連載講座

中性子イメージング技術の基礎と応用(基礎編第11回)

中性子イメージングの最新技術-1[†]

川端祐司

京都大学原子炉実験所 590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2-1010

Key Words : neutron, neutron imaging, neutron radiography, phase contrast, refraction, stroboscopic imaging

1. はじめに

レントゲン写真の影響から,実用強度の中性 子源が得られた直後より中性子ラジオグラフィ が試みられてきた。X線と比べて,金属に対す る透過率が高く,また軽元素の水素等に感度が 高いこと等から,特徴的な利用研究が行われて きており,本連載講座にてそれらの詳しい解説 が行われている。

従来の中性子ラジオグラフィでは、中性子ビ ームの取り扱いは比較的単純であり、十分にコ リメートしたビームを試料に照射し、試料中で の吸収や散乱による減衰を観察するものであっ た。しかし、近年、放射光を利用した X 線イ メージングや中性子散乱研究に用いられている 技法からの影響を受け、従来とは異なった中性 子イメージング手法の発展が著しい。

特に,熱中性子の波長がX線とほぼ同程度 であることから,その研究手法には類似性があ り,中性子においてもX線イメージングと同 様に位相情報の利用が大きな流れとなっている。 また,中性子散乱分野との垣根が低くなってき ており,中性子を用いて得られるあらゆる情報 を総合してイメージング化しようという努力も なされている。

本連載では2回に分けて中性子イメージング の新しい傾向を紹介する。今回は位相情報・屈 折の利用,ストロボ法,中性子とX線による イメージの融合等を紹介し,次回はエネルギー 選択イメージング,単色中性子によるブラッグ カットオフ利用,共鳴吸収法,Dy-Ip法等を 紹介する。

2. 位相イメージング(フェイズコントラスト法)

X線イメージングの分野では,放射光施設の 登場により,測定に利用できるX線強度が飛 躍的に向上し,それに伴って大きな飛躍を遂げ た。特に,高輝度の位相のそろった単色線を用 いたX線位相イメージングは,従来の吸収や 散乱によるビーム減衰だけの効果では,決して 観察することのできない高分解能イメージング を可能とした¹⁾。

中性子分野では,放射光ほどの大輝度な中性 子源は実現されていないため,中性子の位相情 報を利用したイメージングは実用的ではないと 長らく見なされていた。例えば,中性子の位相 情報を利用する研究は,中性子干渉計として基 礎物理研究で行われてきた。その原理は,中性

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Fundamentals Part 11).

New Technology of Neutron Imaging (Part 1).

Yuji KAWABATA : Research Reactor Institute, Kyoto University, 2-1010, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494, Japan.

子を物質波と見なし,一つの中性子波を空間的 に分割して一方のみに外乱を与え,更にそれら の分割した波を再び重ね合わせて干渉を観測し ようというものであった。この方法では,試料 の位置精度に対する要求が厳しく,長い測定時 間にわたって微細な揺れや温度変化を精密に制 御する必要があったため,汎用目的のイメージ ングには適していないと考えられていた。

しかし,物質波の空間的分割を利用しない方 法でも中性子位相イメージングが可能であるこ とを、Allman 他が昆虫の蜂と釣りの鉛おもり を試料として実証し^{2),3)},ここに中性子位相の イメージングへの応用が開始されることとなっ た。この測定は、米国の National Institute and Standards and Technology (NIST) の中性子 干渉実験孔で行われており,発散角を6mrad に制限された波長 0.443 nm の中性子を利用し ている。中性子導管出口に, 直径 0.4 mm のピ ンホールコリメータを置いて中性子源のサイズ を小さく制限し、コリメータ・試料間距離を 1.8mとすることにより、中性子の挙動が平面 波近似で取り扱える条件とした。検出器を試料 直後に配置して従来型イメージを撮像すると共 に、更に試料・検出器間距離を1.8mにして フェイズコントラスト画像を得ている。このよ うな条件において撮像を行うと、試料端面にて 平面波が乱れることを利用してエッジ強調され た画像が測定できるのである。更に、このコン トラスト発生メカニズムについて詳しく調べら れ^{4),5)}, ガスタービン羽根への応用についての 可能性が検討された^{6),7)}。その後,冷中性子の 白色ビームでの撮像にも成功し⁸⁾,本手法が有 望であることを実証している。

