

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 －端部エコー法による深さサイジング(寸法測定)－

Ultrasonic Inspection for Cast Stainless Steel : Depth and Length Sizing of Fatigue Cracks in Cast Stainless Steel Test Piece
- Depth Sizing Performance by using Crack Tip Diffraction Method -

黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)*

要約 加圧水型軽水炉 (PWR) の1次冷却材管等に用いられている鑄造ステンレス鋼中では、超音波の伝播が結晶組織の影響を強く受ける。このため、その管材などの超音波探傷においては、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ることが広く知られている。一方、2003年施行された「発電用原子力設備規格・維持規格」は、超音波探傷で検出された欠陥の深さ同定を要求している。本研究では、筆者が鑄造ステンレス鋼の超音波探傷を目的として、すでに開発した大型の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の疲労試験片に適用し、深さ・長さサイジングの可能性およびその精度について検証した。その結果、深さが板厚70 mmの20%を越える疲労き裂について、深さサイジング可能であることがわかった。また、全ての疲労き裂について長さサイジング可能であった。

キーワード 自動超音波探傷, 大型2振動子探触子, 鑄造ステンレス鋼, 1次冷却材管, サイジング, 疲労き裂

Abstract 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). It is well known that the large attenuation and scattering noise caused by the coarse grain structure interfere with the detection of the defects in the ultrasonic inspection of cast stainless steel. In the meantime, "Rules on Fitness-for-Service for Nuclear Power Plants," which was enforced the year before last, requires to identify the size of defects detected in the ultrasonic inspection.

In this research work, a formerly developed automated ultrasonic inspection system for cast stainless steel with a large aperture twin crystal transducer for the purpose of ultrasonic inspection of cast stainless steel applied to some fatigue crack test pieces and verified the possibility and the accuracy of crack depth sizing. As a result, the depth sizing was possible for the fatigue cracks which have the depth over 20% through wall thickness. The length sizing was possible for all the fatigue cracks.

Keywords automated ultrasonic inspection, large aperture twin crystal probe, cast stainless steel, reactor coolant pipe, sizing, fatigue crack

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。ところが、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偏向させるため、本材料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や、欠陥位置の誤認等を発生させる。こうしたことにより、この材料に対する超音波探傷検査が困難とされている。(1)-(8)

このような性質を有する鑄造ステンレス鋼材に対して効果的な超音波探傷検査を行うには、0.5~1 MHzの低周波数の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

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

にくい縦波モードの超音波を使用すること、あるいは送受信振動子を分割配置して特定の深さの感度を向上させ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。⁽⁹⁾⁻⁽¹⁴⁾ 筆者は、集束探触子および分割型探触子双方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、大口径で厚肉の鋳造ステンレス鋼管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。⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾

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った。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および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。

超音波探傷検査で欠陥の深さサイジングのためには、欠陥の上端と下端からの反射エコーを正確に捉え、それぞれの信号到達時間の差から材料中の音速、超音波の屈折角度を考慮して求める必要がある。原子力発電所の機器・配管溶接部は、製造・据付時に厳格な体積検査が行われており、材料中に内在する初期欠陥は直径が1 mm以下のブローホールなど非常に小さなものしか存在せず、それらがプラント運転中に機器・配管材料の健全性に影響を与えることは少ない。それよりも、機器・配管が内包する流体との相互作用による応力腐食割れやプラントの稼動・停止にともなう応力変動による疲労き裂が、プラントの高経年化にともないその健全性に与える影響が大きい。これら経年的に発生しやすい欠陥は、機器・配管の内面側を起点とする内面開口欠陥がほとんどである。こうした内面開口欠陥は、その下端部(起点部)において角(コーナー)の部分形成するため、斜めから入射した超音波を効率よく反射する(コーナーエコー)。一方、応力腐食割れや疲労欠陥の上端部は一般にとがった形状をしている。超音波がこうした先端部分に当たると、回折波(き裂先端エコー)が発生する。したがって、超音波探傷検査で欠陥の深さを測定するには、コーナーエコーとともに、欠陥先端からの回折波を効率よく検出することが不可欠である。しかしながら、鋳造ステンレス鋼においては、上記のように超音波の散乱減衰が激しいため、回折波の検出が非常に困難である。

欧州共同体で1990年代に行われたPISC III (Program

for the Inspection of Steel Components ; Phase III) において、鋳造ステンレス鋼溶接部超音波探傷法の欠陥検出能力とともに深さ、長さサイジング精度の検証が行われたが、深さサイジングに関し、よい結果が得られなかった。⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ 他の研究においても、深さサイジングについての検証はほとんど実施されていない。

本研究では、先に述べた大口径集束2振動子探触子を搭載した自動超音波探傷法を、鋳造ステンレス鋼中の疲労き裂に適用し、その深さサイジングの可能性および深さと長さサイジング精度について検証した。そして得られた深さおよび長さサイジング精度は、参考にASME Section XI Appendix VIIIの鍛造ステンレス鋼溶接部合格基準と比較した。

2. 試験装置

2.1 超音波探傷装置

自動超音波探傷システムは、配管の超音波探傷用に構成し、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させた。同時に自動走査機構全体を配管周方向に移動させた。本研究においては、疲労試験片の自動超音波探傷を行うため、配管自動走査機構に代わり、XYスキャナーを用いた。使用した装置の概要と写真を、それぞれ図1と図2に示す。

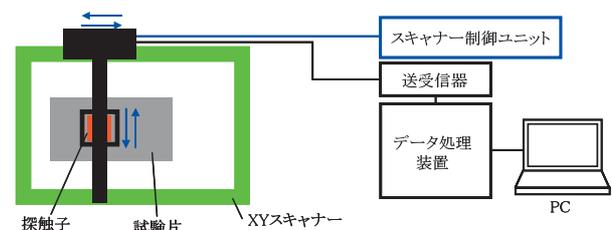


図1 装置概略図



図2 装置写真

高速データ処理装置/送受信器としてR&D Tech製のTomoscan svを用いた。これにより、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した。保存した探傷データを画像表示し、欠陥の検出性および欠陥深さのサイジング評価を行った。表1にXYスキャナー、表2にデータ処理装置の仕様を示す。

表1 XYスキャナーの仕様

| | |
|-----------|--|
| 装置名 | XY スキャナー (エム・イー・エンジニアリング製) |
| 外形寸法 | 600L × 440W × 300H (mm) |
| 重量 | 15 kg |
| 駆動方式 | Y 軸(配管軸方向): 歯付きギヤ駆動 X 軸(配管周方向): 歯付きギヤ駆動 |
| 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 | 140mm |
| 走査速度 | Y 軸 : 30mm/sec X 軸 : 20mm/sec |
| 走査ピッチ | X 軸 : 2~3mm |
| 位置検出分解能 | 1mm |
| エンコーダー分解能 | 0.2mm |

表2 使用したデータ処理装置の仕様

| | |
|----------------|--|
| 装置名 | Tomoscan sv (R&D Tech 製) |
| バルサーレーザースター | チャンネル数 : 16 ch, バンド幅 : 30MHz |
| デジタルタイザ | 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 points |
| 画面表示機能 | A,B,C, D scan, angle-corrected top view, side view, front view |

2.2 超音波探触子

鋳造ステンレス鋼のような粗粒材の探傷には、超音波の散乱減衰、超音波ビームの偏向が比較的少ない縦波斜角、低周波(0.5~1 MHz)の探触子が有効である。さらに、材料中に超音波を集束させるために、音響レンズや球面振動子を使用した集束探触子あるいは送受信振動子が別々になった2振動子探触子が有効である。本研究で用いた探触子は、筆者が以前開発した大型球面振動子を用いた2振動子探触子で、集束探触子および2振動子探触子の長所を併せ持っている。(15)(16)

集束型の2振動子探触子は、超音波の集束深さを任意に変えることができる。本研究では、対象とな

る欠陥が配管内面開口欠陥であるため、その確実な検出を目的として、集束深さを欠陥の下端コーナ部すなわち対象材料の厚さと等しくした。本研究で対象とした1次冷却材管材の厚さは、70mmであるので、開発初期には探触子の集束深さは70mmとした。(15)

このタイプの探触子は、集束深さ付近の感度は高いが、その深さを外れると感度が低下する。一方、前述のように欠陥の深さを知るには、欠陥先端部分から反射する回折波を検出する必要がある。したがって、大きい欠陥の場合、集束深さを浅くした探触子を用いることが有効である。探触子の入射角、屈折角および屋根角と超音波集束深さの関係を図3に示す。使用した探触子の仕様を表3に示す。タイプA, B, Cの順で屈折角が大きくなり、集束深さが浅くなって

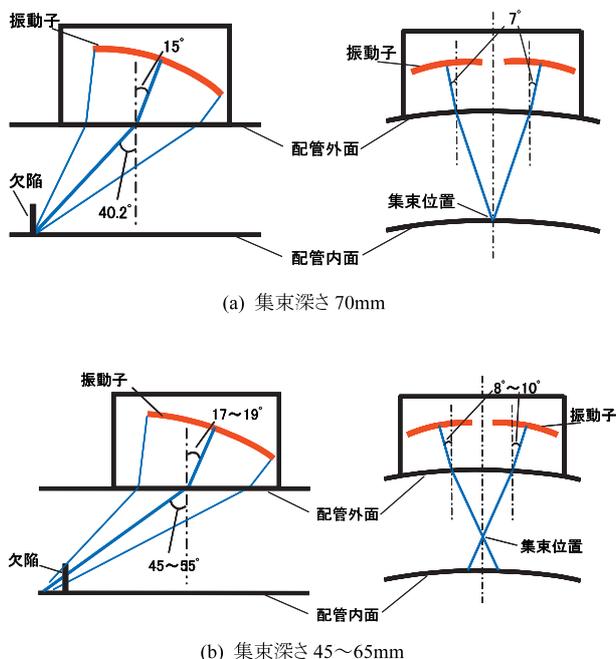


図3 大型集束2振動子触子の各パラメータと集束深さ

表3 使用した探触子の仕様

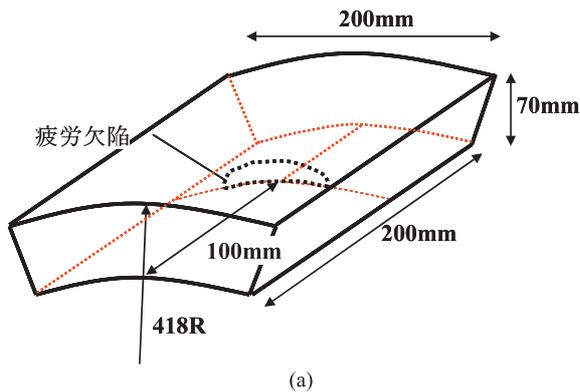
| 探触子 | タイプ A | タイプ B | タイプ C |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| 型式 | 縦波斜角2振動子 | 縦波斜角2振動子 | 縦波斜角2振動子 |
| 外形寸法(mm) | 100 x 100 x 80 | 100 x 100 x 80 | 100 x 100 x 80 |
| 周波数 | 1MHz | 1MHz | 1MHz |
| 振動子形状 | 球面型 | 球面型 | 球面型 |
| 屈折角 | 40.7° | 47.4° | 55° |
| 集束深さ(mm) | 65-75 | 45-65 | 40-60 |

