

連載講座



中性子イメージング技術の基礎と応用 (応用編第2回)

非破壊検査における中性子と X 線のイメージング画像の評価方法[†]

池田 泰

財団法人ファインセラミックスセンター材料技術研究所
456-8587 愛知県名古屋市中熱田区六野 2-4-1

Key Words : neutron, neutron imaging, nondestructive testing, radiography, contrast resolution, spatial resolution, beam purity indicator, sensitivity indicator

1. はじめに

中性子イメージングの応用分野として、従来の X 線透過検査 (X-ray Radiography Testing: XRT) と同様な透過あるいは透視検査があることはよく知られている。これを中性子イメージング透過検査 (Neutron RT: NRT) と呼ぶ。NRT と XRT との相似及び差違については次号以降の本連載講座の基礎編や応用編に譲るが、本稿ではそれに先だて、これらの RT がどのように行われるかを述べる。

2. 放射線透過検査の特徴

放射線を物体に投射し、その後方に映る影を見ると、内部の構造や欠陥が映し出されることは健康診断で誰もが経験している。中性子線も放射線の一種であり、このような透過像を得ることができる。しかし、この自明な透過像も非破壊検査の手段として、その精度、確度、検出限界などを保証することになると、それほど簡

単ではない。特に検査の検出限界が、検査の目標値以下であるかどうかは非常に重要である。検査は画像で判断されるため、識別性能に影響する二つの画像特性、コントラスト識別性能と空間分解能が特に重要である。識別が容易な範囲では、これらの特性は互いに独立のように振る舞い、相互の干渉は小さいが、識別が限界に近づくと両者は互いに干渉し合い、簡単に切り離して議論することはできない。このため、実際の検査では、像質計とか透過度計と便宜的に呼ばれている画像評価計が工夫されている。はじめに、この二つの画像特性について解説する。

2・1 検出器のコントラスト分解能と対象物の厚さ変化の識別度¹⁾

言うまでもないことであるが、画像は白黒画像ならば、その階調、特にグレイの中間色での色階調差がなければ、像がたとえ十分に大きくとも、それを検出することができない。この階調差は従来の写真フィルムでは濃度差であり、最近のデジタル画像では最終的にはディスプレイでの輝度の差である。今後はどちらも δD と記す。ただし、濃度差も輝度差もその絶対値にはあまり意味がなく、その画像が示されている濃度・輝度 D との相対値、即ち濃度差/濃度 ($\delta D/D$) の比が意味を持っている。例えば、フィルムの場合、シャーカステン (フィルム観

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Applications Part 2).

Evaluation Method of Neutron Imaging and X-ray Imaging in Nondestructive Testing.

Yasushi IKEDA: Japan Fine Ceramics Center, 2-4-2, Mutsuno, Atsuta-ku, Nagoya-shi, Aichi Pref. 456-8587, Japan.

察器)の輝度にも依存するが、通常濃度が2.0～3.0の辺りが最適で、これに対してどれくらいの濃度差が検出できるかがそのフィルム画像の検出限界を与えることになる。仮に濃度2.0においてこの濃度差の検出限界が0.02であるとする、0.01即ち1%のコントラスト識別限界 $(\delta D/D)_{\min}$ を与えることになる。このような識別限界%をコントラスト分解能と呼ぶ。

デジタル画像の場合には、従来は8 bitの256階調画像が主であったが、最近では液晶モニターが主流になり、10～12 bit画像も利用されるようになってきた。従来の256階調で上と同様に識別限界を推測すると、輝度200階調のところで、識別可能な輝度差は5～10階調ぐらいではないかと思われる。したがって識別限界 $(\delta D/D)_{\min}$ は2.5～5%程度となる。しかし、デジタル画像の優れているところは、その場で画像強調が可能で、狭い範囲の輝度領域を大きく拡大できることである。例えば原画像での階調が190～210の領域から、20階調を取り出し、それを0～200階調に10倍拡大する機能を持っている。これによって識別限界の輝度差も大幅に改善され、1%程度の識別限界が得られ、従来の写真フィルムに比較し、遜色ない画像コントラスト分解能を得ることができる。

