

## 4-4

## 溶接・接合部の非破壊試験法と検査\*



横野 泰和\*\*

Non-destructive Testing and Inspection for Welds and Bonding Joints\*

by YOKONO Yoshikazu\*\*

## キーワード

品質保証, 品質管理, 溶接施工管理, 放射線透過試験, 超音波探傷試験, 磁粉探傷試験, 浸透探傷試験, 外観試験

## 1. はじめに

非破壊試験は、溶接構造物の製作時の品質保証及び保守メンテナンス時の設備診断において非常に重要な役割を担っている。製造時の検査においては、1960年代の高度経済成長期から、重厚長大産業の代表である鉄鋼業界を初めとして、造船、発電プラント、石油・石化プラントなど重工業分野での品質管理の要求に応えるべく、放射線透過試験などの非破壊試験方法が、多くの溶接構造物に対して適用されその役割を果たしてきた。1980年代に、鉄の時代からコンピュータなどの情報産業の時代へと移り変わると同時に、これらの既存の溶接構造物に対してはメンテナンスを中心とした検査が要求されるようになり、特に、石油・石化プラント、原子力等の発電プラントの老朽化に伴い、超音波探傷試験を中心とした非破壊試験方法が保守検査に適用されている。また、ここ数年のデジタル化、信号処理など周辺技術の急速な発展に伴い、自動化、高精度化、高能率化を目的とした最新技術が開発され、非破壊試験技術は非常に多様化しつつある。しかしながら、一方では、非破壊試験の信頼性は熟練した技術者の技量に依存する部分が多く残されていることも事実である。

本シリーズである溶接接合教室において、非破壊試験は、溶接施工管理の中の重要な項目の一つとして、第4章の「4-1 溶接品質マネジメントシステム」及び「4-2 溶接施工計画と溶接施工管理」に述べられている<sup>1,2)</sup>。また、溶接部の試験方法は、破壊試験と非破壊試験に大別されるが、このうち破壊試験方法については、すでに「2-3 材料と溶接部の試験法」で詳述してある<sup>3)</sup>。ここでは、溶接

部の非破壊試験方法の概要を説明し、それらを溶接部へ適用する場合の留意点について概説する。さらに、溶接・接合部の非破壊試験に関連する最近の新技术の動向を併せて紹介する。なお、基本的な事項で説明不足と思われる箇所については、既存の教科書である「溶接・接合技術入門」<sup>4)</sup>、「溶接・接合技術特論」などを参考にして頂きたい<sup>4,5)</sup>。

## 2. 非破壊試験方法の概要

非破壊試験とは、材料や製品が良品か否かを判断するために、それを壊さずに（非破壊で）その表面及び内部の状態を調べる（試験する）ことを意味する。一般に溶接部に対しては、内部のきずを検出する方法として、放射線透過試験と超音波探傷試験が、表面や表層部のきずを検出する方法として、磁粉探傷試験、浸透探傷試験などがある<sup>6-7)</sup>。なお、JIS Z 2300（非破壊試験用語）では、非破壊試験によって検出された不連続部を「きず」と定義し、そのうち仕様書、基準などで不合格と判定されたものは「欠陥」と定義している。ここでは、上記に従った表現を用いた。

## (1) 放射線透過試験

放射線透過試験（RT）は、X線又はγ線を試験体に照射して透過した放射線の強度を反対側に配置したフィルムに画像表示することにより、空洞や割れなどの不連続部を検出する方法である。X線やγ線は電磁波の一種で、図1に示すように、周波数が非常に高く波長が短い性質を有しており、物質内を透過する特徴がある。図2は、左右で厚さが異なり、内部に球状の空洞が2箇所、異物が1箇所存在する板材を試験したときの様子を示しており、上の図は試験体の断面と放射線の透過経路及びフィルムの配置を、下の図は撮影して得られる透過写真像を放射線の透過方向からみたときの画像として示している。

\*原稿受付 平成21年1月13日

\*\*正員 ポニー工業(株) Member, Pony Industry, co., Ltd.

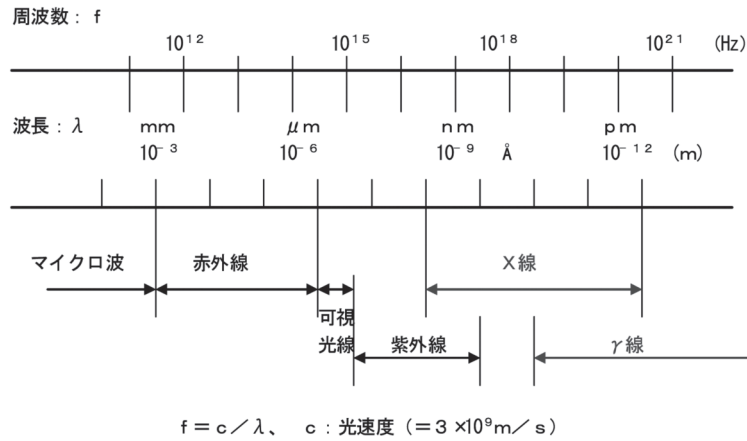


図1 電磁波の種類とその周波数と波長

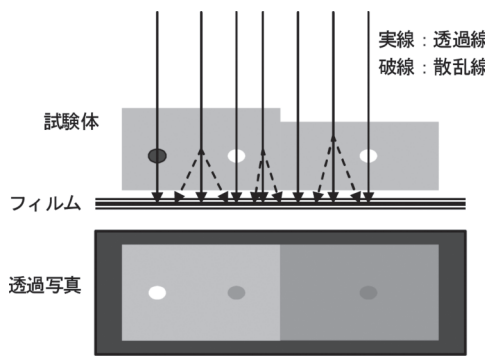


図2 放射線透過試験の原理

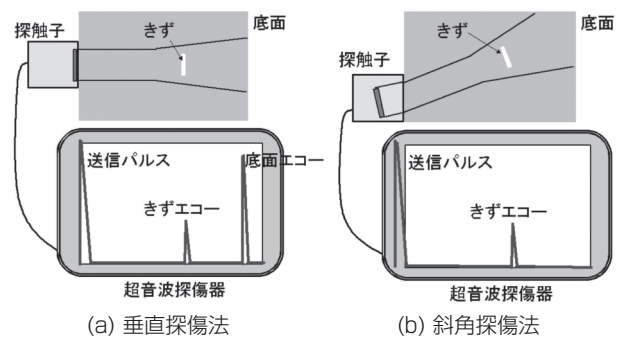


図3 超音波探傷試験の原理

X線やγ線は物質内で散乱するため一部エネルギーを失いながら透過していく。試験体が薄い部分や空洞のある部分では、透過厚さが薄いため、フィルムに到達する放射線の強度がより強くなり黒い像として現れる。一方、試験体より密度の大きい物質、例えばタングステンの巻込みなどが存在すると白い像として現れる。