2.3 疲労試験片

疲労試験片の形状、寸法および写真を図4に示す。これは、実際のPWRプラントに使用されている1次冷却材管と同等の材料、形状および寸法の遠心铸造ステンレス鋼配管から取り出した縦横それぞれ200mm、厚さ70mmのブロックの内面側中央に、深さが板厚70mmの10%、20%、30%、50%を目安に疲労き裂を入れたものである。表4に疲労試験片の仕様を示す。

表4 疲労試験片の仕様

| | |
|-------|---|
| 材質 | 铸造ステンレス鋼(SCS14A) 遠心铸造材 |
| 形状・寸法 | 直管からの切り出し材 L200 × W200mm × H 70mm (418mmR) |
| 欠陥 | 種類：疲労欠陥(10%t、20%t、30%t、50%t) 方向：周方向 |



(a)



(b)

図4 疲労試験片

また、試験片は全く同一条件で2個製作し、片方を切断し、その破面を観察して疲労き裂の深さを実測している。したがって、本研究で使用した試験片の疲労き裂の深さは、破断試験片の実測値とほぼ同

等であると考えられる。表5に疲労き裂の深さと長さを示す。深さは、同条件試験片の実測深さ(最大値)を示す。疲労き裂長さは、き裂の配管内面側開口部の実測値である。各疲労き裂は、ほぼ目標値近くの深さであった。

表5 疲労き裂の深さおよび長さ

| 目標深さ | 実測深さの最大値 | き裂長さ(内面開口部の実測値) |
|------|-----------------|-----------------|
| 10%t | 10.9mm (15.6%t) | 46.8mm |
| 20%t | 14.5mm (20.7%t) | 56.4mm |
| 30%t | 24.7mm (35.3%t) | 76.0mm |
| 50%t | 38.4mm (54.9%t) | 108.0mm |

3. 試験の実施

3.1 試験要領

XYスキャナーを用いて疲労試験片の自動超音波探傷を実施した。表6に試験条件を示す。

表6 試験条件

| 項目 | 試験条件 |
|--------------------|--|
| 探傷ピッチ (データ取得間隔) | X方向(配管軸方向): 1mm Y方向(配管周方向): 2mm |
| 探傷範囲 | X方向(配管軸方向): 140mm Y方向(配管周方向): 140mm |
| サンプリング周波数 | 16MHz |
| 探傷感度 | 56~66dB |
| 探傷ゲート幅 | 185mm |
| 探傷方法 | 水浸方式 |

探傷は、試験片を水没させて行う水浸方式を採用した。周方向の深さサイジングの精度には、軸方向の探傷ピッチ(データ取得間隔)が大きく影響する。探傷ピッチが大きいと深さサイジング精度が低下する。本試験においては、1mmの探傷ピッチでデータを取得した。各探傷位置で深さが正確に測定できたとすると、探傷ピッチが1mmの場合、深さサイジング精度は、1mm以下である。探傷範囲は、データを画像再生したとき、疲労き裂からの信号画像がB、C、Dスコープ上で十分確認できる大きさとした。図5に、試験実施状況を示す。

データ採取完了後、探傷データを画像表示し、欠陥深さのサイジング、欠陥長さのサイジング評価を行った。図6に探傷結果評価用画面の例を示す。画面は、A、B、C、Dスコープに4分割されている。B、

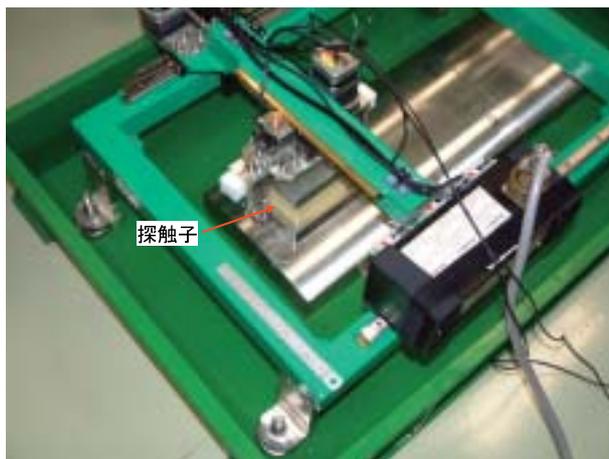


図5 試験実施状況

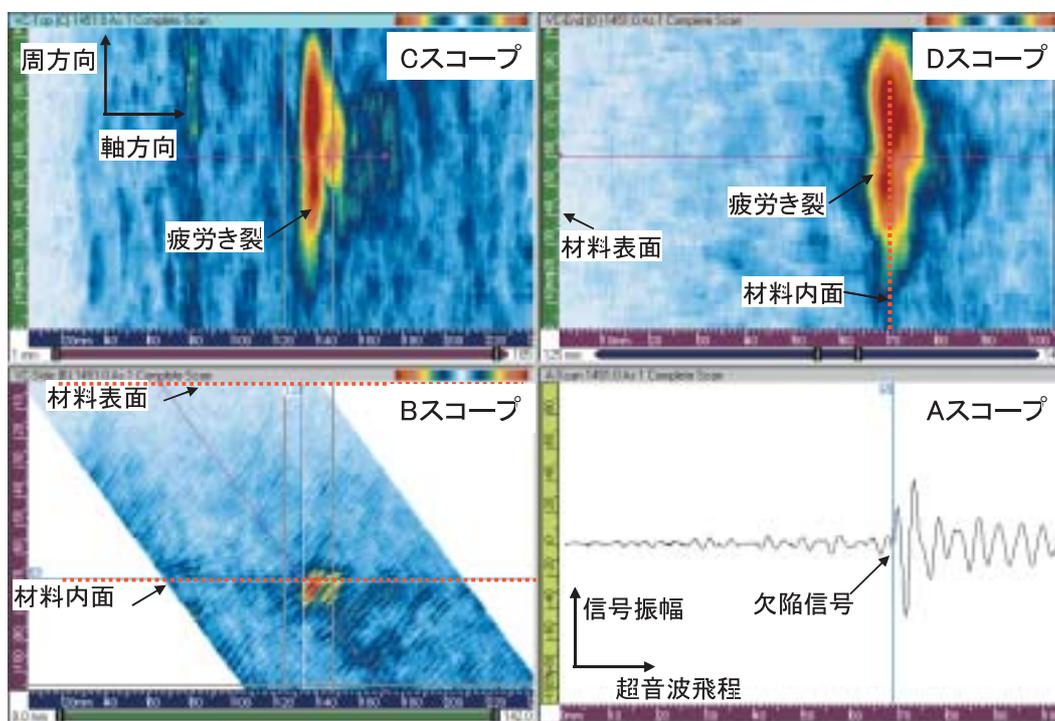


図6 探傷結果評価用画面の例

C, Dスコープの概念を図7に示す。Aスコープ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(超音波ビーム路程)を表す。なお、Aスコープ横軸の目盛りは、板厚方向の深さに換算されている。Bスコープは探傷箇所を溶接線に垂直な断面から見たイメージであり、画面上部が試験体表面を表す。Cスコープ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、横軸は配管軸方向を表す。Dスコープは探傷箇所を溶接線に平行な断面から見たイメージであり、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

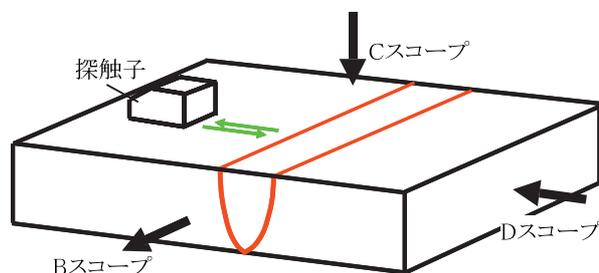


図7 B, C, Dスコープの概念

度のSN比による欠陥検出性と欠陥位置精度を評価した。

3.2 深さおよび長さサイジング方法

端部エコー法による深さサイジングの方法を図8に示す。超音波探傷では、欠陥からの反射波を受信してAスコープ画面に表示する。Aスコープ画面は、横軸が時間(距離)、縦軸が信号強度を表す。この信号強度とその発生時間(距離)から欠陥の識別を行う。まず、図の上側のように探触子の移動により、その超音波ビーム中心線が欠陥下端部に到達したとき、反射信号強度が最も大きくなる。図のように欠陥が材料内側に開口している場合、これをコーナーエコー

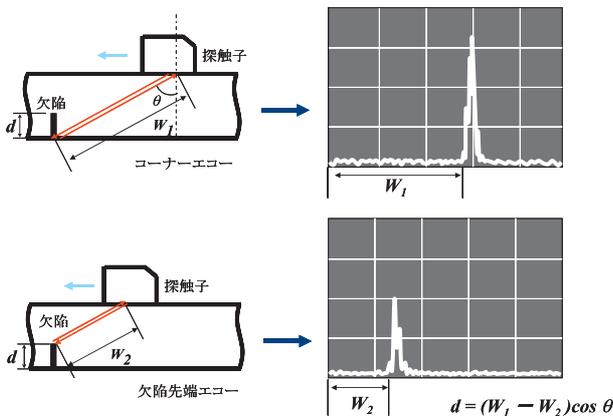


図8 端部エコー法による欠陥深さサイジング方法

という。上のAスコープから、コーナーエコーのビーム路程 W_1 がわかる。

探触子がさらに移動し、超音波ビーム中心線が欠陥の上端部に到達したとき、この先端から発生する超音波回折波の信号強度が最も大きくなる。この回折波のAスコープ画面(図の下側)から、先端回折波のビーム路程 W_2 がわかる。これら2つのビーム路程と探触子の屈折角 θ から欠陥の深さ d を計算する。

長さサイジングは、探触子の欠陥と平行な方向の移動距離から簡単に求められる。自動超音波探傷では、Cスコープ画面を用いる。長さサイジングの例を図9に示す。

4. 試験の結果および考察

4.1 深さサイジングの評価

図10~12に、50%t疲労き裂の深さサイジングに用いた探傷結果評価用画面を示す。図10は、タイプAの探触子による深さ50%t疲労き裂の探傷データ画面である。図10(a)は、探触子の位置をき裂下端コーナー部に合わせた画面である。B, C, D各スコープに疲労き裂からのコーナーエコーが明確に識別できる。Aスコープは、探触子の周方向位置76mmにおける最大のコーナーエコーを再現している。このAスコープの

