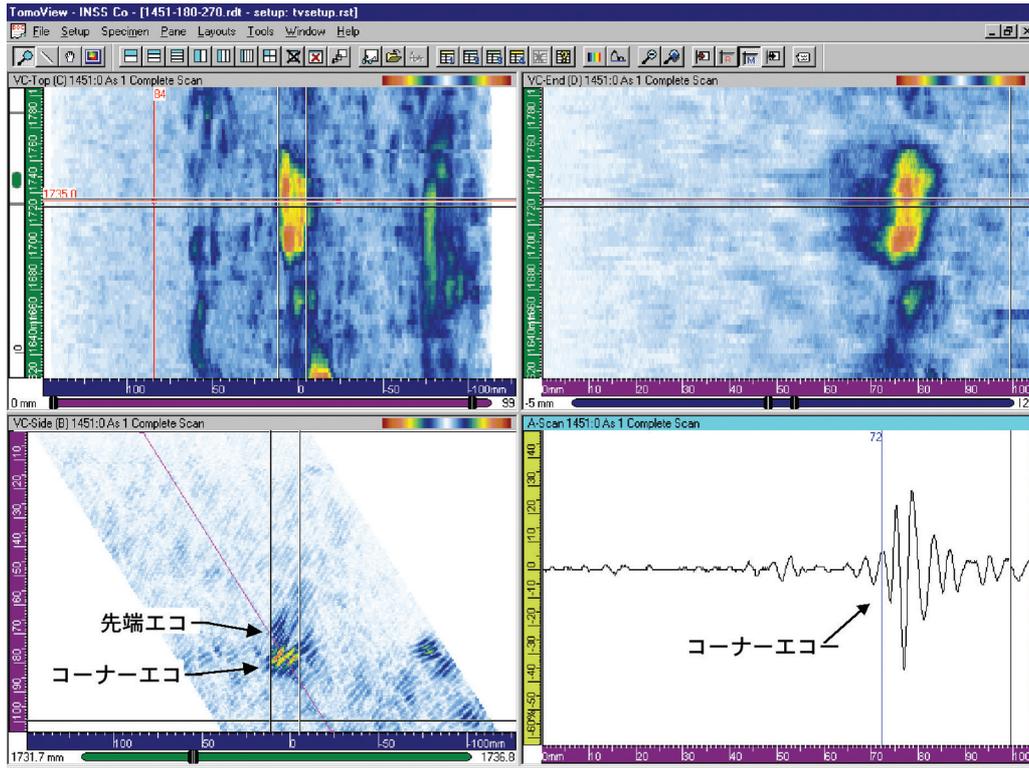
欠陥 番号	軸方向指示位置 (最大エコー位置) (mm)*		
	探触子A	探触子B	探触子C
1	10	9	8
2	10	9	8
3	-4	-5	-2
4	11	12	10
5	11	9	12
6	-4	-7	-2
7	12	9	13
8	-13	-9	-4
9	7	12	10
10	-8	-6	-3
11	8	11	10
12	-5	-7	-3
13	-8	-5	-2
14	10	11	11
15	-4	-5	-4
16	-7	-5	-2

*: 溶接中心から遠鋳材側を+とした距離

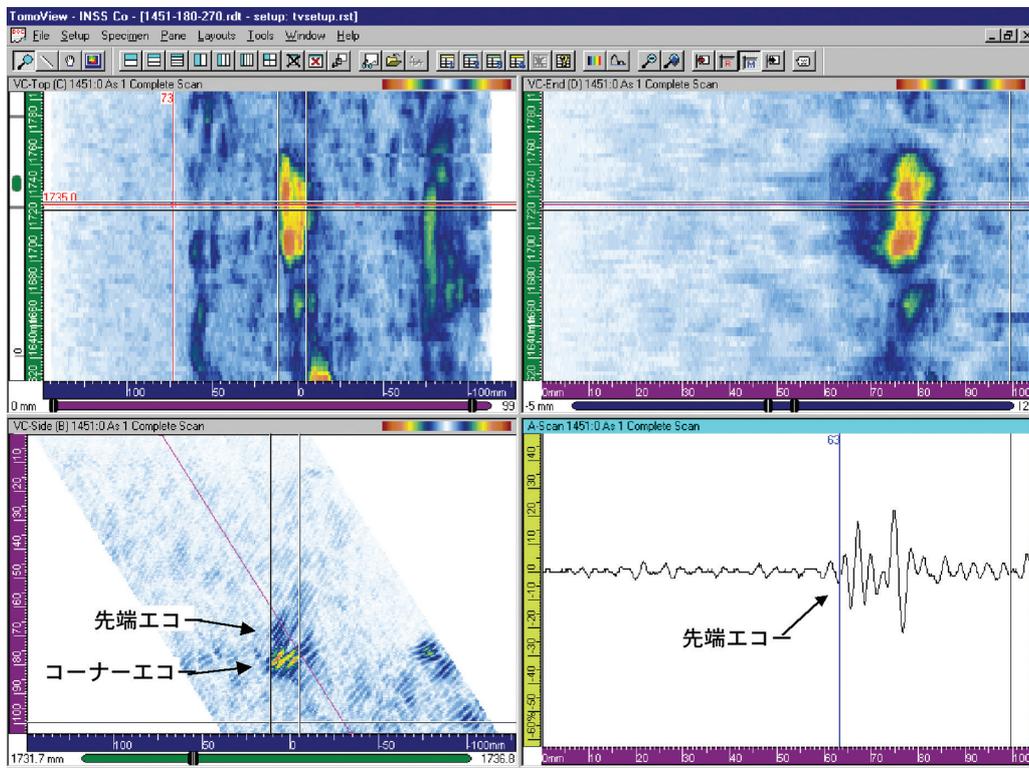
モックアップ試験体についての試験データのうち、欠陥の寸法に係るデータはこれをサイジング試験結果として記録し、その後に試験体欠陥情報に基づき、分析、評価を行った。

