最新の放射線透過試験技術*

加 藤 潔**

The Most Up-to-date Radiographic Examination Technology*

by KATO Kiyoshi**

キーワード：高エネルギーX線，イッテレビウム 169，後方散乱線，コンピューテッドラジオグラフィ，放射線透過試験，デジタルラジオグラフィ，フラットパネルセンサ

1. はじめに

JIS Z 3104 (鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法)，JIS Z 3105 (アルミニウム平板突合せ溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法)，JIS G 0581 (鋳鋼品の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法)が制定された1968年頃から放射線透過試験(以下，RTと記す。)が工業製品の品質を保証するための一手段として本格的に適用されるようになった。これらの規格に規定されている試験方法はX線フィルムを使用した撮影及び観察・評価であり，現在もその試験方法は引き継がれている。

1995年に出された「規制緩和推進計画」に基づくJIS(日本工業規格)のISO(国際標準化機構)規格との整合化の推進，JIS化等のゼロベース見直しなど，JISの国際整合化に向けての取り組みが活発化し，その流れに沿って，RT関連のJISについても国際整合化を見据えた見直し及び検討がなされてきた。

一方，電子技術の目覚ましい発達により，新しいRT技術が多く誕生している。特に，コンピュータをベースとした画像関連の技術に著しい伸展がみられ，今後，RT技術も，他の多くの技術と同様に，デジタル化の方向に向かって進んでゆくことは間違いないであろう。しかし，現在，これらの新しい技術がRTとして実用化できる技術レベルまで達しているにもかかわらず，実際の現場での試験に適用される割合はまだ少ない。そこで，海外も含め，実用化されているRT関連の新技术の紹介

とともに，新技术の普及と発展を鈍らせている問題点についても述べてみたい。

2. 撮像技術

X線フィルム以外のメディアを使用した撮像技術は，放射線像(試験体を透過した後の放射線強度分布)を電気信号に変換して画像化するものであるが，現在では，電気信号に変換される際，デジタル化され，コンピュータによって画像化される。これらを総称してデジタルラジオグラフィ(DR)と呼んでいる。変換方式の違いによって次のように分類される。ただし，ここに示した方式名は一般化された呼び名ではない。

ラインセンサ方式，X線ビジコン撮像方式：X線センサによって直接，放射線像を電気信号に変換し，デジタル画像を得る方法。

X線II(Image Intensifier)方式：放射線像を蛍光体によって発光させ，IIによって光増幅し，CCDカメラなどによってデジタル画像を得る方式。

フラットパネルセンサ方式：放射線像を蛍光体によって発光させ，蛍光体に密着して平面状に配置された光センサによって電気信号に変換し，デジタル画像を得る方式。

CR(Computed Radiography)方式：放射線像を輝尽性蛍光体(IP：イメージングプレート)に取り込んだ後，IPをレーザ光でスキャンし，その際に起きる発光を光センサによって電気信号に変換し，デジタル画像を得る方式。

ディジタイジング方式：ディジタイザ，CCDカメラ，ビジコンカメラなどを介して，X線フィルムによって撮影された画像をデジタル画像に変換する方式。

*原稿受付 平成13年6月11日

**正 員 日本X線検査(株) Member, Japan X-Ray Inspection Co., Ltd.

それぞれの方法ごとに、新技術が開発されているが、その中から、現場への適用又は現場作業の効率化が期待できるフラットパネルセンサ方式と CR 方式の手法について紹介する。