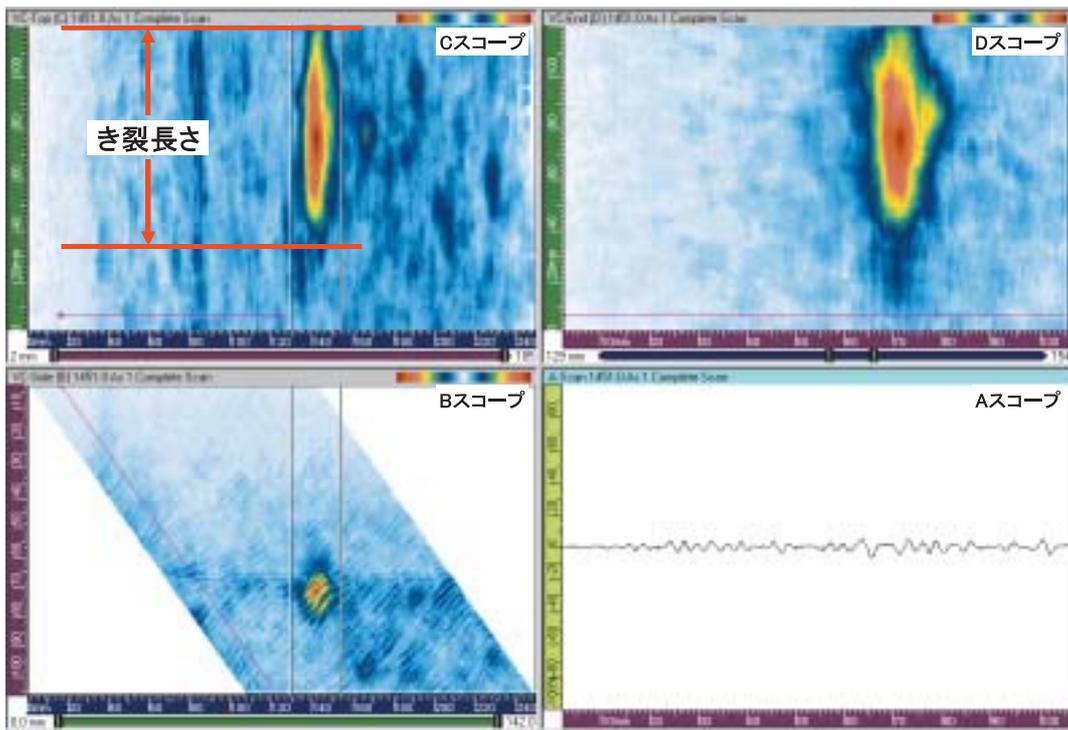
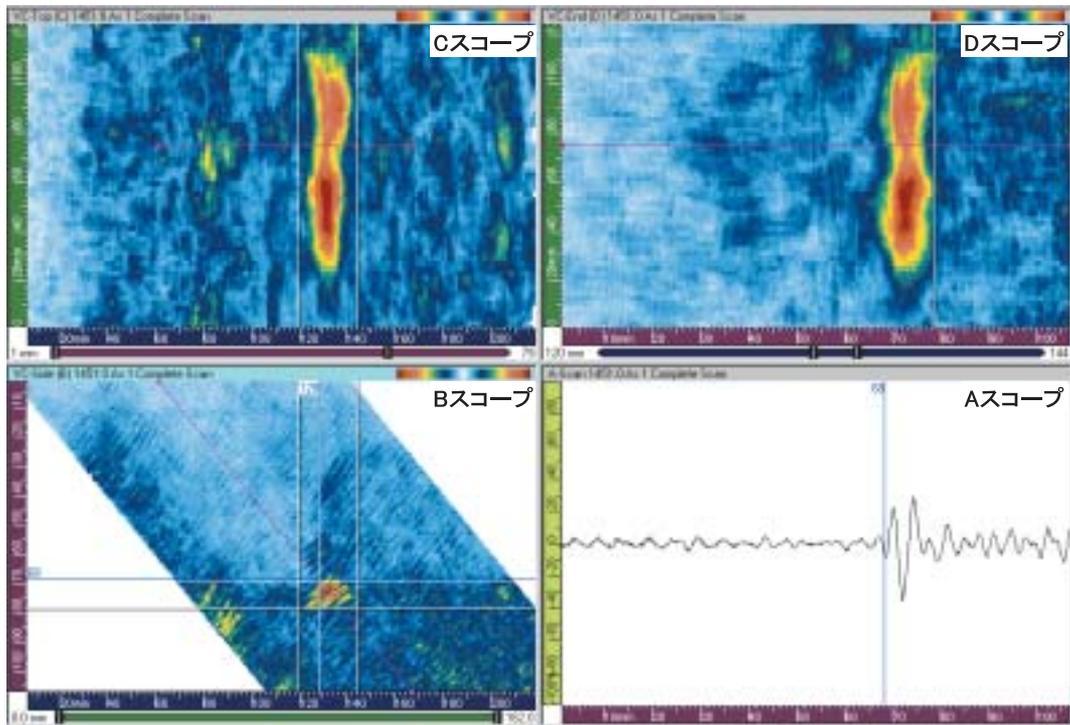
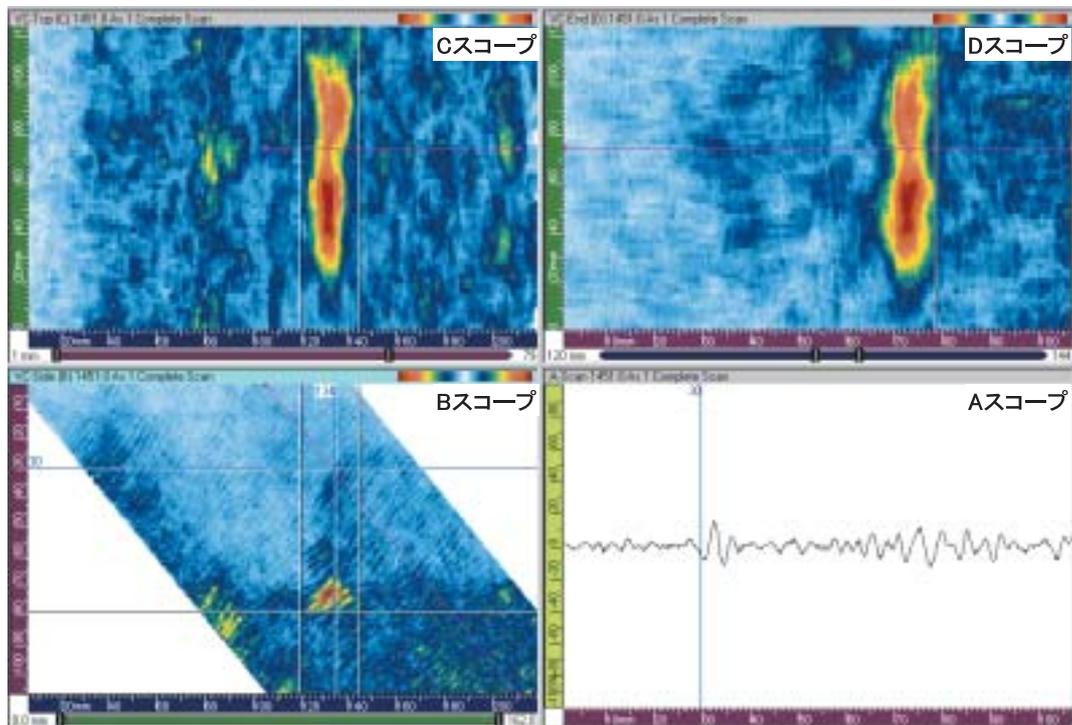


図9 欠陥長さサイジング方法

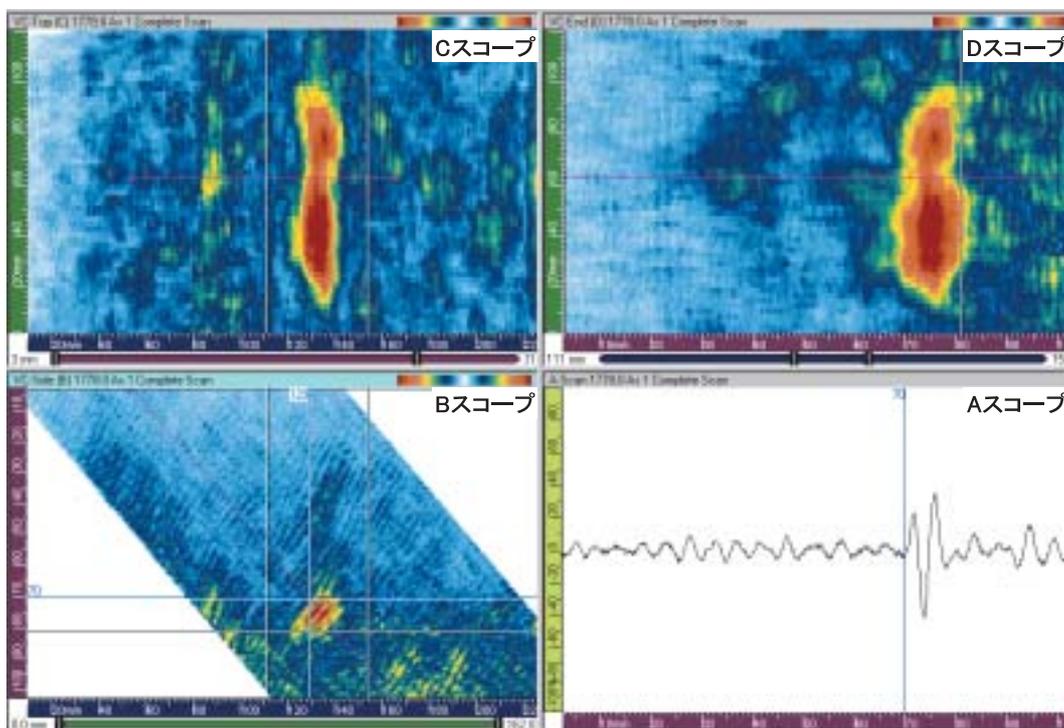


(a) コーナーエコー

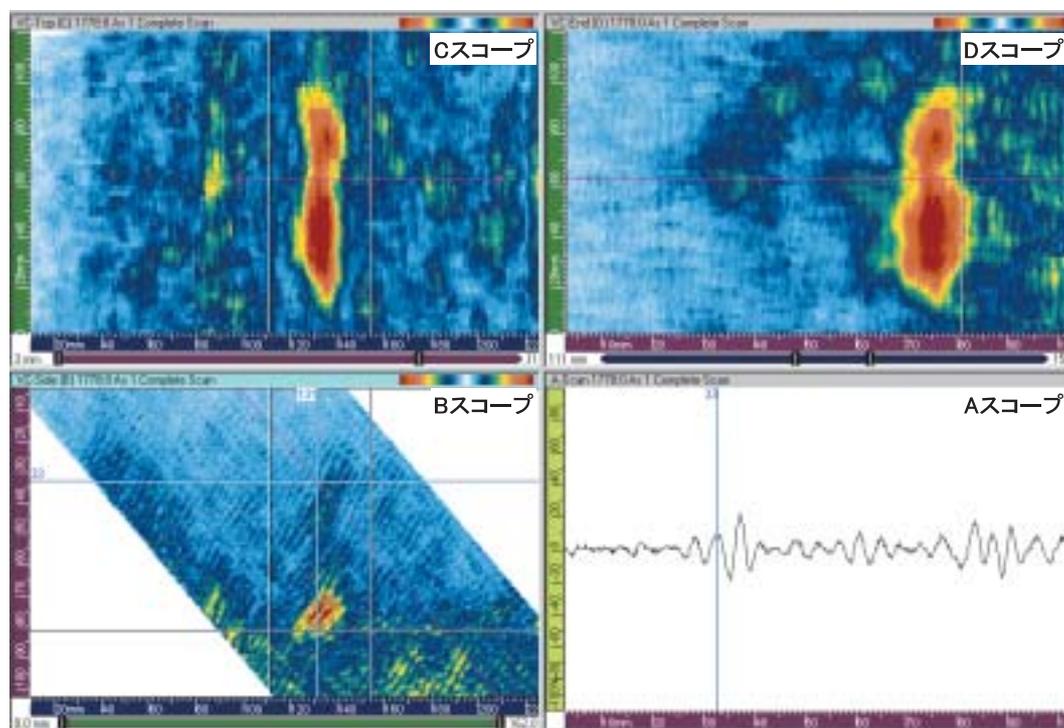


(b) 先端エコー

図10 50%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプA探触子)