放射線の波長は同じ電磁波である光よりもはるかに短いことから、微細な部分まで分解して詳細な画像を表示できる利点がある。しかし、鉛やタングステンのように放射線が透過しにくい材料もあり、また試験体が大きく(厚く)になると、十分な検査が実施できない場合が生じる。さらに、基本的に透過法であるために、試験体を挟んで線源とフィルムを配置することが必要である。通常の撮影方法では、フィルムを現像するまで試験結果が分からないということも欠点の一つである。

(2) 超音波探傷試験

超音波探傷試験 (UT) は、超音波パルスを弾性波として試験体に伝搬させ、内部にあるきずや裏面などの不連続部から反射したパルスを電気信号に変換して、きずを検出・評価する方法である。図3(a)及び(b)はそれぞれ垂直探傷法及び斜角探傷法と呼ばれる方法の原理を示しており、上の図は試験体の断面と超音波の伝搬の様子を、下の図はそのときに得られる波形を示している。垂直探傷法では、探触子から発信された超音波パルスは試験体表面に対して垂直に内部に伝搬し、きずや底面のような

境界部で反射して同じ探触子で受信される。超音波探傷器の表示器は、オシロスコープと同じ機能を有しており、縦軸の受信信号の大きさから反射源の概略の大きさが推定され、横軸の伝搬時間から反射源までの距離が測定される。斜角探傷法では、表面に対して斜めに超音波が伝搬するため底面からのエコーは得られず、きずエコーのみが表示される。

超音波探傷試験では、一般に反射法が用いられるため、片面からの検査が可能であり、試験結果がその場ですぐに得られることが大きな利点である。しかし、試験体中に超音波を伝搬させるために表面に接触媒質と呼ばれる液体を塗布する必要があり、表面状況によっては超音波の伝搬状況に影響することがある。また、得られる試験結果が電気信号であり、きずの形状や種類の判断が困難な場合が多いこと、鋳物のように材料によっては超音波が伝搬しにくいこと、複雑形状の試験体の検査が困難であることなどについても留意が必要である。

斜角探傷法の場合のように、試験体表面に斜めに超音波を入射させその角度を変化させると、試験体中に伝搬する超音波も種々変化する。図4は水から鋼材に超音波が入射した場合の例で、超音波が伝搬してきた媒質と試験体との音速が異なると、図のように境界面で屈折して、固体である試験体中では、縦波、横波、表面波などのいろいろな波動様式 (モード) で伝搬する。通常の斜角探傷法では、できるだけ複雑な状況を避けるため、④に示



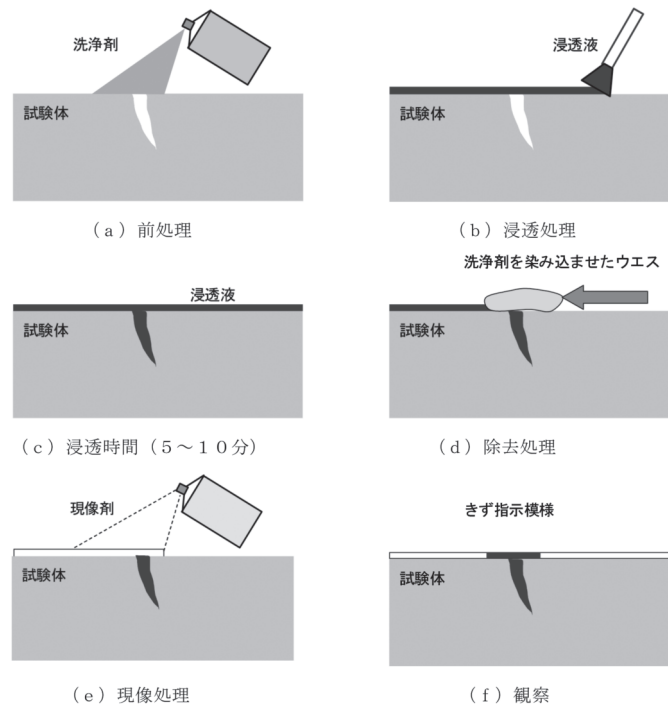


図6 浸透探傷試験の原理

表1 非破壊試験の種類と特徴

方法	利点	適用限界
放射線透過試験 (RT)	ブローホールやスラグ巻込みなどの体積欠陥の検出に適する。表層部欠陥の検出も可。透過写真上できずの種類が推定が可能で記録性がよい。	試験体の両面に接近できる必要がある。面状欠陥では照射方向と欠陥面と平行でなければならない。比較的費用が高い。現像時間が必要。
超音波探傷試験 (UT)	割れなど面状欠陥の検出に適する。片面からの探傷が可能。欠陥の板厚方向の情報が得られる。試験結果の即答性がよい。厚板の探傷も可能。	ブローホールなど球状欠陥の検出不可。表面状態の影響を受け易い。接触媒質が必要。薄板の探傷には不適。欠陥の種類判別が困難。探傷技術者の熟練が必要。
磁粉探傷試験 (MT)	比較的経済的。操作が容易。装置がポータブルである。表面下の欠陥の検出も可能。	強磁性体のみに適用可。試験前後の洗浄が必要。コーティングされたものは適用不可。電源が必要。
浸透探傷試験 (PT)	携帯性がよい。経済的。試験結果の評価が容易。照明以外の電源が不要。欠陥の形状や方向性の影響がない。	コーティング、スケールなどの表面状態では適用不可。試験前後の洗浄が必要。浸透後の過洗浄や洗浄不足に注意。

