432 多色蛍光コンバータを用いた中性子ラジオグラフィ

中川 哲郎^A, 佐藤 貴樹, 持木 幸一, 村田 裕,
日塔 光一^B, 田村 俊幸^B, 小林 久夫^C, 松林 政仁^D

A: 武蔵工業大学, B: (株)東芝, C: 立教大学, D: 原研

Neutron Radiography using a Multi-Color Converter
Tetsurou Nakagawa, Takaki Sato, Koh-ichi Mochiki, Yutaka Murata,
Koichi Nittoh, Toshiyuki Tamura, Hisao Kobayashi, Masahito Matsubayashi

ABSTRACT

In the field of non-destructive testing, simultaneous data taking for both neutron radiography and gamma ray radiography is effective because each image has complementary information. This was demonstrated with a two colors fluorescence converter, optical filters, and a CCD camera, by applying static n- γ radiography. Also a dynamic n- γ radioscopy system has been develop and dynamic video data were obtained at TNRF2 of JRR3M

Keywords: Neutron radiography, Electronic imaging, Real time imaging processing, Two colors fluorescence Converter, CCD

1. 緒 論

中性子ラジオグラフィと γ 線ラジオグラフィは、医療を通して身近なものになっているレントゲン撮影(X線ラジオグラフィ)と類似のものであり、放射線に対する被検体の透過率の差異を利用する技術で、非破壊検査の1つである。 γ 線ラジオグラフィは物質の核外電子と相互作用を起すため、原子番号に対して減弱係数が単調に増加する。そのため、金属など比較的重い物質に減衰される。これに対し、中性子線は核そのものと作用するため、減弱係数が原子番号に依存せず、減衰係数の大きい物質は水素、炭素、硼素等を含む物質(例えば水やプラスチックあるいは有機物等)であり、鉄、鉛、ウラン等の重金属でも透過しやすい。このように、2つのラジオグラフィからは互いに相補的な情報を得ることができる。

近年、多くの工業製品は金属とプラスチック材料によってできている。これら工業製品を非破壊検査する場合において、 γ 線ラジオグラフィのみや中性子ラジオグラフィのみだと不十分である。そこでこの2つのラジオグラフィの同時撮像が有望視されている。

当研究室では、中性子線と γ 線を吸収し赤色または緑色に発光する2色発光コンバータと、赤色と緑色の液晶フィルタさらにCCDを用いて、中性子線と γ 線の同時撮像を可能としこれを動画像に応用した。

2. 2色発光コンバータ

2.1 2色発光コンバータ

Fig.1に2色発光コンバータ^[1]の概略図を示す。このコンバータは、 $Gd_2O_2S(Tb)$ と $Gd_2O_2S(Eu)$ の2層構造になっており、第1層では熱中性子に対する捕獲断面積が大きいGdで熱中性子が吸収され同時に電子が放出される。この電子がEuを励起し赤色に発光する。おなじように γ 線の吸収でもEuを励起し赤色に発光させる。同様なことが第2層でも起こる。しかし、第2層は蛍光体がTbであるため緑色に発光する。

ここで、第1層の厚みをほとんどの熱中性子を吸収する厚

みに設計し、したがって第2層では γ 線の発光成分が多くなるようにする。こうすることで、 γ 線は各層で検出されるのに対し、熱中性子は第1層で多く検出される。したがって、熱中性子成分の抽出では赤色画像の γ 線成分を緑色画像によって除去し、 γ 線成分の抽出では緑色画像の熱中性子成分を赤色画像によって除去すればよい。

Fig.1 Schematic view of 2-color fluorescence Converter

2.2 中性子画像、 γ 線画像の抽出法^{[2], [3]}

RedとGreenの光学フィルタとCCDでRed画像とGreen画像を撮像し、これらから熱中性子線画像と γ 線画像を抽出するための計算法を次に示す。2色発光コンバータの第1層からの出力には、熱中性子成分と γ 成分がある。よって、Redフィルタを設置した時のCCDからの出力(Red画像 $[Robj(i,j)]$)は、CCDの暗電流画像 $[D(i,j)]$ を用いて式(1)のようになる。

$$Robj(i,j) = In(i,j) \times An(i,j) \times Bn_1(i,j) \times Z_R(i,j) + I\gamma(i,j) \times A\gamma(i,j) \times B\gamma_1(i,j) \times Z_R(i,j) + D(i,j) \cdots (1)$$

