

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	配管溶接部SCCの非破壊検査における超音波画像の活用に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	笹原利彦
Author(English)	toshihiko sasahara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4103号, 授与年月日:2014年6月30日, 学位の種類:論文博士, 審査員:井上 裕嗣,中村 春夫,阪口 基己,廣瀬 壮一,水谷 義弘
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4103号, Conferred date:2014/6/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

配管溶接部 SCC の非破壊検査における
超音波画像の活用に関する研究

笹原 利彦

目次

1. 第1章 緒論	1
1.1 はじめに	1
1.2 超音波探傷試験技術	1
1.3 ステンレス鋼配管溶接部における損傷事例	5
1.4 ステンレス鋼配管溶接部の超音波探傷試験技術	8
1.5 画像化技術の開発経緯	14
1.6 まとめ	20
参考文献	23
第2章 SCC 深さ測定技術の分析	25
2.1 はじめに	25
2.2 PD 試験の実施方法	25
2.3 受験者の成績	27
2.4 SCC の深さ測定技術	29
2.5 測定誤差とその要因	33
2.6 SCC 深さ測定結果の信頼性	40
2.7 まとめ	43
参考文献	44
第3章 SCC 超音波特性の画像化	45
3.1 はじめに	45
3.2 手動探傷による SCC の検出及び深さ測定手法	45
3.2.1 SCC の検出手法	45
3.2.2 SCC の深さ測定手法	53
3.3 超音波特性と画像	54
3.3.1 画像化の課題	54
3.3.2 画像化装置の検討	55
3.3.3 試験装置	55
3.3.4 試験体	58
3.3.5 反射源の周波数特性調査	61
3.4 B スコープの解読	67
3.5 周波数による反射源の判別と描写	70
3.6 ログ表示画像の検討	75
3.7 まとめ	81
参考文献	82

第 4 章 フェーズドアレイ画像による SCC 検出と深さ測定手順の開発	83
4.1 はじめに	83
4.2 試験体及び探傷装置	83
4.3 データ採取方法	85
4.4 データ品質確認方法	86
4.5 探傷画像とその評価法	88
4.6 SCC の深さ測定法	94
4.7 画像による欠陥判別手順	97
4.8 まとめ	99
参考文献	100
第 5 章 ログアンプとリニアアンプの併用による超音波探傷試験	101
5.1 はじめに	101
5.2 SCC 探傷画像におけるログ表示の有用性	102
5.3 ログアンプ付加超音波探傷システムの開発	105
5.4 ログアンプとリニアアンプの併用効果の検証	108
5.5 ログアンプ付加システムによる SCC の探傷	110
5.6 まとめ	113
参考文献	114
第 6 章 結論	115
6.1 まとめ	115
6.2 今後の課題	116

第1章 緒論

1.1 はじめに

工業分野では鋼構造物の内部を非破壊的に検査する体積試験法として主に放射線透過試験と超音波探傷試験が使用されている。このうち超音波探傷試験は、携帯型の装置で簡便に体積試験が実施できる方法として、厚肉の鋼溶接構造物が使用される橋梁、建築、車両などの溶接部検査に活用されている。特に原子力発電の分野では、プラントの運転開始後における重要機器の供用期間中検査（ISI：In-service Inspection）に欠くことのできない非破壊検査手法となっている。

この超音波探傷試験では最近の電子技術の発展を反映して様々な画像化技術が開発されている。しかしながら、工業分野における超音波探傷試験は未だ検査員の技量に大きく依存する手動による超音波探傷試験が中心であり、画像を使用する技術の活用は進んでいないのが実情である。画像による超音波探傷試験が社会的に受容されるには、わかり易い画像を提供するだけでなく、超音波探傷試験に係る規格側の対応もまた必要となっている。

本章では工業用超音波探傷試験における課題への理解を得るために、超音波による探傷方法と欠陥評価法を説明すると共に、議論の対象とする欠陥の形態的特徴及び超音波探傷試験の能力と問題点を論じる。更に、これまでの超音波画像化技術開発の経緯を振り返り、工業分野における超音波探傷試験で画像化技術の活用が進まない原因と問題点について議論する。

1.2 超音波探傷試験技術

超音波探傷試験は、20世紀初頭に実用化された放射線透過試験にほぼ半世紀遅れ、1945年に米国スペリープロダクト社から超音波探傷器が販売されたのを契機に、装置が軽量でかつ構造物の片面からの探傷が可能な試験法として使用が開始されている。図1-1に超音波探傷試験方法の原理を示す。図に示した超音波探傷試験方法はパルス反射法と呼ばれ、超音波探傷器から発信した電気パルスを超音波探触子（以下、探触子）で指向性の高い超音波に変換して構造物中に投射し、構造物内の不連続部などの超音波反射源（以下、本章では「欠陥」と称する）から得られた反射波の大きさと到達時間を超音波探傷器に表示する仕組みとなっている。この反射波の表示部分は以前にはCRTと呼ばれていたが、現在は液晶パネルが主流となったため「表示器」と称されている。なお、工業用超音波探傷試験ではこの表示器に示される超音波波形を「Aスコープ」と称している。欠陥の位置は超音波の発信方向と到達時間から算出される。また、反射波の大きさから欠陥のおおまかな大きさを推定することが可能である。

図1-2は放射線透過試験の原理を超音波探傷試験との比較のために示す。放射線透過試験では、X線発生装置あるいは放射性同位元素を格納した放射線源と記録媒体となるフィルムの間に被検体を挟んで配置して試験を行う。欠陥がある場合には周囲との放射線透過量の違いが陰影像としてフィルムに撮影される。このため、欠陥の形状はフィルム上に画像として表示されるためにわかり易い。しかし、被検体の厚さ方向（放射線の透過方向）の欠陥位置及び大きさは知ることができない。なお、図中に示された像質計は放射線透過試験が適正な条件で行われたことを確認するためのものであり、試験体とともにフィルムに写し込まれる。放射線透過試験は構造物中にある欠陥像を撮影できる重要な体積試験法ではあるが、放射線源の取り扱いに注意を要すると共に撮影のためには検査対象物の両側への接近が必要な技術である。

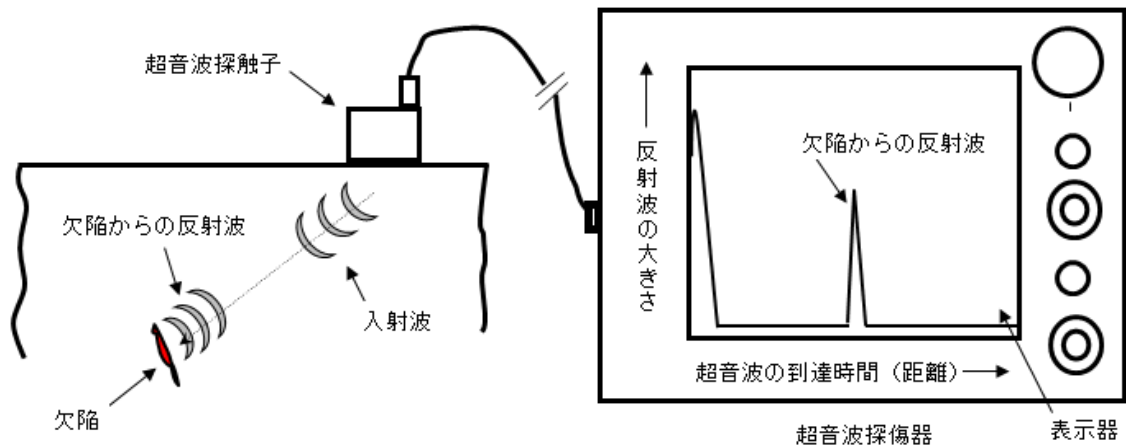


図 1-1 超音波探傷試験方法の原理（パルス反射法）

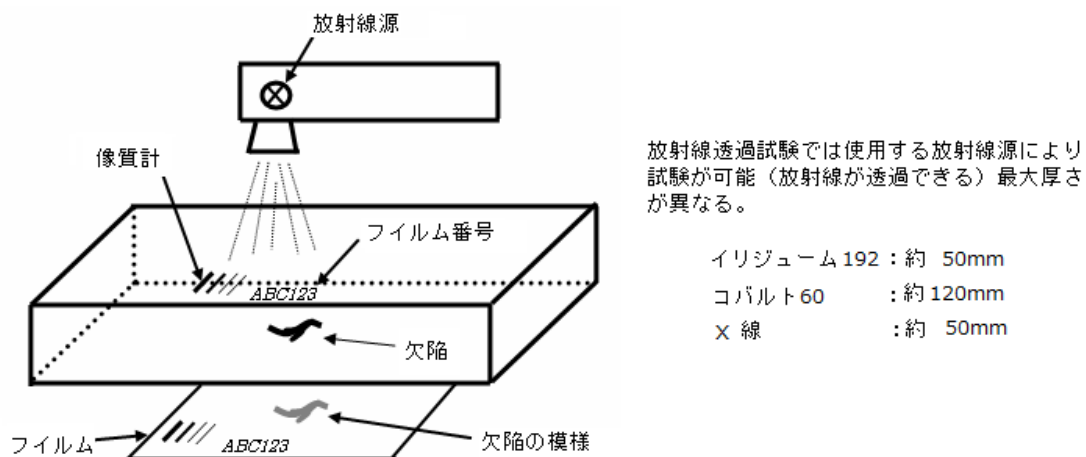


図 1-2 放射線透過試験方法の原理

この二つの体積試験法の比較では、超音波探傷試験は放射線透過試験に対して次の利点を持っている。

- ① 装置が軽量であり、構造物の片面に接近できれば試験が可能である
- ② 板厚方向の欠陥位置の特定が可能である
- ③ 超音波の進行方向を遮る割れ等の面状の欠陥に対して感度が高い
- ④ 放射線障害防止のための制約がない

一方、放射線透過試験では欠陥像が直接観察できるのに対して超音波探傷試験ではエコーが得られた探触子の位置、超音波ビームの方向、及び超音波の到達時間から作図により欠陥位置を算出する必要がある。図 1-3 は A スコープに表示された情報と探触子の位置から欠陥の板厚方向の位置（深さ）、長さ及び板厚方向の寸法（高さ）を決定する手順を示す。

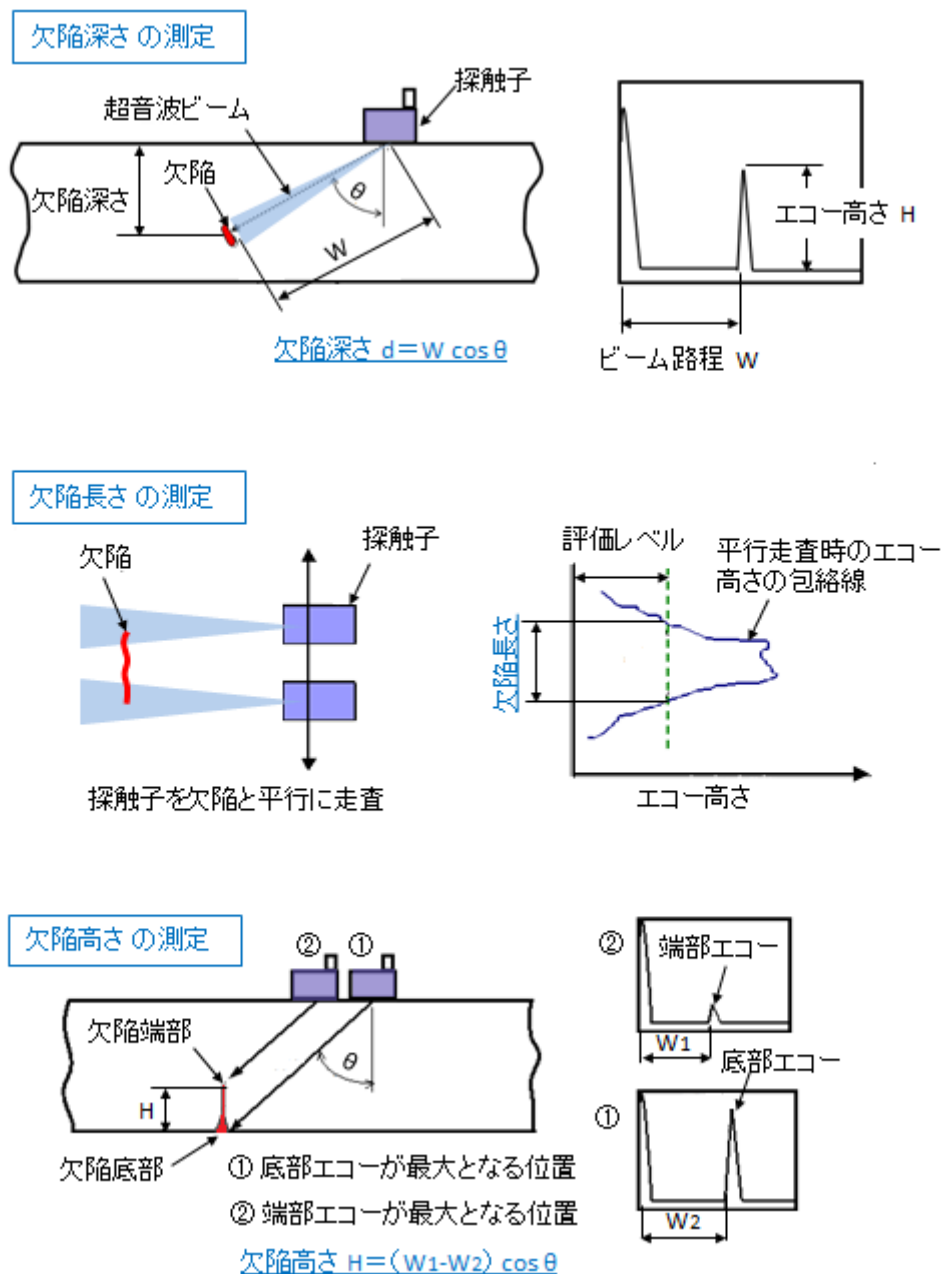


図 1-3 欠陥の位置、長さ及び高さの測定方法

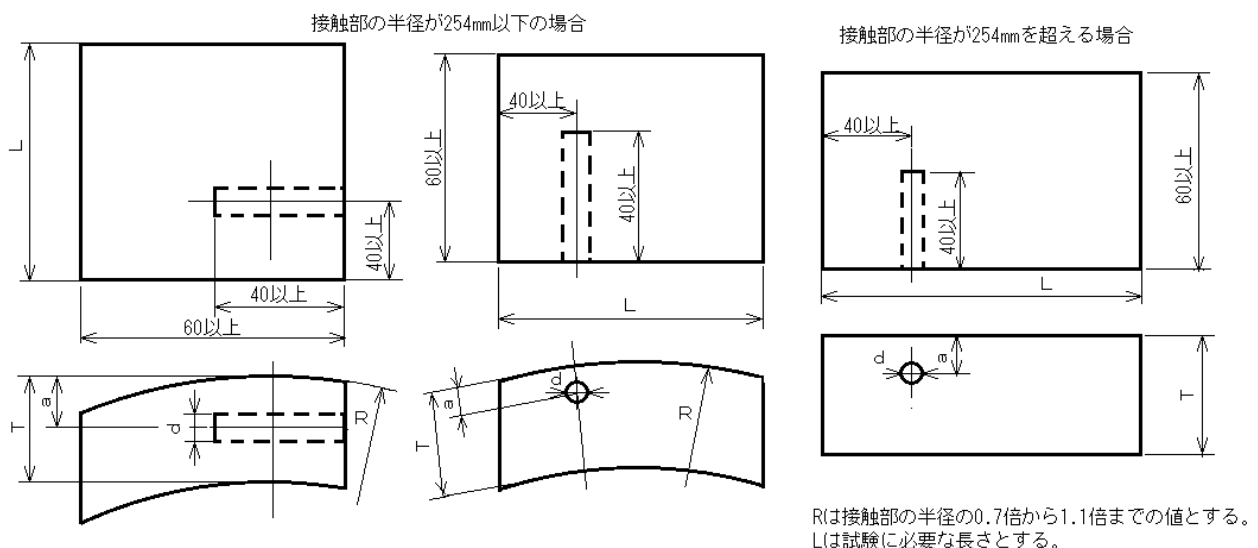
超音波探傷試験にはこれまで述べた利点があるため、運転開始後には機器の内部に接近できなくなるプラント用機器などの定期検査では重要な体積試験方法となっている。特に超音波探傷試験が重要な地位を占めているのは原子力発電所が供用を開始した後に行う重要機器の体積試験であり、プラント建設時には放射線透過試験を行った部位であっても供用開始後は放射線環境下となるために機器内部への接近が困難であり、機器の片側面より検査が可能な超音波探傷試験が現実的な唯一の選択肢となっている。

この超音波探傷試験の原子力発電設備への本格的な適用は、1970年に米国機械学会(ASME)の Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI (以下、ASME Sec. XI) の発行を契機として開始されている。ASME

Sec. XI は、原子力発電所の供用開始後の ISI 実施項目を規定すると共に破壊力学に基づく寿命評価による運転継続可否の判断を許容している。この面でも、欠陥の長さ、深さ及び高さの測定が可能な超音波探傷試験は ISI に不可欠な体積試験方法となっている。

このように、超音波探傷試験は原子力発電所用機器の ISI で重要な役割を果たし、欠陥の検出で数多くの実績があるものの、それを検査員が実施する際には超音波探触子を手で走査する必要があるために探傷結果が個人の技量に依存する度合いが大きいこと、また、A スコープを観察してそのエコー高さや路程、及びその時の探触子位置を記録するという手段を取っているために、検査結果として放射線透過試験のような欠陥像を直接提示できないという問題を抱えている。

加えて、超音波探傷試験は放射線透過試験に対して後発の体積試験技術であったため、その規格は放射線透過試験方法に準じて欠陥像の長さから合否を判定する規定となっている。すなわち、国内の規格^{1)・4)}に規定される鋼溶接部の超音波探傷試験方法は、図 1-4 に示すような溶接欠陥であるスラグを模擬する横穴を校正用反射体とし、欠陥の重要度は校正反射体からのエコー高さ（基準エコー高さ）を基準として定められたしきい値を超える範囲の長さ（指示長さ）で判定される。このため、鋼溶接部の超音波探傷試験ではエコー高さが合否判定における最も重要な情報となっている。



試験部の厚さ区分(mm)	対比試験片の厚さ T (mm)	穴の位置 a(mm)	穴径 d(mm)
25 以下	試験部の厚さ又は 19	T/2	2.4
25 を超え 51 以下	試験部の厚さ又は 38	3T/4 又は T/4	3.2
51 を超え 102 以下	試験部の厚さ又は 76	3T/4 又は T/4	4.8
102 を超え 152 以下	試験部の厚さ又は 127	3T/4 又は T/4	6.4
152 を超え 203 以下	試験部の厚さ又は 178	3T/4 又は T/4	8.0
203 を超え 254 以下	試験部の厚さ又は 229	3T/4 又は T/4	9.6

図 1-4 規格に定められた対比試験片の例

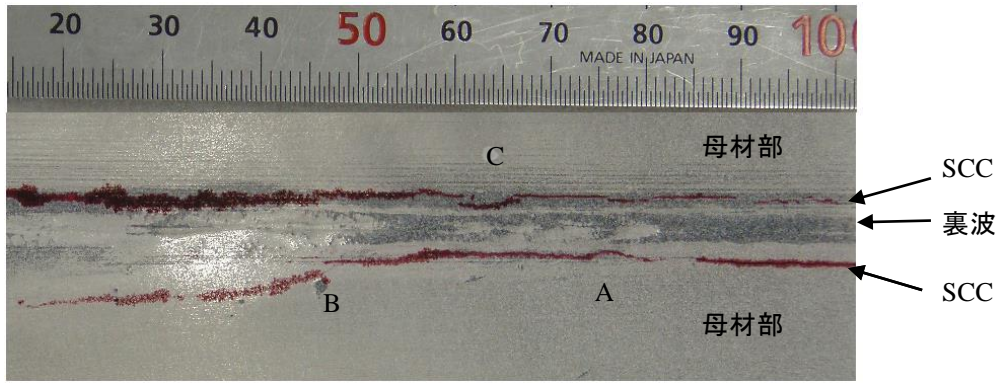
1.3 ステンレス鋼配管溶接部における損傷事例

1.2 節で述べたように超音波探傷試験は原子力発電所用機器の ISI で重要な役割を果たしており、その性能及び信頼性について多くの実証試験が行われている。中でもステンレス鋼配管の突合せ溶接部は応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) による損傷事例が多く、重要な試験対象となっている。このため、本論文でもステンレス鋼配管溶接部の SCC を対象として議論を進める。

原子力発電所における初期の SCC 検出事例は、1974 年 9 月に米国の沸騰水型 (BWR : Boiling Water Reactor) 原子力発電所である Dresden 2 号機で公称外径 6 インチの再循環 (PLR: Primary Loop Recirculation) 系配管での漏洩がある⁵⁾。また、1975 年初頭には、同プラントの公称外径 10 インチの炉心冷却 (Core Splay) 系で SCC が検出されている。米国にやや遅れて我が国でも複数プラントで小口径の PLR 系配管溶接部に SCC による漏えいが検出されている。原子力発電所における SCC はこの時点では小口径配管で原子炉水が滞留し溶存酸素濃度が高まる部位で発生すると考えられていた。米国では 1975 年から 1976 年にかけて小口径及び中口径ステンレス鋼配管溶接部の超音波探傷試験が実施され、複数の BWR プラントの中口径ステンレス鋼配管溶接部でも SCC が検出されている。時を同じくして、国内でも複数のプラントの中口径管で超音波探傷により SCC が検出されている。この時点でも公称外径が 20 インチ (500mm) 以上で厚肉の大径管は溶接部近傍の残留応力が低いために SCC は発生しないとの見解を米国 NRC は示していた⁶⁾。

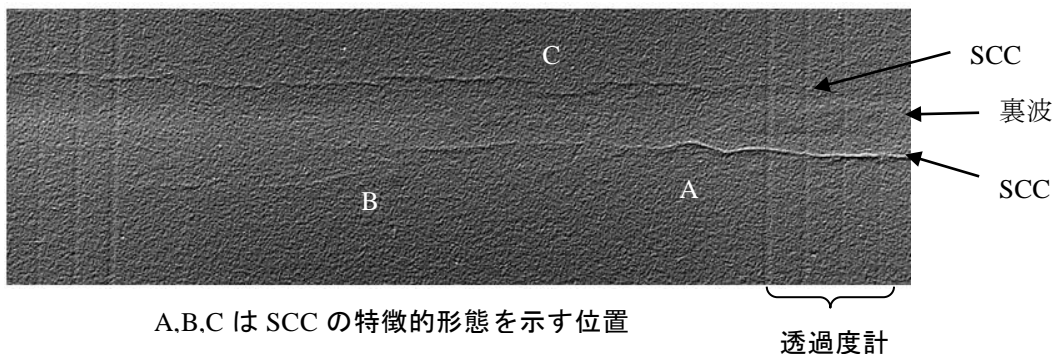
しかし、1983 年 3 月に米国の Nine Mile Point 1 号機で PLR 系の大口徑ステンレス鋼配管溶接部に SCC による漏洩が検出され、SCC がステンレス鋼配管溶接部に共通する損傷であることが認識されるに至っている。また、この溶接部は 9 か月前の超音波探傷試験で無欠陥とされていたため、超音波探傷試験の信頼性に疑問を投げかける契機ともなった⁷⁾。国内プラントではこの時点で SCC 対策として配管材料を 304 系ステンレス鋼から耐 SCC 材料とされる低炭素系ステンレス鋼への変更や溶接部の残留応力の軽減処置が行なわれている。このため国内ではその後しばらくは SCC が検出されなかったが、1993 年頃より低炭素系ステンレス鋼を使用する配管溶接部でも SCC の発生が報告されるようになり、1995 年に自主的な点検が各プラントで実施された結果、SCC の検出報告が続くこととなった^{8) , 9)}。

これらの SCC は、配管内表面の溶接金属と母材の境界より数 mm から十数 mm 離れた溶接熱影響部 (HAZ : Heat Affected Zone) に発生し、深さを増すと共に溶接線に沿って管周方向に進展する。稀に、溶接補修などの影響で溶接残留応力のバランスが崩れて管軸方向の成分を持つこともある。図 1-5 は SCC が発生した配管内表面の浸透探傷試験結果を示す。図 1-6 は同じ試験体の放射線透過試験結果を示す。図 1-5 及び図 1-6 の画像とも SCC が屈曲 (A, C) あるいは断続 (B, C) しながら溶接線に沿って進展することを示している。図 1-7 は 304 系ステンレス鋼溶接部両側の HAZ に小さな SCC が発生し、板厚方向に進展する状況を示す。304 系ステンレス鋼の SCC は HAZ に沿って母材部を管外表面に向かって分岐を繰り返しながら進展する。図 1-8 は SCC が進展し外表面まで達した状況を示す。SCC は屈曲しながら HAZ に沿うように進展し、外表面に到達している。一方、低炭素系ステンレス鋼では、SCC の板厚方向の進展は 304 系ステンレス鋼とは異なる様相を示す。低炭素系ステンレス鋼の SCC は、管内面の HAZ に発生した後は HAZ にはあまり影響されずに残留応力のバランスに従い進展する。このため、図 1-9 に示すように SCC の先端が溶接金属に達し、その先端が溶接金属に侵入したところで停滞、あるいは速度を落として溶接金属内を進展する場合がある。図 1-10 は低炭素系ステンレス鋼に発生した SCC が溶接金属に向かって進展する状況を示している¹⁰⁾。



A,B,CはSCCの特徴的な形態の箇所を示す

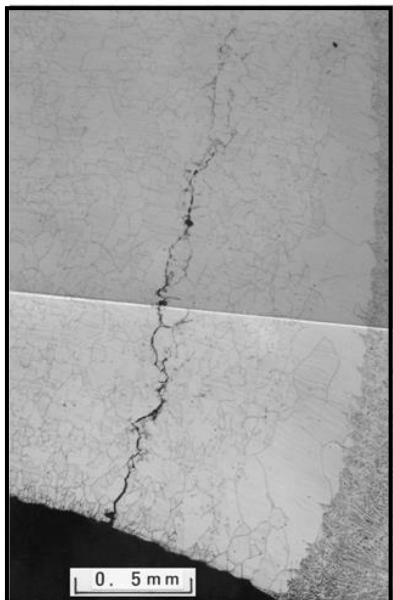
図 1-5 ステンレス鋼配管溶接部 SCC の浸透探傷試験写真



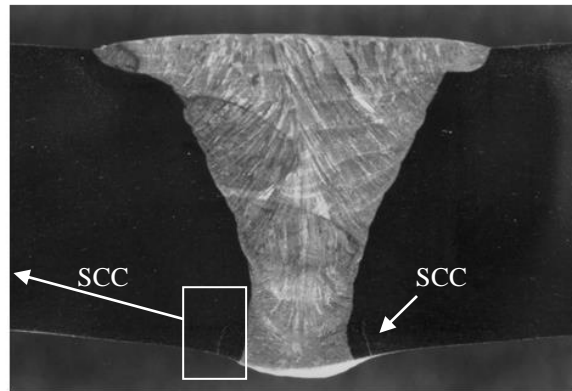
A,B,CはSCCの特徴的な形態を示す位置

透過度計

図 1-6 ステンレス鋼配管溶接部 SCC の放射線透過試験結果（デジタル強調処理）



SCC のマイクロ写真



配管溶接部断面のマクロ写真

図 1-7 SCC が発生した 304 系ステンレス鋼のマクロ及びマイクロ写真

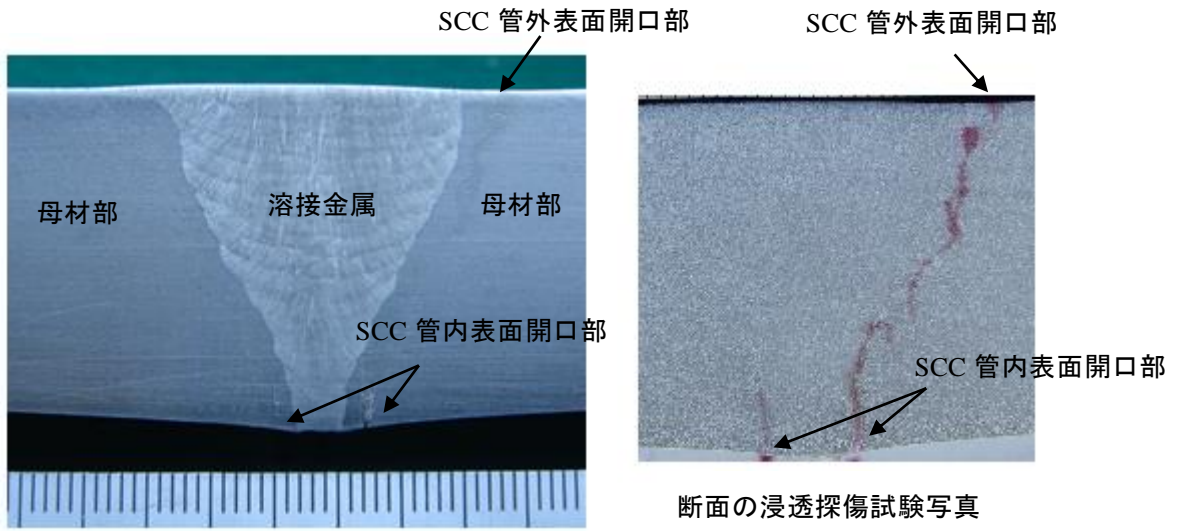


図 1-8 HAZ に沿って外表面まで進展した SCC の例

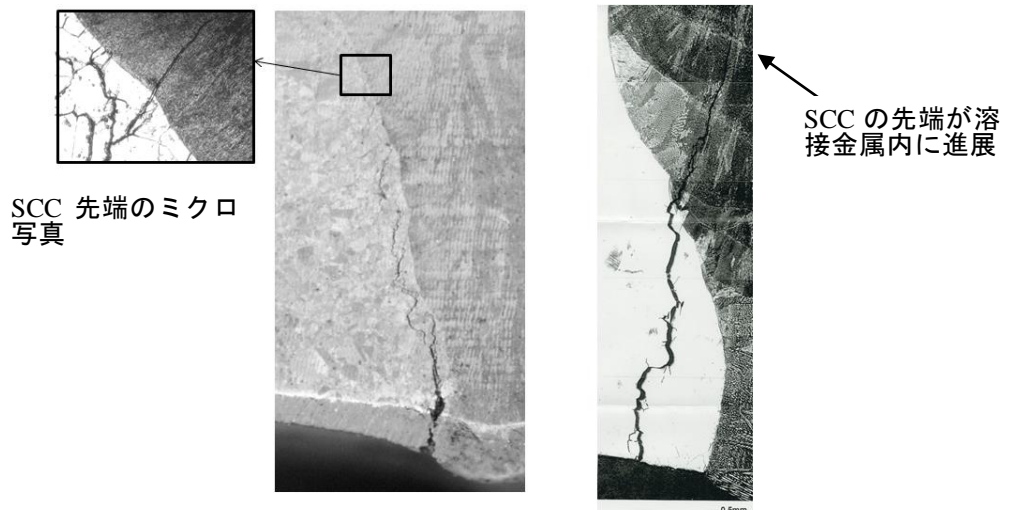
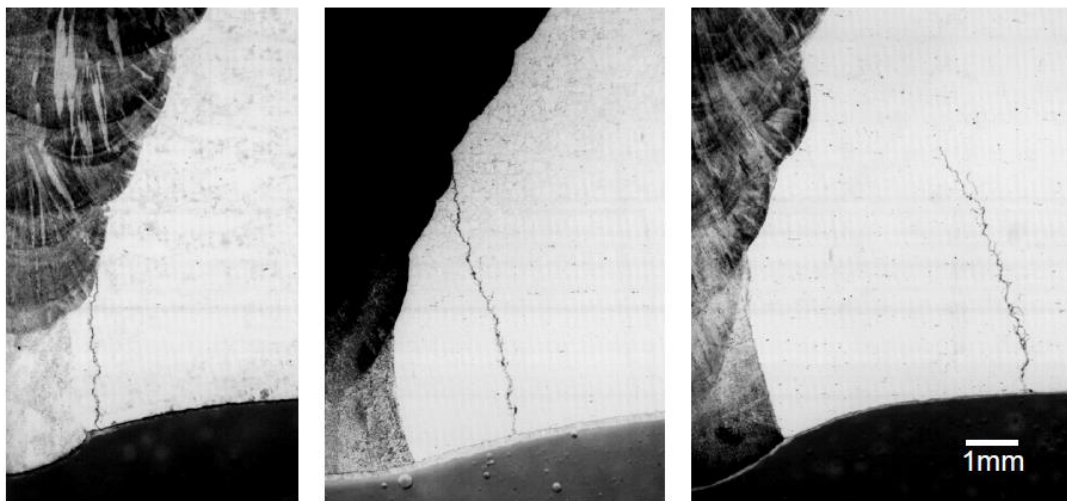


図 1-9 低炭素系ステンレス鋼溶接部に発生した SCC の例



公称外径 400A 配管 公称外径 600A 配管 公称外径 600A 配管
 図 1-10 低炭素系ステンレス鋼 SUS316L の溶接部に発生した SCC の進展状況例¹⁰⁾

1.4 ステンレス鋼配管溶接部の超音波探傷試験技術

1970年発行のASME Sec. XI 初版では原子力発電所用機器のISI対象範囲と検査プログラムが規定された。しかし、検査方法は「表面試験」や「体積試験」との記載のみであり具体的な運用方法は記載されていなかった。このため、超音波探傷試験には建設規格ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III (以下, ASME Sec. III) に規定された方法が採用されることとなった。しかしながら、このASME Sec. IIIの超音波探傷試験方法は素材の検査を主な対象としたものであり、ISIの対象である厚肉容器の突合せ溶接部やステンレス鋼配管溶接部の超音波探傷試験に関しては技術的蓄積が不十分であった。また、ASME Sec. XIの初版では欠陥が検出された場合の評価方法も規定していなかった。

1970年代初頭には上述の状況のままISI及びISIに先立つ供用前検査 (PSI: Pre-service Inspection) の超音波探傷試験が開始されたため、放射線透過試験に合格して完成した原子炉容器の溶接部にPSIの超音波探傷試験で欠陥が検出されて取扱いに苦慮するなどの不都合が発生している¹¹⁾。また、配管溶接部の超音波探傷試験を材料中の超音波減衰についての十分な知識が無いまま実施したため、ステンレス鋼溶接部の探傷を感度不足のまま実施するなどの不都合が発生している。米国ではこの問題に対処するために、ASME Sec. IXの1974年版にAppendix-1として超音波探傷指針を追加している。このAppendix-1には感度校正試験体は被検査部と同等の材料とすること、ステンレス鋼溶接部を検査する場合は感度校正試験体にも溶接部を設けること、標準反射波の50%を超える指示は記録することなどが規定されている。また、この1974年版に破壊力学に基づく欠陥評価が導入された結果、板厚方向の欠陥寸法測定が必要となっている¹²⁾。

1970年代中期には超音波探傷試験の信頼性に対する疑問に答えるために各種の信頼性実証試験が国内外で開始されている。国内では1982年度から1986年度にかけて国家プロジェクトとして「供用期間中検査実証試験」を実施している。引き続き1995年度から2004年度までは「超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認(UTS)」を実施している。これらの実証試験で得られた超音波探傷試験の信頼性に関する成果はISIにおける欠陥評価の基礎として活用されると共に、開発・使用された技術は日本電気協会の「JEAC 4207 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」に標準的な手法として盛り込まれた。

国外の実証試験としては、欧州の主導で日米欧が協力して欠陥を付与した試験片を回送して探傷する回送試験(RRT: Round Robin Test)が1974年から1993年にかけて3回に分けて実施され、試験結果はPISC-I, PISC-II及びPISC-IIIとして報告されている。PISC-Iでは対象欠陥としてEDMノッチを主に使用して規格にある超音波探傷試験方法の有効性の検証を試みており、この試験を通してこれまでの規格に記載された感度設定方法や欠陥高さの評価方法に問題があることが明らかになった。また、ノッチを使用する実証試験では割れを対象とした場合の超音波探傷試験の実力を正しく評価できないとの反省が得られている。PISC-IIではPISC-Iの反省に基づき実規模の試験体に疲労き裂やSCC等の実機を模擬した欠陥を付与した試験体を準備すると共に、各国の参加者は規格に従った超音波探傷試験方法に加えて新技术であるフェーズドアレイ法やTOFD法を使用して技術の検証を行っている。PISC-IIの結果、同じ超音波探傷試験手順や技術を使用した場合でも検査チームにより欠陥検出性及び欠陥深さ測定精度に大きなばらつきがあることが明らかになり、欧米では「超音波探傷手法の規格化」から「装置、手順書及び検査員を組み合わせた実証試験による探傷能力の確認」への流れが強まることとなった¹³⁾。また、PISC-I及びPISC-IIは容器関係の溶接部試験体を使った実証試験であったが

PISC-III では対象を実規模大の圧力容器、オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部、ステンレス鋳鋼配管溶接部及び異種金属溶接部に広げて実証試験を実施すると共に、実証試験による超音波探傷試験能力の確認（PD: Performance Demonstration）の基準作りも行われた¹⁴⁾。

以上がこれまで実施された主な超音波探傷試験技術実証試験の概要であるが、ステンレス鋼配管突合せ溶接部の超音波探傷試験に焦点を絞った信頼性と測定精度に関しても様々な実証試験が行われている。ステンレス鋼溶接部に発生が考えられる代表的なき裂である SCC の形態は 1.3 節の損傷事例で述べたが、ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験の難しさは、SCC の形状が複雑であることに加えて探傷時に 図 1-11 に示すような溶接部の形状に起因する裏波エコー、内面テーパエコー、あるいは溶接金属と母材の境界面からのエコーが得られることにある。特に小さな SCC は管内面開口部からのエコーが小さく、形状に起因するエコーとの高さの差が無くなるためにその検出が難しくなる。

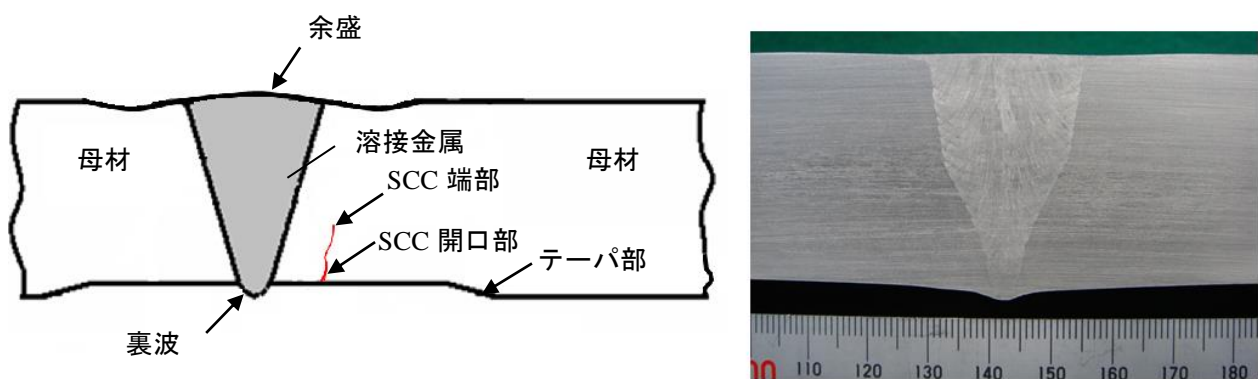


図 1-11 ステンレス鋼配管の突合せ溶接継手形状と SCC

図 1-12 は UTS で得られたステンレス鋼配管溶接部における SCC 深さと欠陥検出率の関係を示す。データは異なる検査会社から参加した 5 チームによる探傷結果である。図中の「10t」は試験体の溶接部の肉厚が 10mm であることを示している。「評価不要欠陥」とは、板厚に対するき裂の寸法が小さく残存寿命評価を行う必要が無い欠陥である。また「周方向探傷結果」とは、配管の周方向に超音波を向けて検出した SCC, すなわち SCC が配管の軸方向を向いていることを示している。この図は SCC の深さが 2mm 以下になると検出が難しくなることを示している。

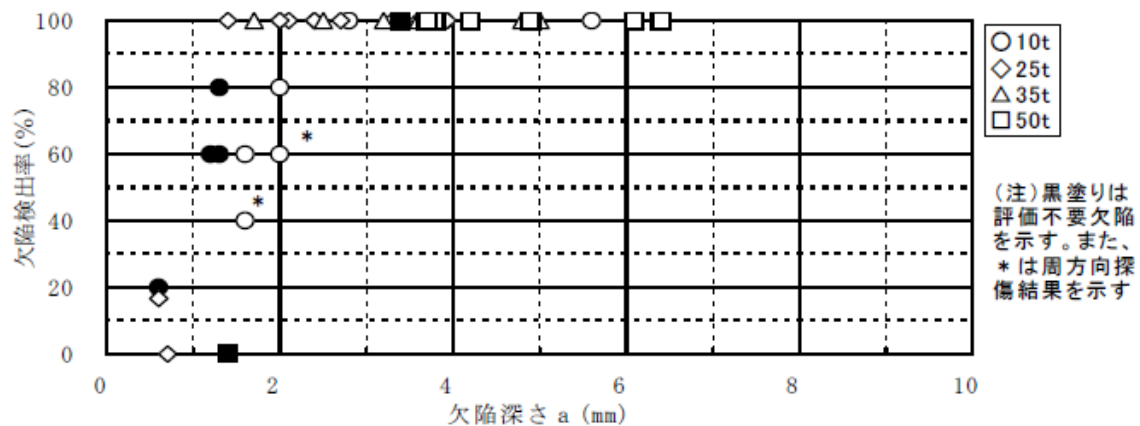


図 1-12 直管ステンレス鋼 SCC 付与試験体の欠陥深さと欠陥検出率¹⁵⁾

図 1-13 にステンレス鋼配管溶接部に発生するき裂の検出率改善を示す米国 EPRI の資料を示す¹⁶⁾。1980 年前半に実施した米国の配管探傷実証試験 PIRR から 1990 年に終了した PISC-III のステンレス鋼配管突合せ溶接継手の実証試験 PISC-AST までの欠陥検出率の向上は参加した検査チームにおける技術開発の成果であり、1994 年の米国 PD 試験開始後の欠陥検出率の改善は検査手順書と教育訓練の成果であろうと報告されている。なお、PDI (Performance Demonstration Initiative) は ASME Sec. XI の要求に従って EPRI が実施している PD 試験の呼称である。図 1-13 に示された PDI 合格者の欠陥検出率は図 1-12 に示した UTS での欠陥検出率に比べ若干低くなっている。これは UTS が選抜 5 チームの結果であるのに対して PDI が米国に加えて欧州各国や韓国、台湾の検査員も受験した結果であることを考慮すると、PDI 合格者 (PDI PASS) の欠陥検出率が現在の超音波探傷技術の実力を示していると考えられる。

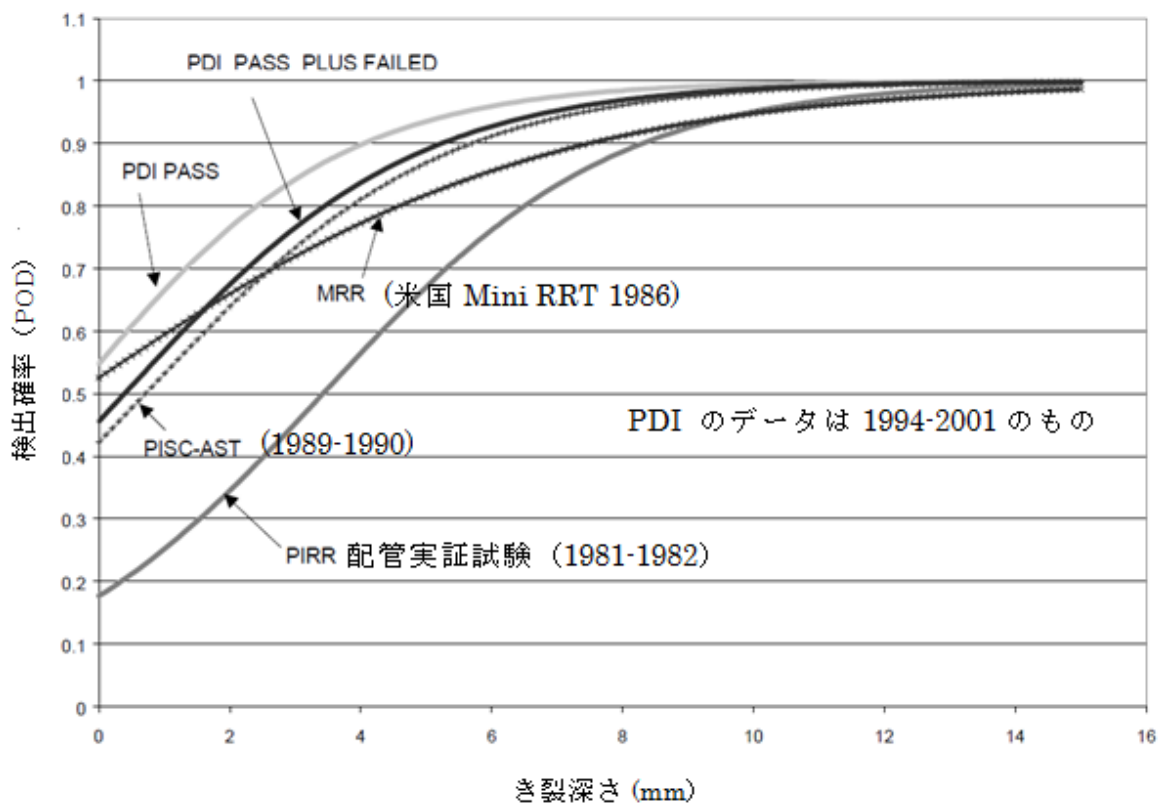


図 1-13 PDI とそれ以前の実証試験との欠陥検出性比較¹⁶⁾
(ステンレス鋼配管, 肉厚 11mm ~ 25mm)

ステンレス鋼配管溶接部の超音波探傷試験では、先に述べたように、SCC 以外からも配管の形状に起因する紛らわしいエコーが得られるためにこれを欠陥と判定する誤検出 (False Call) が発生する。図 1-14 に PDI 試験合格者の欠陥検出率と誤検出の関係を示す¹⁷⁾。この図は技量の優れた PDI 試験合格者であってもある程度の誤検出があることを示している。図が示すように PDI では誤検出が 15% を超えると合格が困難になり、20% を超えると不合格となる。したがって、超音波探傷技術者には欠陥を検出するのみではなく欠陥エコーをその他のエコーから正しく弁別する技量が求められる。

DETECTION/FALSE CALL PERFORMANCE
PASSED CANDIDATES - AUSTENITIC PIPING

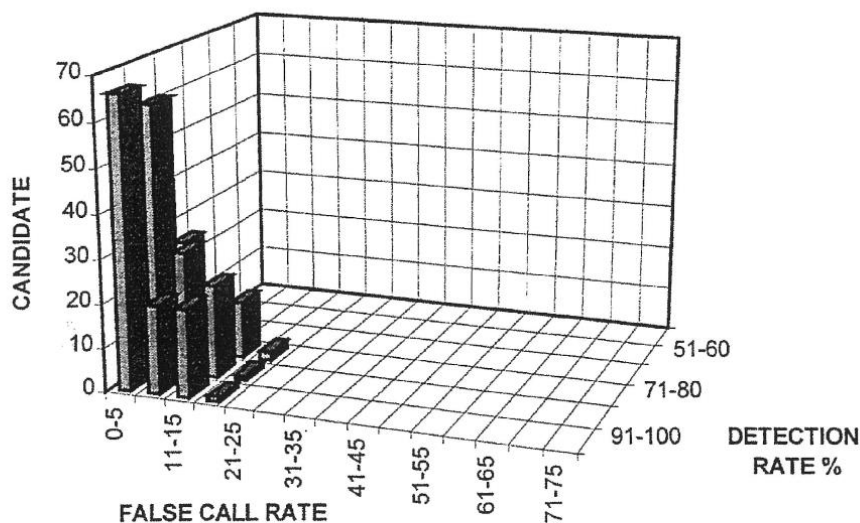


図 1-14 PDI 合格者の欠陥検出率と誤検出率¹⁷⁾

図 1-15 は PISC-III のステンレス鋼配管試験体での検査手法と超音波探傷試験結果を欠陥検出率 (FDF) と誤検出率 (FCRD) の関係で示している¹⁸⁾。図の左上 (FDF : 1、FCRD : 0) が理想的な結果であるがこれを達成したチームは居ない。欠陥検出率 1.0 を達成したのは横波と縦波を組み合わせて使用したチームであるが、この技術の組合せでもチーム間で欠陥検出率及び誤検出率に大きな差が認められ、検査方法を規定するのみでは検査の信頼性を維持できないことが明らかである。

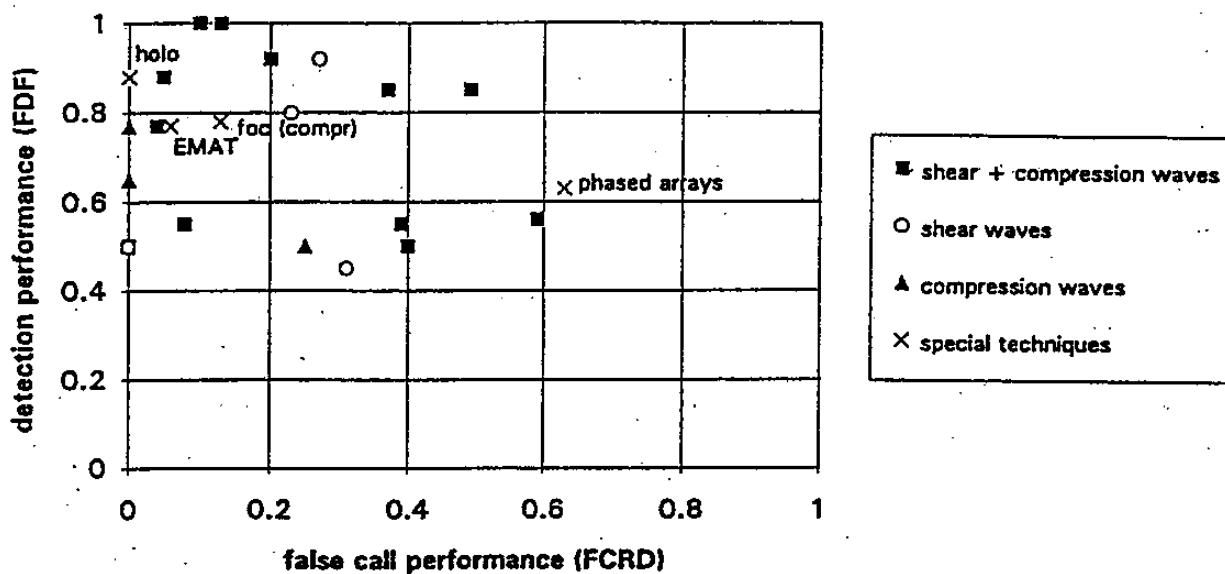


図 1-15 PISC-III におけるステンレス鋼配管溶接部欠陥の検出率と誤検出率¹⁸⁾

一方、き裂の板厚方向の寸法測定でも様々な探傷技術が試みられ、実証試験を通して測定精度が確認されている。なお、欠陥の板厚方向の大きさは図 1-13 に示したように JIS Z 2300:2009 の非破壊試験用語で「高さ」と定義されるが、開口欠陥の場合は「深さ」の呼称も許容されており、また維持規格 JSME S NA1, ISI 規程 JEAC 4207 及び超音波探傷技術に関する国内の実証試験では「深さ」が使用されている。このため、本論文でも以降の記述では「深さ」を使用する。

図 1-16 は 1983 年に EPRI で実施された各種の超音波探傷試験手法を用いた欠陥深さ測定精度確認試験結果を示す¹⁹⁾。当時は SCC 付与試験体の入手が困難であったために欠陥には EDM ノッチを使用している。図中にあるデシベルドロップ法 (Amplitude drop approach) は、探触子を欠陥に向けて前後移動させて欠陥エコーの高さがしきい値を超える範囲から欠陥深さを推定する方法である。これは当時の ASME Section XI に規定されたき裂深さ測定法であったが、この試験結果によりデシベルドロップ法によるき裂深さ測定は否定され、端部エコー (Crack-tip diffraction) 法による欠陥深さ測定が主流となっている。端部エコー法では様々なモードの波や直射法、1 回反射法が使用されているが、いずれの手法もデシベルドロップ法に比較して良好な結果を示している。

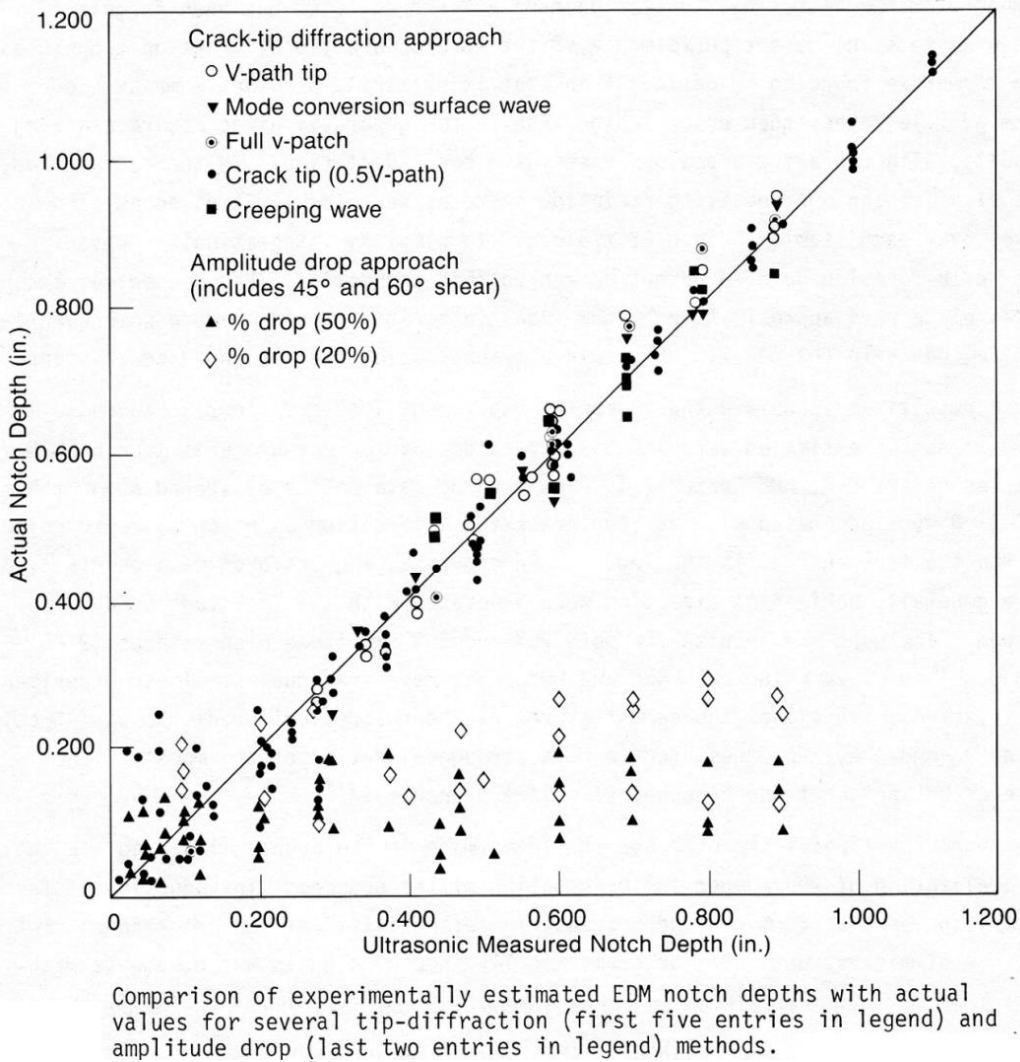


図 1-16 米国 EPRI におけるき裂深さ測定実証試験結果¹⁹⁾

図 1-17 に UTS における横波端部エコー法を使用した SCC の欠陥深さ測定精度の試験結果を示す¹⁵⁾。試験では 5 チームが各自の装置と手順を使用して SCC の深さを測定している。図中の「欠陥指示深さ」は測定値を、欠陥深さ“a”は測定終了後の切断調査で得られた実測値を示す。図中に示すように、測定誤差の平均は-0.78mm、RMS 誤差は 2.66mm であり、米国や国内におけるステンレス鋼溶接部のき裂深さ測定 PD 試験における RMS 誤差の合格基準の「3.2mm 以下」を満足し、十分な精度で SCC の深さ測定が可能なが示されている。

