815. 中性子CTの改良研究

仙藤敏和*, 松本元一*

(1985年 1月4日 受理)

Improvement Study of Neutron Computed Tomography

By Toshikazu SENDO and Genichi MATSUMOTO

The images of neutron radiography (NRG) have been able to be digitally analyzed recently. Following it, neutron computed tomography (NCT) attracts people's attention of non-destructive testing field. In our laboratory, the study of NCT technology has been carried out for 5 years. We utilize NRG as a method to obtain projection data. One of the NRG's demerits is to take a long time for measuring film density, and to input it into a computer system. Then, by making use of the image input equipment, instead of micro-densitometer, the data proceeding time is amazingly shortened.

This makes it possible to increase the number of projections remarkably. We made an experiment, in which the number of angular projections is 200(0.9 degree interval), at Kyoto University Reactor (KUR). The quality of obtained CT images is sufficiently good. FWHM of the line spread function for air-stainless steel was 130 μm . Resolution power was 400 μm for both air-stainless steel and aluminum-paraffin. By using image input equipment, it became easy to chase the 3-dimensional shape of an inspected object. We obtained 41 CT images for one object axially at interval of 120~240 μm , attempted 3-dimensional reconstruction of the object. Comparing to the real object, the 3-dimensional reconstructed images were satisfactory on shape and dimension.

KEYWORDS: neutron computed tomography, projection data, reconstructed image, image input equipment, resolution, 3-dimensional reconstruction, algorithms, accuracy

I. 緒 言

中性子はX線と異なり物質を通過する際、原子核と直接反応する。このため中性子ラジオグラフィ(NRG)は中性子断面積の差の大きな物質同士の識別などに威力を発揮し、X線ラジオグラフィと補完的に用いることによって、より正確な非破壊検査が可能となる。著者らの研究室では15年にわたる中性子ラジオグラフィの経験があり、その応用の一環として中性子CT(neutron computed tomography, NCT)に取り組んできた⁽¹⁾⁽²⁾。

NCTはX線を中性子に置き換えたもので、原理的にはX線CTと変わらない⁽³⁾。しかし、中性子はX線と異なり強力なビームを得にくい。また、その検出も比較的難しいなどの技術的問題がある。このため、当研究室では研究の当初より投影データを得る方法とし

て最も簡便な写真法(NRGを用いる方法)を採用している。従来までは、角度数20で比較的良好なCT像を得ていた⁽¹⁾。しかし写真法を採用しているため投影データの収集に多大な時間がかかり、これ以上の角度数は望めなかった。NCTが実用に耐えうるかどうかを調べるためには、X線CTと同程度の角度数(180程度)を実現して像質をみなければならない。このため、投影データの処理時間の短縮は必須となる。そこで従来、マイクロデンシトメータを用いて黒化度を測定していたのを、本研究においては画像入力装置を用いて処理時間の短縮をはかり一応の目的を達成した。

それに伴い、撮影実験を京大炉(KUR)E2照射孔

* 名古屋大学 工学部原子核工学科(Dept. of Nucl. Eng., Fac. of Eng., Nagoya Univ.)

において、角度数200(0.9°ごと)として行なった。実験はコンバータにGd-箔、フィルムにFuji Softex HSを用いて、数個の試料についてCT像を求めた。CT像の再構成のアルゴリズムにはコンボリューション積分法を用い、CT像の空間解像力や分解能の測定を行なった。写真法では投影データが2次的に得られるという利点を用いて、被写体の軸方向の変化を追跡した。

II. 投影データの処理方法

CT像を得るためには、投影データを測定して計算

機に入力しなければならない。投影データを得る方法には中性子TV⁽⁴⁾⁽⁵⁾、計数管⁽⁶⁾、NRG⁽⁷⁾⁽⁸⁾の3種が考えられる。この3種の特徴をTable 1に掲げる。われわれは、Table 1の(10), (11), (12)の理由によりNRGを採用している。しかし、(13)の理由によりNRGを用いる方法は投影データの処理時間が非常に長くかかる。CT像の像質を向上させるためには角度数を増やす必要があり、処理時間の短縮は必須課題であった。

従来のマイクロデンストメータを用いる方法では、黒化度の測定、計算機への入力に多大な時間がかかる。

Table 1 Characteristics of methods for obtaining projection data

Method	Advantages	Disadvantages
Neutron TV	(1) Easy to input data into a computer system	(3) Poor resolution
	(2) Time to obtain projection data is comparatively short.	(4) Being noisy (5) Narrow dynamic range
Neutron counter	(6) Easy to input data into a computer system	(8) Time to obtain projection data is long.
	(7) Wide dynamic range	(9) Handling is difficult.
NRG	(10) Possible to obtain 2-dimensional projection data quickly	(13) Impossible to input data into a computer system
	(11) Good image quality	(14) Photographic processing is needed.
	(12) Low cost	

これを解決するため名大大型計算機センターの画像入力装置(NAC社製DVP-MT1)を用いた。装置の全景をPhoto. 1に、その諸元をTable 2に示す。この画像入力装置は入力領域を480×640に分割し、それぞれの画素の黒化度を磁気テープに記録するものである。これによって、NRGフィルム上に記録された2次的な投影データを素早く計算機に入力することができる。

Table 2 Characteristics of image input equipment of Nagoya Univ. Computation Center (Products of NAC Inc.)