以上は放射線画像検出器/表示器についてのコントラスト分解能 $(\delta D/D)_{\min}$ の議論であるが、問題はそれでは実際の対象物における検出限界はどうなるかということである。これを考察するために、図1のように、問題を単純化して、一様な物体(厚さ Z)中に微小な厚さ変化 (δZ) がある場合の画像について考察する。投射放射線の強度を I_0 とし、厚さ Z と $Z-\delta Z$ での透過後の強度を I_Z と $I_{Z-\delta Z}$ とすると、その差 δI_Z が濃度差 δD を与える。上に述べたように、検出限界を考えると、この δI_Z の絶対値よりは、濃度 D を与える透過後の強度 I_Z との相対値 $\delta I_Z/I_Z$ がより意味を持っている。

図に示すように、試料透過後の強度 I_Z は、厚さに対して(1)式で示される I_0 の指数関数

的に減弱する成分(透過成分) I_t を含んでいる。

$$I_t = I_0 \exp(-\mu Z) \quad (1)$$

実はこの透過成分が物体の画像を与える成分である。ここで、 μ は放射線の減弱係数あるいは線吸収係数であり、中性子線では全巨視的断面積ともいう(ともに単位は Z の逆次元である)。また、X線では主に線吸収係数と呼ばれる値である。

元素の中で、Li, B, Cd, Gd, Sm等は中性子吸収断面積の大きな同位体を含むので、非常に大きな減弱係数を示す。Hはその高い散乱断面積のために、やはり大きい減弱係数を示す。これらの軽元素が大きい減弱を示すことが、X線に対する減弱現象とは大きく異なっていて、中性子線の特徴である。ここから、NRTでは鉛や銅などの重元素容器中の水、油などが検出できるという非常に優れた性質を持っている。

これに比較して、X線の場合、減弱は核外電子の数に支配されるため、軽元素では小さく、重元素では大きいという単純な傾向を示している。重元素中の水の検出は容易ではない。

実際の検査では、透過後の強度 I_Z には図1に示すように、透過成分 I_t 以外に様々な放射線が加わってくる。試料による放射線の散乱、中性子による試料や支持台などからの誘導放射線、撮影室の壁などからの反射線、更にNRTではビーム中に含まれる γ 線や高速中性子線などの影響が加わる。これらは全て、本来のNRTが目的とする画像情報を持たない不都合な放射線である。いわば、これらの不都合な放射線による霧の中で、試験体の像を探しているようなものである。そこで、これらの非画像成分をまとめて I_s とし、画像成分 I_t との比を非画像比 n と呼んでおくと便利である。即ち n が大きいと本来の画像がかき消され、識別性が劣化する。

$$\text{非画像比} : n = \frac{\text{非画像成分 } I_s}{\text{透過成分 } I_t} \quad (2)$$

この非画像比 n はXRTでは散乱比と呼ばれて

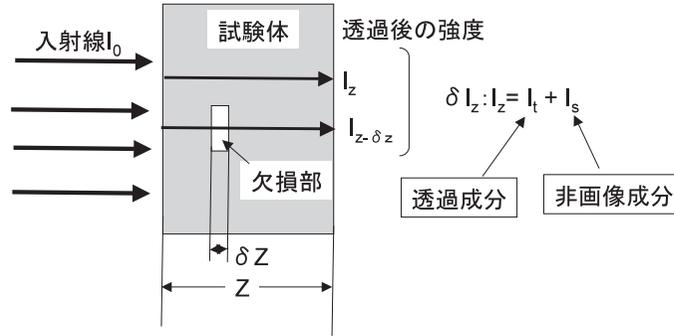


図1 放射線透過試験における透過成分と非画像成分

いて、ここで、この比を n と表したのは、XRT と整合させるためである²⁾。この n を用いると、試験体中の欠損量 δZ に対する放射線の強度変化（濃度変化）とその相対値 $\delta I_z/I_z$ は、次の (3)、(4) 式で与えられる。ただし、非画像成分 I_s に対する δZ の影響は無視できるとした。

$$\delta I_z = \mu \delta Z \cdot I_t \quad (3)$$

$$\delta I_z/I_z = \mu \delta Z \cdot I_t/I_z = \mu \delta Z / (1+n) \quad (4)$$

(4) 式の左辺がこれまで議論してきたコントラスト識別性能を与える比である。この値が、先に述べた検出器・表示器のコントラスト分解能を超えたとき、検査画像上で有意な差として識別される。よって (5) 式の関係があり、添字 min は検出限界を意味するので、この (5) 式でコントラスト分解能を定義する。