4.2.1 深さサイジング結果

欠陥深さサイジングには、3. 試験方法に記載のとおり端部エコー法を用いた。図7～9に、深さサイジング結果の例を示す。図7は、欠陥No.9EDMスリットの探傷データ画面で、(a)では、図中に示すようにBスコープ中に欠陥No.9のコーナーエコーと先端エコーが明確に識別できる。Dスコープでも同様に識別できる。Aスコープは、この2つの信号のうちコーナーエコーを示す。このAスコープの横軸は、時間を深さに換算した値である。この値から、コーナーエコーの深さは、72mmと読める。図7(b)のAスコープは欠陥No.9の先端エコーを示し、その深さは63mmと読める。この両者のデータより、欠陥No.9の超音波探傷による深さ測定値は72-63=9mmとなった。図8, 9においても同様の手順により、それぞれ欠陥の深さ測定値11mm, 12mmとなった。

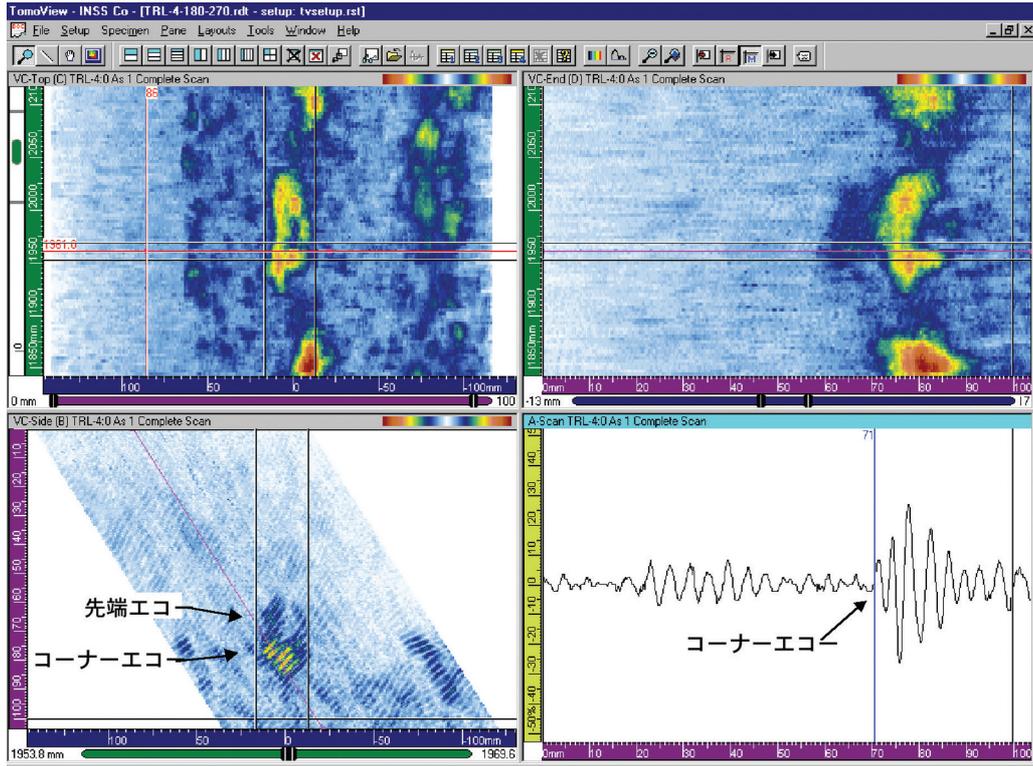


(a) コーナーエコー(指示深さ72mm)