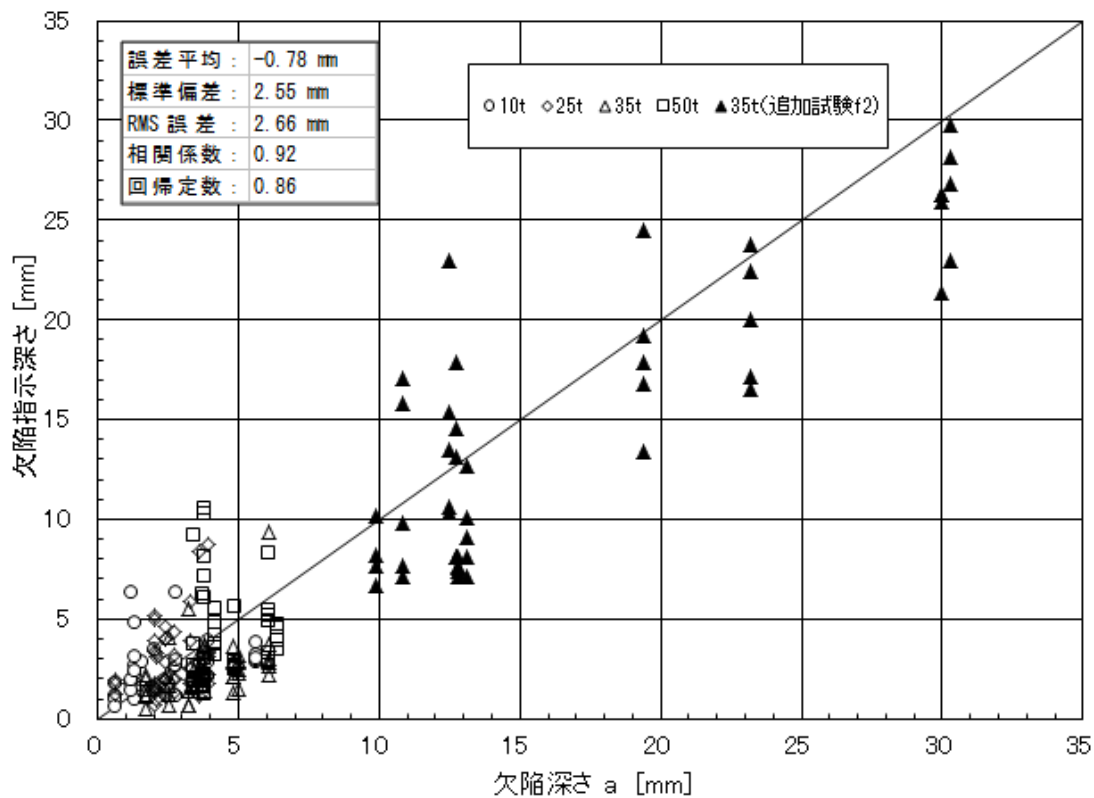


図 1-17 ステンレス鋼配管継手の欠陥深さ測定精度（横波端部エコー法）¹⁵⁾

その後国内では低炭素系ステンレス鋼の溶接継手において HAZ に発生した SCC の先端が溶接部内へ進展したために横波を使用する端部エコー法では欠陥先端を捉えることができず、SCC 深さの測定で過小評価を引き起こしている。この過小評価に対処するために、溶接部内部まで超音波が到達できる縦波を使用する縦波斜角端部エコー法や、大まかにき裂の深さを推定するモード変換波法、あるいはフェーズドアレイ技術を使用する手法が開発されている。これらの手法を組み合わせたき裂深さの測定方法は PLR 系配管のき裂高さ測定実証試験²⁰⁾でその有効性が実証され、改良 UT 法と称されるようになって²¹⁾。この改良 UT 法によるき裂深さ測定方法の詳細は第 2 章に示す。

1.5 画像化技術の開発経緯

先に放射線透過試験に対する超音波探傷試験のデメリットとして欠陥像を直接得ることができないことを述べた。これに対して検査に超音波を利用する他の分野、例えば医用分野では、工業分野と同時期に超音波技術の開発が開始され、日本が画像を使用する胆石の検出や血流からのドプラ信号の検出で先駆的な貢献を行っている^{22), 23)}。これまでに超音波波形 (A モード) 表示に加えて断面画像表示の B モード、動的な変化を検出して表示する M モード、血流の状態を画像化して表示するドプラモード、ハーモニック波を利用して臓器の精細な像を映し出すハーモニック画像 (tissue harmonic imaging) などが開発されており、胎児や心臓の B モード画像は身近な例となっている。また、医用分野では様々な症例の診断画像がインターネット上に公開され、超音波診断技術活用の範囲拡大に貢献している。現在では三次元 (3D) モードによる画像も一般的となっている。なお、工業分野で用いられる「スコープ」と医用で用いられる「モード」は同義である。

医用に限らず海洋における地形調査や魚群探知も超音波画像を利用する身近な例であり、エコーの強度をカラー階調で表示する B モード画像が一般的に使用されているだけでなく、海底と魚の自動判定、複数の周波数を利用した魚の大小や海底の質 (泥、岩) の判定機能も備えた装置が安価に販売されている。

工業分野においても超音波探傷画像の開発は 1970 年代より開始されている。図 1-18 は 1980 年代初頭の非破壊検査技術に関する国際会議資料に掲載された当時の超音波探傷画像処理技術を示している²⁴⁾。図中には当時英国 Harwell 研究所で開発中であった TOFD 法を除いて現在も開発が行われている主な画像化技術が網羅されている。


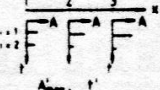

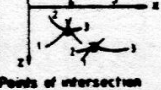


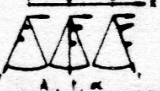





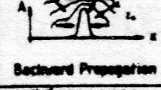
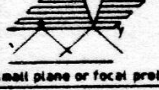
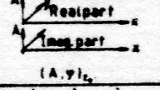
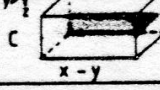
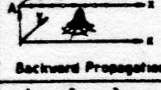
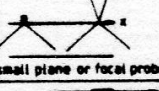






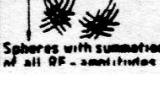
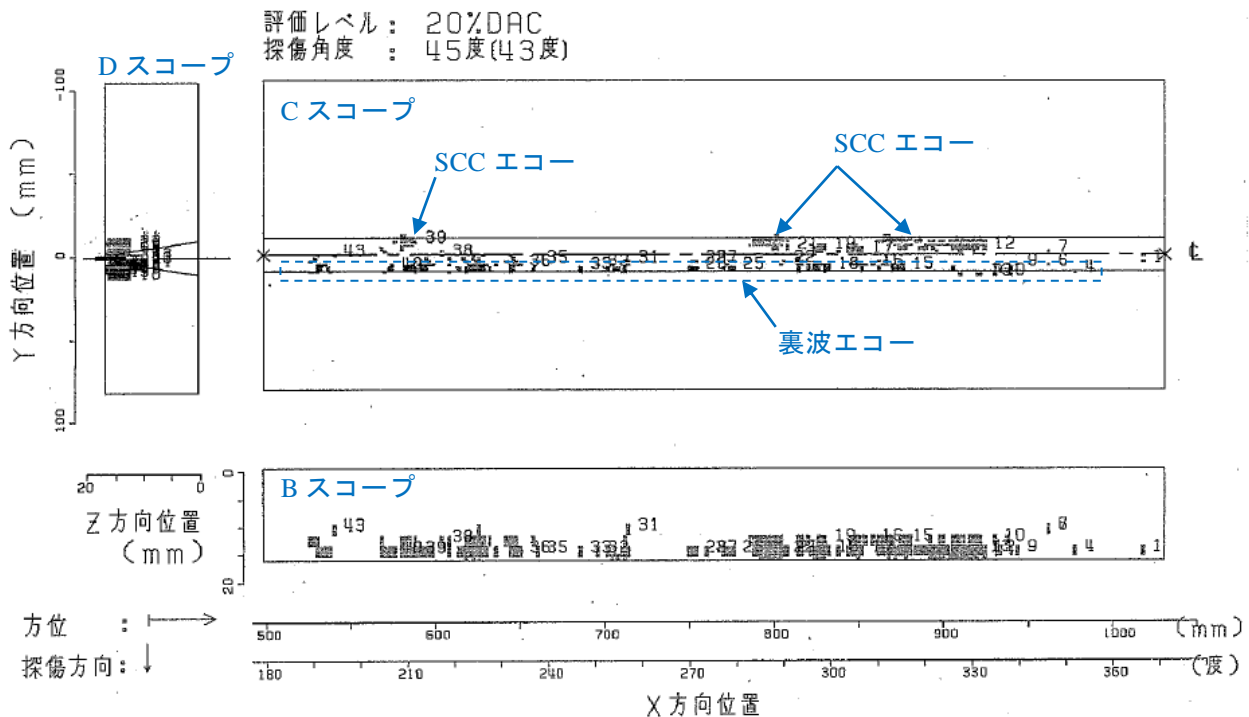
US-TESTING METHODS	APERTURE PROBE SYSTEMS	DATA ACQUISITION	RECONSTRUCTION PLANE	RECONSTRUCTION METHOD	S N R IMPROVEMENT	CLASSIFICATION THROUGH
A L O K	 angle beam probes	 A_{sum}, t	 X-Z	 Points of intersection	 Time-of-flight curves	Existence of points of intersection Comparison IE-Tomography technique Reconstruction Pattern Recognition
COMPOUND-SCAN with PHASED-ARRAYS	 array	 A, t, α	 X-Z		Summation of Video - Signals Focussed Soundbeam in Transmitting and Receiving mode	Reconstruction
HOLOGRAPHY 1 - dim	 small plane or focal probe	 Real Imag $(A, y)_z$	 X-y	 Backward Propagation	Redundancy Focussing during Reconstruction RF-Averaging	Reconstruction
HOLOGRAPHY 2 - dim	 small plane or focal probe	 Real part Imag part $(A, y)_z$	 X-y	 Backward Propagation	Redundancy Focussing during Reconstruction RF-Averaging	Structure of Hologram Reconstruction
S A F T 1 - dim	 small plane or focal probe	 all A, t	 X-Z	 Circles with summation of all RF-amplitudes	RF-Averaging in a plane	Shape of the RF-data Reconstruction
S A F T 2 - dim	 small plane or focal probe	 all A, t	 X-Y-Z	 Spheres with summation of all RF-amplitudes	RF-Averaging in a volume	Shape of the RF-data Reconstruction

図 1-18 1980 年代初頭に検討されていた超音波画像化技術²⁴⁾

このように超音波探傷試験における画像化の努力は盛んに行われたものの、1980年代ではこれらの技術を生かすための電子回路の高密度化、記録媒体の大容量化、コンピュータの高速化が不十分であった²⁵⁾。すなわち、工業用の超音波探傷試験装置は作業員による現場への持ち込みが可能であるだけでなく、埃、湿度、不安定な電源などの現場環境に耐える必要があった。また、広範囲を探傷するために、大量のデータを採取し、時間をかけずに結果を出すとの高いハードルを越える必要があった。このような理由で、最初に ISI で使用された超音波探傷画像化技術は、専用の区画にコンピュータ、超音波探傷器及び遠隔走査制御装置を組み合わせる方式の遠隔自動探傷システムであり、探触子の X-Y 位置データと超音波の路程と波高データをコンピュータに取り込んだ後、オフライン処理で断面画像 (B スコープ)、平面投影画像 (C スコープ)、断面透視図 (D スコープ) を表示する形式が主流であった。図 1-19 は 1980 年代にステンレス鋼配管溶接部の ISI に使用された半自動型超音波自動探傷装置による SCC 付与試験体の探傷結果例を示す。この図では B スコープ及び D スコープ上で SCC と裏波の像が重なっており、これらを区別して表示する場合は解析範囲を狭めて作画し直す必要があった。また、これらの画像の出力には現場でのデータ採取後に据え置き型のコンピュータを使用したオフライン処理が必要であったために数時間が必要であり、採取データの不良による再探傷が発生した場合には、検査作業者に多大の労力をかける結果となっている。さらに、これらのデータを解析するには経験と訓練が必要であり、超音波自動探傷作業は手動探傷に比較して苦労の多い作業であった。現在ではコンピュータの高速化及び記憶媒体の大容量化により、超音波波形データをそのまま取り込みながら同時にエコー高さをカラーの階調表示した B、C 及び D スコープ画像をリアルタイムで表示可能なシステムが使用されるようになり、検査の効率化が図られている。



図中の「青字」は探傷記録に加えた著者の注記

図 1-19 1980 年代のステンレス鋼配管溶接部の SCC 探傷画像例

次に実用的画像化技術として現場適用が開始されたのは TOFD 法であった。TOFD 法は 2 つの斜角探触子を定距離で対向させて走査してその結果を断面画像として表示できる手法であり、板厚方向の欠陥上端及び下端が断面画像上に二次曲線の指示模様として示されると共に試験部の内表面形状も表示可能な技術であった。図 1-20 に TOFD 法の原理を示す。TOFD 法は通常の可搬型超音波探傷装置並みの大きさの装置を使用してリアルタイムで探傷部の断面を画像化できると共にき裂先端の位置を特定し易い点で画期的であった。このため炭素鋼の溶接継手、例えば厚肉容器溶接部の検査やボイラプラントの厚肉配管溶接部の劣化損傷の検出に活用されている。図 1-21 はボイラプラントの高温再熱蒸気管エルボ内側を TOFD 法で探傷した結果を示す。探傷は溶接部を挟む形で探触子を配置し、それを溶接線と平行に走査することで溶接線の長さ方向にある欠陥の分布状況を描写している。このボイラプラント高温再熱蒸気管の溶接部は、供用中の経年劣化により発生したボイドが成長してき裂となることが知られており、この例でも多数の微小な欠陥が溶接部中に発生している状況を画像として把握することが可能となっている。ただし、TOFD 法はこのように簡便で理解しやすい欠陥像を提供できる手法ではあるが、ステンレス鋼配管溶接部の検査では超音波の減衰と屈曲が発生するステンレス鋼の溶接金属部を挟んで探傷を行う必要があるため、溶接金属の影響が大きい範囲、例えば配管外表面近傍に限定して使用できる手法となっている²⁶⁾。

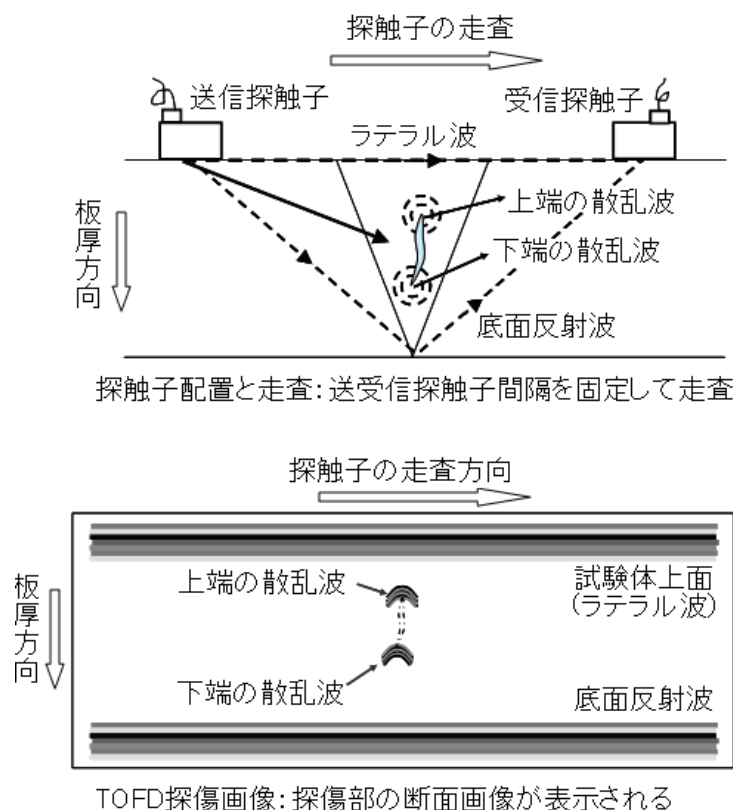


図 1-20 TOFD 法の原理図

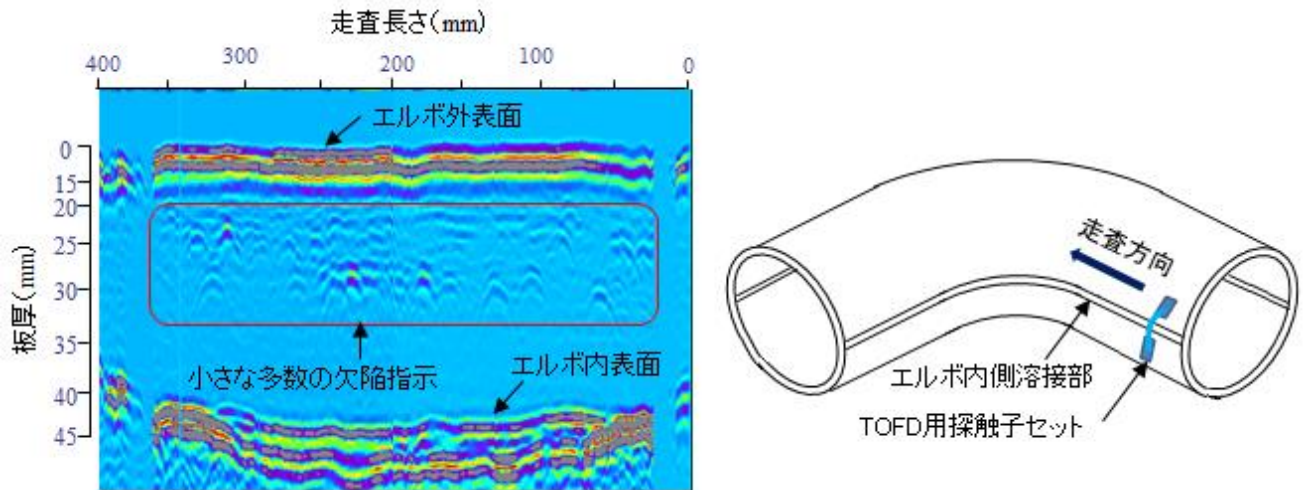


図 1-21 TOFD 法によるボイラの高熱再熱蒸気管エルボの探傷

1990 年以降には超音波探傷試験の画像化技術として主流となりつつあるフェーズドアレイ探傷装置が損傷調査などのために原子力発電所へ持ち込まれ始めている。フェーズドアレイ技術は小さな超音波振動子を並べて配置し、各振動子の励振タイミングを制御することで超音波ビームを電子的に制御する手法である。この技術は探傷屈折角や超音波ビームの集束範囲を電子的に制御できるために、幅広い使用法が可能となっている。図 1-22 にフェーズドアレイ探傷で各振動子の励振タイミングを変えて超音波の方向や焦点位置を操作する様子を模式的に示す。励振振動子は個々に励振のタイミング(遅延時間)を変更可能であり、例えば遅延時間のパターンを小さな屈折角から大きな屈折角まで短時間に変更することにより超音波ビームを扇形に走査(セクター走査)することができる。超音波ビームを一定の屈折角で電子的に走査する場合はニア走査と呼ばれる。

このフェーズドアレイ技術を使用すれば個々の振動子で送受するデータを自由に換えることができるため、開口合成(SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique)法やホログラフィ法への応用が可能となっている²⁷⁾。このため、フェーズドアレイ技術を使用して従来の超音波探傷試験と同じような斜角探傷や焦点を合わせた探傷を行う場合を単にフェーズドアレイ法と呼ぶ場合が多い。

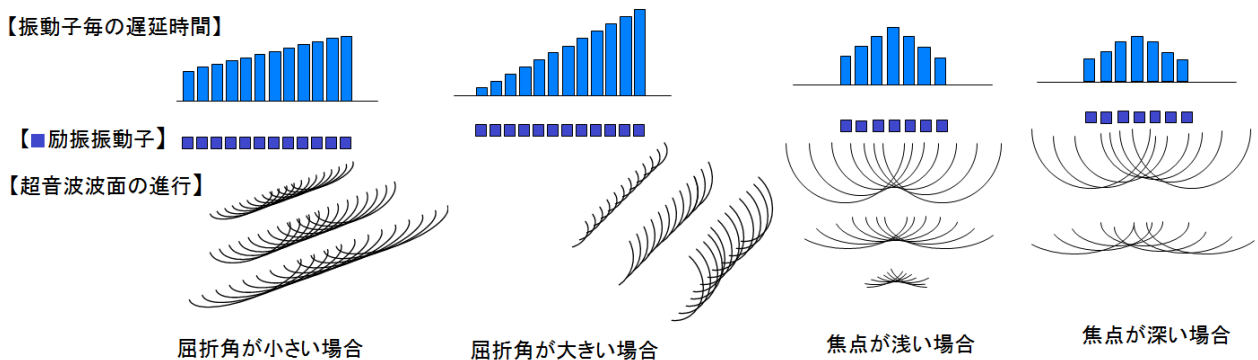


図 1-22 フェーズドアレイ探傷における超音波ビームの制御方法

図 1-23 はフェーズドアレイのセクタ走査から様々な画像を作成するプロセスを示す。ある位置におけるセクタ走査データの中から 1 角度のデータのみを表示すれば従来の超音波探傷と同じ波形 (A スコープ) 表示となる。走査した全ての角度のデータを表示すればその位置における扇状の B スコープ画像となり、セクタ B スコープと称される。超音波ビームを 1 角度に固定して超音波をスキャン軸方向に電子的に走査するか、あるいはセクタ探傷を行いながら探触子をスキャン軸方向に走査して得られたデータから 1 角度の情報を抜き出して表示した場合は、通常の固定角探傷と同じ B スコープ画像となる。この B スコープはフェーズドアレイ探傷の場合、セクタ B スコープと区別するためにリニア B スコープと称されることもある。なお、A スコープ以外の表示ではエコー高さを任意の色で階調表示することができる。立体的な超音波探傷画像はこのリニア B スコープ画像をステップ軸方向に積層することにより得ることができ、探傷の目的に応じて透視範囲を定めて B, C, D スコープ画像が作成される。

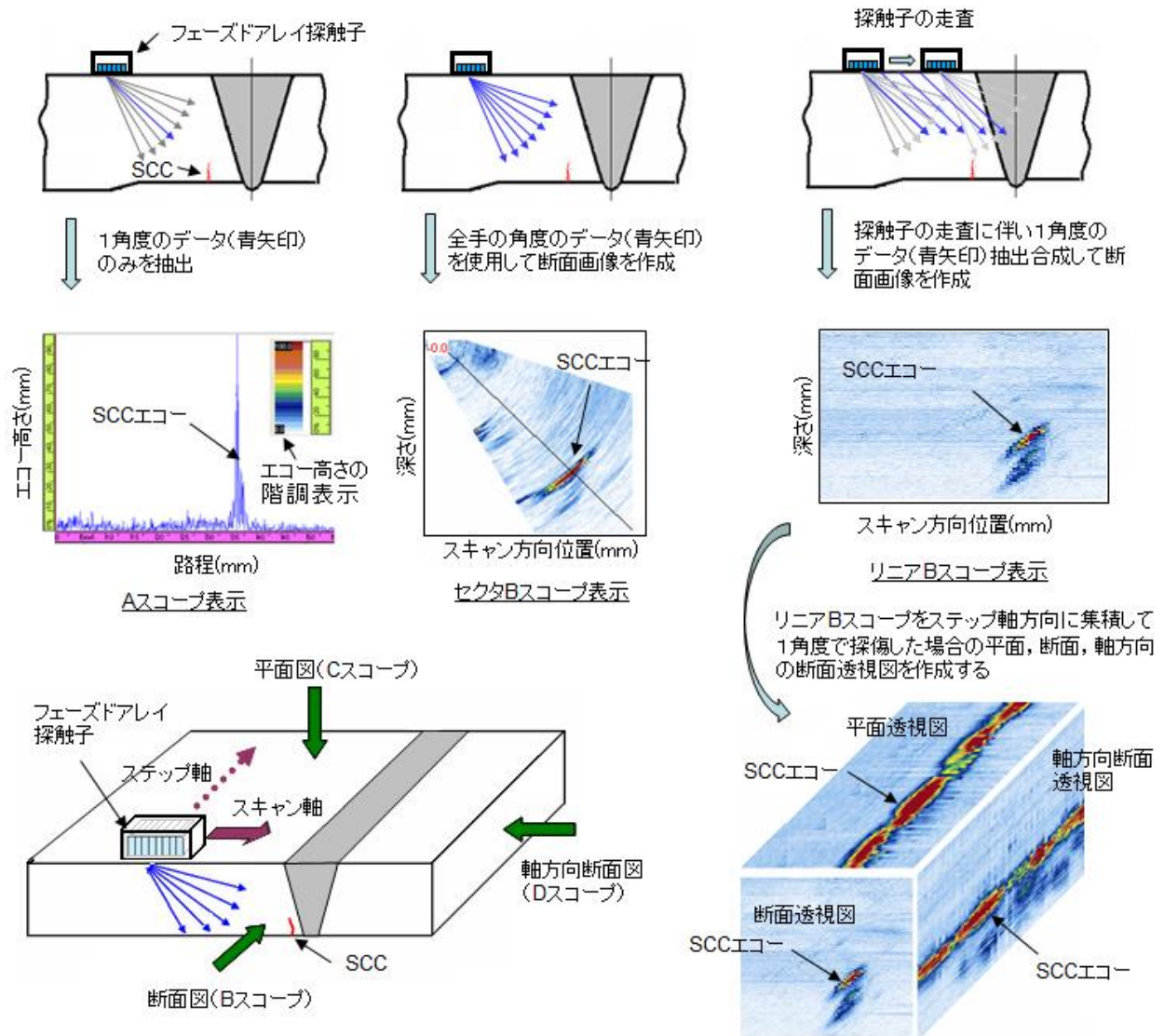


図 1-23 フェーズドアレイセクター走査で作成できる様々な探傷画像例

1990年以降にフェーズドアレイ技術が工業用の超音波探傷分野で広く用いられ始めた理由は、それを制御するコンピュータの高速化と記憶の大容量化に負うところが大きい。加えて、チャンネル数分の超音波送受信のラインを必要とするために堅く重かった探傷用ケーブルが柔軟かつ強靱な細径のケーブルとなり断線によるトラブルが少なくなったこと及び多数の振動子を組み込むために大きく重いフェーズドアレイ探触子の大幅な小型軽量化により探傷面との接触を保つのが容易になったことなど、使い易さの改良も重要な要因となっている。最近のフェーズドアレイ技術では、探触子の幅方向にも超音波のビーム幅を絞るための2分割のアレイや三次元画像の生成をより容易にするマトリックスアレイの応用技術も開発されている^{28), 29)}。また、フェーズドアレイ探傷を外表面にテーパを有する部分や局面を有する部分にも適用するための様々な手法の開発も行われている^{30), 31)}。

これまで述べたような画像化技術を欠陥の検出及び欠陥寸法測定に活用する利点として、PISC-IIIでは、原子炉圧力容器試験体に付与された12個の欠陥を10検査機関がASMEに準拠した手動探傷、自動探傷、SAFT、タンデム探傷、TOFD、超音波ホログラフィ、収束探触子法、EMATを使用して探傷した結果として、「TOFDやSAFTはばらつきが小さい」と評価している。この報告ではまた、「欠陥面が粗いき裂、複雑なき裂、き裂と体積欠陥の組合せのような欠陥に対しては、単独で欠陥の性状を識別できる技術は少なく、技法を組合せることによりこれらの複合欠陥を検出、分類し、定量化する必要がある。」としている³²⁾。また、国内の「低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術の実証(NSA)」においても、「斜角法で検出した指示が、欠陥であるかどうか疑わしい場合は、縦波を用いたフェーズドアレイ法が欠陥を識別する方法として有効であることを確認した」と報告すると共にフェーズドアレイ技術の活用に関して様々な検討を行っている³³⁾。このように、超音波探傷試験に画像を使用する有用性についての共通認識は構築されつつある。しかしながら、手動探傷との比較において決定的な優劣を示す結果はこれまでの実証試験では得られていない。この理由として、これらの実証試験に参加した検査技術者は参加組織が厳選した技術者であったため、結果として得られた違いは使用した探傷技術の優劣ではなく、探傷者の技量の差が反映されたものであったと考えることができる。

以上に述べたような理由もあり、工業用の超音波探傷試験分野では優れた超音波画像化技術が開発されているにもかかわらず、実際に原子力発電プラントのISIで使用されている画像化装置は原子炉容器の超音波自動探傷システムと組み合わせて使用されるものに限られ、その活用も画像による判定ではなく、むしろ大量の探傷データを効率的に採取し、保管することに重点が置かれ、検査結果の評価は主にエコー高さや指示長さを基準として行われている。このため、超音波探傷画像データは損傷調査などの重要な判断を行う場合の参考データとして活用されているものの、通常のISIにおいては画像データの監督官庁や検査機関に対する説明や規格に従った記録の作成などの面で、むしろユーザーの負担になっている場合が多い。一例として図1-24に深さ約6mmのSCCを探傷した場合のBスコープ画像の解析例を示す。本図はフェーズドアレイ探傷で作成した5MHz横波45°のリニアBスコープ画像であるが、横波45°の固定角探触子を使用した場合でも原理的には同じBスコープ画像が得られると考えることができる。図中の(a)は原画像からSCCの指示が得られた部分を切り出したものである。通常の探傷画像はこのように指示とその板厚方向の位置及び軸方向位置の情報のみを示す画像となる。(b)は原画像に溶接中心位置、管内表面位置及び溶接部開先形状を加えた図である。本図には参考としてエコーから推定したSCCの形状も赤の破線で加えてある。図1-24が示すように(a)の原画像のみでは画像解析に習熟した検査員でも正しく各エコーの意味を判断することは難しい。こ

れに溶接中心位置，管内表面位置及び溶接部開先形状の情報を加えることにより，初めて各エコーを解釈することが可能となる。なお，(b) 図中に「(1 回反射)」と示したエコーは 45° の横波が管内表面で反射した後に SCC の端部あるいは屈曲部を捉えたエコーであることを示す。これらのエコーは管内表面を挟んで鏡像の位置にある。屈曲部エコーは，開口部エコーと端部エコーの中間位置にあるエコーである。これらのエコーの解釈で考慮しなければならない点は，これらの超音波探傷画像が超音波ビームの拡散によりデフォルメされた欠陥像であり，常識的な「欠陥像」のイメージとは全く異なる形態であることである。これは (b) 図中に赤の破線で示した SCC 像と超音波画像を比較すれば明らかである。このため，図 1-24 に示した画像は超音波探傷の実務者には容易に理解可能な画像であるものの，超音波探傷の実務経験を持たない者にとっては説明がなされた場合でも理解が難しい画像となっている。この相違は超音波探傷結果について顧客あるいは監督官庁に説明を行う検査員にとっては重い課題であり，工業分野における画像化技術の進歩にもかかわらず現場での適用が進まない一因となっている。したがって，超音波探傷画像の活用を推進するためには，画像読み取り技術の普及に加えてよりリアルな画像描写技術を追求する必要がある。

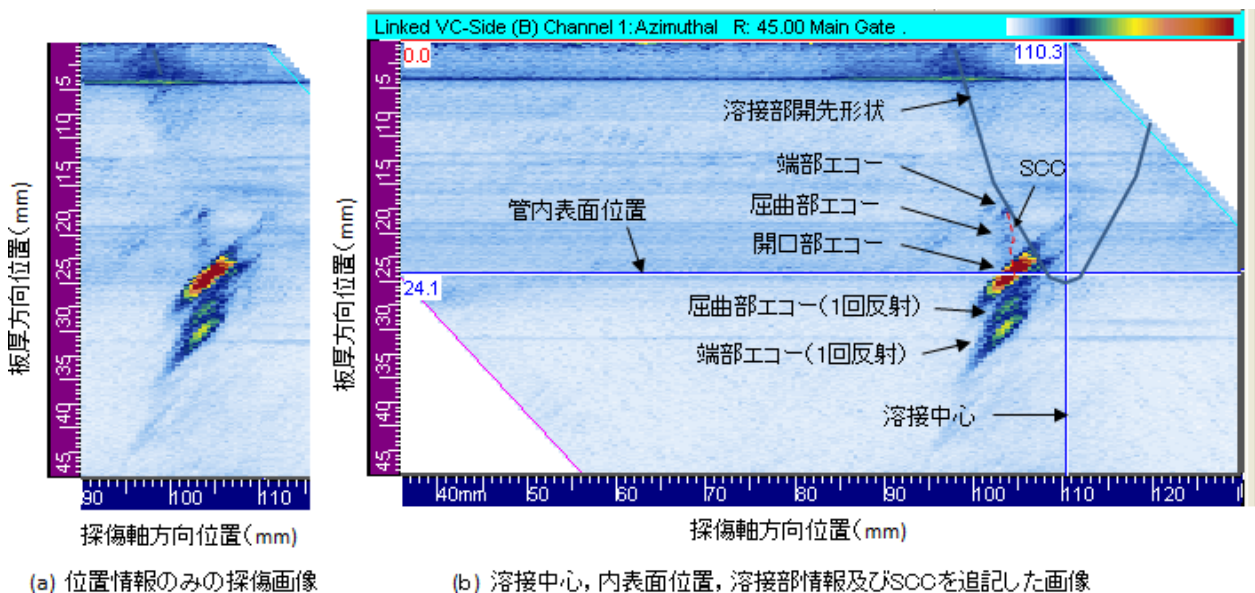


図 1-24 B スコープ画像の解析

1.6 まとめ

本章は議論の導入部として工業用の超音波探傷試験技術の基礎となる超音波による欠陥検出と欠陥寸法測定方法を説明すると共に，超音波探傷試験が設備の健全性維持に重要な地位を占めている原子力発電所の ISI へ適用された経緯とそれが抱える問題点を明らかにした。また，原子力発電所で発生事例が多いステンレス鋼配管突合せ溶接部 SCC について，超音波探傷試験から見たその特徴を説明した。加えて，SCC を対象とした超音波探傷試験における欠陥検出率及び深さの測定技術と測定値の信頼性について調査を行い，その信頼性に超音波探傷の画像化技術が果たした役割と問題点を示した。以上の検討を通して，現在の工業用の超音波探傷試験技術ではその信頼性の向上に向けて次のような課題を抱えていることが明らかとなった。

(1) 検査員による測定結果のばらつき

SCC 検出では深さが 2mm を超える SCC はほぼ 100%の検出率が期待できる。また、端部エコー法を使用すれば SCC の深さが高精度で測定できることが実証されている。しかし、同じ装置と手法を使用する場合でもチームあるいは個人によるばらつきが大きいことも明らかとなっており、検査員個々人の技量について実証試験（PD）による証明が求められている。超音波探傷試験結果の信頼性を向上させるためには検査員による試験結果のばらつきを最小に抑える手段の開発が課題である。

(2) 探傷ノウハウの公知化

これまで行われた様々な実証試験への参加者や PD 資格試験合格者は SCC 検出及び深さ測定に十分な能力を有することが証明されている。しかしこれらの技術者が実際に使用したテクニックの詳細はノウハウであるため公開されていない。工業分野全体として超音波探傷試験の信頼性を向上させるにはノウハウとなっている作業手順を公知化してレベルアップを図ることが必要である。

(3) 画像を使用する超音波探傷技術の適用拡大

SCC の検出及び深さ測定のばらつきを少なくする手段としては、欠陥像を提示できる点で A スコープより理解が容易な超音波探傷画像の活用が有望である。しかし、工業用超音波探傷の現場における探傷画像の活用は他の分野、特に医用の分野に比較して低いレベルにある。この理由として工業分野では欠陥の合否判定が未だにエコー高さと指示長さに依存していること及び提供される欠陥画像が実際の欠陥形状と異なるため、超音波探傷画像の有用性に対するユーザーの理解が進まないことが挙げられる。このため、超音波探傷画像の解釈方法とその有用性に関する啓蒙、及びより理解しやすい探傷画像を提供できる技術の開発が求められている。

本論文は工業用超音波探傷試験の信頼性向上を目指すものであり、その手段として検査員の技量に大きく依存するエコー高さを基準とする現在の探傷手法からより安定した検査結果が期待できる画像に基づく探傷手法への移行を促すことを目的としている。図 1-25 はこのために本論文で取り組んだ各章の内容と各章間の関連を示す。

第一の課題である検査員によるばらつきの実態を明らかにするために、第 2 章ではステンレス鋼配管溶接部 SCC のき裂深さ測定 PD 資格試験の実態を分析し、個人差が発生する原因やその程度の把握を試みる。また、A スコープを使用する手動探傷と探傷画像を使用するフェーズドアレイ法の優劣比較を行うと共に検査員間の探傷ノウハウの共有程度を明らかにする。

第二の課題である SCC 探傷ノウハウの公知化に関しては第 3 章でこれまで培われたノウハウを整理し、ステンレス鋼配管溶接部の形状的特徴と関連付けた具体的な例を示して解説する。更に、超音波のモード、探傷周波数、波数などの条件で探傷画像がどのように変化するかも示す。加えて、新しい試みとして周波数フィルタを使った反射源の判別、及び幅広い範囲のエコー高さ情報が取得できるログアンプの活用について検討する。第 4 章ではこれに引き続き第 3 章でまとめたノウハウをフェーズドアレイ技術によるステンレス鋼配管溶接部の SCC 検出及び深さ測定手順として取りまとめる。

第 3 の課題である画像を使用する超音波探傷技術の適用拡大に対しては第 5 章で安価で汎用の超音波探傷装置を利用して精細な探傷画像を得る技術を市場に提供する目的でリニアアンプとログアンプを併用する超音波探傷システムを開発する。

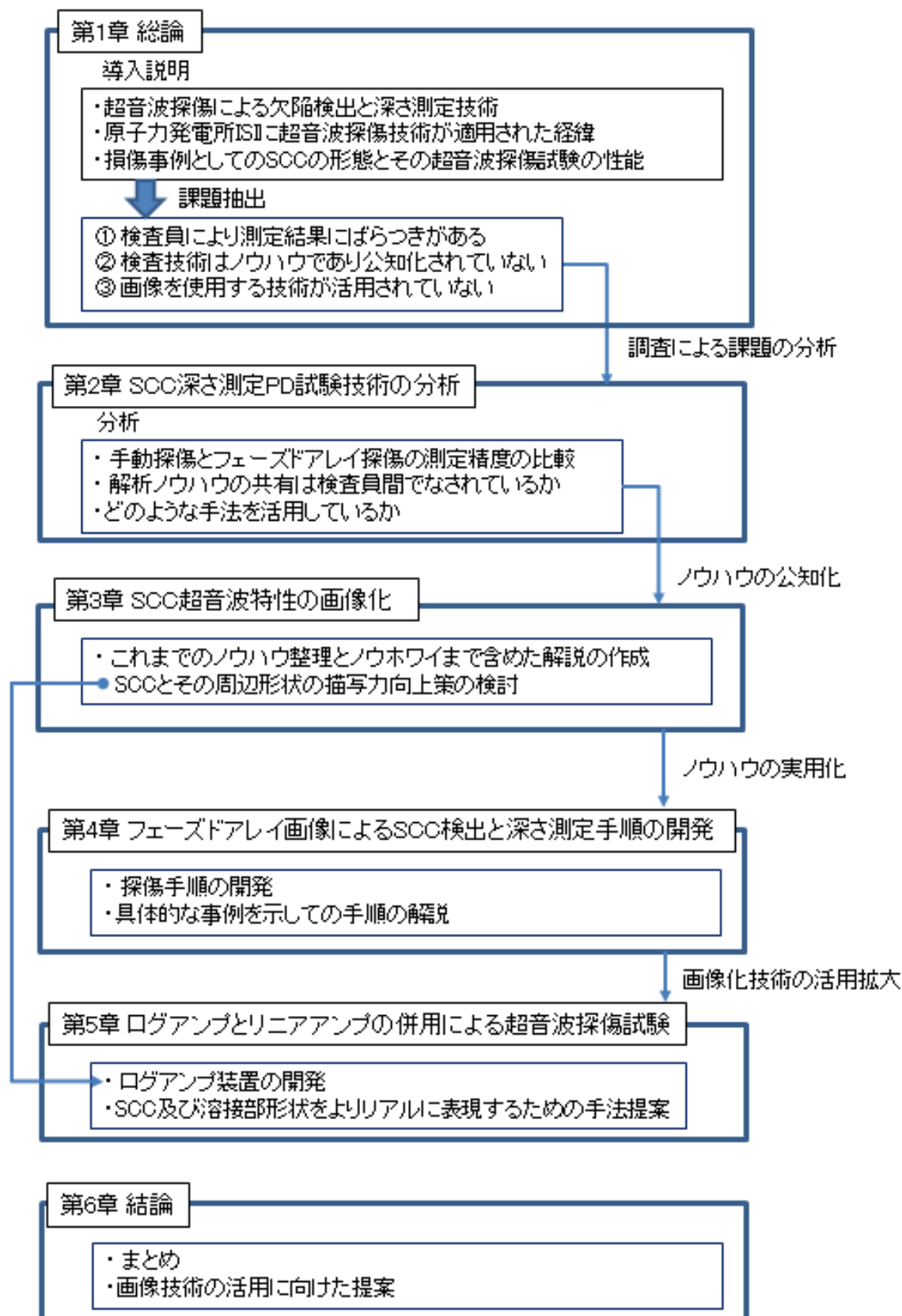


図 1-25 各章の内容と相互関連

参考文献

- 1) JAEC 4207-2008 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程, 日本電気協会, (2008)
- 2) JIS Z 3060:2002 鋼溶接部の超音波探傷試験方法, 日本規格協会, (2002)
- 3) JSME S NB1-2007 日本機械学会発電用原子力設備規格 溶接規格, 日本機械学会, (2007)
- 4) JSME S NA1-2008 日本機械学会発電用原子力設備規格 維持規格, 日本機械学会, (2008)
- 5) U.S. Regulatory Commission, NUREG 75/067, “Investigation and Evaluation of Cracking in Austenitic Stainless Steel Piping of Boiling Water Reactor Plants”, (1975)
- 6) U.S. Regulatory Commission, NUREG-0313 Rev.1, “Technical Report on Material Selection and Processing Guidelines for BWR Coolant Pressure Boundary Piping”, U.S. Regulatory Commission, (1979)
- 7) NRC, IE BULLETIN 82-03 Revision.1, “Stress Corrosion Cracking in Thick-wall, Large-diameter, Stainless Steel, Recirculation System Piping at BWR Plants”, (1982)
- 8) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会基準評価ワーキンググループ (第6回) 資料 6-1: 原子炉再循環系配管の健全性評価について (II), 原子力安全・保安院, (2003)
- 9) 第45回原子力安全委員会資料第3号: 応力腐食割れ (SCC) に関する現在までの知見の総括, 原子力安全・保安院, pp.30-34, (2006)
- 10) S. Suzuki, K. Takamori, K. Kumagai, A. Sakashita, N. Yamashita, C. Shitara and Y. Okanura, “Stress Corrosion Cracking in Low Carbon Stainless Steel Components in BWRs”, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.1, pp.12-16, (2009)
- 11) L. G. Chockie, “Section XI of the ASME Code A New Approach to Qualifying Procedure and Personnel”, Proceedings, 7th International Conference on NDE the Nuclear Industry, pp. 83-86, (1985)
- 12) C. D. Cowfer, O. F. Hedden, “Overview of the ASME Section XI Code Relating to NDE and Ultrasonic Examination Performance Demonstration”, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 113, pp. 170-173, (1991)
- 13) S. Crutzen, “PISC I and PISC II Looking for Effective and Reliable Inspection Procedures”, Proceedings of the International Workshop on the Contribution of PISC to Code and Standards, in Particular to Performance Demonstration, PISC Report No.29, pp.9-34, (1992)
- 14) S. Crutzen, “The Objectives of the PISC III Programme: Validation Experience of the Preceding Programmes Results”, Proceedings of 7th International Conference on NDE the Nuclear Industry, pp. 75-78, (1985)
- 15) 平成16年度原子力発電設備検査技術実証事業に関する事業報告書 (超音波探傷における欠陥検出性およびサイジング精度の確認に関するもの) [総括版 (1/2)], 原子力安全基盤機構, p.805,p.806, (2005)
- 16) F. L. Becker, “Performance Demonstration – 25 Years of Progress”, Proceedings of Third International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Inspection Qualification V, (2001)
- 17) F. L. Becker, P. Ashwin, C. Latiolais, “Implementation of ASME Section XI Appendix VIII, Performance Demonstration Requirements”, Proceeding of the 14th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp. 37-42, (1996)
- 18) EC Joint Research Center, “Report of the evaluation of the inspection result of wrought –to-wrought PISC III Assemblies No. 31,32,33,34,35 and 36”, PISC III Report No. 33, EUR 15663 EN, (1995)
- 19) G. J. Dau, “IGSCC Detection Status” Report presented to the ASME Pressure Vessel Research Committee, Subcommittee on NDE, New York, (1984)
- 20) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会、原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会(第8回) 資料 8-2: 超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験について”, 原子力安全・保安院, (2003)
- 21) 原子炉再循環系配管等の検査への改良超音波探傷試験の適用について, 原子力安全・保安院, (2004)
- 22) Iowa State University NDT Education Resource Center, “History of Ultrasonics”, www.ndt-ed.org.
- 23) 日本超音波医学会 新超音波医学: 第1巻 医用超音波の基礎, 医学書院, p.47, (2000)
- 24) W. Huller, V. Schmitz, G. Schafer, “Imaging Defects by one-dimensional Synthetic Aperture Focusing Technique”, Proceedings, 7th International Conference on NDE the Nuclear Industry, pp.301-304, (1985)
- 25) 佐藤知正: ホログラフィックな音響映像形成技術, 日本機械学会誌, 第86巻 第781号, pp.1311-1317, (1983)
- 26) JEAC 4207-2008 軽水型原子力発電用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程, 日本電

気協会, 解説 A-5310, (2008)

- 27) 黒川悠：原子力発電設備の超音波探傷試験におけるき裂のサイジングと種別判定の高度化に関する研究, 東京工業大学学位論文, (2008)
- 28) G. Maes, J. Berlinger, J. Landrum, M. Dennis “Appendix VIII Qualification of Manual Phased Array UT for Dissimilar Metal Welds”, Proceedings of 5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Inspection Qualification I, (2006)
- 29) 中畑和之, 河野尚幸：超音波フェーズドアレイ探触子による音場の 3D モデリングと送信ビームの特徴について, 非破壊検査, Vol.62, No.2, pp.76-83, (2013)
- 30) G. Toullelan, A. Nadim, O. Casula, E. Abittan “Piping Inspection Using a 3D Smart Flexible Phased-Array Transducer”, Proceedings of 6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Developments in Ultrasonic, Phased Array Inspection III, (2007)
- 31) 山本撰, 千星淳, 三浦崇広, 三橋忠浩, 落合誠：複雑形状対象を検査可能なビーム制御方式フェーズドアレイ超音波探傷システム, 非破壊検査, Vol.62, No.2, pp.95-101, (2013)
- 32) EUR 22640 EN, NESC III Inspection Task Group Final Report, “Analysis of the Inspection results Obtained in the NESC III Blind RRT on Dissimilar Metal Welds”, (2006)
- 33) JNES-SS-0620 低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術, 原子力安全基盤機構, (2007)

第 2 章 SCC 深さ測定技術の分析

2.1 はじめに

第 1 章では工業分野の超音波探傷試験における課題として検査員により測定結果にばらつきがあることをこれまでの様々な実証試験などの結果から示した。また、A スコープに頼る手動探傷より画像を用いる探傷法がばらつきの少ない結果を期待できるが、規格との関係で探傷画像の活用は広がりや欠いていることを示した。このような中で、構造材の板厚方向のき裂寸法測定にはエコー高さに依存しない端部エコー法が信頼性の高い測定法として使用されており、国内で 2006 年に開始された原子力発電所のステンレス鋼配管突合せ溶接部に発生する SCC の高さ（深さ）測定技術の実証（PD: Performance Demonstration）資格試験（以下、PD 試験）では、受験者が自由に探傷装置及び探傷手順を選定することが可能となった結果、ほとんどの受験者が超音波探傷画像を使用するフェーズドアレイ技術を採用している。

著者は PD 試験開始の当初から 2011 年まで主任試験員として PD 試験の運営を行ってきたため、本章では最初の 3 年間における PD 試験の実績を解析し、SCC の深さ測定における測定結果のばらつきの要因及び測定に超音波探傷画像を使用する利点と課題を明らかにする。また、超音波探傷技術に関する知識の共有が検査員間で十分に行われているかについても確認する。

2.2 PD 試験の実施方法

国内における PD 試験は、2005 年に日本非破壊検査協会規格 NDIS 0603:2005 「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」が制定されたのを受け、2006 年に開始されている^{1),2)}。

この PD 試験の実施方法は以下のとおりである。

(1) 手順書と試験装置

PD 試験は受験者の技術の実証が目的であるため、探傷の手順（要領）書及び試験装置は受験者が準備して試験に持ち込んでいる。なお、手順書は記載内容が NDIS 0603 の要求に合致しているかの確認を PD 試験センターが実施するが、その内容は検査会社のノウハウを記載した「無形資産」であるために公開されていない。

(2) 試験体

PD 試験に供される試験体として、ステンレス鋼配管突合せ溶接部に SCC を付与した以下の 3 種類が準備されている。この 3 種類の配管径及び管の肉厚は現在の BWR 型原子力発電所の ISI において超音波探傷試験の対象となる配管をカバーするように計画されている。

大口径管：公称外径 600A，公称肉厚 35mm

中口径管：公称外径 350A，公称肉厚 25mm

小口径管：公称外径 150A，公称肉厚 10mm

また、試験に供される試験体には、国内の原子力発電所配管で発生した SCC の実績を踏まえ、深さ 15mm 以上の SCC および先端が溶接金属内にある SCC がそれぞれ 1 個以上含まれている。

(3) SCC の深さ測定

試験は受験者に SCC の深さを知らせない「目隠し試験」方式とし、試験中は試験員による監視が行われている。

試験では管径の異なる3種の試験体を組み合わせた10個のSCCについて深さ測定が要求されている。10個のうち6個の深さは表2-1の分布とし、残りの深さは任意に振り分けられている。

表 2-1 PD 試験体における SCC の深さ分布

SCC 深さ h (肉厚に対する%)	最小個数
$0 < h \leq 30\%$	2
$30 < h \leq 60\%$	2
$60 < h < 100\%$	2

試験体には図 2-1 に示すように溶接中心線と測定範囲の中心を示す印が罫書されており、受験者は試験体表面に指示された測定範囲の中心線より左右25mmの範囲内でSCCの最大深さを測定することが求められる。

なお、守秘の観点から、試験体は受験者が外見的特徴を特定できないように配管径毎に同一の形状としており、試験体外面の罫書きも試験の都度消去できるようにしている。また、PD試験は最大5人が同時に受験できるが、受験者にはそれぞれ異なる10試験体を組み合わせた試験体セットが与えられる。

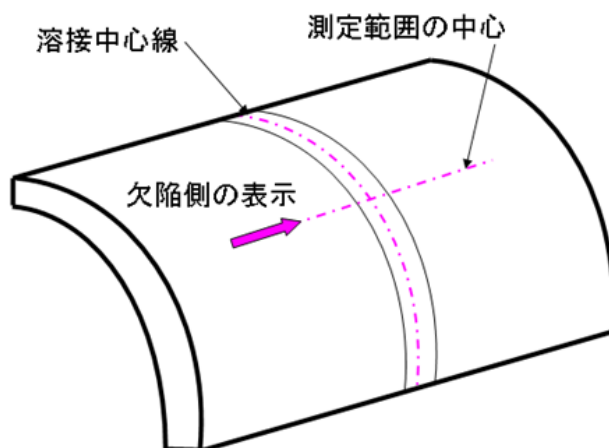


図 2-1 PD 試験用試験体と測定基準の罫書き

(4) 試験時間

試験時間は準備を含めて8時間/日×5日間となっている。試験体は測定が完了した後1体ずつ提供され、後戻りは許されない。1試験体に許される試験時間は最長1日であり、また、1試験体について日を跨いでの探傷は許されていない。

(5) 合否基準

受験者は各試験体の深さ測定終了の都度、測定結果を提出する。合否基準は以下のようになっている。

- ① 測定値の RMSE (Root Mean Square Error) が 3.2mm を超えない。RMSE の算出は次式による。

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - t_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (1)$$

m_i : SCC 深さの測定値

t_i : SCC 深さの真とする値

n : 試験体数

② 測定値は真とする値に対して 4.4mm を超えて下回らない (-4.4mm 制限)。

(6) 採点とデータの確認

PD 試験では受験者が提出した「SCC 深さ測定値」のみを使用して合否が決定される。この他に、測定結果提出時に、受験者が各試験体の測定結果をどのような情報に基づき決定したかについて、試験員が口頭で確認している。これは、受験者が不正に解答を入手していないかを確認するためのものであるが、受験者の判断プロセスを試験実施者側が確認する機会ともなっている。

(7) 再試験

最初の PD 試験で不合格となった場合は 30 日以降に行われる再試験をもう一度受験することができる。また、PD 研修センターで PD 研修を受けた場合は 30 日以内でも PD 試験が受験できる。再受験でも試験内容の減免は無く、新規試験と同じ扱いとなる。

(8) 結果の連絡

受験者には合否の結果のみが連絡される。技量向上のために不合格となった原因を知りたいとの要望は多いが、PD 試験システムを保護するためにこのような措置が採られている。

2.3 受験者の成績

2006 年 3 月の PD 試験開始から 2009 年 3 月末までの 3 年間に計 23 回の試験が実施され、38 名が受験し、27 名が合格している。また、再受験者を加えた延受験者数は 63 名であった。

PD 試験の時期、受験者数及び試験結果を表 2-2 に示す。第 1 期には PD 有資格者の早急な確保が必要であったため、3 か月間に 6 回の試験を行っている。第 2 期では 4 回の PD 試験を実施している。第 3 期以降は PD 試験の実施間隔はほぼ半年となっている。

PD 試験結果では、第 1 期で新規受験者の合格率が 18 人中 8 人 (44%) と高いのに対して、再受験者の合格は 7 人中 1 人 (14%) となっている。逆に、第 2 期以降は新規受験者の合格率が低下する一方、再受験者の合格率が改善されている。受験者の RMSE 値も同じ傾向を示している。これら合格率及び RMSE 値の変化の理由としては、新規受験者については、き裂深さ測定を実務とする第一線級の検査技術者のほとんどが第 1 期に新規受験者として合格してしまい、第 2 期以降の新規受験者は経験の浅いグループであったためと推測できる。また、再受験者に関しては、第 1 期の新規試験で不合格となり第 1 期中に再受験した者は、再受験までの期間が 2 ヶ月未満であったために技量の修正が間に合わずに不合格となる者が多かったと推測できる。特にこの時期は PD 試験の発足直後で各社の教育体制が整わなかったために失敗原因への対応が不十分であったと考えられる。第 2 期以降の再受験者の RMSE 値が第 1 期に比較して向上しているのは、各社の教育内容に改良があったためと考えられる。この RMSE 値の向上が試験情報漏洩の結果

でないことは、PD 試験センターが試験体毎に解答内容の変化を解析してその懸念が無いことを確認している。また、第 3 期以降も新規受験者の合格率に向上が見られないことから、試験体情報が漏洩している可能性はないと考えられる。

表 2-2 各期における PD 試験受験者の成績

期	実施時期	実施回数	全受験者		新規受験者			再受験者		
			受験	合格	受験	合格	RMSE*	受験	合格	RMSE*
1	2006/03-06	6	25	9	18	8	3.38	7	1	3.62
2	2006/07-09	4	12	5	8	1	6.13	4	4	1.55
3	2007/02-03	2	6	3	3	1	3.63	3	2	2.14
4	2007/07-08	3	8	3	4	0	4.63	4	3	2.16
5	2008/01-03	3	5	2	3	1	4.01	2	1	2.79
6	2008/06-08	3	4	2	1	0	-	3	2	2.03
7	2009/01-02	2	3	3	1	1	-	2	2	1.86
合計		23	63	27	38	12	-	25	15	-

* 受験者の RMSE (mm) の算術平均値

図 2-2 は受験者の受験時の満年齢と試験結果を時系列で示している。図 2-3 は合格者が何度目の試験で合格できたかを年齢層別に示している。図 2-2 は 1 期から 2 期までの 2006 年における受験者の年齢は 35 歳から 50 歳未満までが中心であったことを示している。また、2007 年以降は、受験者の年齢がほぼ 35 歳以下と 45 歳以上の二つのグループに分かれ、35 歳以下のグループの合格率が高いことを示している。図 2-3 は 35 歳から 39 歳のグループは他の年齢層に比較して初回試験での合格者の比率が高いことを示している。第 2 期以降の 35 歳以下のグループは初回の試験では合格できずに再試験で合格している場合が多い。第 2 期以降には 50 歳を超えるグループも受験しているが、合格者は 2 名で、再試験での合格となっている。これらの事実から、PD 試験の開始時点で実践的な SCC の深さ測定技量を有していたのは 35 歳から 50 歳未満までのグループであると判断できる。このグループの後に 35 歳以下の若手グループが受験を開始しているが、経験不足のために最初の試験では合格できずに再試験で合格するパターンが多い。50 歳以上のグループは、長期間 SCC の探傷を経験しているベテランではあるが、SCC の深さ測定は SCC の検出とは異なる技術と経験の習得が必要なことを示唆している。また、第 2 期以降は社内の教育内容に改良があったと先に述べたが、35 歳以下の新規受験者の合格率が低いことを考えれば、経験の少ない層に対する受験前の教育は十分なものでは無かったと考えられる。このグループには試験実施中に試験が進むに連れて測定精度が向上する受験者がおり、また、試験終了後に「勉強になった」との感想が多く寄せられていることから、「様々な深さの SCC を使った実践的な経験」の部分が不足していたと考えられる。

以上の事実より、SCC の深さ測定には SCC の検出とは異なる技量が必要であり、またその習得も個人差があることから検査員を送り出す側にも確立した教育プログラムが備わっていないものと推定することができる。

式であった。このデジタル式超音波探傷器は、予め感度校正条件を記憶させておけば探触子を交換した際に校正条件を呼び出すだけで探傷が可能となる点で、その都度校正が必要となるアナログ式超音波探傷器に比較して便利である。

