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12回)

中性子イメージングの最新技術-2[†]

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, energy selective imaging, bragg-cut-off, neutron resonance absorption spectroscopy, dysprosium-imaging plate method, coded aperture

1. はじめに

本連載では2回にわけて中性子イメージング の最新技術を紹介している。前回は位相情報・ 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について紹介した。今回は, 更に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,共鳴吸収分光 法,Dy-IP法等を紹介する。

現在の中性子イメージングの状況は,入射ビ ームの試料中での減衰を測定するだけの従来型 の中性子ラジオグラフィから一歩踏みだし,こ れまで利用されてこなかった,中性子位相をは じめとする情報の積極的な活用が一気に始まっ たばかりであり,今まさに,新たな時代が開き つつある^{1),2}。

2. エネルギー選択イメージング

中性子のエネルギーは,核破砕や核分裂で得 られる高速中性子から,常温の熱中性子,液体 水素等で減速された冷中性子,更には極冷中性 子・超冷中性子まで,非常に幅広いエネルギー 領域を有している。また,そのエネルギー領域 によって物質透過能力が大きく異なることを利 用し,汎用的な熱中性子の利用ばかりでなく, 透過性の高い高速中性子を利用した比較的大き な試料への適用³⁰や,冷中性子利用による高コ ントラスト画像の取得⁴⁰等が広く行われてきて いる。このような利用は,今後も着実に発展す ると期待されている。

また近年,飛行時間分解が可能な2次元位置 検出器の発展が著しい。このような検出器の利 用をパルス中性子源と組み合わせ,飛行時間法 によるエネルギー分解を行うことによって,高 速中性子から冷中性子までを用いたさまざまな エネルギー領域による画像を,同一試料に対し て同時に取得することが可能である⁵⁾⁻⁷⁾。

北大グループが行った飛行時間法による測定 方法を図1に,更に電子線形加速器を用いて撮 像した例を図2に示す⁶⁾。試料は,アルミニウ ム板の上にポリエチレンで「H」を,更にポリ 塩化ビニールテープで「U」を作り,「H」は カドミニウムカバーで覆っている。中性子エネ ルギーが低い場合,Cdは良く中性子を吸収し, 更にビニールテープ程度のものでも中性子の吸 収・散乱が十分大きく,画像上ではっきりとそ

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Fundamentals Part 12).

New Technology of Neutron Imaging (Part 2).

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



中性子エネルギー

れらが見えている。しかし,エネルギーが高く なるにつれ,Cdでは中性子が止まらなくなる。 そのような場合でも,ポリエチレンのような水 素を大量に含んでいるものは,高速中性子を減 速するため,見ることが可能である。

このように,エネルギーが異なると,同一サ ンプルでも見え方が変化することが,この方法 の特徴である。連続中性子源でそれらのエネル ギー領域ごとの中性子を取り出して,それぞれ 特長ある画像を別々に取得する方法に加えて, このようにパルス中性子源を用いると,全エネ ルギーに対する画像を同時にすべて得ることが できる。

しかし、本手法は、まだ検出器の位置分解能 やピクセル数が十分でないため、現状では中性 子イメージングに汎用的に使用されるには至っ ていない。しかし、Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) や米国の Spallation Neutron Source (SNS) といった超高中性 子束源の稼働も近づいており、そこで必要とさ れている高分解能2次元検出器は、非常に精力 的に開発が進められている。そのような検出器 が利用できるようになった時、本手法の本格的 応用が開始されることになろう。

またこれら以外にも,加速器中性子源からの 高エネルギー中性子を利用するイメージング装 置の開発も進められている^{8,9}。

3. 単色中性子法

熱中性子の波長は約0.2 nm (約20 meV) であり、金属材料中の結晶の格子間距離とほぼ 同程度である。このことから、この程度のエネ ルギーの中性子を単色化すると、試料内の結晶 格子による回折等が観測され、中性子の物質波 としての性質が顕著に現れることがある。

例えば,熱中性子や冷中性子のエネルギー領

図2 飛行時間法を応用した中性子スペクトルによる画像の変化



図3 ブラッグカットオフ前後の波長による多結晶物質の強調 (a) 中性子波長 0.69 nm, (b) 中性子波長 0.32 nm, (c) 左の2 画像を割って得た画像

域では、通常は波長が長くなる(つまり、エネ ルギーが低くなる)ほど断面積が大きくなるが、 中性子の波長が試料内結晶の格子間距離よりも 長くなると、その結晶によるブラッグ反射が起 こらなくなるため、断面積が非連続的に減少し、 中性子透過率がステップ状に増加する。その現 象をブラッグカットオフと呼ぶ。ブラッグカッ トオフ前後の波長を持つ単色中性子にて撮像を 行うと、そのブラッグカットオフを持つ物質の みが画像上の濃度を大きく変化させる。つまり、 ピクセルごとにそれらを比較することにより、 目的の物質を浮き上がらせることができる。