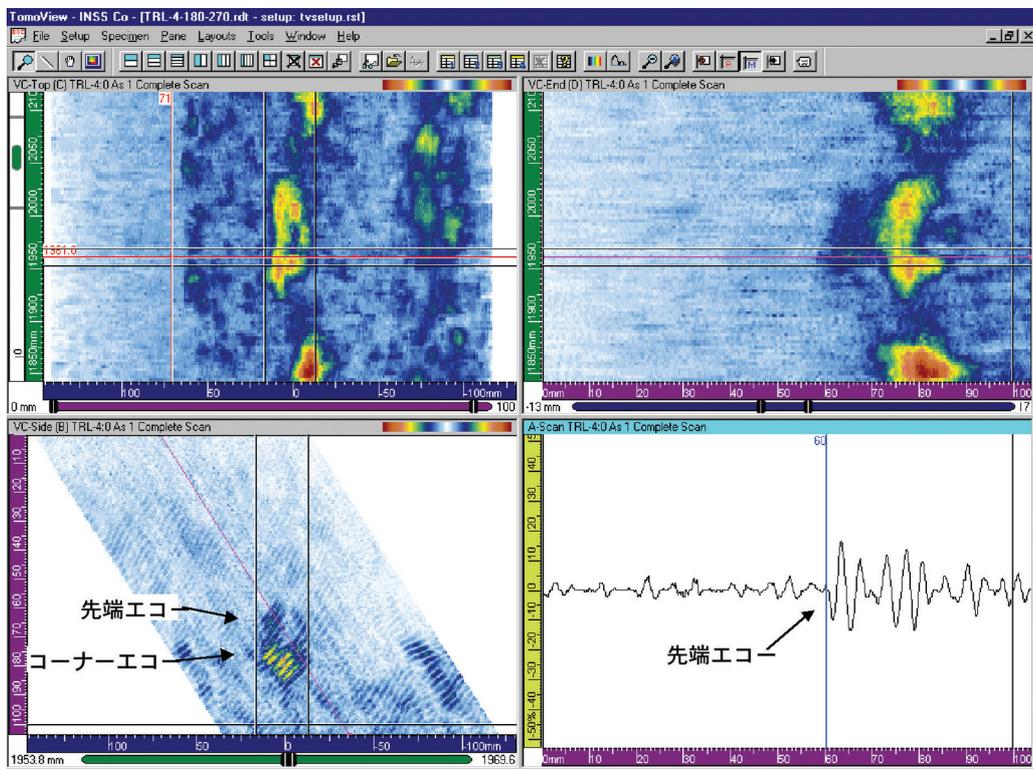


(b) 先端エコー(指示深さ63mm)

図7 サイジング試験結果例 [探触子A, 欠陥No. 9 (EDMスリット), 評価深さ 9 mm]

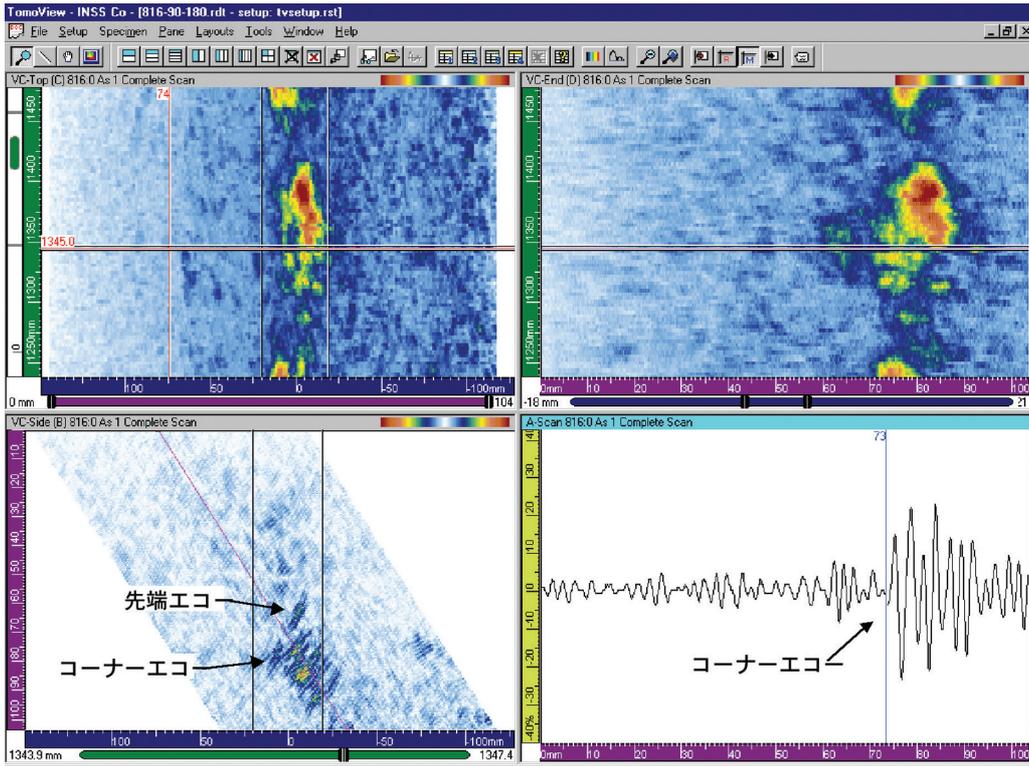


(a) コーナーエコー(指示深さ71mm)