2.1 フラットパネルセンサ方式¹⁾

撮像部はパネルになっており、金属カセットを用いた従来のフィルム法と同じ感覚で撮影することができる。撮像部は、図 1 に示すように、インターフェースカードを介してコンピュータに直結しており、放射線像のデータは直接、コンピュータに取り込まれる。コンピュータは市販のパーソナルコンピュータを使用し、Windows ベースの専用画像処理ソフトで運用されるが、取り込んだ画像は、市販の画像処理ソフトでも処理作業は可能である。照射時間は試験体の材質、厚さなどによって異なるが、従来のフィルム法（フジ#100、コダック AA、アグファ D7 を用いた場合）に比べ、数分の 1～数 10 分の 1 であり、また、現像などの写真処理が不要で、データ転送時間も数秒と短いため、リアルタイムに近い状態で試験を行うことが可能である。ピクセルサイズは約 130～140 μm で、一般的な撮影における針金形透過度計の識別性は、従来のフィルム法に比べて遜色はない。撮像部に柔軟性がないこと、重いこと（四切サイズで約 6～7kg）、高価であること（数百万円）など、一般の現場作業に適用するにはまだ難点はあるが、これらの問題が解決されれば、今後の普及が大いに期待される技術である。

2.2 CR 方式²⁾

IP 自体の形態は蛍光板や蛍光増感紙と同じであり、フィルムカセットに装填し、従来のフィルムと同じ方法で試験部にセットして使用することができる。また、フィルムほどではないが、薄いアクリル板程度の柔軟性

があり、フレキシブルカセットに装填すれば、ある程度の曲面にも貼り付けて使用することも可能であり、重量も軽く、現場にも適用可能である。IP は繰り返し使用することができるという大きな特長をもち、画像情報を取り出した後、強い可視光に曝すことで再使用可能な状態に戻ることができる。使用回数は、使用状況によって異なるが、1000 回以上は可能とされている。IP はダイナミックレンジが広いので、撮影条件の厳密な設定は必要とせず、また、肉厚が変化する複雑な構造の試験体であっても、出力された画像の濃度域を適宜選定することで、最適条件を得ることができ、薄肉部から厚肉部までの広い領域を 1 回の撮影で得られた画像で観察することができる。画像読取り装置のレーザスポットサイズが 100 μm 前後であるため、従来のフィルムによる一般的な撮影と同程度の針金形透過度計の識別性が得られる。一般的にフィルム法に比べて感度は高く、フラットパネルセンサ方式と同程度の感度を有しているといえる。

以前の読み取り及び出力装置は据え置き式であったため、撮影と画像の出力が遊離状態にあり、不便な面もあったが、現在では、図 2 に示すように、小型トラック程度の大きさの車に搭載できる装置が開発され、撮影現場での画像の出力が可能となった。IP を用いたシステムは配管などの腐食状況や目詰まり状況調査などの保守検査、鋳造品の製品検査、コンクリート構造物の調査などに適用されている。DR の需要が少ないこともあり、まだ製品価格に対する割高感がある。溶接検査に適用が可能となるなどで、DR の需要が増大すれば、フラットパネルセンサ方式と同様に、大幅な普及が期待される。

3. 放 射 線 源

線源は、放射線の試料に対する透過能力と透過写真の像質を決定する要因であり、厚い試料を効率よく撮影するには、透過力のある高エネルギーの線源を必要とし、薄い試料を撮影するには、透過写真の像質を確保するために低エネルギーの線源を必要とする。厚さ 100mm を超えるような厚肉配管、厚さ 1m を超えるようなコンクリート躯体などの大型構造物に対する RT の要求、ま

図1 フラットパネルセンサ方式による撮影の概念図

図2 CR方式による撮影の概念図

た、逆に小口径配管の溶接継手に対する効率的な RT の要求は決して少なくない。我が国においては、安全管理上の法的規制の問題があり、実現できない面もあるが、技術的にはそれらの要求を満たすことが可能となってきた。