$$(\delta I_z/I_z)_{\min} = (\delta D/D)_{\min} \quad (5)$$

したがって、検出限界 δZ_{\min} は (4) 式を用いて (6) 式で与えられる。

$$\delta Z_{\min} = (1/\mu) (1+n) (\delta D/D)_{\min} \quad (6)$$

このように検出限界 δZ_{\min} は試験体の減弱係数 μ 、非画像比 n と検出器のコントラスト分解能 $(\delta D/D)_{\min}$ によって決まる。検出限界は μ が大きいと小さくなるが、 n が大きいと大きくなり、たとえ検出器のコントラスト分解能が小さくても、検出感度の低下をもたらす。

実際には、この δZ_{\min} と試験体の厚さ Z との

比を識別度 (%表示) と呼び、検査の感度、性能の指標とすることが便利である。

$$\delta Z_{\min}/Z = (1/\mu Z) \cdot (\delta D/D)_{\min} \cdot (1+n) \quad (7)$$

この識別度は分母に Z を含むため、試験体の厚さ Z と共に減少する。しかし、一方で非画像比 n が Z の増大と共に大きくなるので、 Z と共に緩やかに大きくなる。図2に、比較的散乱断面積の大きな窒化ケイ素に対する識別限界の測定例を示した³⁾。この例では 0.5 ~ 1.5% の識別度が得られている。

放射線透過検査では、この非画像比 n を小さくすることがいつも重要な課題となる。NRT では、中性子線に含まれる γ 線、また、カセットや支持体からの誘導放射線などの γ 線によるカブリを避けることが重要で、これらは XRT にはない特性である。一方、NRT では、散乱断面積の大きな水、プラスチック、パラフィン等を含まない場合は対象物からの散乱線はそれほど大きな問題ではない。むしろ中性子ビームの斜め成分が問題であり、ハニカムメッシュやソーラーコリメータなどいろいろな斜め中性子除去の工夫がされている。X線では、試験体による散乱線や蛍光 X線の除去のため可動グリッド板が用いられている。

対象物中に吸収の大きな介在物があるか、欠陥に造影剤を施して造影効果を出す場合には (7) 式とは逆に近い (8) 式の結果になる。

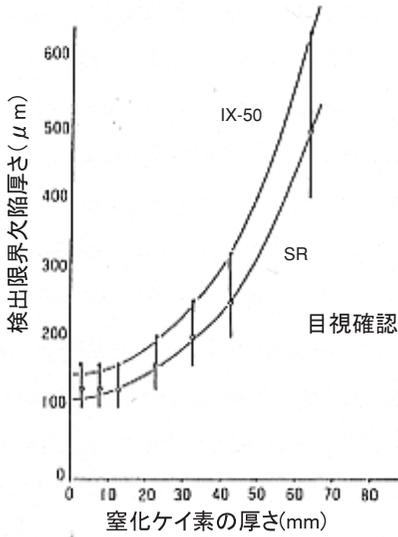


図2 125Iの材厚と検出限界欠陥厚さの関係

$$\delta Z_{\min}/Z = [1/((\mu_i - \mu_t)Z)] \cdot (\delta D/D)_{\min} \cdot (1+n) \tag{8}$$

ここで、減弱係数 μ に付けられた添字 i と t はそれぞれ介在物（造影剤）と母材を示す。介在物と母材の差が小さい場合、識別限界は大きくなり、逆に Cd, Gd, B など吸収の大きな物質が存在すると、識別限界が小さくなり、造影剤の効果が期待できる。ただし、以上の議論は、本影が得られる大きな像に対して適用される議論で、半影しか得られない小さい像に対しては、像のボケの影響を考慮しなければならない。

3. 検出感度（空間分解能による影響）

上に述べた考察は、濃度/輝度の識別限界に関するもので、薄いけれども十分に広い空隙や構造上の変化における検出限界であった。実際には、検出感度にはもう一つの画像ファクターである空間分解能が影響してくる。空間分解能は、図3に示すような放射線像の幾何学的なボケ（半影）に起因し、また画像検出器の空間分解能によって決められる。幾何学的なボケの大きさ U_g は、NR 設備ではコリメータの長さ L