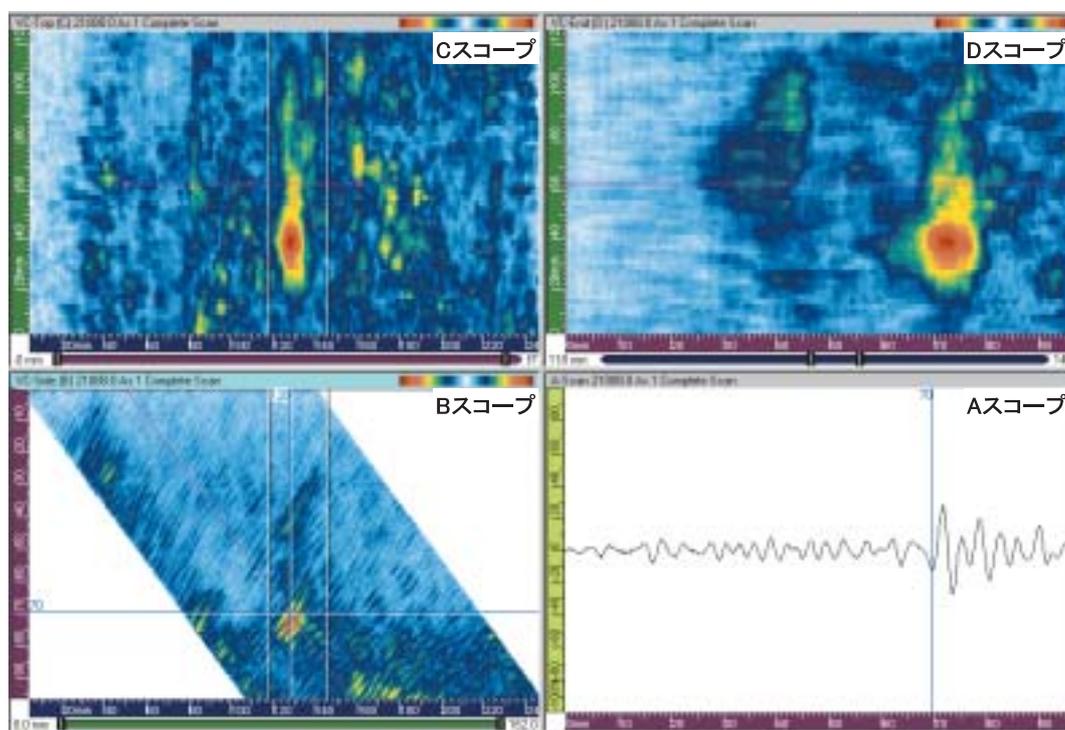


(a) コーナーエコー

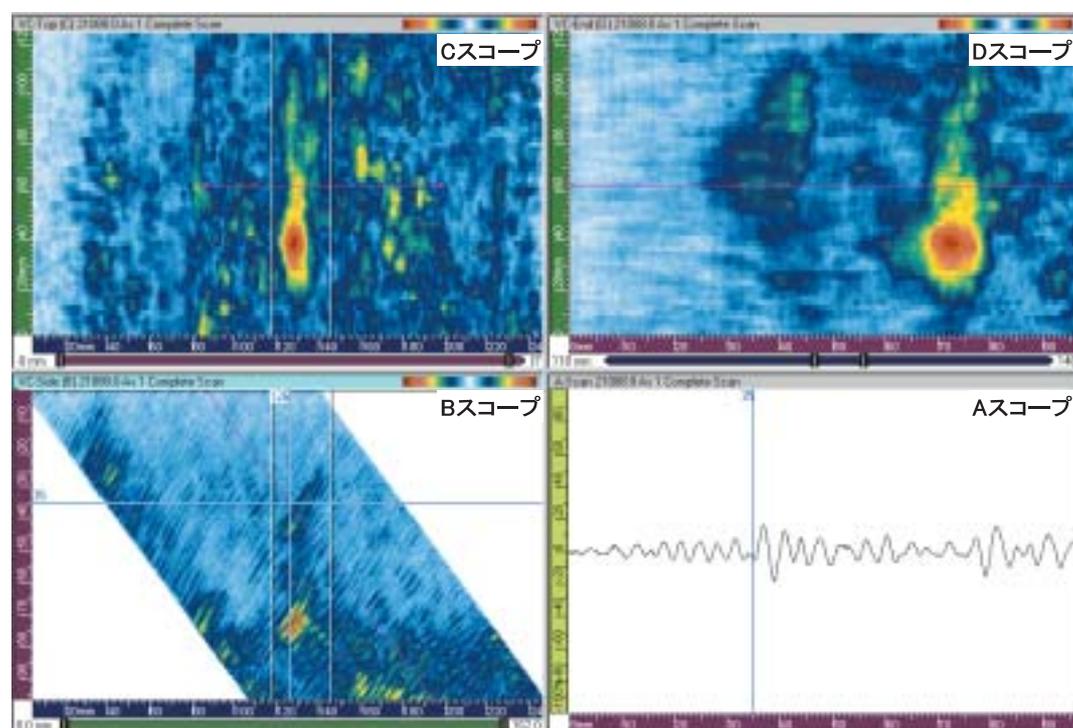


(b) 先端エコー

図11 50%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプB探触子)



(a) コーナーエコー



(b) 先端エコー

図12 50%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプC探触子)

横軸は、時間を深さに換算した値である。このときの、Aスコープにおけるコーナーエコー立ち上がり位置の深さすなわちき裂下端の深さは68mmである。

深さサイジングには、き裂先端エコーを同定しなければならない。そのために、まずDスコープ画面上でコーナーエコーと同じ周方向位置で、それより浅い位置に信号強度の強い部分がないか観察する。コーナーエコーよりかなり強度が低下しているが、Dスコープ上にやや信号強度の強い部分が観測される。これが、き裂先端エコーである。図10(b)のAスコープは、疲労き裂先端エコーを示し、その深さは30mmと読める。この両者のデータより、50%t疲労き裂の超音波探傷による深さ測定値は $68-30=38\text{mm}$ となった。この値は、表5に示す同条件で製作した疲労試験片の破面観察による実測値38.4mmと非常によく一致している。

図11は、タイプBの探触子による深さ50%t疲労き裂の探傷データ画面である。同様に図11(a)は、探触子の位置をき裂下端コーナー部に合わせた画面である。B、C、D各スコープに疲労き裂からのコーナーエコーが明確に識別できる。Aスコープは、探触子の周方向位置63mmにおける最大のコーナーエコーを再現しており、コーナーエコー立ち上がり位置の深さは70mmである。タイプBの探触子では、タイプAよりもコーナーエコー強度がやや低下しているが、疲労き裂先端エコーが見分けやすいことがわかる。これは、タイプB探触子の屈折角が大きくなり、集束深さが浅くなったことによるものである。コーナーエコーの信号強度は、屈折角の増加とともに減少する。

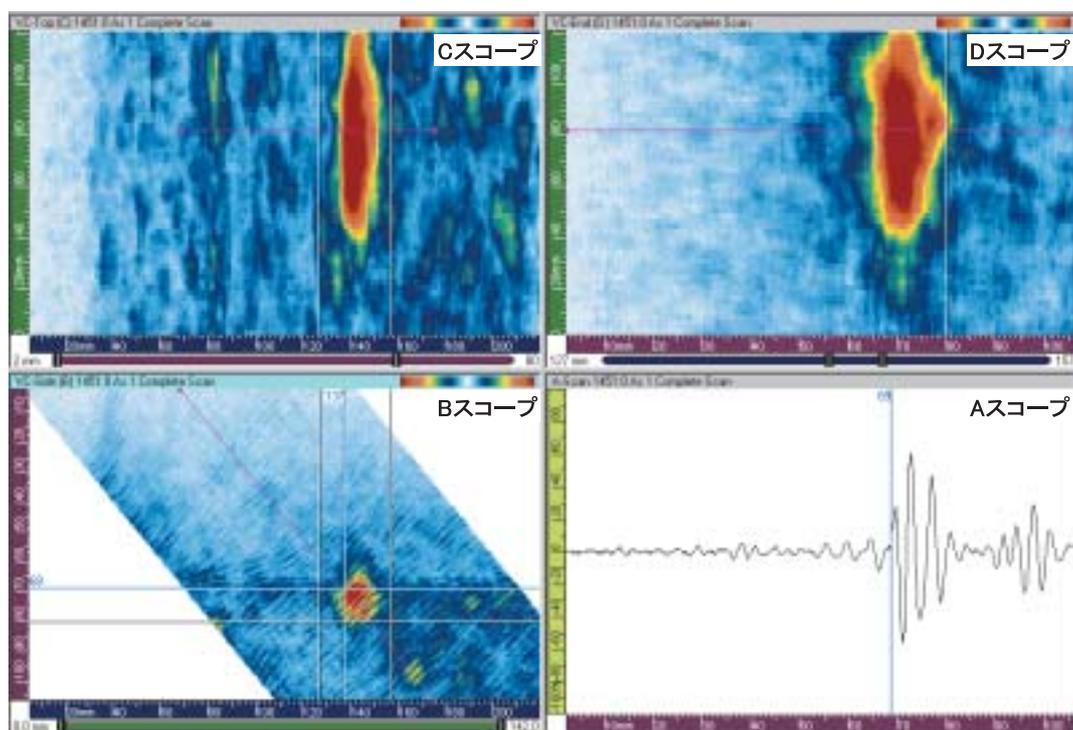
また、集束深さが浅くなったことにより、き裂先端位置に効果的に超音波が集束していることを示している。図11(b)のAスコープは、疲労き裂先端エコーを示し、その深さは33mmと読める。この両者のデータより、50%t疲労き裂の超音波探傷による深さ測定値は $70-33=37\text{mm}$ となり、タイプBの探触子同様、同条件の疲労試験片の実測値38.4mmとよく一致している。

図12は、タイプCの探触子による深さ50%t疲労き裂の探傷データ画面である。図12(a)は、探触子の位置をき裂下端コーナー部に合わせた画面である。B、C、D各スコープに疲労き裂からのコーナーエコーが明確に識別できるが、その信号強度はタイプA、B探触子のデータと比較してさらに低下している。また、Dスコープより疲労き裂先端エコーがさらに見分けやすくなっていることがわかる。これは、タイプB探触