Number of measured pixels	480×640
Time to measure	about 1 min
Range for measurement	0.00~2.55 O.D.†
Minimum measurement field	35 mm film

† Optical Density

このようにして入力された480×640の投影データから再構成する断面に相当する部分を計算機処理によって取り出す。そして、再構成のプログラムに入力することによってデータ処理の時間は大幅に短縮される

Radiographed films are put on the fluorescent plate, and the transparent light is measured and transferred to video signal. Video signal passes through the interface and is recorded on the magnetic tape.

Photo. 1 Image input equipment

ことになる(Fig. 1)。Fig. 1では、再構成する断面は試料の上部からX cmのところである。

今回の KUR における実験では、角度数を 200、1 角度当りの投影データのサンプリング数は 420、再構成した断面の数は 78 であった。そのデータの処理時間は従来のマイクロデンストメータを用いる方法に比べ

ると約 1/1,000 であった。

またそれと同時にフィルム全体を一度に入力するため、サンプルの軸方向の変化を容易に追跡できるようになった。その間隔は最小 55 μm まで可能である。今回は 120~240 μm 間隔で 3 次元追跡を試みた。

Images of neutron-radiographed films are fed into the computer system by image input equipment. The axial position of the films for the section that is reconstructed is processed with the computer. CT images are reconstructed by edited projection data.

Fig. 1 Theory of time shortening for data processing

Ⅲ. 実験と計算機処理

1. 実験内容

実験は KUR の E2 照射孔で行なった。E2 照射孔の諸元を次に挙げる⁽⁹⁾。

中性子束: $1.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

コリメーター比: 100

Cd 比: 400

撮像面積: 約 200 cm^2 (直径 16 cm の円形)

実験の条件については次に挙げる。

角度数: 200

角度間隔: 0.9°

フィルム: Fuji Softex HS

コンバータ: Gd 箔 (25 μm 厚)

照射時間: 4 min

撮像面における中性子フルエンス: $2.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$

この HS と Gd 箔の組合せは、分解能も 70 μm と良好で照射時間も適当であり CT の実験には最適のもの 1 つである。

なお、サンプルの回転には京大炉 NR グループのご厚意によりステッピングモータ装置を借用した。

実験で得られた 200 枚の NRG フィルムは画像入力

装置を用いて、その黒化度が測定される。この黒化度は中性子行路上の積分断面積に変換されなければならない。変換は再構成プログラムの中で行われるが、黒化度-積分断面積変換曲線が与えられなければならない。変換曲線は Cd の 15 段ステップ・エッジを撮像することによって実験的に定めた。そのグラフを Fig. 2 に示す。

Fig. 2 Density-integral cross section transfer function

2. 再構成アルゴリズム

次節で述べる CT 像はすべてコンボリューション積分法を用いて再構成されたものである。コンボリュ

ジョン積分法は、投影データとフィルタ関数の重畳積分を逆投影して再構成像を得る方法である⁽³⁾⁽⁸⁾。このフィルタ関数には Shepp & Logan 法を用いた。再構成にかかるパラメータは次のとおりである。

1 角度当りの投影データのサンプリング数: 420

投影データのサンプリング間隔: 120 μm

再構成画像の画素数: 400 $\times$ 400

再構成画像の画素間の距離: 125 μm

計算はすべて名大大型計算機センターの FACOM M-382を用いて行なった。1つのCT像を得るのに必要なCPU時間は約240sであった。

3. 試料

CT像を得るための試料は計6個である。その形状・内容物についてFig. 3(a)~(f)に示す(SUSはステンレス鋼(SUS-304)を表わす)。

それぞれの試料の目的などについては、CT像と比

較しながら次節において述べる。

IV. 結果と考察

すべてのCT像は出力値を単純に16段階に等分し、16段の濃淡で表示してある。なおCT像は出力の都合上、サンプル図に比べて回転しているものもある。

1. Air-SUS シャープ・エッジ (Fig. 3(a))

このサンプルは中空のAlの中に半円形のスUSを入れたものである。これにより、断面において中性子断面積がゼロから約 1.1 cm^{-1} へとステップ状に変化することになる。この部分のCT像の出力値の変化の様子から空間解像力を求めることができる。空間解像力はSUSの中央付近の出力値を1次元で微分しLine Spread Function(LSF)を求め、その半値幅をとったものである。