これらの仕事と独立に,Kardjilov等は熱中 性子の白色ビームによってフェイズコントラス ト画像を得ることに成功した⁹⁾。白色中性子を 利用すると,通常は干渉効果は異なる波長によ って打ち消されてしまうことが多いが,試料端 面では波長によらず,それぞれの平面波が同様 な形で乱れる。その結果,端面では,白色中性 子を用いても波長の乱れは打ち消されることな く生成する。その結果,エッジ強調された画像 が,中性子の干渉の結果として現れるのである。 ヨーロッパでのフェイズコントラスト法は当初, スイスの Paul-Scherrer-Institut (PSI)を中心 に発展し^{10),11)},現在ではベルリンやミュンヘン でも盛んに行われている。

フェイズコントラスト法を行える典型的な施 設の例として、図1にドイツのHarn Meitner Institute (HMI) における冷中性子ラジオグラ フィ装置 (Cold Neutron Radiography and tomography, CONRAD)¹²⁾の様子を、更にそのフ ェイズコントラスト法の撮像体系を図2に示し た。ピンホールを用いて中性子源サイズをでき るだけ小さくすることと、中性子源・検出器間 距離を長くすることは、小さなビーム発散を得 るために必要であることから、従来型ラジオグ ラフィでも求められる条件である。しかし、従 来型ではビーム発散による画像のにじみを小さ くするため、試料・検出器間距離をできるだけ



図1 HMIにおける冷中性子ラジオグラフィ装置(CONRAD)の概要





図2 フェイズコントラスト撮像体系



図3 フェイズコントラストと従来法との比較 (試料:注射針) ピンホール径:左より5mm,5mm,1mm

試料・検出器間距離:左より0mm, 700mm, 700 mm

小さくすることが望ましいのに対し、フェイズ コントラスト法ではこの距離が一定程度必要で あることが異なっている。

CONRAD で得られた従来型ラジオグラフィ と、フェイズコントラスト法によって撮像した 結果を図3及び図4に示す。図3は、非常に小 さなものの例として注射針の撮像結果である。 従来型ラジオグラフィでは、物質の種類にもよ るが、注射針程度の大きさでは十分な中性子の 吸収・散乱が生じないため、透過ビームに十分 な減衰が発生せず、十分なコントラストが得ら れないことが多かった。しかし、フェイズコン トラスト条件下で測定した右側の二つのイメー ジでは、針がはっきりと捉えられている。特に 条件の良い方では,この図ではわかりにくいが, 注射針内部の孔部分まで示されている。



ピンホール径:左より5mm,5mm,1mm 試料・検出器間距離:左より0mm, 700mm, 700mm

同条件でアルミニウムステップを撮像した結 果が図4である。この比較によって,フェイズ コントラスト法ではエッジが強調されているこ とが明瞭である。このように中性子の干渉現象 を用いることにより,これまで見ることができ なかった微細な部分が観察できることが示され た。この方法は,従来法に比べると撮像時間が かかるものの,静止物体に対して非常に有効で あり,FRP (Fiber Reinforced Plastic)等への 応用が行われている¹³。

また,全く新しい提案としては,中性子の磁 気位相を中性子スピンエコーの手法によって測 定する磁気位相イメージングがある¹⁴⁾。これは, 単に磁気的に偏極した中性子による透過画像を 得るものではなく,中性子が通過する経路の磁 場積分によって中性子の磁気位相が変化するこ とを利用するものであり,現状ではまだ原理実 証の段階であるが,試料中の磁場測定に対して 新たな展開をもたらす可能性のあるものである。

3. 中性子屈折イメージング

中性子の物質波としての性質を用いた手法に は屈折法もある。フェイズコントラスト法では 画像のエッジ強調効果が得られるが,屈折法で は中性子に対する屈折率の変化によってビーム 進行方向を変化させて画像のコントラストを得 るため,試料中の中性子ポテンシャルの変化を 観察することになる。中性子ポテンシャルは, 各元素固有の散乱長と原子数密度の積に比例す るが,更に磁場に比例する磁気ポテンシャルを 利用することも可能である。ただし,通常は屈 折角が小さいことと色収差があることから,利 用できる中性子ビーム発散角が小さく,また良 い単色度が求められる。