磁粉探傷試験の試験対象が強磁性体に限られるのとは異なり、浸透探傷試験は、金属はもちろんのこと、セラミックス、プラスチックなど固体材料全般に適用可能であるが、検出できるきずは表面に開口したものに限られる。

#### (5) その他の非破壊試験方法

コイルに電流を流したときに生じる磁界によって試験体に渦電流を発生させ、きずにより乱れた渦電流のインピーダンス変化によってきずを検出する渦流探傷試験 (ET) がある。溶接部の試験に用いられることは稀であるが、非接触で電気信号として結果が得られるので、軸やチューブなどを高速で試験するのに適している。

また、電気抵抗ひずみゲージなどを用いて構造物に加わる応力を解析するひずみ測定 (SM)、ヘリウムなどのガスを容器や配管の内部に注入して漏れを調べる漏れ試験 (LT)、材料や構造物に外力が加わったときあるいは

亀裂が進展するときに発生する音 (超音波) を検知するアコースティック・エミッション (AE) がある。さらに、図1で示した電磁波の一種である赤外線を用いて構造物の表面温度を遠隔で測定して、その健全性を評価する赤外線サーモグラフィ (TT) などがある。試験の目的、対象物の状況や環境などを考慮して、適した方法を選出することが重要である<sup>6,7)</sup>。

### 3. 溶接部に対する非破壊試験の適用

#### (1) 非破壊試験方法の選定

溶接部の健全性を評価する目的で非破壊試験を実施する場合、基本的には、表面に対する試験方法又は内部に対する試験方法、あるいはその両方を選定する。このとき、各種試験方法の特徴を十分に把握して選定することが重要である。表1に、各種非破壊試験方法の一般的な

表2 外観試験の検出対象となるきず及び寸法測定対象箇所

試験の目的	実施項目
表面きずの検出	割れ、オーバラップ、ピット、アンダカット、スパッタ、クレータなど
形状寸法の測定	目違い、余盛高さ、アンダカット、ビード表面の凹凸、角変形など

表3 非破壊試験を実施する際の余盛の影響

試験方法	余盛の影響
放射線透過試験	余盛が存在すると母材部に比較してその部分のフィルム濃度が低くなる。余盛が過度に高い場合には、JISなどに規定される濃度範囲を満足しなくなる場合が生じる。また、透過写真上で余盛部の散乱比が大きくなりコントラストが低下する。
超音波探傷試験	探傷面側に余盛が存在すると、探触子を走査する範囲が限定される。すなわち、探触子の前面がビード止端部に当たる位置より前に走査させることができないため、直射法での探傷領域が小さくなる。余盛の形状によっては、超音波の反射源となり妨害エコーが発生することがある。
磁粉探傷試験	極間法で横割れを検出しようとする場合、余盛が存在するとその上に磁極を配置すると磁化が弱くなるため、ビード近傍の母材部に磁極を配置する必要がある。余盛の形状によっては磁粉（又は検査液）が溜まりやすくなり疑似指示が現れることがある。また、ビード止端部は形状的に不連続部となるため、疑似指示の原因となることがある。
浸透探傷試験	余盛の形状によっては除去処理（又は洗浄処理）が困難となり疑似模様が現れることがある。また、ビード止端部は特に浸透液が残りやすく、疑似模様の原因となることがある。また、余盛の凹凸が著しい場合や余盛が高すぎる場合は、現像剤を塗布するときに均一な塗膜厚さにすることが困難となる。

表4 溶接構造物の非破壊試験関連の日本工業規格（JIS）

試験方法	規格番号	規格の表題
外観試験（VT）	JIS Z 3090:2005	溶融溶接継手の外観試験方法
放射線透過試験（RT）	JIS Z 3104:1995	鋼溶接継手の放射線透過試験方法
	JIS Z 3105:2003	アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法
	JIS Z 3106:2001	ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法
超音波探傷試験（UT）	JIS Z 2344:1993	金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則
	JIS Z 3060:2002	鋼溶接部の超音波探傷試験方法
	JIS Z 3070:1998	鋼溶接部の超音波自動探傷方法
	JIS Z 3080:1995	アルミニウムの突合せ溶接部の超音波斜角探傷試験方法
磁粉探傷試験（MT）	JIS Z 2320-1:2007	非破壊試験－磁粉探傷試験－第1部：一般通則
	JIS Z 2320-2:2007	非破壊試験－磁粉探傷試験－第2部：検出媒体
	JIS Z 2320-3:2007	非破壊試験－磁粉探傷試験－第3部：装置
浸透探傷試験（PT）	JIS Z 2343-1:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第1部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様の種類
	JIS Z 2343-2:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第2部：浸透探傷剤の試験
	JIS Z 2343-3:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第3部：対比試験片
	JIS Z 2343-4:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第4部：装置

長所及び適用限界をまとめて示す<sup>8)</sup>。試験対象物によって、これらの適用について制約を受けることがあるが、いずれの場合も試験の目的を明確にして、その目的を達成するために適切な試験方法を選定することが重要である。

## (2) 外観試験の役割

溶接部を試験・検査する場合は、まず外観試験が実施される。一般に、我々がものを購入するとき、目で見える範囲で外観にきずなどが無いのか、あるいは所定の形状・寸法であるかのチェックを行うが、それと同様に溶接部に対しては表2に示す外観試験が行われる。その実施目的として、目視によって表面のきずなどの異常部を検出する試験と測定器具などを用いて外観形状の寸法を測定する試験に大別される。