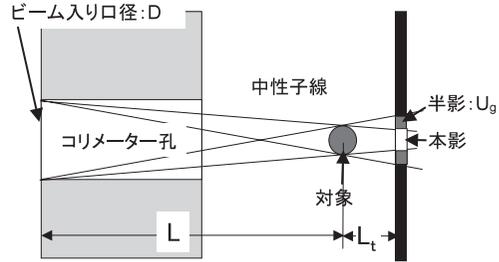


図3 コリメータ比 L/D により決まる半影の大きさ

と入り口の大きさ（直径） D との比 L/D を用いて (9) 式で表される。 L_t は検出目標と検出器との間の距離である。

$$U_g = [1/(L/D)] \times L_t \tag{9}$$

この式から、薄いサンプルで画像検出器に密着させ、 L_t がゼロに近い場合は、ボケ U_g も小さくなる。しかし、例えば L/D 比が 100 のコリメータで、長さ (L_t) が 10 mm の物体を撮影すると、 U_g として 0.1 mm のボケは避けられない。即ち、最近の最良の画像検出器を用いても空間分解能として 0.1 mm を超えることはできない。ここで空間分解能とは簡単のために、等間隔に並んだ白黒線がきちんと分離して見えるかどうかであるとする。即ち、上の例ではボケによって、0.1 mm の線列を識別することができない。

次に、画素の大きさが U_d の画像検出器で放射線像を検出すると、分離して検出できる線列の最小値は U_d である。全空間分解能 U はこの両者の和となり、(10) 式で表される。

$$U = U_g + U_d \tag{10}$$

NRT における U_d は 0.05 ~ 0.1 mm なので、全体のボケの大きさ U として 0.15 ~ 0.2 mm の値を想定しなければならない。これを空間分解能とすると、空間周波数で表すと 2.5 ~ 4 LP/mm に相当する。この値は多くの画像検出器の 2 ~ 5% の MTF 特性値にほぼ対応している。しかし、単独な 1 個の目標、例えば 1 本の線を

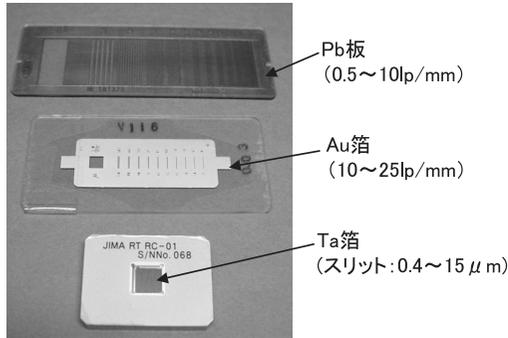


図4 X線解像度測定用チャートの例

検出する場合には、相当に画素よりも小さい対象物を、特に十分なコントラストがある場合には検出できること、ただし、表示においては画素の寸法で表示されることを付け加えておく。

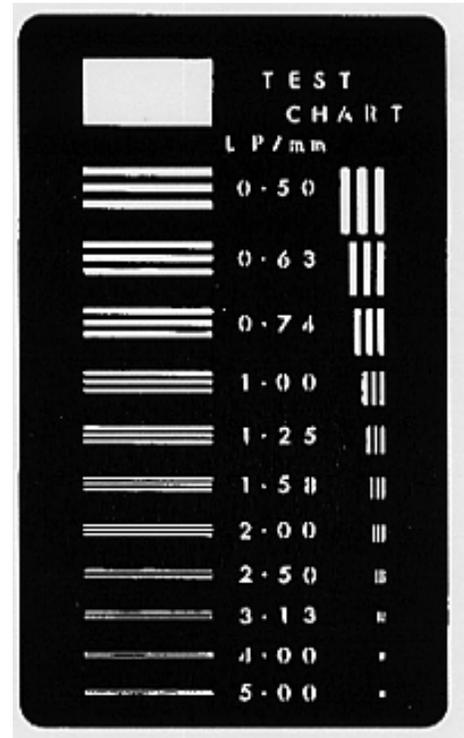
4. 放射線検査画像の評価方法

4.1 画像解像度チャート

前節で、放射線透過検査における検出限界、識別度、検出器の分解能、コリメータ比などについて解説した。実際の検査では、画像評価計あるいは透過検査評価計を用いて、簡単・明瞭に検査画像を評価する方法が工夫されている。例えば、XRT では、検出器の空間分解能を示すために各種の解像度パターンが工夫されている。