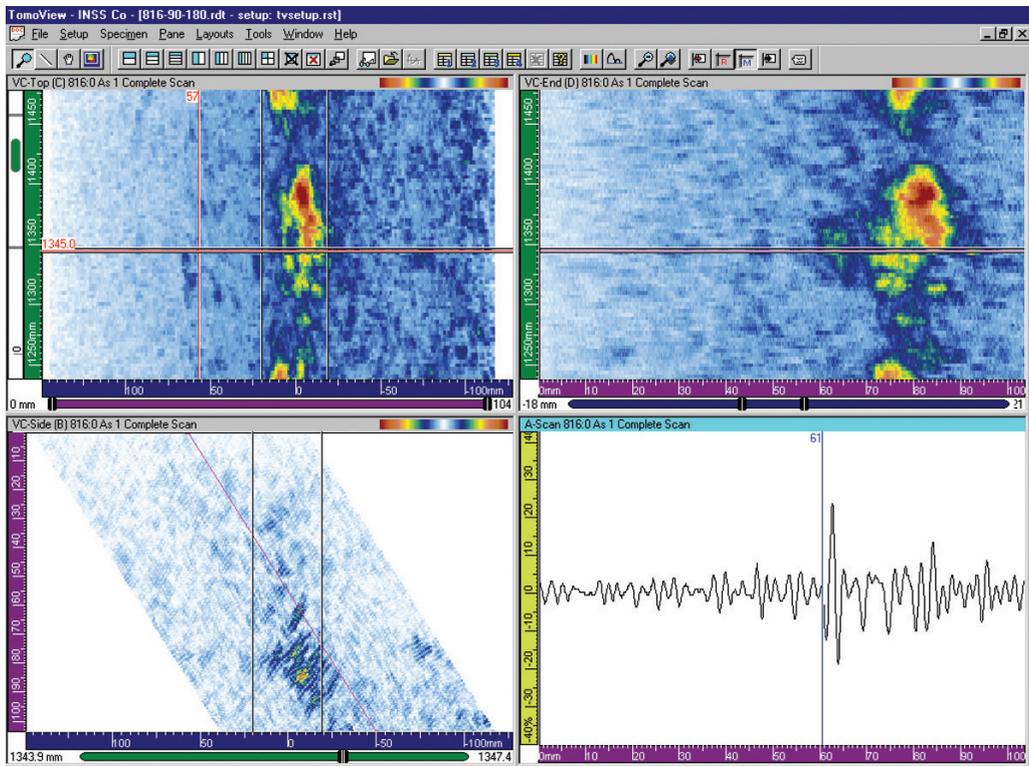


(b) 先端エコー(指示深さ60mm)

図8 サイジング試験結果例 [探触子B, 欠陥No.11(EDMスリット), 評価深さ11mm]



(a) コーナーエコー(指示深さ73mm)



(b) 先端エコー(指示深さ61mm)

図9 サイジング試験結果例 [探触子C, 欠陥No. 6 (EDMスリット), 評価深さ12mm]

表 8 に、各探触子により得られた欠陥の深さ測定値を示す。欠陥の深さは、試験体製造時記録の値であり、実際に欠陥を切断して調査した値ではない。表 8 において、指示深さ値の記載のないものは、深さ測定ができなかったことを示している。これらは、付与された欠陥のうち、試験体製造時の深さ値が小さい 5 ~ 6 mm のものである。試験体製造時の深さ値が 6 mm を超える欠陥については、深さ測定が可能であった。

指示深さとともに、探傷波形上での端部エコーの識別のし易さを、○、△、× で示した。端部エコーの識別性は、EDM スリットと疲労欠陥で差がなかった。欠陥の種類よりも欠陥深さで識別性が異なり、深さが 5 ~ 6 mm の欠陥では、端部エコーの識別が容易ではなく、測定不能の場合がほとんどであった。また深さ 8 ~ 9 mm の欠陥でも、欠陥番号 3 の疲労欠陥、欠陥番号 8 の EDM スリットは、3 個の探触子すべてで端部エコー識別のしやすさが × であった。これらの欠陥は、静铸造側に存在しており、溶接金属ごしに探傷するため、超音波の散乱が大きかったものと

推定される。

深さが 6 mm 以下の浅い欠陥の端部エコーの識別が容易ではなかったのは、使用した探触子の周波数が 1MHz と低く 1 波長が 6 mm と長い一方で、浅い欠陥ではコーナーエコーと端部エコーの位置が近接しているため、端部エコーとコーナーエコーが重なることによると推定される。端部エコーが立ち上がり始めるとともに、コーナーエコーに吸収される例が、実際に観測された。粗粒材の超音波探傷では、超音波の散乱しにくい 1MHz 付近の低周波数が必要であり、小型欠陥のサイジング性とはトレードオフの関係にある。

なお、欠陥番号 3 と 8 以外の深さ 8 mm 以上の欠陥は、端部エコーの識別性が △ または ○ であった。特に、深さが 10 mm を超える欠陥では、3 個のいずれの探触子を用いても、端部エコーを明瞭に識別して深さ測定が可能であった。

図 10(a) に、EDM スリットの深さサイジングによる測定値と実際の欠陥深さの関係を、図 10(b) に、疲労欠陥の深さサイジングによる測定値と疲労欠陥深

表 8 各探触子により得られた欠陥の深さ

設けられた欠陥			深さ測定値 (mm) *2					
番号	種類	深さ a (mm) *1	探触子A		探触子B		探触子C	
1	疲労欠陥	8	8		11		11	
2	疲労欠陥	5	6		—	-	7	
3	疲労欠陥	8	13	×	14	×	8	×
4	疲労欠陥	10	13		10		11	
5	EDM	5	8	×	10		7	×
6	EDM	12	13		12		13	
7	EDM	6	7		5		7	
8	EDM	9	9	×	6	×	10	×
9	EDM	9	9		10		13	
10	EDM	6	—	-	8	×	—	-
11	EDM	12	12		11		14	
12	EDM	5	7	×	—	-	—	-
13	疲労欠陥	5	6	×	—	-	—	-
14	疲労欠陥	14	14		13		13	
15	疲労欠陥	12	13		14		9	
16	疲労欠陥	15	14		14		18	