外観試験のもう一つの重要な役割は、非破壊試験を実施するに当たって事前調査を行うことである。試験体の表面状況、溶接ビードの形状、余盛高さなど、非破壊試験の実施に影響を及ぼす項目について、それらが障害とならないかどうかを事前にチェックしておくことが非常に重要である。例えば、表面が粗いと超音波探傷試験を実施する際に超音波が試験体内部に十分に伝搬しなくなる場合があり、磁粉探傷試験や浸透探傷試験においてもバックグラウンドの疑似模様の原因となることがある。また、余盛が存在するときその形状によっては非破壊試験を適用する際に制限を受けたり、試験結果を判定する場合の障害の要因となることがある。余盛の形状が各種非破壊試験を実施する際に及ぼす影響をまとめて表3に示す。特に溶接止端部の形状や余盛高さの影響が著しいこ

表5 非破壊試験の適用に際して留意すべき項目

方法	試験装置及び材料	主な留意すべき項目
外観試験 (VT)	計測器具(金尺、溶接ゲージ、ダイヤルゲージなど)、光学補助具(カメラ、ビデオ、内視鏡など)	試験条件(環境)、試験の種類(目視試験、計測試験)、試験の時期(溶接前、溶接中、溶接後、補修後)
放射線透過試験 (RT)	線源の種類(X線発生装置、ガンマ線照射装置)、感光材料(フィルム、増感紙)、フィルム観察器、透過度計	エネルギー(電圧、GBq)、撮影配置、必要条件(透過度計、濃度、階調計)、きずの像の分類
超音波探傷試験 (UT)	超音波探傷器、超音波厚さ計、垂直探触子、斜角探触子、接触媒質、標準試験片、対比試験片	周波数、振動子寸法、屈折角、探傷感度、検出レベル、感度補正(表面状況、減衰係数)、試験結果の分類
磁粉探傷試験 (MT)	磁化装置(極間式磁化器、プロッド磁化装置)、磁粉(蛍光、非蛍光)、紫外線照射装置、標準試験片	磁化方向、探傷有効範囲(探傷ピッチ)、磁粉模様の観察方法、磁粉模様の分類、脱磁
浸透探傷試験 (PT)	浸透液(蛍光、染色)、洗浄液、現像剤、乳化剤、紫外線照射装置、対比試験片	前処理の方法、浸透時間、余剰浸透液の除去方法(洗浄方法)、現像方法、観察方法、浸透指示模様及びきずの分類

とがあるので外観試験で事前に十分にチェックしておくことが必要である。

### (3) 溶接部の非破壊試験に関する規格・基準

溶接部の非破壊試験を実施する際に、信頼性のある客観的な結果を得るために関連する規格・基準が引用される。その最も代表的なものは日本工業規格(JIS)であり、各種試験方法に対して表4に示すJISが制定されている。原子力や火力発電プラント、石油石化・化学プラント等の大型構造物で、公共性の高い社会資本に相当するものに対しては、さらに法律によってその実施規定が定められているが、適用基準や合否判定などの基本事項だけを規定し、具体的な実施手順等についてはJISなどの既存の規定を引用するが多い。

溶接部に対して非破壊試験を適用する場合はこれらのJIS等をベースにして、実際の試験対象物及び試験の目的を考慮して試験計画が立案されるが、そのときの留意点をまとめて表5に示す。発注者が作成する仕様書を満足しかつ具体的な試験要領及び試験手順を文書化する際に、これらの留意点に配慮が必要である。特に放射線透過試験及び超音波探傷試験に関しては、溶接継手の形状によってその適用の仕方が異なるため、それぞれのJISの附属書においては、継手形状ごとの適用方法が規定されている。放射線透過試験の場合は、JIS Z 3104の附属書1に鋼板の突合せ溶接継手を、附属書2に鋼管の円周溶接継手を、附属書3に鋼板のT溶接継手の試験方法を規定している。超音波探傷試験の場合はさらに細かく分類されており、JIS Z 3060の附属書2に平板継手溶接部を、附属書3に円周継手溶接部を、附属書4に長手継手溶接部を、附属書5に鋼管分岐継手溶接部を、附属書6にノズル継手溶接部を規定している。

### (4) 試験結果の評価方法

鋼溶接部の放射線透過試験を規定するJIS Z 3104では、得られた透過写真上のきずの評価方法は、上記JISの附属書4に規定されている。まず透過写真上で観察されるきずに対して、割れ、線状及びそれに類するもの、球状及びそれに類するものなどに種別分けを行い、それぞれに対してきずの大きさ、長さ及び分布状況を考慮し

てきずの程度を評価する。

鋼溶接部の超音波探傷試験を規定するJIS Z 3060では、得られた結果の評価方法は、上記JISの附属書7に規定されている。まず、基準とするエコー高さレベル(検出レベル)を超えるエコーに対して、そのエコー高さが最大となるときの探触子位置及びビーム路程からきずの位置を推定し、溶接部のきずによるものかを判定する。次に探触子を左右に走査して(溶接線方向に伸びたきずの場合は溶接線に沿って走査して)エコー高さが所定の高さを超える範囲をきずの指示長さとして求める。検出したきずごとに、エコー高さときずの指示長さを考慮してきずの程度の評価を行う。

磁粉探傷試験は、一般に、JIS Z 2320-1に従って行われる。溶接部に対しては、電磁石で試験体を直接磁化させる極間法又は電極を用いて試験体に電流を流すことによってその回りに磁場を発生させるプロッド法のいずれかの磁化方法が適用される。プロッド法はアークストライクの恐れがあることから、高張力鋼溶接部の検査には極間法が用いられる。いずれの場合も、磁束をさえぎる方向にきずがあると検出されやすいため、溶接部の磁粉探傷試験を行う場合は、少なくとも直交した2方向に対して磁化させて探傷する。磁粉模様が現れた場合は、きずによるものかそれ以外の疑似模様かを確認して、きずによる磁粉模様に対しては、割れによるもの、独立した線状又は円形状のもの、連続したもの、あるいは分散したものに分類して記録する。