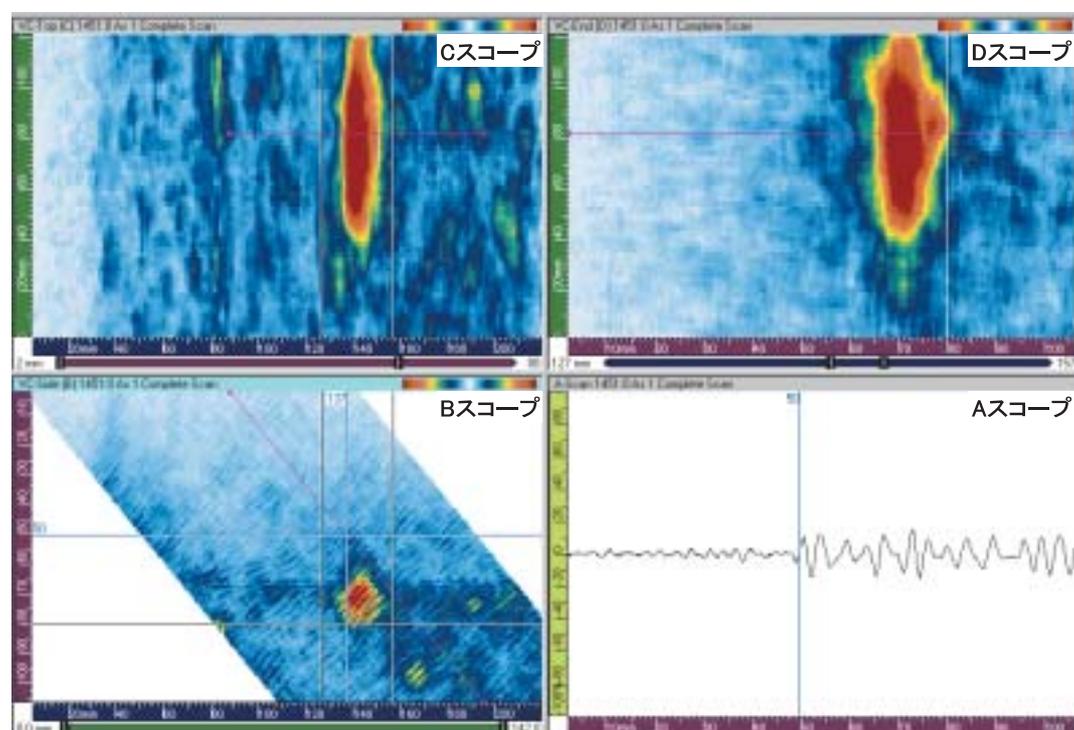
子よりもさらに屈折角が大きくなり、集束深さが浅くなったことによるものである。Aスコープは、探触子の周方向位置62mmにおける最大のコーナーエコーを再現しており、コーナーエコー立ち上がり位置の深さは70mmである。図12(b)のAスコープは、疲労き裂先端エコーを示し、その深さは35mmと読める。この両者のデータより、50%t疲労き裂の超音波探傷による深さ測定値は $70-35=35\text{mm}$ となり、他の探触子同様、同条件疲労試験片の実測値38.4mmとよく一致している。以上、50%t疲労き裂の深さサイジングの評価用画面から、深さサイジングをねらいとした当初の探触子デザインの考え方が適切であったことがわかった。

図13～15は、それぞれタイプA、B、C探触子を30%t疲労き裂の深さサイジングに用いた探傷結果評価用画面を示す。各探触子とも疲労き裂先端エコーが確認できるが、50%t疲労き裂の場合と比べ、タイプA探触子では信号強度が非常に微弱である。タイプB探触子の場合、コーナーエコーとの区別がしにくい。タイプC探触子の場合、比較的はつきりき裂先端エコーが識別できる。各評価用画面におけるコーナーエコーとき裂先端エコーの立ち上がり位置は、タイプA探触子で69mmと50mm、タイプB探触子で69mmと57mm、タイプC探触子で68mmと55mmである。これらの値から、疲労き裂深さは、タイプA、B、C探触子それぞれ19mm、12mm、13mmとなった。これは、同条件の疲労試験片の実測値24.7mmと比べ、過小評価傾向である。

図16～18は、それぞれタイプA、B、C探触子を20%t疲労き裂の深さサイジングに用いた探傷結果評価用画面を示す。各探触子とも疲労き裂先端エコーが確認できるが、50%t、30%t疲労き裂の場合と比べ、タイプA探触子では信号強度がさらに微弱である。タイプB探触子の場合、コーナーエコーとやや重なっているが、明瞭なき裂先端エコーが観察できる。タイプC探触子の場合、き裂先端エコーも観察されるが、より浅い領域にき裂先端エコーと紛らわしい疑似エコーが数多く存在する。各評価用画面におけるコーナーエコーとき裂先端エコーの立ち上がり位置は、タイプA探触子で69mmと52mm、タイプB探触子で70mmと56mm、タイプC探触子で68mmと54mmである。これらの値から、疲労き裂深さは、タイプA、B、C探触子それぞれ17mm、14mm、14mmとなった。タイプB、C探触子の測定値は、同条件の疲労試験片の実測値14.5mmとよく一致している。

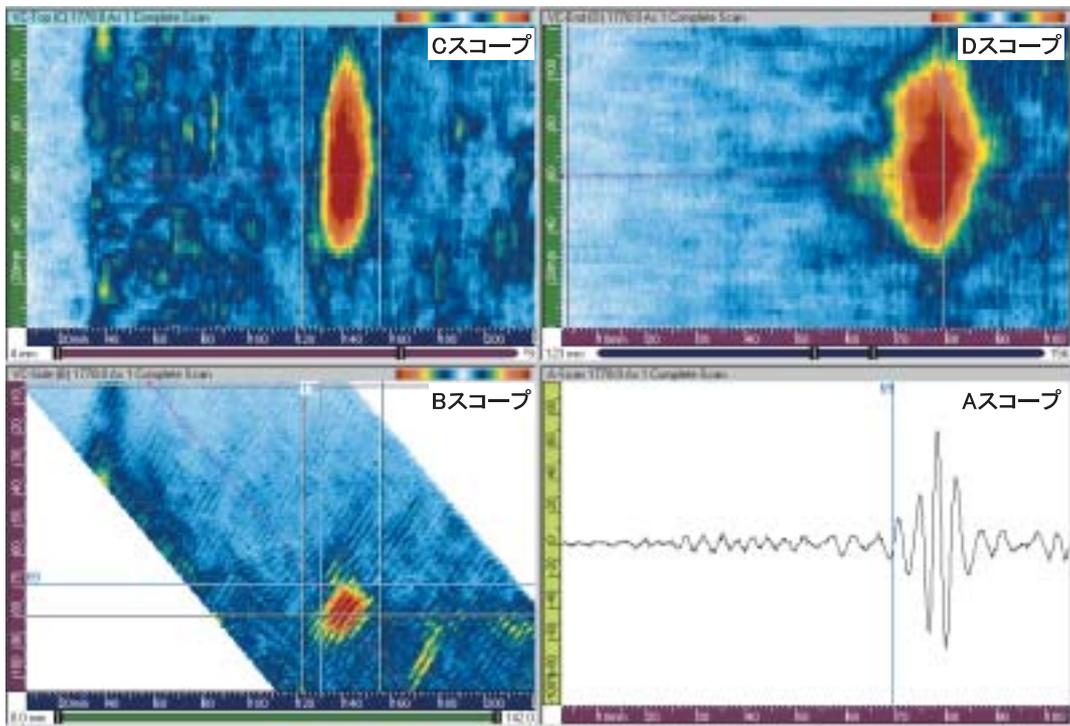


(a) コーナーエコー

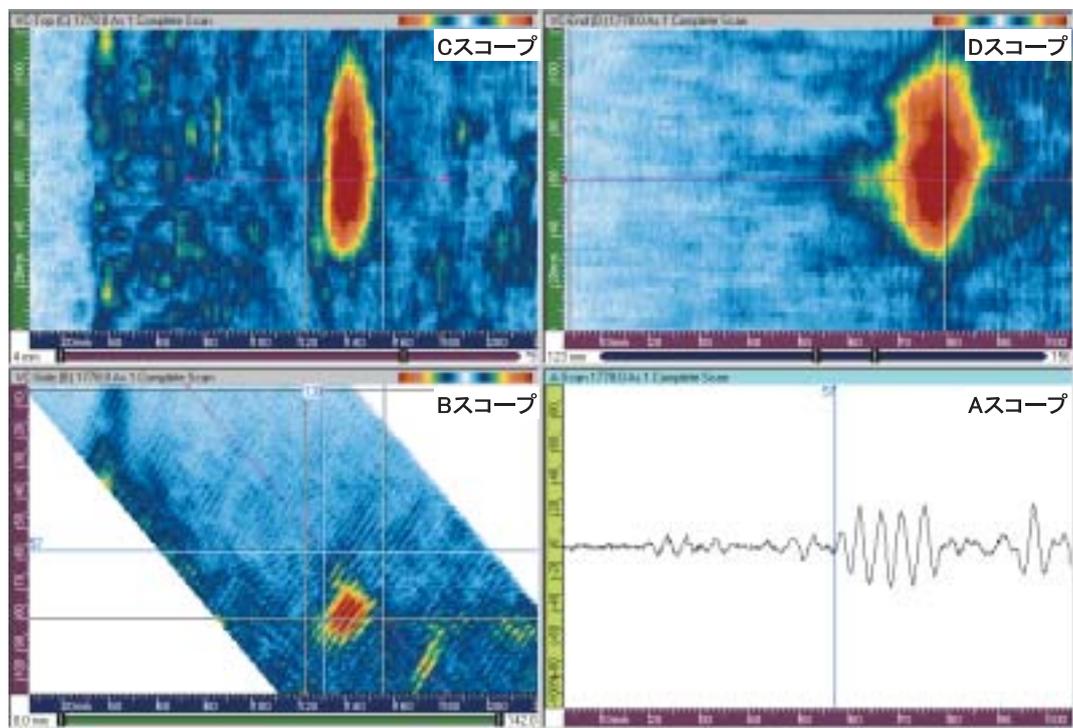


(b) 先端エコー

図13 30%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプA探触子)

