ミニレビュー

中性子断層撮影法 (NCT) の現状

小林久夫

まえがき

中性子断層撮影法 (NCT) は、X線断層撮影法 (XCT) と同様いわば中性子ナイフとでもいうべき手法で被写体を「切断」し、その切断面の全巨視的断面積の分布を可視化する方法である。その再構成アルゴリズム等の基本部分は XCT とほとんど変わることがなく、その詳細は、たとえば CT 一般に関しては岩井¹⁾、NCT に関しては筆者の解説²⁾ などがある。

NCT に関するわが国の研究は、1980年頃より他国とほぼ同時期に始められており、現在まで国内外で 50 篇を超える報告がある。その技術の達成状況も世界の先端にあるといつてよい。そこで、ここではわが国におけるいくつかの研究成果と問題点を紹介することとする。

国内における NCT

(1) 名古屋大学のグループは、1980年より、わが国においてはじめて NCT の研究を開始している³⁾。彼らは、再構成にコンボリューション法 (CV 法) を用い、フィルム法による熱中性子 CT (TNCT)⁴⁾、トラックエッチ法による TNCT⁵⁾、各種撮像管 (SIT, イメージオルシコン, ニュービコン, 冷却型 PCD) を用いた TNCT を、幅広く試みている⁶⁾。彼らはまた、核燃料要素中の PuO_2 の非均質局在を模擬し、その検出を目的とした疑似試料を用い、三次元 NCT を行っている⁷⁾。また、京都大学炉や日本原子力研究所の冷中性子ビームによる冷中性子 CT (CNCT) を実施している⁸⁾。フィルム法による高解像度 CNCT の試み⁸⁾ においては、0.3 mm のスリットを高コントラスト差 (高 MTF 値) で解像している。さらに、吉井ら⁹⁾ の開発した高速中性子ラジオグラフィ用コンバータを用いた高速中性子 CT (FNCT) の実

験も行っており、FNCT としては世界に誇れる断層像を得ている¹⁰⁾。

(2) 京都大学グループは、わが国ではじめて、実時間画像取得装置を用いた TNCT を試みた¹¹⁾。画像再構成は、前処理における対数変換をしていないため完全なものではないが、この研究により国内で撮像管方式による NCT の可能性を実証した意義は大きい。

(3) 武蔵工業大学グループの村田ら¹²⁾ は、SIT 管の画像読出しに、ブランキングを与えることで、読出しノイズを軽減し、広いダイナミックレンジを実現できる優れた画像取得方式を提案した。彼らは、この撮像方式を、TNCT に適用した¹³⁾。その結果、FFT 法と比較して、FBP 法の方が良好な結果を得たことを報告している¹³⁾。彼らは同じ報告で、上記三次元空間フィルタを用いた画像処理の効果も試験している。このシステムを用いた本格的な NCT の成果が期待される。

(4) 日本原子力研究所では、1989年末 JRR-3M の熱中性子照射設備に TNCT 画像取得装置を設置¹⁴⁾、 $1.5 \times 10^8 \text{ n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ と国内最強の中性子束密度のもとで、TNCT 像 (FBP 法) を取得している。この測定系では、360 投影を得るのに約 30 分を要している。この系の、再構成に要する時間は、投影数 360 において、スライスあたり約 20 分である。再構成画像は、画素数 480×480 で出力している。

(5) 立教大学では、冷却型 CCD 撮像装置 (C-CCD) を TNCT に用いた。この撮像装置の特徴は、入力光子数と出力信号強度の良好な直線性、検出位置信号の無歪性、信号検出感度の均質性に加え、素子冷却による SN 比の向上に伴う広いダイナミックレンジにある¹⁵⁾。これらの特徴は、そのまま高性能 NCT を可能としている。この観点から、C-CCD による TNCT が立教大学炉を用いて実施された¹⁶⁾。その際、再構成への前処理においては、散乱線の評価補正と、C-CCD 素子に発生する γ 線起因の輝点除去処理の方法を提案している。その報告の中では、NCT に適した CT 値の定義、CT 値の決定範囲と直線性、および CT 値の識別分解能を議論している。さらに、測定系のダイナミックレンジとの関連において、原理に基づいた NCT を実施するための被写体の条件を記述す