ここで、 $In(i,j)$: 熱中性子強度

$I\gamma(i,j)$: γ 線強度

$An(i,j)$: 熱中性子に対する被検体透過率
 $A\gamma(i,j)$: γ 線に対する被検体透過率
 $Bn_1(i,j)$: 熱中性子が第1層で吸収される割合
 $B\gamma_1(i,j)$: γ 線が第1層で吸収される割合
 $Z_R(i,j)$: Red に対する光学フィルタの透過率
 と CCD の効率を考慮した係数である。また、オブジェクトを設置していない Red 画像 (Red のシェーディング画像 [Rshd(i,j)]) は式 (2) のように示される。

$Rshd(i,j) = In(i,j) \times Bn_1(i,j) \times Z_R(i,j) + I\gamma(i,j) \times B\gamma_1(i,j) \times Z_R(i,j) + D(i,j) \dots \dots \dots (2)$
 第2層からの出力でも第1層と同じようなことが起こり、Green フィルタを設置した時の CCD からの出力 (Green 画像 [Gobj(i,j)]) 及び、オブジェクトを設置していない Green 画像 (Green のシェーディング画像 [Gshd(i,j)]) は式 (3)、(4) で示される。

$Gobj(i,j) = In(i,j) \times An(i,j) \times Bn_2(i,j) \times Z_G(i,j) + I\gamma(i,j) \times A\gamma(i,j) \times B\gamma_2(i,j) \times Z_G(i,j) + D(i,j) \dots \dots \dots (3)$
 $Gshd(i,j) = In(i,j) \times Bn_2(i,j) \times Z_G(i,j) + I\gamma(i,j) \times B\gamma_2(i,j) \times Z_G(i,j) + D(i,j) \dots \dots \dots (4)$

ここで、 $Bn_2(i,j)$: 熱中性子が第2層で吸収される割合
 $B\gamma_2(i,j)$: γ 線が第2層で吸収される割合
 $Z_G(i,j)$: Green に対する光学フィルタの透過率
 と CCD の効率を考慮した係数である。これら5種類の画像データを用いて次の計算を行い中性子画像 $N(i,j)$ と γ 線画像 $\gamma(i,j)$ を求めることができる。

$$N(i,j) = \frac{\{Robj(i,j) \cdot D(i,j)\} \cdot k1 \{Gobj(i,j) \cdot D(i,j)\}}{\{Rshd(i,j) \cdot D(i,j)\} \cdot k1 \{Gshd(i,j) \cdot D(i,j)\}} = An(i,j) \dots \dots (5)$$

$$\gamma(i,j) = \frac{\{Gobj(i,j) \cdot D(i,j)\} \cdot k2 \{Robj(i,j) \cdot D(i,j)\}}{\{Gshd(i,j) \cdot D(i,j)\} \cdot k2 \{Rshd(i,j) \cdot D(i,j)\}} = A\gamma(i,j) \dots \dots (6)$$

ここで、 $k1$: 係数1
 $k2$: 係数2
 である。
 ただし、 $k1 = \{B\gamma_1(i,j) \times Z_R(i,j)\} / \{B\gamma_2(i,j) \times Z_G(i,j)\}$
 $k2 = \{Bn_2(i,j) \times Z_G(i,j)\} / \{Bn_1(i,j) \times Z_R(i,j)\}$
 に設定する。実際の処理の際は目視によりこの $k1$ 及び $k2$ を決定する。これについては、3.3 節にて詳しく述べる。以降では、(5)、(6) をそれぞれ、以下の (7)、(8) と表記する。

$$n = Red - k1 \times Green \dots \dots \dots (7)$$

$$\gamma = Green - k2 \times Red \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 n : 中性子線画像
 γ : γ 線画像
 Red : Red 画像
 Green : Green 画像
 である。