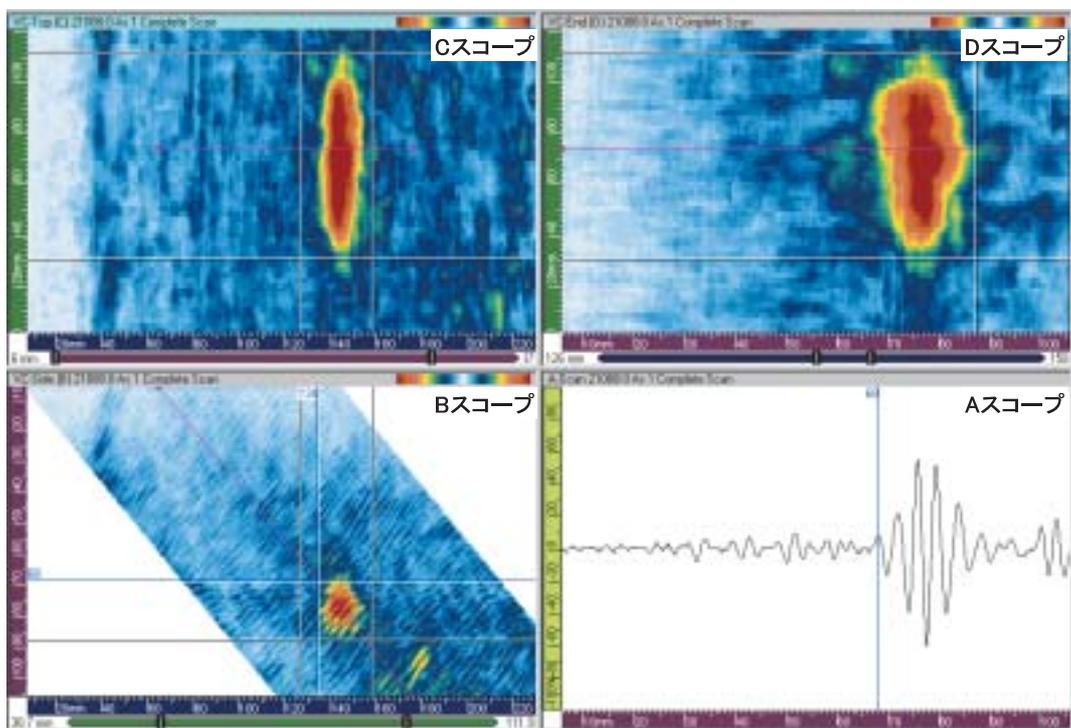


(a) コーナーエコー

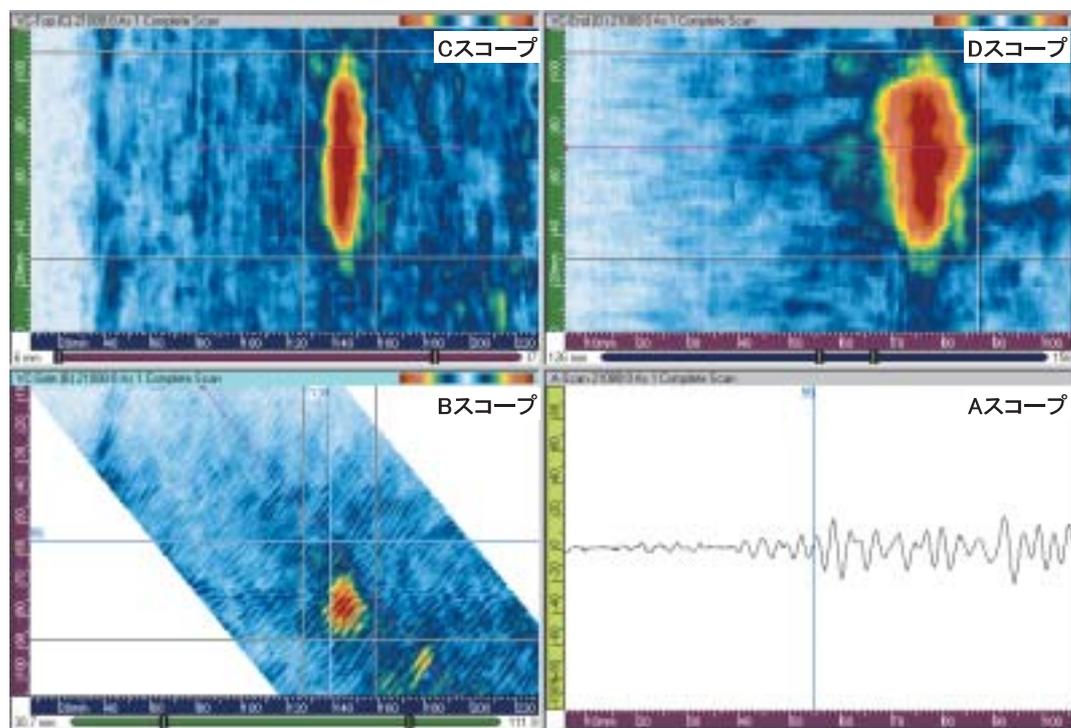


(b) 先端エコー

図14 30%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプB探触子)

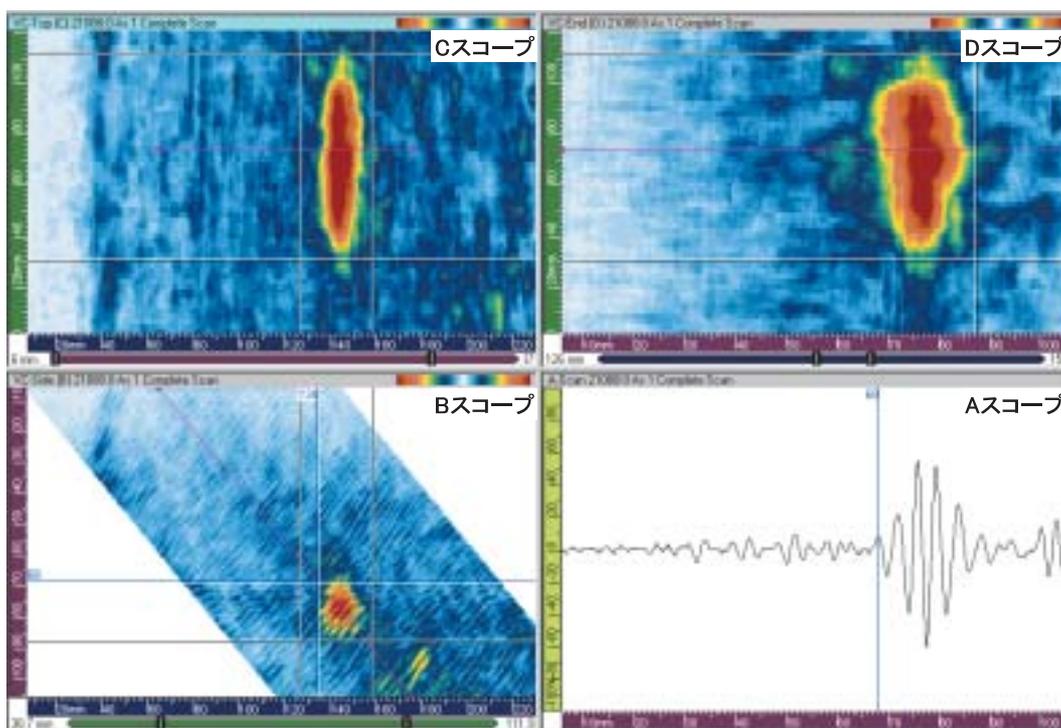


(a) コーナーエコー

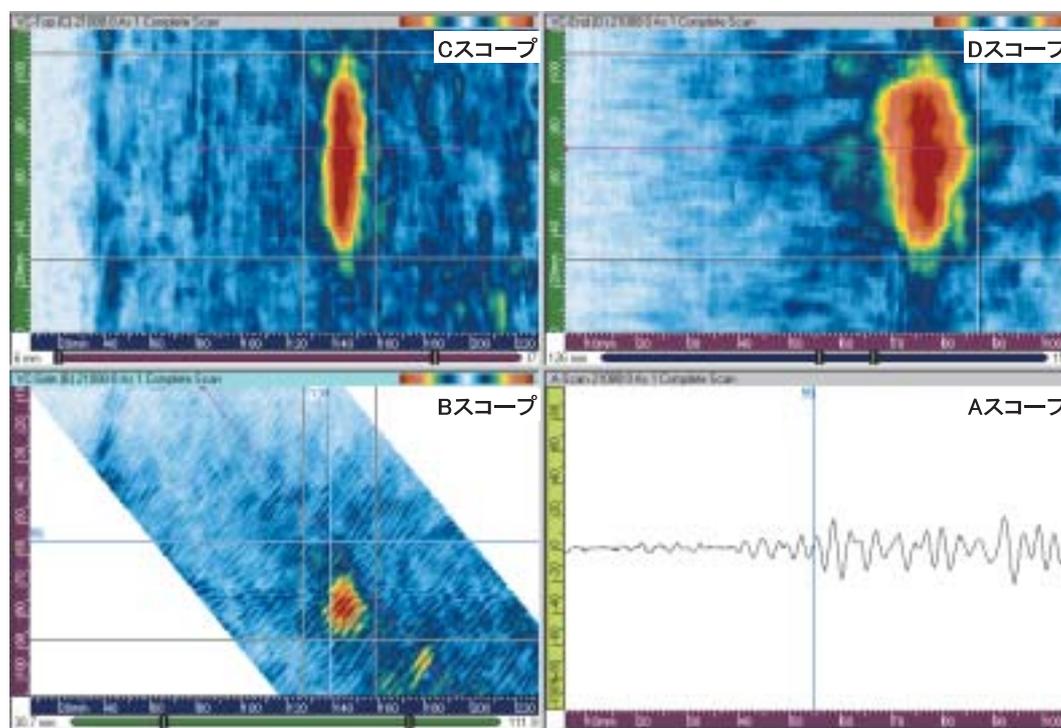


(b) 先端エコー

図15 30%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプC探触子)