超音波探触子は、ステンレス鋼溶接部に発生する SCC の深さ測定には屈折角 45° の横波斜角探触子が良いとされているため、PD 試験でもこれが使用されている。また、PD 試験では先端が溶接部内に進展した SCC の深さ測定が必要なため、ステンレス溶接部内の超音波透過性に優れる縦波斜角探触子も併せて使用されている。

手動 UT では、 45° の斜角探傷に加えて、き裂の深さを大まかに分類するためのモード変換波法を使用している。モード変換波法は図 2-4 (a) に示すように屈折角が $70^\circ \sim 80^\circ$ の縦波を送信する探触子を使用する手法であり、原理的に縦波に加えて屈折角が約 35° の横波も同時に発生している。モード変換波法はこの二つのモードの波が反射の度に互いにモード変換を繰り返す原理を積極的に利用して SCC の深さを推定する手法である。(a) は探触子から発信された横波及び縦波がモード変換する状況を示す。クリーピング波とは縦波が面の近くを這うように進むために付けられた名称である。SCC が浅い場合は (b) に示す二次クリーピング波で SCC の面が検出される。SCC が深くなるにつれて (c) に示す様々なモード変換波が SCC 面で発生し、A スコープ上に複数のエコーが観察される。更にき裂が深くなると (c) のモード変換波に加えて (d) の一次クリーピング波による SCC の端部エコーが検出できる。このように、SCC の深さは様々なモード変換エコーの出現パターンで推定されるため、厳密な深さ測定は行えないが、深さの目安には有効な手法となっている。なお、モード変換波用の探触子には振動子が一つのものや、より積極的にモード変換波を捉えるために送信用と受信用の振動子の角度を変え縦に並べた形式のものなどがある。

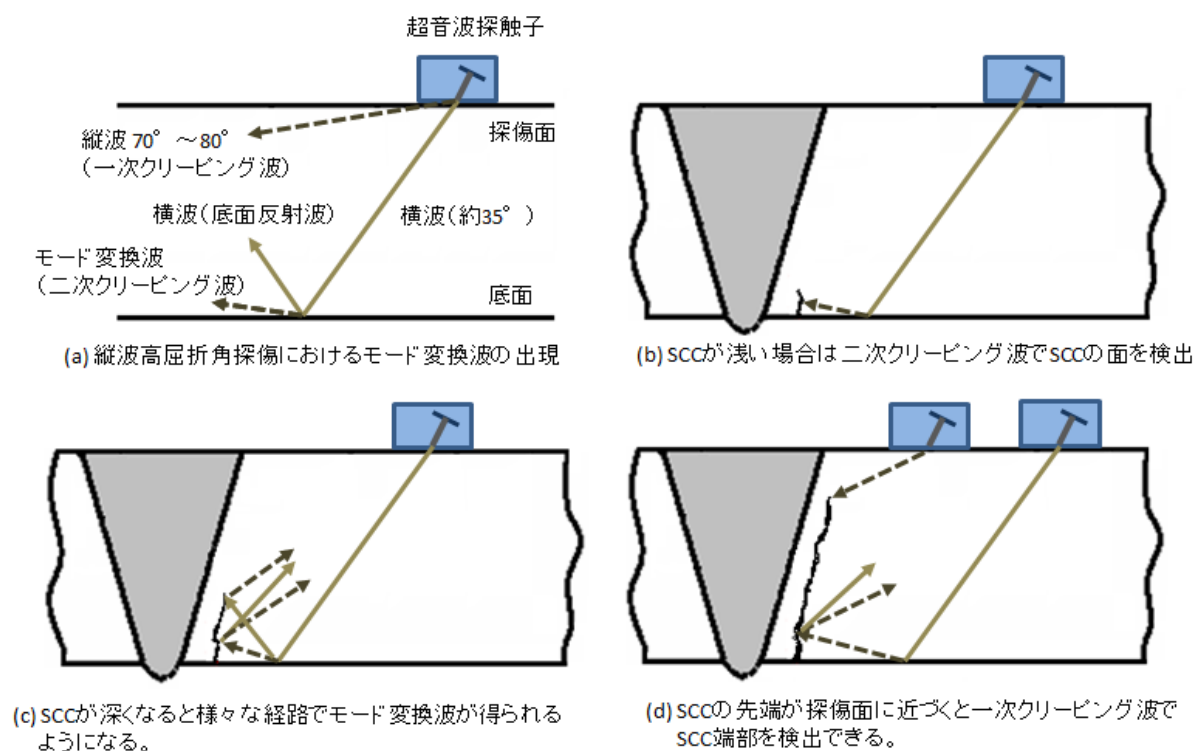


図 2-4 モード変換波法の原理

(2) 改良 UT 法

PLR 系配管のき裂高さ測定実証試験⁴⁾で SCC の深さ測定法として開発された手法で、本論文では (1) の手動 UT 法にフェーズドアレイ法を併用する手法を「改良 UT 法」としている⁵⁾。PD 試験で使用されたフェーズドアレイ法は、図 2-5 に示すように X-Y スキャナに探触子を装着し、探傷ビームを管軸方向に向けてセクタースキャンを行う手法が採用されている。X-Y スキャナは各種の形式が使用されているが機能的には同等である。また、探傷モードは全て縦波を使用している。フェーズドアレイデータの解析は A, B, C 及び D スコープを使用して端部エコーを特定する手法で、手順書により多少の違いはあるものの、基本的な使い方は類似した手法となっている。ただし、受験者の観察結果では、同じ手順書を使用する場合でも探傷の手順やデータの取り扱いに個人差が認められた。例えば、現場における手動探傷試験の経験が長い年長者は手動探傷に重点を置き、フェーズドアレイ画像は手動で得た結果の確認に使用する傾向があり、若手は、フェーズドアレイ探傷を重視し、手動探傷は形式的に使用しているなどである。

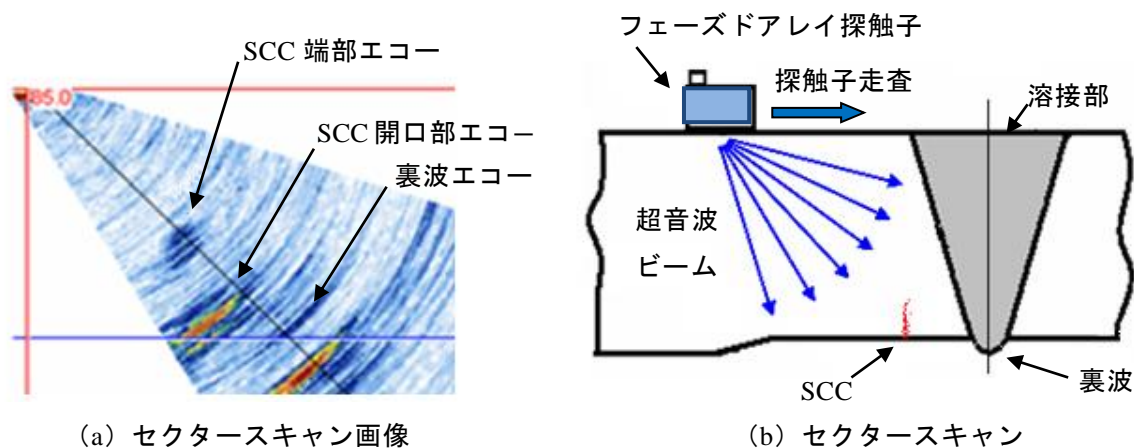


図 2-5 セクタースキャンの模式図と探傷画像例 (B スコープ)

(3) フェーズドアレイ (PA) 主体の手法

手動 UT 法を使用せずに、フェーズドアレイ法のみで測定を行う手順を使用した場合をフェーズドアレイ主体の手法とした。手動 UT 法を溶接部の板厚計測に使用している場合や、手順書には手動探傷を補助的手段として記載しているものの実際には使用していない場合も、フェーズドアレイ主体の手法としている。

(4) その他

複数の固定角探触子を併用し、それぞれの探触子で検出した端部エコーの軌跡から SCC 端部の位置を特定する手法である。この手法は 1 名が 2 回使用しているが不合格となっている。

図 2-6 は PD 試験に使用された手法の使用回数とその結果を示す。試験結果は改良 UT 法の合格率が約 54%と最も成績が良く、手動 UT 法での合格率は約 27%、フェーズドアレイ主体の手法での合格率は約 22%であった。手動 UT 法に比較して、手動 UT 法にフェーズドアレイ法を加えた改良 UT 法の合格率が高いこ

とは、フェーズドアレイ法が有効であることを示している。しかし、フェーズドアレイ主体の手法での合格率が高くないことは、手動 UT とフェーズドアレイ法を組合せて得られた利点をフェーズドアレイ主体の手法では完全には補完できていないことを示している。

表 2-3 はそれぞれの手法における RMSE 値の平均を示す。合格者の RMSE 値で比較した場合、手動 UT 法は改良 UT 法及びフェーズドアレイ主体の手法に比較して劣っており、フェーズドアレイ法を使用する場合に比較して測定精度の面で不利なことを示している。また改良 UT 法とフェーズドアレイ主体の手法の合格者の RMSE 値には大きな差は認められない。したがってフェーズドアレイ主体の手法でも合格者は問題無く測定を行っており、フェーズドアレイ主体の手法での合格率が低いのはその運用方法に何らかの問題があるためと考えられる。

フェーズドアレイ主体の手法と改良 UT 法との違いとして、フェーズドアレイ主体の手法では探傷結果を現場で簡便に確認するための手段が少ないことが挙げられる。例えば、浅い SCC や非常に深い SCC の端部エコーを特定する場合、フェーズドアレイ法では超音波ビームの焦点を当該範囲に合わせて絞るか、あるいはその範囲専用の探触子を使用する必要がある、このいずれの場合も、探傷条件の再設定とデータ採取作業が必要となる。一方、手動探傷の場合には、探触子を交換し、予め設定してある超音波探傷器の感度校正条件を呼び出せば、直ぐにも確認作業が開始可能となる。フェーズドアレイ主体の手法を使い、この探傷結果の再確認作業の手間を省いた場合は、測定精度の低下を招くと共に不合格の要因となることも容易に予想できる。

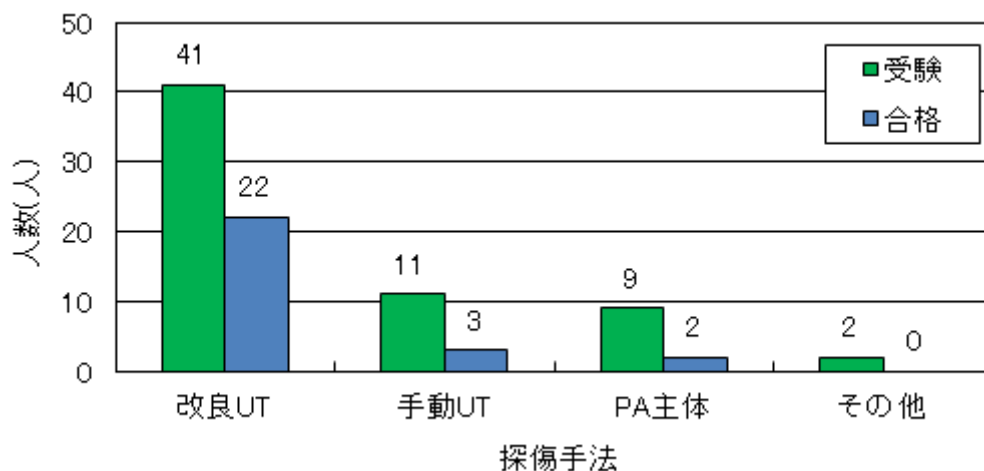


図 2-6 PD 試験における探傷手法と結果

表 2-3 探傷手法と受験者の RMSE の平均値

探傷手法	RMSE の平均値 (mm)			最良 RMSE 値 (mm)
	合格者	不合格者	全体	
改良 UT 法	1.91	4.46	3.05	0.9
手動 UT 法	2.60	5.08	4.41	2.0
PA 主体の手法	1.82	4.85	4.18	1.4

2.5 測定誤差とその要因

図 2-7 は 600A 試験体における SCC 深さの板厚に対する 10%区分ごとの深さ測定誤差の標準偏差 (S) を合格者と不合格者に分けて示している。S は次式により算出した。なお、板厚 10%毎の標準偏差は、その範囲に含まれる試験体の測定誤差の標準偏差を算術平均している。

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

x_i : 当該 SCC 深さの測定値

t_i : 当該 SCC 深さの真とする値

n : 当該 SCC を測定した受験者数

これまで、PD 試験の不合格者は SCC 先端エコーの判別に問題を抱えていることが PD 試験センターから報告されている⁶⁾。図 2-7 は合格者の標準偏差が SCC の深さ区分に係わらずほぼ一定であるのに対して、不合格者の標準偏差は SCC の深さが板厚の 20%から 60%の範囲で大きく、この深さ範囲で SCC の端部エコーを正しく判別できていないことを裏付けている。

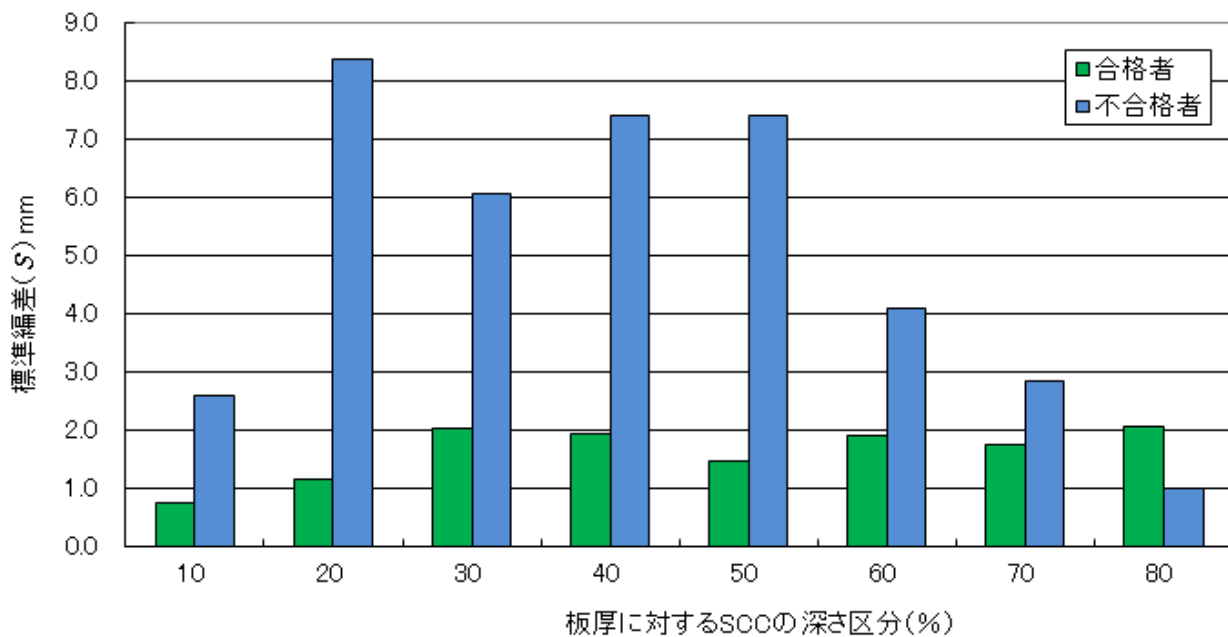


図 2-7 SCC の深さ区分毎の受験者の測定誤差の標準偏差

図 2-8 は、図 2-7 と同じ 600A 試験体における SCC 深さ区分ごとに平均測定誤差を、合格者と不合格者に分けて示している。ここでの平均測定誤差は各試験体について次式で求めている。また、板厚 10%毎の平均はその範囲に含まれる試験体の平均測定誤差を算術平均している。

$$\bar{x} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - t_o \right| \quad (3)$$

- x_i : 対象とする試験体の測定値
- \bar{x} : 当該 SCC 深さの平均測定誤差
- t_o : 当該 SCC 深さの真値

測定誤差の平均値算出にはいくつかの考え方があるが、ここでは合格者及び不合格者グループの、ある板厚の深さ区分にある SCC についての測定傾向を明らかにするために、式 (3) を用いている。個々の受験者の測定値の真値との差の絶対値を平均した場合は図 2-7 と同じ傾向を示す。

図 2-8 で合格者グループの平均測定誤差は 2mm 以内で SCC の深さに係りなく安定しているが、不合格者の SCC 深さの平均測定誤差は SCC 深さが 20% で最大となり、20% から 50% にかけて小さくなる傾向を示している。この傾向は、不合格者が SCC 深さの 20% から 50% の範囲では実際の深さに係らず板厚中央付近の値に読む傾向があることを示している。SCC の深さが板厚の 50% を超えればモード変換波法などである程度大きな SCC であることが推定可能となるためか、誤差は小さくなっている。ただし、SCC 深さが 50% 程度の場合には、不合格者グループとしての平均測定誤差は小さいが、個々人の測定値のばらつきが大きいことは図 2-7 の測定誤差の標準偏差が示しており、不合格者は SCC の端部エコーの特定ができずに何らかの推定を加えてそれらしい解答を行っていることを裏付けている。なお、SCC の深さが 10% 程度の場合には試験の合格に係らず高い精度で測定できているのは、SCC 開口部エコー高さが低いこと及びモード変換エコーがほとんど得られないことから小さな SCC であることが容易に推測可能であるためと考えられる。また、非常に深い SCC は、一次クリーピング波など屈折角の大きな探触子を用いれば SCC 先端の確認が可能であるために、測定精度が高くなっていると考えられることができる。

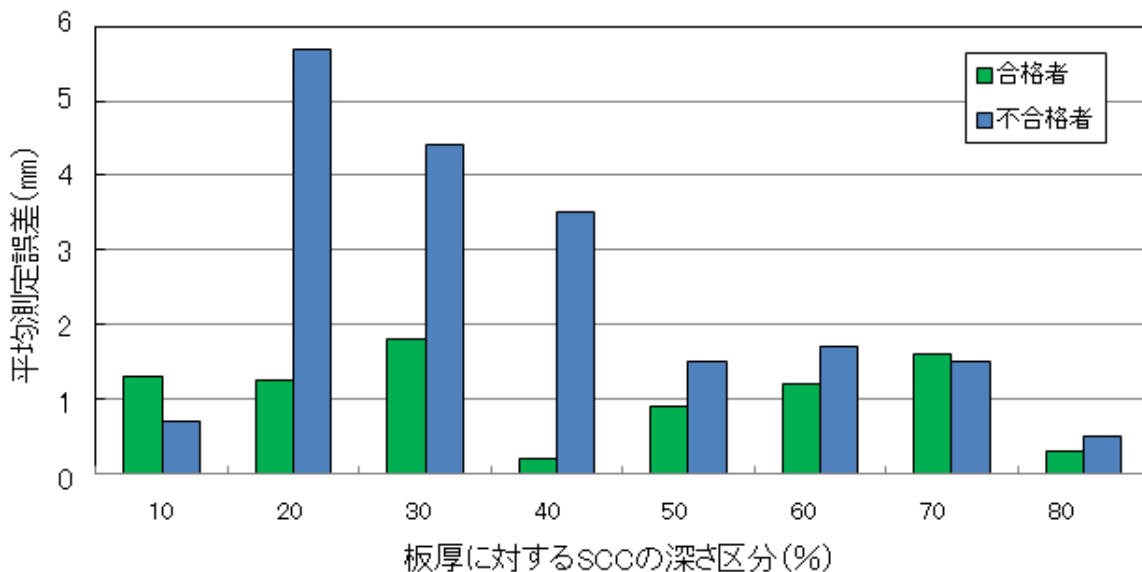


図 2-8 SCC の深さ区分ごとの平均測定誤差

図 2-9 は各受験者の測定誤差（測定値－真値）の平均値と RMSE 値の相関を示す。RMSE 値が破線で示す 3.2mm 以下にもかかわらず不合格となったのは-4.4mm 制限を超えた受験者である。RMSE 値が 2.5mm 以下の受験者の測定誤差の平均値は青の四角枠で示すようにほぼ±1mm の範囲にあり高い精度で測定を行っている。RMSE 値が 2.5mm を超える付近からは測定誤差の平均値が大きくなり、測定のばらつきが拡大していることを示している。

ここで、RMSE と平均誤差（ \bar{x} ）及び標準偏差（ S ）間には次式の関係がある。

$$RMSE = \sqrt{\bar{x}^2 + \frac{n-1}{n} S^2} \quad (4)$$

n : データ数

式 (4) から測定誤差の平均値を 1 mm として青枠内の合格者の標準偏差（ S ）を求めると、 $n=10$ であるため $S=2.4\text{mm}$ となり、実証試験 UTS⁷⁾ で得られた測定誤差の標準偏差と近い値となり、PD 試験合格者の SCC 深さ測定精度は実証試験における結果と同等のレベルにあることを示している。

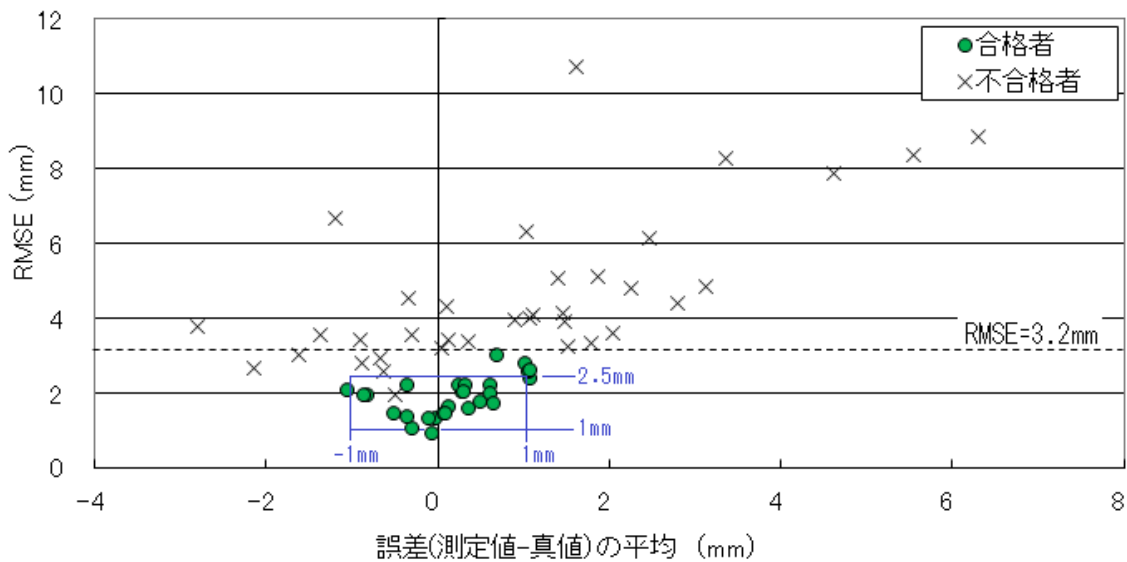


図 2-9 RMSE と測定誤差平均値の相関

図 2-10 は受験者の技量レベルがどのように分布しているかを確認するために RMSE 値を横軸とした受験者数の分布を示す。受験者数は延べ人数である。この図から受験者の技量レベルは一つのピークを持つ分布では無く、いくつかのピークを持つ分布となることが明らかになった。この結果から受験者の技量を大まかに A、B 及び C の 3 グループに分けてそれぞれの特徴を考察した結果を以下に示す。

グループ A :

RMSE 値が約 2.5mm 以内で測定誤差の平均値が±1mm 以内のグループで、SCC の深さに係らず端部エコーを正しく判別できる技量を有している。グループ A に属するものの不合格になった受験者は不注意により-4.4mm 制限を超えた者である。

グループ B :

RMSE 値が 2.5mm を超え 6mm までの範囲にあるグループで、SCC の深さ測定技術は一通り習得しているが SCC の先端を正しく識別する能力が十分では無い技術者である。板厚の中間にある SCC の先端を

確実に識別できずにいくつかの試験体で読み違えを犯している。このグループの RMSE 値は大きな幅を持っているが、これは読み違えを犯した数によるもので、読み違え方法の類似性から技量的にはほぼ同じレベルにあると見做すことができる。

このグループ B の受験者は自分の判断に確信が持てずに「山を張る」傾向がうかがえ、その結果として無理読みをして失敗する例が多い。この傾向は解答提出時の質問で確認している。また、グループ B には手順を踏まずに早く結論に到達しようとする傾向も見受けられた。このように直感に頼って測定を行った場合の弊害は、「最後まで考え抜く」ことを避けた結果として、自分の失敗の原因を正しく把握するのに手間取ることが挙げられる。表 2-4 は受験者が初回の試験に失敗した後、次の試験でどの程度改善が見られたかをグループ別に RMSE 値で示している。なお初回に-4.4mm 制限で不合格となった者は RMSE が 3.2mm を超えていないために表 2-4 のグループ B からは除いてある。また、第 1 期における再受験者の成績は表 2-2 に示したように改善が少ないため、第 2 期以降に再受験したグループ B の成績も併せて示した。この表に示されるように、グループ B の受験者が再受験した場合の成績は平均で RMSE=2.23mm でありグループ A となる $RMSE \leq 2.5mm$ に届かない者も多い。

グループ C :

このグループの受験者は、SCC の深さ測定技術の理解が不十分なままか、あるいは開発した手順の検証が不十分なまま PD 試験に臨んだ結果として、勘違いと思える非常に大きな 1 個の失敗、あるいは複数個の大きな失敗を犯している。このグループは失敗の原因を理解して修正するのが早い傾向があり、表 2-4 が示すように、次の受験ではほとんどの受験者が技量をグループ A に引き上げている。

受験者の技量レベルに関する特徴は以上のようなものであるが、同じ手順書を使用しても A,B,C のいずれのグループとなるかは個々人で異なり、技量のグループと 2.4 節で述べた探傷手法との関係は認められない。個人の技量では表 2-2 の RMSE 値の変化が示すように第 2 期以降に再受験者の測定精度が向上しており、初回の試験中に得た経験あるいは不合格になった後の研鑽が測定精度の向上に大きく寄与していると考えられることができる。しかし、新規受験者の成績向上には繋がっておらず、組織としての教育には問題がある。

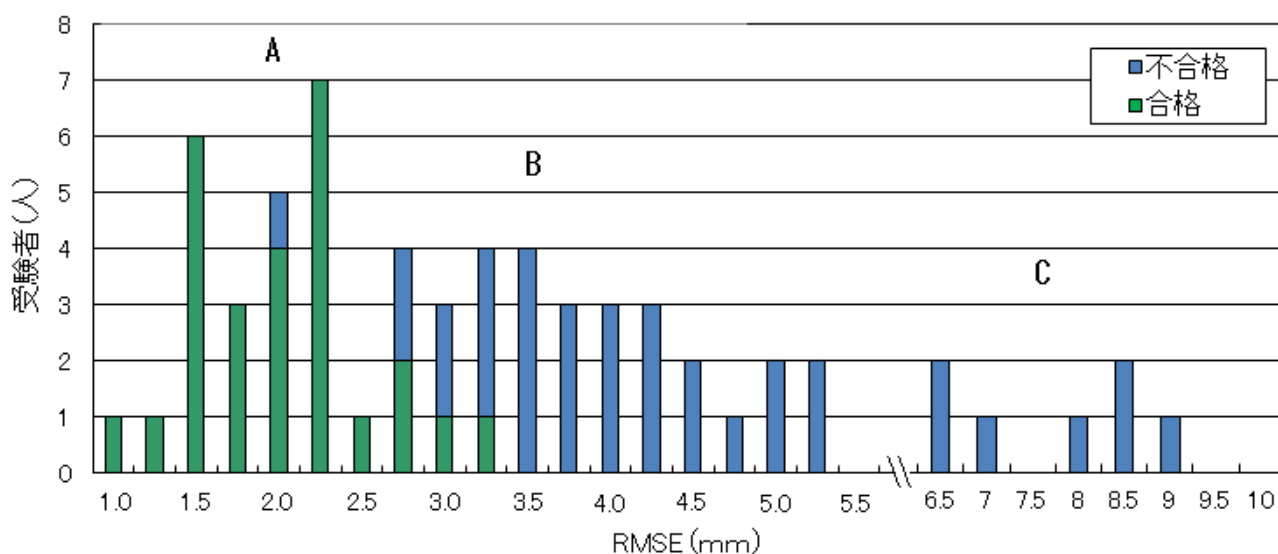


図 2-10 PD 試験受験者の技量レベルの分布

表 2-4 PD 試験受験者の技量改善

グループ	対象者(人)	初回 RMSE	再試験 RMSE
グループ B 全員 ^(注1)	14	4.08mm	2.93mm
グループ B 第二期以降	7	3.86mm	2.23mm
グループ C ^(注2)	5	7.51mm	1.98mm

(注1) -4.4mm 制限で不合格となった受験者を除く

(注2) 初回の試験で RMSE 値が 6mm を超えた中で再受験した者

PD 試験で不合格となった受験者は SCC の端部エコーの特定に問題があることを先に述べた。以下に受験者に多く見られる間違いを模式図で説明する。

図 2-11 は SCC の深さ測定時に出現する様々なエコーについて、その出現範囲を楕円の長軸で、エコー高さを色の濃淡で模式的に示している。受験者はこれらのエコーの中から SCC の端部エコーを見分けてその位置(深さ)を測定することが要求される。もし SUS 304 系ステンレス鋼に発生する SCC が対象の場合は、その先端が溶接熱影響部にあるため、横波による探傷で端部エコーを検出することが可能である。しかし、この例では SCC の先端は溶接部内にあるため、端部エコーの検出にはステンレス溶接部内でも超音波が透過できる縦波を使用する必要がある。図 2-11 の模式図も縦波を使った固定角探傷あるいはフェーズドアレイ探傷の例を示している。

SCC の深さ測定でも SCC 検出と同じく SCC の管内表面開口部から最も高いエコーが得られる。もし SCC 面に超音波ビームと向き合う方向の屈曲部があれば、その部分からもエコーを得ることができる。このエコーは高さとしては低い場合が多い。SCC が溶接金属部内に進展している場合は、SCC が溶接部に侵入した箇所で屈曲部と同程度かあるいはそれよりも大きなエコーが得られる場合が多い。また、溶接金属と母材の境界面では、エコー高さは低い溶接熱影響部に沿って連続したエコーが出現する。このエコーはその出現位置と連続性から SCC 面からのエコーと見間違い易い特徴を持っている。このような見間違いを犯した場合は、検査員の推定が入り易く、SCC の先端がありそうだと想定した位置で多少大きめのエコーがあればそれを端部エコーと判断してしまう場合が多い。

このように様々なエコーが出現する中での SCC 深さの過小評価は、SCC の屈曲部あるいは SCC が溶接部に進展した箇所を端部と見誤ることにより、過大評価は母材と溶接金属の境界面からのエコーを SCC 面のエコーと見誤ることにより起きている。このような間違いを避けるためには、実際に即した試験体と欠陥を使用し、正しい指導の下に画像読み取り技術を習得する必要がある。

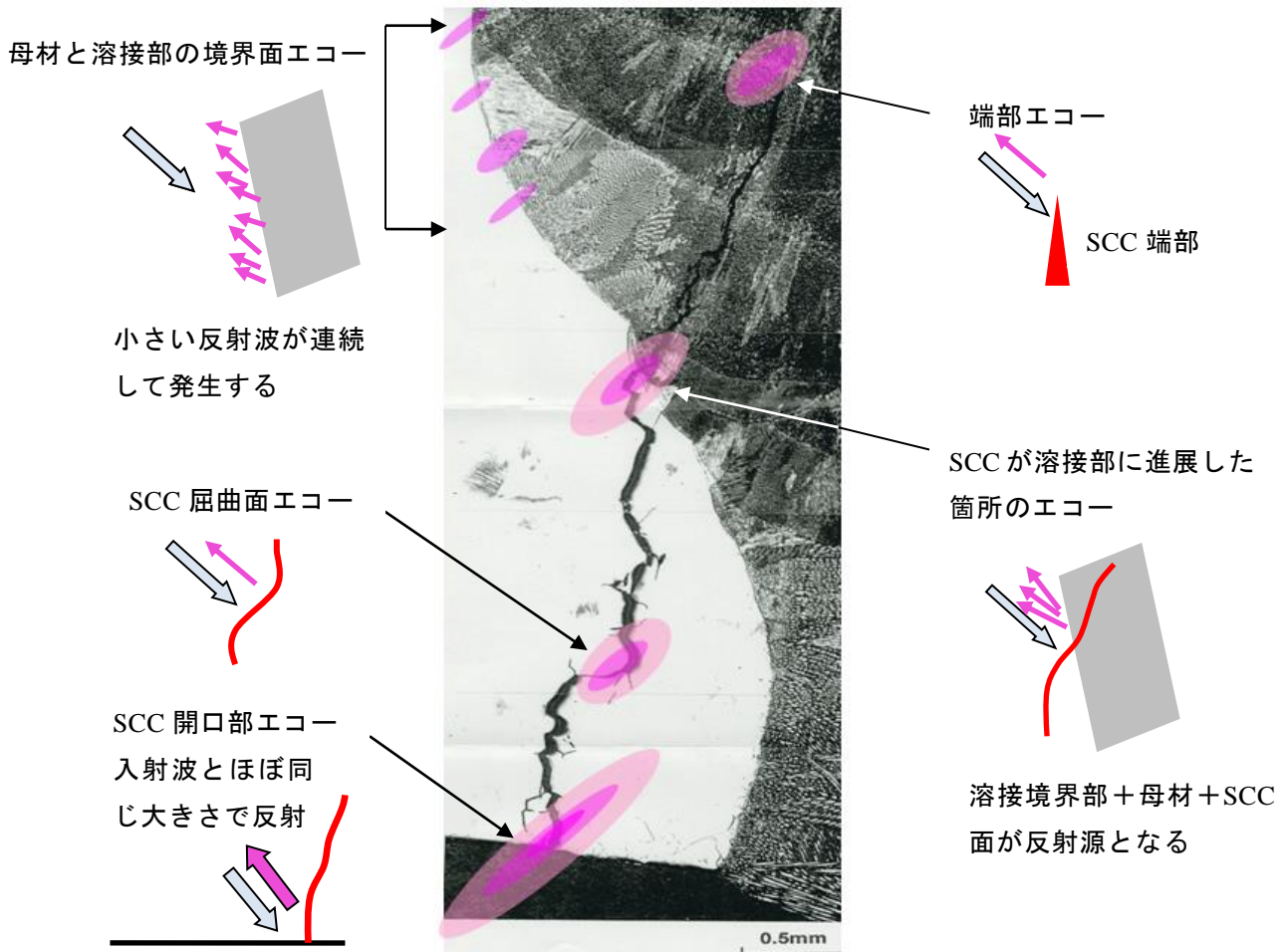
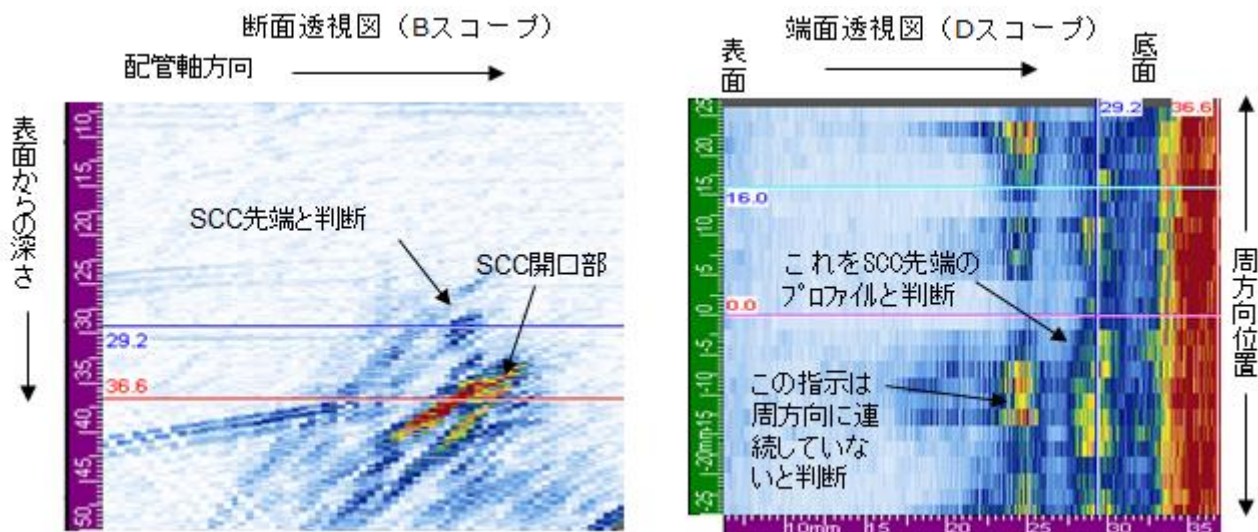
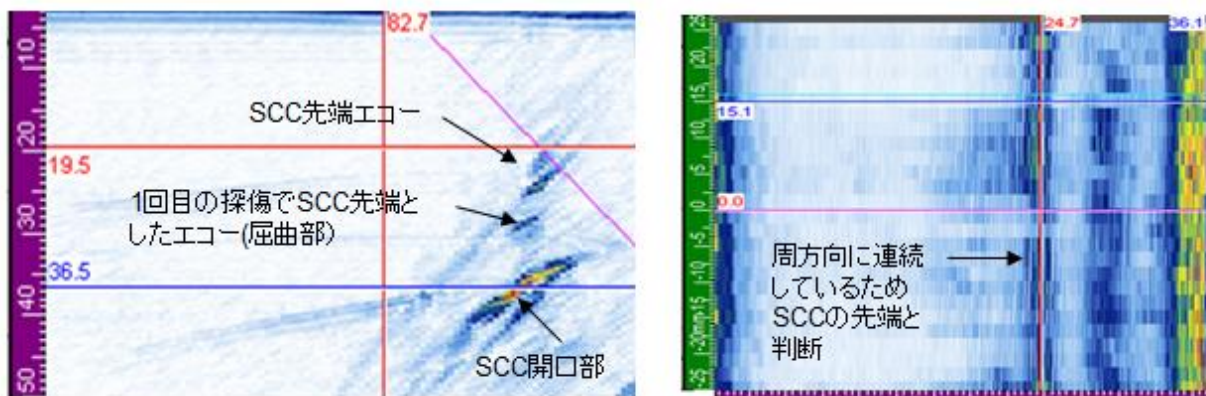


図 2-11 SCC の深さ測定時に見られる様々なエコーとその特徴

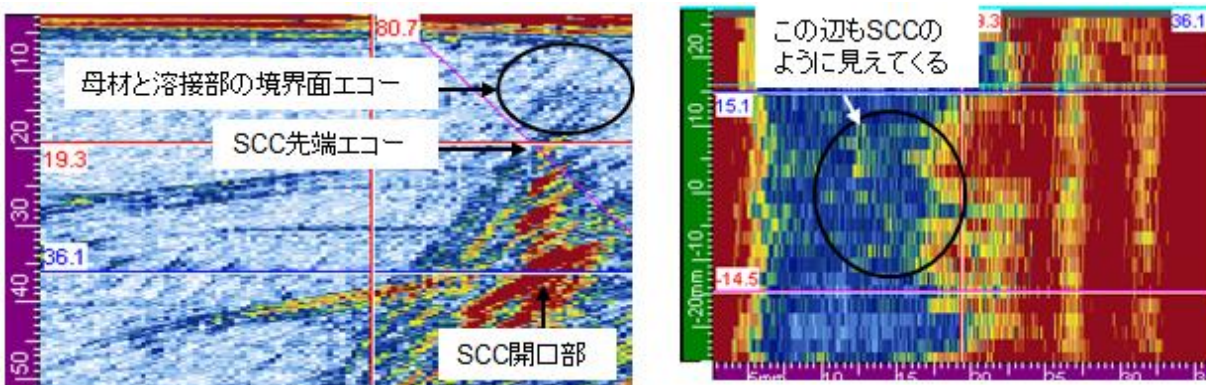
図 2-12 は端部エコーの見間違い例を示す。この例では X-Y 走査装置を使用して管軸方向を走査軸として探傷を行っている。探傷にはフェーズドアレイ装置を使用し、縦波のセクタースキャンを行っている。図 2-12 (a) は探触子の走査不良のため探傷面と探触子の接触にむらがある例を示す。接触媒質の供給が不適切、あるいは探触子の押し付けが不適切なケースに相当する。このような場合には、探触子から被検体への超音波の透過が安定せず、その結果として探傷画像に線状のむらが発生する。本例では D スコープにむらが見られ、その結果として端部エコーが周方向に連続しないため、SCC からのエコーであることの判断が難しくなっている。周方向位置 $Y=0$ の B スコープでは端部エコーは確認できず、SCC が溶接部に進展した箇所のエコーが周方向に連続しているために端部エコーのように見えている。(b) は丁寧な走査を行った結果を示す。探傷感度は (a) より低く設定しているが $Y=0$ の B スコープで端部エコーが確認できる。なお、(b) の探傷感度が (a) より低いことは B 及び C スコープのベースとなる色調が淡色であることから推定可能である。(c) は探傷感度を過大にした場合を示す。この場合は、母材と溶接部の境界面の小さな指示の連なりが D スコープ上で SCC の面からのエコーのように見え、その先端付近の多少高いエコーを SCC 端部のエコーと判断し易くなる。グループ A の技術者は、このように適切な感度設定を行い、様々な画像を観察することで、正しく SCC の端部を判別できる技量を有している。



(a) 探傷時の走査が適正でない例



(b) 適正な探傷例



(c) 感度を過大にして探傷した場合の例

図 2-12 SCC の深さ測定画像と測定間違いを起こしやすい事例

2.6 SCC 深さ測定結果の信頼性

構造物の供用中にき裂が確認された場合はその残存寿命を評価するためにき裂の形状を正確に把握する必要がある。また、このためにはき裂寸法を測定する超音波探傷試験の精度を知ることが重要となっている。ここでは PD 試験で得られたデータから試験合格者に期待できる SCC 深さの測定精度を算出した。

表 2-5 は全受験者、合格者、不合格者の測定誤差の平均値（平均誤差）及び標準偏差を示す。参考として ASME の合否基準 $RMSE < 3.2\text{mm}$ (0.125") および欧州の実証試験などで用いられる基準 $RMSE < 3.0\text{mm}$ を適用した場合の合格者についても算出した。

表 2-5 PD 試験で得られた受験者の統計値

グループ	データ数 n (個)	平均誤差 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)
全受験者	630	0.62	4.01
合格者	270	0.17	2.00
不合格者	360	0.95	5.00
RMSE < 3.2mm	340	-0.05	2.20
RMSE < 3.0mm	310	-0.03	2.08

SCC 深さ測定の信頼性を検討するにあたり、測定誤差の分布について確認した。超音波探傷試験によるき裂深さサイジングでの測定誤差は古川等によりおおむね正規分布であると報告されている⁸⁾。図 2-13 は PD 試験合格者の測定誤差が正規分布であるかについて正規確率紙を用いて確認した結果を示す。この結果、合格者の標準偏差の 2 倍に相当する $\pm 4\text{mm}$ の範囲でプロットがほぼ直線となりおおむね正規分布であることが確認できた。

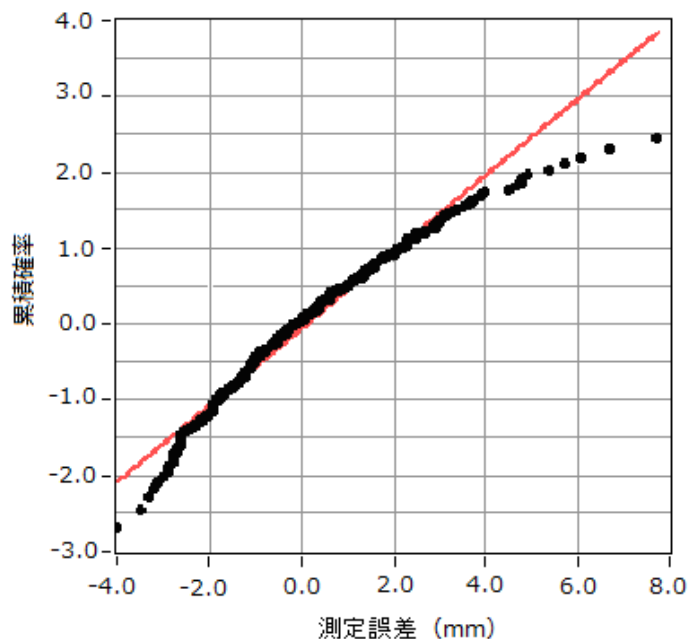


図 2-13 正規確率紙による測定誤差分布の確認

ここで平均値を(μ)、標準偏差を(σ)とする正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の確率密度 $f(x)$ は次式により求められる。この式により表 2-5 に示した各グループの測定誤差の確率密度を求めた結果を図 2-14 に示す。なお、表 2-5 の標準偏差は母分散の不偏推定値より求めているため、これを母標準偏差 (σ) として計算した。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

図 2-14 において我国と欧米基準による合格者の誤差の確率を比較した場合、わずかではあるが我国の合格基準が安全側に設定されていることが確認できた。

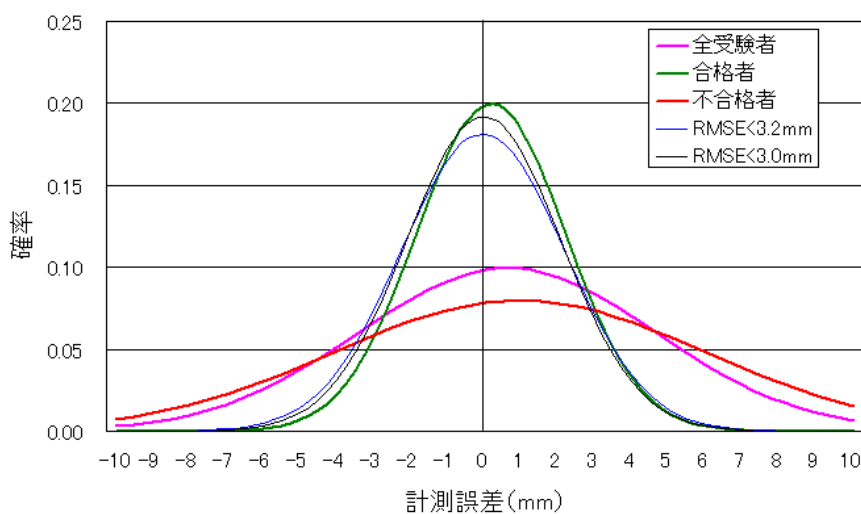


図 2-14 測定誤差の確率密度曲線

図 2-15 は全受験者の測定誤差の度数分布に全受験者および合格者の正規分布をあてはめたものである。度数分布のクラス分けは 1mm 単位とし、横軸の測定誤差“1”は 0 以上 1 未満の数を示している。

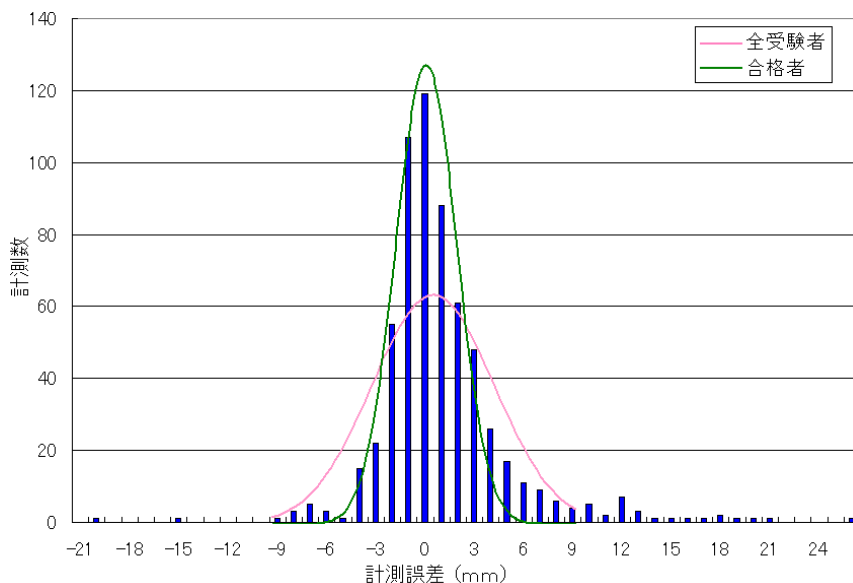


図 2-15 PD 試験における測定誤差の分布と確率密度曲線

図 2-15 に示す実際の測定誤差分布は測定誤差 0mm を挟んでおおむね左右対称となっているが、標準偏差より算出した正規分布と比較すると誤差の小さな範囲は合格者の分布に近く、誤差の大きな範囲は全受験者の分布よりも裾野が広がった形となっている。この正規分布との差異は、PD 試験の場合には測定誤差の要因が多数あり、特に不合格者の場合はこれまで述べた人的要因により大きな測定誤差が発生することに起因していると考えられる。更に言えば、不合格者であってもかなりの数の SCC は合格者と同じような精度で測定しているものの、一部で大きな測定ミスを行っていることを示している。

図 2-16 は合格者の測定誤差の度数分布を正規分布 $N(0.17, 2.00^2)$ に当てはめたものである。また、 $RMSE < 3.2mm$ の受験者の測定誤差の度数分布を正規分布 $N(-0.06, 2.15^2)$ に当てはめたものを図 2-17 に示す。

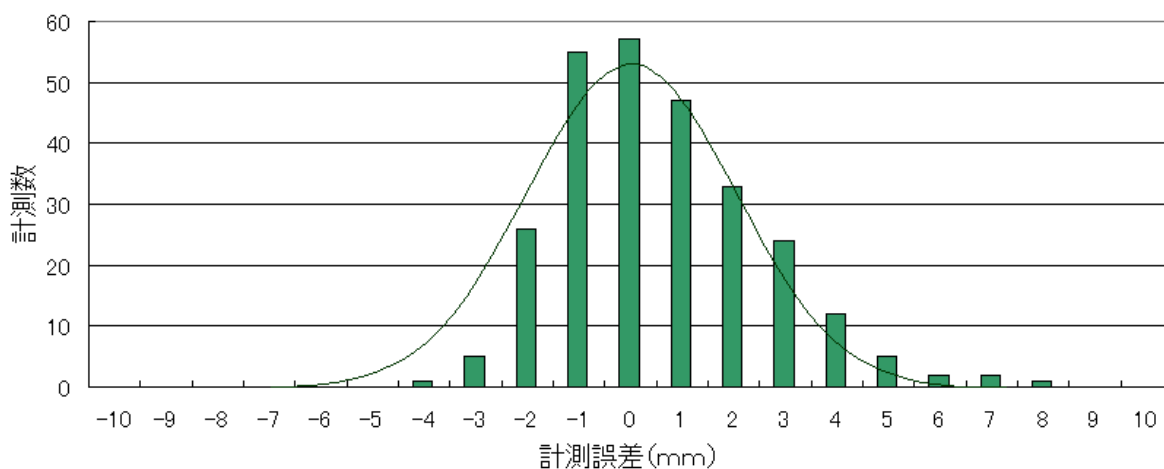


図 2-16 PD 試験合格者の測定誤差分布

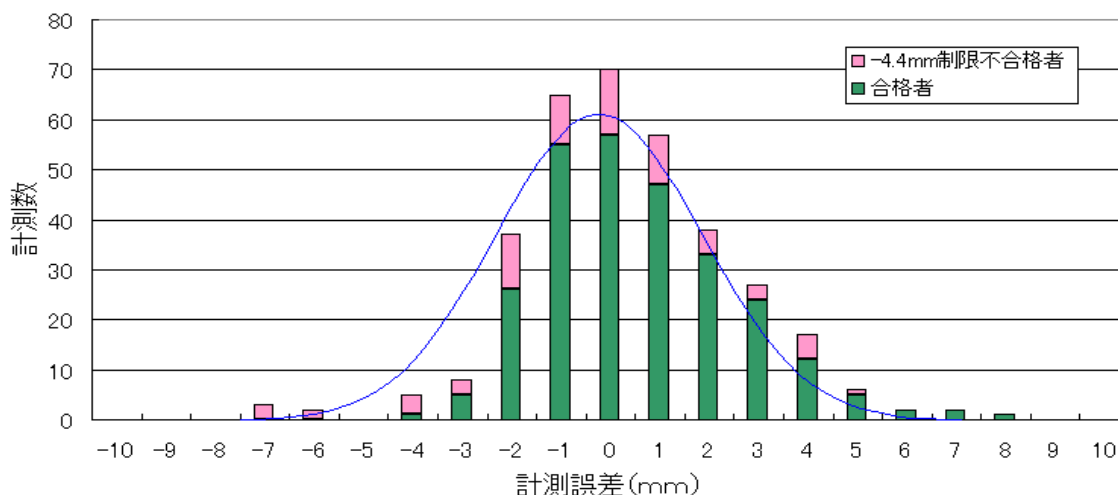


図 2-17 $RMSE < 3.2mm$ を満たす受験者の測定誤差分布

図 2-16 及び図 2-17 とも測定誤差の分布は平均誤差 0mm 付近を挟んでほぼ対称であるが、上側がなだらかな曲線であるのに対し下側は-3mm 以下が挟られた形となっている。この歪みは-4.4mm 制限による心理的な影響と推察できる。

PD 試験合格者が現場で SCC 深さ測定を行なう場合は、PD 試験と異なり-4.4mm 制限を考慮する必要が無い場合、実際の測定誤差の分布はより正規分布に近づくと予想できる。したがって、PD 試験合格者の測定値が-4.4mm 制限を超える確率 $P(x)$ は、合格者の正規分布 $N(0.17, 2.00^2)$ と下式に示す下側累積確率 $P(x)$ で計算でき、 $P(x)=0.011$ (1.1%) を求めることができる。

$$P(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (6)$$

また、ASME Code Section XI, Appendix VIII と同じく RMSE が 3.2mm (0.125 インチ) 未満を合格とする場合に測定誤差が-4.4mm 制限を超える確率は、正規分布 $N(-0.05, 2.20^2)$ より 2.4% と推定できる。

これまで行った PD 試験の結果、RMSE が 3.2mm 未満のグループで測定値が-4.4mm 制限を超えたデータは7個あり、グループの測定数 340 個の約 2.1% となっている。この確率は正規分布より算出した確率 2.4% とほぼ一致している。

RMSE が 3.2mm 未満だが測定値が-4.4mm 制限を超えた技術者は、注意不足が不合格を招いた可能性が大きいことは先に述べた。この注意不足が合格者全てに起こり得ると仮定すると、PD 試験合格者の信頼度を推定するには-4.4mm 制限を超えたために不合格となった者を加えた RMSE<3.2mm グループの標準偏差 $\sigma=2.2\text{mm}$ で評価するのが安全側である。

2.7 まとめ

本章では PD 試験で得られたデータの解析を行い、超音波探傷画像を使用する利点と課題を検討した。その結果、探傷画像の利用は超音波探傷の信頼性向上と精度向上に有利であるとの結論が得られた。しかしながら、画像解析に関する知識の共有の面では問題を抱えていることが明らかとなった。本章で得られた知見及び成果を以下に示す。

(1) SCC 深さの測定精度

PD 試験合格者の測定誤差の平均値は 0.17mm で、高い精度で測定を行っている。また、測定誤差は標準偏差 2.0mm の正規分布にほぼ一致している。

(2) SCC 深さ測定値の信頼性

PD 試験合格者の測定誤差の分布は-4.4mm 制限の影響と思われる歪が見られる。このため合格者の現実的な誤差確率密度は RMSE<3.2mm グループの標準偏差 2.2mm の正規分布に従うと考えられる。この場合に SCC 深さ測定値が-4.4mm 制限を超える確率は 2.4% となる。

(3) SCC 深さ測定技術

SCC の深さ測定では手動 UT 法よりフェーズドアレイ法を使用した方が高精度で測定できることを PD 試験合格者の RMSE 値から示した。しかしフェーズドアレイ法のみを使用する場合の合格率が低く、結果に個人差が大きいことから、解析技術の共有がなされていないことが明らかとなった。

(4) PD 受験者の技量

PD 試験合格者は SCC の深さに関わらず正しい深さ測定が可能であるのに対し、不合格者は肉厚の 20% から 60% 深さの SCC の測定誤差が大きい。また、不合格者は浅い SCC を実際の深さに係らず板厚中央の深さに読む傾向があることが明らかになった。

(5) 測定誤差の要因

PD 試験受験者の観察から、PD 受験者が陥りやすい測定誤りの原因について考察し、それを具体的な事例を用いて明らかにした。

(6) 技術者の教育

PD 試験では同じ超音波探傷装置と手順書を使用した受験者間でも結果にばらつきが大きいことが明らかになった。また、新規受験者と再受験者間でも技量に差が見られることから、同じ組織内でも知識の共有が十分にはなされていないことが明らかになった。

参考文献

- 1) 笹原利彦：SCC 高さサイジングの PD 資格試験実施方法，日本非破壊検査協会 超音波分科会 第 13 回 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp.91-96，(2006)
- 2) 笹原利彦：PD 資格試験の実施経過とその方向，日本保全学会第 3 回学術講演会要旨集，pp.259-262，(2006)
- 3) 笹原利彦，直本保，秀耕一郎，神戸弘巳：PD 資格試験の実施状況 ～試験開始から 1 年を振り返って，平成 19 年度火力原子力発電大会論文集，pp. 79-83，(2007)
- 4) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会，原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会（第 8 回）資料 8-2，：超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験について，原子力安全・保安院，(2003)
- 5) 原子炉再循環系配管等の検査への改良超音波探傷試験の適用について，原子力安全・保安院，(2004)
- 6) 笹原利彦，直本保：PD 試験とその実績について，日本非破壊検査協会平成 19 年度春季大会講演概要集，pp. 31-34，(2007)
- 7) (一財) 発電技術設備検査協会：超音波探傷試験における欠陥検出及びサイジング精度の確認に関するもの，平成 15 年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する事業報告書，(2003)
- 8) 古川敬，古村一郎，米山弘志，山口篤憲：超音波探傷試験によるき裂深さサイジングにおける教育訓練目標の指標について，保全学 Vol. 4, No. 3, pp. 50-55, (2007)