*1: 欠陥深さは、試験体製造時の記録による。

*2: - は測定不能を示す。

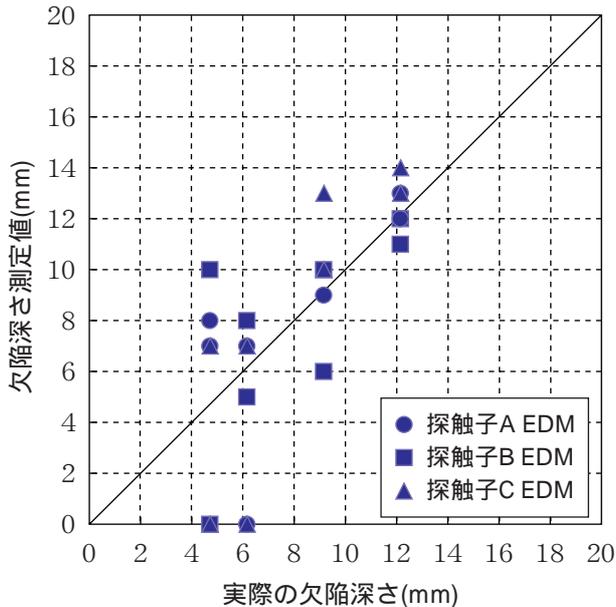
○: 明確に端部エコーの識別ができた。

△: 明確ではないが、端部エコーの識別ができた。

×: 端部エコーが明瞭ではなく識別が容易ではなかった。

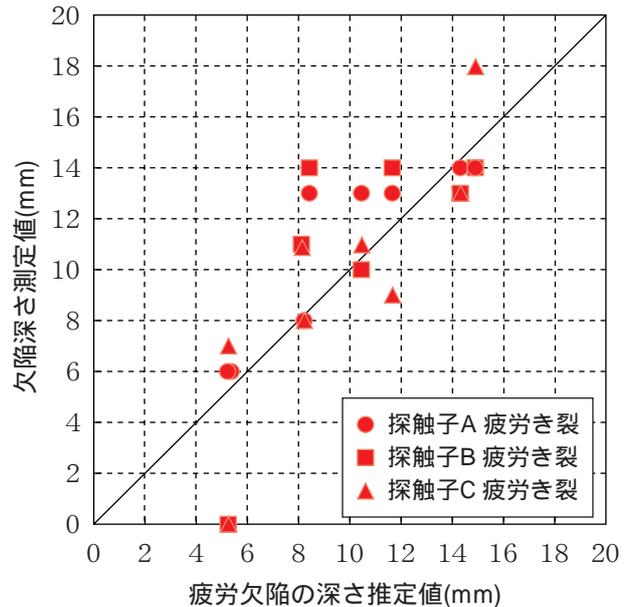
さ推定値との関係を示す。ただし、横軸としている実際の欠陥深さは、試験体製造時の記録である。また、深さサイジングが不可能な場合は、グラフ上測定値0で表示している。表9に、深さ測定精度に関する相関係数、誤差平均、誤差の標準偏差およびRMS誤差を示す。ただし、深さの測定値がないものは、統計処理から除外した。

測定率は、全体で0.85であった。さらに、欠陥全体で相関係数は平均0.80、誤差平均は、1.1 mm、誤差の標準偏差は2.0 mm、RMS誤差は2.2 mmであった。EDMスリットに関しては、その製造過程を考慮すると、製造記録と実際の欠陥寸法との誤差がほとんどないものと推定される。このEDMスリットのみに着目すると、探触子A、Cにより、0.9を超える高い相関係



深さ測定ができなかったものは、測定値を0とした。

図10(a) EDMスリット欠陥深さサイジング結果



深さ測定ができなかったものは、測定値を0とした。

図10(b) 疲労欠陥欠陥深さサイジング結果

表9 欠陥深さの測定精度

項目		探触子A	探触子B	探触子C	A,B,Cの平均
測定率	疲労欠陥	1.00	0.75	0.88	0.88
	EDM	0.88	0.88	0.75	0.83
	全体	0.94	0.81	0.81	0.85
相関係数	疲労欠陥	0.88	0.39	0.82	0.79
	EDM	0.92	0.53	0.93	0.77
	全体	0.89	0.62	0.85	0.80
誤差平均 (mm)	疲労欠陥	1.1	1.4	0.6	1.1
	EDM	1.0	0.4	1.8	1.1
	全体	1.1	0.9	1.2	1.1
誤差の 標準偏差 (mm)	疲労欠陥	1.8	2.7	2.1	2.1
	EDM	1.4	2.7	1.2	1.9
	全体	1.6	2.7	1.8	2.0
RMS誤差 (mm)	疲労欠陥	2.0	2.9	2.1	2.3
	EDM	1.6	2.6	2.1	2.1
	全体	1.9	2.7	2.1	2.2