中性子屈折のイメージングへの最初の応用は, 磁性体内における中性子磁気ポテンシャルを利 用するものであった。単結晶モノクロメータ・ アナライザを用いた単色熱中性子を用いて¹⁵⁾, 磁気単結晶内部の磁区の観察を試みており¹⁶⁾, 厚みのある試料内での磁化プロセスの観察¹⁷⁾へ と応用が発展している。また,極小角散乱装置 と組み合わせ,試料内における中性子ビームの 微少な確度変化を精密に測定し,屈折効果によ り金属異材の組み合わせやホール等のComputed Tomography (CT)画像が得られてい る¹⁸⁾。更に整備された装置が組み上がっており, 今後の応用が期待されている^{19),20)}。

熱中性子を利用する限り上記のような制限が あるが、よりエネルギーの低い中性子を用いる と屈折効果が大きくなることから、より効率的 に測定することが可能となる。その例として、 極冷中性子(Very Cold Neutron, VCN)による イメージングがある²¹⁾。試料はアルミニウムの 溶接材であり、その密度変化を VCN イメージ ングによって撮像したものである。アルミニウ ムの中性子断面積は小さいため、溶接部の密度 変化等は従来法では測定不可能であったが、図 5 に示すように、溶接部分が明瞭に示されてい る。また境界が不明確で、密度変化が連続的で あるため、フェイズコントラスト法での観察は 困難である。

4. ストロボ法

中性子イメージングでも,動画像による研究 はこれまでも大きな比重を占めている。しかし, 高速画像を追求した際の測定限界は,通常は1 フレームあたりの中性子数に依っている。中性 子源はX線源と比較して強度が弱いため,そ の強度が画像の明るさを決定し,測定限界を制 限することが多い。このような限界から連続的 な動画像として撮像できないような場合でも, 周期的現象に対しては更に短時間の現象を観察 することが可能である。

例えば、エンジンの場合、短時間で同じ現象 が繰り返される。その結果、その瞬間だけをス トロボ撮影し、それを重ね合わせることによっ て、1 画像では統計誤差に埋もれてしまうよう な現象でも、多くのストロボ画像を足し合わせ て、これらの限界を超えることが可能となる。

ストロボ測定を行う方法としては、中性子を



図5 極冷中性子 (VCN)を用いた中性子屈折効果によるアルミニウム溶接部の観察

連続的に照射して光シャッター付き CCD を利 用する方法²²⁾⁻²⁴⁾と,中性子ビーム自体をパル ス化する方法²⁵⁾がある。

図6に中性子をパルス化する場合の撮像法を 示す。ここではディーゼルエンジンの燃料ノズ ルからの燃料噴出の観察を目的としており,図 7に試料の形状を示す。燃料噴出の場合,同じ 位相の現象は再現性良く繰り返されている。そ の結果,その瞬間のみに中性子を照射し,その 画像を足し合わせることによって精度の良い画 像が得られる。この場合,300~3000 rpmで 0.2~2 msec の時間分解能を要求されている。 燃料は最終的にノズル孔から噴出されるが,こ の径は 0.38 mm であり,現在利用できる中性 子源の強度では,この部分を連続的に観察する ことは困難である。

ストロボ撮像によって得られた結果を図8に 示す。燃料噴出部における噴霧状態が示されて おり、燃料が霧状になるのはノズルから噴出し た後ではなく、ノズル孔通過中に既に密度が下 がり、霧化が始まっていることが示されている。 この結果は、ある瞬間を切り取ったものではな いが、ノズルからの噴出動作におけるその位相 の平均状態を示しており、現象の揺らぎを平均



図6 ストロボ撮影原理図



図7 ストロボ撮影用試料:ディーゼルエンジン用 燃料ノズル

したものとして理解することができる。



図8 ストロボ撮影結果:ディーゼルエンジン用燃料ノズルにおけるキャビテーションの可視化

5. N(中性子)-X(X線)フュージョン

中性子とX線が相補的な性質を持っている ことはよく知られている。構造解析の分野では, その特徴を活かして放射光によるX線回折・ 散乱と,中性子源による中性子回折・散乱を組 み合わせた研究が盛んに行われており,特に生 物研究等で大きな成果を生んでいる。