第3章 SCC 超音波特性の画像化

3.1 はじめに

超音波探傷試験による SCC の深さ測定精度の向上には超音波探傷画像の活用が有効であることを第2章で示した。これを超音波探傷試験の信頼性向上に結び付けるには一部技術者のノウハウとなっている画像解析技術を公知化し、産業界としてその知識を共有する必要がある。また、これまで個人ベースで培われた画像解析に関するノウハウは、「5MHz 縦波探触子を使用して探傷する場合」など、手順書が設定した探傷条件内に限定されたノウハウであり、「なぜその探触子を選定するか」や「なぜそのように解析するか」などのノウホワイ (Know-why) が十分には理解されずに使用されている様子もうかがえる。同様に、これまで公表された様々な画像化技術の報告は成果の提示に重点が置かれ、欠陥の形態や使用する周波数や周波数帯域特性が超音波探傷画像に及ぼす影響に関する十分な説明が行われていない。工業用の超音波探傷試験技術において画像の解析手順に関する知識の共有化がこれまで進まなかった理由の一つは、これらのノウホワイの説明が十分にはなされていなかった結果とも考えられる。

本章では以上の状況に鑑み、ステンレス鋼配管溶接部 SCC の超音波探傷試験を対象として、これまで手動探傷で培った SCC の検出及び深さ測定ノウハウを整理すると共に、これらのノウハウが超音波探傷画像上ではどのように表現されるかをその理由 (ノウホワイ) も含めて示す。更に、画像の描写力を向上させるための方策についても検討する。

3.2 手動探傷による SCC の検出及び深さ測定手法

3.2.1 SCC の検出手法

ステンレス鋼配管溶接部の手動超音波探傷試験では検査員が超音波探触子を手で走査しながら A スコープを観察している。この手動探傷で得られた探触子位置とビーム路程 (W_i) 及び探触子の屈折角 (θ) より計算した指示の位置が図 3-1 に示す配管継手断面形状図の赤枠で囲った範囲にある場合は SCC である可能性が高いとの判断がなされている。以下に SCC と判定するための基本的な条件を示す。

なお、ここではエコーの反射源の性状 (欠陥、裏波など) が同定される前の超音波エコー源を「指示」と表記している。

- ① 指示の位置が溶接熱影響部近傍の管内表面付近にある。
- ② 指示の位置が裏波エコーの手前にある。
- ③ 指示のエコー高さが記録レベルである 20%DAC 以上である。
- ④ 指示が全周連続では無く断続しており、部分的にエコーの高い箇所がある。

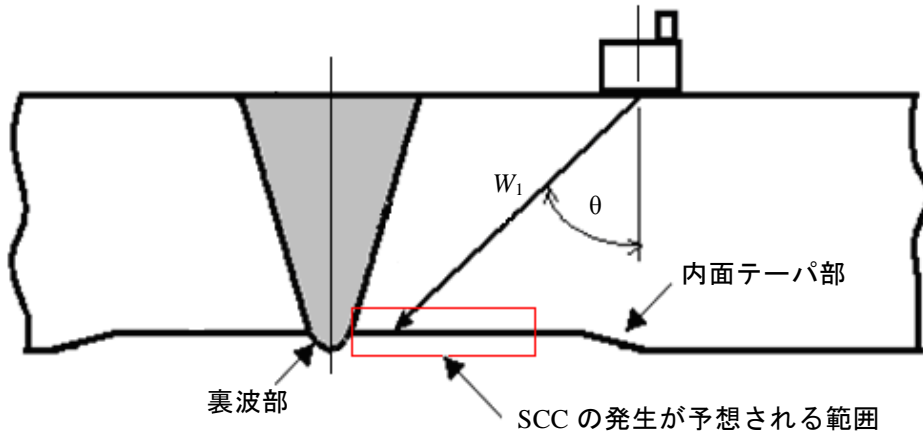
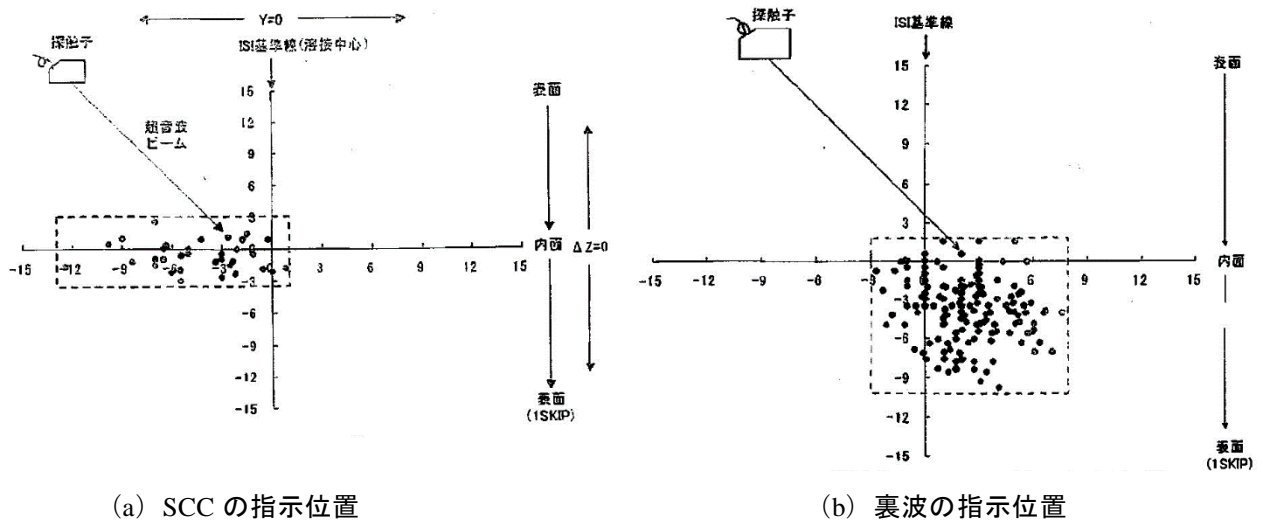


図 3-1 SCC の発生位置と探傷結果解析図

図 3-2 は、小林らが国内 BWR プラントの PLR 系ステンレス鋼配管溶接部の ISI 記録から拾い出した SCC エコー位置と裏波エコー位置のプロットを示す¹⁾。この図は先に述べた SCC と判断するための条件①及び②が妥当であることを示している。



(a) SCC の指示位置

(b) 裏波の指示位置

図 3-2 ISI 実績より求めた SCC エコーと裏波エコーの配管軸断面上の位置¹⁾

SCC 判別の基本は以上のとおりであるが、SCC 探傷の熟練者は判別の精度を高めるために上記の条件に加えて A スコープ上の波形や探触子の走査に伴うエコーの動特性を加味して SCC の判別を行っている²⁾。この波形やエコーの動特性は SCC 及び形状エコーの形態的な特徴に由来するもので、次に示すような特徴を示す。

(1) SCC の管内表面開口部エコー (SCC 開口部エコー)

図 3-3 は SCC 開口部エコーの波形における特徴を示す。SCC 開口部エコーは、配管内表面と SCC が構成する約 90° のコーナ部からの全反射エコーであるため、入射波と同じように立ち上がり時間が短く (鋭く)、エコーが高い場合が多い。エコー高さに関しては小林らの報告でも横穴で校正した基準波高値の 50% ~ 400% の範囲にあることが報告されている¹⁾。

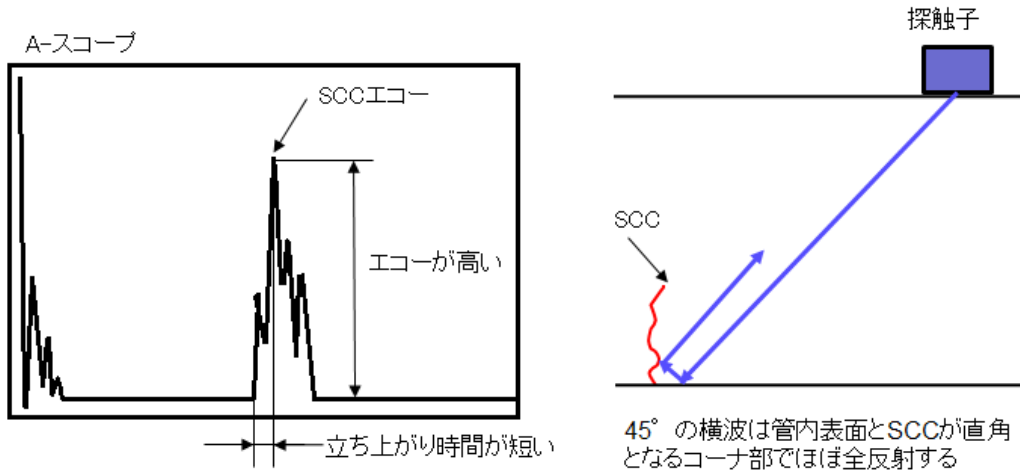


図 3-3 SCC の典型的な A スコープ画像

図 3-4 及び図 3-5 は、超音波ビームを SCC に向けたまま探触子を前後走査して A スコープに示された波の動特性より SCC を判別する手法を示す。探触子を SCC に向けて走査した場合は超音波ビームの中心が SCC と管内表面が構成するコーナーより徐々にずれるために、SCC 開口部エコーは緩やかにその高さが変化すると共にそれに連動してビーム路程が変化する。この結果、エコーは高さを変えながら時間軸上を移動（トラベル）するのが観察できる。超音波ビームを SCC に向けたまま探触子を SCC の長さに沿って平行走査した場合は、SCC の屈曲及び分離により、エコー高さは小刻みに変化しながら時折そのピーク位置の移動あるいはピーク位置が入れ替わる動きを示す。このように SCC はそのエコー高さ及び反射源の位置情報だけでなく、探触子の走査に伴うエコーの動特性を観察することにより判別をより確実にすることが可能である。

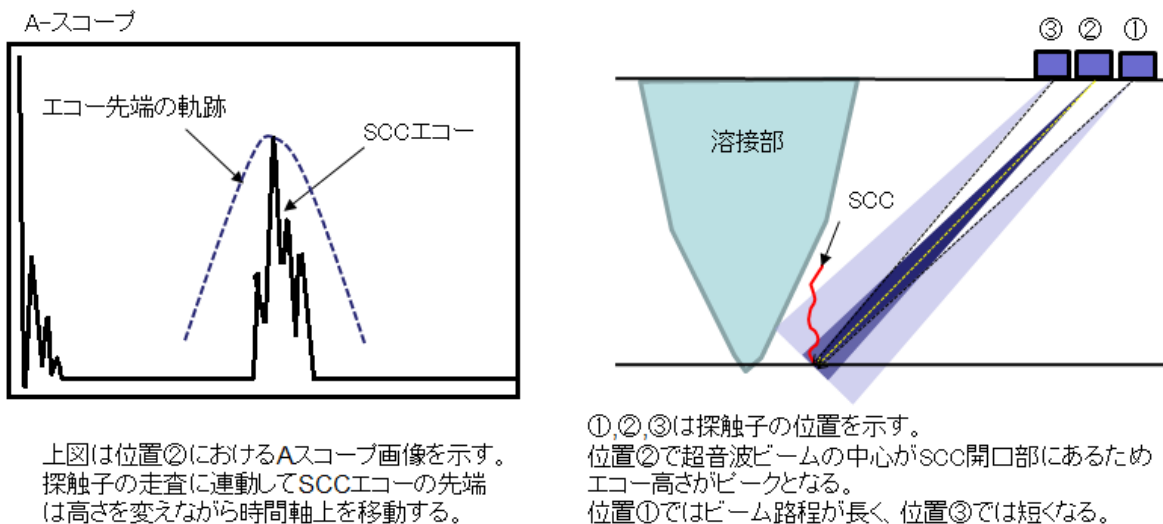


図 3-4 軸方向探傷時の SCC エコーの動特性

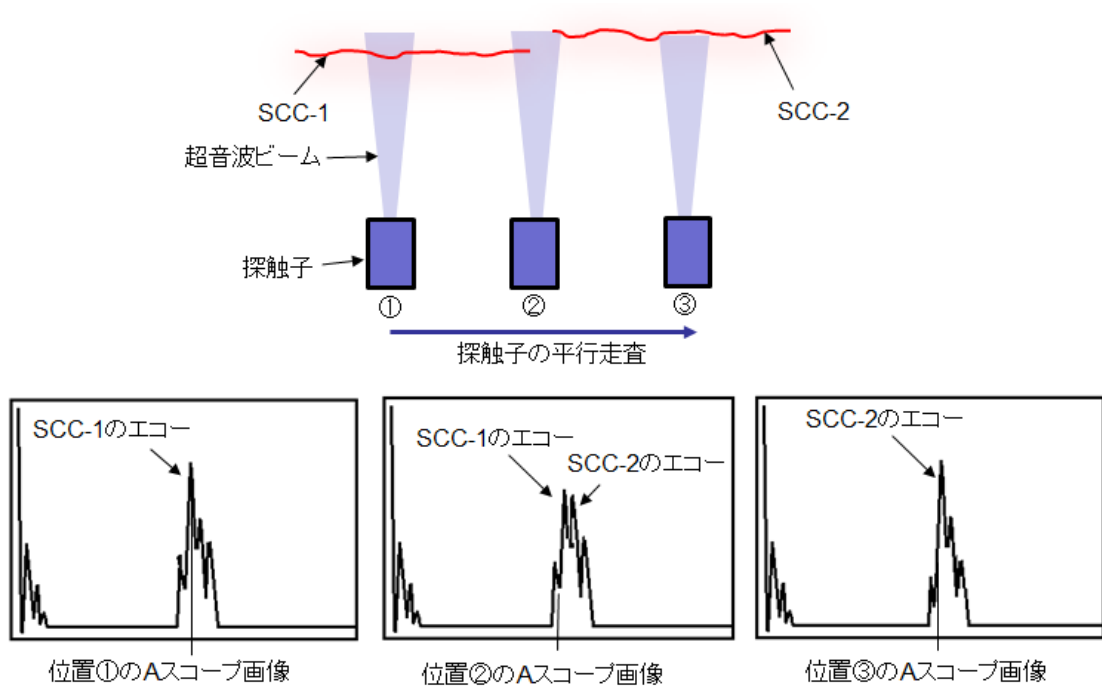


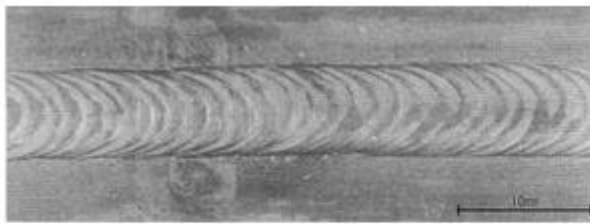
図 3-5 SCC に平行走査時の SCC エコーの動特性

(2) 裏波エコー

配管の完全突合せ溶接部は、必要な肉厚を確保すると共に疲労き裂の起因となる切欠き部を形成させないために、裏波ビード（以下、裏波）と呼ばれる凸部を溶接時に形成する。裏波を管内表面から見た写真を図 3-6 に示す。図 3-6 (a) はビード形状の揃った、嵩の高い裏波である。このような裏波はその形状から高いエコーを発生することが多い。ただし、形状が周方向に均一であるため、指示の位置と周方向の連続性から、裏波エコーと判別するのは比較的容易である。図 3-6 (b) はビードが乱れた低い裏波である。このような形状では裏波エコーはほとんど得られない。しかし、局所的にエコーが出現する場合があります。裏波エコーとの位置関係に基づく SCC の判別が難しくなる。このような場合に SCC で無いことを証明するには、指示の位置を良く見極めるとともに、クリーピング波法などの SCC 深さ測定手法を使用して、当該指示が深さを持たないことを証明する必要がある。図 3-6 (c) は嵩が高くかつ乱れた裏波である。このような裏波では高い断続的な指示が管周方向に連続して出現する。エコーが高いために SCC と疑われ易く、裏波であることの証明には図 3-6 (b) と同じく指示位置とクリーピング波等による確認が必要となる。製造時の放射線透過試験記録と照合し、嵩が高い乱れた裏波が存在することを証明する場合もある。

超音波探傷の熟練者は裏波エコーでも波形と動特性を観察して判別を行っている。図 3-7 は裏波エコーの波形及び動特性を示す。探触子から裏波部に入射する超音波ビームの幅は、探触子の寸法、周波数、及び探触子からの距離により異なるものの、裏波の凹凸の間隔より広いため、裏波エコーはこれらの凹凸からの反射波が集合した波となり、その形は SCC エコーに比較してエコー高さは低いが多峰かつ幅広となる。したがって、溶接線に沿って探触子を走査した場合や首振り走査を行った場合には、個々のピークがそれぞれに上下するものの、図 3-5 に示したような路

程がずれながらピークが交代するような動きはしない。また管軸方向に走査した場合には個々のピークがそれぞれ異なる軌跡を描くことにより裏波エコーと識別することができる。



(a) 幅広で高い裏波



(b) 低い乱れた裏波



(c) 高い乱れた裏波

図 3-6 様々な裏波の形状例

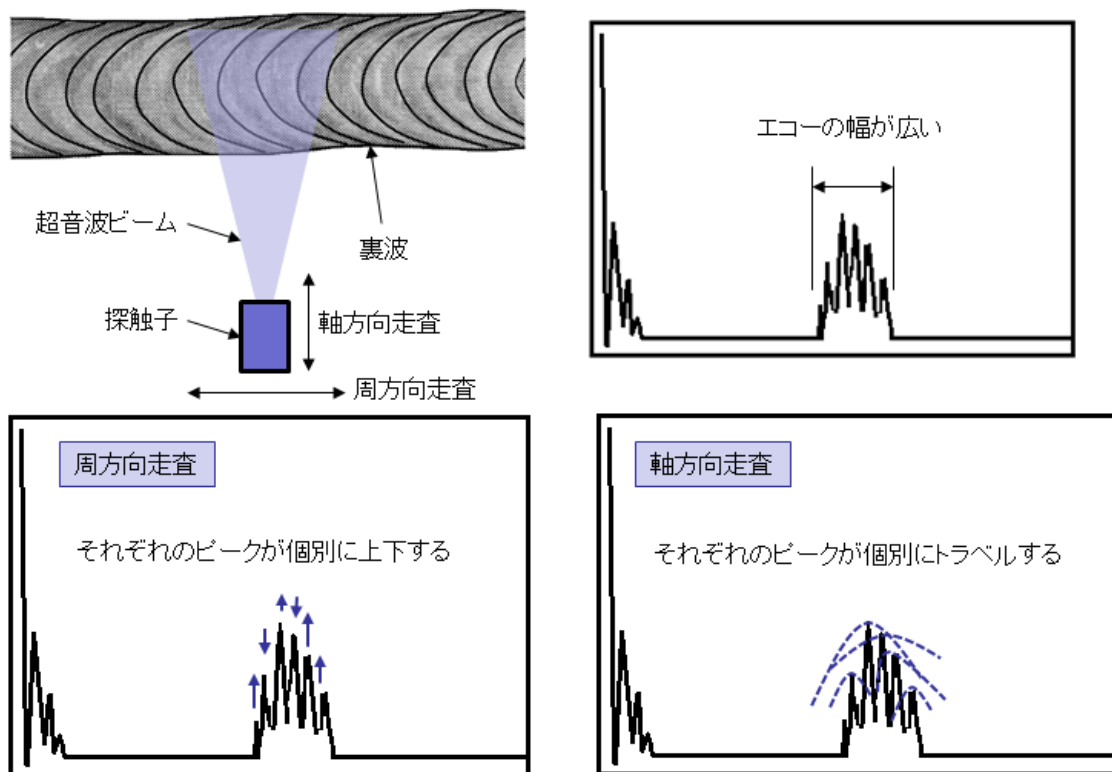


図 3-7 裏波の形状と周、軸方向走査時の波の動き

(3) テーパ加工部エコー

外径及び肉厚に公差を持つ管材を目違い無く突合溶接する目的で、管内面は切削され、テーパ加工部（以下、テーパ部）が形成される。この内面加工部の長さは、初期の原子力発電所では管端より 12.5mm と SCC 発生位置の近くに設定されていた。しかし、ISI で溶接部の超音波探傷試験が開始されて以降は、紛らわしさを除くために溶接部から 50mm 以上離すようになっている。但し、バルブやエルボなど曲面形状のためにテーパ部を離せない構造の継手や海外の古いプラントではテーパ部が近い溶接部も残存しており、米国の PD 試験ではテーパ部が溶接線に近い位置にある試験体の探傷も試験の一部として要求している。図 3-8 は内面加工部の写真と過去に経験したテーパ部エコーが超音波探傷試験で問題になった例を示す。テーパ部が問題になるのは、図のような例では SCC と同じような鋭いエコーが得られるためである。テーパ部は、図 3-9 に示すように周方向の走査でエコーの動特性を観察することにより SCC と区別することが可能である。

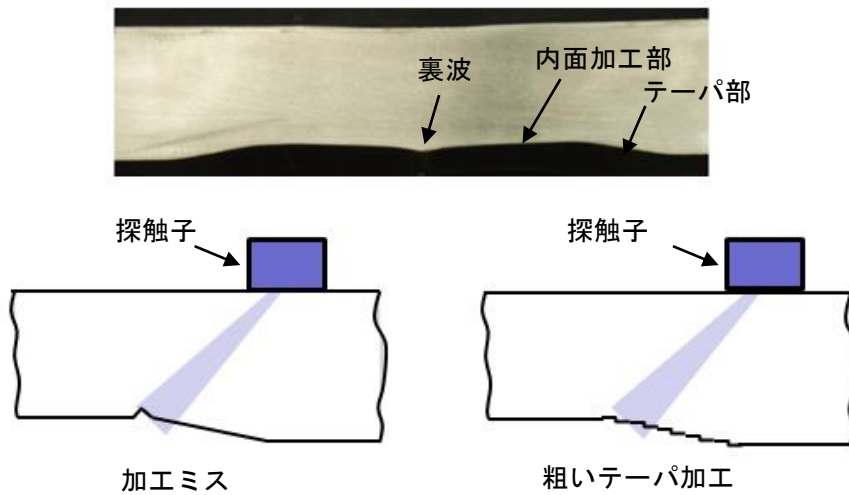


図 3-8 内面加工部形状及び過去に問題になったテーパ加工部の例

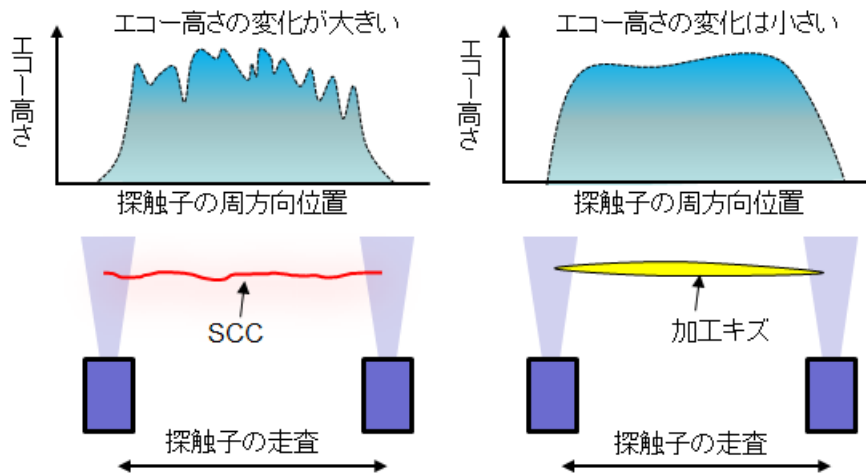


図 3-9 探触子の周方向走査による SCC とテーパエコーの見分け方

(4) 溶接金属に由来するエコー

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部は、[図 3-10](#) に示すように柱状晶組織であるため、超音波の減衰及び進行方向に変化が生ずることが知られている^{3) -5)}。特に横波は溶接金属内での散乱及び減衰が大きく、超音波探傷試験では図に示す ①溶接部エコー、②溶接金属と母材の境界面エコー、③柱状晶伝搬エコーが観察される場合が多い⁶⁾。特に③の柱状晶伝搬エコーのうち母材部より超音波を入射したときに発生するエコーは、指示の位置が SCC に近いために識別が難しくなっている。

これらのエコーは主に溶接金属組織からの反射であるため、その特徴として発生がランダムであると共にエコー高さは低く、波形は多峰である。探触子を管軸方向に走査しても時間軸上の位置は動かず（トラベルしない）、エコー高さのみが上下する特徴を示す。

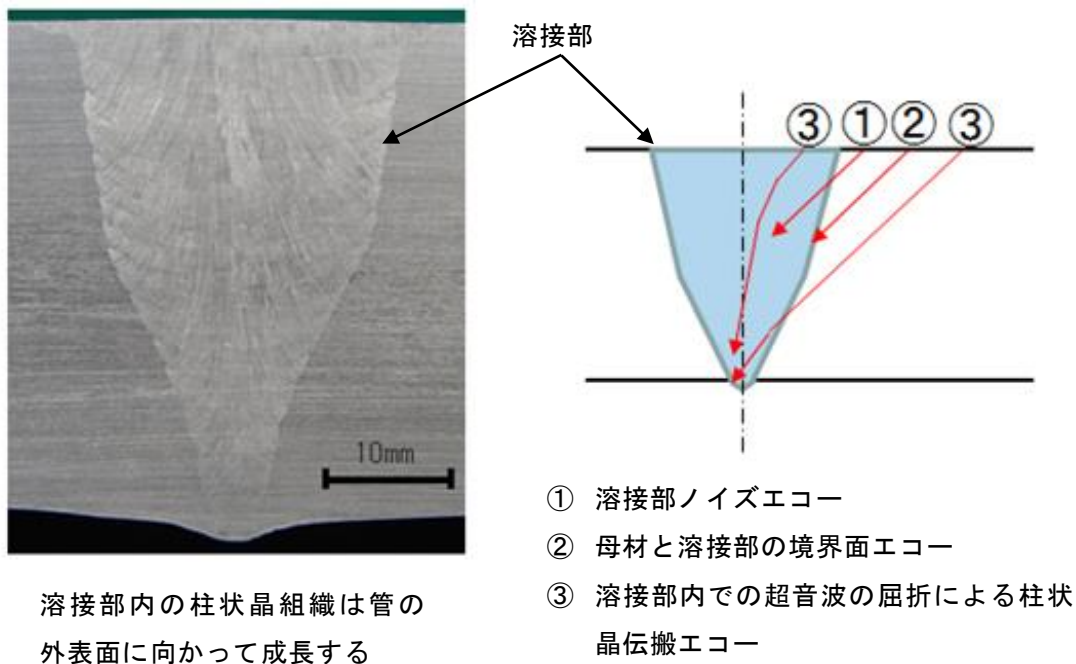


図 3-10 ステンレス鋼溶接部の柱状晶組織と金属組織に起因するエコー

[図 3-11](#) はこれまで述べた各種エコーを識別するための A スコープ上での観察ポイントを示す。図中の破線は探触子を溶接線に向かって走査した場合のエコー先端の軌跡を示す。①のエコー高さは、SCC の開口部エコーでは大きく、ノイズや端部エコーは表示画面の 5%~10% 程度となっている。裏波エコーはその中間にある。②のビーム路程は、管内表面の位置を基準として観察する。SCC は管内表面位置に、裏波はそれより少し深い位置にある。③の立ち上がり時間では、SCC の場合は短く、裏波は長くなっている。④の動特性では、SCC 開口部エコーは波全体が一体となってトラベルするのに対して、裏波エコーはそれぞれのピークが独立してトラベルすると共にピークが見定めがたいため、トラベルを観察するのは難しい。また、ノイズの場合はトラベルせずに波高が上下する特徴を示す。⑤のピーク数は、SCC 開口部エコーと裏波エコーの識別に使用する。

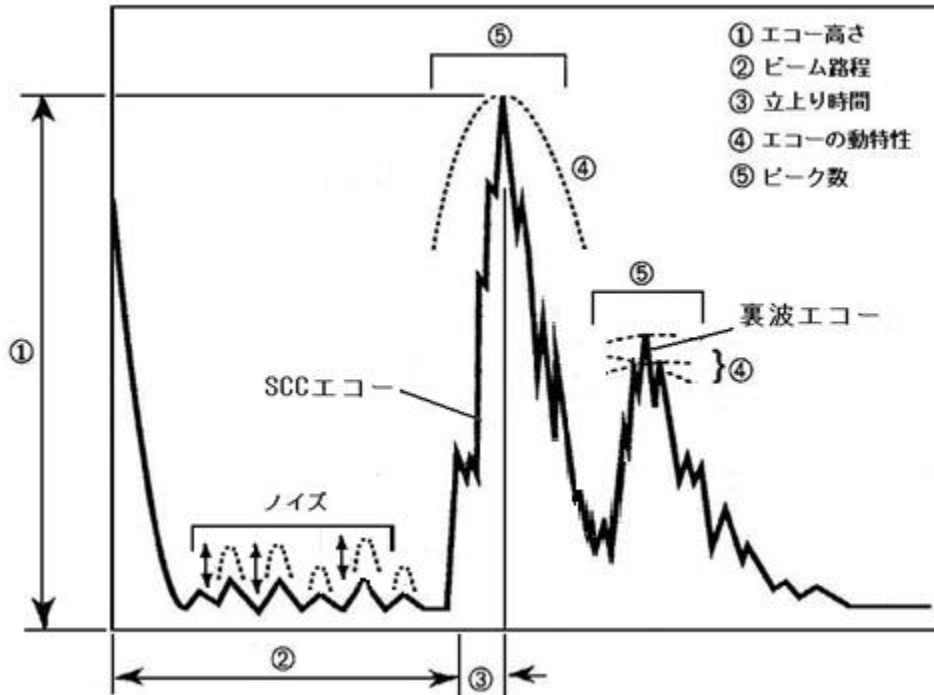


図 3-11 様々なエコーの波形と動的な挙動（軸方向探傷）

また、SCC と裏波あるいは内面テーパ加工部の識別では、図 3-12 のように通常の 45° 斜角探傷に加え 60° あるいは 70° 斜角探傷を追加し、複数の探傷角度で高いエコーが得られた場合は SCC と判断する手法も以前には使われている⁷⁾。最近では、SCC の深さが数 mm 以上になると検出感度が高くなる二次クリーピング波がより簡便で確実な判別方法として使用されている。

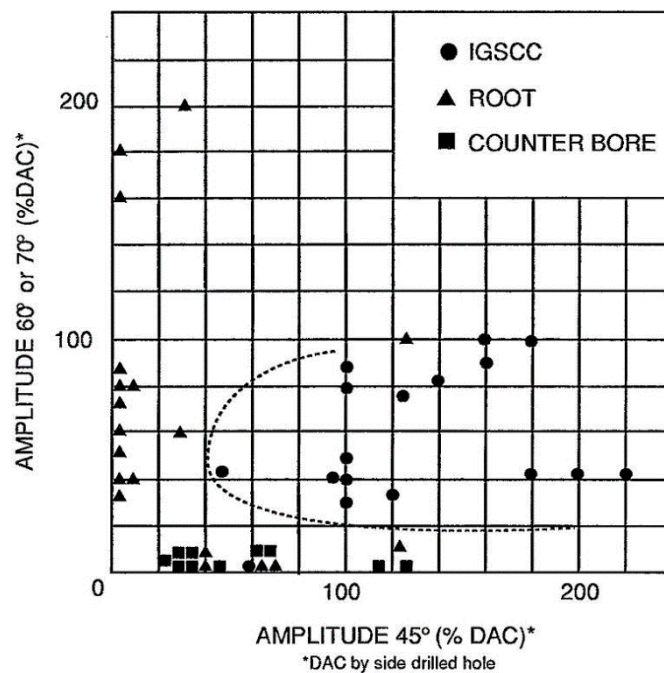


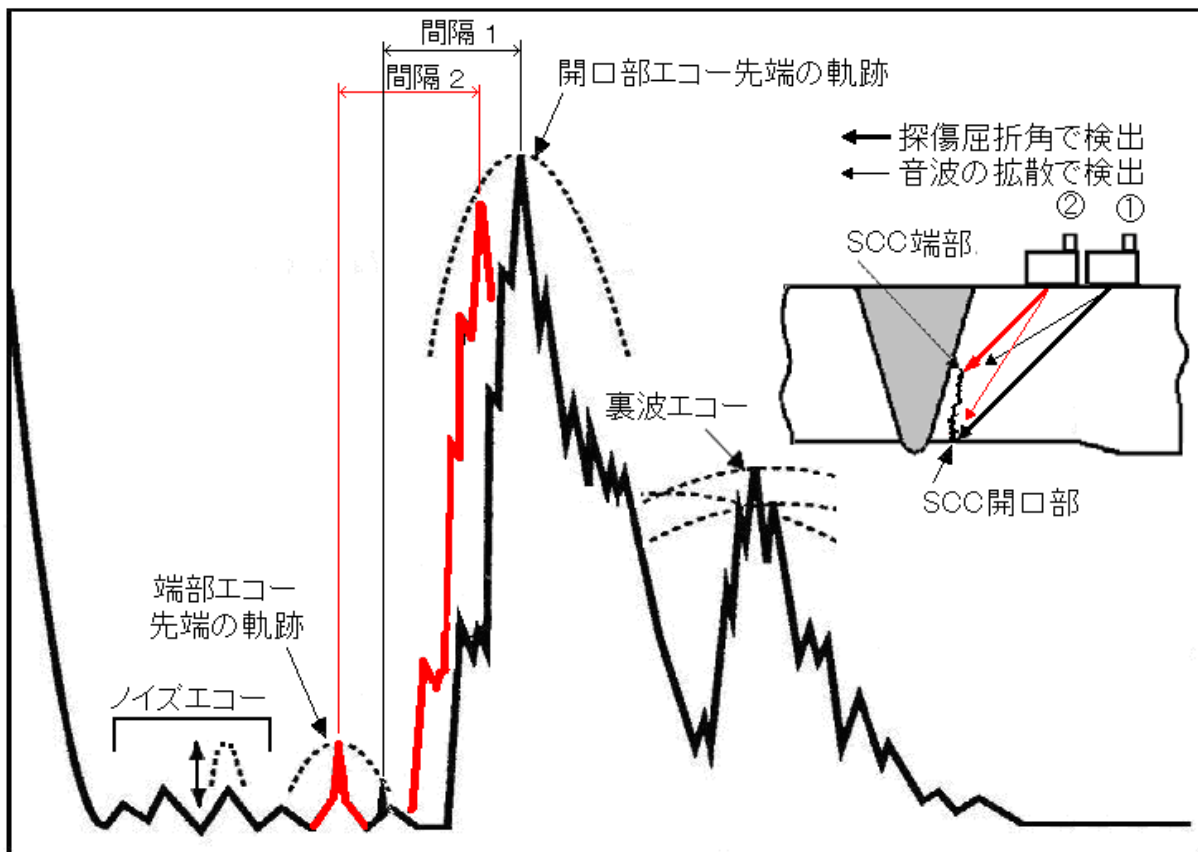
図 3-12 二つの屈折角を使った SCC とその他のエコーの判別

3.2.2 SCCの深さ測定手法

超音波はその進行方向に垂直となる面や SCC のように欠陥と管内表面がコーナを構成する箇所で大きなエコーを発生する他に、欠陥の先端部で回折波を発生するために、SCC の先端部から小さな反射エコー（端部エコー）を得ることができる。屈折角が 45° の横波を使用した場合の SCC 端部エコーの大きさは、SCC 開口部エコーの約 $1/10$ (-20dB) 程度となる。

図 3-13 に SCC 端部エコーの動特性を示す。端部エコーの特徴として、その波形は開口部エコーと同様に立ち上がり鋭く、探触子走査に伴う先端の軌跡は単峰型となる。また、SCC 開口部と端部の位置関係は不変であるため、二つのエコーは連動してトラベルする。すなわち図 3-13 の間隔 1 と間隔 2 は変化せずエコー高さのみが変化する。一方、母材と溶接部の境界面付近で発生するノイズエコーは、探触子の走査に対してエコー高さが上下するのみでほとんどトラベルしないのが特徴となっている。この端部エコーとノイズエコーの動特性の違いがこれらのエコーを識別する鍵となっている。

なお、図 3-13 では説明のために裏波エコーを示しているが、図に示すような深い SCC が存在する場合は、裏波が SCC の陰に入り検出できない。もし SCC 開口部エコーの後ろに裏波エコーが見える場合は SCC が浅いことを示しており、これも SCC の深さを推定する手がかりとなる。



間隔 1: 探触子位置①における開口部エコーと端部エコーの路程差
 間隔 2: 探触子位置②における開口部エコーと端部エコーの路程差

図 3-13 SCC の端部エコーの動特性

3.3 超音波特性と画像

3.3.1 画像化の課題

3.2 節では著者がこれまで経験した手動超音波探傷試験を通して培った SCC 検出及び深さ測定ノウハウを説明した。画像化技術を発展させるためには、これらのノウハウがどのように画像上で表現されるかを理解すると共に、画像化による利点を示す必要がある。さらに良質な探傷画像を得るための条件も明確にする必要がある。このために実施すべき課題を以下に示す。

(1) 探傷周波数と画質の関係

超音波探傷試験で小さな欠陥を高精度で検出するためには、分解能の観点からできるだけ高い周波数で波数の少ない超音波を使用するのが望ましい。しかし、実際に使用する探傷周波数は材料中の超音波減衰とのトレードオフで決定される。例えば、手動超音波探傷試験ではステンレス鋼溶接部の検査に対しては 1.5MHz から 5MHz の範囲の探傷周波数が使用されている例が多い。また、小さな SCC が裏波に近接して存在する場合には、パルスの持続時間が長い超音波では SCC と裏波のエコーが重なり判別が困難となる。この近接した反射源を分離するために波数の少ない広帯域型探触子が 1980 年代より使用されるようになり、近年は、高価ではあるが、コンポジット型広帯域探触子が用いられるようになっている。超音波探傷画像の活用を考えた場合、手動探傷と同じ選択が適正であるかの検証が必要であり、このために、探傷周波数及び周波数帯域特性が画質にどのような影響を与えるかを明らかにする。

(2) SCC 及び周辺形状の画像化

ステンレス鋼配管溶接部の手動超音波探傷試験では、裏波エコーを基準としてその手前にある指示に注目して記録を採取し、そのデータを配管断面図上にプロットして SCC を識別している。必要と思われる場合には、垂直探傷を追加して裏波位置や配管肉厚の情報を採取している。また、これまでは超音波自動探傷装置により採取した超音波探傷画像を解析する場合でも、1.5 節の図 1-24 に示したように、説明のために溶接部形状を得られた画像記録に追記する必要があった。もし、指示の画像に加えて配管の内面及び溶接金属と母材の境界の情報まで画像化できれば、裏波エコーが得られない場合でも指示エコーと溶接部の位置関係が把握可能となり、SCC の判定がより容易かつ信頼できるものとなる。このため、超音波探傷の画像化では SCC に加えて周辺の形状も含めて画像化を図る。

(3) 波形的特徴の画像化

3.2 節で示したように SCC の内面開口部エコーは立ち上がり時間の短い鋭い波形であり、裏波エコーの波形はパルス持続時間が SCC より長い特徴を持っている。これらの波形の違いが画像にどのように表現されるかを明らかにするとともに、その違いを用いて指示の分類ができないかを検討する。

(4) 動特性の画像化

手動超音波探傷では SCC 開口部エコー、端部エコー、裏波エコー及びノイズエコーは探触子の走査に伴いそれぞれ異なる動特性を示すことがわかっている。探傷画像を利用する場合、これらの動特性が画像としてどのように表現されるかを明らかにし、指示の識別手法を確立する。

3.3.2 画像化装置の検討

原子力発電所における SCC の調査などで使用実績のある画像化装置には固定角探触子を使用するものとフェーズドアレイ探触子を使用する装置がある。特に最近のフェーズドアレイ探傷装置は小型かつ高機能となったため、その使用例が増加している。しかしながら、探触子も含めたフェーズドアレイ探傷システムは検査を専業とする中小の企業にとってはまだ高価な設備となっている。本論文は画像化による欠陥の判別技術の普及を目標の一つに掲げるため、できるだけ汎用に近い探傷装置を組み合わせた画像化システムを使用して超音波探傷画像の基本的な特性を確認することとした。この点で最近の手動超音波探傷装置もデジタル化が進み、X-Y 走査装置の位置情報と組み合わせて 1 チャンネルの波形情報を採取し、そのデータから波形 (A スコープ)、断面画像 (B スコープ)、平面画像 (C スコープ) 及び B スコープに直交する断面の透視画像 (D スコープ) が表示可能な装置が百万円を超える程度で入手可能となっている。

なお、フェーズドアレイ装置で採取する画像の解析技術は、本章で述べる基礎的な画像解析技術の延長線上に位置する技術であり、これについては第 4 章で述べる。

3.3.3 試験装置

画像データ採取に使用した超音波探傷装置及び試験体を以下に示す。

(1) 超音波探傷器

超音波探傷器は、X-Y スキャナと組み合わせて波形データを採取し A、B 及び C スコープの作画が可能な汎用の手動超音波探傷器 UI-25 を使用した。また、より広い感度範囲のデータ採取を目的として、ログアンプ型超音波探傷器 Scan Master upi-50 を使用した。どちらの超音波探傷器もエンコーダと連動して探傷軸に沿って 0.2mm ピッチで探傷波形 (A スコープ) の採取が可能であり、実時間 B スコープの表示機能を持っている。以下に使用した探傷装置の仕様と特徴を示す。

① 超音波探傷器 UI-25

メーカー：菱電湘南エレクトロニクス社

特徴：ABC 描画機能付きデジタル超音波探傷器

② 超音波探傷器 Scan Master upi-50

メーカー：IRT 社

特徴：ABC 描画機能及びログアンプ機能付き超音波探傷器

(2) 超音波探触子

SCC 及び溶接部周辺形状部の超音波反射特性を確認するため、中心周波数及び周波数帯域幅の異なる各種探触子を使用して B スコープの描写を調査した。

探傷屈折角は実機のステンレス鋼配管溶接部の探傷で規定されている 45° を使用した。超音波のモードは ISI で通常用いられる横波とした。また、ステンレス鋼溶接部内に進展した SCC を対象として適用実績が増えている屈折角 45° の縦波も使用した。表 3-1 に使用した超音波探触子の仕様及び周波数特性を示す。

表 3-1 試験に使用した探触子の仕様

仕様・名称	屈折角	メーカー	周波数特性			
			型	公称(MHz)	中心(MHz)	帯域幅(%)
2C10X10A45	横波45°	JP	狭帯域	2	1.97	36
5C10X10A45	横波45°	JP		5	4.69	20
B2K10X10A45	横波45°	JP	広帯域	2	2.17	92
B5K10X10A45	横波45°	JP		5	4.69	73
V109	垂直	P		5	4.76	87
V538	垂直	P		10	10.94	52
V538+横波シュー	横波45°	P		10	4.66	118
V538+縦波シュー	縦波45°	P		10	8.79	72

JP:ジャパンプローブ, P:Panametrics

図 3-14 は UI-25 の周波数分析機能を使用して作成した各探触子の超音波波形と周波数特性を示す。反射体は斜角探触子では超音波探傷用標準試験片 STB-A3 の 50R の面を、垂直探触子では板厚 35mm のステンレス鋼材の底面とした。波形採取ゲートの幅は周波数及び帯域特性により波の持続時間が異なるため、表示波形を包含する長さに調整した。設定したゲート幅を各図の上部に記載している。超音波探傷器の周波数設定は各探触子の周波数の仕様に合わせた。図 3-14 より各探触子の中心周波数の公称値及び周波数分布は適正であることを確認した。また、広帯域探触子の波数は 1.5 波から 2.5 波程度で、基準内であることを確認した。

本試験では、できるだけ広い帯域の超音波情報の取得を目的として、通常のスチレンス鋼配管溶接部の探傷では使用されない 10MHz 広帯域探触子も試みた。Panametrics 社の 10MHz 探触子 V538 はシューを装着して使用するタイプであり、ここでは同一の探触子に横波 45° 及び縦波 45° のシューを付け替えて使用した。図 3-15 に縦波及び横波シューを装着した場合の超音波波形及び周波数分布を示す。この結果より、縦波 45° の場合は波形及び周波数分布も垂直探傷の場合とほぼ同じ特性を示すが、横波の場合は中心周波数が 4.66MHz と公称 5MHz の広帯域探触子とほぼ同じ周波数特性となることが確認された。これとは別に 10MHz 斜角探触子を試作した結果も同じように周波数が低下した。この周波数の低下はシュー内における超音波減衰が原因と考えられ、シューを介する形の 10MHz の横波斜角探傷は実用が難しいことを確認した。

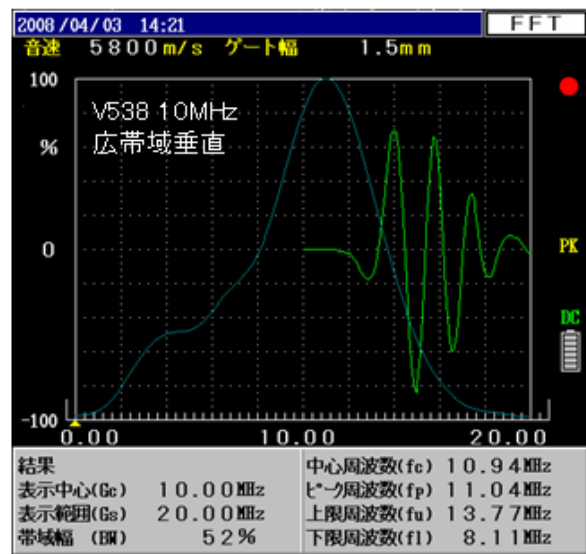
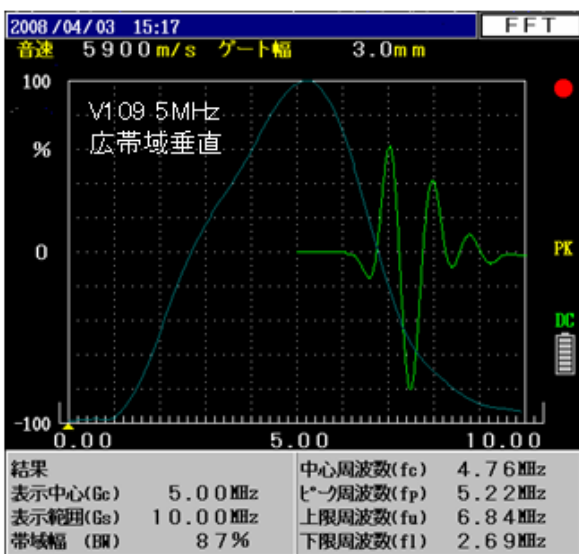
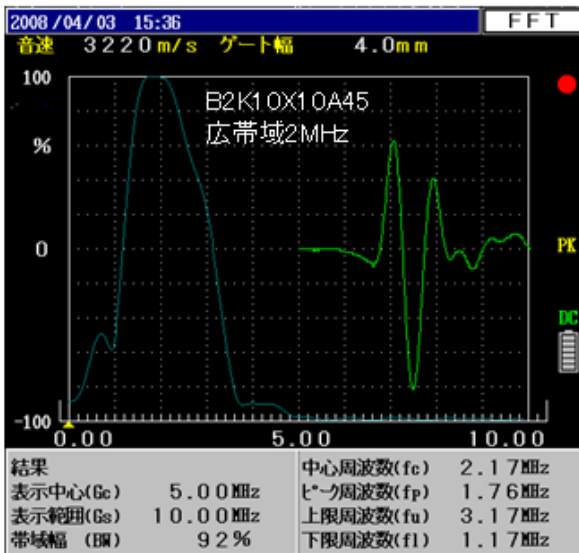
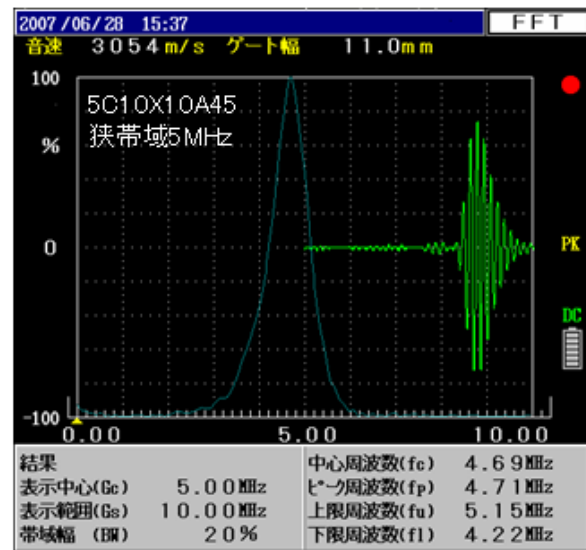
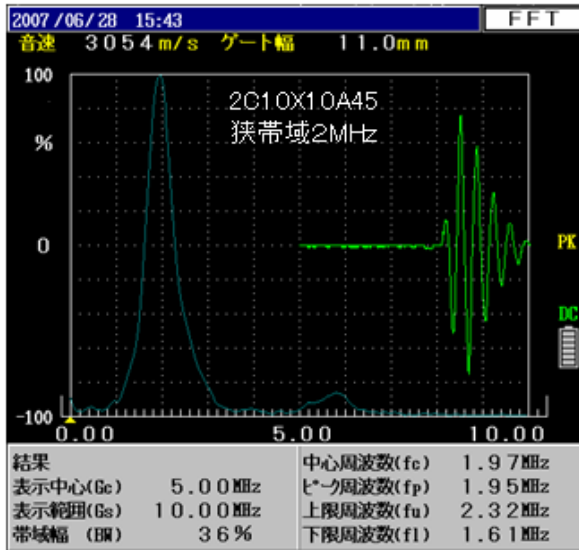


図 3-14 探触子の波形と周波数特性

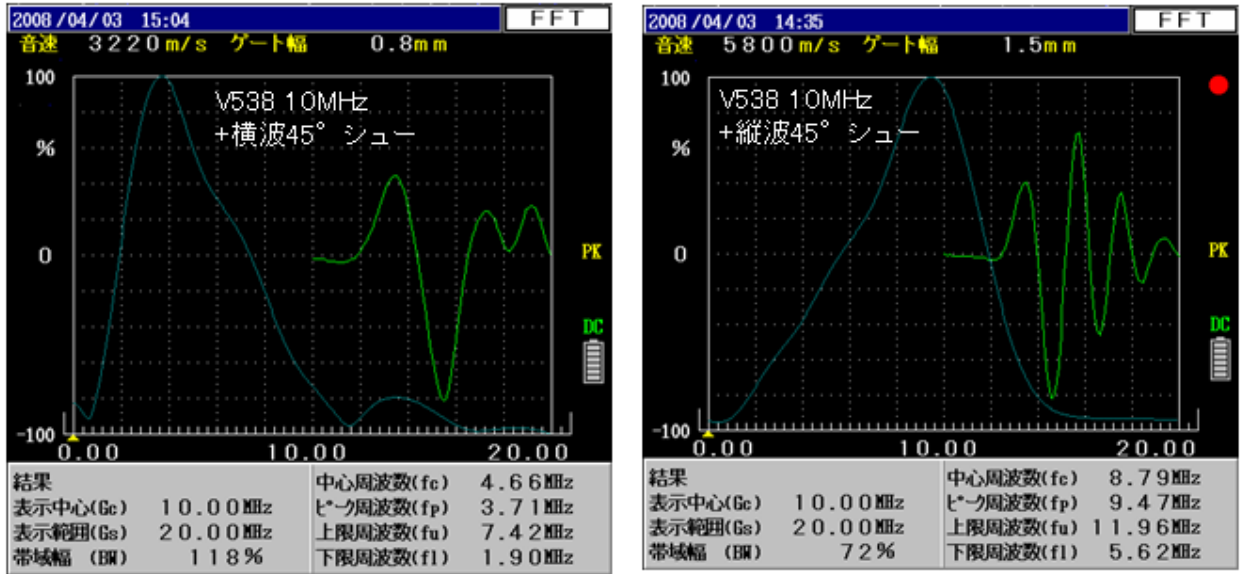


図 3-15 10MHz 探触子に縦波 45° 及び横波 45° シューを装着した場合の周波数特性

3.3.4 試験体

試験には以下の 3 種類の試験体を使用した。これらの試験体の外表面はグラインダにより余盛を削除した後バフによる仕上げを行っている。また、内表面についても表面の粗さに起因するエコーの出現を抑制するためにバフ仕上げを行っている。

(1) 350A ステンレス鋼配管試験体 (350A 試験体)

公称外径 350A、肉厚 25mm のステンレス鋼配管を突合せ溶接し、一部に SCC を付与した試験体を準備した。試験体は幅 100mm 長さ 400mm である。本試験体の SCC は実機と同じく高温高圧水中で発生・進展させたものである⁸⁾。図 3-16 に試験体の外観写真を示す。図 3-17 に試験体周方向端面のマクロ写真と内面の浸透探傷試験結果を示す。



図 3-16 SCC 付 350A 試験体の外観写真

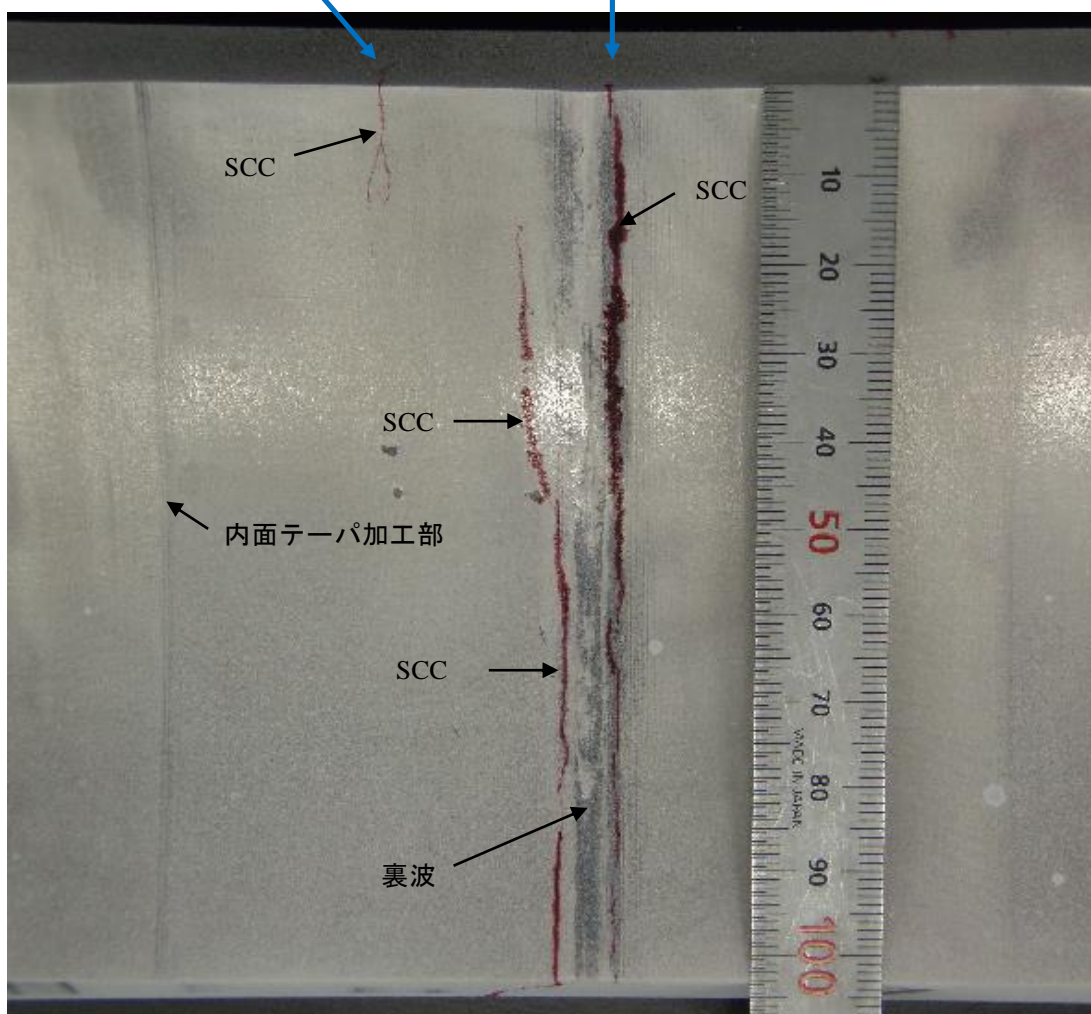
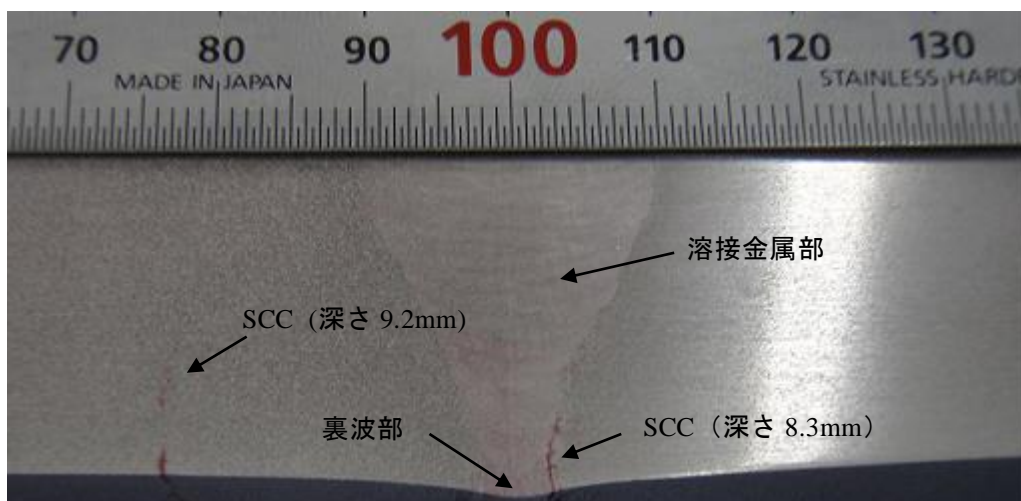