浸透探傷試験は、一般に、JIS Z 2343-1に従って行われる。溶接部に対して浸透探傷試験を適用する場合、溶剤除去性染色浸透液と速乾式現像法を組み合わせる探傷法が多く用いられる。この方法は、電気や水道等の設備が不要で、非常に簡便に行えるという利点を有しており、大型構造物の部分的な試験に有効である。浸透探傷試験において最も問題となるのは表面状況である。特に溶接部の場合、溶接ビードの凹凸が著しい場合や止端部の形状によっては浸透液がたまりやすくなり、除去処理が困難となる場合がある。できる限りビードの止端部に対していねいに除去処理を施すのがよい。浸透指示模

表6 非破壊試験に対する品質管理方法の例

試験方法	規定内容	準拠規格
放射線透過試験 (RT)	撮影配置：線源及びフィルムの位置 透過写真の必要条件：透過度計の識別最小線径、X線フィルムの濃度、階調計の濃度差/濃度	JIS Z 3104:1995
超音波探傷試験 (UT)	材料の異方性の測定、距離振幅特性曲線の作成、探傷感度と感度補正、検出レベル	JIS Z 3060:2002
磁粉探傷試験 (MT)	標準試験片による有効磁界の確認、対比試験片による性能の確認、磁粉液の濃度、観察条件	JIS Z 2320-1~3:2007
浸透探傷試験 (PT)	浸透探傷剤（浸透液、洗浄剤、現像剤など）の性能試験、対比試験片によるきず検出能の確認、装置	JIS Z 2343-1~4:2001

様が現れた場合は、独立したもの、連続したもの、あるいは分散したものに分類し、独立した浸透指示模様については割れ、線状又は円形状のものかに分類する。これらの分類が困難な場合は、指示模様を取り除いた上で、目視、拡大鏡、エッチングなどの適切な方法で観察する。

#### (5) 試験結果の信頼性

非破壊試験結果の信頼性に影響を及ぼす因子としては、使用する装置・機材などの性能、試験方法の要領・手順、さらには試験技術者の技量や経験が挙げられる。このうち、使用装置や機材の性能に関しては、先に述べた規格・基準等にそれらの測定方法、判定基準などが規定されている。また、試験方法の要領・手順に関してはJISなどの規格に基本的に共通する必要事項が規定されており、これらを基にして実際の対象物に応じたNDT手順やNDT指示書を作成した上で試験を実施する。

溶接施工する場合には、溶接施工方法確認試験が実施されるように、非破壊試験においても、適用した試験方法及び試験条件が妥当であるか否かを確認することが望ましいが、そのためには検出すべききずを付与した模擬試験体の製作やさらに非破壊試験実施後の切断試験による確認を伴い非常に不経済となる。このため通常は、例えば表6に示すように、放射線透過試験では透過度計や階調計により透過写真の像質を確認したり、超音波探傷試験では対比試験片により探傷感度を調整し、実機材の超音波特性を考慮して感度補正等を行うことにより、間接的に試験方法及び試験条件の評価と管理を行っている。このようにして、ある品質レベル以上の試験結果が得られるように非破壊試験の品質管理が行われている。

試験を実施する技術者の、専門の知識、技量に関しては、技術者の資格認証で実証される。国内では、(社)日本非破壊検査協会が、JIS Z 2305:2001に基づいてRT、UTなど6部門に対して3つのレベルの非破壊検査技術者を認証している。このJISは、ISO9712を、国内の実情を考慮して修正したMODとして制定され、資格取得のためには、筆記試験、実技試験、経験等が要求され、さらに10年経過するごとに再認証試験が課せられる。なお、この資格は、検査対象物を特定したものではなく、共通の一般要求事項を満足していることを証明するものであるため、実際に現場の試験を実施するに当たっては、試験対象物特有の事象、特に発生が予想されるきずや損傷に関する知識、それを検出する場合の留意点などを事前に把握しておくことが必要となる。このため、特に経

験が必要とされる対象物に対しては、実機試験の前にモックアップ試験体によるトレーニングなどを行い、さらに現場では経験のある監督者の指導の下で試験を実施することが一般的である。

#### (6) 技術者の資格認証の動向

米国の原子力発電プラントに対しては、試験の信頼性に影響を及ぼす因子である、検査機器、検査員及び試験方法を総合して認定するPDI (Performance Demonstration Initiative) の考え方が導入され、Sec. XIのAppendix VIIIの中に規定として盛り込まれている<sup>9)</sup>。これが非破壊試験の妥当性を評価する最も理に叶った方法であり、世界的に広まる傾向にある。欧州では、PDIに相当するENIQ (European Network for Inspection Qualification) が導入され、イギリス、フランス、ドイツ、オランダ等の各国が対応を進めている。

日本国内でも、2004年12月(社)日本非破壊検査協会に「PD認証制度準備委員会」が設立され、2005年5月に協会規格としてNDIS0603「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<sup>10)</sup>。規格制定の動機となった対象物は軽水型原子力発電所用機器であるが、それ以外の機器をも包含した広範な構造物についても適用できる規格として制定されたが、当面は軽水型原子力発電所用機器のオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波探傷試験に対して適用される。このように、検査対象物の特性に配慮して、適した検査方法、検査装置及び検査員の組合せの実証に基づいた信頼性の高い検査が実施されるようになった。

## 4. 非破壊試験技術の最近の動向

最近では、IT産業の発展により、デジタルカメラが普及し、パーソナルコンピュータや携帯電話の機能がますます高度化しつつあるが、非破壊検査技術もこれらの周辺技術の進展に伴い大きく変わろうとしている。基本的な原理としては、放射線、超音波、電気、磁気などを用いて、きずを検出し評価する方法であることには変わりがないが、得られたデータの処理方法や評価に用いる表示方法において先端技術の応用が行われつつある。