3.1 高エネルギー X 線の利用

MeV オーダーのエネルギーをもった X 線は、電子線線形加速器 (LINAC) により高エネルギーの電子線を発生させ、そのビームをタングステンなどの重金属に当てて発生させる。LINAC は、装置が大がかりで、一般には建家に据え付けて使用されることが多い。1980 年代にアメリカにおいてポータブルタイプの LINAC (商品名: MINAC) が開発され、現在約 25 台が使用されている。このシステムは、1.5~6MeV の X 線を発生させ、鉄換算厚さで約 350mm まで撮影可能とされ、厚さ 200mm の鉄鋼材料は、フジ#100 クラスの X 線フィルムを使用して約 1 分で撮影できる能力をもっている。また、コンクリートの場合は、約 1.5m まで撮影可能とされ、厚さ 1m の躯体は、スクリーンタイプの X 線フィルムを高輝度の蛍光増感紙との組み合わせで使用した場合には、約 5 分で撮影できる能力をもっている。MINAC の特徴は、システムがいくつかのユニットに分割され、ケーブルでつなぎ合わせる構成となっていることである。そのため、X 線を発生させるヘッド部も独立しており、その重量が 25~40kg で人の力で比較的簡単に移動させることができ、セッティングするための特別の重機を必要としない。

高エネルギーの X 線の場合、透過力が強いために、X 線フィルムとの相互作用も小さく、数 MeV のエネルギー領域の X 線に対する X 線フィルムの量子効率 (X 線光子を捉える確率) は 10^{-5} のオーダーで、極めて小さい値となる。現在、高エネルギー X 線 CT/DR 等に使用されている X 線センサ (シリコン半導体センサ) は、20~30% ($2 \sim 3 \times 10^{-1}$) の量子効率をもつとされ³⁾、X 線フィルムの 10000 倍程度の感度を有することになる。したがって、MINAC と X 線ラインセンサとの組み合わせによる DR システムを構築すれば、撮影に要する時間は、むしろ、システムのスキヤニング速度に依存することになり、短時間 (10~数 10 秒) での撮影が可能となる。撮影枚数にもよるが、数 10m 程度の管理区域を設定することができれば、安全は確保され、現場においても適用可能となる。しかし、我が国においては、法的規制上、1MeV 以上の X 線を発生させる LINAC は現場 (遮へい構造のない場所) では使用することはできず、現在のところ、現場への適用は実現不可能である。

3.2 γ 線源・イッテルビウム 169 (^{169}Yb) の利用

従来、我が国における γ 線による RT のほとんどは、イリジウム 192 (^{192}Ir) 又はコバルト 60 (^{60}Co) のいずれ

かで行われてきた。ボイラ、熱交換器などの小口径管溶接継手の撮影は、X 線装置の使用が物理的に困難な場合が多く、そのような個所には、放射線の発生部が小さく、また、自由度の高い γ 線が使用される。これまで、これらの管の撮影には ^{192}Ir が使用されてきたが、 ^{192}Ir の実効エネルギーは 400keV で、実用的な適用板厚範囲は 12~60mm であり、10mm 以下の肉厚をもった管の撮影の場合には、JIS 等の規格要件を満足することはできなかった。4 年ほど前から、200keV の実効エネルギーをもったイッテルビウム 169 の国内生産が開始され、規格要件を満足する小口径管の撮影が可能となった。 ^{169}Yb の実用的な適用板厚範囲は 2~15mm である。 ^{169}Yb の半減期は 32.0 日と ^{192}Ir の半減期 (73.8 日) の半分以下であり、作業効率上の多少問題がある。 ^{169}Yb と ^{192}Ir の中間のエネルギーをもち、約 120 日の半減期をもったセレン 75 (^{75}Se) の国内製造及び輸入が検討されている。 ^{75}Se の場合、線源強度 3TBq (約 80Ci) の線源が供給可能であるが、我が国の場合、一時的移動使用 (現場へ線源を移動しての使用) の線源強度の許容限度が 370GBq と定められているため、作業効率上不利となる。

高エネルギー X 線も含めた線源の有効利用のためには、諸外国並のレベルとする規制緩和措置が必要であり、早期の実施に期待したい。

4. 後方散乱線を利用した撮影技術

この撮影方法は、線源として X 線が使用されるが、X 線を照射した面側に戻ってくるコンプトン散乱によって発生した後方散乱線を X 線センサで検知し、変換されたデジタル電気信号と散乱点の位置又は X 線ビームの透過位置のデータからコンピュータによって画像を構築するものである。したがって、透過撮影方法の範疇からははずれるが、既に実用化され、片側からのアクセスで試験できること、透過撮影とはまったく異なる情報が得られることなどの特徴をもち、今後の適用分野の拡大も期待されるため、ここに紹介する。