図 3-17 SCC 付 350A 試験体の側面及び内面の浸透探傷試験写真

(2) 600A ステンレス鋼配管試験体 (600A 試験体)

図 3-18 に公称外径 600A, 肉厚 35mm のステンレス鋼配管突合わせ溶接試験体の断面マクロ写真を示す。試験体の長さ及び幅は 350A 試験体と同じである。本試験体は溶接部形状によるエコーの出現状況を観察するためのものであり, 欠陥は付与していない。試験体溶接部の内表面には裏波があり, 溶接金属部には柱状晶組織が観察できる。また, 溶接部外表面の余盛はグラインダで切削されているがその両端は溶接時の収縮のためわずかに落ち込んでいる。国内の原子力発電所における標準的なステンレス鋼配管溶接部の断面形状は図 3-17 や図 3-18 のような形状となっている。

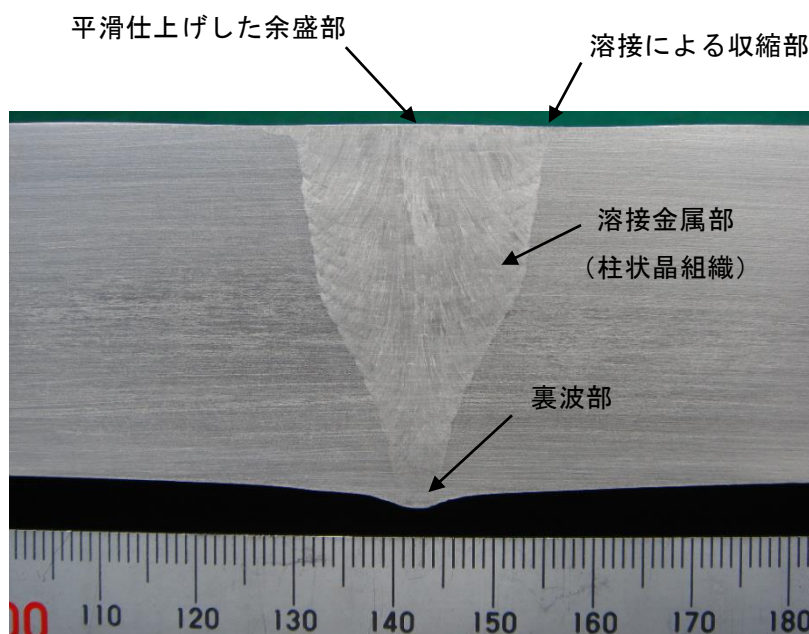


図 3-18 600A ステンレス鋼配管溶接部試験体の端面のマクロ写真

3.3.5 反射源の周波数特性調査

(1) 狭帯域探触子による探傷

SCC 及びその周囲の形状に起因するエコーは、それぞれの反射プロセスの違いにより波形が異なることを 3.2 節で述べた。この波形の違いは周波数特性の違いとして表現できると考えられる⁹⁾。このため、中心周波数の異なる探触子を使用し、それぞれの反射体が探傷周波数の違いによりどのように描写されるかを B スコープで確認した。本確認試験は探傷周波数とそれに対応する反射源毎の応答について調査するのが目的のため、試験には超音波帯域幅の狭い狭帯域型探触子を使用した。

探傷感度は、欠陥探傷が目的の超音波探傷試験では通常横穴を基準に設定するが、本試験は B スコープに描写される SCC とその周辺の状況を観察するのが目的であるため、SCC 開口部エコーの高さを基準とした。

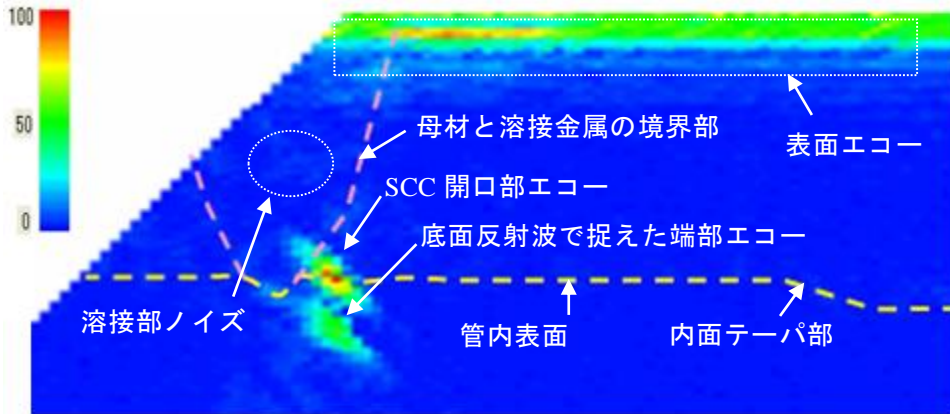
図 3-19 は狭帯域型の 2MHz 及び 5MHz の横波 45° 探触子で 350A 試験体を探傷した結果を示す。超音波探傷器は UI-25 を使用した。探傷は溶接部右側熱影響部にある SCC を対象として超音波ビームを溶接線に向け、試験体幅の中央を走査した。走査軸方向のデータ採取ピッチは 0.2mm である。

図 3-19 (a) の B スコープは狭帯域 2MHz 探触子による探傷結果を示す。探傷感度は SCC 開口部エコーを 100% に設定した。B スコープ上に赤く表示されている範囲はエコー高さが 100% を超えた部分である。このときの母材部ノイズのエコー高さは 3% 程度であった。図では SCC の開口部エコー及び超音波が管内表面で反射した後に SCC の端部を捉えたエコー（以下、端部エコー（1 回反射）と表記）が高い SN 比で表現されている。SCC の先端を直接狙った端部エコーは、この探傷感度ではエコー高さが低いために表示できていない。また、わずかではあるが溶接部からのエコーがノイズとして得られている。この感度では管内表面、テーパ加工部及び母材と溶接金属の境界部のエコーは確認することができない。また、表面エコーは超音波を入射する際に探触子と試験体の接触面で発生するエコーである。

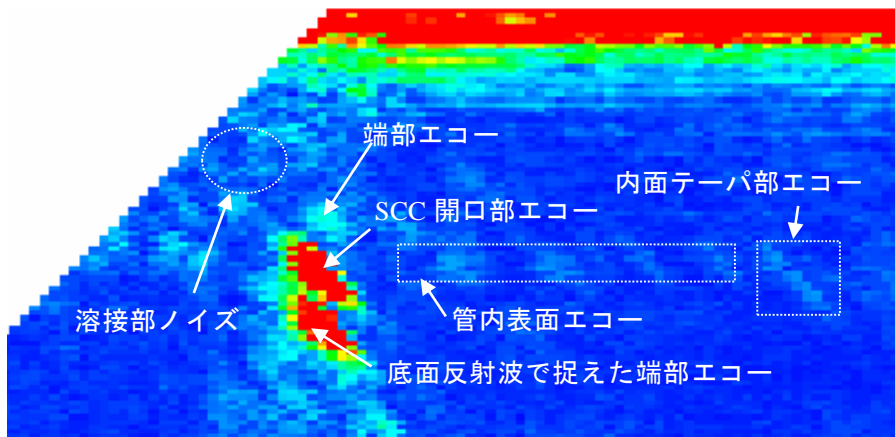
図 3-19 (b) は、(a) 図で表現できていないエコー高さが低い反射源を観察するために、感度を 4 倍 (+12dB) にして探傷した結果を示す。この場合は管内表面エコー、テーパ部エコー、直接入射による SCC 端部エコーが表示できている。一方、SCC 開口部エコー及び 1 回反射端部エコーはその高さが 100% を大きく超えるために赤色の表示範囲が広くなり、画面上ではエコーがピークとなる点を特定することができない。また、採取したエコー高さのデータは飽和しているため、規格^{10), 11)} が求めるピークエコー高さを求めるには感度を下げた再探傷が必要となる。

図 3-19 (c) は 5MHz で 2MHz と同様の探傷を行った結果を示す。探傷感度は 2MHz と同じく SCC の開口部エコーの高さを 100% とした。この際の母材部のノイズエコーレベルは 15% 程度となった。5MHz 探傷では SCC の開口部エコー、端部エコー（1 回反射）及び管内表面エコーが表示できている。管内表面エコーは連続した像となり、2MHz 探傷よりも良く管内表面を描写している。しかし、SCC 開口部エコー、端部エコー（1 回反射）とも指示画像が小さく、周囲とのコントラストも図 3-19 (a) と比較して低くなっている。母材部のノイズは図 3-19 (b) と比較してやや高く、狭帯域 5MHz での探傷は、母材部からのノイズが高くかつ SCC 開口部エコーが低いために SCC の探傷には適さないとのこれまでの認識を裏付ける結果が得られた。なお、図 3-19 (c) の溶接部ノイズが図 3-19 (b) より低いのは、5MHz の超音波では減衰が大きすぎて反射エコーも得られないためと考えられる。

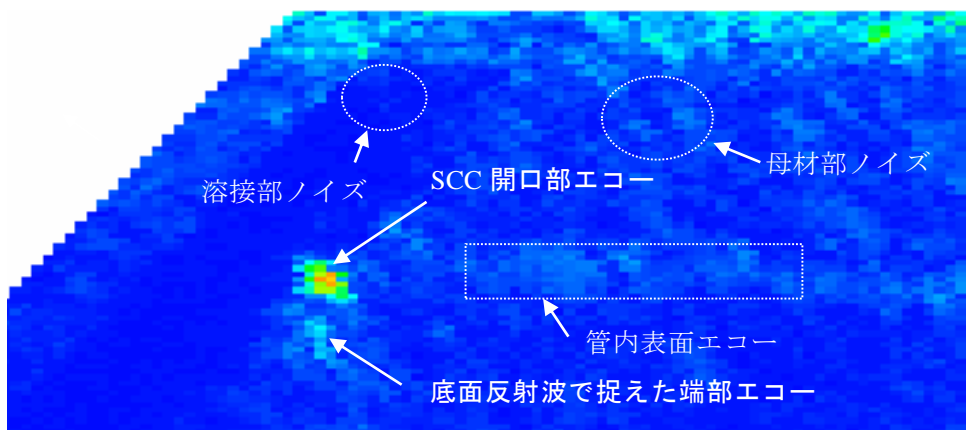
エコー高さの階調 (%)



(a) 2MHz 45° , 感度 : SCC 開口部エコーを 100% (ノイズレベル 3%)



(b) 2MHz 45° , 感度 : SCC 開口部エコーを 100%+12dB (ノイズレベル 10%)



(c) 5MHz 45° , 感度 : SCC 開口部エコーを 100% (ノイズレベル 10%)

図 3-19 2MHz 及び 5MHz 狭帯域探触子による SCC 試験体の B スコープ

図 3-20 は図 3-19 と同じく狭帯域 2MHz 及び狭帯域 5MHz の横波 45° 探触子を使用した 600A 試験体の探傷結果を示す。超音波探傷器、探触子の走査方法及びデータ採取ピッチは 350A 試験体のデータ採取条件と同一としている。

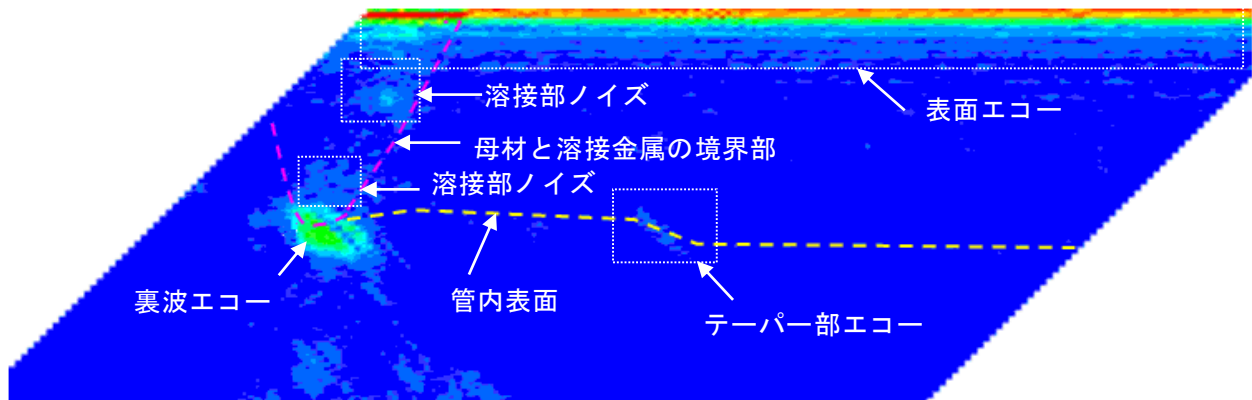
図 3-20 (a) は 2MHz 探触子での結果を示す。探傷感度は溶接裏波部からのエコーを表示器の 80% に設定した。このときの配管内面近傍のノイズレベルは 3% で、350A 試験体と同程度である。図 3-20 (a) では、図 3-19 (a) と同様に、裏波エコーに加えてテーパ部エコー及びわずかな溶接部ノイズを観察することができる。管内表面エコーは微弱であり、それと特定することは難しい。

図 3-19 (b) は感度を 4 倍 (+12dB) にした結果を示す。この感度では、母材中のノイズレベルが 10%~15% とやや高くなり、管内表面からのエコーレベルは母材部ノイズを多少上回る程度となっている。管内表面はわずかにエコーレベルの高い断続した指示として認識される。テーパ部エコーは見えやすくなっている。また、溶接部ノイズのレベルが高くなり、溶接金属と母材の境界部が識別しやすくなっている。ただし、この感度では裏波エコーが完全に飽和しているために裏波近傍に欠陥がある場合はそれを覆い隠す可能性があり、欠陥検出を目的とする探傷感度としては不適切である。

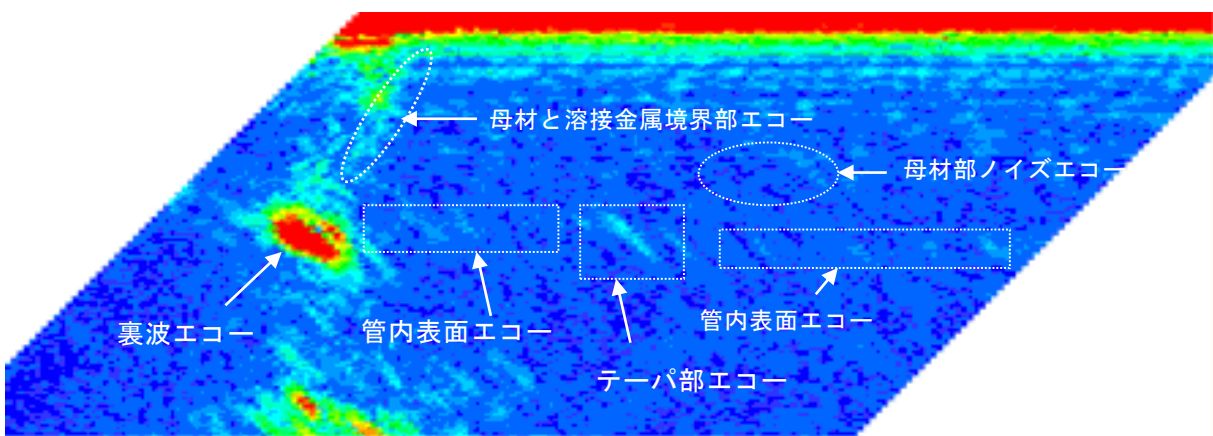
図 3-20 (c) は 5MHz 探触子での結果を示す。5MHz では、裏波エコーを表示器の 80% に設定すると母材部ノイズエコーが過大となり画像の解析が困難であるため、探傷感度は管内表面近傍のノイズレベルを 10% に設定した。なお、母材部のノイズレベルを表示器の 5%~10% とする方法は、標準欠陥を使用せずに感度を設定するような探傷では一般的な手法である。5MHz 探傷の場合、裏波エコーは 350A 試験体の場合より信号レベルが小さくなっている。これは肉厚が 10mm 増えたことにより母材中における超音波の減衰が大きくなった影響と考えられる。一方、管内表面及び溶接金属と母材の境界部は、ノイズエコー有無の境界となるために認識しやすくなっている。テーパ部は明確なエコーとしては確認できず、表面エコーの包絡線から推測可能となっている。これは 5MHz 超音波の指向性が強いためにテーパ部からの反射波は探触子に戻らない方向に進み、管内表面で散乱した波のみがノイズとして検出されるためと考えられる。

以上の結果から、狭帯域型探触子を使用してステンレス鋼配管溶接部の画像化による SCC の検出及び深さ測定を行う場合に考慮すべき以下の知見を得ることができた。

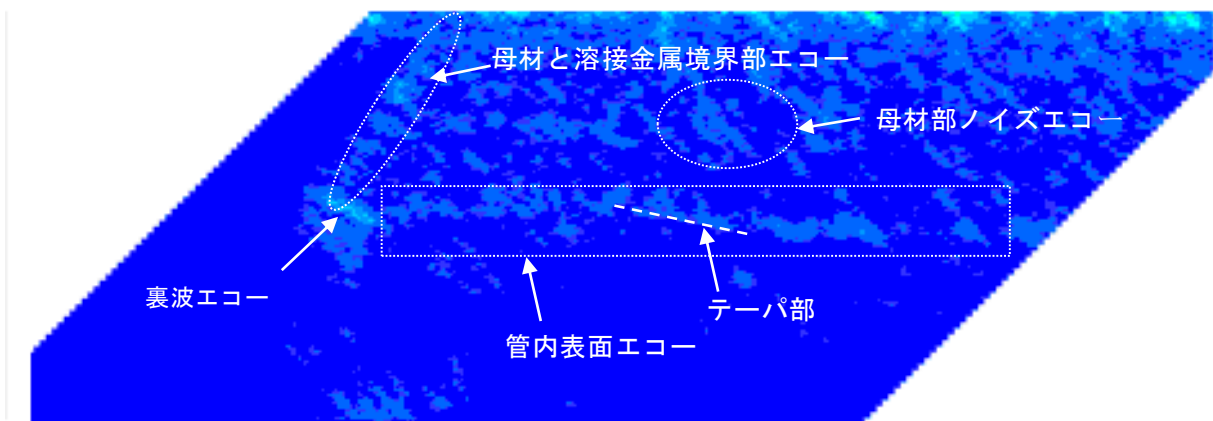
- ① 溶接部裏波及び SCC 開口部のみを高い SN 比で検出するには、ステンレス母材中における超音波の減衰が比較的少ない 2MHz が適している。
- ② SCC の端部エコーを直射で捉えるには 2MHz を使用し、探傷感度を母材部のノイズレベルが 10% 程度に設定するのが良い。この探傷感度では内表面エコー及び内表面テーパ部からのエコーを得ることができるため溶接継手近傍の形状を認識するのに有効である。
- ③ 5MHz を使用した場合は母材中の超音波の減衰により裏波エコー及び SCC エコーとも低く、SN 比も低いため SCC の検出が難しくなる。
- ④ 5MHz を使用すれば管内表面及び溶接金属と母材の境界部の識別は容易となる。
- ⑤ SCC、試験体内表面、溶接金属境界部のそれぞれを B スコープ上で最適に表現できる感度には 6dB 以上の開きがある。したがって、これらの反射源を的確に表現するには探傷周波数の最適化に加えて広い感度範囲でデータを取得する必要がある。



(a) 2MHz 45° , 感度 : 裏波エコー 80% (ノイズレベル 3%)



(b) 2MHz 45° , 感度 : 裏波エコー 80%+12dB (ノイズレベル 10%- 15%)



(c) 5MHz 45° , 感度 : ノイズレベル 10%

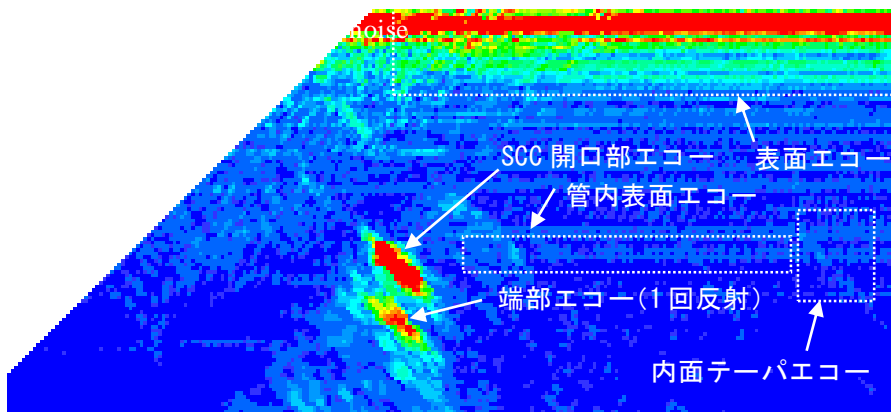
図 3-20 2MHz 及び 5MHz 狭帯域探触子による 600A ステンレス鋼試験体の B スコープ

(2) 広帯域探触子による探傷

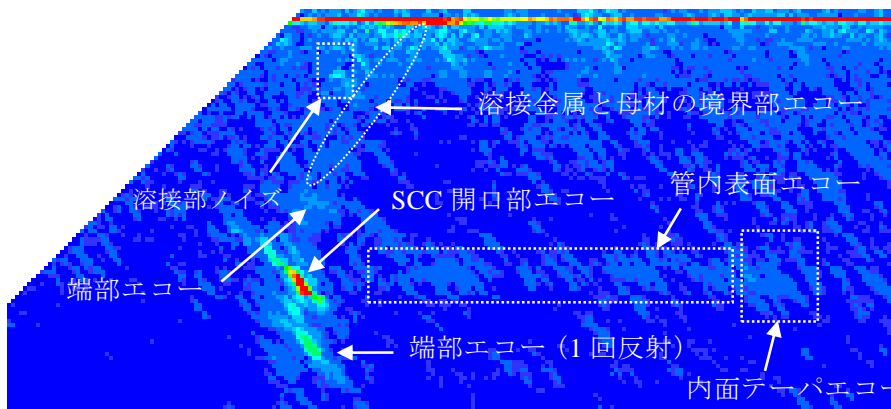
狭帯域超音波を使用して探傷周波数の画像への影響が確認できたため、より広い帯域の超音波を使用した場合の画像について広帯域探触子を用いて確認した。試験には 350A 試験体を使用した。超音波探傷器、走査方法及びデータ採取方法は狭帯域探触子と同じとした。

図 3-21 に B スコープ画像を示す。図 3-21 (a) の 2MHz 広帯域探触子では、図 3-19 (b) の 2MHz 狭帯域探触子に比較して SCC 開口部エコー及び端部エコー（一回反射）像の時間軸方向の幅が狭くなっている。また、母材部ノイズのエコー高さは同等であるが、指示模様が細かく、管内表面エコーや溶接部エコーの視認性が低下している。これは、広帯域超音波波形のパルス持続時間が短いため影響である。それ以外には 2MHz 狭帯域との大きな差は認められない。2MHz では広帯域型であっても上限周波数が 3.17MHz、上下限周波数の幅が 2.0MHz と狭いために、狭帯域型との差が顕著には現れないと考えられる。

図 3-21 (b) は 5MHz の場合を示す。図 3-19 (c) の狭帯域探触子の結果に比較して SCC 開口部エコー及び端部エコー（1 回反射）の像が明瞭になると共に、直接入射の端部エコー像も視認可能となっている。管内表面エコー及び溶接金属と母材の境界部エコーも視認性が改良されている。これは、広帯域 5MHz 探触子が下限周波数 2.98MHz から上限周波数 6.4MHz までの広い帯域幅を持つために、狭帯域の 2MHz と 5MHz 探触子の双方の利点を持つためと考えられる。



(a) 広帯域 2MHz 45° (ノイズレベル 10%)



(b) 広帯域 5MHz 45° (ノイズレベル 10%)

図 3-21 広帯域探触子による SCC 試験体の B スコープ

図 3-22 は 600A 試験体を広帯域 5MHz 探触子で探傷した結果である。ノイズレベル 5%の条件で裏波部、溶接金属と母材の境界部及び配管内表面が表現できており、この条件を選定すれば画像による SCC の判別がより容易にできることを示している。

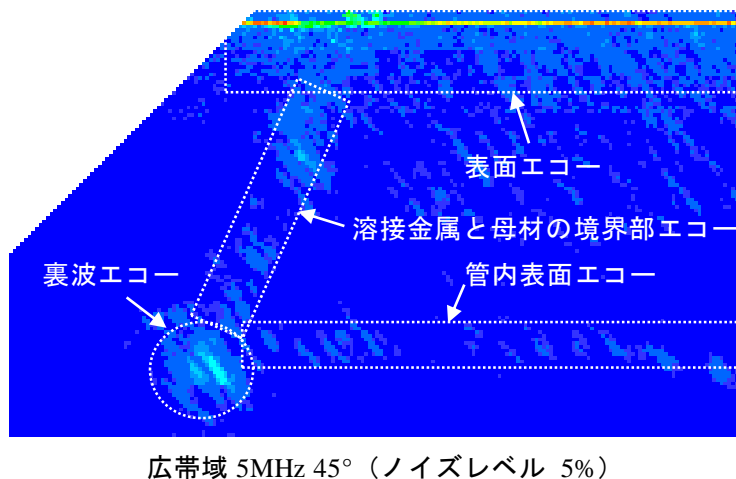


図 3-22 5MHz 広帯域探触子による 600A ステンレス鋼試験体の B スコープ

(3) 探傷周波数と帯域幅の影響のまとめ

SCC 及びその周辺形状の周波数特性について、中心周波数が 2MHz と 5MHz で周波数帯域幅が狭帯域と広帯域の計 4 種類の探触子を使用して確認した結果、次の知見を得ることができた。

- ① 狭帯域探触子で溶接部裏波及び SCC 開口部のみを高い SN 比で検出するにはステンレス母材中における超音波の減衰が比較的少ない 2MHz が適している。
- ② 狭帯域 5MHz 探触子は、管内表面及び溶接金属と母材の境界部の識別は容易であるが、母材中の超音波の減衰により裏波エコー及び SCC エコーとも SN 比が低くなるため、SCC の検出には適さない。
- ③ 2MHz 広帯域探触子は、絶対的な帯域幅が狭いために狭帯域と比較して画像が多少きめ細くなる程度で、画像においては大きな違いは生じない。
- ④ 5MHz 広帯域探触子は、狭帯域型の 2MHz と 5MHz の探触子で得られた双方の利点、すなわち SCC の描写性と母材と溶接境界部や内表面の描写性の双方を兼ね備えている。この理由で、探傷画像を使用する超音波探傷試験には 5MHz 広帯域探触子が適している。
- ⑤ SCC、試験体内表面、溶接金属境界部のそれぞれを B スコープ上で最適に表現できる感度には 6dB 以上の開きがある。したがって、これらの反射源を的確に表現するには探傷周波数の最適化に加えて、広い感度範囲でデータを取得する工夫が必要となる。

3.4 Bスコープの解説

3.2節で熟練者が SCC の検出及び深さ測定に活用している波形の特徴及びエコーの動特性を述べた。これらの特徴や動特性の B スコープ上での表現は次のようになる。

図 3-23 は SCC 開口部エコーの特徴とその B スコープを示す。SCC 開口部エコーの A スコープでの特徴は「立ち上がり時間が短く、鋭いエコー」であるが、B スコープではこの特徴は指示の前縁からピーク位置までの幅が狭い像として表現される。また、SCC エコーは「探触子の軸方向の走査に伴い穏やかに高さを変えながらトラベルする」であるが、B スコープでは超音波の入射方向に直交する軸を持つ長楕円あるいは紡錘状の指示像となり、トラベルする軌跡の長さは長軸の長さに相当する。

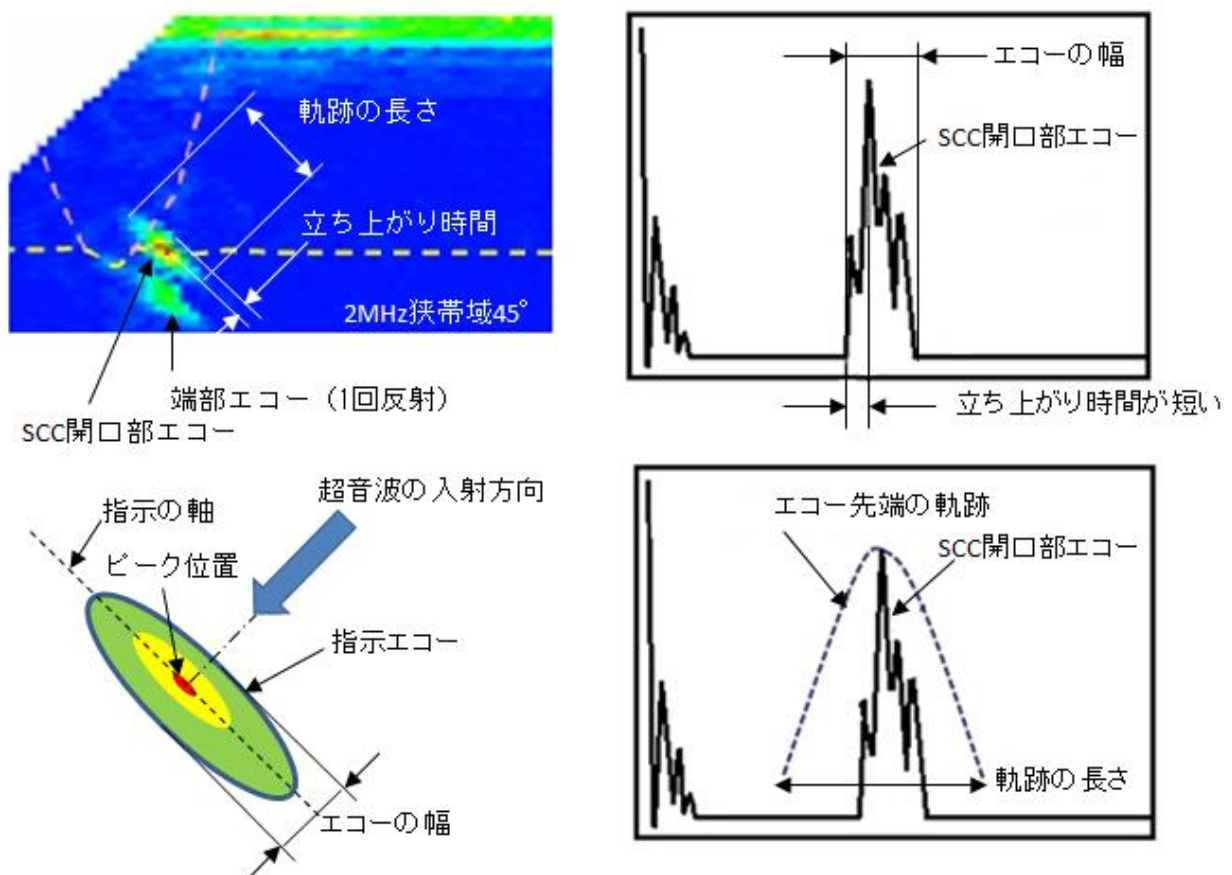


図 3-23 SCC エコーの A スコープでの特徴と B スコープ表示

図 3-24 は裏波エコーの特徴とその B スコープを示す。裏波エコーの A スコープは広幅の多峰状の波形であるため、B スコープ像はピーク点が定めにくい塊状に近い楕円形の指示となる。探触子の軸方向走査でそれぞれのピークが個別にトラベルする様子は、B スコープ上では長軸が短く、並びがやや乱れた指示群として表示される。

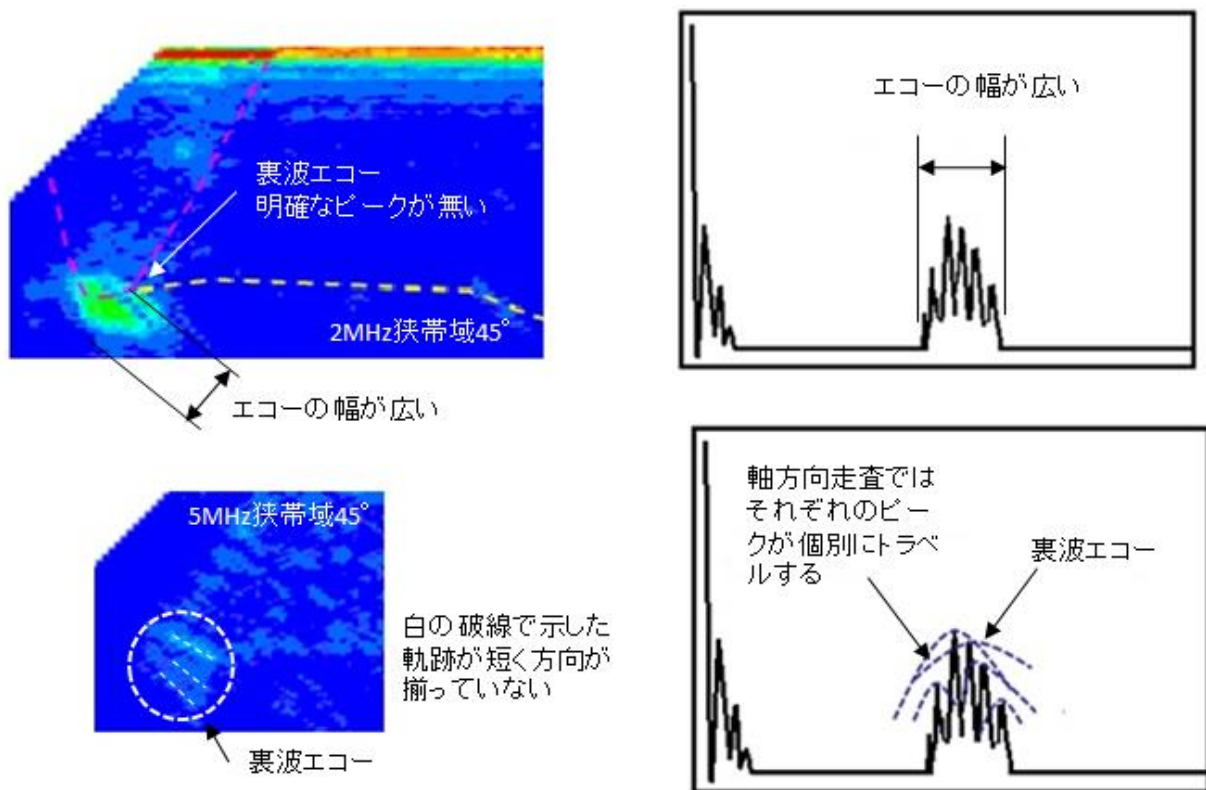


図 3-24 裏波エコーの A スコープでの特徴と B スコープ表示

図 3-25 はノイズエコーの特徴とその B スコープを示す。ノイズエコーは、A スコープでは時間軸上に現れる小さな林状のエコーであり、探触子の軸方向走査に伴いトラベルせずにエコー高さが変化する。B スコープでは「超音波ビーム」と示された白の破線内にある指示が A スコープのノイズエコーに相当している。B スコープ上のノイズエコーは小さな不定形の像となる。溶接部内のノイズエコー（溶接部ノイズ）にはエコーが周囲より多少高めになる場合がある。この場合も B スコープでは塊状の像となり長楕円あるいは紡錘状となる欠陥の画像とは異なる形態を示す。

図 3-26 は端部エコーの特徴とその B スコープを示す。直射で得られる端部エコーの高さはノイズエコーより多少高い程度であり、静止した A スコープ上で端部エコーを見分けるのは難しい。このため、探触子を前後走査して SCC 開口部エコーと連動しかつ波形が SCC 開口部エコーに類似しているエコーを探すことで端部エコーを判別する手法が使われる。これは、B スコープ上では SCC 開口部像の長軸と平行な軸を持つ指示を識別する作業となる。この識別は難しい作業のため、特定できた場合でも最終的な決定は A スコープで波の動特性を再確認するのが望ましい。

以上は SCC のような鋭く複雑な形状の先端を持つ端部エコーの記述であり、EDM に代表される機械加工ノッチの先端や図 3-26 に示した一回反射で捉えた SCC 端部のように端部エコーが得やすい場合は、B スコープのみでも判断が可能である。また、第 2 章で PD 試験不合格者が SCC 先端を深読みする可能性があることを述べたが、これは図 3-26 に示した溶接部ノイズを端部エコーと見間違えるようなケースである。この場合も溶接部ノイズ指示はエコーが高くても塊状であること及びエコーの連続性に注意を払えば判別が可能である。

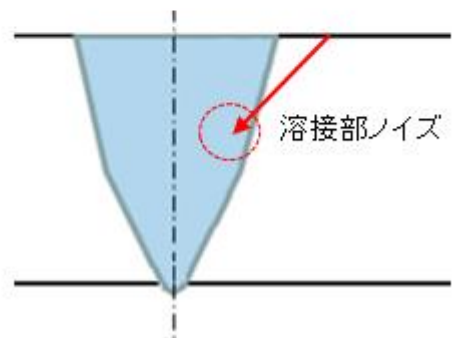
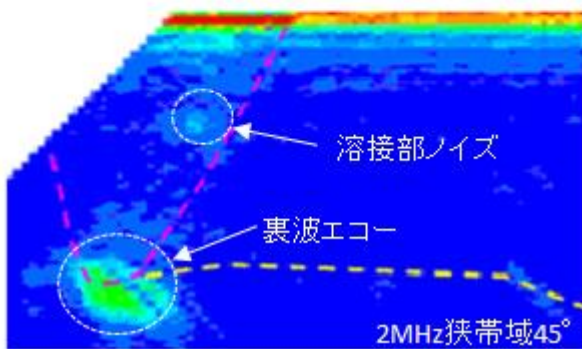
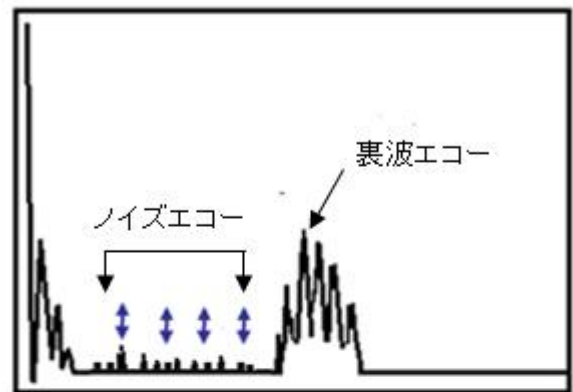
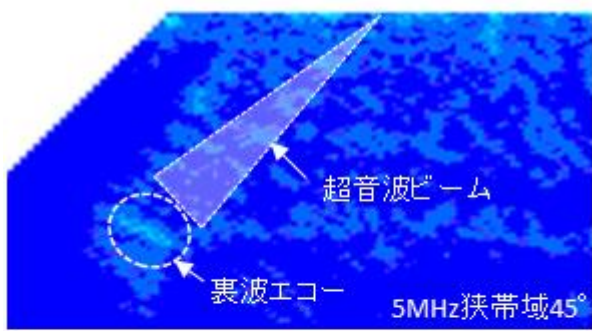


図 3-25 ノイズエコーの A スコープでの特徴と B スコープ表示

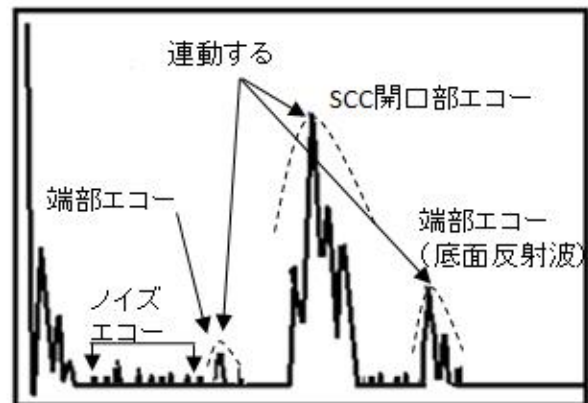
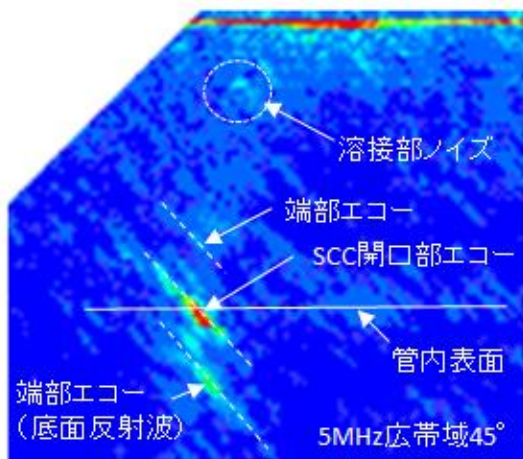


図 3-26 端部エコーの A スコープでの特徴と B スコープ表示

3.5 周波数による反射源の判別と描写

3.3.5 項で SCC 及びその周囲の形状に起因するエコーは反射プロセスの違いにより周波数特性が異なり、狭帯域の超音波で探傷する場合、SCC 開口部及び端部の検出には 2MHz が、母材と溶接金属境界部及び管内面形状の描写には 5MHz が適していることを述べた。また、5MHz の広帯域超音波による探傷では、周波数帯域幅が広いために双方の特徴を包含していることを述べた。ここでは、この反射源毎に反射エコーの周波数特性が異なることを利用して、特定の周波数成分を抽出した B スコープは反射源毎の画像となりうることを想定してその実証を試みた。

図 3-27 はこの目的のために開発した周波数による画像抽出プログラムの処理プロセスを示す。解析には UI-25 で採取した超音波波形と探触子位置情報を使用する。画像分離プロセスでは元となる波形情報を周波数の上限値及び下限値を任意に設定可能なバンドパスフィルタを通した後に B スコープ画像を作成する。開発システムは最大 4 個の画像 (File 1- File 4) を作成可能としている。また、それぞれの B スコープは任意の色を選定してその濃淡で波高値を表示でき、色を表示する波高値の上下限値も設定可能としている。図 3-27 に示す例では、「File 1」として 0MHz - 2MHz のバンドパスフィルタを通した後にシアン色で作成した B スコープを示している。開発プログラムは各ファイルの B スコープ画像を重畳表示する「画像合成」機能を持たせている。この画像合成を使用すれば、ファイル毎に異なる色を選定し、全ての周波数帯でエコーが得られる SCC 開口部エコーは白色表示となるような使用法が可能である。このプログラムの特徴は、一つの波形と位置データの組合せ情報から周波数帯域幅を限定した B スコープを抽出すると共にその再合成を可能としたことで、異なる周波数特性の探触子で採取した情報を重ね合わせる際に発生する探傷作業の手間や画像の位置ずれの問題が発生しない利点がある。

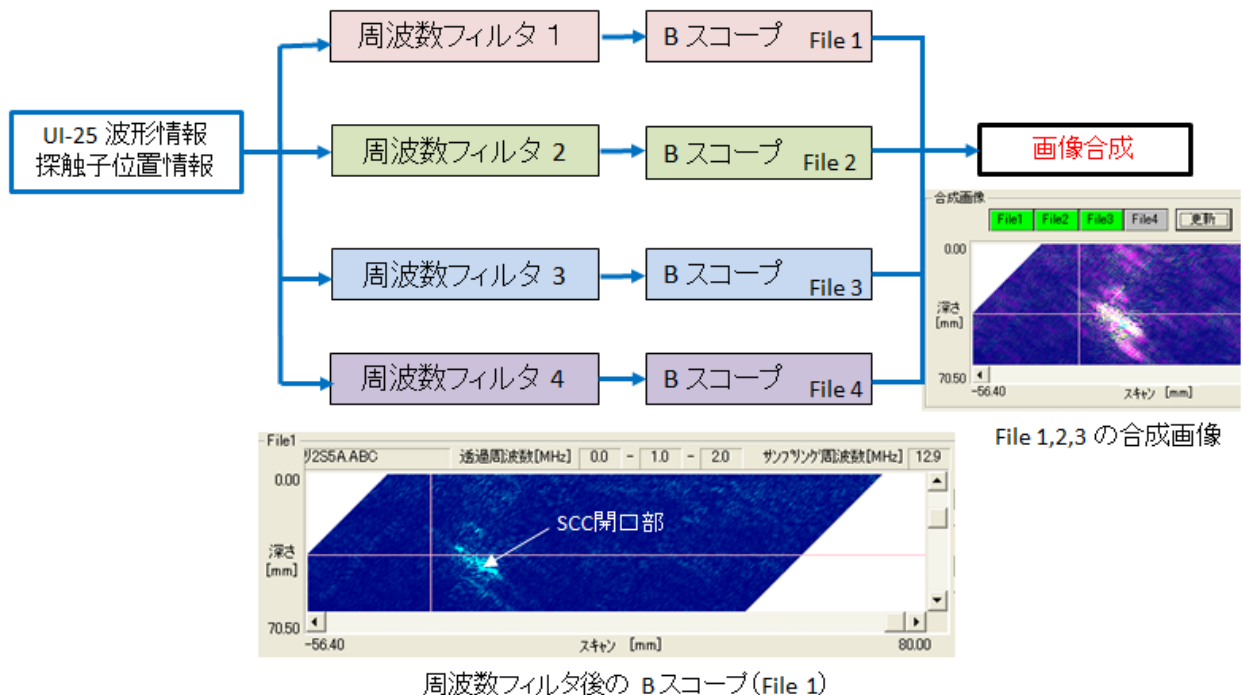


図 3-27 周波数による画像抽出ソフトウェアの概念

図 3-28 は 5MHz 広帯域型探触子で採取した 350A 試験体の A スコープ及び B スコープを示す。B スコープに示されるように、このデータには SCC とその周辺の溶接部形状に起因する情報が含まれており、この情報を使用して周波数による画像分離を試みた。

図 3-29 は 5MHz 広帯域型探触子の周波数スペクトルと解析で使用した周波数帯域を示す。バンドパスフィルタの幅はそれぞれ 2MHz とし、低帯域 (1MHz-3MHz) と中帯域 (4MHz~6MHz) 間は周波数帯域による特徴を分離して引き出すために 1MHz の間隔を設けている。一方、中帯域と高帯域の間は高周波数領域における超音波減衰が大きくなりすぎるために間を空けていない。解析の帯域幅を 2MHz としたのは、これ以上狭い場合は低帯域及び広帯域でのエネルギーが小さすぎ、また広い場合は帯域による特徴が出にくくなる理由によるが、これは分離の対象と使用探触子の特性により変更すべきパラメータである。

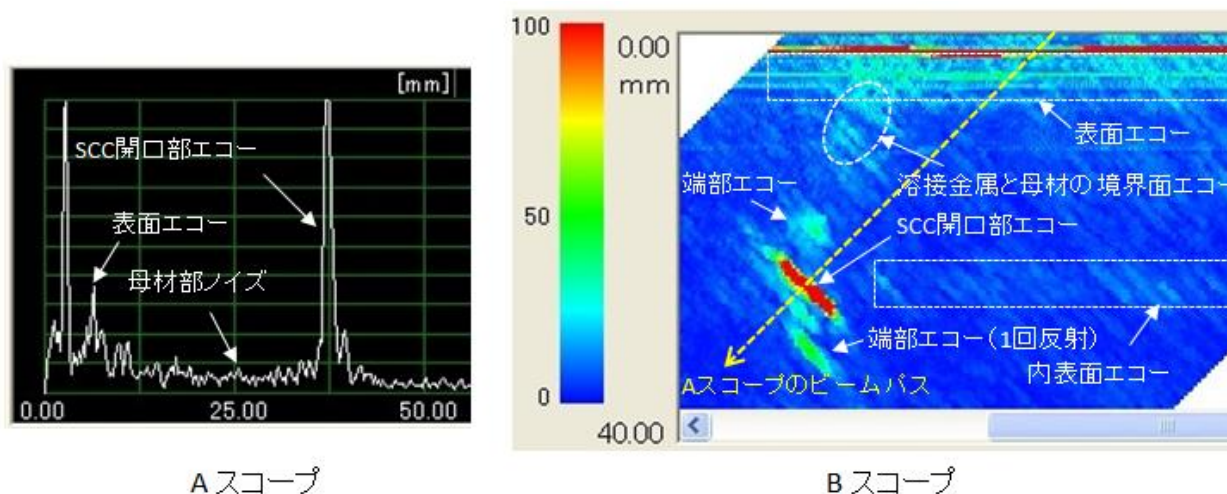


図 3-28 A スコープ及び UI-25 の B スコープ画像 (5MHz 広帯域探触子データ)

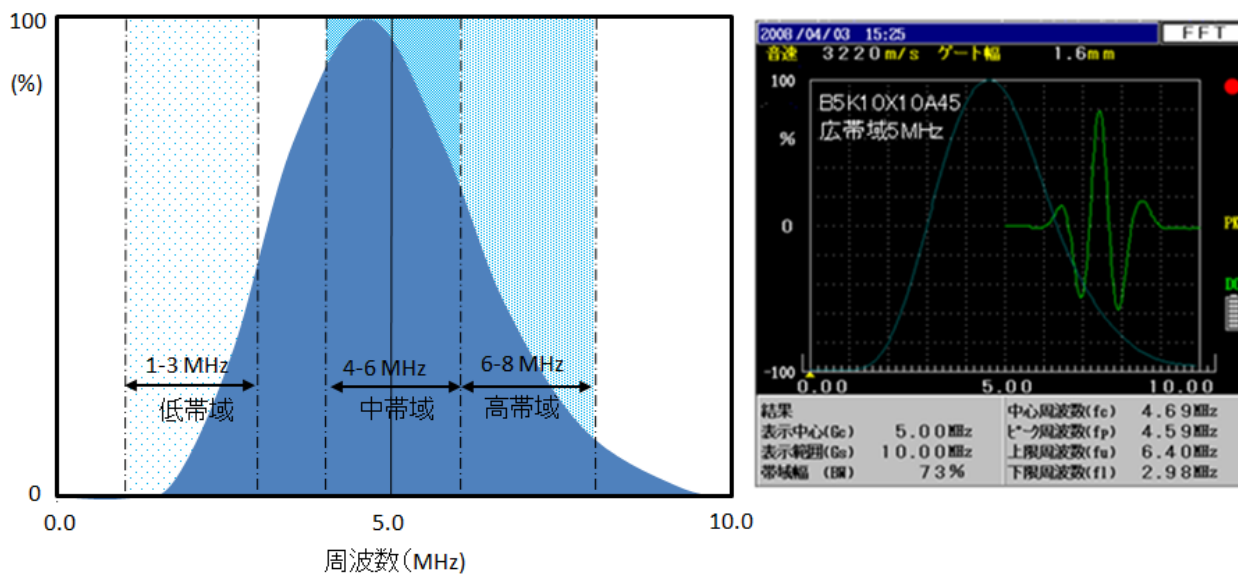


図 3-29 使用探触子の周波数スペクトルと使用したバンドパスフィルタ

図 3-30 は各帯域で作画した B スコープ画像とその画像を合成した結果を示す。低帯域の画像はシアン、中帯域はイエロー、高帯域はマゼンタとし、全ての帯域でエコーが得られる指示は白色になるように設定した。また、エネルギーの強い中帯域のみが強調されないように、低帯域、中帯域、高帯域とも色階調はエコー高さが 30% で濃度が最大になるように設定している。この結果、合成画像では、SCC 開口部エコー及び端部エコーは「白色」に表示されている。図 3-28 に示した B スコープでは端部エコーが溶接金属と母材の境界面エコーに重なり判別しにくいですが、合成画像では SCC 開口部エコーに平行な線状の指示像となり、判別し易くなっている。溶接金属と母材の境界面エコー及び内表面エコーは低帯域では表示されていない。高帯域の表示では SCC 開口部及び端部周辺に溶接部ノイズと思われるエコーが重畳し、SCC エコーの輪郭が不鮮明となっている。

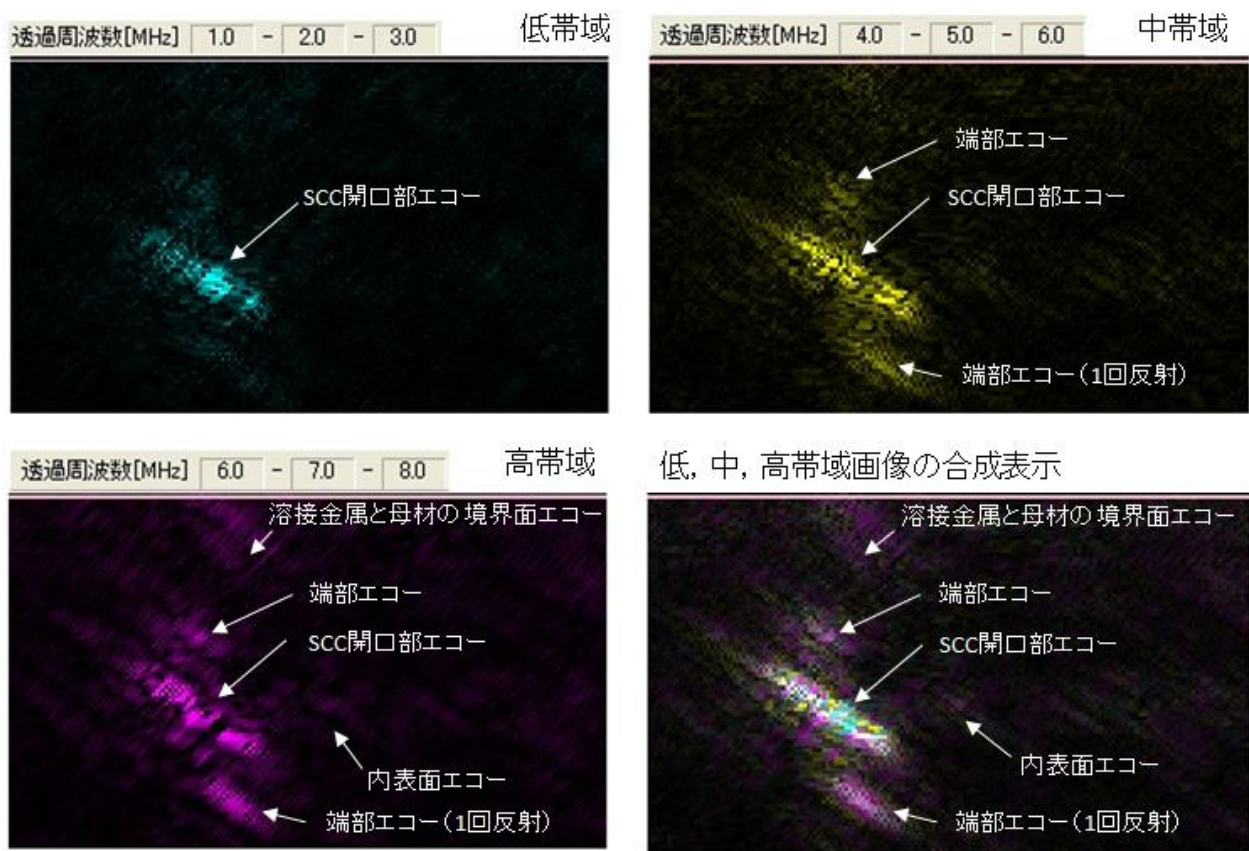


図 3-30 周波数帯域毎の B スコープとその合成画像

図 3-31 は欠陥を付与していない 600A 試験体の例を示す。色階調はエコー高さが 10% で濃度が最大に設定している。600A 試験体の低帯域の B スコープでは、裏波エコーが観察できるが、その他のエコーは微かで、明確な像としては観察できない。中帯域の B スコープでは、内表面エコー及び母材と溶接金属と母材の境界面エコーが観察できるが、断続的な像となっている。高帯域になり、内表面エコー及び母材と溶接部境界面エコーがほぼ連続した線として観察可能となっている。