イメージングの場合においても同様であり, 中性子とX線は異なる情報を与えてくれる。 特徴的な違いとしては,X線は原子番号が大き い物質に対して減衰が大きいが,中性子は水素 原子に対して感度が高いため,高分子等の水素 を多く含む元素がよく見えること等がある。

その例として,図9に同じペースメーカーを X線と中性子線で見た例を示す²⁶。X線では回 路部分が明瞭であるのに対し,金属で覆われて いる電池部分は全く見えていない。それに対し, 中性子線では回路部分はコントラストが十分に 得られていないのに対し,電池部分は内部がは っきりと見えている。このように見えるものが 異なっており,X線と中性子線では異なる情報 が得られる。

また考古学への応用の例として,パラフィン



図9 X線と中性子によるイメージの比較:ペース メーカー

を表面及び内部の一部に塗布した鉄製のやじり に対する X 線と中性子線による CT 画像を図 10 に示す²⁷⁾。これは,出土状態において金属 に土壌等の有機物が付着した場合を模擬するも のであり,金属部分と他の部分を分離できるか どうかを確認することを目的としている。中性 子線 CT では,鉄とパラフィンが明確に分離さ れており,それぞれの形がどのようになってい るか明瞭に示されている。それに対し,X線 CT では,X線源サイズが小さいため形状に関する 分解能は優れているものの,パラフィンが全く 見えていない。このように,X線を利用して重 い元素と軽い元素を同時に見ようとした場合,



図 10 X線と中性子によるイメージの比較:パラフィンを付着させた鉄製「やじり」模型 中央:中性子イメージ,右:X線イメージ 中性子では鉄とパラフィンの区別が明瞭に判明しているが,X線ではパラフィンはまったく見えていない

軽い元素が非常に見えにくくなるという欠点が ある。

X線を用いると分解能が良くなり,中性子線 を用いると軽元素がよく見えるというように, それぞれに特徴がある。今後,積極的に中性子 画像とX線画像の両方を利用するため,中性 子施設にX線源を組み込むこと²⁸⁾や放射光施 設との組み合わせ²⁹⁾,更にはγ線との組み合わ せ³⁰⁾を行うことにより新しい情報が見えてくる ことが期待されている。

6. まとめ

近年,中性子イメージングの世界が大きく変 貌しつつあるという印象が強い。その理由は, これまで長く用いられてきた透過ビームの減衰 を用いたイメージング手法から,位相を利用す るような中性子物理・散乱・回折の手法が導入 されてきたことによっている。従来と異なる手 法は,新しい情報を得る手段となり,中性子イ メージングの世界を広げることになると期待で きる。

また, X線 CT では常識となりつつある空間 の3次元に時間軸も加えた4次元画像について も,中性子イメージングの分野でもチャレンジ され始めている。従来は一つの CT 画像を取得 するのに1~3時間は必要であったが,より高 い中性子束を利用し,より高速での画像取り扱 いや試料コントロールを行うことによって飛躍 的に測定時間を短くしようという試みである。 現在進行中であり,どの程度まで時間短縮でき るかによって応用範囲が大きく広がる可能性が あり,非常に楽しみな計画である。

更に,入射中性子ビームを絞り,中性子入射 点を特定することによって得られた中性子散乱 による情報を,これらの3次元画像に重ね合わ せることにより,中性子から得られるすべての 情報の画像化も考えられる。これらによって, 従来の非破壊検査の概念を超えた新しいイメー ジングが可能になると期待される。