(a) Air-SUS sharp edge

(b) Regular array sample

(c) Air-SUS resolution sample

(d) Al-paraffin resolution sample

Fig. 3(a)~(f) Radiographed samples for CT reconstruction

Fig. 3(e) Alumina sphere sample

Fig. 3(f) Sample for 3-dimensional chase

CT 像をFig. 4(a)に示す。これより Air-SUS の空間解像力は $130\ \mu\text{m}$ と求められた。従来、当研究室においては角度数20で空間解像力は $870\ \mu\text{m}$ であった⁽¹⁾。このことから角度数を十分多くとすることは、CT 像の像質を向上させる上で重要であることがわかる。

2. 規則配列性物質 (Fig. 3(b))

これは中空の Al の中に5 mm 径の SUS 棒を規則的に並べたものである。その SUS 棒のうち3本に1, 2, 3 mm 径の穴があけてある。また1箇所は SUS 棒を抜いてある。

CT 像を Fig. 4(b) に示す。CT 像をみると中央付近の SUS 棒や3 mm 径の穴をあけた SUS 棒のように、若干歪んでいるものがある。これはフィルムを入力する際に中心が微妙にズレていたためと考えられる。画像入力装置を用いる場合には、この位置合せが最大の問題点となる。

Fig. 4(a) Air-SUS sharp edge

(b) Regular array sample

(c) Air-SUS resolution sample

(d) Al-paraffin resolution sample

(e) Alumina sphere sample (8 mm dia.)

(f) Alumina sphere sample (4 mm dia.)

(g) Sample for 3-dimensional chase

Fig. 4(a)~(g) CT images

また、端の方の SUS 棒はその直径が小さくなっている。これは各フィルムごとの照射量の違い、特性の違いによるものである。これらに対する補正は、それぞれの角度における投影データの積分断面積の合計を一定にすることによって行なっている。しかし、これだけでは不十分であることを示している。これは投影データを得る手段として NRG を用いる場合の難点の 1 つである。

しかし、2 mm 径の穴と SUS 棒が抜けている所ははっきり識別できる。

3. Air-SUS 分解能試料 (Fig. 3(c))

これは 0.4~3.0 mm 径の SUS 棒を直径の間隔に配置したものである。1 本 1 本の SUS 棒が識別できるときその直径が分解能となる。空間解像力とは意味が異なるので注意が必要である。分解能の判定には主観の入る余地があるので、1 つの目安にしかならない。

CT 像を Fig. 4(c) に示す。Al の枠が薄く出ている。CT 像においては、0.4 mm 径の SUS 棒は識別できない。しかし、SUS 棒の並び方向に CT 像の出力値分布をとったところ、個々の SUS 棒が識別できることを確認した。CT 像の画素幅が 0.125 mm であることを考えると、0.4 mm は約 3 画素に対応し、これより小さなものの識別は無理であろう。これ以下の直径のものを識別するためには、投影データのサンプリング間隔を小さくして、サンプリング数を増やさなければならない。そして再構成画像の画素数を増やせば 0.4 mm 径の SUS 棒もより明確に識別できるであろう。

4. Al-パラフィン分解能試料 (Fig. 3(d))

これは円柱状の Al に 0.3~1.0 mm 径の穴を直径の間隔にあけてパラフィンを詰めたものである。これにより Al-パラフィンの分解能が決定できる。

CT 像を Fig. 4(d) に示す。0.4 mm の径の穴まで識別できる。なお 0.4 mm の穴のうち上から 4 つ目には工作の途中で折れたドリルの刃が入っており、その部分の出力値は小さくなっている。0.3 mm の穴についてはその部分の出力値は大きくなっているが、識別できるまでには至っていない。

5. 球状アルミナ試料 (Fig. 3(e))

この試料には 2 種類ある。1 つは Al の枠に 8 mm 径のアルミナ球を詰めたものであり、他方は 4 mm 径のアルミナ球を詰めたものである。

当研究室では被覆管の中に球状の燃料を詰めた原子炉燃料、すなわち球充填型燃料の熱伝達解析が行われている。その際、球がどのように詰まっているかを知る必要がある。実際の実験では 1 mm 径以下のアルミ

ナ球が用いられているが、今回はその初歩として 4 と 8 mm のものを用いて CT 像を得た。

CT 像を Fig. 4(e),(f) に示す。Fig. 4(e) は 8 mm 径のアルミナ球のものであり、球を 1 つ抜いてある所が確実に識別できる。Fig. 4(f) は 4 mm 径のものであり、球の位置決定が十分できるほど良好な像が得られている。