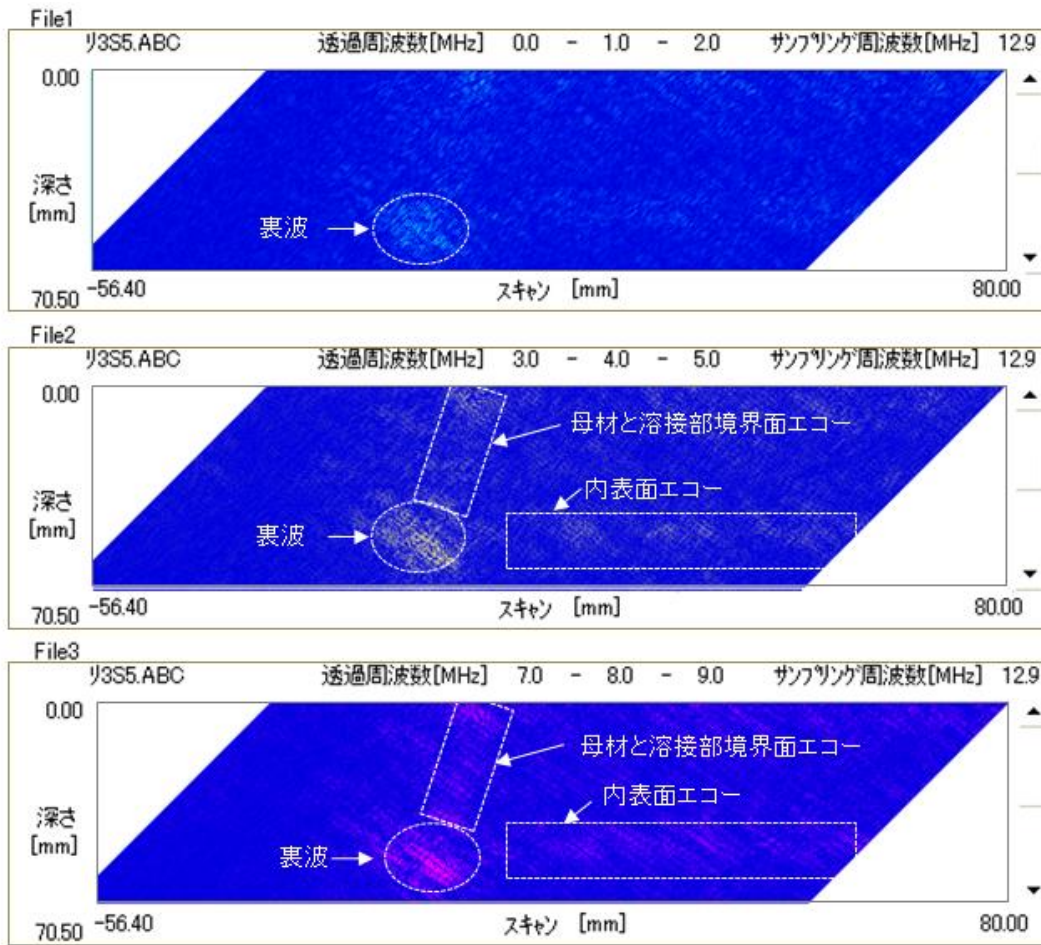


図 3-31 周波数帯域毎の B スコープ画像 (600A 試験体)

周波数による画像抽出と再合成は、反射源の周波数特性の違いを利用してその像を異なる色で描写するのが目的であった。しかし、ここに示した合成画像では、SCC 端部の認識が容易になるとの成果は得られたものの、反射源毎に明確な画像を提供するには至らなかった。この理由として、現在入手可能な広帯域探触子は帯域幅が広いとは言えエネルギー分布が平坦では無く、低周波及び高周波領域でのエネルギーが低くなっている。また、反射源の周波数特性も、周波数が偏る傾向が認められる程度のもので、明確な変化ではないことが挙げられる。したがって、ここでの成果は、①これまでノイズとして扱われてきたエコー高さの低いエコーには溶接部や配管内面形状に関する情報が含まれていること、②これらは中帯域以上の探傷周波数で描画が可能で、確認したことがある。この成果により、画像描写には、中心周波数が 5MHz 程度で広帯域の超音波を使用する必要があることと、感度の設定が画像描写の重要な因子であることが明らかとなった。図 3-32 は解析レベルの変更による画像描写の変化を示す。図 3-33 はエコー高さが 5% 以下の情報の有無による描写の違いを周波数帯域別の B スコープと共に示している。これらの図は、5% 以下の情報を除外すれば溶接部形状に関する情報が失われることを示している。この点で図 3-28 のレインボーカラーの階調表示は、低いエコーを明度の高い色で際立たせている点で理にかなっている。逆に、低いエコーの明度を抑えた表現は、SCC が際立ち、素人目にはわかり易い画像を提供できるが、重要な情報を隠してしまう可能性がある。

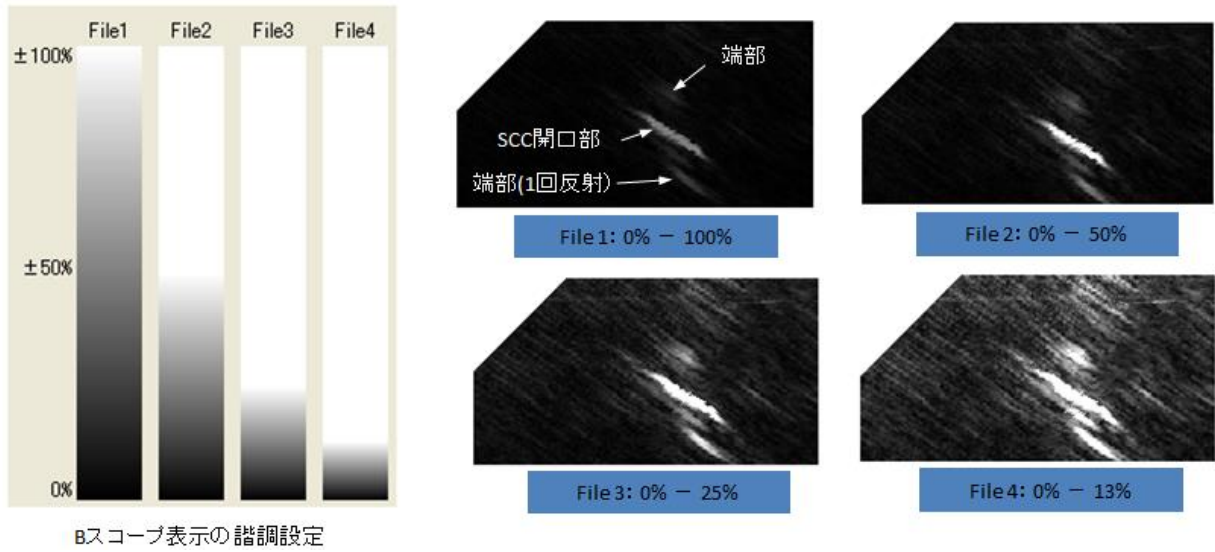


図 3-32 色階調の変更による描写の変化

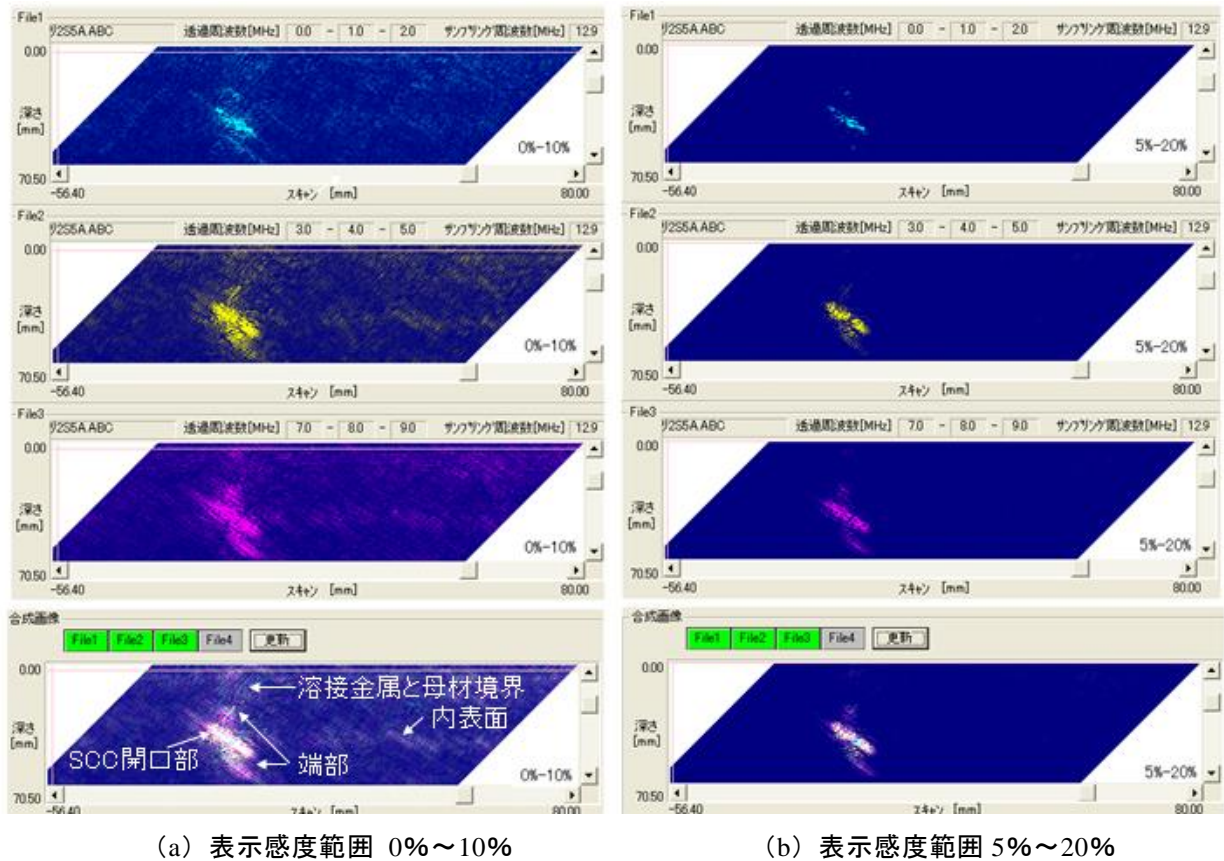


図 3-33 5%以下の情報の有無による表現力の比較

3.6 ログ表示画像の検討

第1章では SCC の検出や深さ測定では溶接部周辺の形状に関する情報が重要であることを述べた。また、3.5 節では A スコープに依存する探傷でノイズエコーとして無視されてきた低いエコーには溶接金属と母材の境界部や配管内面などの形状に関する情報が含まれていることを明らかにした。更に、SCC 開口部エコーと端部エコーや管内表面エコーの間はエコー高さの差が大きく、これらを同じ画面上で観察するには探傷周波数や探傷感度の注意深い調整が必要であることを示した。

このように、探傷では可能な限り広い範囲のエコー高さの情報を一度の探傷で収集するのが望ましい。しかし、現在主流であるリニアアンプを使用する超音波探傷器では、SCC 端部エコーの高さを A スコープ表示器の 10%程度に設定した場合には開口部エコーが 100%を超える場合が多く、SCC の探傷と SCC の深さ測定は別々の感度で実施されている。このエコー高さの収集範囲を拡大する手段の一つとして、広い範囲のエコー高さ情報を採取できるログアンプの使用が考えられる。

以上の考えから、本節ではログアンプを使用して探傷画像を採取し、リニアアンプとの違いを画像の表現力を中心に比較評価した。

(1) リニアアンプとログアンプの得失

超音波探傷試験における探傷感度の調整は増幅器及び減衰器（以下二つを総称して「アンプ」と称する）により行われている。このアンプにはリニアアンプとログアンプがあり、初期の超音波探傷器ではリニアアンプとログアンプの双方が使用されていた。リニアアンプを使用する場合、表示器の画面上で観察できる波高値の範囲はほぼ表示器画面の約 5%~100%の 26dB (20 倍) の比較的狭い範囲となっている。しかし、工業用の超音波探傷試験では欠陥の評価を基準エコー高さに対する比で評価するため、エコー高さがリニアスケールで直読でき、基準エコーに対する欠陥エコー高さの比が算出しやすいリニアアンプが便利である。

ログアンプは 80dB (10,000 倍) 以上の範囲の信号を表示画面上で観察できるが、感度のスケールが対数圧縮されているため、欠陥エコーを表示器上で視認するのが難しくなっている。この理由でログアンプは工業用超音波探傷器の市場から徐々に撤退し、現在ではログアンプを使用している装置はほとんど見かけられなくなっている¹²⁾。しかしながら、医用超音波の分野では体内の浅い部分から深い部分まで幅広い感度範囲のデータを収集して超音波画像を再構築する必要があるため、ログアンプの使用が一般的となっている¹³⁾。

図 3-34 は 350A 試験体をログアンプ式超音波探傷器 Scan Master UPI-50 (RI 社) 及びリニアアンプ式超音波探傷器 UI-25 で探傷した際の A スコープの違いを示す。どちらの場合も SCC 開口部エコーの高さを表示画面の約 50%に設定している。探触子は 10MHz 垂直探触子 V538 (パナメトリックス社) に横波用のシューを装着して使用した。

位置①で採取した表示画面中には SCC 開口部エコー及びノイズエコーが表示されているが、ログアンプとリニアアンプでは SN 比の差が大きく、ログアンプの $S/N \approx 2$ に対してリニアアンプでは $S/N > 10$ となっている。位置②では、ログアンプは探傷感度を変えていないが、リニアアンプでは端部エコーを観察するために探傷感度を 4 倍 (+12dB) に高めている。採取したリニアアンプの A スコープ画像では、端部エコーは周辺のノイズとのエコー高さの差が 6dB 程度ありエコーのトラベルを観察することで端部エコーを特定することが可能となっている。一方、ログアンプではノイズと端部エコーの区別が困難となっている。

ここで注目すべき点は SCC の開口部エコー及び端部エコーともログアンプによる探傷では感度の設定を変えなく表示可能であるが、リニアアンプによる探傷では検出する対象が SCC 開口部か端部かにより感度レベルの再設定が必要な点にある。このように、ログアンプを使用した場合は高い感度で探傷しても微小なエコーまで漏れなく記録が可能であるが A スコープ上の SN 比は低くなる。

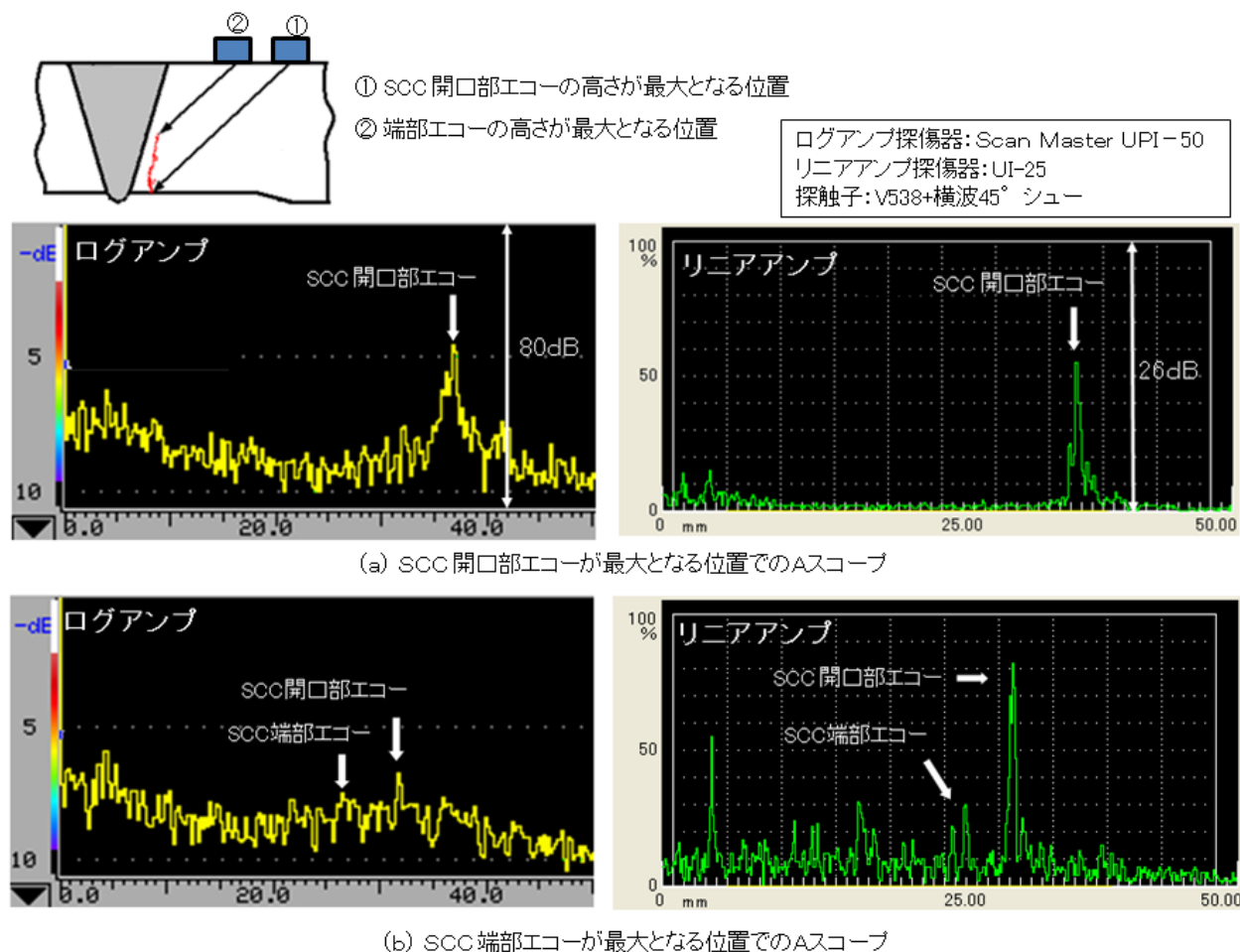


図 3-34 リニアアンプとログアンプの A スコープの比較

(2) 垂直探傷での B スコープ評価

垂直探傷はブローホール、スラグ巻き込みなどの体積欠陥やラミネーションなど探傷面に平行な面状欠陥の検出に用いられ、SCC のように超音波ビームに平行する面状欠陥の検出は困難と考えられている。しかし、高感度探傷では欠陥先端のエコーを検出できる可能性があり、底面反射波と端部エコーのように検出感度差の大きい反射体を同時に扱う場合にはログアンプの利点が生かせると考え、二つのアンプの B スコープ画像を比較評価した。

図 3-35 は Scan Master upi-50 及び UI-25 で採取した 350A 試験体の A スコープ及び B スコープを示す。画像は色調に惑わされずに画質を評価するために、白黒の階調表示とした。参考に試験体端面の写真を示す。探傷では写真に示した試験体端面に沿って 0.2mm ピッチでデータを採取した。探触子は広帯域型の 5MHz 垂直探触子 V109 である。試験体の底面エコーと SCC 端部エコーとの感度差は 42dB あるが、ログアンプの A 及び B スコープでは SCC 及び底面エコーが確認可能である。一方、当該 SCC

の端部をリニアアンプの B スコープで観察するには底面エコーを 80%CRT とする通常の探傷感度に 32 dB を加える必要があり、この場合は底面エコーが飽和してしまう。以上の結果より、大きな感度で小さな欠陥を探傷する場合はログアンプが有利となることが確認できた。

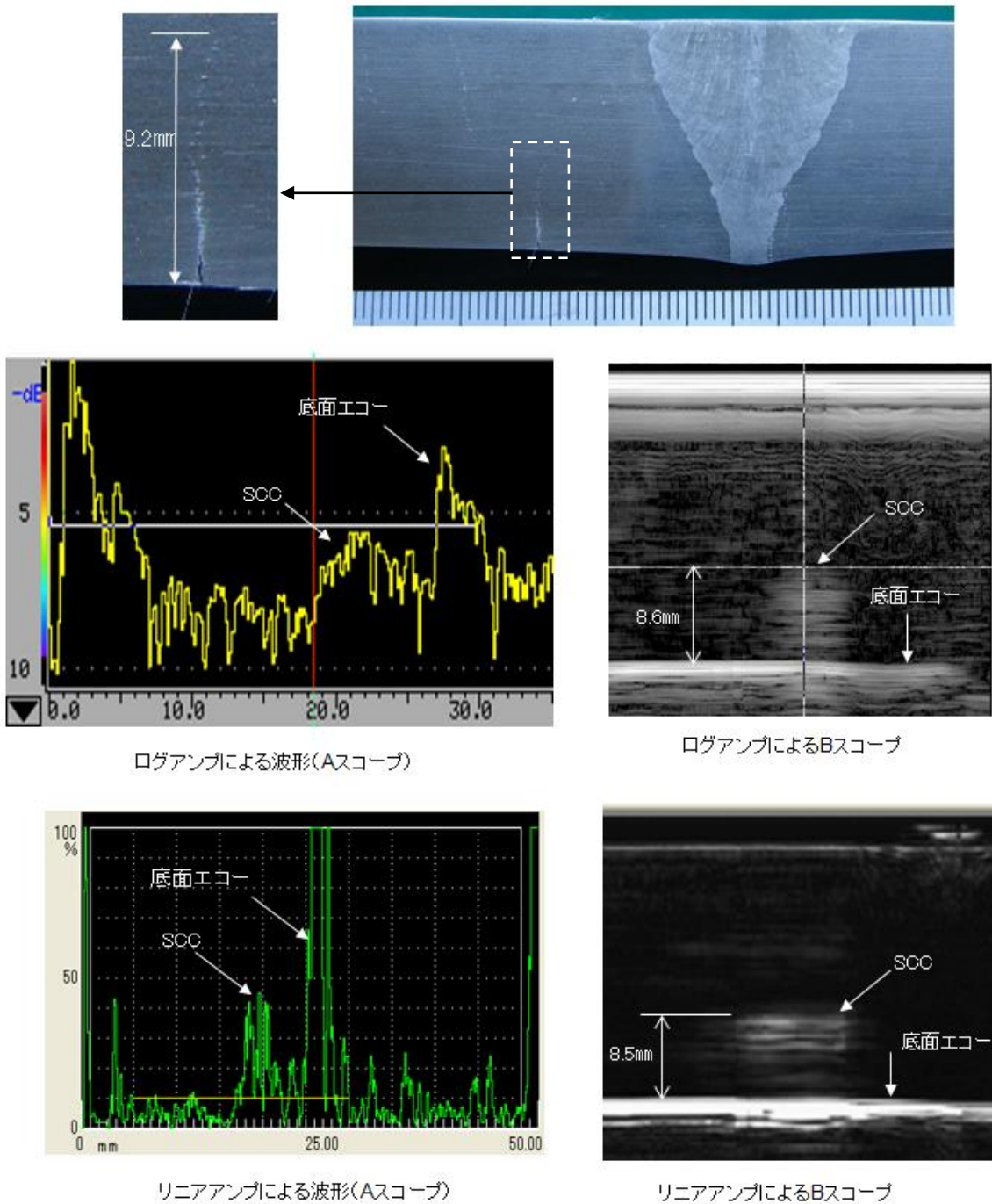


図 3-35 SCC 試験体の垂直探傷におけるリニアアンプとログアンプ画像の比較

(3) 斜角探傷での B スコープ評価

図 3-36 は斜角探傷に使用した試験体側面のマクロ写真を示す。探傷では試験体端面沿いに溶接線に向かって走査し、0.2 mmピッチでデータを採取した。探触子は 10MHz の広帯域探触子 V538 を横波 45° 用シューと組み合わせて使用した。この場合の実測中心周波数は約 4.7MHz、下限周波数 2.0MHz、上限周波数は 7.4MHz であった。使用した超音波探傷器は UI-25 及び Scan Master upi-50 である。

図 3-37 は二つのアンプで採取された B スコープの比較を示す。図 3-37 (a) はリニアアンプで採取した B スコープを示す。探傷感度はノイズレベルを表示器の 10% に設定した。リニアアンプによる探傷では SCC 開口部が明確に表示されるとともに、小さな端部エコーが表示されている。また、B スコープの上部に微かに母材と溶接金属の境界部が表示されている。配管内表面エコーはエコー高さが低く明確には識別できない。図 3-37 (b) はログアンプで採取した B スコープを示す。探傷感度は試験体のコーナエコーを -20dB (表示器高さで 80%) に設定し、0dB から -80dB の範囲のデータを採取した。B スコープの解析感度幅は全ての波形データを包含できる 0dB から -60dB とした。この B スコープは SCC 開口部エコーと端部エコーの他に微かではあるが溶接部と母材の境界部及び試験体内表面エコーも描出し、ログアンプでは SCC に加えて周囲の状況も併せた情報が取得できることが確認できた。図 3-37 (c) はログ探傷データの解析の感度幅を -20dB から -46dB までの 26dB に狭めて B スコープを描画している。これは、-20dB が SCC 開口部エコーの最大波高に相当するため、リニアアンプ探傷器で SCC 開口部エコー高さを表示器の 100% に設定して 5% の範囲までを観察するのに等しい設定となる。したがって、この B スキャンにはログ階調表示のために多少描写が異なるが、リニア探傷画像と同じ情報が表示されている。このようにログアンプは採取範囲がリニア探傷におけるデータ採取範囲を包含しているため、データ処理の段階でリニア画像と同等の描写を行うことが可能である。

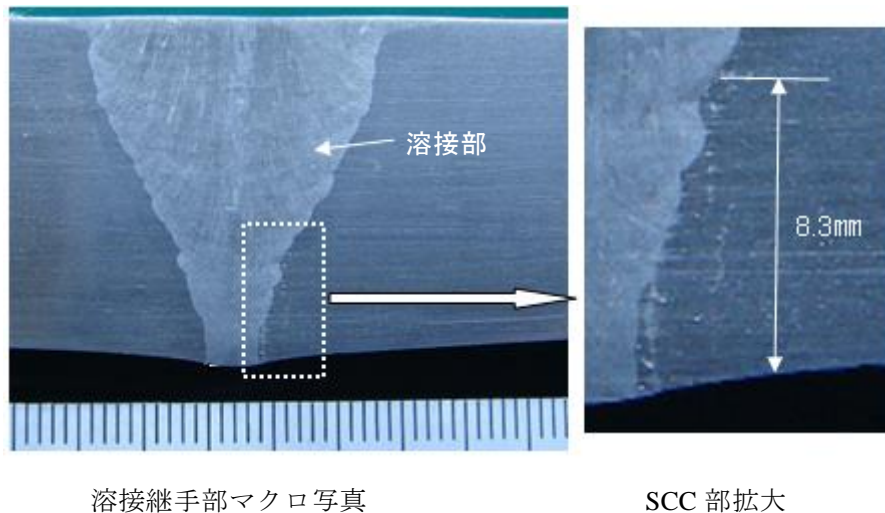
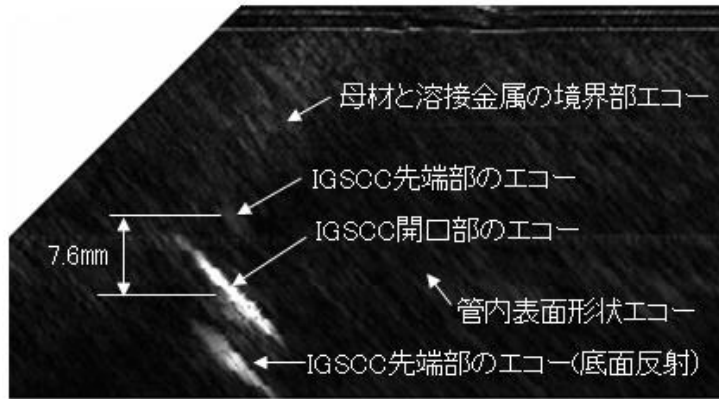
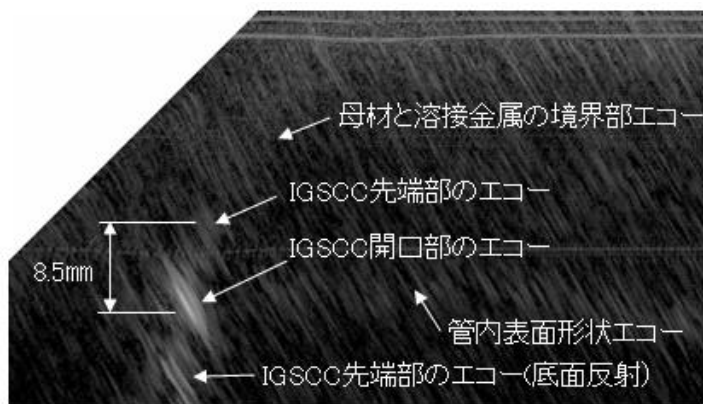


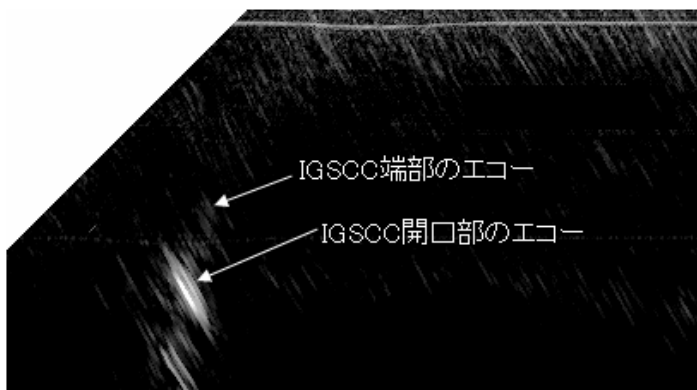
図 3-36 SCC 付試験体のマクロ写真と SCC 部拡大



(a) リニアアンプで採取した B スコープ



(b) ログアンプで採取した B スコープ (解析感度幅 60dB)



(c) ログアンプで採取した B スコープ (解析感度幅 26dB)

図 3-37 リニア及びログアンプで採取した B スコープの比較

図 3-38 は横波探傷で使用した周波数 10MHz の広帯域探触子 Panametrics V538 と縦波 45° シューを組み合わせ、ログアンプ型超音波探傷器 Scan Master upi-50 で採取した B スコープ画像を示す。探傷感度は試験体のコーナエコーを-30dB に設定し、0dB から-80dB の範囲のデータを採取した。なお、横波 45° 探傷ではコーナエコーを-20dB に設定したが、縦波の場合はコーナエコー高さが横波より低下するため、設定可能な最大高さの-30dB としている。試験体コーナエコーが-30dB であるため、B スコープの解析感度幅は-10dB から-60dB の 50dB 範囲とした。

周波数 10MHz の広帯域探触子を縦波 45° シューと組合せた場合の実測中心周波数は約 8.8MHz、下限周波数 5.6MHz、上限周波数は 12.0MHz であり、横波シューを使用したときの周波数帯域とは異なっている。しかし、ステンレス材料中の超音波波長は横波及び縦波とも約 0.7mm であり、波長の点では同等の分解能が期待できる。

図 3-37 との比較では、縦波探傷は SCC の開口部エコーの画像は横波探傷に比較してノイズレベルの差を割り引いても粗くなっている。これは図 3-15 に示したように 10MHz 縦波超音波の波数が横波より多いためと考えられる。縦波では溶接金属と母材の境界部からのエコーは強く出ているが管内表面からのエコーはほとんど得られていない。また、縦波は底面反射時にモード変換が起きるため、1 回反射後に SCC 先端を捕らえる波は確認できない。さらに、縦波 45° 探傷ではシューから試験体面への入射角が小さいために探傷面からの深さ約 15 mm の付近にシューエコーが出現し、探傷の妨げとなっている。

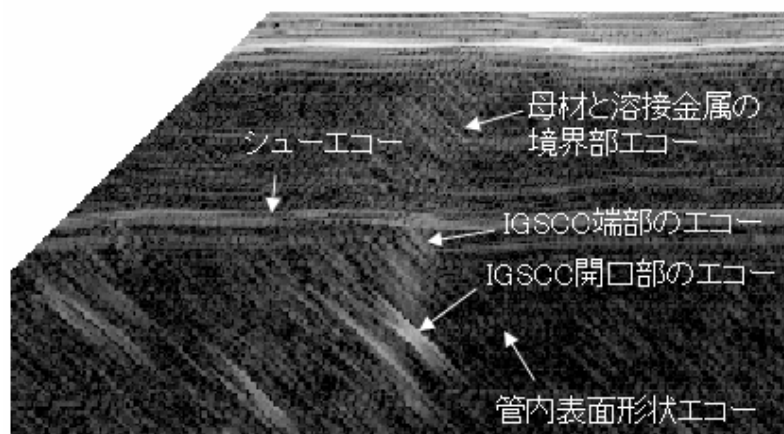


図 3-38 ログアンプで採取した 10MHz 45° 縦波探傷の B スコープ画像

3.7 まとめ

本章はステンレス鋼配管溶接部の SCC を対象に、手動探傷で得られた SCC の検出及び深さ測定のノウハウを整理すると共に、これらのノウハウが超音波探傷画像ではどのように表現されるかについて B スコープ画像を中心に示した。これにより、これまで手動超音波探傷技術者個人の断片的なノウハウとなっていた SCC の判定及び深さ測定技術に関して系統立てた説明が可能となり、SCC 探傷技術の教育と信頼性向上に貢献できると考える。

さらに、新しい手法として周波数フィルタを使った反射源種類別の画像化を試みると共に、エコー高さの小さな反射源の情報採取を目的として、ログアンプを使用する探傷画像の活用について検討した。本章ではこれらの検討により SCC の検査技術及びその画像化に関して次に示す知見を得ることができた。

(1) 探傷周波数

SCC の手動探傷では多くの場合 2MHz が使用されてきたが、探傷結果を画像化して観察する場合は広帯域 5MHz が SCC の開口部、SCC 端部及び溶接部周辺の形状を描写するのに有利である。ただし、5MHz 広帯域探触子の手動探傷での使用は、2MHz 広帯域探傷に比較してエコー高さが低くなること及び指示の表示範囲が狭まる結果、小さな SCC を見逃す可能性があり推奨できない。

(2) 超音波の波数と探傷モード

使用する超音波の波数は探傷画像の画質に大きく影響し、良質の画像を得るにはできるだけ波数の少ない超音波を使用するのが良い。また、縦波は横波と比較して母材と溶接部の境界部は良く表現できるが配管内表面は描画できないなど、縦波と横波ではそれぞれ描画に有利な条件が異なるため、目的に合わせて使い分ける必要がある。

(3) 溶接部周辺形状の画像化

これまでの手動超音波探傷ではノイズエコーとして無視されてきたエコー高さが 5% 以下のエコーには溶接金属と母材の境界部や管内表面など溶接部の形状に関する情報が含まれている。このため、溶接部周辺形状の画像化ではノイズレベルの情報を漏れなく評価するためにデータ採取及び解析感度の設定が重要な因子となる。

(4) 周波数フィルタを使った反射源の判別と画像化

溶接金属と母材の境界部や管内表面からのエコーは高周波成分が多いことが確認できた。周波数フィルタを使用してこれらの反射源を選別して画像化する手法を試みた結果、SCC 端部の認識は容易になるとの成果は得られたものの反射源毎に選別した画像を提供するまでは至らなかった。この原因としては、反射源による周波数のシフトは限定的であり、また、現在の広帯域探触子は周波数スペクトルが平坦では無いことが挙げられる。

(5) ログアンプの評価

エコー高さの高いエコーからノイズレベルのエコーまでを漏れなく採取して評価するためにログアンプを使用する方法についてリニアアンプとの比較で評価した。その結果、SCC、配管内表面、溶接金属と母材の境界部エコー間では高さの差が大きく、リニアアンプ付の超音波探傷器を使用する場合は描画対象に合わせた感度調整が必要であるが、ログアンプではデータ採取時の感度調整が不要であり、画像化を目指した探傷ではログアンプの使用が有利であることを確認した。

参考文献

- 1) 清水敬輔, 設楽親, 小林輝男, 山下理道, 岡田亮兵, 稲垣哲彦, 中田親秀, 長松弘, 近畑英之, 山本幸司, 枅明彦, 牧原善次, 高津光志, 岩田潔, 東海林一: 原子炉再循環系配管への超音波探傷試験実施・評価に関するノウハウ, 保全学, 8(4), pp.31-36, (2010)
- 2) T. Sasahara and F. V. Ammirato, “Automated ultrasonic pipe examination and data interpretation”, EPRI NP-5760, (1988)
- 3) H. Yoneyama, S. Shibata and M. Kishigami, “Ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds, False indications and the cause of their occurrence”, NDT International, (1978)
- 4) 岸上守孝, 米山弘志, 芝田三郎: オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷方法の研究, 石川島播磨技報, 第20巻第6号, pp.1-6, (1980)
- 5) J. A. Ogilvy, “Modeling of Ultrasonic Wave Behavior in Austenitic Steel”, Proceedings of 7th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, pp. 431-434, (1985)
- 6) JEAC 4207-2008 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷規程, 日本電気協会, pp.解24-解29, (2008)
- 7) T. Sasahara and F. V. Ammirato, “Automated ultrasonic pipe examination and data interpretation”, EPRI NP-5760, p.3-2, (1988)
- 8) T. Kawamoto, “Production of Controlled IGSCC for Large Diameter Pipe”, EPRI Report RP-1448-07, (1979)
- 9) T. Sasahara, H. Yoneyama, T. Arakawa, “Applications of new NDE techniques for the nuclear industry”, Proceedings, 10th International conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries, PP.759-763, (1990)
- 10) JEAC 4207-2008 : 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷規程, 日本電気協会, (2008)
- 11) 3060:2002 : 鋼溶接部の超音波探傷試験方法, 日本規格協会, (2002)
- 12) S. Neergaard, S.E. Iversen, W. Damgaard Kristensen, “System for Advanced Automated Ultrasonic Examination”, Proceedings of the 7th European Conference on Non-destructive Testing, pp.3040-3047, (1998)
- 13) 日本超音波医学会, 新超音波医学, : 第1巻 医用超音波の基礎, 医学書院, pp. 32-33, (2000)

第4章 フェーズドアレイ画像による SCC 検出と深さ測定手順の開発

4.1 はじめに

本論文は画像を使用する超音波探傷試験の現場への適用促進を目指すものであり、第3章では技術者個人のノウハウとなっている画像解析技術の公知化を目指して、ステンレス鋼配管溶接部の SCC を対象に手動探傷で得られたノウハウを整理して示すと共に、これらのノウハウが超音波探傷画像においてはどのように表現されるかを示した。

本章では第2章における PD 試験結果の分析で SCC 深さ測定に有効ではあるが未だ解析ノウハウの共有が十分では無いと評価されたフェーズドアレイ技術に関して、その探傷画像解析技術の公知化と工業分野での適用促進を目指して、第3章で示した画像解析のノウハウを盛り込んだフェーズドアレイ画像による SCC 検出及び深さ測定手順を開発する。

なお、開発する手順は汎用化を目的とするために、特殊な形状のアレイ探触子や複雑な解析プロセスを必要とする三次元表示などの特殊な装置や機能は使用せず、一般的なアレイ探触子と探触子位置データと組み合わせて使用するフェーズドアレイ探傷器ならばどの製品でも備えている基本的な解析機能を組み合わせて使用するもの開発する。

4.2 試験体及び探傷装置

本章で探傷例として使用した SCC 付試験体の詳細と探傷装置を以下に示す。

(1) 試験体

試験体は第3章で使用した 350A 試験体とした。図 4-1 は 350A 試験体の内面及び端面の浸透探傷試験 (PT) の結果を示す。図中には後述する探傷部位及び位置関係を記載している。SCC は裏波の両側の熱影響部及び A 側の母材部に存在し、試験体 A 側熱影響部の SCC は試験体の端面の写真が示すように、(+) 側端面では開口せず、(-) 側端面では外表面まで達する深い SCC となっている。試験体の B 側で熱影響部にある SCC は、深さは浅いが試験体の周方向全長にわたって続いている。

(2) 超音波探傷機器

探傷には以下の超音波探傷機器を使用した。これらの機器は、近年のフェーズドアレイ探傷において標準的に使用される構成としている。

(1) フェーズドアレイ探傷器：OmniScan MX PA (R/D Tech 社)

(2) フェーズドアレイ用探触子：5K0.6(0.5/0.1)×10-16 (KGK 社)

なお、フェーズドアレイ探触子は横波 45°及び縦波 45°シューを装着して使用した。

(3) 解析ソフトウェア：Ultra Vision 1.1Q5 (R/D Tech 社)

データ解析では、画像評価として標準的に使用されている波形表示 (A スコープ)、断面表示 (B スコープ)、平面表示 (C スコープ) 及び軸方向断面表示 (D スコープ) を使用した。

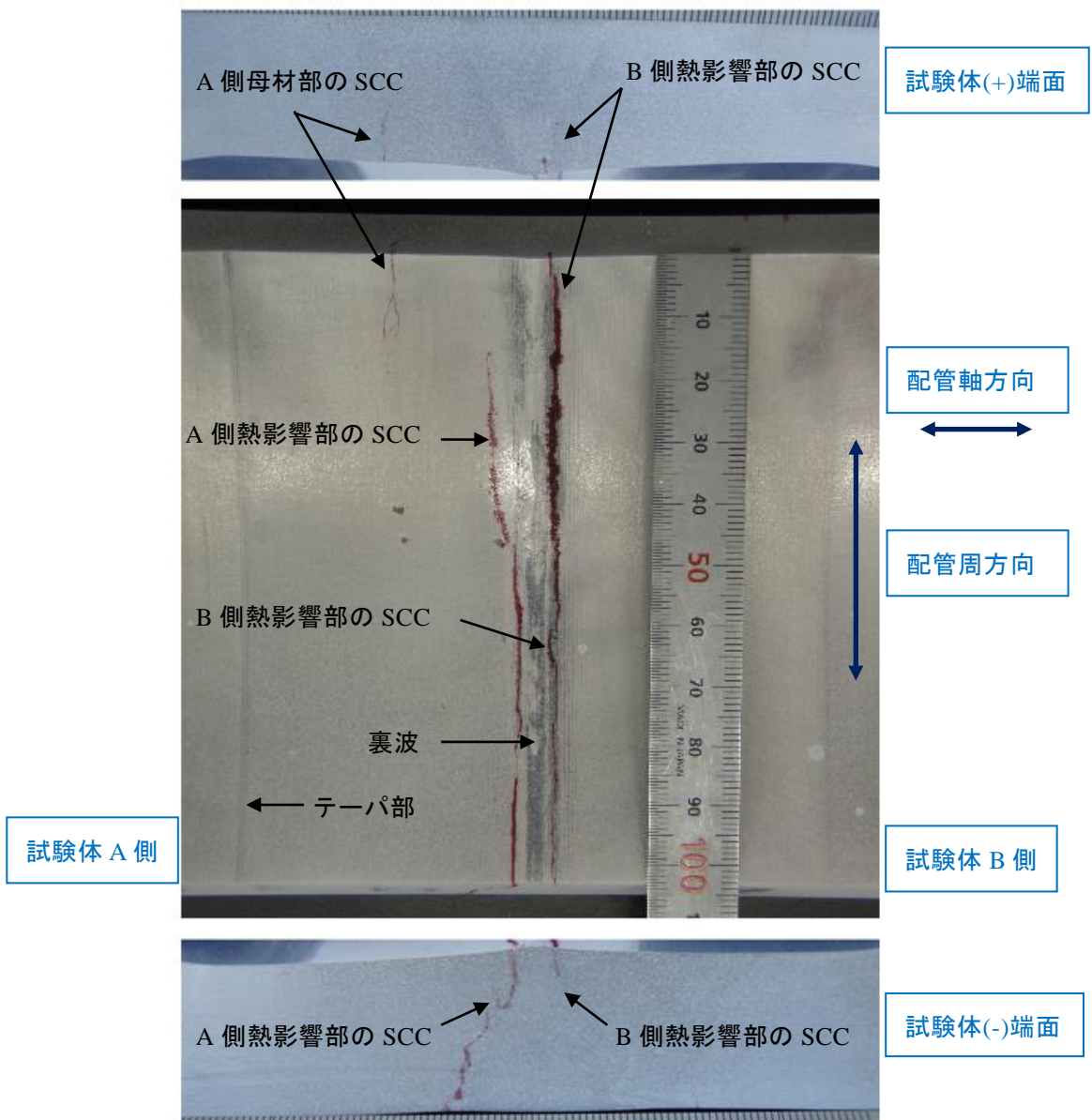


図 4-1 350A 試験体の SCC 分布と配管位置関係の呼称

4.3 データ採取方法

本章の探傷例では以下の方法でデータを採取した。

(1) 走査方法

フェーズドアレイ探傷では、リニアスキャン、セクタスキャン、ダイナミックフォーカシング等様々な超音波ビームの操作が可能である。ここでは、配管溶接部のフェーズドアレイ探傷法として一般的に使用されている、超音波ビームを溶接部に向けてセクタスキャンしながら配管軸方向に探触子を走査する手法を採用した。探触子の走査及びデータ採取に関する詳細は以下の通りである。

走査軸：配管軸方向、データ採取ピッチ 1mm、溶接中心から 110mm の範囲を探傷。

ステップ軸：配管周方向、ステップ幅 1mm、試験体（-）端から周方向 10mm の位置を基点（0 mm）として、90mm の範囲を探傷。

探傷モード：横波及び縦波シユーへの交換によって変更。

セクタ走査：30° から 70° まで、データ採取ピッチは 1° 。

走査装置：配管探傷用 X-Y スキャナを使用。

図 4-2 に試験体 A 側から探傷した場合の探触子走査と探傷画像の関係を示す。ここでは、探傷画像として探触子位置情報が記録可能なフェーズドアレイ探傷装置に共通する、波形表示(A スコープ)、走査方向の断面画像 (B スコープ)、平面画像 (C スコープ)、走査に直交方向の断面画像 (D スコープ) を使用している。

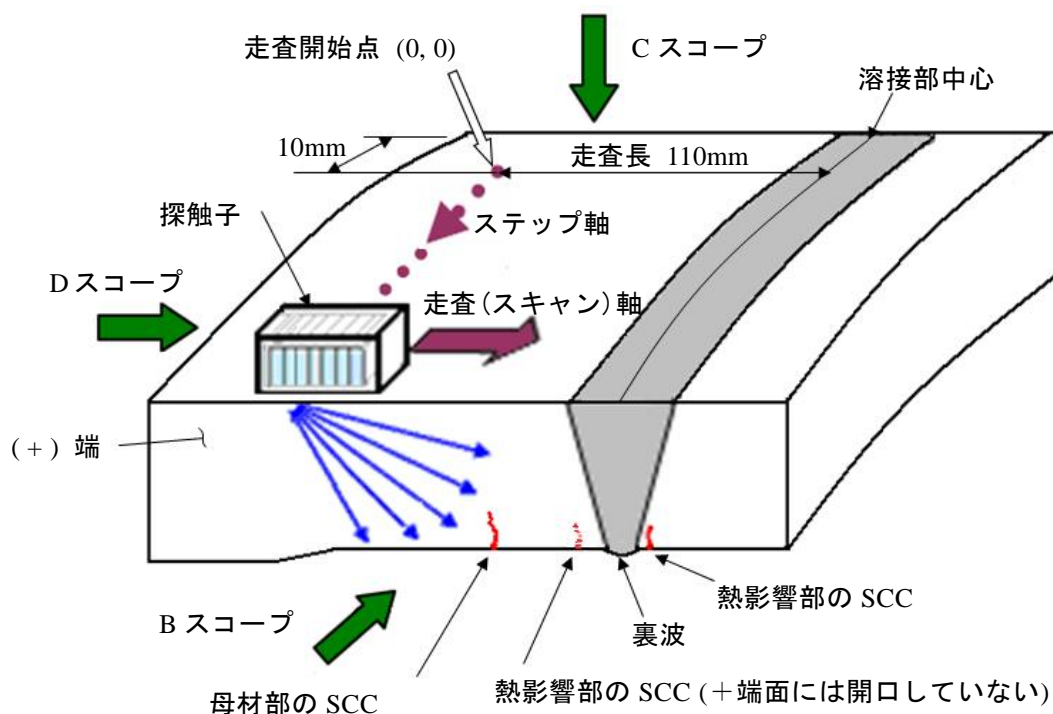


図 4-2 探傷時の走査パターンと B, C, 及び D スコープの関係

(2) 感度の校正

規格¹⁾²⁾による感度校正では横穴等の標準反射体を基準とするが、き裂深さ測定のように詳細にエコーを観察する必要がある場合はノイズレベルを基準とする手法も認められている¹⁾。ここでは画像データを重視する立場から SCC の発生部位である管内表面近傍の材料ノイズエコーが表示器の約 5% 高さになるように設定した。この方法のデメリットとして材料ノイズのレベル確認のための予備探傷が必要になる場合があるが、材料ノイズのレベルを 5% に抑え、表示器の 5% から 100% までの 26dB の範囲を SCC エコー、形状エコー、溶接部エコー等の表示範囲とすることにより、エコー高さの階調表示機能を最大限に利用できる利点がある。

4.4 データ品質確認方法

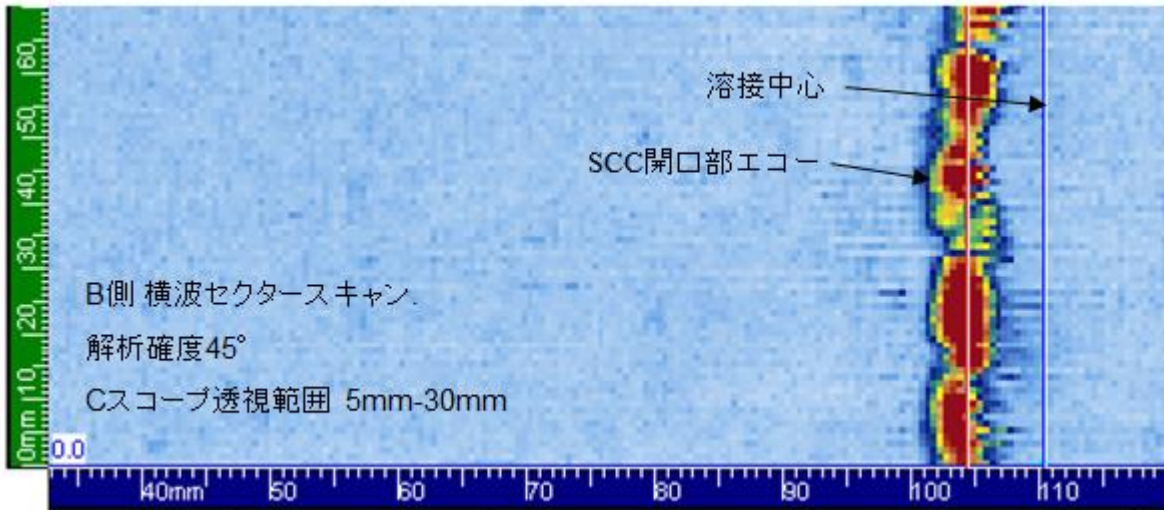
自動探傷装置等を使用して現場での探傷データ採取作業を完了した後の解析段階でデータ不良が判明した場合には、再度探傷作業をやり直す必要がある。この状況は現場では珍しいことでは無く、第 2 章でも採取データの品質不良のために SCC の先端を見逃す例を説明した。したがって、検査技術者として、データ採取中或いは採取直後に必ず実施すべきことは採取データの品質確認であり、データの良否見極めは検査技術者にとって必須の技量となっている。

図 4-3 に SCC 探傷における B 及び C スコープを使ったデータ品質確認の例を示す。データ採取には、ステンレス鋼配管溶接部の探傷で一般的に使用されている横波モードを使用した。図 4-3 (a) は探傷が良好に行われた場合の C スコープ画像を示す。溶接部近傍の約 20mm の範囲は、表示された色調にややむらがあり、多少の感度変化があったことが読み取れる。これは、溶接部近傍の探傷面に熱収縮による凹凸があるためであり、全体の色調はほぼ均一で、SCC 開口部の画像にも異常な断続は認められず、良好な探傷が行われたことが確認できる。

図 4-3 (b) は、図 4-1 に示した試験体と同仕様の SCC 付与試験体を使って採取した探傷不良の例である。管軸方向に走る白線は探傷データが取り込まれなかったことを示している。探傷不良には様々な原因が考えられるが、探触子が傾いた等の理由で探触子と探傷面との良好な接触が保てなかった可能性が大きい。この他にも、走査速度がデータの採取速度に対して速すぎる場合にも探傷データの抜けが発生する。図 4-3 (b) の画像は図 4-3 (a) の画像に比較して色調にむらが多く、探触子と探傷面間の接触が安定していないことを示している。更に、走査装置の位置ずれに起因すると思われる SCC と裏波像の歪みが認められる。これらの情報を総合すると、探傷装置の機械的な作動あるいは、探傷速度の設定に問題があったことが読み取れる。

図 4-3 (c) は良好な探傷が行われた場合の B スコープを示す。B スコープでは様々なエコーの位置関係から探傷結果の妥当性を評価することができる。図 4-3 (c) の例では、溶接中心の約 6mm 手前にある内表面付近のエコーはその位置から SCC 開口部エコーと判断できる。裏波は手前の SCC の影になり検出されないと考えれば全てのエコーがその位置関係から矛盾なく説明可能であり、妥当なデータであると判断できる。B スコープ画像ではこの他に以下のような確認が可能である。

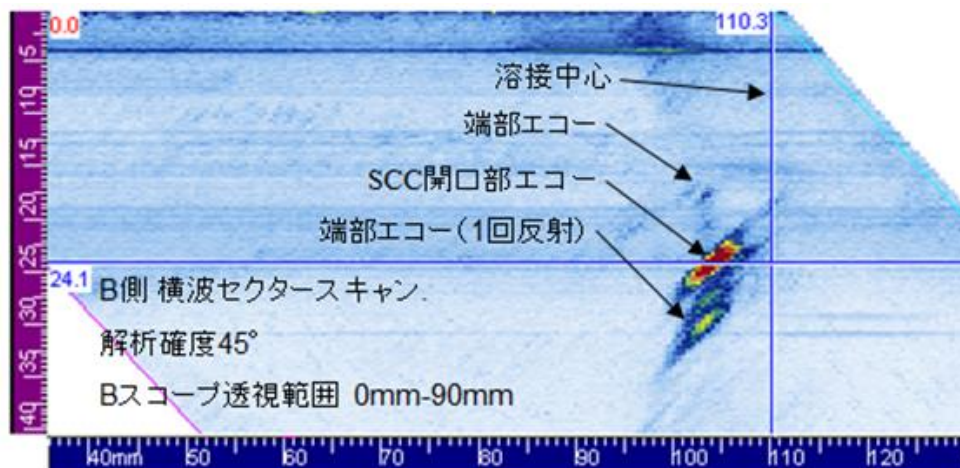
- ① 表面エコーの幅が広く、探触子と探傷面間の接触に問題がある。
- ② 走査時に外来の電氣的ノイズが多く混入している。
- ③ 走査速度が速いか、データ採取量が多いかなどの理由で走査時にデータの抜けが多い。



(a) データが良好である例 (Cスコープ)



(b) データが不良である例 (Cスコープ)



(c) データが良好である例 (Bスコープ)

図 4-3 B スコープと C スコープによる採取データの品質確認

4.5 探傷画像とその評価法

(1) C スコープの評価

探傷データの評価は SCC の有無確認から開始する。図 4-4 は 350A 試験体 A 側の縦波探傷で採取した B 及び C スコープである。B スコープは試験体の周方向全幅を透視している。評価の手順として、最初に B スコープで表層部の不感帯幅と管内表面位置を確認し、それに基づいて C スコープの板厚方向の透視範囲を決定する。透視範囲は原則として表層部の不感帯を除いた深さから管内表面を少し超える範囲までとする。縦波探傷の透視範囲が広過ぎる場合 (5mm~30mm) には、図 4-4 (b) の C スコープのように透視範囲内にモード変換エコーが含まれ、多くのエコーが重畳して評価の障害となる場合がある。透視範囲を図 4-4 (c) のように内表面近傍 (24mm~28mm) に設定すれば SCC 開口部に限定した像を観察することが可能となる。