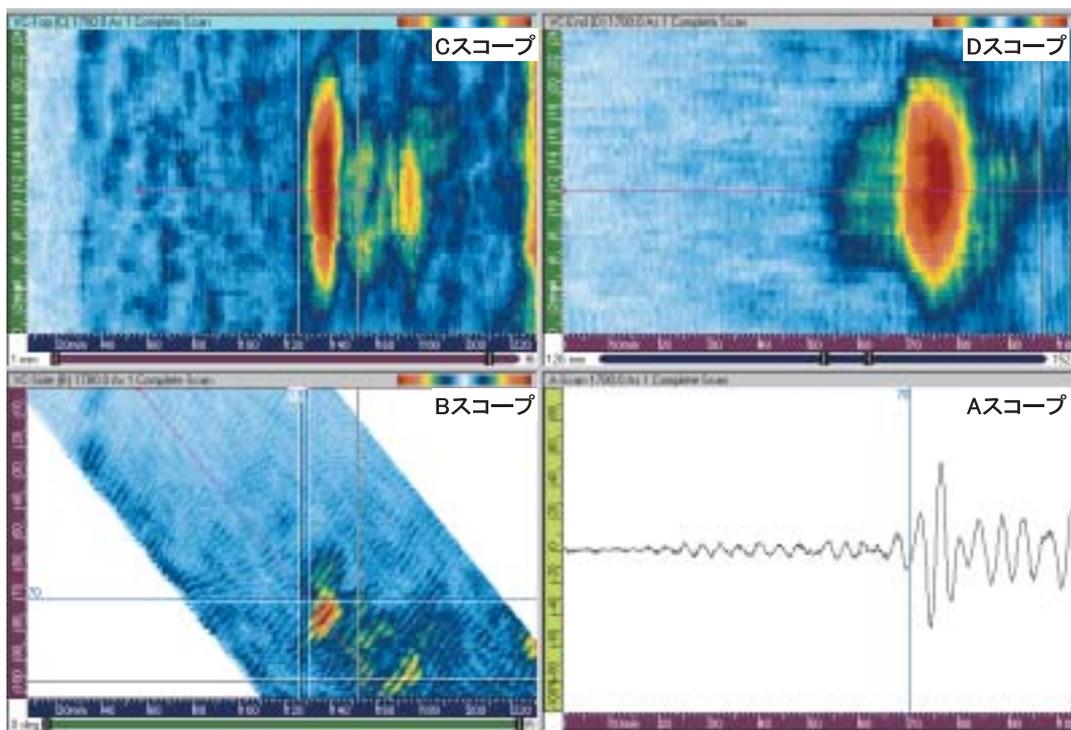


(a) コーナーエコー

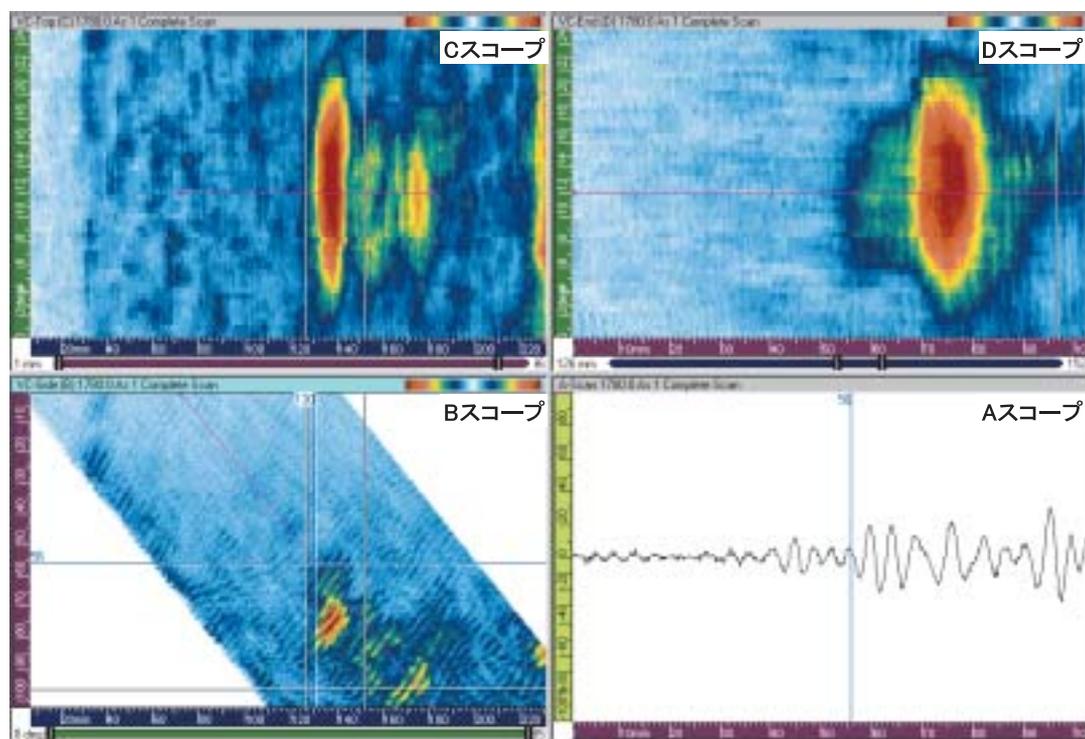


(b) 先端エコー

図16 20%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプA探触子)

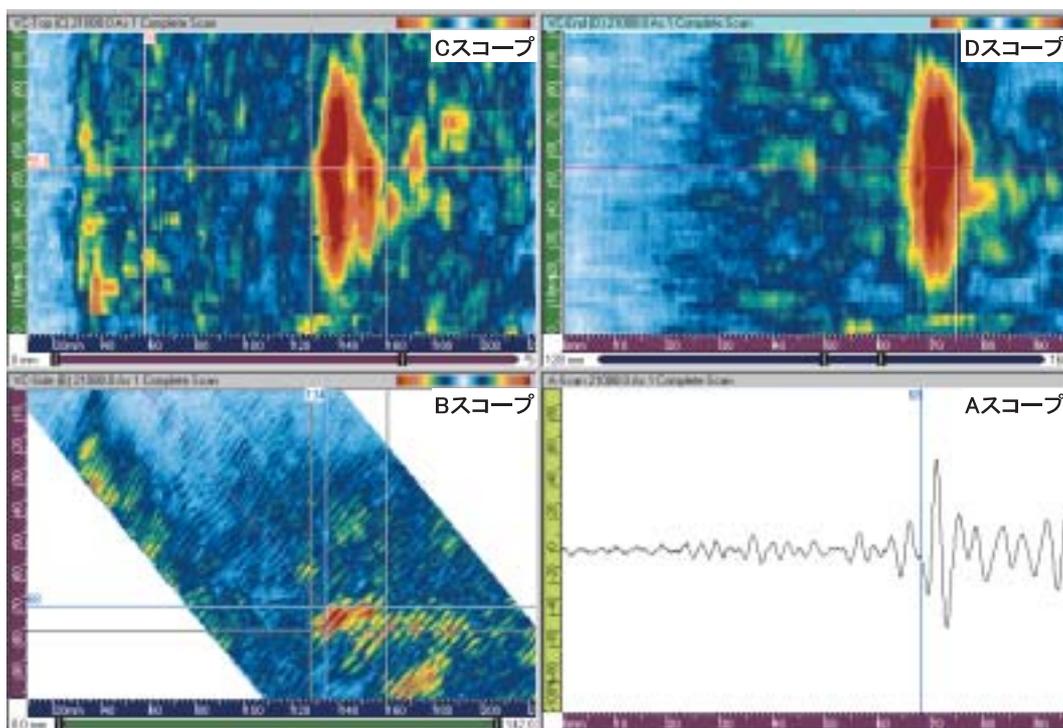


(a) コーナーエコー

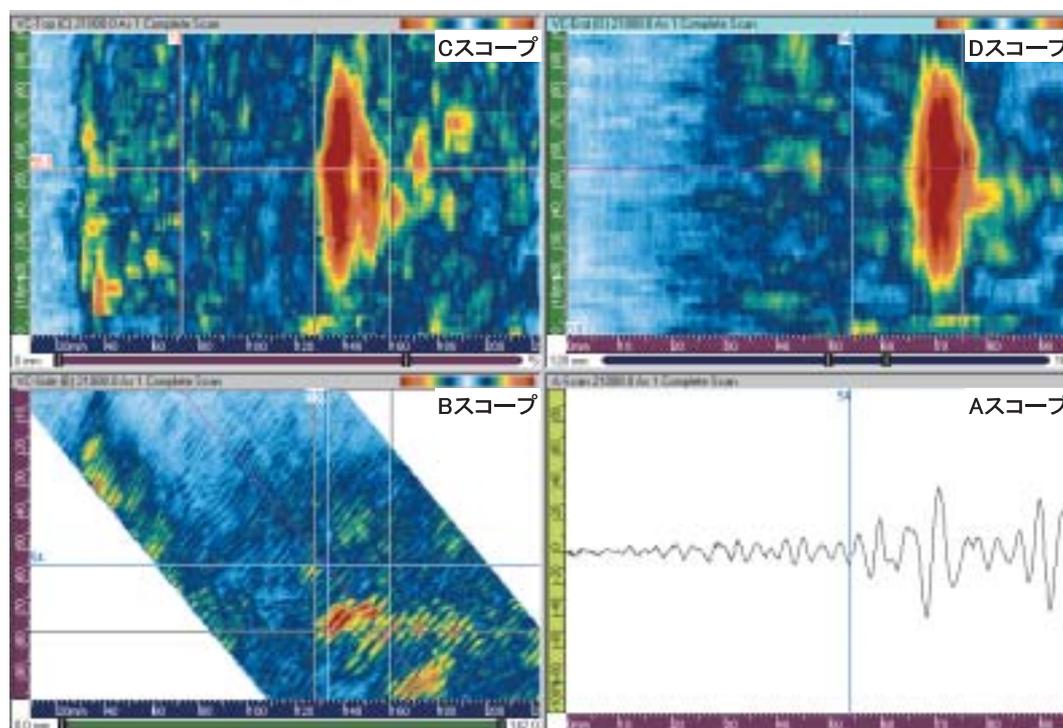


(b) 先端エコー

図17 20%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプB探触子)



(a) コーナーエコー



(b) 先端エコー

図18 20%t疲労き裂探傷データ画面 (タイプC探触子)

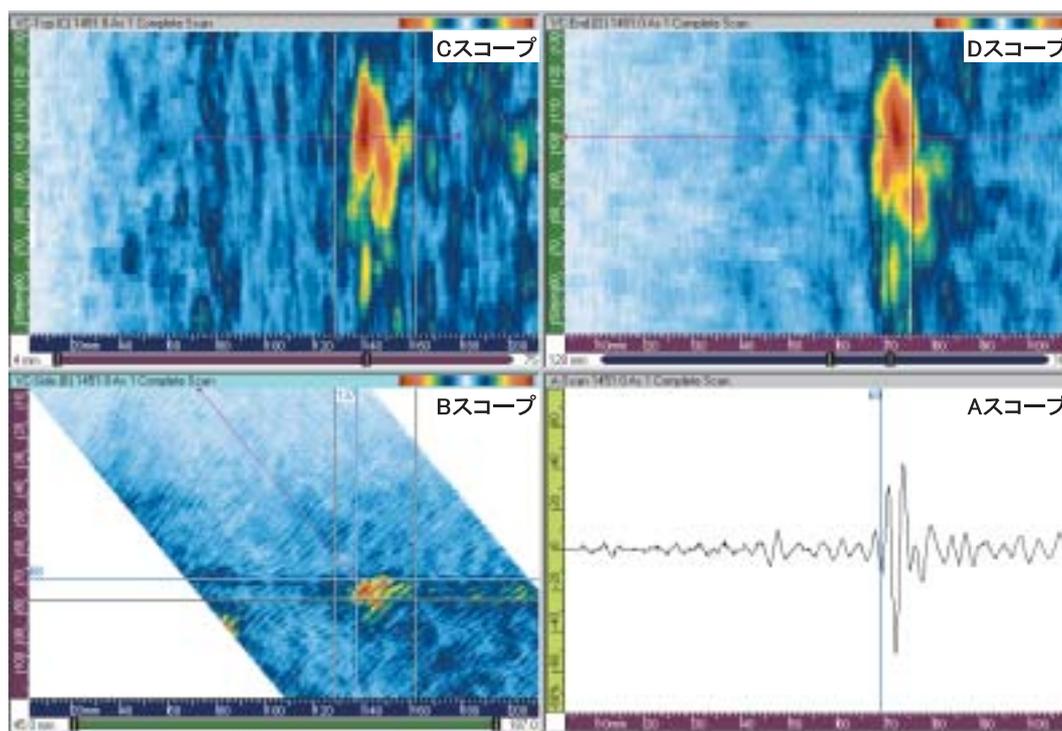


図19 10%t疲労き裂探傷データ画面（タイプA探触子）

深さ10%tの疲労き裂に関しては、全ての探触子で疲労き裂先端エコーが観察されなかった。図19は、タイプAの探触子による深さ10%t疲労き裂の探傷データ画面である。