図4はX線画像用の解像度チャートである⁴⁾。上段はPb箔製のチャート Type 1 (KYOKKO 製)で、3本のスリットの組が幅1mm ~ 50 μ m (空間周波数が0.5 ~ 10.0 LP/mm)で、開けである。中段は金箔製 R-4W 型 (KYOKKO 製)で空間周波数が10 ~ 25 LP/mm、下段は超高解像度用でスリットの幅は0.4 ~ 15.0 μ m (空間周波数1250 ~ 33.3 LP/mm: 日本検査機器工業会)である。

図5にX線像の一例を示した。このX線画像からシステムのレスポンス関数 (Modulation Transfer Function: MTF) が(11)式によって求められ、画像評価に用いられる。



材質:モリブデン
厚さ:0.1mm

図5 X線解像度測定用チャートの画像例

$$\text{MTF (LP/mm)} = (a - b) / (a + b) \quad (11)$$

a: スリットを透過した黒の階調

b: スリット間の箔により吸収された白の階調

(a - b) は白黒の振幅, (a + b) / 2 は平均の階調である。MTF は撮像システムの伝達関数であり、システムを構成する各要素の伝達関数の積として求められ、どの要素が伝達特性を劣化させるかを検討することができる。

NRT でもスリット形の解像度用チャートやシーメンススターと呼ばれる楔形を円形に組み合わせたチャートが工夫されているが、規格品や市販品までには至っていない。研究者により

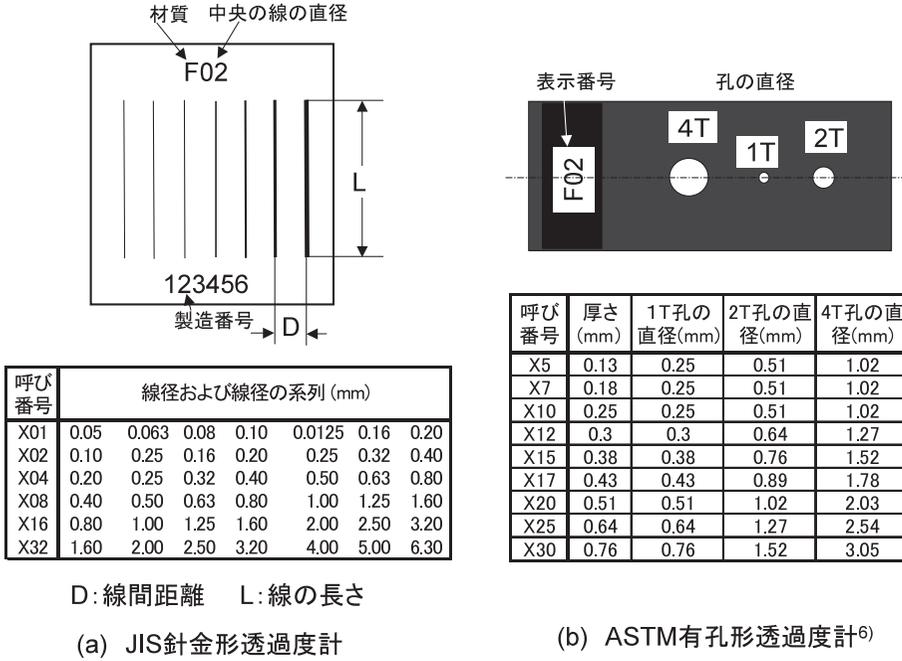


図6 XRT用透過度計⁵⁾

(a) JIS規格 針金形

(b) ASTM規格 有孔形⁶⁾

簡便なCd製のシャープエッジが準備され、そのプロファイルを微分して得られる線広がり関数 (line-spread function: LSF) をフーリエ変換してMTFを得る方法が採用されている。