### (1) 放射線を用いる方法

放射線透過試験では、これまでフィルムによって放射線の強度分布を透過写真として画像化してきずの像を観

表7 フィルム以外の放射線検出器

名称	原理と特徴
イメージ・インテンシファイアー (II)	X線を可視光に変換し、微弱な光を明るくする機能を持った大型の電子管(真空管)で、TVモニターを用いてリアルタイムで画像が得られる。この信号をA/D変換器でデジタル化及び画像処理して観察する。
イメージング・プレート (IP)	支持体に光輝尽蛍光体を塗布したシート状の記憶媒体にX線画像を蓄積させる。これにレーザーを照射して発生する蛍光を光電子増倍管で検出して、デジタル変換及び画像処理して観察する。
フラット・パネル (FPD)	アモルファスシリコンとフォトダイオードを組み合わせたパネルで、透過してきたX線を直接デジタル信号に変換する。薄型のセンサーで通常のX線フィルムの数十倍の感度を有し、リアルタイムでの観察が可能である。
ライン・センサー (LS)	X線ディテクターを線状に並べたセンサーで、これを直角に動かすか又は被検体を直交させて動かすことにより二次元画像が得られる。インラインの検査に適しており、連続した大きな画像が得られる。

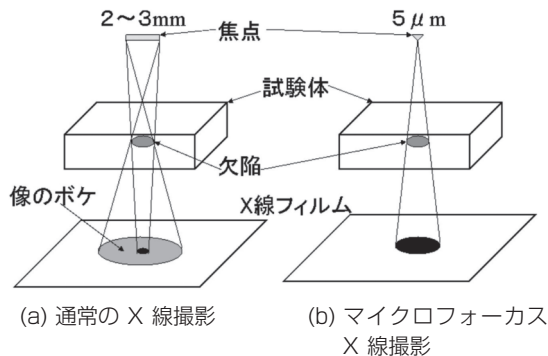


図7 マイクロフォーカス X線による拡大撮影

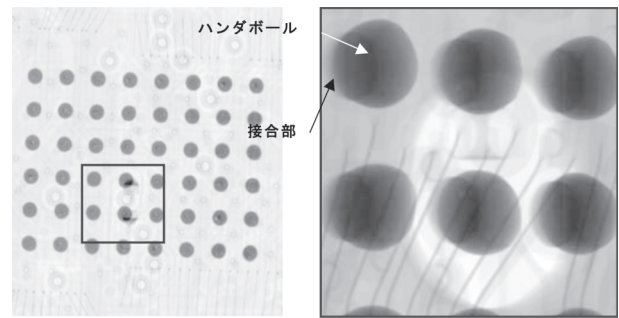


図8 実装回路基板のマイクロ接合部の拡大撮影画像の例

察する方法が用いられてきたが、フィルム以外の放射線検出器を用いてデジタル化した画像により試験結果を評価する方法が行われるようになってきた。デジタル化の最大の利点は、得られた電子データからコンピュータを用いて自由に画像処理できることである。例えば、画像の濃度を自由に調整できることから、広範な濃度範囲を扱うことができ、厚さの大きく異なる部分をもつ試験体を一枚の画像として撮影可能である。また、コントラストを改善させたり、エッジ強調により画像を鮮明にさせることが可能である。放射線検出器としては、表7に示す、イメージ・インテンシファイア (II)、イメージングプレート (IP)、フラットパネル (DFP)、ラインセンサー (LS) などがあり、それぞれ特徴を有しており、用途に応じた使い分けが必要である。また、医療分野ではすでに一般化されている、物体を輪切りにしてその断面像を観察するCT (断層撮影) 法も、小型部品などの検査に適用されつつある<sup>11)</sup>。しかしながら、デジタル画像の最大の問題点は、画像の細かさ (分解能) が検出器及び表示装置の一画素 (ピクセル) の大きさに依存することであり、通常フィルムでは識別される溶接部の微細なきずがデジタル画像では検出することが困難である。このため、通常の規格や基準に基づいた溶接部の放射線透過試験には、フィルムを用いた方法が適用されているのが実情である。

デジタル画像を用いて微細なきずを検出するためには、分解能をX線フィルム並みに如何に改善するかに尽きるが、これを解消させる一方法として微小焦点 (マイクロ

フォーカス) X線による拡大撮影が挙げられる。図7に示すように、試験対象物を線源 (X線の焦点) に近づけて、フィルムなどの検出器を離れた位置に配置することによって拡大した画像が得られるが、このときボケのない鮮明な画像を得るためには、X線の焦点を小さくすることが有効である。この適用事例として、実装回路基板に適用した結果を図8に示す<sup>12)</sup>。これは、基板の上に球状のハンダボールを並べて接合するBGA (Ball Grid Array) 構造の例で、接合部は非常に微細であり通常の大きさの画像でその健全性を確認することはできない。図8(a)のように拡大撮影して、さらに図8(b)のように斜めから観察することにより接合部の状況が明瞭に確認できる。

## (2) 超音波を用いる方法

超音波探傷試験では、従来の基本表示 (Aスコープ表示) の波形を観察する方法では熟練者の技量に依存することが大きいことから、探触子を走査させて得られるデータを集積して、きずを画像表示させる方法が開発されてきた。もともとは、基本表示 (Aスコープ) の情報をベースとして、探触子を走査させたときに得られる異常指示を記録してきずの分布状況を作図する方法で、断面表示 (Bスコープ) や平面表示 (Cスコープ) が行われてきたが<sup>13)</sup>、最近では、コンピュータの信号処理速度の進化や記憶容量の増大によって、これらの装置は大いに高度化し、記録をリアルタイムで画像化・映像化する装置やそれを立体表示 (3D表示) できる装置も実用化されている。