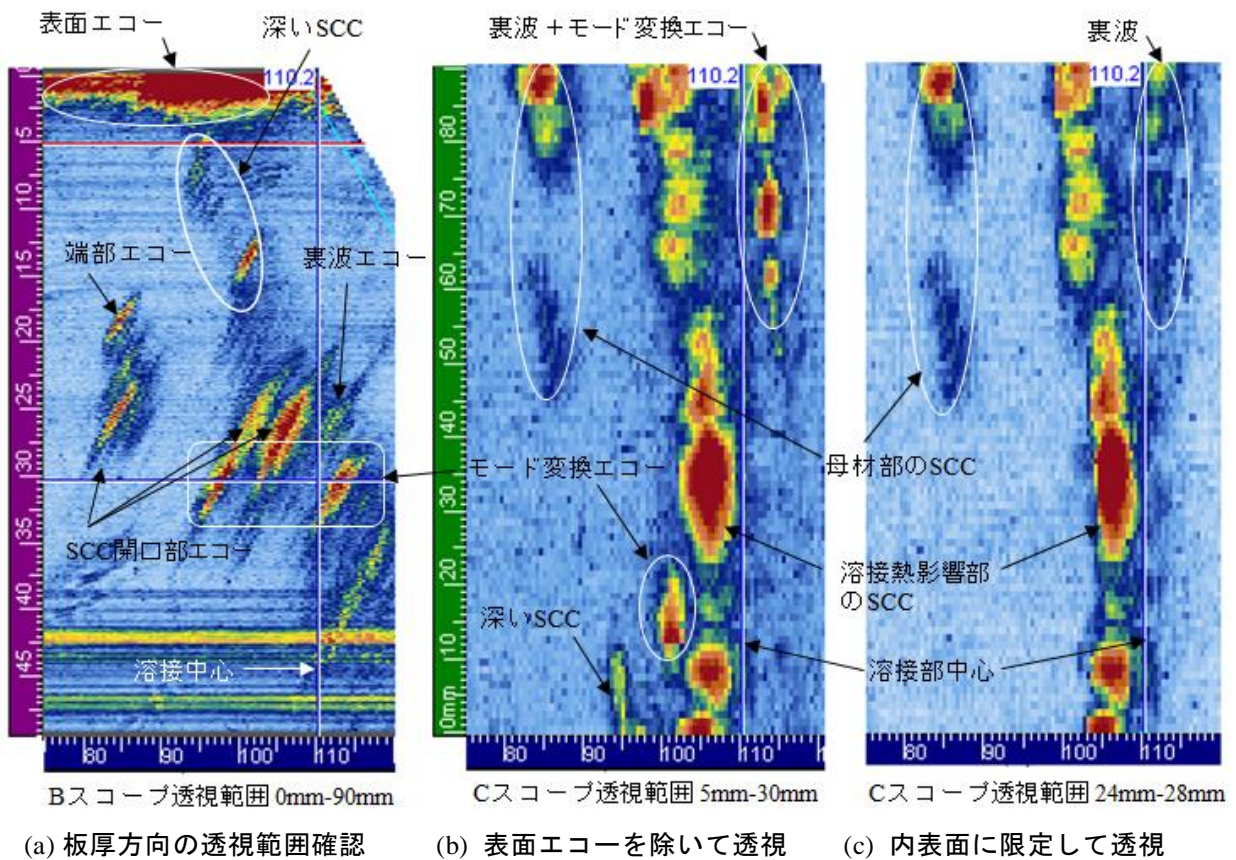
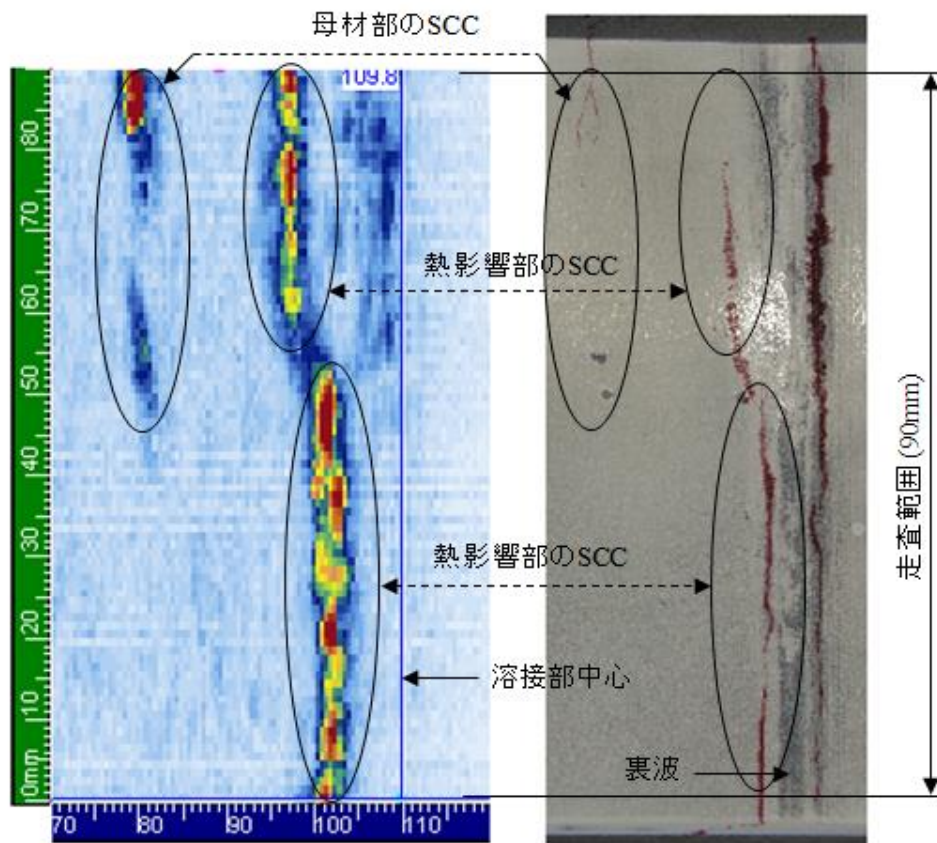


図 4-4 C スコープの透視範囲設定による探傷画像の変化

図 4-5 は横波探傷における板厚方向の透視範囲が 24mm から 28mm の C スコープを試験体内表面の PT 結果と比較したものである。この図では PT で検出できない範囲を含めて C スコープが SCC 開口部の形状を的確に描写していることを示している。図 4-4 (c) に示した縦波による C スコープ像と比較すると、横波探傷の場合は波長が短い分だけ画像の分解能が高くなっている。



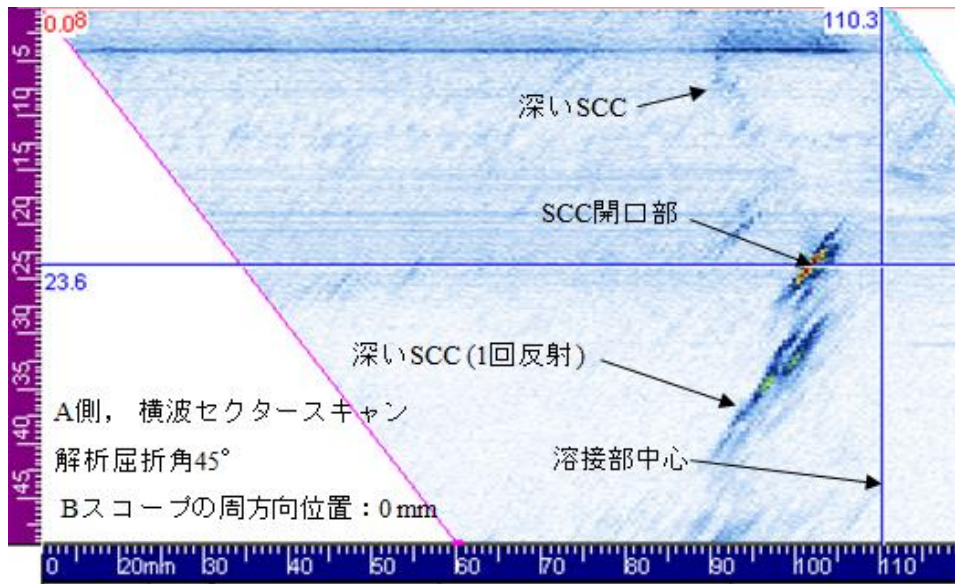
A側，横波セクタースキャン，解析屈折角 45°

Cスコープ透視範囲：24mm-28mm

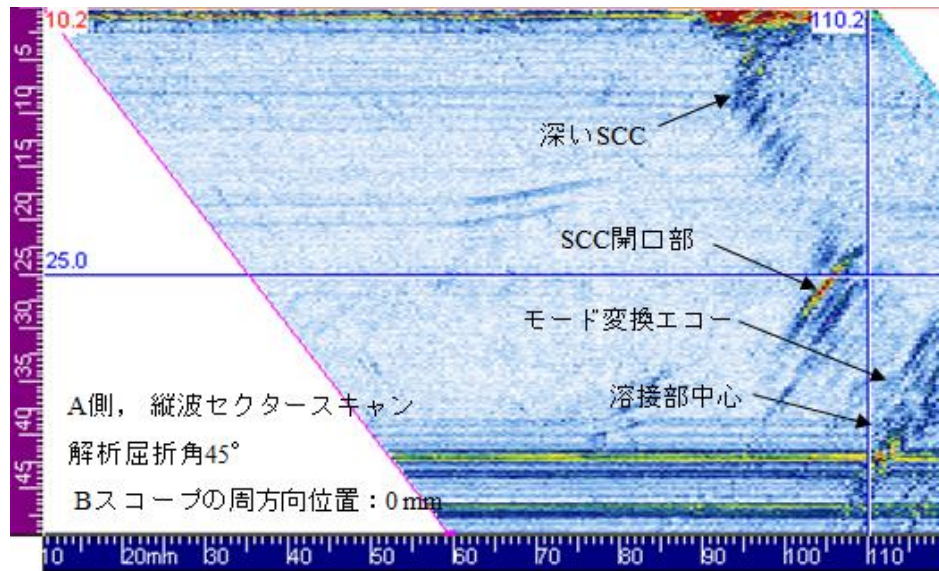
図 4-5 横波探傷による C スコープ上での SCC 描写

(2) B スコープの評価

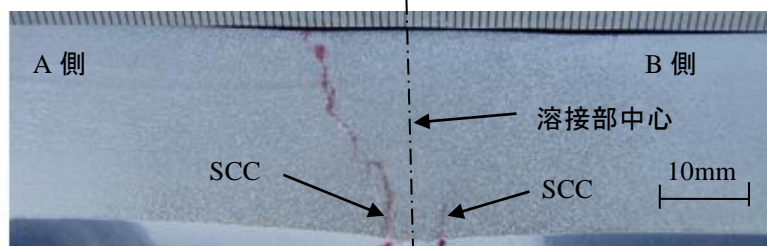
B スコープでは横波と縦波の違いが明瞭に現れる。図 4-6 は試験体 A 側（一）端の軸方向探傷で採取した B スコープと試験体（一）端面の PT 写真である。試験体 A 側（一）端面の SCC は溶接熱影響部に沿って表面にまで進展した深い SCC となっている。図 4-6 (a) に示した横波による B スコープでは直射で SCC の開口部及び SCC 面の一部を捉えている。この試験体の場合は、SCC が超音波の入射方向に傾いているため、SCC 面に対してエコーの反射し易い角度で入射する一回反射波によって SCC 面がより広範囲で捉えられていることがわかる。(b) に示した縦波による B スコープでは、直射で SCC 開口部と共に横波よりも広い範囲で SCC の面を捉えており、縦波は SCC 面の描写力が横波に勝っていることが理解できる。また、SCC が表面まで貫通する大きな面を構成しているため、縦波の特徴である複雑なモード変換エコーが得られている。



(a) 横波による B スコープ上での SCC の表現



(b) 縦波による B スコープ上での SCC の表現

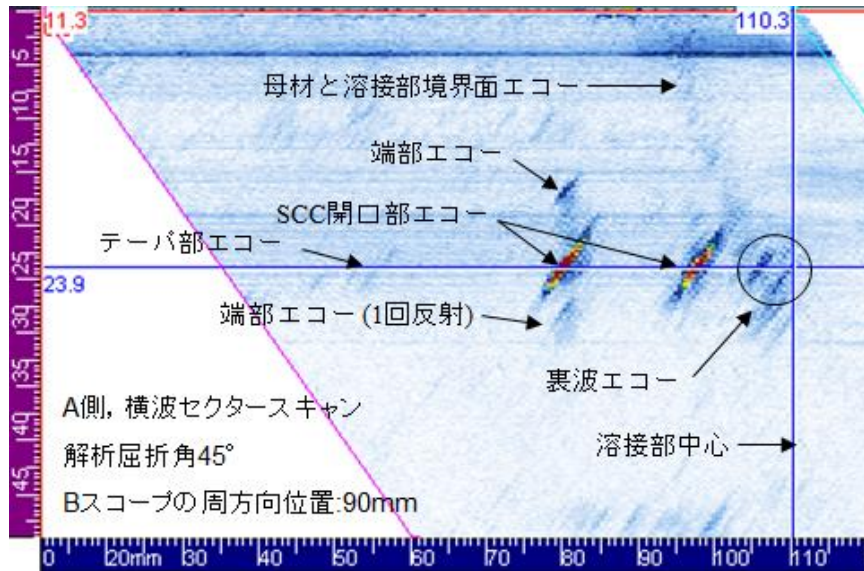


(c) 試験体 (-) 端面における SCC の PT 写真

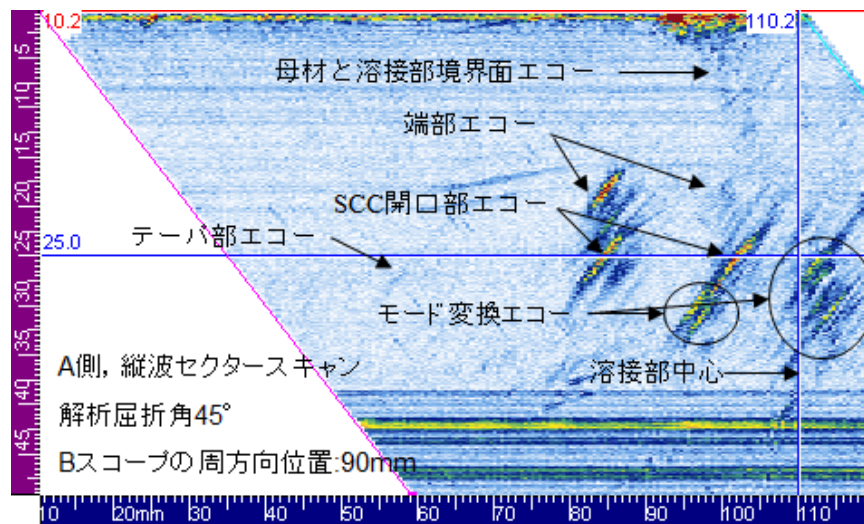
図 4-6 探傷モードによる SCC の B スコープ画像の違い A 側 (-) 端

図 4-7 は試験体 A 側 (+) 端の軸方向探傷による B スコープと試験体 (+) 端面及び内面の PT 写真を示す。A 側 (+) 端の溶接熱影響部の SCC は図 4-1 に示したように端面には開口はしていないが試験体の端に近いために検出・描画されている。図 4-7 (a) の横波による B スコープでは母材部 SCC の開口部と端部が、また溶接熱影響部近傍では SCC 開口部と裏波が検出されている。さらに、微かで

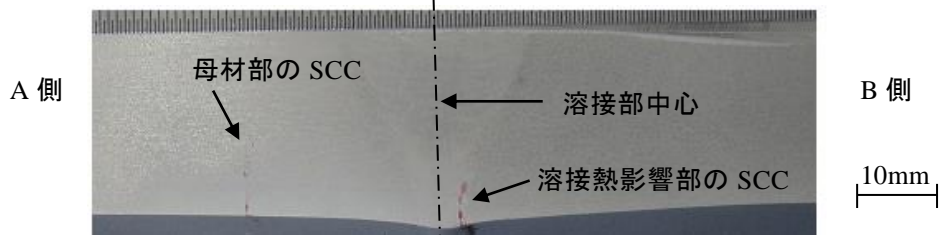
はあるが溶接金属と母材の境界及び管内表面が表示されており、SCC と溶接部の位置関係が把握可能なために SCC であることの判別が容易となっている。図 4-7 (b) の縦波による B スコープでは、母材部 SCC の開口部及び端部に加えてその中間からもエコーが得られるため SCC 端部の認識がより容易である。溶接熱影響部近傍では SCC 開口部エコーが観察できるが、裏波エコーはモード変換エコーに重なり判別できていない。



(a) 横波による B スコープ上での SCC の表現



(b) 縦波による B スコープ上での SCC の表現



(c) 試験体 (+) 端面における SCC の PT 写真

図 4-7 探傷モードによる SCC の B スコープ画像の違い A 側 (+) 端

(3) D スコープの評価

D スコープでは、B スコープについて述べたのと同じ理由で、横波と縦波では異なる画像を示す。

図 4-8 は A 側探傷での D スコープである。管軸方向の透視範囲は、試験体 A 側で溶接熱影響部にある SCC のみを描画するために、溶接部中心から A 側 20mm までの幅 20mm の範囲とした。D スコープでは、横波及び縦波ともに図中の破線で示すように、SCC 深さの大きな分布を知ることができる。ただし、横波と縦波では SCC 深さの表現が異なっている。すなわち、横波では図 4-8 (a) に示すように直射及び 1 回反射の両方で SCC の深さ分布が得られる。SCC が溶接熱影響部に沿って進展している場合は、一回反射波の超音波ビームがより垂直に近い角度で SCC 面に入射する可能性が高いために、精度の高い SCC の深さ分布が得られる場合がある。ただし、低炭素ステンレス鋼の場合は、第 1 章で述べたように SCC が溶接金属に向かって進展し先端が溶接金属内に至る場合があるので、溶接金属中を透過できない横波では正しい欠陥深さ分布を得ることができないことに注意する必要がある。一方、図 4.8 (b) に示す縦波探傷の場合は、モード変換波が混在しないように透視範囲を限定すれば、SCC 面を直射した超音波ビームによって描画された SCC の深さ分布を観察することができる。ここでも、直射の場合は縦波の方が横波よりも SCC の面エコーを捕捉する可能性が高いことを示している。

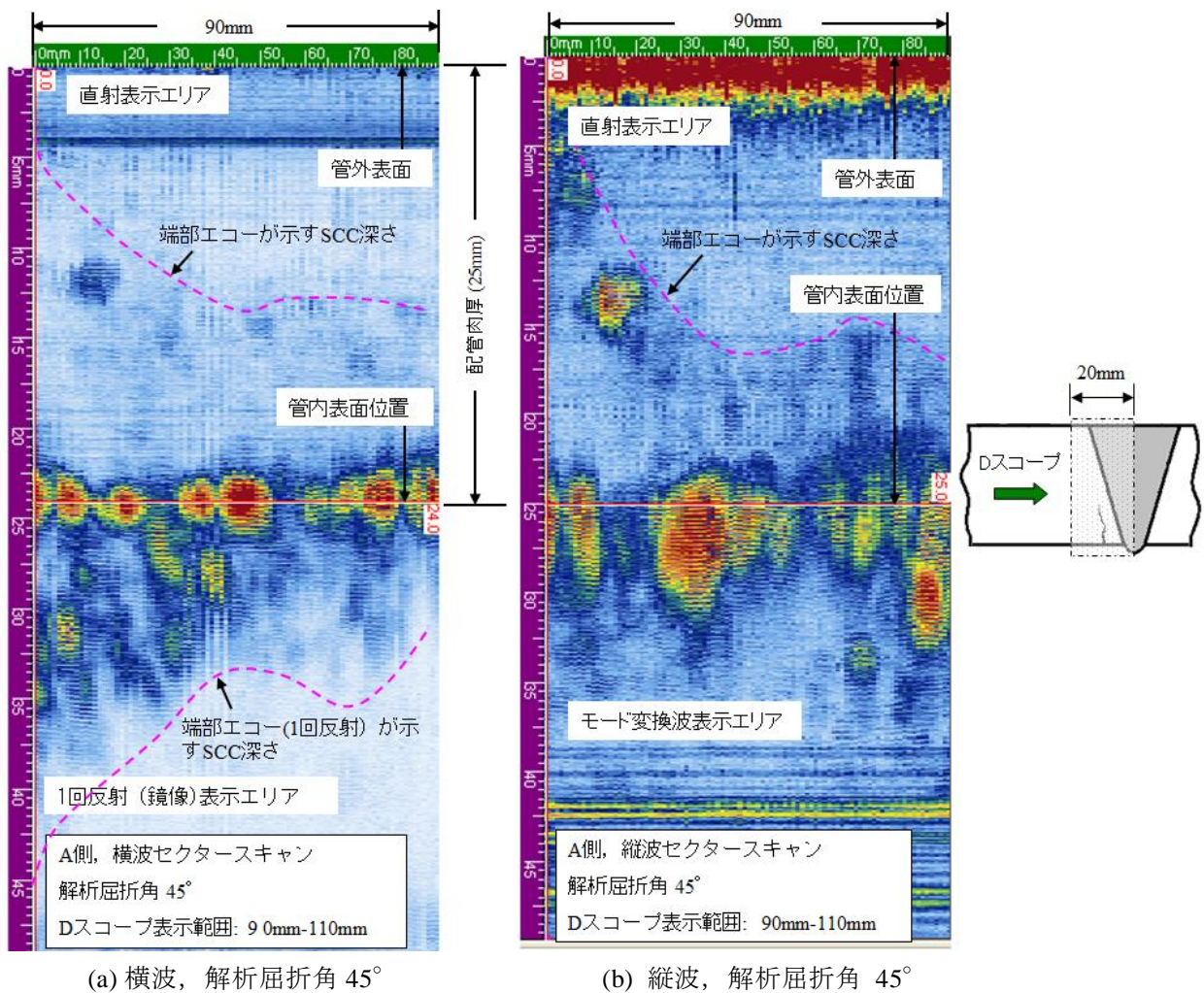
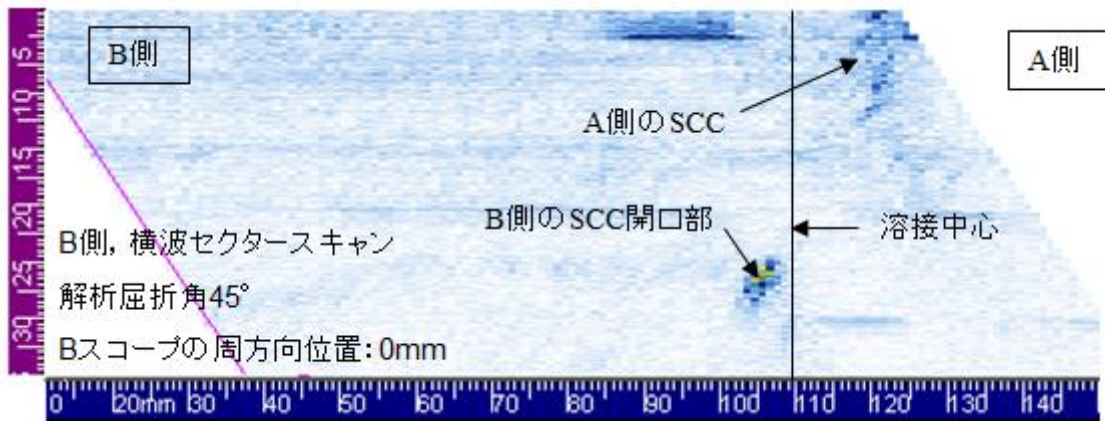


図 4-8 D スコープにおける横波と縦波の表示比較

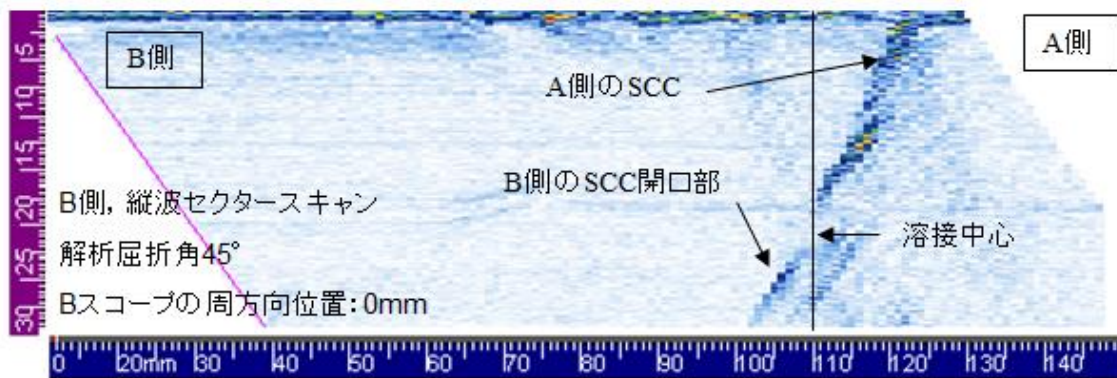
(4) 溶接部越しの SCC 探傷

ステンレス鋼配管溶接部への接近が片側からのみに限定されている場合には溶接部の反対側にある SCC を検出できるか否かは重要な課題であり，国内でもこの課題に関して実証試験が行われた結果，ステンレス溶接部内での減衰が比較的小さい縦波の使用が推奨されている³⁾。ここでは，貫通した SCC を対象に片側からの探傷でどのような画像を得ることができるかを横波及び縦波を使用して確認した。

図 4-9 の B スコープは試験体の（－）端 A 側の貫通 SCC を B 側より探傷した結果である。図 4-9 (a) の横波探傷では B 側 SCC の開口部と A 側 SCC の外表面近傍のみが検出されている。一方，図 4-9 (b) に示した縦波による探傷では B 側 SCC の開口部と溶接金属部を通して A 側 SCC 面の大部分を捉えることが可能であることを確認した。すなわち，SCC の先端が溶接部内あるいは溶接部の反対側にある場合でも，縦波を使用すれば検出が可能であることを示している。但し，ステンレス鋼溶接部内では縦波であっても超音波が屈曲して進むことが知られており⁴⁾，このために溶接部を透過した後の欠陥像が管軸方向に歪められていることに留意する必要がある。



(a) 横波探傷（解析屈折角 45°）



(b) 縦波探傷（解析屈折角 45°）

図 4-9 溶接部越しの SCC 探傷における横波と縦波の画像比較

4.6 SCC の深さ測定法

(1) 深さ測定方法

D スコープで SCC の大まかな深さ分布を確認した後に深さの測定を行う。現在実用的に最も信頼できる SCC の深さ測定方法は端部エコー法⁵⁾であるが、階調表示された B あるいは D スコープからは端部エコーの高さが最大となる点を特定することは難しい。このため、採取したデータから A スコープを再生し、A スコープの動画像を手動探傷と同じように観察することで深さ測定を行なう必要がある。その場合、A スコープには SCC 端部エコーと紛らわしい様々な反射源からのエコーが現れるため、端部エコーの見極めが重要となる。

図 4-10 に手動探傷における端部エコーの見極め方法を模式的に示している。これには SCC の形態的な特徴に由来する次に述べるような動特性が使用されている。

- ① 超音波ビームを SCC に向けたまま探触子を SCC に向かって前後走査させた場合、A スコープ上の端部エコーはエコー高さを変えながら時間軸上を移動する。
- ② SCC は長さを持つため、超音波ビームを SCC に向け、小刻みに端部を探しながら探触子を SCC の長さ方向に移動させた場合は端部の深さは緩やかに変化する。

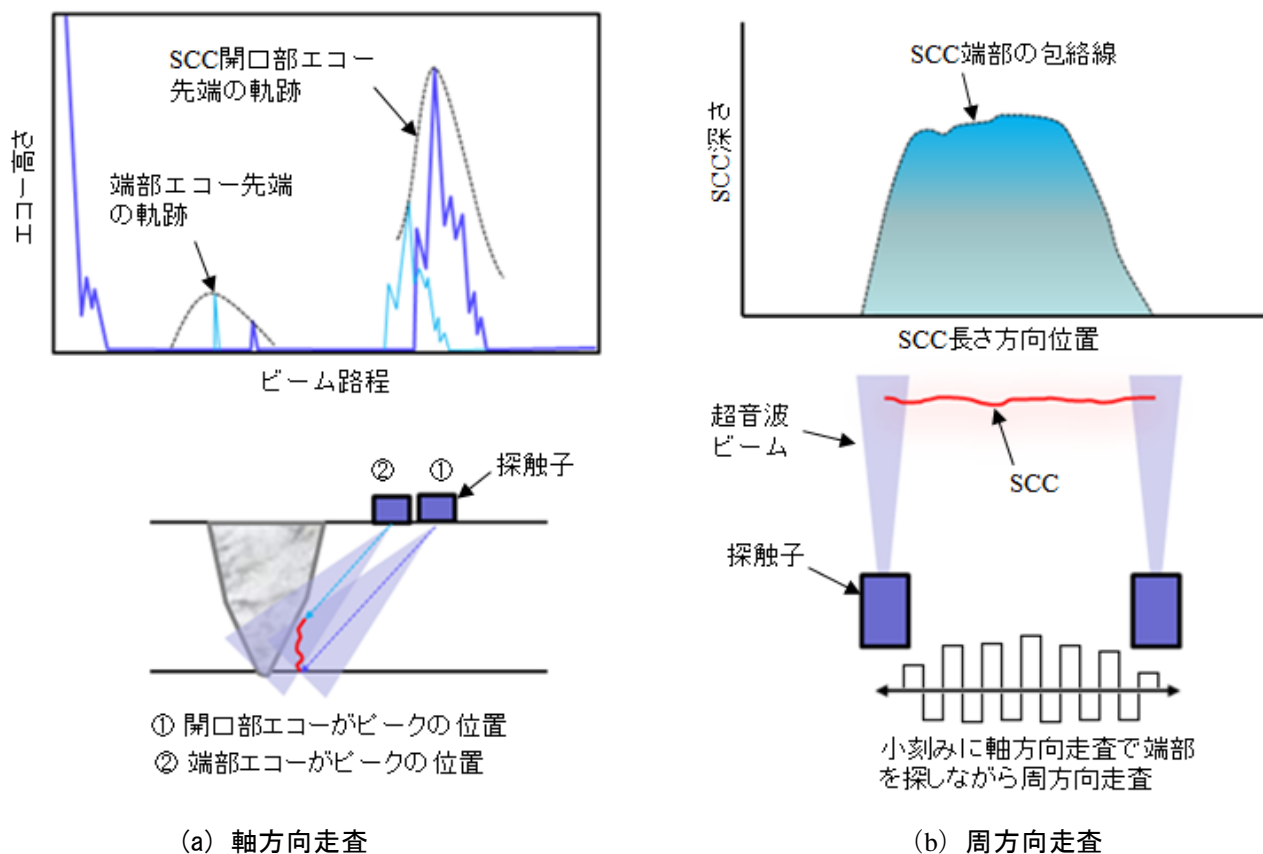
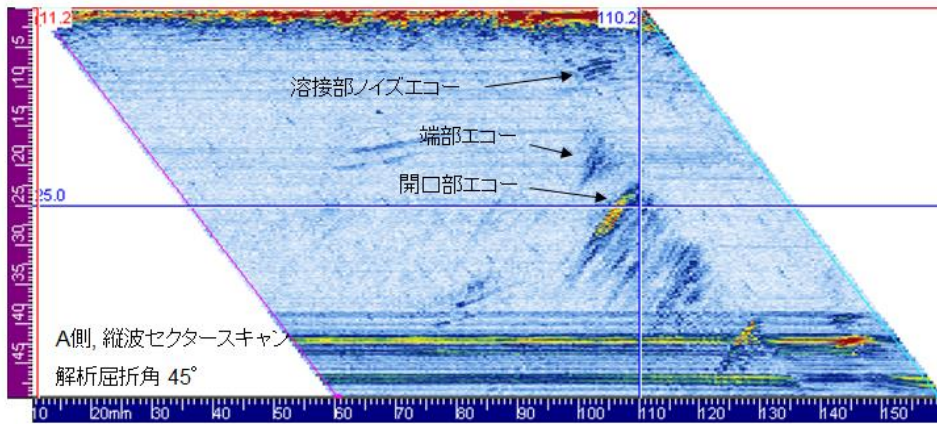


図 4-10 探触子走査時の端部エコーの挙動

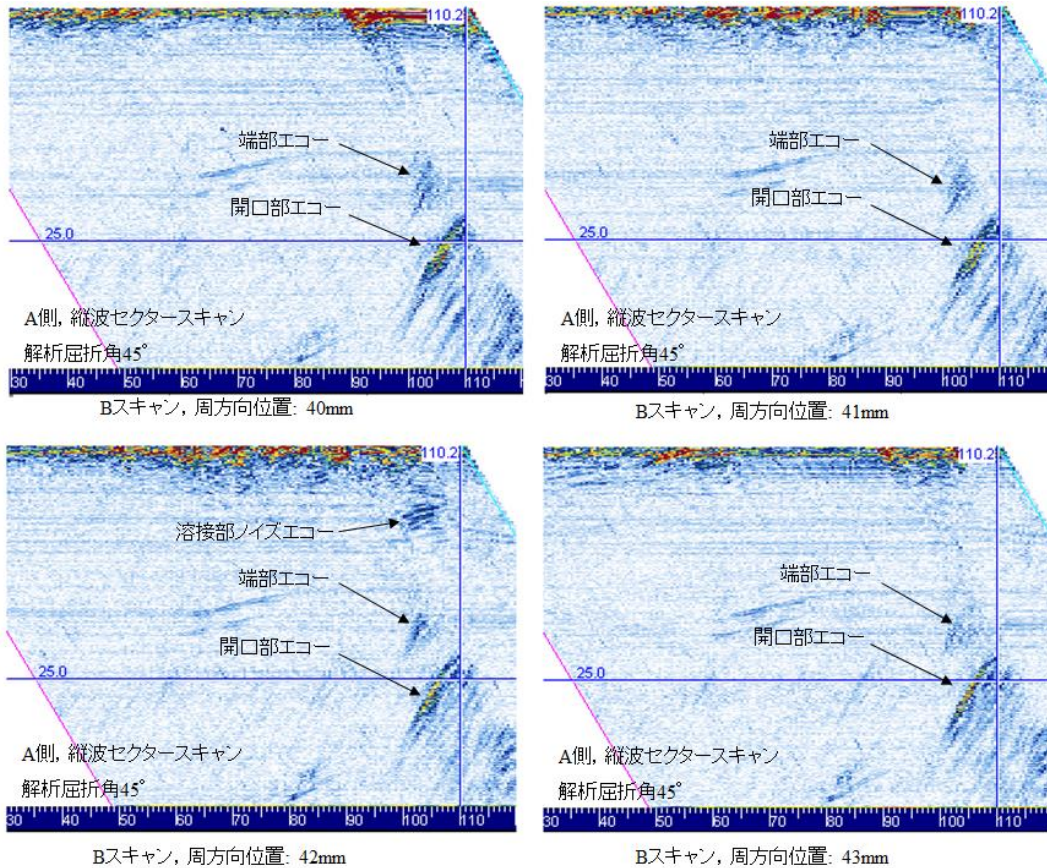
画像による SCC の判別においても原理的に同じ知識が利用可能であり、動特性を観察するための手動による探触子走査に代わり次に述べる画像の送りを使用する。

(2) リニア B スコープを使った端部エコーの判別

図 4-11 は A 側探傷における縦波 45° リニア B スコープを使った端部エコーの判別例である。図 4-11 (a) は管周方向位置 40mm~43mm の透視 B スコープであり、図 4-11 (b) は 1mm ステップの B スコープを並べて示している。(a) で溶接部ノイズと示したエコーは (b) では 42mm の位置のみに現れるのに対し、SCC 端部及び開口部と示したエコーは形の変化はあるが画面上のほぼ同位置に連続して留まるために有意な指示と判断できる。なお、端部エコーは徐々にその深さが変化する。その出現が連続しない指示はエコー高さに関わらず小さな反射源からのものであり、有意では無いと判断できる。



(a) B スコープ (透視範囲 40mm - 43mm)

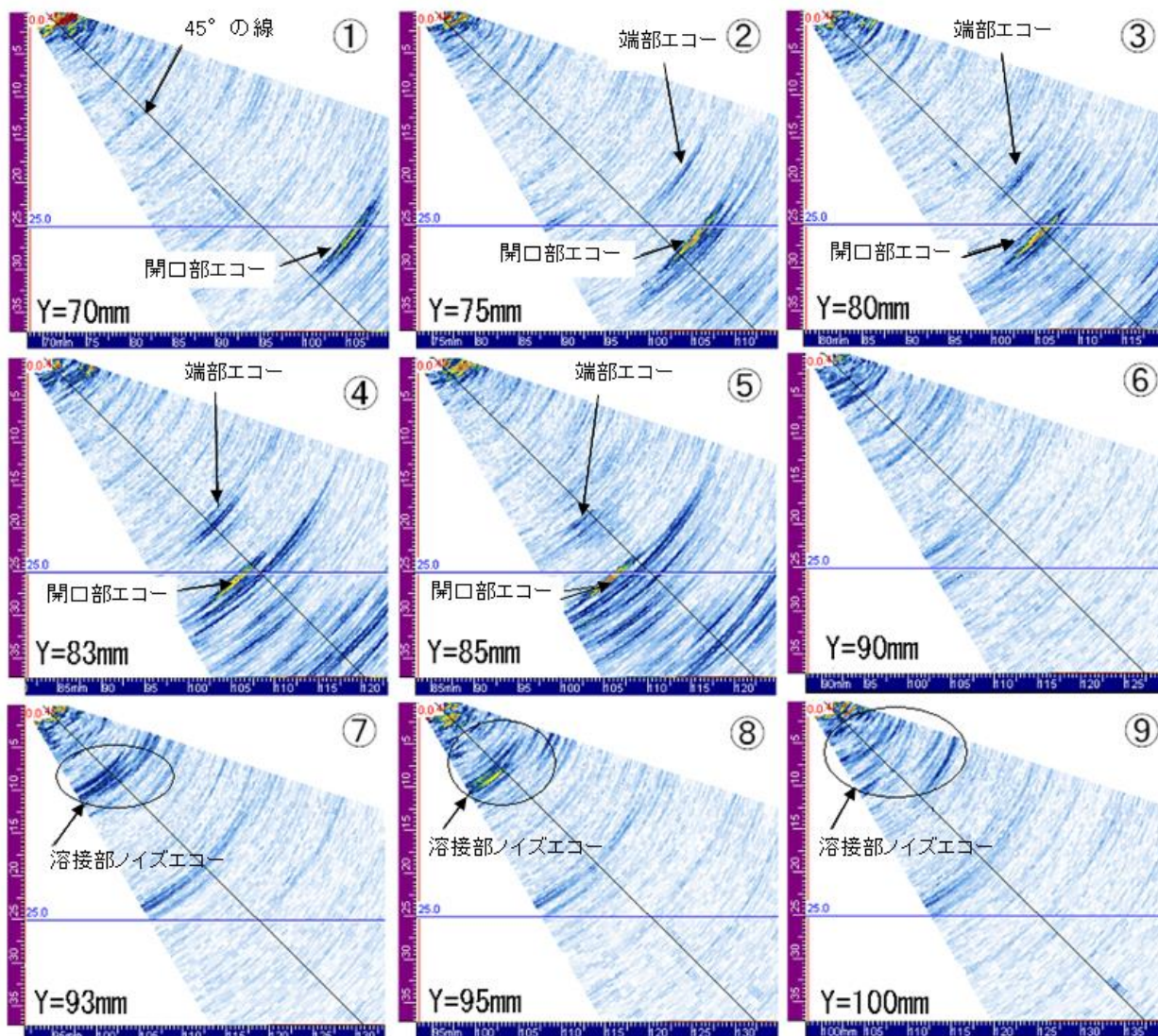


(b) 周方向位置 1mm 毎の連続する B スコープ表示

図 4-11 リニア B スコープを使った端部エコーの判別法

(3) セクタ B スコープを使った端部エコーの判別

図 4-12 は試験体の A 側，管周方向位置 42mm において探触子を軸方向に走査したときの縦波 30 度～70 度のセクタ B スコープを走査方向順に並べて示している。管周方向位置 42mm は図 4-11 で溶接部ノイズ指示が得られた箇所である。図 4-12 では端部エコー及び溶接部エコーの変化が見やすいように並びの間隔は等距離とはしていない。図中の“Y”は探触子位置を示し，Y=110mm が溶接中心となっている。図中の①では SCC 開口部エコーのみが見える。②で SCC 端部エコーが出現し，⑤までは開口部エコーと端部エコーは多少形を変えながらも相対位置を一定に保ちながら画面上の位置を変化させている。端部エコーが最も強く表示されている箇所④がこの走査軸上でのピーク点となる。一方，ノイズエコーは⑦～⑨で観察できるが，探触子の動きとは連動せずにランダムに出現及び消失する。このエコーは A スコープ上では路程が変わらずに高さのみが上下するエコーとして観察されるものであり，有意な指示エコーとは見なされない。



A側，縦波セクタスキャン，Bスキャンの周方向位置 42mm

図 4-12 セクタ B スコープを使った端部エコーの判別法

4.7 画像による欠陥判別手順

図 4-13 に、これまでに例示した結果を踏まえて、フェーズドアレイ探傷画像による SCC の検出及び深さ測定の手順をフローチャートにまとめたものを示す^{6),7)}。本フローチャートは著者が開発した固定角探触子を使った超音波自動探傷画像による SCC の判別フローチャートに改良を加えたものである⁸⁾。また、フェーズドアレイによる音場は、屈折角が 45° の場合は従来の固定角探触子とほぼ同等であると報告⁹⁾されていることから、このフローチャートは 45° の固定角探触子による超音波探傷画像にも適用可能と考える。

以下にフローチャートの具体的な内容を記載する。いずれの場合においても画像の活用は無欠陥である状態との比較で行うため、類似の形状を持つ健全な溶接部、あるいは同じ溶接線上で欠陥が無いと判断できる部位の画像を事前に確認しておくことが重要となる。

Step 1 : 波動モードの選定

SCC の検出を主とする場合は、モード変換波が出現せず、内表面に対して垂直方向に成長する SCC に対しての検出感度が高い横波が SN 比の高い画像を提供できる点で推奨できる。また、横波は管内表面及び母材と溶接金属の境界部を縦波よりも良く描写できるため SCC の判別に有利である。

一方、SCC の深さ測定を行う場合は、横波に比べ SCC 端部及び SCC 面からの反射波が得やすい縦波が有利である。また、SCC の先端が溶接金属内にあることが疑われる場合や溶接金属越しの探傷が必要な場合は、縦波探傷が必須となる。ただし、縦波探傷では様々なモード変換エコーが生じるために探傷画像が複雑であり、評価技術者には横波探傷よりも高い錬度が求められる。

Step 2 : 探傷感度の設定及び探傷時の注意事項

高感度の探傷は材料ノイズが多くなり画像が見にくくなる。探傷感度は画像の階調表示機能を十分に生かすために、管内表面近傍の材料ノイズレベルを表示器画面の 5% 程度に設定するのが良い。探触子走査機構部のバックラッシュなどにより探傷ステップ毎に走査軸方向の位置ずれが発生すると、透過 B スコープでは画像のぶれによる分解能の低下が、C スコープでは走査軸毎の画像のずれが発生する。このため、走査装置のバックラッシュはスキャン軸のデータ採取ピッチ以下に抑えることが望ましい。

探傷中或いは及び探傷終了直後のデータ品質の確認は確実にこなう必要がある。確認すべき項目は、接触不良による探傷感度不足、探傷基準点の設定違い、探傷速度過大によるデータの欠落及び走査装置の位置ずれである。

Step 3 : C スコープによる SCC の有無確認

Step 3 の C スコープと Step 4 の B スコープによる SCC の有無確認は、通常は同時にモニタ画面上に表示して見比べながら行われるが、ここではステップを分けて記述する。

C スコープによる評価には基本的に SCC の管内表面開口部に対して最も感度が高いと考えられる 45° のリニア探傷画像を使用する。傾いた SCC に対しても検出感度を高めるためにセクタ画像を使用する考え方もあるが、この場合は多数の屈折角で捉えた像の重なりのために見かけ上の画像の分解能が低下することがあり、裏波とそれに接近して存在する小さな SCC の判別が難しくなることに留意する必要がある。

観察の手順として、まず、C スコープで探傷面直下の不感帯を除いた全厚さに対して欠陥の有無を確認する。製造時に欠陥が無いことを確認している場合は、SCC 検出を目的に底面部近傍に限定し

て確認することも可能である。この場合には、C スコープの板厚方向透視範囲を探傷面の凹凸による板厚の変化及び溶接による管内面形状の変形を考慮し、底面の上下数 mm の範囲に設定するのが良い。

Step 4 : B スコープによる SCC の有無確認

B スコープの観察では、まず C スコープで無欠陥と判断した箇所でも 1 断面を作画し、管内表面、溶接金属と母材の境界部及び裏波部の位置を確認する。1 断面では管内表面、溶接金属と母材の境界部が確認できない場合は、数断面を透視すると管内表面、溶接金属と母材の境界部が強調できる場合が多い。

SCC の有無確認では管周方向の透視範囲を広くすれば効率的ではあるが、複数の SCC が存在する場合は複雑な画像となるために適宜区切って評価する。透視範囲が広くかつ SCC が裏波に近接している場合には画像の重畳により SCC を見逃す可能性がある。C スコープ上で裏波の表示幅が他の位置と比較して広い部分は、SCC と裏波の像が重畳している可能性があるため、振動子幅以下の間隔で B スコープを評価する必要がある。

Step 5 : D スコープによる SCC の概略深さの把握

SCC の概略深さ把握のための D スコープは管軸方向の透視範囲を SCC 発生部近傍に絞れば評価が容易となる。この透視範囲は、溶接部中心から SCC の進展が予想される溶接部端から母材側 10mm の範囲が妥当と考えられる。

SCC が深さを持つ場合はその大まかな分布を確認する。観察範囲は、横波の場合は直射及び一回反射の範囲とし、縦波の場合は直射の範囲とする。

Step 6 : 端部エコーの特定

端部エコーの特定ではセクタ B スコープを管軸方向に移動して SCC 端部の判別を行なう。装置の機能上セクタ B スコープが使用できない場合はリニア B スコープ画面を管周方向に動かして SCC 端部を特定する。

セクタ B スコープを管軸方向に移動中に SCC と疑わしいエコーが最も明確に表示できる屈折角が 45° 以外であることが確認できた場合は、その屈折角で B, C, D スコープを描画して再評価する必要がある。

Step 7 : SCC 深さの測定

A スコープ上に SCC の探傷波形を表示し、手動探傷で管軸方向に探触子を動かして波形を観察すると同じ要領で波形を移動させて端部エコーのエコー高さが最大になる点を特定する。特定手法も手動探傷と同じである。この作業は Step 6 のセクタ B スコープあるいはリニア B スコープと A スコープ画像を同時に表示して画面を見比べながら行なうのが良い。

なお、Step 1 で横波を選定し、その結果 SCC を検出した場合は、溶接金属内を調査するために Step 1 に戻り縦波探傷を行う必要がある。

なお、開発したフローチャートには SCC の長さ測定の手順は含まれていない。SCC の長さ測定法は規格¹⁾ で定められており、原則として基準横穴で作成した DAC 曲線の 20% を超える範囲を長さとしている。画像のみで長さを測定する場合は、ノイズレベルを超える指示の範囲を長さとするのが安全側となる。

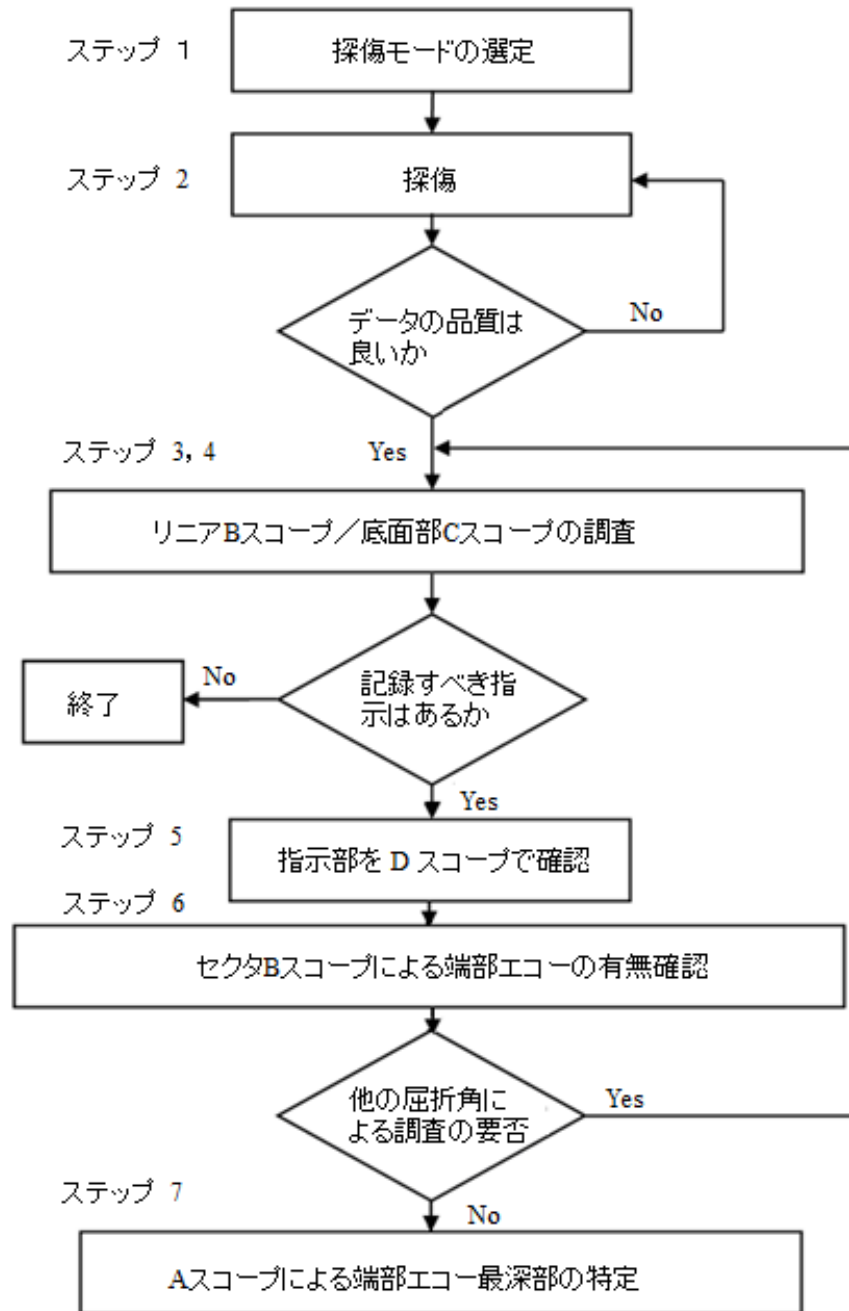


図 4-13 フェーズドアレイ画像による SCC の検出及び深さ測定フロー

4.8 まとめ

本章ではステンレス配管溶接部に発生する SCC の検出及び深さ測定を超音波探傷画像により行う手順（フローチャート）を開発した。

開発した手順はフェーズドアレイ技術の使用を前提とし、探傷モードの選定から画像の評価法までを包括している。この手順はセクタ B スコープを使用する部分を除けば 45° の固定角探触子を使用する探傷画像評価にも適用可能である。

本開発を通して得られた探傷画像の評価手法に関する知見を以下に示す。

- (1) 横波は SN 比の高い SCC 開口部エコーが得られると共に溶接金属と母材の境界面及び管内表面エコーが得やすい点で SCC の検出に有利である。
- (2) 縦波は直射で SCC の面及び端部エコーが得やすく、また、溶接金属内の超音波透過性に優れる点で深さ測定に有利である。しかし、モード変換エコーが出現するために探傷画像の評価には熟練を要する。
- (3) D スコープは透視範囲を適切に選定することにより SCC の大まかな深さ分布を得ることができ点で有効である。
- (4) 従来の横波による端部エコー法では測定精度の点で直射が重視されてきた。しかし端部エコーは直射よりも一回反射で明瞭に得られる場合もある。したがって、横波の D スコープでは直射の範囲だけでなく一回反射後のエコーにも注意して評価する必要がある。

参考文献

- 1) JAEC 4207-2008 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程，日本電気協会，(2008)
- 2) JIS Z 3060:2002 鋼溶接部の超音波探傷試験方法，日本規格協会，(2002)
- 3) 永田義昭，長谷川勝広，久米田正邦，稲垣哲彦，中田親秀，太田隆，田口豊信，米谷豊，清水泰，三橋忠浩，東海林一，山口篤憲，杉林卓也，小林輝男：ステンレス鋼溶接金属を透過した UT(検出)確認試験研究の成果，保全学，Vol.9 No.3，pp. 19-24，(2010)
- 4) J. A. Ogilvy, “Modeling of Ultrasonic Wave Behavior in Austenitic Steel”, Proceedings, 7th International Conference on NDE the Nuclear Industry, pp. 431-434, (1985)
- 5) 小林英男，大岡紀一，牧原善次：超音波による欠陥寸法測定，共立出版，pp. 2-4, (2009)
- 6) 笹原利彦：超音波断面画像によるき裂判別技術の開発（第一報），電力中央研究所報告，Q08002，(2009)
- 7) 笹原利彦，井上裕嗣：超音波探傷画像に基づく SCC の検出及び高さ測定のための手順の開発，非破壊検査，第 60 巻 2 号，pp.119-125，(2011)
- 8) T. Sasahara, “Interpretation of Automated Inspection Data of IGSCC in Stainless Piping”, Proceedings, 9th International conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries, pp.227-231, (1988)
- 9) 古川敬，古村一朗：現行の規格に準拠したきず検出への Phased array UT の適用，日本非破壊検査協会平成 20 年度秋季大会講演概要集，pp. 15-16，(2008)

第5章 ログアンプとリニアアンプの併用による超音波探傷試験

5.1 はじめに

超音波探傷試験は原子力発電プラントの供用期間中検査（ISI）に広く使用されており，特に BWR 型原子力発電プラントのステンレス鋼配管溶接部に発生する SCC の検出及び深さ測定に重要な役割を果たしている。現在のところこの SCC の超音波探傷作業のほとんどは手動で実施されており，したがってその結果は検査員の技量に負うところが大きい。

本論文は検査員の技量に依存する度合いの大きな手動探傷に代わり超音波探傷画像を使用することにより超音波探傷試験結果の品質安定を目指すものであり，そのためには画像を使用する超音波探傷技術の利点が検査員及び検査発注者の双方に受け入れられることが必要となっている。このためのステップとして第4章ではフェーズドアレイ装置を使用するステンレス鋼配管溶接部の SCC 検出及び深さ測定の手順を開発し，フェーズドアレイ探傷画像の解析技術の公知化を図った。

しかしながら，フェーズドアレイシステムは中小を中心とする一般の検査会社にとっては未だ高価な装置であり，画像による SCC の検出や深さ測定をより広い範囲で活用してもらうには，安価で汎用の超音波探傷装置を利用して精細な探傷画像を得る技術を市場に提供する必要がある。

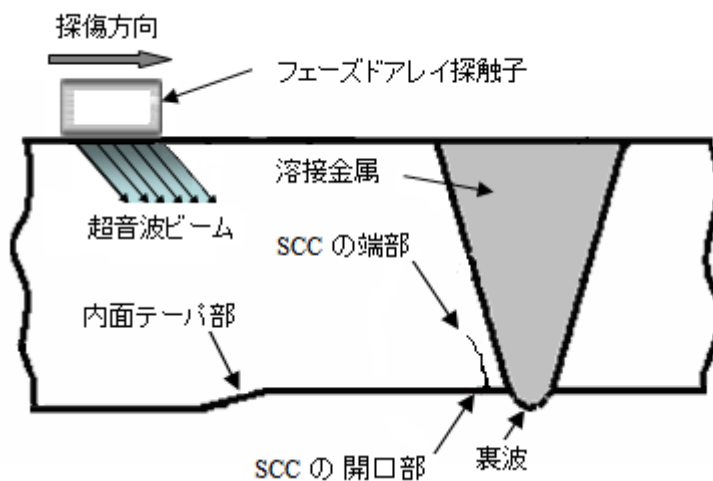
この精細な探傷画像を提供する手法の一つに第3章で提案したログアンプを使用して非常に小さなエコーから大きなエコーまでを圧縮して画像表示する技術がある。また，ログアンプ使用の効果として，これまで感度差が大きいために感度の設定を変更して行う必要があった SCC 検出のための探傷と深さ測定の探傷を一度の探傷で済ますことも期待できる。

しかしながら，ログアンプの使用は医用超音波探傷装置では一般的であるが¹⁾，工業用ではエコーを飽和させずにデータを採取する場合²⁾や減衰の大きな材料へ適用する場合³⁾に限られており，特殊な装置であるために高価であり市場での入手も困難となっている。このため，本章ではリニアアンプを使用する汎用の超音波探傷器と組合せ可能な外付け型ログアンプ装置の開発を行うと共に，これを使用して精細な SCC 探傷画像の提供を可能とする新しい超音波探傷手法を開発し，工業分野における超音波探傷画像の活用拡大を通して超音波探傷試験結果の品質安定を目指す。

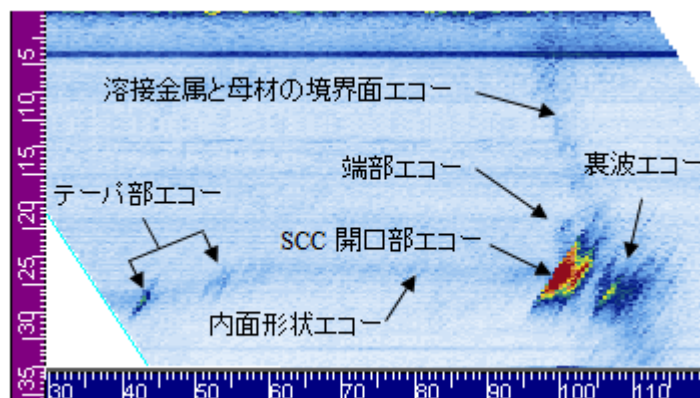
5.2 SCC 探傷画像におけるログ表示の有用性

(1) SCC 探傷画像の例

図 5-1 に SCC が存在する代表的なステンレス鋼配管溶接部の断面形状とフェーズドアレイ技術を使用して採取した超音波断面画像を示す。画像はフェーズドアレイ探触子から屈折角 45° の縦波を管軸方向に送信しながら同じく管軸方向に探触子を走査してリニア探傷画像としたものである。探傷にはフェーズドアレイ探傷器 (R/D Tech, OmniScan MX PA) と公称周波数 5MHz のリニアアレイ探触子 (KGK, 5K0.6 (0.5/0.1)×10-16) を使用した。超音波波形のサンプリング周波数は 25MHz, A/D 変換の分解能は 12bit である。フェーズドアレイ探傷装置の精細なデータ採取機能により、探傷画像には SCC の管内表面開口部 (SCC 開口部) に加えて SCC の端部 (端部), 溶接部裏波 (裏波), 配管内表面形状 (内面形状), 及び溶接金属と母材の境界面 (溶接境界部) が描写されており、それらの指示の位置関係から、SCC の識別が容易となっている。ただし、この画像は慎重な感度設定により探傷を行った結果であり、フェーズドアレイ探傷では常にこのような画質が保証されるわけではないことに留意する必要がある。



(a) ステンレス鋼溶接部の形状とフェーズドアレイリニア探傷



(b) フェーズドアレイリニア探傷による SCC の探傷画像 (B スコープ)

図 5-1 ステンレス鋼配管突合せ溶接部とフェーズドアレイ探傷画像

(2) ログ表示の有用性

図 5-2 にステンレス鋼配管溶接部の探傷において規格⁴⁾が定める屈折角 45° の横波を使用し、設定感度を標準横穴からのエコー高さを 80%とした場合に得られる様々な反射エコーの高さを示す。SCC 開口部エコー及び裏波エコーの高さは、BWR 事業者がまとめた成果⁵⁾を参考とした。また、端部エコー、内面テーパ部エコー、内表面形状エコー、及び溶接境界部エコーの高さは、電力中央研究所が保有する実プラント模擬環境で付与した SCC 試験体で求めた。ステンレス鋼の探傷では、母材の金属組織から高さ 5%程度の林状エコーが得られるが、これをノイズエコーと称した。