4.2 X線RTにおける透過度計⁵⁾

実際のRTにおいては、対象物の吸収・散乱特性、厚さによって、得られる検査画像の欠陥識別度は異なってくる。検査画像の識別限界を一目で判別でき、検査の精度を保証するために、「透過度計」と呼ばれる指示計が用いられる。これにもJISタイプとASTMタイプ、針金形と丸孔形などがある。図6(a)に針金形透過度計の一例を示した。針金は鋼、ステンレス合金、アルミニウムなど、検査対象材と同質の金属からなり、JISタイプでは異なる直径の7本の針金が等間隔に並べられている。針金の直径を図の表に示す。中央の線径が小さい方から0.1, 0.2, 0.4, 0.8, ……のように 0.1×2^n の

数列になっている。これを対象物の前後に貼り付け、何番の透過度計の何番の線まで明瞭に識別されているかで識別限界を求めている。例えば、厚さ10mmの鋼板溶接部にF04の透過度計を貼り付けて、中央の針金までが明瞭に識別されたとすると、識別度4%が達成されたことを意味する。JIS規格において、この材厚と識別限界値が規定されていて、これをクリアしないと、その検査画像は不良となる。

透過度計には他に有孔形透過度計がある(図6(b))⁶⁾。針金形では長さが十分にあるため、微細な画像も識別しやすい。そのため、小さな点状の欠陥の検出の評価には不向きである。有孔形は孔が小さくなると点状になり、点状欠陥の評価には適している。この場合の識別度は(12)式で与えられる。

$$\alpha = (1/X) (\text{Th}/2)^{1/2} \times 100 (\%) \quad (12)$$

ここでX:対象物の材厚 (in)

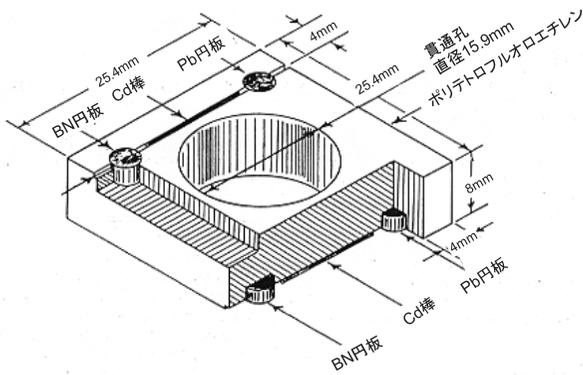


図7 NRT用の線質計 (BPI) (ASTM 規格)⁷⁾

中央に直径約 16 mm の丸孔を開け、更に四方に窒化硼素 (BN) と Pb のディスクが表裏面に各 1 対埋め込まれており、それらを結ぶように 2 本の Cd 線を埋め込んだ構造となっている。フィルム濃度計で各部の濃度を読み取り、各部の濃度と濃度差を得る。これらの値を用いて、以下の中性子ビームの線質が評価され、そのビームが検査基準のどの等級を満たしているかが判別される。

中性子成分 =

$$\{D_H - (D_B \text{ の高い値} + \Delta D_L)\} / D_H \quad (13)$$

$$\text{散乱線成分} = (\Delta D_B / D_H) \quad (14)$$

$$\gamma \text{ 線成分} = (D_T - D_L \text{ の低い方}) / D_H \quad (15)$$

$$\text{電子対生成} = (\Delta D_L / D_H) \quad (16)$$

- D_H : 中央穴像の濃度
- D_B : BN ディスク像の濃度
- D_T : テフロン像の濃度
- D_L : Pb ディスク像の濃度
- ΔD_L : 二つの D_L 間の差
- ΔD_B : 二つの D_B 間の差