3. JRR3M TNRF-2 での実験 (静止画)

3.1 撮像装置

Fig.2 に撮像システム概略図を示す。Table 1 にフィールド特性を示す。
 2色蛍光コンバータ上の画像は回転交換式光学フィルタと冷却型モノクロ CCD カメラによって撮像される。このとき、熱中性子と γ 線の蛍光成分の強度比の依存性を調べるためにアクリル板 (厚さ 5, 10, 15mm) を使用した。
 CCD からのデータは 14Bit のデジタルデータとして取得

され、オフラインでパソコンで処理される。

Fig.2 Schematic view of the imaging system

Table 1 Characteristic of the TNRF2

Thermal neutron	n/γ [$n \cdot cm^{-2} \cdot \mu Sv^{-1}$]	Cd	L/D	Radiation field W[mm] × H[mm]
1.5×10^8	62.5	130	H:176 V:153	255 × 305

3.2 透過画像

Fig.3 に、この実験で使用したオブジェクトの概要を示す。

Fig.3 Schematic view of object

Fig.4 に、10 mm のアクリル板を使用して取得された Red 画像及び Green 画像を示す。Red、Green 両方の画像とも熱中性子成分及び γ 線成分のどちらも含まれているが、Red では熱中性子成分、Green では γ 線成分が多く含まれているのがわかる。

Fig.4 Raw red and green images

ここで、 k_1 と k_2 は目視によって最適値を決めた。例として γ 線を抽出する場合を Fig.5 に示す。

Fig.5 Dependency of γ ray image on the coefficient k_2 value.

目視評価の際、ASTM インジケータの Pb 部分、アクリルステップやステップオブジェクトのポリエステル部分を評価の対象とした。 $k_2=0.45$ の場合、アクリル部分に影が残っているため、熱中性子が残っていることが確認できる。そのため係数が小さい事がわかる。また、 $k_2=0.60$ の場合、アクリル部分や BN 部分が白く反転していることから、係数が大きい事がわかる。このようにして、係数を判定し(7)、(8)の式をそれぞれ、

$$n = \text{Red} - 0.74 \times \text{Green} \cdots \cdots (9)$$

$$\gamma = \text{Green} - 0.52 \times \text{Red} \cdots \cdots (10)$$

とし、それぞれ熱中性子線画像、 γ 線画像を抽出した。その結果を Fig.6 に示す。

Fig.6 Extracted thermal neutron and γ ray images.

Fig.6 より、 γ 線成分をあらわした画像では、BN やアクリル、ポリエチレンが透過しやすいのがわかる。また万歩計は電池の部分で減衰しているのがわかる。逆に熱中性子画像では、Pb は透過し、アクリルのステップウェッジや万歩計の内部が見て取れるような透過画像になっている。

以上より、画像間演算により静止画での熱中性子線成分と γ 線成分が、抽出されていることが確認できた。

3.3 アクリルの厚さの検討

熱中性子、 γ 線ラジオグラフィの同時撮像を行う場合、2つの画像を最大限に有効に活用するためには、2つの画像の N/S の和が最低となるのが望ましい。そこで、撮像時間が一定で、 N/S の和が最低となる熱中性子成分と γ 線成分の輝度比(n/γ)を求めるため、オブジェクトの前にアクリル板を設置し、設置なし、5mm、10mm、15mm と変化させた。Fig.7 に相対標準偏差と n/γ との関係を示す。

Fig.7 Relation of the sum of relative standard deviation and n/γ .

Fig.7 よりアクリルの厚みが10mmの時に最良な n/γ となり、この時最も良質な画像が得られることがわかる。

4. JRR3M TNRF-2 での実験 (動画像)

静止画実験によって開発された画像間演算法を動画像に応用するために、実時間演算処理が可能な動画像処理装置を開発した。

4.1 撮像装置

高感度なカラーCCDカメラがないので、Fig.8 に示す動画像用撮像系を使用した。

Fig.8 Camera for dynamic imaging.