散乱線の強さは散乱体の物性によって異なる。したがって、試験体の各位置における散乱線の強さの強弱を検知し、強さに応じた濃度を与えれば、そこに存在する物体の画像が得られる。撮影の方式には、図 3 に示すように、断層撮影 (三次元 CT) と平面撮影の 2 通りがあり、使用目的に応じて選択される。

工業製品のきずの検出などに適用されるのは、断層撮影の方であり、航空機のハニカム構造部に対する形状検査や含水確認調査、アルミ構造物の内面腐食検査、スチールタイヤのワイヤ配列検査、各種構造物の表面割れの深さ測定などに適用されている。探査可能な深さは、

図3 後方散乱線を利用したデジタルラジオグラフィの原理図

X線のエネルギーとラインセンサの数によって決まる。実用化されたシステムの標準タイプは表面から深さ10mmまでであるが、オプションとして最大50mmまで延長することができる。ヘッド部は比較的軽く、小型のポータブルタイプのX線装置と同じ程度であり、現場で試験部の片面に固定すれば、標準タイプ（探査範囲0~10mm）の場合、2分程度で、50mm×100mm、画素数250×500ピクセルの断層写真が最大で22枚得られる。

一方、平面撮影は、透過撮影と組み合わせて、空港などの手荷物検査、及び国境検問所でトラックなどの積荷検査（トラック全体をスキャンする。）に適用されており、特に麻薬、プラスチック爆弾などの検出に威力を発揮している。

5. おわりに

DRは、従来のフィルムを用いたRTと比較して、次のような特長をもつ。

- ① 少ない線量（短時間）で撮影できる。
- ② 現像処理を必要とせず、リアルタイム又は短時間で画像を観察することができる。
- ③ 必要に応じて画像処理ができる。
- ④ 画像の転送が容易である。
- ⑤ 画像の劣化が少なく、長期間の保存が可能である。

⑥ 収納スペースが小さくてすむ。

将来とも、このような特長を無視して、従来のフィルム法に固守するわけにはいかないであろう。現在のDR技術は、検出対象とするきずが比較的大きい鋳造品の撮影には十分対応できるレベルに達していると思われる。しかし、サブミリオーダー以下のきずの検出を目的とした溶接継手の検査などにDRを適用することに対しては、まだ慎重論が多い。X線フィルムの解像度はDR画像に比較して桁違いに高く、また、溶接継手の検査に対するDRの実績が少ないこともあり、慎重論に対する反論は出にくい状況にある。今後とも、DR画像の解像度を、X線フィルムの解像度に匹敵するレベルまで高めることは現実として不可能であるとの専門家の指摘もあり、従来のフィルム法をDRにすべて置き換えるのではなく、DRとフィルム法の棲み分けを検討してゆくことが賢明な選択かもしれない。

一方、我が国においては、他の先進国にみられるような、発注者と受注者との合意の基に、試験手法を選択する習慣はなく、また、設計又は設置基準が法規に絡むものであれば、それらの強制法規が最優先となる。試験技術が実用上、適用可能なレベルまで達していても、それが強制法規で呼び出されない限り、運用されることはない。すなわち、規格化しない限り、技術的に優れていても、一手法として広く実務に適用されることはない。DRに関しても適用する分野、もしくは範囲を限定すれば技術的には十分適用できる段階に達しており、早期のJIS化を図ることが今後の課題であろう。また、先に述べたように、線源の有効利用を促進するための規制緩和の動きかけも大きな課題の一つであろう。

参考文献

- 1) 木下義高：a-Siイメージセンサを用いたリアルタイムラジオグラフィ、非破壊検査協会・平成11年度春季大会講演概要集、13-16。
- 2) 福岡孝義：イメージングプレートを用いたデジタルラジオグラフィ、非破壊検査、45-10（1996）、720-724。
- 3) 出海 滋：MeV領域工業用X線CT/DRの性能、非破壊検査、48-9（1999）、574-578。