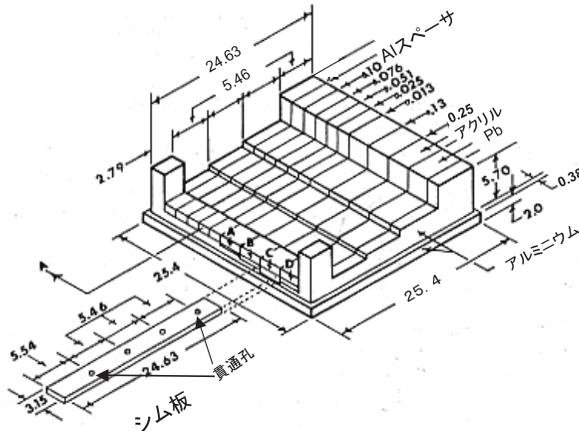


図8 NRT用の像質計 (SI) (ASTM 規格)⁷⁾

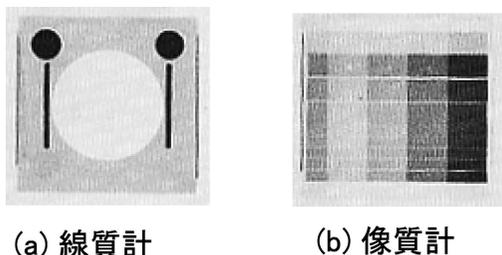
T : 有孔形透過度計の厚さ (in)

h : 有孔形透過度計の孔径 (in)

4.3 NRT における線質計, 像質計⁷⁾

NRT に独特な指示計として線質計 (Beam Purity Indicator : BPI) がある。これは NRT に必要な放射線は熱中性子だけであり、ビーム中に含まれるそれ以外の放射線、即ち高速中性子、 γ 線、その他の荷電粒子線などはできる限り少ないことが望まれるからである。図7に示す BPI は、このような線質を評価する指示計である。縦横 25.4 mm, 厚さ 8 mm のテフロン板の

また、コントラスト分解能と空間分解能を評価するために、図8に示す像質計 (Sensitivity Indicator : SI) が用いられる。SI はアクリル, Al, Pb のステップウエッジ (階調計) とシムと呼ばれるアクリル製の薄板の組み合わせからなっている。アクリルのステップウエッジの間に Al のスペーサが置かれ、シムには直径の異なる小さなホールが開けられている。シムの厚さと孔の大きさが4種類組み合わせられて画像を評価する。どの厚さのどの大きさの孔まで識別できたかによって H 番の値として評価される。また、ギャップの識別寸法から G 番の値が決められる。この G 番・H 番と先の BPI の各成分評価値との組み合わせから、総合的な NRT 画像評価がなされ、その検査画像が指定する検査要件をクリアして



(a) 線質計

(b) 像質計

図9 NRT用線質計・像質計の中性子画像
(提供：立教大学)⁸⁾

- (a) 線質計
(b) 像質計

いるかどうかを判別する。図9に線質計と像質計の中性子画像の一例を示した⁸⁾。

XRT, NRTに共通して、このように検査規格に基づいて、その基準を画質が満たしていることが保証されなくてはならない。保証された画像を基に、その製品の合否が判断される。試験的に撮影するだけであれば、こうした画像の保証は必要でなく、省略される場合も多い。「非破壊検査」では、ここで述べた画像の保証が全てのベースになっている。XRTにおいては国内規格として、JIS規格、日本非破壊検査協会等の協会規格が存在し、また、国際規格としてISO規格、米国のASTM規格などが存在する。しかし、NRTの国内規格はまだ存在せず、ISO、ASTM規格などを準用している。

5. おわりに

XRTに比較し、NRTは特殊技術であり、産業用の応用としては対象物に限定がある。誘導放射能の問題もあり、手軽に検査というわけにはいかない。しかし、タービンブレードや火工品など、NRTでなければ検査できない対象物もあり、この技術の進化と継承はおろそかにできない。従来は、原子炉が線源として主力であったが、今後は加速器の利用など線源の制約も緩和されれば、一層の発展があると期待している。

文 献

- 1) 池田 泰, ファインセラミックスを対象とした中性子ラジオグラフィの研究, 非破壊検査, **42**, 57(1991)
- 2) 日本非破壊検査協会編, 新非破壊検査便覧, **185** (1992)
- 3) 池田 泰, 参考文献1), **69**(1991)
- 4) 例えば, (株)化成オプトニクスホームページ, <http://www.kasei-optonix.co.jp/japanese/index.html> 参照
- 5) JIS Z 2306, 放射線透過試験用透過度計
- 6) ASTM E 1025, Practice for Hole-type Image Quality Indicators Used for Radiograph
- 7) ASTM E 545-1, Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination
- 8) 日本非破壊検査協会編, 中性子ラジオグラフィ写真集, **12**(1995) (提供：立教大学)