

## 連載講座



## 中性子イメージング技術の基礎と応用

中性子イメージング概論<sup>†</sup>

小林久夫

立教大学名誉教授

238-0023 神奈川県横須賀市森崎 4-9-27 (自宅)

Key Words : neutron, neutron imaging, X-ray imaging, neutron radiography, transparent material, opaque material, visualization, nondestructive inspection, nondestructive testing

## 1. 中性子イメージング

本講座を始めるにあたって、従来の中性子イメージング(狭義のラジオグラフィ)を簡単に紹介しておく。この技術はX線ラジオグラフィ(レントゲン撮影)と類似の手法で、通常、X線ラジオグラフィと同様、フィルム上に、物質の透過画像を取得することによって、物質内部を可視化する技術である。

両者は物質への相互作用が、そして物質によってはそれが著しく異なることにより、得られる透過画像に相違が、場合によっては著しい相違として現れる。また、中性子線の検出、画像化の方式も当然、X線の場合とは異なる。

中性子線は、原子核と直接相互作用して、吸収(捕獲や核反応)、散乱するのに対して、X線は、多くは核外電子と相互作用して吸収(光電効果、電子対創生)、コンプトン散乱等する。同じ放射線の吸収、散乱でも相互作用が異なるのはこの故である。この辺のところは、本講座第1回(本号)と第2回(次号)の基礎編で解説される。

この相違は、そのまま用途の相違となる。例えば、水は、中性子線に対して著しく不透過(5 mm でほぼ1/10に減衰)であるが、X線では透明である。したがって、X線イメージングは中性子イメージングと比較し、人体の内部を観察するのに有効な技術である。しかし、航空機のウイングの不具合(アルミ製品の腐食検査)を発見するには中性子イメージングの方が有効である。別の例では、鉛などの重金属はX線に対しては良い遮蔽材として知られているが、中性子線は10 cmの鉛でも容易に透過する。更に、中性子線の場合、極超冷中性子線( $\mu\text{eV}$ )から高速中性子線(数十 MeV)にわたって、優に10の13乗以上の広範囲で実施され得る。

このようなわけで、中性子イメージングとX線ラジオグラフィとは競合的な技術と言うよりは、むしろ相補的な技術といえる。両者を併用することにより、物質内部の可視化や検査の効果を質的に向上できる。最近フィルム法ばかりでなく、電子式撮像や輝尽発光体を用いた新しい撮像法が開発され、むしろこちらの方に将来性がある。この辺のところは、基礎編第7回以降に詳しく説明されよう。

## 2. 中性子イメージングの歴史

Röntgen, W. C. によるX線の発見(1895)の後、Rutherford, E. によって中性子の存在が予

<sup>†</sup>Fundamentals and Applications of Neutron Imaging. An Introduction to the Neutron Imaging. Hisao KOBAYASHI : Professor Emeritus at Rikkyo University, 4-9-27, Morisaki, Yokosuka-shi, Kanagawa Pref. 238-0023, Japan (Residence).

測 (1920) され, Chadwic, J. により発見 (1932) された。3 年後には, 中性子イメージングに関連する一連の実験が, ドイツの Kallman, H. と Kuhn, E. により加速器を用いて行われ, ドイツ, フランス, アメリカで関連技術の特許が申請されている。この論文の発表は 1947 年であったが, それに先だつ 1946 年には, 同じドイツ人の Peter, O. が加速器を用いての最初の研究を発表している<sup>1)</sup>。その後 1950 年代では筆者の知る限り Thewlis, J. の論文<sup>2)</sup>が一編発表されている。

1950 年代までの時期は, 中性子イメージング黎明の時期, あるいは第二次世界大戦と戦後の混乱期に重なる暗黒の一時期といえる。大戦が終了して, 1950 年代から世界各地で原子炉が建設され, その研究用原子炉を中心に中性子イメージングに関する本格的な研究がなされるようになった。しかし, この技術が宇宙, 航空部品の検査に欠かせない技術であり, それが同時に軍事利用と密接に結びついていることもあって, 全面的に開かれた技術とは言えない部分もあった。このころ主要な役割を果たしたのは Berger, H. で, 成果をまとめて 1965 年に専門書を刊行している<sup>3)</sup>。中性子イメージングの基礎は, 既にこの時点でほぼ固まったといってもよい。なお 1964 年には, 日本人の Kanno, A. は Berger, H. の装置を用いて, 溶接に関する非破壊検査を行っている<sup>4)</sup>。また, 1960 年代で主要な役割を果たした研究者 Barton, J. P. の名も忘れてはならないだろう。この時代には世界において 20 編弱の論文が発表されている。

1970 年代では, 60 編弱の論文が発表されているが, 忘れてならない論文に, Harms, A. A. らの一連の論文がある<sup>5)-7)</sup>。彼らは, 中性子イメージング取得法を模索している時期にあって, 金属 Gd 等をコンバータとして使用する場合の最適厚さを提案している。コンバータの提案が以降の中性子イメージングの発展に果たした寄与は大きい。Harms, A. A. は, この種のコンバータの作る画像の空間分解能を近似的には