る「有効積厚」という量を新たに定義している¹⁷⁾。この「有効積厚」は、測定系の性能と、CT 値の直線性が成立する範囲を推定できること、任意の物質の断層撮影可能な最大の寸法も決定できることなどにより有用な量である。今後、この点に関連し全巨視的断面積および中性子線の線質との関係の研究が進むことが望まれる。

NCT 技術の現状のまとめ

前節で、国内で行われた NCT についての現状をまとめたが、国外の状況もほとんど同様の技術水準にあると考えて間違いはない。いずれも、研究室段階にあることが多く、XCT において投影数 1 000、画素数 $1\,024 \times 1\,024$ の再構成画像を数分で取得可能とするような高度に実用化されたものは実現していない。NCT を XCT と比較するのは、これにかけた開発費（主として画像処理系）を考慮しなければ正当な評価ができない。このことを、また多様な条件でかなり大きく数値が変わり得ることを前提として、すでに達成している CT の性能に関する現状をまとめると、

- (a) 被写体の寸法：数 cm から 20 cm の程度（被写体寸法と巨視的断面積に依存する）
- (b) 投影画像の取得：数分から数時間（中性子束密度 $10^6 - 10^8 \text{ n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ ，投影数 ~ 100 ）
- (c) 再構成：スライスあたり数分から 30 分（ 512×512 画素）
- (d) 再構成画像の CT 値の分解能： $\sim$ 数%
- (e) 再構成画像の空間分解能：0.1 - 1 mm（被写体寸法、 L/D 値と、光学系に依存）

である。以上は、TNCT についてまとめたものであるが、CNCT においては、(d)の分解能（コントラスト）増大が期待でき、FNCT においては、透過力の増大に伴って厚ものの被写体の CT が可能となるが、(e)の分解能は現状 $\sim 1 \text{ mm}$ の程度に制限されている。

あ と が き

以上、中性子断層撮影のおおまかな現状と問題点をまとめた。なお紙数の関係で詳細の議論ができなかったが、世界における NCT の現状、NCT 撮像技術の詳細、NCT 用再構成アルゴリズムの詳細、アーティファクトの問題、

NCT の問題点と将来像全般の議論については、近々「非破壊検査」誌（日本非破壊検査協会発行）²⁾に、3 回に分けて詳細に解説する予定であるから、そちらの方も参考にいただければ幸いである。

Key Words : neutron computed tomography (NCT), thermal-NCT, cold-NCT, fast-NCT, capability of NCT

文 献

- 1) 岩井喜典編：“CT スキャナ”，コロナ社，東京（1979）
- 2) 小林久夫：“中性子断層撮影法開発の現状と問題点—I～Ⅲ”，非破壊検査（印刷予定）
- 3) 松本元一：*Isotope News*, No. 315, 6-7 (1980)
- 4) Matsumoto, G. and Kurata, S. : NR-1, 899-906 (1982)
- 5) 本田昌治：名古屋大学工学部修士論文（1987）
- 6) Ikeda, Y. et al. : *Material Evaluation*, **46**, 1471-1476 (1988), 他
- 7) Honda, S. et al. : NR-3, 827-834 (1990)
- 8) Oda, M. et al. : NR-4, 603-609 (1994)
- 9) Yoshii, K. et al. : NR-4, 535-542 (1994)
- 10) 中島智広：名古屋大学工学部修士論文（1994）
- 11) Fujine, S. et al. : *Nucl. Instr. Meth.*, **226**, 475-482 (1984)
- 12) Murata, Y. et al. : NR-3, 487-494 (1990)
- 13) Murata, Y. et al. : NR-3, 843-850 (1990)
- 14) Tsuruno, A. et al. : NR-3, 87-91 (1990)
- 15) Kobayashi, H. et al. : NR-3, 421-428 (1990)
- 16) Kobayashi, H. : NR-4, 553-560 (1994)
- 17) Kobayashi, H. : “Radiation Detectors and Their Uses”, pp.174-185, KEK, (June 1993)
- 18) Kobayashi, H. : NR-3, 893-902 (1990)
- [注] NR-3 : Fujine, S. et al. ed. : “Neutron radiography-(3)”, Kluwer Academic (1990)
- NR-4 : Barton, J. P. ed. : “Neutron radiography-(4)”, Gordon & Breach (1994)

（立教大学原子力研究所）