数が得られた。さらに、EDM スリットに関する誤差平均は、すべての探触子で 0.4 ~ 1.8 mm と、やや大きめに評価する傾向にある。同様に誤差の標準偏差は 1.2 ~ 2.7 mm，RMS 誤差は、1.6 ~ 2.6 mm である。なお、疲労欠陥に関しては、破断試験結果を待って詳細な精度評価をする必要があるが、製造記録データによる統計では、相関係数は平均 0.79，誤差平均は、1.1 mm，誤差の標準偏差は 2.1 mm，RMS 誤差は 2.3 mm であった。

これらの統計値は、ASME Code Sec.XI Appendix VIII の鍛造ステンレス鋼溶接部に対する UT 深さ測定に関する合格判定基準 (RMS 誤差 0.125 inch (3.2 mm) 以下であること。) を満足している。

4.2.2 長さサイジング結果

欠陥の長さサイジングは、C スコープ上の周方向の欠陥信号長さを直接読みとる方法で行った。表 10 に、長さサイジングにより得られた測定値を示す。ただし、欠陥の長さは、試験体製造時記録の値であり、実際に欠陥を切断して調査した値ではない。図 11(a) に、EDM スリットの長さサイジングによる測定値と実際の欠陥長さの関係を、図 11(b) に、疲労欠陥の長さサイジングによる測定値と疲労欠陥長さ推定値との関係を示す。表 11 に、試験体製造時の長さ値による長さ測定精度に関する統計値の試算値を示す。

実際の欠陥長さ と長さ測定値との相関係数は、EDM スリットのみに着目すると、いずれの探触子に

よっても、0.93 以上である。同様に EDM スリットに関する誤差平均は、5.5 ~ 6.8 mm，誤差の標準偏差は 5.3 ~ 7.5 mm，RMS 誤差は 7.6 ~ 9.0 mm であった。なお、疲労欠陥に関しては、破断試験結果を待って詳細な精度評価をする必要があるが、製造記録データによる統計では、相関係数は平均 0.81，誤差平均は、

表10 各探触子により得られた欠陥の長さ測定値

番号	欠陥		長さ測定値 (mm)		
	種類	長さ (mm)	探触子A	探触子B	探触子C
1	疲労欠陥	65	60.1	61.2	87.7
2	疲労欠陥	40	47.6	49.4	54.3
3	疲労欠陥	60	61.0	68.7	96.0
4	疲労欠陥	105	96.9	100.6	97.7
5	EDM	30	36.7	40.1	41.7
6	EDM	80	91.8	85.2	92.7
7	EDM	40	56.8	45.1	43.4
8	EDM	60	57.6	56.8	65.1
9	EDM	60	61.0	57.6	57.6
10	EDM	40	46.8	45.9	45.1
11	EDM	80	90.2	91.0	86.0
12	EDM	30	41.7	50.1	42.6
13	疲労欠陥	40	77.7	65.1	92.7
14	疲労欠陥	105	113.6	114.4	103.5
15	疲労欠陥	85	92.7	92.7	97.7
16	疲労欠陥	105	97.7	105.2	116.1

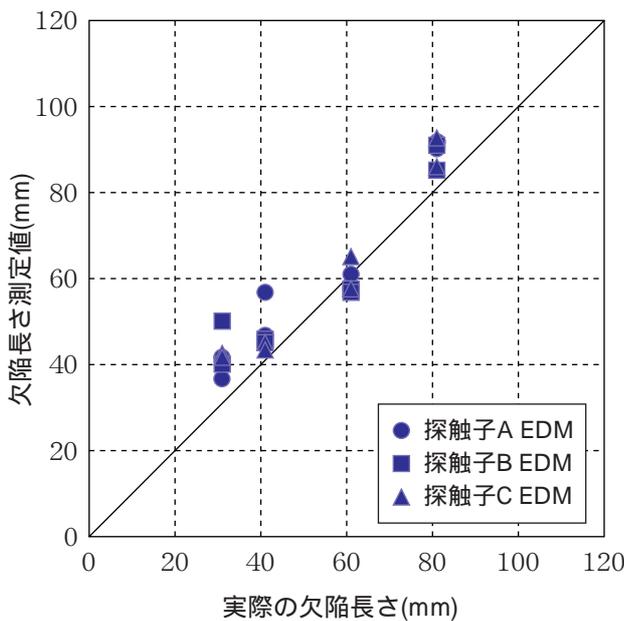


図11(a) EDMスリット長さサイジング結果

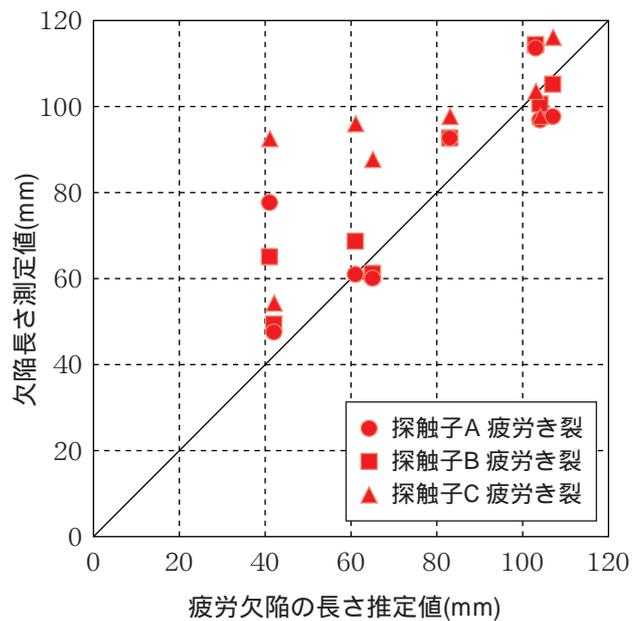


図11(b) 疲労欠陥長さサイジング結果

9.7 mm, 誤差の標準偏差は 15.2 mm, RMS 誤差は 17.8 mm であった.