あるが, 理論的に解析している<sup>8),9)</sup>。この解析結果は, 後に Kobayashi, H.<sup>10)</sup> のシミュレーション計算によって検討されて, 簡単なモデルながらフィルムを使用する直接法の画像に関しては比較的よい近似であることが確認されている。この辺りは, 基礎編第 3 回以降に順次解説されよう。

中性子イメージングを主テーマとする会議は, まず英国 (1973)<sup>11)</sup> において, 次いで米国 (1975)<sup>12)</sup> で開催された。その後 10 年ほどを経て, Barton, J. P. の呼びかけで, 新たに 1981 年, 「第 1 回中性子ラジオグラフィ世界会議」がサンディエゴで開催<sup>13)</sup> され, 各国間で研究成果の発表や情報交換がなされるようになった。この会議はほぼ 3 年ごとに開催され, 第 8 回ワシントンの National Institute of Standard and Technology (NIST, 2006)<sup>14)-20)</sup> へと引き継がれている。この国際会議の間を縫って, 1990 年 (カナダ, ペンブローク) より, その時点の主題を中心に十分な時間をとって議論を行うという主旨で, 中性子ラジオグラフィに関するトピカルミーティング (第 1 回中性子ラジオグラフィ・トピカル・ミーティング, International Topical Meeting on Neutron Radiography, 1st ITMNR) が開かれ<sup>21)</sup>, ミュンヘンの会議 (2005) で第 5 回を数えている<sup>22)-25)</sup>。以上, 中性子イメージング関連研究の歴史は, 広範な工業利用の現状も含めて, 上の諸論文集・報告でほとんど尽くされていると考えてよい。詳細は, 本講座の応用編で, 折に触れて論じられる。

中性子イメージングの歴史を刻んだ研究者, 研究組織及び研究施設は, 原子炉停止などに伴い国内外で様々な変遷を遂げている。この辺りは, 本講座では取り上げる可能性が少ないから, 国内に限って簡単に触れておこう。

我が国における初期の研究は, 既に 1960 年代に始まっている。文献は挙げないが, 東京都立アイソトープ総合研究所の Ra-Be 線源を用いた研究 (1963), 東芝中央研究所による訓練用原子炉を用いての研究 (1964) がある。その

後、日本原子力研究所東海研究所に、研究用原子炉 JRR-3 の水平実験孔 H4 (1967), JRR-2 の熱中性子柱 (1979), パルス炉 NSRR に設置された 2 基の照射設備 (1976), JRR-4 の照射設備 (1964) が次々と設置され、本格的な研究が開始された。同大洗研究所では<sup>252</sup>Cf 自発性核分裂物質を用いた実験も行われた (1981)。

大学、研究所においては、京都大学原子炉実験所 (KUR, 1978), 名古屋大学 (後にバンデグラフ加速器, 1985), 大阪府立放射線中央研究所 (同左, 1973, リニアック, 1977), 武蔵工業大学原子力研究所 (TRIGA-II, 1978), 立教大学原子力研究所 (同左, 1980), 近畿大学原子炉実験所 (1984) に、中性子イメージング施設が設置された。第 1 回の世界会議を契機に、我が国でも、相互の共同研究や研究会が盛んとなり、本格的に中性子イメージング研究がなされるようになった。今日では、実質的には、改造 JRR-3M に設置された本格的な照射設備 (1991) が、全国共同利用の施設として有効に利用されている。

第 3 回の世界会議が大阪で開催された頃からは、論文数からも、特に電子イメージングの領域と基礎データ取得の領域で、我が国は世界を圧倒するようになっていた。東京大学弥生炉 (高速中性子炉) を用いた、速中性子イメージングの研究も、この時期先端を行っていた。北海道大学 (リニアック) のグループも、国際会議等に積極的に参加するようになっていた。

産業応用に本格的に参加した事業所は、日本製鋼所室蘭製作所 (超小型サイクロトロン, 1981), 住友重機械工業(株)東予製造所 (小型サイクロトロン, 1983) があるが、日本製鋼所室蘭製作所は既に事業を中止している。国外では、中性子イメージングだけで事業所を行っている企業もある。最近、しばしば報道されている航空機のタービンプレード起因の事故防止に、中性子イメージングが果たし得る役割は大きい。国内で、その種の検査技術の実施は十分可能であるにもかかわらず、それが十分生かされてい

ない。本来の目的である中性子イメージングの産業利用を、もう一度考え直す時期にきているように思う。国外で主要となっている産業利用に関しては、我が国では未だに苦戦を強いられているが、最近、産業利用を促進するため茨城県中性子利用促進研究会が茨城県科学技術振興会議に設けられた。