6. 3 次元追跡用試料 (Fig. 3(f))

これは中空の Al の中に軸方向に変化する試料を配置したものである。配置したものは Fig. 3(f) 中の①が SUS の円錐、②が SUS の円柱を半分に切ったもの、③が SUS の円柱に 1~8 mm 径の穴をあけたもの、④が真鍮の円錐、⑤が真鍮のフックである。

画像入力装置の使用により 3 次元追跡が容易に行えるようになり、CT 像を 120~240 μm 間隔に、41 の断面について得た。その代表的なものを Fig. 4(g) に示す。SUS の円柱にあけた穴や真鍮のフックの足の部分が識別できる。他の試料についてもその形状がはっきりとわかる。

41 の CT 像がどれほど試料の軸方向の変化に追随しているかを見るために 3 次元的に構築したものが、Fig. 5(a),(b) である。それぞれ右側には実物の像が示してある。これはそれぞれ Fig. 3(f) 中の A-A' 線上、B-B' 線上の CT 像の出力値を軸方向に重ねたものである。Fig. 5(a) は真鍮の円錐であり、Fig. 5(b) は SUS の円柱を半分に切ったものである。両者とも若干のノイズが出ているが寸法・形状ともに良い再現性を示している。この 2 つの図は、画像入力装置を用いて十分に実用に耐えうる 3 次元追跡ができることを示している。

実際の工業部品でも 3 次元的な解析が要求される場合は多く、その可能性を示し得たことは重要である。分解能、空間解像力について Table 3 にまとめる。

Table 3 Spatial resolution power

Object	Measurement item	Value(μm)
Air-SUS	FWHM of LSF	130
Air-SUS	Resolution power	400
Al-paraffin	Resolution power	400

V. 結 論

写真法は像質が良く、コストも低いことから NCT への応用が考えられる。NCT を写真法で行うときの最大の問題点は投影データの処理時間であり、この処理時間を画像入力装置の使用によって大幅に短縮することができた。

(a) Brass cone

(b) SUS half pole

The left is a reconstructed one and the right is a real one.

Fig. 5 3-dimensional reconstructed images

それに伴った角度数 200 の実験で CT 像の像質を向上させることができた。Table 3 にあるように、分解能・空間解像力は良好な値を示した。

3 次元追跡については、120~240 μm 間隔で実施し、SUSと真鍮の試料について十分に良い再現性を示すことができた。

以上の結果から、この研究は NCT の実用化に寄与するものと考ええる。今後、より複雑な試料や実際の工業部品の経験を積むことによって、NCT は非破壊検査の重要な手段となるであろう。

最後に、実験に際していろいろお世話頂いた京都大学原子炉実験所 NR グループの方々に厚く謝意を表します。

—参考文献—

- (1) 倉田 聡, 松本元一: 原子力学会「昭 55 年会」要旨集, E44, (1982).
- (2) 松本元一, 仙藤敏和, 大谷 篤史: 同「昭 59 年会」要旨集, C4, (1984).
- (3) 岩井喜典編: "CT スキャナ", (1979), コロナ社.
- (4) 藤根成典, 米田憲司, 神田啓治: 原子力学会「昭 59 年会」要旨集, C2, (1984).
- (5) 藤根成典, 米田憲司: 原子力誌, 26[9], 57~65 (1984).
- (6) KOEPPE, R.A., et al.: J. Comput. Assist. Tomogr., 5[1], 79~88(1981).
- (7) 仙藤敏和, 倉田 聡, 松本元一: 中性子ラジオグラフィに関する研究会, (1983), 京大炉.
- (8) BETTEN, P.R., TOW, D.M.: Mater. Eval., 42, 815~821(1984).
- (9) 桂山幸典, 他: 原子力工業, 29[6], 75~80 (1983).

昭和61年度科研費補助金の公募

特別推進研究, 特別研究, 特定研究, 総合研究, 一般研究, 奨励研究, 試験研究 } 提出期間 12月2~7日
 公募要領の詳細は文部省学術国際局研究助成課へ。
 (03-581-4211, 内2580, 2583)
 申請用紙は 日本学術振興会 科研費用紙頒布会へ。
 (東京都千代田区一ツ橋2-1-2。03-263-9092~3)

○東工大・原子炉工学研究所○

教 官 公 募

公募人員 放射線物理部門 教授 1名
 提出書類 ①履歴書, ②業績リスト(論文, 著書等)および主要論文の別刷, ③他薦の場合は推薦書
 公募締切 昭和61年 1月31日(金)必着
 書類提出・問合せ先 (〒152)東京都目黒区大岡山2-12-1
 東京工業大学原子炉工学研究所
 選考委員長 佐藤 伸(03-726-1111, 内3075)