これらの統計値は, ASME Code Sec.XI Appendix VIII の鍛造ステンレス鋼溶接部に対する UT 長さ測定に関する合格判定基準 (RMS 誤差 0.75 inch (19 mm) 以下であること.) を満足している.

表11 欠陥長さ測定精度

項目	探触子A	探触子B	探触子C	A,B,Cの平均	
相関係数	疲労欠陥	0.84	0.94	0.73	0.81
	EDM	0.95	0.93	0.97	0.95
	全体	0.91	0.95	0.84	0.89
誤差平均 (mm)	疲労欠陥	5.1	6.4	17.5	9.7
	EDM	6.8	5.5	5.8	6.0
	全体	6.0	5.9	11.6	7.9
誤差の 標準偏差 (mm)	疲労欠陥	14.8	9.4	18.8	15.2
	EDM	6.2	7.5	5.3	6.1
	全体	11.0	8.2	14.6	11.6
RMS誤差 (mm)	疲労欠陥	14.8	10.9	24.8	17.8
	EDM	9.0	8.9	7.6	8.5
	全体	12.2	10.0	18.3	13.9

5. まとめ

PWR 1次冷却材管溶接部と同等の材料, 形状および寸法を有し, 疲労欠陥およびEDM スリットを設けたモックアップ試験体に対し著者の一人が開発した自動超音波探傷システムによる超音波探傷試験を行った. 結果は, 以下のように優れた特性を得ることができた.

- 1) EDM スリット 8 個, 疲労欠陥 8 個計 16 個の欠陥全てを 3.7 以上の良好な SN 比で検出した. また, 欠陥以外の信号を欠陥とする誤識別はなかった. これらは, ASME Code Sec.XI Appendix VIII の鍛造ステンレス鋼溶接部に対する合格基準を満足するものである.
- 2) 欠陥深さサイジングは, 深さの小さい欠陥を除き可能であった. 特に深さ 10 mm を越える欠陥においては, 全ての欠陥で明瞭な端部エコーが確認された. しかしながら, 深さ 8 ~ 9 mm の欠陥になかにも, 深さサイジングに必要な端部エコー識別が一応可能であるが, 容易ではなかったものがあつた. 深さ測定値の相関係数は平均 0.80, RMS 誤差は 2.2 mm であった. 欠

陥長さ測定値の相関係数は平均 0.89, RMS 誤差は 13.9 mm であった. これらの値は, ASME Code Sec.XI Appendix VIII の鍛造ステンレス鋼溶接部に対する合格基準を満足するものである.

INSS で開発した自動超音波探傷システムにより鍛造ステンレス鋼の超音波探傷試験において, 欠陥の深さサイジングが可能であることがわかった. しかしながら, 深さサイジングに必要な端部エコーの識別が容易でないケースが含まれており, 今後さらなる技術開発が必要である. 本手法の実用化に向けて, 今後さらに他のモックアップ試験体の欠陥サイジングデータ蓄積を図る必要がある.

謝辞

本研究は, 旧発電設備技術検査協会高経年化技術センターの平成 15 年度安全調査研究として, 実施されたものであります. 研究の進行にあたり, 旧発電設備技術検査協会高経年化技術センター他各位には大変お世話になりました. ここに, 御礼申し上げます.

文献

- (1) S. Nishino, Y. Hida, T. Shirai, "Ultrasonic Test of Austenitic Stainless Steel Welds", *Journal of MHI*, **18**[6], p.783(1981).
- (2) D.S.Kupperman, K.J.Reimann, "Ultrasonic NDE of Cast Stainless Steel," *NDT International*, **20**[3], p.145(1987).
- (3) I. Atkinson, J.P. Charlesworth, B.M. Hawker, A. Rogerson, "Automated Ultrasonic Inspection of Austenitic Castings and Welds", *Non-Destructive Testing (Proc. 12th Int. Conf.)*, p.1019(1989).
- (4) P. Jeong, F. Amirato, "Ultrasonic Evaluation of Cast Stainless Steel Component," *Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*, **8**, p.2105 (1989).
- (5) P. Jeong, F. Amirato, *Ultrasonic Examination of Cast Stainless Steel*, EPRI NP-6299 Project 1570-2 Topical Report, (1989).
- (6) W. Lord, "Forward and inverse NDE problems," *Proc. the ISMM Int. Sympo. Computer Applications in Design, Simulation and Analysis*, p.113 (1989).
- (7) Hacker M.G., "Technical approach for effective