これらのエコーのうちリニアアンプを搭載する超音波探傷器の表示画面上で検査技術者が観察できるのは、エコー高さが約 5%から 100%までの 26dB (20 倍) の範囲であり、エコーとしては SCC 開口部及び裏波が主となる。内面テーパ部エコーなどの内面形状エコーは、エコー高さが低いために時折観察できる程度であり、SCC 端部からのエコーも高さが低いために認識が困難である。このため、端部エコーの検出には感度を高めて探傷を行い、SCC 開口部エコーが 100%を超える場合のピークエコー高さは感度を低めて観察する。自動探傷で超音波波形をデジタルデータとして採取する場合には、表示範囲を超える波形データは飽和データとして取り扱われる。図 5-1 (b) の例では、SCC 開口部指示のうちの赤色の部分はエコー高さが 100%を超えた範囲であり、この情報からはエコーが最大となる箇所を特定することはできない。

図 5-3 は、図 5-2 の縦軸であるエコー高さ (リニア表示) を 1%から 500%までの対数目盛に変換して表示 (ログ表示) したもので、表示器の全高に対するパーセントも併記している。図 5-2 と図 5-3 の比較で明らかなように、リニア表示に比較してログ表示ではエコーの低い範囲でより細かな情報を得ながらエコーの高い範囲まで表示が可能となる。これまで市販されているログアンプ付き探傷器^{2),3)}では、80dB (10,000 倍) 以上の範囲をログ表示して観察することが可能である。

このように、超音波波形のエコー高さをログ表示した場合は、エコーが上下に圧縮された形となり、表示画面上でエコー高さを読み取るのが難しく、基準エコー高さとの比較による欠陥評価には不都合である。その反面、ログ表示はリニア表示に比較して低いエコーの範囲が拡大されるため、低いエコーから高いエコーまでのデータを 1 画面に表示できる点で有利となる。ログ表示のこのような特性は、エコー高さを基準とする評価には向いていないが、非常に小さなエコーから大きなエコーまでの全体を見渡した中で周囲とは異なる部分を見つけ出して疑わしい箇所と判断するような、画像を使用する欠陥判別には適していると考えられる。

第 3 章ではこのようなログアンプの特性が超音波探傷画像の観察の面で有用であると考え、基礎的な実験を行ないその有用性を実証した^{7),8)}。しかし、基礎的な実験時に入手可能なログアンプ付超音波探傷器は旧式であったために、リニアアンプの装置との間で十分な比較検討を行うまでは至らなかった。

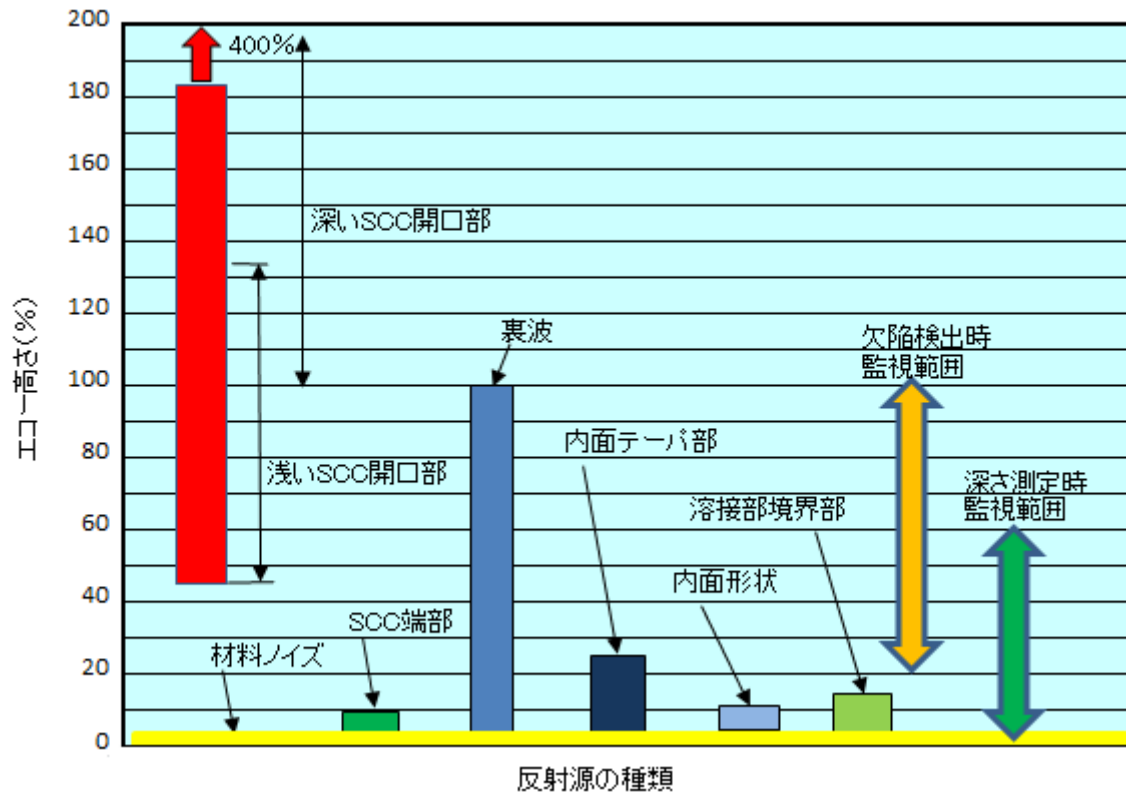


図 5-2 超音波の反射源とそのエコー高さのリニア表示

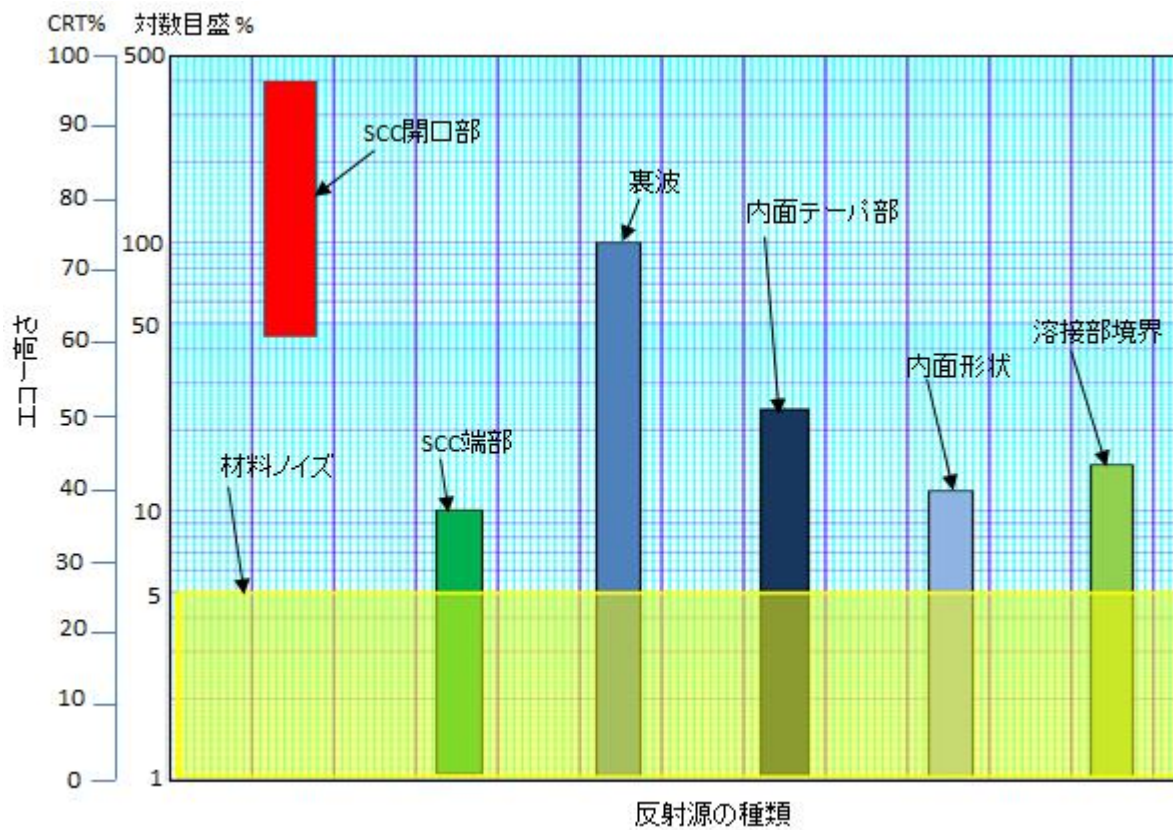


図 5-3 超音波の反射源とそのエコー高さのログ表示

5.3 ログアンプ付加超音波探傷システムの開発

ログアンプに関して基礎的な実験を行った後、その活用法を更に検証するために、超音波探傷用のログアンプ装置を開発した⁹⁾。開発したログアンプ装置は汎用の手動超音波探傷装置に接続して使用するため、双方を合わせた探傷システムの呼称は「ログアンプ付加超音波探傷システム」とした。

(1) システムの構成

図 5-4 に開発したログアンプ付加超音波探傷システム（ログアンプ付加システム）の構成を、図 5-5 にシステムの写真を示す。このシステムは超音波を送受信する超音波探触子、探触子を走査して位置情報を採取するスキャナ、ログアンプ装置、及び超音波探傷器で構成している。超音波探触子及びスキャナは超音波探傷器と接続可能な汎用品が使用可能である。超音波探傷器は波形及び位置データを記録して平面及び断面画像が表示できる装置ならば使用可能である。ここでは菱電湘南エレクトロニクス社製デジタル超音波探傷器（UI-25）を使用した。なお、図 5-4 には示していないが、データ解析には UI-25 の解析ソフトを汎用コンピュータで使用している。

ログアンプ装置は開発品であり、プリアンプ部とログアンプ部より構成され、超音波探傷器と探触子間に汎用の探傷ケーブルを使用して接続可能である。プリアンプ部は探触子からログアンプ部への入力電圧を 10^{-4}V から 1.0V の範囲内に調整する役割を持ち、 -20dB 単位で 2 段階及び -2dB 単位で 20 段階の切替式の減衰器により計 80dB のゲイン調整が可能である。ただし、以下ではこの減衰器を $-80\sim 0\text{dB}$ に設定した状態のことをログアンプのゲインが $0\sim 80\text{dB}$ であると表記する。ログアンプ部の手前には電圧調整用の 26dB 固定ゲインのアンプを配置している。ログアンプ部は Texas Instruments の TL441 を使用した 80dB の対数変換特性を持つ広帯域ログアンプである。このログアンプは直流から 40MHz の周波数帯域で使用可能で、 80dB の範囲で $\pm 0.5\text{dB}$ の直線性を持っている。図 5-6 に広帯域ログアンプ部の回路構成及び特性を示す。この広帯域ログアンプ回路は公開されている⁶⁾。

ここで、RF 波形のような正負の値を持つデータをデジタル的に対数変換する場合にはゼロ点及びマイナス側の取り扱いが問題となる。このログアンプ部はプリアンプ部からの入力を TL441 へ入力する前段でプラス成分とマイナス成分に分離し、マイナス成分はプラスに反転した後に対数変換を行い、その後再びマイナスに反転し、プラス側成分と合成後 RF 波形として出力する仕組みでマイナス側の処理を行っている。また、入力値が 0V の場合は出力も 0V となるためゼロ点の問題も発生しない。

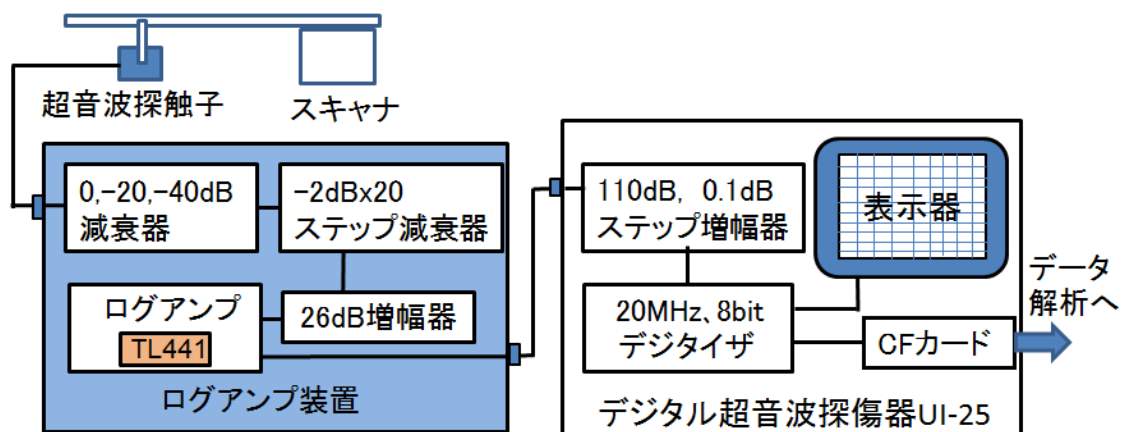


図 5-4 ログアンプ付加超音波探傷システムの構成



図 5-5 ログアンプ付加超音波探傷システム

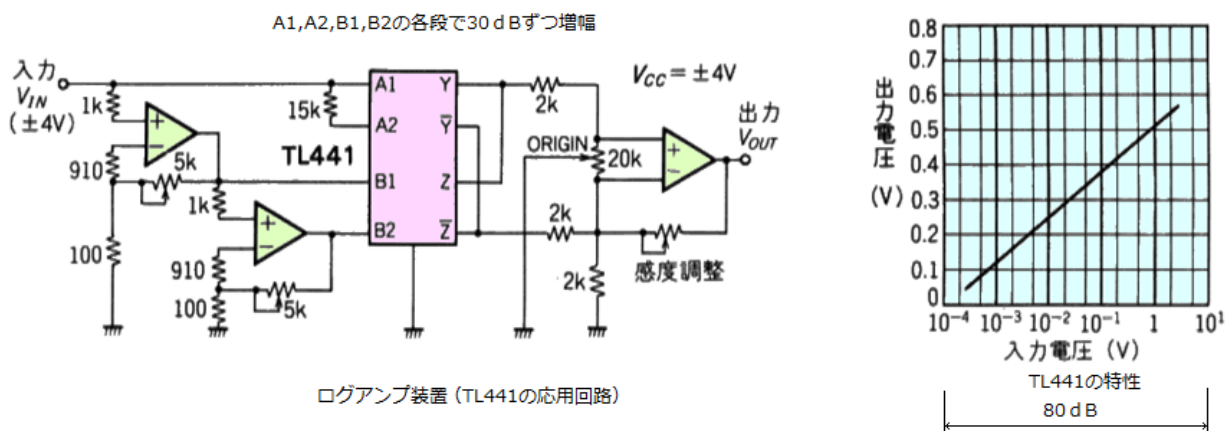


図 5-6 ログアンプ回路と入出力特性

(2) システムの特徴

図 5-7 に STB-A3 標準試験片の厚さ 15mm の底面エコーの通常 (リニアアンプ) 波形と周波数スペクトル及びログアンプ装置を通した波形と周波数スペクトルを示す。探触子は 5MHz の広帯域型探触子 (Panametrics, V541) を使用した。波形データの採取には UI-25 の周波数解析機能を使用しており、どちらの波形も表示器上の最大値が約 80% になるように自動調整されている。波形採取時の時間ゲートは約 2.5 波長に相当する 3mm に設定した。対数変換の効果だけを確認するために、ログアンプのゲインは最小 (0dB) に設定している。

図 5-7 に示した二つの波形を比較すると、エコーが高い範囲では同様であるがログアンプを使用した場合エコー高さが低い部分が持ち上げられており、図 5-3 に示した傾向と一致していることが確認できた。周波数分布は、5MHz のピーク周波数付近では類似しているが、それ以外の周波数範囲ではログアンプを使用した方がやや崩れた分布となる。これは対数変換によってノイズエコーレベルが上昇したこと及び波形が上下に圧縮されたことの影響と考えられる。このようにログアンプを通過後は周波数スペクトルが異なるため、3 章で示した周波数による欠陥判別手法をそのまま適用するのは適切でない。

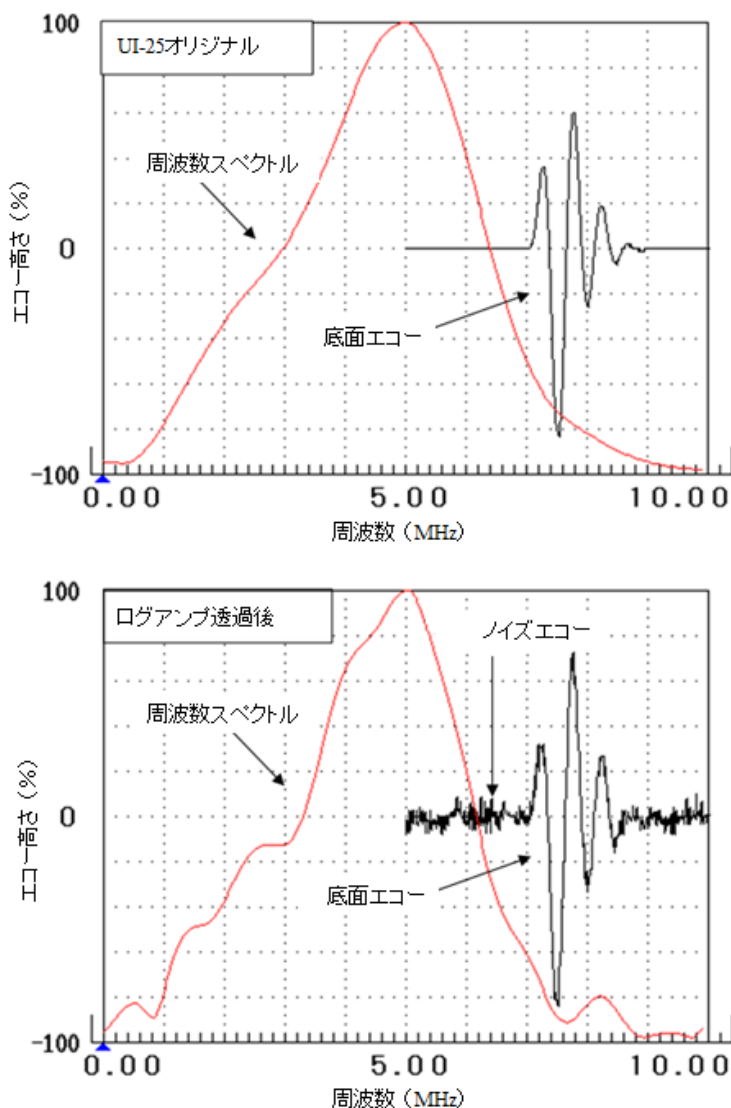


図 5-7 リニアアンプとログアンプ通過後の超音波波形の比較

なお、医用超音波装置のログアンプでは探触子及び検査目的に合わせてゲインがあらかじめ設定されているものやノンスケールのもが多い。また、ログアンプとリニアアンプの両機能を備えた工業用の超音波探傷器では、ログアンプとリニアアンプが切替式で二つのアンプの併用はできない構成となっている。これらに対して、開発したログアンプ付加システムの特徴は、超音波探傷器の表示器上のエコー高さをログアンプ装置のゲインと超音波探傷器のゲインの両方で調整可能としている点にある。以下にその利点を述べる。

5.4 ログアンプとリニアアンプの併用効果の検証

ログアンプを使用する超音波探傷の問題点は、エコー高さがログ表示のためエコー高さの比を直読しにくい点に加え、波高値軸が対数圧縮されるために感度差があまり大きくない複数のエコーを表示器上で同時に観察するのが難しくなることがあった。

この欠点を除くために、開発したログアンプ付加システムはログアンプとリニアアンプの双方を組合せて使用することを可能とし、高さの異なる複数のエコーの表示器上のエコー高さのバランスを目的に合わせて適切化できる機能を持たせている。以下に、アンプを組み合わせる場合の利点を説明する。

図 5-4 に示したようなログアンプ装置とリニアアンプ付超音波探傷器を組み合わせたログアンプ付加システムの入出力関係は次式で表記できる。

$$V_o = m_1 \kappa \log_{10}(m_2 V_i) \quad (1)$$

ここで、 V_i はシステムの入力電圧、 V_o はシステムの出力電圧、 m_1 は超音波探傷器内のアンプのゲイン、 m_2 はログアンプ装置内のプリアンプのゲイン、 κ はログアンプの特性で決まる定数である。

図 5-8 にリニアアンプとログアンプの特性及びそれを組合せて使用した場合の入出力関係を示す。システムへの入力電圧 V_i を 0V~1.0V と仮定し、出力電圧の範囲は表示器の%表示に読み替え易くするために便宜的に 0V~100V としている。また、SCC 開口部エコー及び端部エコーの入力電圧はそれぞれ 0.8V 及び 0.1V (すなわち、それぞれ最大入力の 80% 及び 10%) と仮定している。

リニアアンプのみの場合の入出力関係は直線で表され、 $m_1=100$ とすると紺色の実線となる。この場合は、SCC 開口部エコー及び端部エコーの高さはそれぞれ 80% 及び 10% となる。

一方、 $\kappa=20$ で $m_2=20$ のログアンプのみで対数変換した場合の出力は、青色の実線となる。この場合には、SCC 開口部エコー及び端部エコーの高さはそれぞれ 24% 及び 6% となる。また、さらにログアンプのゲインを 50 倍 (+34dB) すなわち $m_2=1000$ にした場合の出力を青色の破線で示す。この場合の SCC 開口部エコーは 58%、端部エコーは 40% となる。すなわち、ログアンプのゲイン変更は、出力曲線を表示器上で上下にほぼ平行移動させることになり、ノイズエコーレベルが非常に小さい場合を除いてノイズエコーを増大させる方向に作用する。このことが、これまでログアンプは扱いにくいと言われてきた一因ともなっている。

以上に対して、青色の実線で示した $\kappa=20$ で $m_2=20$ のログアンプによる対数変換後にリニアアンプで $m_1=3.16$ (+10dB) に増幅した場合の出力を赤色の実線で示す。この場合は、SCC 開口部エコーの高さは 76%、端部エコーの高さは 19% となり、SCC 開口部エコーの高さを抑えながら端部エコーの高さを持ち上げることが可能となる。

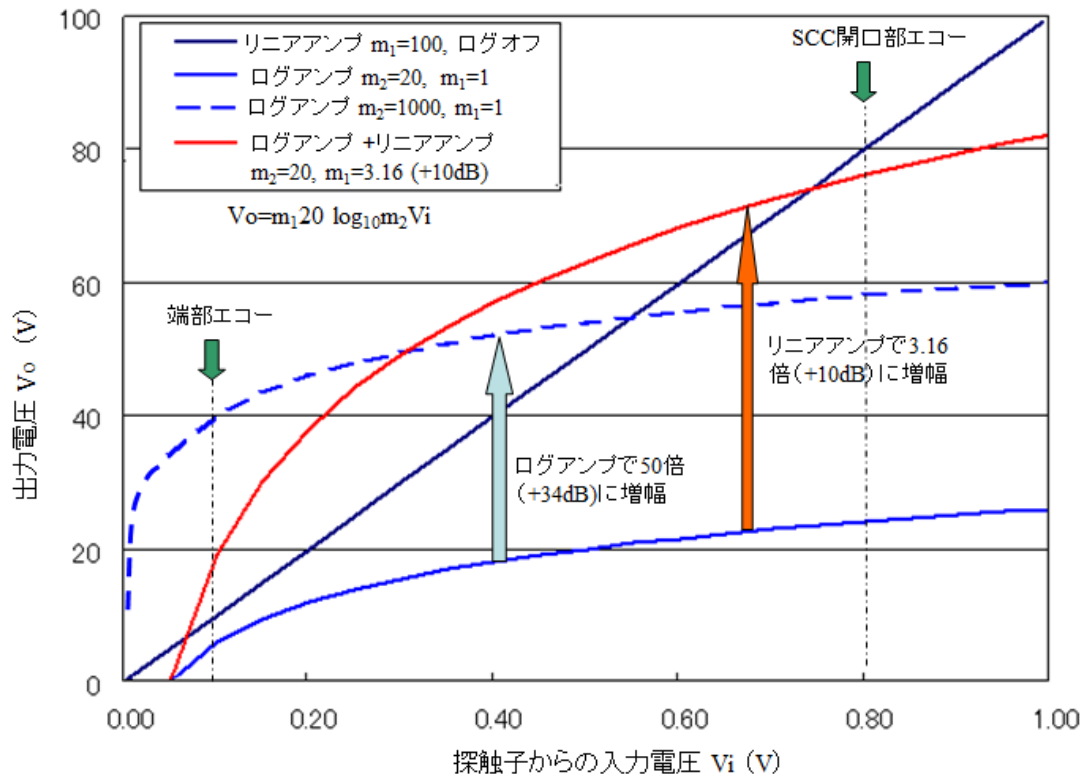
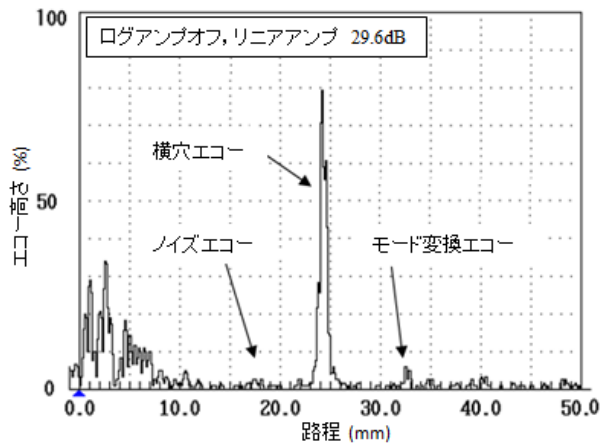


図 5-8 ログアンプとリニアアンプの組合せ使用の効果

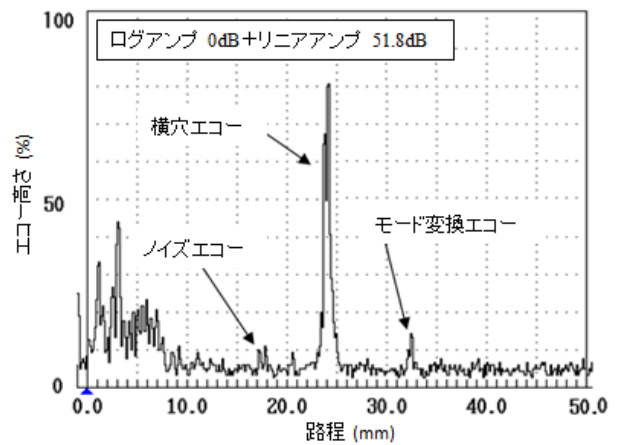
図 5-9 は開発したログアンプ付加システムについて、ログアンプとリニアアンプを組合せて使用した場合の効果を実験で示している。探触子は 2MHz の広帯域型探触子 B2K10×10A45 を使用し、反射源は STB-A3 標準試験片の φ8mm 貫通穴であり、時間軸幅は 50mm である。

図 5-9 (a) はリニアアンプのみを使用した場合の A スコープ画像である。A スコープ上には高さ 80% の横穴エコーとその後方に横穴でモード変換した後に上方の試験片表面で反射した高さ 5% のモード変換エコーが観察できる。(b) はログアンプのゲインを最小 (0dB) として対数変換の効果だけを活用した場合である。リニアアンプのゲインを調整して横穴エコー高さを 80% とした場合のモード変換エコーの高さは 15% である。(c) はログアンプのゲインを 20dB とした場合で、横穴エコーを 80% に合わせるためにリニアアンプのゲインを 42.1dB としている。この場合のモード変換エコーの高さは 30%、ノイズエコーの高さは 10% であり、モード変換エコーの SN 比は 3 となり観察に適した状態となっている。(d) はログアンプのゲインを 40dB とした場合で、ノイズエコーが過大となり横穴エコーとモード変換エコーの両者とも SN 比が低下している。以上のように、ログアンプとリニアアンプを適切に組合せて使用すれば (c) のようにレベルの小さなエコーを強調して観察することが可能となる。もしログアンプのゲインを過大にした場合には (d) のようにノイズエコーの増大を招き、探傷画像の解析が難しくなる。

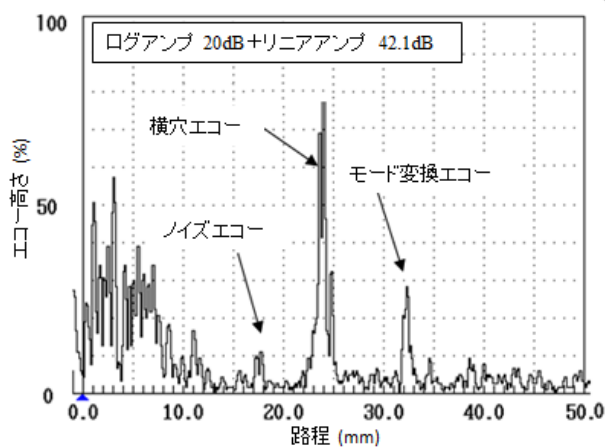
工業用超音波探傷分野におけるこれまでのログアンプの使用法では、リニアアンプ部のゲインが変更できなかったために、ステンレス鋼のように減衰のある材料では結果的に (d) に示した条件で使用された例が多く、ログアンプは使いにくいとの評価になっていたと考えられる。



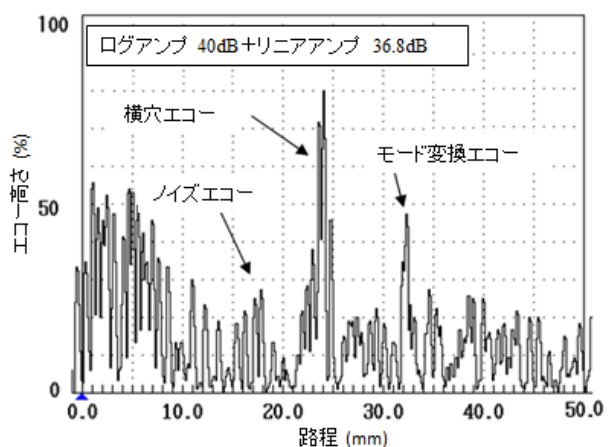
(a) リニアアンプのみを使用



(b) ログアンプを最小ゲインとしリニアアンプで横穴エコーを80%に設定



(c) 横穴/モード変換/ノイズエコーをバランス良く表示



(d) ログアンプの感度を過大に設定

図 5-9 ログアンプとリニアアンプの組合せ使用の効果

5.5 ログアンプ付加システムによる SCC の探傷

開発したログアンプ付加システムを使用して実際の配管溶接部を探傷した。試験体は SCC を付与した 600A, 肉厚 35mm のステンレス鋼配管溶接部である。図 5-10 に試験体の浸透探傷試験結果の写真を示す。この試験体には溶接部中心から約 5mm の位置に溶接部に平行な長い SCC があり、その外側に点状の SCC が存在している。長い SCC の試験体端面における深さ約 5.5mm である。なお、図 5-10 の写真は次に示す探傷画像とイメージを合わせるために左右を反転している。

探触子は 5MHz の広帯域型探触子 B5K10×10A45 を使用した。ログアンプを使用しない場合（リニア探傷）での基準感度は深さ 20mm の位置にある $\phi 3$ mm の横穴からのエコーが表示器高さの 80% になるように設定した。ログアンプとリニアアンプを組合せて使用した場合（ログ探傷）においては、ログアンプでノイズエコーレベルが表示器の 10% 程度になるように調整し、その後 UI-25 の増幅器で SCC 開口部エコーの高さが表示器の 60%～100% で、かつ端部エコーの高さができるだけ高くなるように設定した。通常はノイズエコーレベルが表示器の 10% 程度のときにターゲットとする最大エコーを表示画面の 80% 程度に設定すればよい。

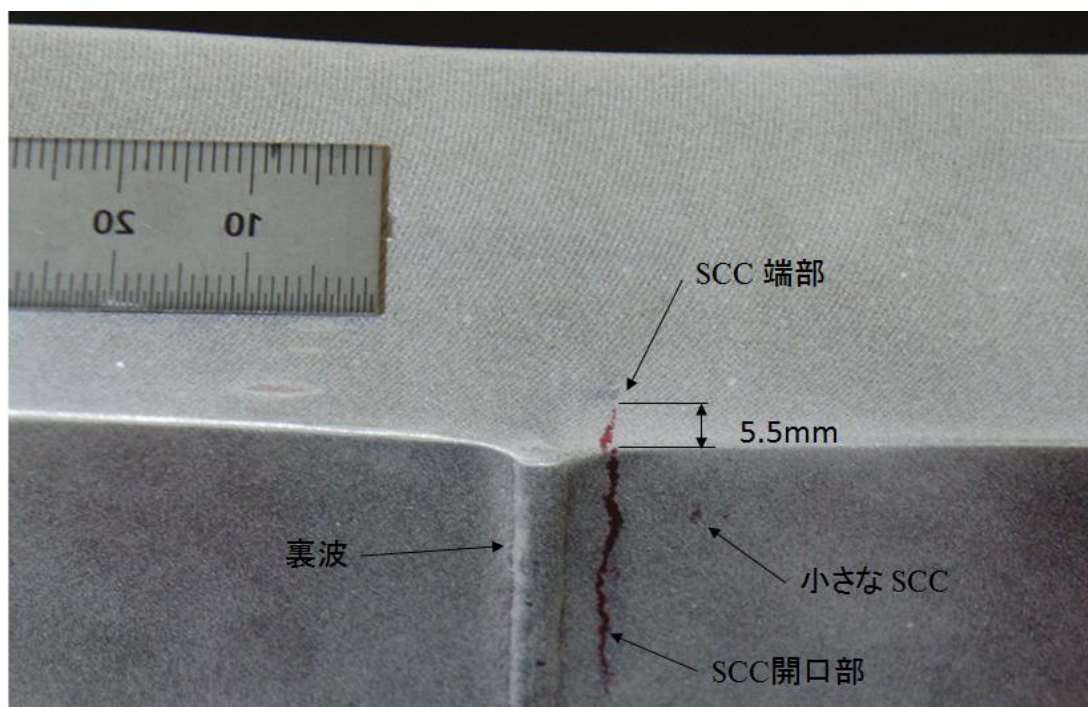


図 5-10 SCC 付 600A ステンレス鋼配管溶接部

図 5-11 に探傷結果の A スコープ及び B スコープ画像を示す。(a) はリニア探傷の結果を(b) はログ探傷の結果を示す。どちらの探傷画像においても SCC 開口部と SCC 端部に加えて、形状エコーとして裏波と配管内面が確認できる。ログ探傷の A スコープでは SCC 開口部エコーがリニア探傷よりやや低くなっているものの端部エコーはリニア探傷における 16%に対して 27%と高く表示されている。また、ログ探傷の B スコープでは、SCC 開口部エコーが飽和しない範囲で SCC 端部、管内表面、母材と溶接金属境界部がリニア探傷画像よりも視認しやすくなっている。

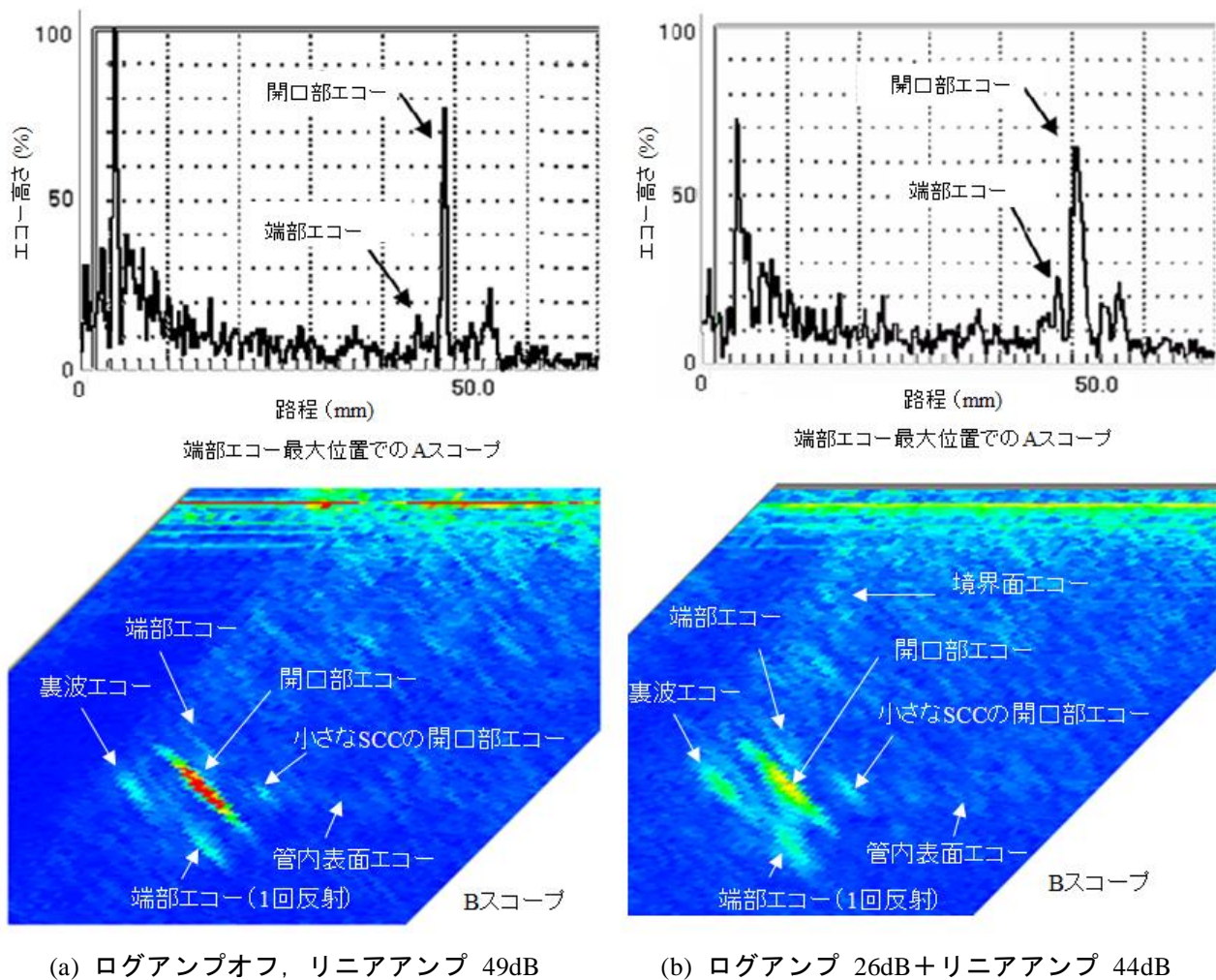
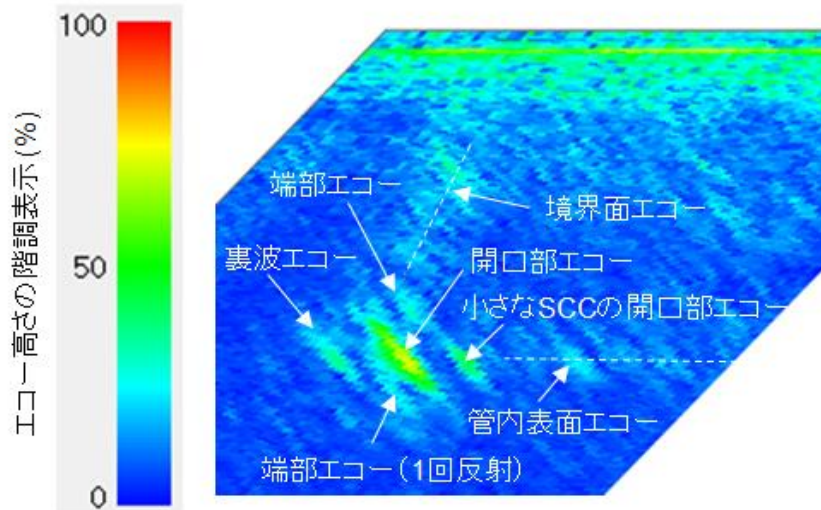
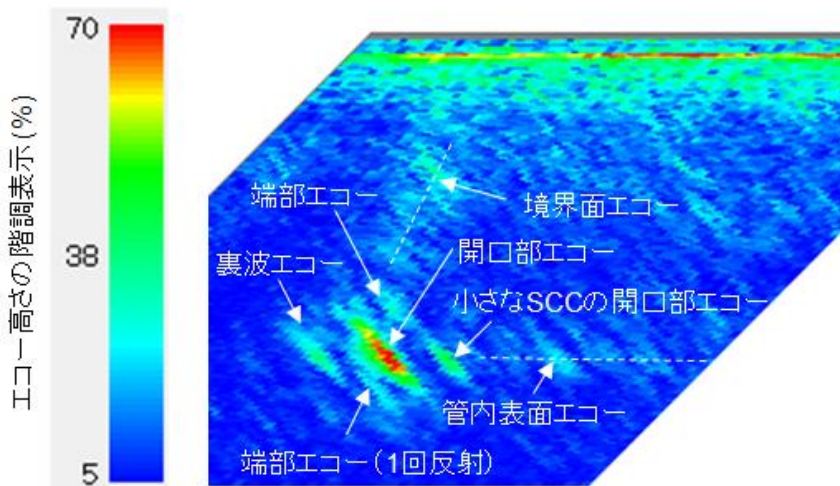


図 5-11 ログアンプ付加超音波探傷装置による SCC の探傷

図 5-12 は図 5-11 (b) に対してログアンプのゲインをさらに 6dB 増大させて 32dB とするとともにエコー高さを過大にしないためにリニアアンプのゲインを 4dB 減少させて 40dB とした場合の結果である。図 5-12 (a) では SCC 開口部エコーと端部エコーのエコー高さ比はさらに低くなり、端部、裏波及び管内表面はさらに視認しやすくなっている。しかし、ノイズエコーも高くなっており、B スコープにおける各々のエコーとノイズエコーの間のコントラストが低くなったためエコーの視認性は低下している。図 5-12 (b) は描画の色階調表示範囲を 5%~70%に変更することによりコントラストを改善したものである。画像の色階調表示の範囲あるいは色調を変更してターゲットとするエコーのコントラストを改善する処理はリニア探傷画像でも可能であるが、ログ探傷では端部エコーや形状エコーなど重要な情報を含みながらこれまで過小評価されてきたエコーの低い範囲が拡大表示できるために、エコー高さをデジタル値とした場合の実質的な分解能がリニアアンプに比較して高まり、画像のコントラスト改善処理が容易となる。



(a) 階調表示範囲を 0% から 100% とする基本表示



(b) 階調表示範囲を 5% から 70% の範囲に狭めた表示

図 5.5-3 エコー高さ階調表示変更による画像の改善

5.6 まとめ

本章では B スコープ画像の作成が可能な汎用の超音波探傷装置と組合せて使用することによって精細な探傷画像を得ることができるログアンプ付加システムを開発し、ステンレス鋼配管溶接部に発生する SCC を対象として試験を行い、システムの利点を実証した。開発したログアンプ付加システムは広範囲のエコー高さ情報の採取を可能とすると共にき裂の端部エコーや形状エコーなどのエコー高さの低いものを嵩上げできるため、探傷画像をより読み取り易くすることが可能である。

本開発を通して得られたログアンプ付加システムに関する知見を以下にまとめる。

- (1) ログアンプはリニアアンプと組合せて使用することによって、単独で使用する場合に比べてより性能を発揮する。
- (2) ノイズエコーレベルを表示画面の 10% 程度に設定し、ターゲットとする最大エコーを表示画面の 80% 程度に設定すれば、良好なログ探傷画像を得ることが期待できる。

- (3) 開発したログアンプ付加システムを使用することにより, SCC の開口部エコーを飽和させることなく端部エコーの視認性が改善できたため, これまで探傷感度を変更して行う必要のあった, SCC 検出と深さ測定を一度の探傷で行うことが可能となった。
- (4) 開発したログアンプ装置は汎用の超音波探傷器に通常の超音波探傷ケーブルを介して容易に接続でき, 簡便に探傷画像を改善するログアンプ付加システムを構成することが可能である。

ログアンプの開発は汎用の超音波探傷装置と組合せて使用することを目的としてログアンプ付加システムを構築した。しかし, 本論文で示したログアンプを使用する探傷画像の改善手法はフェーズドアレイ探傷装置などに対しても有効な画像改善手法になると考えられる。

参考文献

- 1) 新超音波医学, 第1巻, 医用超音波の基礎, 日本超音波医学会, 医学書院, pp.32-33, (2000)
- 2) S. Neergaard, S.E. Iversen, W. Damgaard Kristensen, “System for Advanced Automated Ultrasonic Examination”, Proceedings of the 7th European Conference on Non-destructive Testing, pp.3040-3047, (1998)
- 3) ScanMaster Systems Ltd, Brochure, “LAM4 Log Amplifier Front-end electronics for the upi-50 ultrasonic instrument”, (1998)
- 4) JAEC 4207-2008 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程, 日本電気協会, (2008)
- 5) 清水敬輔, 設楽親, 小林輝男, 山下理道, 岡田亮兵, 稲垣哲彦, 中田親秀, 長松弘, 近畑英之, 山本幸司, 枅明彦, 牧原善次, 高津光志, 岩田潔, 東海林一: 原子炉再循環系配管への超音波探傷試験実施・評価に関するノウハウ, 保全学, 8(4), pp.31-36, (2010)
- 6) Texas Instruments Inc., “TL441 Logarithmic Amplifier Datasheet”, SLVS328, p.12, (2000)
- 7) T. Sasahara, H. Inoue, “Application of Logarithmic Amplifier to Ultrasonic Imaging”, CD Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing, (2008)
- 8) 笹原利彦: 超音波断面画像によるき裂判別技術の開発 (第一報), 電力中央研究所報告, Q08002, (2009)
- 9) 笹原利彦, 井上裕嗣: 超音波探傷画像に基づく SCC の検出及び高さ測定のための手順の開発, 非破壊検査, 60(2), pp.119-125, (2011)

第6章 結論

6.1 まとめ

超音波探傷試験技術は原子力発電所用機器の供用期間中検査（ISI）において欠陥の位置及び寸法測定が可能な実用技術として不可欠であり、この技術による欠陥の検出性及び欠陥寸法測定精度が十分な性能を有していることはこれまでの国内外における信頼性実証試験で確認されている。しかし、その測定結果が探傷者あるいは探傷チーム間でばらつきがあることもこれらの実証試験で明らかとなった。

本論文が画像を使用する超音波探傷試験の適用拡大と定着を大きな目標に据えているのは、超音波探傷試験における個人差によるばらつきを小さくし、超音波探傷試験結果の信頼性を高めたいと考えるためである。この点で、現在の超音波探傷画像は、探傷結果を画像として提示するのみでなく、観察者に現場で探傷していると同じAスコープを動画として再現表示することが可能であり、探傷画像の適切なレビューにより測定のばらつきを最小化できる可能性がある。しかし、エコー高さや指示長さによる「Yes」、「No」判定に比較すると、画像の読み取りに専門的知識を必要とするため、探傷実施側と評価側の双方に負担を強いる結果となっており、探傷画像の持つ利点と将来性について十分な社会的理解が得られていないのが現状となっている。

本論文は以上の状況を踏まえて、超音波探傷画像読み取りのノウハウ開示と理解しやすい超音波探傷画像作成手段の提供により、従来の、探触子走査やAスコープの判読技術の習得に多大な努力を必要とする手動超音波探傷から、機械的な探触子走査と超音波画像を使用する探傷への移行を促すものである。このため、本論文の各章では以下を論じた。

第1章「緒論」では、議論の導入部として現在の工業用超音波探傷試験技術を規格の要求を含めて説明した。また、代表事例として原子力発電所のステンレス鋼配管突合せ溶接部に発生するSCCを取り上げ、超音波探傷試験から見たSCCとその周辺形状の形態的特徴を示すと共に、現状の超音波探傷試験技術による検出確率及びSCC深さ測定値の信頼性を示した。更に、工業分他における超音波画像化技術の状況に加えて、超音波探傷試験規格がエコー高さを基準としていることが足枷となり、画像による解析技術の探傷現場への取り込みが遅れていることを示した。

第2章「SCC深さ測定PD試験技術の分析」では、ステンレス鋼配管溶接部SCCのき裂深さ測定実証試験（PD試験）で得られたデータを分析し、手動探傷に比べて探傷画像を使用するフェーズドアレイ法がより測定精度が高いことを明らかにした。また、同じ超音波探傷装置と手順書を使用する受験者間でも結果にばらつきが大きいことから、同じ組織内でもノウハウの共有が十分ではないことを示した。

第3章「SCC超音波特性の画像化」では、ステンレス鋼配管溶接部のSCCを対象とした画像解析技術の公知化を目的として、手動探傷で蓄積したSCCの検出及び深さ測定のノウハウを整理し、これらの知見に基づく探傷画像の読み取り技術を具体的に示した。

また、より良い超音波探傷画像の作成に役立てるため、使用する超音波の周波数及び周波数帯域幅が画質に与える影響を明らかにし、その選定方法を示した。

更に、理解しやすい探傷画像を提供するための新しい試みとして、周波数フィルタを使った反射源の判別と画像化を試みると共に、ログアンプを使用する画像の改良方法を検討した。その結果、画像化による欠陥判別ではログアンプの使用が有効なことを確認した。

第4章「フェーズドアレイ画像による SCC 検出と深さ測定手順の開発」では、フェーズドアレイ技術を使用したステンレス鋼配管溶接部の SCC 検出及び深さ測定について、第3章で示した画像解析プロセスを SCC 付試験体の探傷画像を使用しながら手順として取りまとめた。開発した手順の基礎的な部分は固定角探触子を使用する探傷画像評価にも適用可能である。

第5章「ログアンプとリニアアンプの併用による超音波探傷試験」では、安価で精細な探傷画像作成技術の提供により画像化技術の現場適用を促進する目的で、汎用の超音波探傷器と組合せて使用可能な外付け型ログアンプ装置を開発した。また、このログアンプ付加システムを使用して精細な SCC の探傷画像が提供できることを証明した。

本論文では各章の議論を通して超音波探傷画像の有用性とその具体的な使用法を Know-why を含めて示すことができた。特に、本論文で提示した超音波探傷画像では、これまで無視されて来たノイズエコーが探傷部位の形状に関する情報を含んでおり、これらを画像として描写することにより手動探傷において手作業で行われている溶接部と指示位置の作画作業を省略できるだけでなく、探傷部位に関する信頼性の高い情報の提供が可能になり、SCC の検出及び深さ測定がより確実に行えることを示すことができた。

6.2 今後の課題

本論文が目指している画像を使用する超音波探傷試験の適用拡大のために必要と考えられる今後の課題を以下に示す。

(1) ログアンプとリニアアンプ併用システムの改良

第5章で述べたログアンプとリニアアンプを併用する超音波探傷については SCC 付の試験体を使用してその有用性を示すことができた。このシステムは原理的に応用できる範囲が非常に広いため、今後様々な探傷事例を追加してその可能性を拡大することができると思う。例えば、材料による減衰は小さいがビーム路程が長いために超音波の拡散減衰が大きな厚肉容器に発生する微小な欠陥の探傷ではその威力を発揮できると考える。また、炭素鋼の溶接部と母材部のわずかな減衰率の違いによるノイズエコーを画像化することにより溶接部の形状を描き出すなど、より有効な使用法と可能性を追求して行く必要がある。

(2) より欠陥らしい描写の追求

今後改良すべき課題として、超音波探傷画像が描き出す欠陥像をより実際の欠陥形状に近づける必要がある。現在の B スコープが描き出す欠陥像は超音波ビームの広がりそのまま画像化された形であり、超音波探傷技術者以外には、一般の技術者であっても描画された像を簡単には理解できないことを承知したうえで、よりリアルで平易な表現を追求する必要がある。また、画像を素人目に見易くするために説明しやすいエコーのみを残して低いエコーを表示しないような表現は重要なデータが隠れてしまう可能性があるため、このような手段を取らずによりわかり易い画像を提供できる手段を工夫する必要がある。

よりリアルな欠陥像を描き出す手法としては SAFT 法やハーモニックイメージングを利用する方法等の開発が進められているが、高速で広範囲を探傷するという現場サイドの要求を十分考慮して開発を進める必要があると考えている。

また、精細な探傷画像を得るための手段として超音波のビームを絞る手法がある。この方法は細い超音波ビームを使用する代償として細かな探傷ピッチが必要となる。したがって、この方法を現場における欠陥検出に実用するためには、細い超音波ビームを作り出す技術に加えて、広い範囲を電子的に走査するフェーズドアレイ技術と組み合わせるなどして高速で精細な走査を可能にする技術の開発が必要と考える。

(3) 画像解析技術の規格化

海外においては画像解析技術の規格化が進められている。例えば非破壊検査を規定する米国の ASME Section V では TOFD 法及びフェーズドアレイ法の使用が規格化され、それに係る様々な欠陥の評価法についても規格が作られている。一方、国内においては ISI における超音波探傷試験の手法を規定する日本電気協会の電気技術規程 JEAC 4207-2008 の 2012 年追補版において実証によるフェーズドアレイ技術の使用を認める規定が追加されているものの、画像を使った欠陥の評価法等の規格化は計画されていない。超音波の画像化技術の開発においては国内と海外で大きな差は存在せず、また海外技術の導入にも何ら制限は存在しない。したがって、この差は画像を使用する超音波探傷試験の有用性を認めてそれを実際に使用して行こうとのユーザ及びそれを監督する側の意志の違いと考えている。

国内においても本論文で示したような形で様々な適用事例が具体的かつ系統立てて公開され、解析事例を蓄積されれば、超音波画像による判定が社会的に容認され、実用化が促進できると考えている。

(4) レビューシステムの構築

超音波探傷画像が提供する客観性は、超音波探傷試験におけるばらつきを最小化させるうえで重要な手段となることに注目し、その有効活用を進める必要がある。手動探傷の場合は検査員が探傷現場で欠陥が無いと判断して記録を作成した場合、その後いかなる評価を行っても見逃しを認識できない可能性が大きい。この点で現在の超音波探傷画像データは精細であり、A スコープ像も動画として再現することが可能である。このため、探傷データを複数の超音波探傷技術者が観察すれば、それぞれの技術者が探傷を行ったと同じ信頼性を期待することが可能である。

現在の高速通信網により画像によるレビューを更に容易にできる環境が整えられている。現在は超音波探傷記録の確認を現物での A スコープの確認等があるために現地で実施しているが、画像による解析が定着すれば記録の解析のために現地に赴く必要は無く、かつ、検査結果の信頼性を向上させることが可能になると考えている。

このようなレビューシステムの構築は、データの守秘や複数の解析装置を準備する費用、レビュー者の資格など検討すべき課題は多いが、解析結果の信頼性とレビューを含めた効率を考慮すれば十分検討に値すると共に、世界に先駆けて超音波探傷の信頼性を格段に向上させることが可能となる。

本論文は BWR 型原子力発電所におけるステンレス配管溶接継手の SCC を対象として記述した。これは、この部位に損傷事例が多く、これまで多くの研究や実証試験が行われてきたことを考慮している。本論文で記述した基本的考え方は他の工業分野、対象部位、及び損傷形態についても適用可能であり、これらの分野・部位でも活用例が報告され、データが蓄積されることを希望している。

謝辞

本論文は 1970 年代に発生が確認された軽水型原子力発電プラント配管溶接部における SCC の超音波による検出及び寸法測定技術の現状と今後進めるべき方向について、40 年以上にわたる探傷経験をベースとしてまとめています。

この 40 年間には、その大半を過ごした石川島播磨重工業株式会社（現（株）IHI）原子力事業部の諸先輩や同僚だけでなく、東北電力株式会社，東京電力株式会社，中部電力株式会社の方々や現場で一緒に汗を流した協力検査員の方々から多くの支援と示唆を頂き，この実際的な経験がこの論文の基調となっております。したがって，最初にこれらの方々に感謝の意を表したいと考えます。

また，1984 年から 1987 年までを客員研究員として過ごした米国の Electric Power Research Institute (EPRI) において，本論文の骨格となる SCC を判別するための様々な技法と超音波画像を使用する判定の手順を系統的に取りまとめる機会を得ると共に，海外における SCC 検出及び寸法測定に関する技量確認試験の実際を経験することができました。この点で，異例の長期滞在に辛抱いただいた原子力事業部の方々，特に直接の上司であった数岡省一郎氏に感謝すると共に，EPRI で指導いただいた Gary Dau 博士及び Frank Ammirato 氏に感謝いたします。

2006 年には，当時在籍していた株式会社 IHI 検査計測から財団法人電力中央研究所（一財）電力中央研究所）に移籍し研究員としての道を進み始めました。このような機会を与えて下された石本礼二社長のご決断に感謝しております。

電力中央研究所においても様々な方々から支援をいただきました。特に，博士課程進学へ背中を押していただいた初代 PD センター長である神戸弘巳博士に感謝すると共に，電力中央研究所 材料研究所 所長である新田明人博士とその後任の黛正巳博士及び第二代 PD センター長である秀耕一郎博士の暖かいご支援に感謝いたします。

本論文はその着手から完了まで 6 年の歳月がかかってしまいました。この間，辛抱強く論文の内容や構成について丁寧にご指導くださいました，東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻の井上裕嗣教授に心より感謝いたします。また，論文作成に当たりご助言及びご助力を頂いた東京工業大学大学院理工学研究科 機械制御システム専攻の黒川悠助教に感謝いたします。

最後に，これまで支え続けてくれた妻の清子に「ありがとう」の言葉を贈ります。