残念ながら、国内の中性子ビーム発生施設は、原子炉停止などにより、次々と機能を停止している。現在稼働しているのは、日本原子力研究開発機構の JRR-3M, 京都大学原子炉実験所の KUR, 近畿大学原子力研究所 UTR-KINKI の三施設である。一方、パルス中性子ビームを発生させる大型施設 (J-PARC) が建設中であり、この施設が稼働を開始すると、今まで不可能となっていた新たな技術での中性子イメージング法の開発も期待できる。当然、本講座で取り上げるべき主要な主題となる。中性子イメージング技術そのものの進展については、本講座で触れられることになる。

関連学問分野への応用や基礎的技術の開発の面では、現在なお他国を圧している側面もあり、この辺りの解説は特に充実したものになると思う。現在、この研究分野の現場で活躍されている産業界、大学、研究所の諸先生方に、分担して執筆いただき、良く纏まった講座 (教科書兼参考書) になることを期待している。

## 文 献

- 1) Peter, O., Neutron-Durchleuchtung, *Z. Naturforsch.*, **1**(10), 557 (1946)
- 2) Thewlis, J., *Brit. J. Appl. Phys.*, **7**, 345 (1950)
- 3) Berger, H., Neutron Radiography: Methods, Capabilities and Applications, (Originally published by Elsevier Publ. Co., Amsterdam, 1965), Modified Photocopy edition, Industrial Quality Inc., Gaithersburg (1995)
- 4) Kanno, A., The nondestructive testing of brazes joints, ANL-6924 (1964)
- 5) Garside, B. K. and Harms, A. A., *J. Appl. Phys.*, **42**,

- 5161 (1971)
- 6) Mullner, M. and Jax, H., *Nucl. Instrum. Methods*, **103**, 229 (1972)
- 7) Harms, A. A., Brake, T. G. and Marton, J. P., *Nucl. Instrum. Methods*, **109**, 253 (1973)
- 8) Harms, A. A., Garside, B. K. and Chan, P. S. W., *J. Appl. Phys.*, **43**, 3863 (1972)
- 9) Harms, A. A. and Wymann, D. R., *Mathematics and Physics of Neutron Radiography*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1986)
- 10) Kobayashi, H., (in ref.17) 893-902 (1990)
- 11) British Nuclear Energy Society (BNES), *Radiography with Neutrons*, Thomas Telford Ltd. (1975)
- 12) Berger, H., *Neutron Radiography and Gaging*, ASTM STP 586 (1975)
- 13) Barton, J. P. and Der Hardt, P. v. eds., *Neutron Radiography* [(1)], D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1982)
- 14) Barton, J. P., Farny, G., Person, J.-L. and Röttger, H. eds., *Neutron Radiography* [(2)], D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1987)
- 15) Shigenori, S., Kanda, K., Matsumoto, G. and Barton, J. P. eds., *Neutron Radiography* (3), Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (1990)
- 16) Barton, J. P., ed., *Neutron Radiography* (4), Gordon and Breach Sci. Publ., Yverdon (1994)
- 17) Fischer, C. O., Stade, J. and Bock, W. eds., *Neutron Radiography* (5), DGZfp (1997)
- 18) Fujine, S., Kobayashi, H. and Kanda, K. eds., *Neutron Radiography* (6), Gordon and Breach Sci. Publ., Amsterdam, 2001; collected papers were published by Nondestr. Trst. Eval., **16**(2-6) (2001)
- 19) Chirco, P. and Rosa, R. eds., *Neutron Radiography* (7), ENEA, Rome, 2002; (collected a few papers were published by *IEEE Trans Nucl. Sci.*, **52** (1), Feb. 2005)
- 20) *Neutron Radiography* (8) (to be Published.)
- 21) MacGillivray, G. M. and Brenizer, J. S. eds., *Neutron Radiography System Design and Characterization*, International Topical Meeting on Neutron Radiography (ITMNR)-1, Canadian Nucl. Soc., Tronto (1994)
- 22) Kobayashi, H. and Mochiki, K. eds., *Neutron Radiography System Design and Characterization*, ITMNR-2, *Nucl. Instrum. Method.*, **A377** (1) (1996)
- 23) Lehmann, E., Pleinerrt, H. and Koerner, S. eds., *New Detectors, Imaging Techniques and Applications*, ITMNR-3, *Nucl. Instrum. Methods*, **424** (1) (1999)
- 24) Brenizer, J. and Tsukimuram, R. eds., *Advances in Neutron Imaging for the 21st Century*, ITNMR-4, *Appl. Radiat. Isot.*, **61** (4) (2004)
- 25) Bucherl, T., Schilinger, B., Türler, A. and Böni, P. eds., *Electronic Neutron Imaging Systems and their Applications in Neutron Radiography and Testing*, ITMNR-5, *Nucl. Instrum. Methods*, **542** (1-3) (2005)
-