- ultrasonic examination of cast stainless steel piping and components", *1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, p.221(1989).
- (8) P.D.Young, L.S.Lai, C.T.Eon, "Development of nondestructive testing technology for the pressure boundary", *KAERI/RR-856/89*, 106 p(1990).
- (9) R.B.Thompson, "Ultrasonic wave propagation in cast stainless steel," *Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting*, 8.1, (1990).
- (10) M.S.Good, B.P.Hildebrand, C.M.Batson, "Phase Mapping of Ultrasonic Fields Passed Through Centrifugally Cast Stainless Steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, (1990).
- (11) A.Minachi, R.B.Thompson, "Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous, Anisotropic Cast Stainless Steel", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, (1990).
- (12) J.L.Rose, T.D.K.Ngok, A.Tverdokhlebov, K.Balasubramaniam, Y.Huang, "Ultrasonic interactions with CCSS (Centrifugally Cast Stainless Steel) and guidelines for CCSS inspection," *Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting*, **10.1**, (1990).
- (13) M.S.Good, B.P.Hildebrand, C.M.Batson, "Phase Mapping of Ultrasonic Fields Passed Through Centrifugally Cast Stainless Steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, p.1982(1990).
- (14) P.Dombret, P.Caussin, P.Rorive, "Developing ultrasonics for PWR pump bowl in-service inspection," *Nuclear Engineering*, **35**, p.42(1990).
- (15) P.Dombret, "Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel," *Nuclear Engineering and Design*, **131**, p.279(1991).
- (16) A.Minachi, R.B.Thompson, "Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous, Anisotropic Cast Stainless Steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **10B**, (1991).
- (17) G.A.Alers, "Application of electromagnetic acoustic transducers to coarse-grained material", *EPRI-NP-7438*, (Jul 1991).
- (18) B.P.Hildebrand, M.S.Good, A.A.Diaz, E.R.Green, "Application of Critical Angle Imaging to the Characterization of Cast Stainless Steels," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **11A**, p.863(1992).
- (19) C.Boveyron, D.Villard, R.Boudot, "Ultrasonic Testing of Cast Stainless Steel Components", *Proc. 11th Int.Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries*(1992).
- (20) J.M.Bordier, M.Fink, A.L.Brun., F.C.Tenoudji, "The random phase transducer in ultrasonic nondestructive testing of coarse grain stainless steel: An original tool to characterize multiple scattering effect," *Proc. IEEE 1992 Ultrasonics Symposium*, **2**, p.877(1992).
- (21) S.L.Lee, H.T.Lim, C.S.Park, B.C.Kim, "Ultrasonic testing simulation in austenitic stainless steel weld by ray tracing technique," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **15**, p.310(1995).
- (22) J.M.Bordier, M.Fink, A.L.Brun, F.C.Tenoudji, "The random phase transducer in ultrasonic NDT of coarse grain stainless steel", *EDF-94-NB-00072* (1993).
- (23) G.Maes, B.Hansoul, P.Dombret, "PISC parametric study on the effect of cast austenitic steel macrostructure on the capability of ultrasonic examination", *Proc. 12th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries*(1994).
- (24) M.Serre, P.Benoist, "Ultrasonic examination of cast stainless steel", *Proc. 12th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries*(1994).
- (25) C.Boveyron, D.Villard, R.Boudot, "Ultrasonic testing of cast stainless steel components", *EDF-93-NB-00096*(1994).
- (26) M.Serre, P.Benoist, D.Villard, N.Mathan, "Ultrasonic examination of cast stainless steel", *EDF-95-NB-00055*(1994).
- (27) S.R.Doctor, L.J.Angel, A.A.Diaz, R.V.Harris, F.A.Simonen, G.J.Schuster, "Reliability of NDE - cast stainless steel, SAFT-UT performance, PISC III program status, and evaluation of computer-based UT/ISI systems", *NUREG/CP-0133* **3**(1994).
- (28) M.Serre, P.Benoist, D.Villard, N.Mathan, "Enhancement of ultrasonic non-destructive techniques for the inspection of cast stainless steel components", *EDF-96-NB-00060*(1995).
- (29) T.Zetterwall, "PISC III -- Experience from UT evaluation in cast austenitic stainless steel components", *Proc.*

Joint ASME/JSME pressure vessels and piping conference, p.73(1995).

- (30) P.Lemaitre, T.D.Koblé *Report on the evaluation of the inspection results of the cast-to-cast PISC III Assemblies no.41, 42 and weld B of Assembly 43*, PISC III Report no.34 European Commission, (1995).
- (31) P.Lemaitre, T.D.Koblé *Report on the evaluation of the inspection results of the wrought-to-cast PISC III Assemblies 51 and weld A of Assembly 43*, PISC III Report no.35 European Commission, (1995).
- (32) S.R.Doctor, P.Lemaitre, S.Crutzen, "Austenitic steel piping testing exercises in PISC", *Nuclear Engineering and Design*, **157**, [1-2], p.231(1995).
- (33) C.Poidevin, M.Serre, O.Roy, N.Mathan, D.Villard, "Ultrasonic examination of cast stainless steel", *14th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries* (1996).
- (34) A.Diaz, S.R.Doctor, B.P.Hilderbrand, "Evaluation of Ultrasonic Inspection Techniques for Coarse Grained Materials", *NUREG/CR-6594 PNNL-11171*(1998).
- (35) 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).
- (36) Y.Kurozumi, " Development of an ultrasonic inspection technique for cast stainless steel, " *Insight*, 44, p.437(2002).
- (37) Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI, p353(2001)