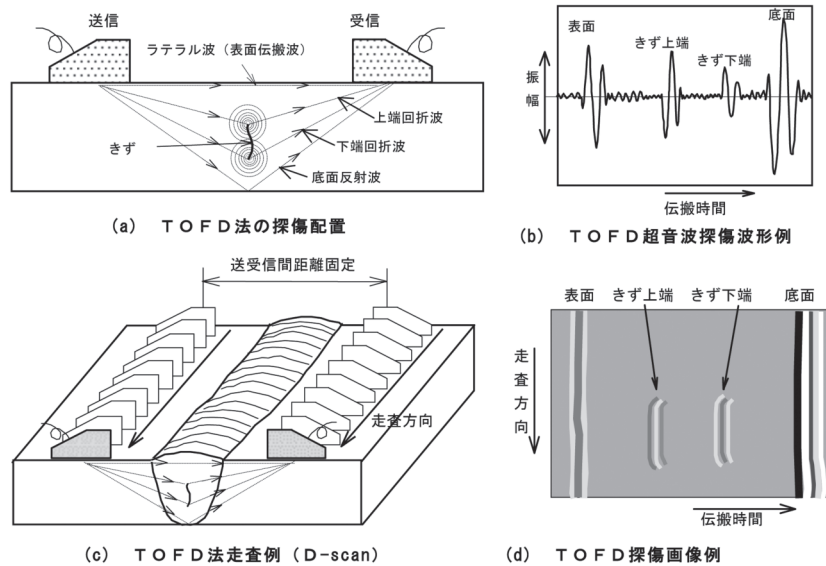


図9 TOFD法の原理

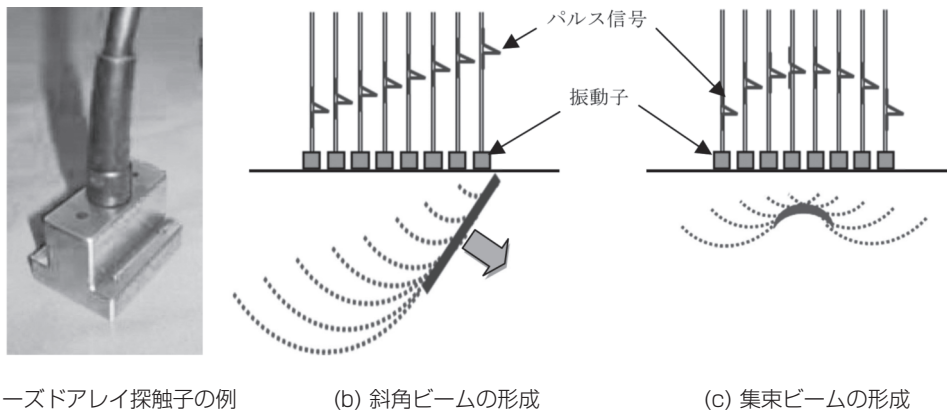


図10 電子走査型（フェーズドアレイ）探触子と超音波ビームの形成

リアルタイムで画像収集ができるシステムの代表的例として、図9に示すように、送受2個の探触子を向い合わせに固定した走査治具を溶接線方向に移動させるだけで溶接部の縦断面画像が得られるTOFD法がある<sup>14)</sup>。TOFDとは、Time of Flight Diffractionの略で、超音波の回折波の伝搬時間を画像表示させることを意味する。図9(a)に示すように、試験対象部をまたいで送信及び受信探触子を配置する。このとき超音波ビームが比較的広い探触子を使用することによって一度に広範囲の探傷ができるようにすると、表面を伝搬する超音波と底面で反射する超音波が受信され、きずが存在するとその上端及び下端からの回折波が受信される。このときの基本表示は図9(b)のようになる。溶接部を探傷する場合は、図9(c)のように、送信及び受信探触子を、溶接部をまたいで配置して、同時に溶接線に沿って移動させると、連続的に波形が採取できる。ここで信号が上に振れるときは白く、下に振れるときに黒く、というようにしてグレースケールで振幅を表し、時間軸と探触子の走査方向との二次元表示させると図9(d)のようになり、表面の指示と底面の指示の間にきずの指示が現れる。通常の超音波探傷試験では探触子を前後に動かしながら少しずつ左右方向に移

動させる必要があるのに対して、この方法では探触子を溶接線方向に一度移動させるだけで試験部の断面表示（Bスコープ）が得られ、非常に効率よく探傷ができる利点を有している。

医療用では既に一般化されている、探触子の走査を電子的に行うフェーズドアレイ（電子走査型）も、工業用において実用化され始めた<sup>15)</sup>。図10のように小さな振動子を並べて配置してそれぞれに信号を送るタイミングを少しずつずらすことによって試験体中に伝搬する超音波の方向や音場を制御する方法で、(b)のように斜めに超音波を伝搬させること、(c)のように超音波を集束させることができる。この原理を用いて、図11のように、探触子を動かすことなく電子的に超音波を横方向に走査させること及び超音波ビームの方向を自由に変えることができる。前者の(a)をリニア走査、後者の(b)をセクタ走査と呼んでいる。リニア走査及びセクタ走査を用いた端面エコー法によるきず高さの測定事例を、それぞれ図12(a)及び(b)に示す<sup>16)</sup>。裏面に開口したきずに対して、その裏面開口部及びきずの先端が画像化して表示されており、従来では技術者の技量に依存していたきず高さの測定が客観的に行えるようになった。