2色発光コンバータからの光を、液晶フィルタとモノクロCCDカメラにより時分割に色分離して取得する。液晶フィルタは、透過スペクトルを電気信号により瞬時に選択ができる光学フィルタである。

Fig.9にこの撮像系を使った撮像システムの概略図を示す。

CCD で取得された画像は、デジタルデータとして実時間処理装置に取り込まれ、暗電流・シェーディング補正、デジタルフィルタ、フレーム間演算、リカーシブフィルタ、及び擬似カラー化処理をリアルタイムで施され、モニタとVTR に出力される。なお 30 フレーム/秒のフレームレートで撮像し、Red フレーム、Green フレーム、ダミーフレームの周期で取り込み、熱中性子及び γ 線の画像は 10 フレーム/秒で出力される。

Fig.9 Block diagram of the real time image processing system

4.2 透過画像

この実験で使用したオブジェクトを Fig.10 に示す。

Fig.10 Schematic view of the objects

オブジェクトは、厚さ(3 mm, 6 mm, 10 mm)の異なる鉛板、厚さ(50 μm, 100 μm, 150 μm, 200 μm)の異なるカドミウム板、ATSM インジケータ 3 種、100 円ライター、厚さ 4 mm の星型アクリル板、これらをアルミニウム板に貼り付け水平に移動させ撮像した。

Fig.11 に Red フレームと Green フレームの画像を示す。

Fig.11 Raw red and green frame images.

モノクロ表示のため、赤色画像と緑色画像間の相違点を認識しづらいが、ASTM インジケータの鉛とアクリルを組み合わせたものにおいて、緑色画像のほうがアクリル部分の影が

薄く、鉛部分の影が濃い事がわかる。また 100 円ライターの本体部分はプラスチックであるため赤色画像のほうが、影が濃い事がわかる。以上のことより一見同じような透過画像であるが熱中性子成分と γ 成分の含まれる割合が赤色、緑色画像で異なっている。ここで、静止画と同様に、式(7)、(8)を用いて、係数を目視により $k_1=0.75$ 、 $k_2=0.80$ と決定し、以下の式(11)、(12)を用いて実時間で画像間演算を行った。

$$n = \text{Red} - 0.75 \times \text{Green} \dots (11)$$

$$\gamma = \text{Green} - 0.80 \times \text{Red} \dots (12)$$

その結果を Fig.12 に示す。

Fig.12 Extracted thermal n and γ ray frame images.

ASTM インジケータがどちらの画像も見難くなっている。しかし、その他のオブジェクトは確認することができる。まず、星型のアクリル板は中性子線成分の画像に見られ、 γ 線成分では透過していることが確認できる。100 円ライターやカドミウム板についても同じことが言える。逆に、鉛は、熱中性子線成分の画像では透過して見ることができないが、ガンマ線成分の画像では吸収されて見ることができる。

以上のことより、リアルタイムで熱中性子と γ 線透過像の取得ができたといえる。

5. まとめ

静止画像では、2 色発光コンバータと CCD の組み合わせによる熱中性子・ γ 線同時ラジオグラフィ手法(画像間演算による抽出法)を開発した。これにより、2 色発光コンバータと光学フィルタ及び、1 台のカメラで熱中性子線画像と γ 線画像の取得が可能となった。

動画像においては、熱中性子と γ 線のラジオグラフィ像を、静止画で開発したものと同じアルゴリズムで実時間処理により表示できるシステムを開発し、JRR3M の TNRF2 のフィールドで実証した。

参考文献

- 1) Nittoh, K.: Discriminated neutron and X-ray radiography using multi-color scintillation detector, Nucl.Instrument&Methods, A428 (1999)
- 2) 岩田 秀規 他: 二色発光コンバータを用いた中性子- γ ラジオグラフィ, 第 3 回放射線による非破壊評価シンポジウム講演論文集, (1999), pp145-146.
- 3) 岩田 秀規 他: 2 色発光コンバータを用いた中性子- γ ラジオグラフィ, 春季大会講演概要集, (1999), pp51-52.