4.2 深さおよび長さサイジングの結果および考察

図20に、タイプA, B, C探触子で測定した深さサ

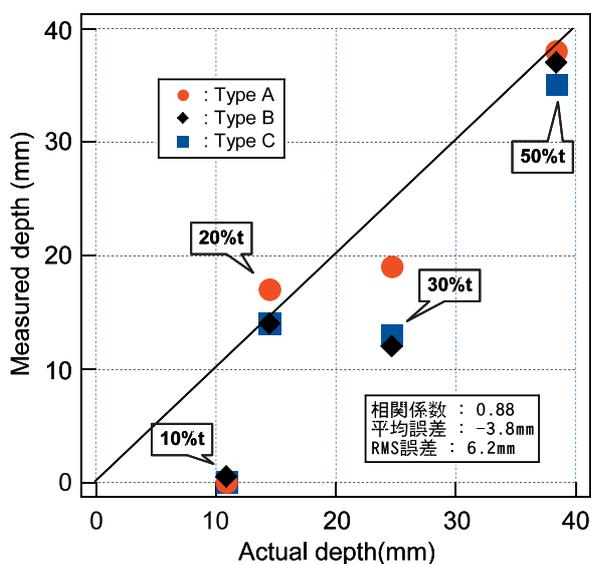


図20 深さサイジング結果

イジングの結果を示す。横軸は、2.3で述べたように同一の条件で製作した疲労試験片を切断した深さ実測値、縦軸は深さサイジングによる計測値を示す。各測定データに付記している「10%t」、「20%t」、「30%t」、「50%t」の表示は、それら測定データが、当初板厚 $t=70\text{mm}$ に対する%表示で表した深さをねらいとした疲労き裂のものであることを示す。表5に示したように、10%t, 20%t, 30%t, 50%t疲労き裂の実際の深さは、それぞれ10.9mm(15.6%t), 14.5mm(20.7%t), 24.7mm(35.3%t), 38.4mm(54.9%t)であるとした。

前述のように10%t疲労き裂は、き裂先端エコーが同定できず、深さサイジングができなかったため、深さを0とした。20%tおよび50%t疲労き裂については、測定値と実測値が比較的一致しているが、30%t疲労き裂は過小評価傾向にある。10%t疲労き裂を除いた深さサイジングデータの統計値は、相関係数0.88, 平均誤差-3.8mm, 平均自乗 (root mean square: RMS) 誤差6.2mmであった。誤差の生じた原因は、主に30%t疲労き裂を過小評価したことによるものである。30%t疲労き裂が過小評価にいたった原因は、き裂先端部からの反射エコーを捕捉しておらず、先端より下の部分からの反射エコーを先端エコーと考えたためであると推定される。また、10%t疲労き裂に関しては、先端エコー強度が弱い上に、コーナー

エコーの信号位置が近接しているため、先端エコーとコーナーエコーが重なってしまうためであると考えられる。本研究では、先述のように1MHzという比較的低い周波数の超音波を用いている。縦波の場合、1MHzで1波長約12mmであることも、このように近接したエコーの分離を困難にしている。この問題解決には、2MHz以上の周波数で探傷することが望ましいが、結晶粒界による散乱減衰が大きくなり、き裂先端エコー強度がさらに低下することが予想される。このことから、深さ10%tが深さサイジングの限界ではないかと考える。

本研究では、集束深さを変えた3種類の探触子を深さサイジングに用いた。20%t以上の疲労欠陥に関しては、いずれの探触子でも先端回折エコーが観測されたが、個々のデータにおいては、探触子により非常に鮮明に観測される疲労き裂が、それぞれ異なっている。したがって、複数の探触子を併用することで、より信頼性の高い深さサイジングができることがわかった。

ASME Section XI Appendix VIIIには、超音波探傷試験の技量認定に関わる合格基準が示されているが、 casting ステンレス鋼配管溶接部に関しては他の材料と比べ超音波探傷試験が困難であることから、合格基準が策定されていない。一方、オーステナイト系鍛造ステンレス鋼配管溶接部の合格基準は明記されており、深さサイジングのRMS誤差が3.2mm (0.125 inch) 以内とされている。⁽¹⁷⁾ 将来この合格基準がそのまま casting ステンレス鋼に適用されることはないと考えられるが、深さサイジング精度は、さらに改善が必要であると思われる。

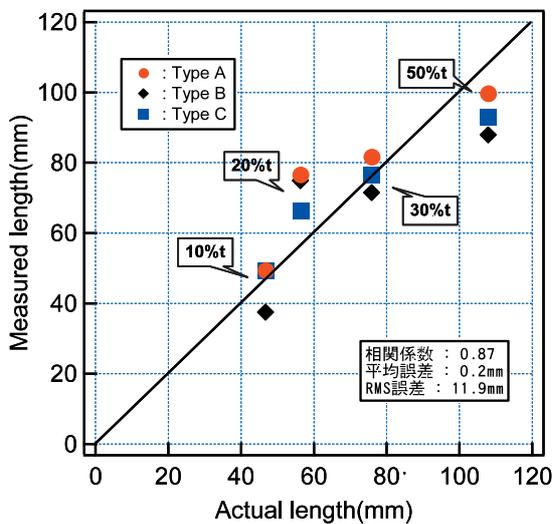


図21 長さサイジング結果(タイプA, B, C探触子)

図21に、タイプA, B, C探触子で測定した長さサイジングの結果を示す。横軸は、疲労き裂長さの実測値、縦軸は長さサイジングによる計測値を示す。疲労き裂長さは、試験片内表面の疲労き裂開口部の長さを実測したものである。10%t, 20%t, 30%t疲労き裂については、やや過大評価傾向にあるが50%t疲労き裂については、やや過小評価になっている。長さサイジングデータの統計値は、相関係数0.87, 平均誤差0.2mm, RMS誤差11.9mmであった。前述のように、長さサイジングは探触子の移動距離すなわち欠陥のコーナーエコー長さを測定して行う。したがって、コーナーエコーを正確に補正できるタイプAの探触子を使うことが本来適当である。図21においても、タイプBの長さサイジング精度は、あまりよくない。そこで、タイプAと同一仕様の探触子をもう一つ用意して、その二つの探触子で長さサイジング精度をみることにした。図22に、その結果を示す。タイプA'探触子の仕様はタイプAと同一である。長さサイジングデータの統計値は、相関係数0.93, 平均誤差4.7mm, RMS誤差10.4mmであり、相関係数と誤差平均が改善された。

ASME Section XI Appendix VIIIのオーステナイト系鍛造ステンレス鋼配管溶接部の長さサイジングに関する合格基準はRMS誤差が19mm (0.75inch) 以内とされており、本研究の長さサイジング結果は、これを満足している。

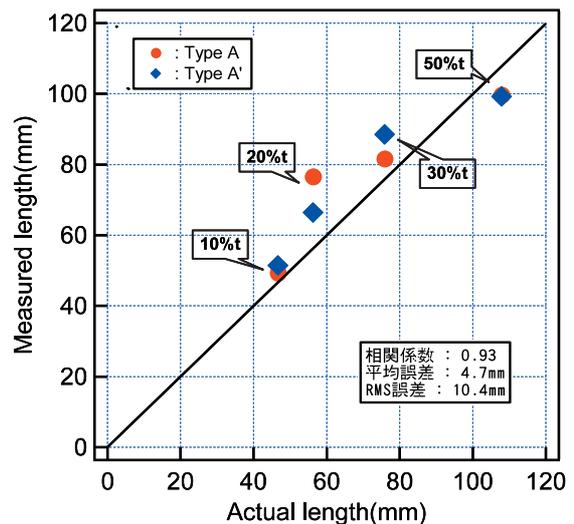


図22 長さサイジング結果(タイプA, A'探触子)

5. 結論

casting ステンレス鋼中の疲労欠陥に関し、3種類の大型2振動子探触子を用いた自動超音波探傷により、

深さおよび長さサイジング評価を実施した。主な結果および今後の課題は、以下のとおりである。

- 1) 深さ20%以上の疲労欠陥については、深さサイジング可能である。深さサイジングデータの統計値は、相関係数0.88, 平均誤差-3.8mm, RMS 誤差6.2mmであった。
- 2) 深さサイジングに集束深さの異なる探触子を併用することは、それぞれの探触子が他の探触子を補い合い、より信頼性の高い評価を可能にする上で、非常に効果的である。
- 3) 長さサイジングデータの統計値は、相関係数0.87, 平均誤差0.2mm, RMS 誤差11.9mmであった。長さサイジングは、コーナーエコーにより探触子移動距離を測定することから、深さサイジングのように3種類の探触子を併用するよりも、コーナーエコー検出に集束深さを絞った探触子のみのデータのほうが精度は向上する。
- 4) ASME Section XI Appendix VIIIでは、鋳造ステンレス鋼の超音波探傷に関する合格基準が、まだ示されていない。このため参考に、超音波探傷が容易な鍛造ステンレス鋼溶接部の合格基準と比較した。その結果、深さサイジング精度は、合格基準 (RMS 誤差 \leq 3.2mm) を満たさなかった。深さサイジングに関しては、さらに精度向上が必要である。しかし、長さサイジング精度は RMS 誤差11.9mmであり、合格基準 (RMS 誤差 \leq 19mm) を満たした。

本研究で得られた深さおよび長さサイジング精度を参考に、本手法の実用化に向け、超音波探傷検査のガイドラインを今後策定する予定である。

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 Examination of Cast Stainless Steel*, EPRI NP-6299 Project 1570-2 Topical Report, (1989).
- (5) R.B.Thompson, "Ultrasonic wave propagation in cast stainless steel," *Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting*, 8.1, (1990).
- (6) 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).
- (7) P. Dombret, P. Caussin, P. Rorive, "Developing ultrasonics for PWR pump bowl in-service inspection," *Nuclear Engineering*, **35**, p.42(1990).
- (8) P.Dombret, "Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel," *Nuclear Engineering and Design*, **131**, p.279 (1991).
- (9) 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).
- (10) M.Serre, P.Benoist, D.Villard, N.Mathan, "Ultrasonic examination of cast stainless steel," *EDF-95-NB-00055* (1994).
- (11) 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).
- (12) 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).
- (13) 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).

- (14) A.Diaz, S.R.Doctor, B.P.Hilderbrand, "Evaluation of Ultrasonic Inspection Techniques for Coarse Grained Materials," *NUREG/CR-6594 PNNL-11171* (1998).
- (15) 黒住保夫, "鋳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).
- (16) Y.Kurozumi, "Development of an ultrasonic inspection technique for cast stainless steel," *Insight*, **44**, p.437 (2002).
- (17) 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).
- (18) 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).
- (19) Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI, p.353 (2001).