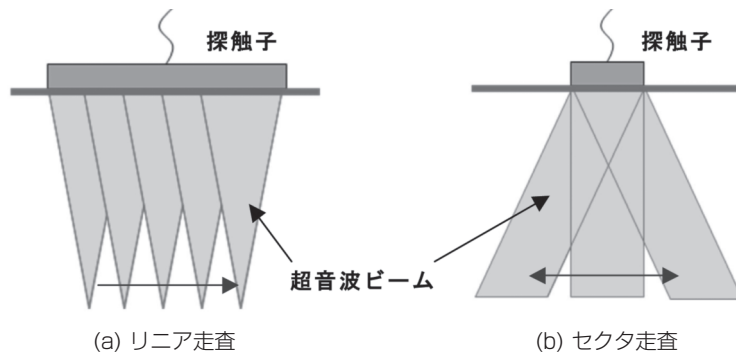


図 11 フェーズドアレイ法による電子的走査方法

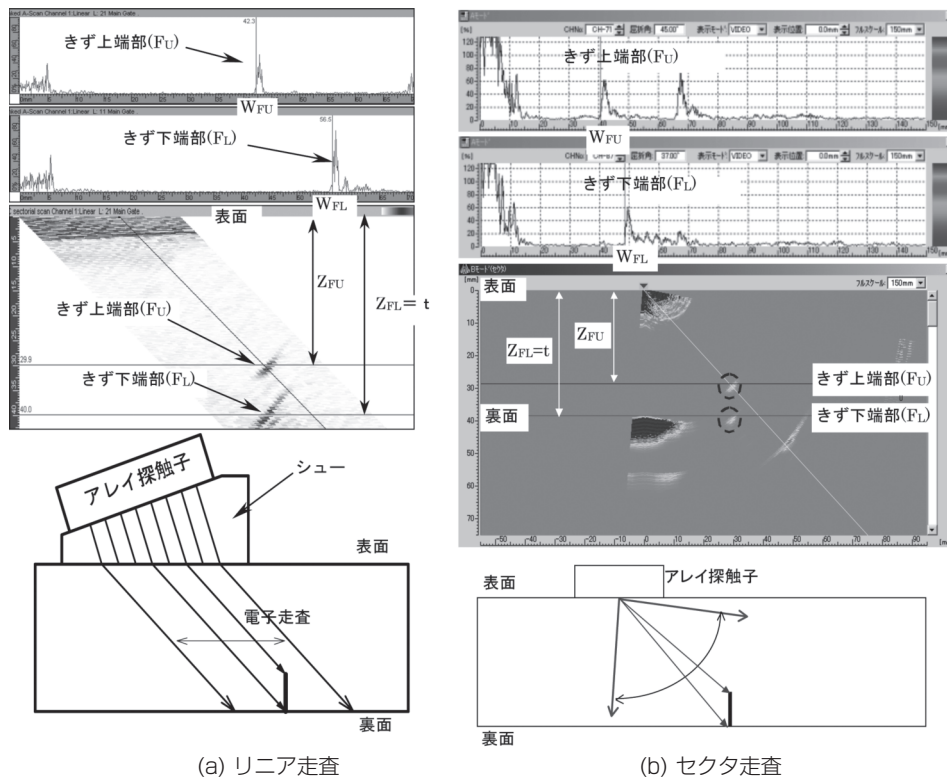


図 12 フェーズドアレイ法によるきず高さの測定例

## 5. あとがき

非破壊試験の概要とその溶接部への適用方法について、それらの最新技術の動向も含めて紹介したが、限られた紙面のため必要最小限の説明に留まったことをご了解頂きたい。溶接部の非破壊試験の信頼性は、技術者、装置及び試験方法に依存する。この中で国内において認定されている非破壊検査資格数が60,000を超える実情が示すように、特に技術者の技量や経験が非常に重要な位置を占めている。ところが、現在、各種プラントの検査において第一線で活躍している技術者は、いわゆる団塊の世代と称される年代の人が中心であり、高齢化する熟練技術者のノウハウを如何に若い技術者に伝承していくかが重要課題である。米国電力研究所 EPRI が発表したデータによると 2009 年には、必要な技術者の 4 割以上が不足

すると予想されていることから、これは日本国内に限った問題ではないようである<sup>17)</sup>。

この問題を解決するためには、検査を自動化、画像化することにより、試験結果ができるだけ技術者の技量に依存しないようにすることが重要となる。最近の IT 技術の著しい進展によって、試験結果の画像化技術は大きく改善されてきたが、これらの規格化・標準化はまだまだこれからの課題であり、今のところ画像化した結果を評価判定するのは非破壊検査技術者である。まだまだ熟練した技術者の技量や経験に頼るところが多く、技術の伝承と若手技術者の育成と同時に、画像化による客観的な試験結果の評価・判定技術の開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 和田宏一：溶接品質マネジメントシステム，溶接学会誌，

- 77-3 (2008), pp. 248-253.
- 2) 原沢秀明：溶接施工計画と溶接施工管理，溶接学会誌，77-6 (2008)，pp. 582-595.
  - 3) 小野守章：材料と溶接部の試験法，溶接学会誌，77-8 (2008)，pp. 745-751.
  - 4) 溶接学会編：(新版) 溶接・接合技術入門，4.7 非破壊検査，pp.302-320.
  - 5) 溶接学会編：(新版) 溶接・接合技術特論，4.10 溶接部の非破壊試験法と検査，pp. 399-418.
  - 6) 大岡紀一他：非破壊検査技術総論，(社) 日本非破壊検査協会 (2004).
  - 7) (社) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査便覧，日刊工業新聞社 (1992).
  - 8) 横野泰和：非破壊検査の種類と特徴(実用講座)，溶接学会誌 59 (6)，pp. 18-21 (1990).
  - 9) 笹原利彦，大岡紀一：海外における PD の現状，非破壊検査，54 (4)，pp. 192-196 (2005).
  - 10) 戸田裕己：国内の PD 認証制度への取組み，非破壊検査，54 (4)，pp. 180-181 (2005).
  - 11) 藤井正司：マイクロ CT，非破壊検査 54 (5)，pp. 228-232 (2005).
  - 12) 森川雅裕：デジタル X 線装置，検査技術，11 (4)，pp. 65-70 (2006).
  - 13) 横野泰和：超音波による溶接構造物の検査の自動化，溶接学会誌 67 (6)，pp. 27-31 (1998).
  - 14) 三原毅：TOFD 法の原理と BS7706，非破壊検査 49 (12)，pp. 802-805 (2000).
  - 15) 横野泰和：フェーズドアレイ UT の適用事例及び標準化の世界的動向，非破壊検査 56 (10)，pp. 510-515 (2007).
  - 16) (社) 日本非破壊検査協会：NDIS2418 端部エコー法によるきず高さの測定方法.
  - 17) Henry M. Stephens，横野泰和：海外における NDT トレーニングの実情 (ERPI の NDE トレーニングと資格認証)，非破壊検査 53(12)，pp. 736-740 (2004).
-