その例を図3に示す¹⁰⁾。これはスパークプラ グを、中性子波長0.69 nm(1.7 meV)及び 0.32 nm(8.0 meV)の単色中性子で撮像し、 更にそれらの画像を対応するピクセルごとに割 り算を行って得た画像である。このような操作 を行うことにより、この二つの波長間での中性 子断面積の変化を現すことができる。中央部分 に強調された部分が認められる。この部分にこ の二つの波長の間にブラッグカットオフを持つ 物質が有ることがわかる。この手法では、多結 晶物質を強調した画像が得られる。2次元位置 検出器の位置分解能が向上し、位置ごとに飛行 時間を厳密に決定することができれば、物質に よってわずかに異なるブラッグカットオフ波長 から、物質の種類を特定できる可能性がある。

金属中の残留応力は、溶接部の割れの原因に

なる等,工業利用上問題になることが多い。内 部応力は格子問距離を変化させるため,格子問 距離の変化を測定することにより,内部応力の 分布を可視化することが可能となる。しかしX 線では金属内部まで透過することができないた め,中性子線による観察が行われている^{11),12)}。

5 mm 厚の鉄板を 2 か所で折り曲げ, 1.7 mm 角ピクセルごとに中性子飛行時間 (Time-offlight: TOF) 測定を行った結果を図4に示 す^{13),14)}。この図で示されたように,内部応力に 応じて結晶格子が歪むことが,位置ごとの飛行 時間スペクトルの解析から解明できる。

同様な測定を行い,波長を適切に選択するこ とによって格子間距離の変化した部分を示した 例を図5に示す^{15),16)}。厚さ5mmの鉄板を曲げ ることで内部応力を発生させ,それを0.22nm (16.9meV)から0.64nm(2.0meV)まで0.01 nmステップの中性子波長で測定した。試料の 写真,単純な透過イメージ,更には濃度の波長 依存性から求めたブラッグカットオフ波長を各 ピクセルごとに示した結果である。明らかに試 料の曲げ状態とブラッグカットオフ波長のずれ に対応がみられている。

これらに示したように,本手法によって残留 応力分布の可視化が既に行われており,今後の 中性子産業利用の有望な分野となることが期待 されている。



図4 中性子飛行時間法による歪み測定



図5 ブラッグカットオフ前後の単色中性子による 残留内部応力の観察

(上) 試料,(中)単色中性子による透過画像,
(下)異なる波長から得られた多数の画像から
内部応力が存在する場所を示したもの

4. 中性子共鳴吸収分光法

中性子は、元素ごとに固有の共鳴吸収エネル ギーを持っており、元素によっては非常に大き な吸収断面積となる。また、試料温度が変化す るとドップラー効果によって共鳴吸収のエネル ギー幅が変化し、その結果吸収断面積が変化す る。このことを利用し、試料の核種同定と温度 測定を同時に行おうというのが、中性子共鳴吸 収分光法(Neutron Resonance Absorption Spectroscopy: N-RAS)である^{17),18)}。

共鳴吸収時の即発 γ 線測定と TOF 測定を組 み合わせることにより,このような測定を非破 壊で行うことが可能となる。測定原理を図 6 に 示す。パルス中性子源からパルス状に発生した 中性子を TOF 法にてエネルギーを測定し,エ ネルギーごとの即発 γ 線強度を測定する。測 定された共鳴吸収スペクトルの形は試料の実効 温度に依存するため,元素とその実効温度が測



図6 中性子共鳴吸収法の測定原理



図7 中性子共鳴吸収法の測定体系

定される。

実際の測定体系を図7に示す¹⁹⁾。中性子ビームをスリットで絞り,目的とする範囲をスキャンすることにより位置情報を得る。直径17 mmのAl₂O₃円筒中に直径3 mmのTaロッドを組み込んだ試料について,CT測定を行った場合の測定配置及び測定結果を図8に示す。試料中心部分にヒーターを挿入し,Taの共鳴吸収エネルギーに注目して γ 線測定を行い,更に試料を回転して全方向から測定することによってCT測定が行われた。その結果,核種及び温度分布が測定可能であることが実証された。

5. Dy-IP 法

イメージングプレート(IP)は高位置分解能 を持つ優れた撮像機器であり、中性子用 IP も 広く用いられている。しかし、γ線にも感度が 高いため、これまでは放射化された試料に対し て使用することができなかった。原子炉の炉心 廻りで使われた後の機器の点検は、原子力安全 にとって重要な情報であるが、これまでそのよ うな非破壊検査はほとんど行われていない。

そのような放射化された試料を測定するため に開発されたのが, Dy-IP 法である²⁰⁾。通常の 中性子用 IP では Gd を用いているが, これを



図8 中性子共鳴吸収法の測定配置及び測定結果

半減期のやや長い(約2時間)Dyとする。試 料を照射する際に,中性子ばかりでなくγ線 も同時にIPに照射されるため,測定直後は試 料のイメージが得られない。照射後にイメージ を消去し,照射中の中性子及びγ線による効 果を消滅させる。試料を透過した中性子で放射 化された Dy が再度自己露光をするのを待って, イメージの読み取りを行う。この結果,最初に 試料を測定した際のγ線の効果を除去できる のである。この方法については,本連載講座応 用編第4回にも記述されているのでそちらも参 照されたい²¹⁾。