文 献

- 例えば, Momose, A., Jpn. J. Appl. Phys., 44(9A), 6355-6367 (2005)
- Allman, B. E., McMahon, P. J., Nugent, K. A., Paganin, D., Jacobson, D. L., Arif, M. and Werner, S. A., *Nature*, 408 (9), 158-159 (2000)
- Allman, B. E. and Nugent, K. A., *Physica B*, 385-386, 1395-1401 (2006)
- McMahon, P. J., Allman, B. E., Nugent, A., Jacobson, D. L., Arif, M. and Werner, S. A., *Appl. Phys. Lett.*, 78 (7), 1011-1013 (2001)
- Benedicta, D., Arhatari, B. D., Mancuso, A. P., Peele, A. G. and Nugent, K. A., *Rev. Sci. Instrum.*, 75 (12), 5271-5276 (2004)
- Thornton, J., McMahon, P. J., Allmann, B. E., Murphy, J. E., Nugent, K. A., Jacobson, D. L., Arif, M. and Werner, S. A., NDT&E Int., 36, 289-295 (2003)
- 7) Thornton, J., Arhatari, B. D., Peele, A. G. and Nugent, K. A., *Physica B*, 385-386, 917-920 (2006)
- Jacobson, D. L., Allman, B. E., McMahon, P. J., Nugent, K. A., Paganin, D., Arif, M. and Werner, S. A., *Appl. Radiat. Isot.*, 61, 547-550 (2004)
- Kardjilov, N., Lehmann, E., Steichele, E. and Vontobel, P., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A527, 519-530 (2004)
- Lehmann, H., Lorenz, K., Steichele, E. and Vontobel, P., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 95-99 (2005)
- Kardjilov, N., Lee, S. W., Lehmann, E., Lim, I. C., Sim, C. M. and Vontbel, P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 100-105 (2005)
- 12) Hilger, A., Kardjilov, N., Strobl, M., Treimer, W. and Banhart, J., *Physica B*, 385-386, 1213-1215 (2006)
- Bastürk, M., Kardjilov, N., Rauch, H. and Vontbel, P., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 106-115 (2005)
- 14) Tasaki, S., Kageyama, M., Kawabata, Y., Hino, M. and Hayashida, H., Abstracts of 4th Europian Conf. on Neutron Scattering, 25-29 June, Lund,

Sweden, M087 (2007)

- Podurets, K. M., Somenkov, V. A., Chistyakov, R.
 R. and Shilstein, S. Sh., *Physica B*, **156-157**, 691-693 (1989)
- Podurets, K. M., Somenkov, V. A., Chistyakov, R.
 R. and Shilstein, S. Sh., *Physica B*, **156-157**, 694-697 (1989)
- Podurets, K. M., Chistyakov, R. R. and Shil'stein, S. Sh., *Zh. Tekh. Fiz.*, 67, 134-136 (1997)
- 18) Treimer, W., Strobl, M. and Hilger, A., Appl. Phys. Lett., 83 (2), 398-400 (2003)
- Strobl, M., Treimer, W., Kardjilov, N. and Hilger, A., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 383-386 (2005)
- 20) Stroble, M., Treimer, W., Ritzoulis, C., Wagh, A. G., Abbs, S. and Manke, I., *J. Appl. Crystallogr.*, 40, s463-s465 (2007)
- Kawabata, Y., Hino, M., Nakao, T., Sunohara, H., Matsushima, U. and Geltenbort, P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 61-67 (2005)
- 22) Schillinger, B., Abele, H., Brunner, J., Frei, G., Gahler, R., Gildemeister, A., Hillenbach, A., Lehmann, E. and Vontobel, P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 142-147 (2005)
- Vontobel, P., Frei, G., Brunner, J., Gildemeister, A. E. and Engelhardt, M., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 148-153 (2005)
- 24) Hillenbach, A., Engelhardt, M., Abele, H. and Gahler, R., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 116-122 (2005)
- 25) Takenaka, N., Kadowaki, T., Kawabata, Y., Lim, I. C. and Sim, C. M., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 129-133 (2005)
- 26) Kardjilov, N., private communication
- Kawabata, Y., 8th World Conf. on Neutron Radiography, Gaithersburg, USA, T243 (2006)
- (例えば De Beer, F. C., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 1-8 (2005)
- Beckmann, F., Vollbrandt, J., Donath, T., Schmitz, H. W. and Schreyer, A., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 279-282 (2005)
- 30) Baraskó, M., Kuba, A., Nagy, A., Kiss, Z., Rodek, L. and Ruskó, L., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 22-27 (2005)