6. コーデッド・アパチャー法

通常の中性子ラジオグラフィ装置の撮像系は, 基本的に単一のピンホールを用い,あとは試料 までの距離によってビーム発散を決定すること によって画像を得ている。より位置分解能の高 い画像を得るためにはビーム発散を小さくし, 試料から検出器の間におけるビームのにじみを 小さくする必要がある。しかし,中性子強度は このビーム発散に比例するため,より良い画像 を得るためにビーム発散を小さくすると,中性 子強度が弱くなり,S/Nが悪くなるという問 題がある。

この問題点を改善するため、ピンホール数を 増やし、それぞれのピンホールから得られた画 像の重なりを、ピンホールの位置情報を元に解 くことで元の画像を得ようというコーデッドア パチャー (Coded Aperture)法が検討されてい る。この手法は、もともとX線天文学で用い られ、更には核医学でも利用されてきたもので ある。

この方法は、ソースの数を増やすものである ため、中性子強度を大きく改善できる可能性が あることから、さまざまな検討が行われてい る²¹⁾⁻²³⁾。現在のところ、ノイズに敏感なこの手 法は、自由にビーム発散を決定できる中性子ラ ジオグラフィ体系に対しては有効性を示せてい ない。ただし、フェイズコントラスト法のよう な限られた条件下では有効であるとしている²⁴⁾。

しかし、セキュリティの分野からまったく異 なる要求がある。核テロ対策として中性子源の 存在を探すために、イメージングとして捉える ことは、安全対策上有効な情報となる。この場 合、分解能よりも測定効率が優先されるため、 本手法に期待が寄せられている²⁵⁾。

7. その他

ここまで述べてきた以外にも、今後新たな展

開が期待できる新手法の開発が進められている。 その一つに回折格子を用いて結像系を構築する 方法がある。これは元来,放射光の物質透過中 の位相変化を捉えるために開発されたものであ る。これは、それまでX線では測定すること が困難であった生体中の軟構造体の状態を見事 に捉えることができる両期的なイメージング手 法である²⁶⁾。その手法をそのまま中性子に移植 しようという試みが行われており,実証実験に 成功している27)。中性子フェイズコントラスト 法はエッジ強調を目的としたものであり、境界 が不明確で位相が徐々に変化する対象物には効 果が小さい。それに対して、この手法は位相変 化をそのまま画像化するため,密度が連続的に 変化するような試料に対しても、位相情報を明 瞭にとらえた画像が得られることが特長である。

更に,放射光で大きな成果が得られている位 相イメージングと同様な手法として,Si単結 晶から切り出した干渉計を用いて,中性子波を 空間的に分離し,その一方に試料を通過させ, 更に他方の外乱のない波と干渉をさせることに より,試料が中性子波に及ぼした位相変化を画 像化する試みがある²⁸⁾。中性子源強度は放射光 に比較して格段に強度が弱いため,この方法を 中性子に適用するには,長時間に亘って試料位 置を極めて高精度に保つ必要がある。そのため, すぐに汎用的な利用を行うことは難しいと考え られる。

また,フランス・グルノーブルのラウエ・ラン ジュバン研究所 (Insitut Laue Langevin:ILL) の高中性子束炉でも,その世界最高の中性子強 度を活かして,新たな中性子イメージングの試 みが進められている²⁹⁾。その一つが,試料中か らの散乱線を捉え,散乱源の分布を測定しよう という試みである。この方法は中性子回折・散 乱との相性が良く,中性子散乱と従来のイメー ジングを繋ぐものである。中性子を用いて得ら れるすべての情報を利用しようという現在の大 きな流れの一環と見なすことができ,興味深い 試みである。

8. まとめ

連載講座の2回に亘って中性子イメージング の新しい方向性を概観した。もちろんここに述 べたことがすべてではなく,これら以外にも, 例えば偏極中性子の利用などは新しい可能性を 持っている。

国内の中性子イメージング研究環境は、これ までは JRR-3M を中心とした定常中性子源が主 であり、パルス源は電子線加速器を用いた比較 的中性子強度の弱いものであった。現在、茨城 県・東海村には J-PARC の建設が順調に進ん でおり、来年度には最初のビームが出る予定で ある。J-PARC への中性子イメージング装置の 設置が行われた場合、定常・パルスの両方を使 った測定が可能になり、これまでと質的に違っ た環境が整備されることになる。

中性子イメージングは,中性子の産業利用に 最も適したものの一つと見なされている。今後, 新しい手法の発展により,これまで観察するこ とができなかった情報を,より効率的に得るこ とが可能になり,更に応用が広がることが期待 されている。

文 献

- Treimer, W., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T111 (2006)
- Lehmann, E. H., Hassanein, R., Kühne, G., Vontobel, P. and Frei, G., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T121 (2006)
- 3) 例えば, Bücherl, T., Lierse von Gostomiski, Ch. and Osterloh, K., Rädl, Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T131 (2006)
- 例えば, Kardjilov, N., Hilger, A., Manke, I., Strobl, M., Treimer, W. and Banhart, J., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 16-21 (2005), Kühne, G., Frei, G., Lehmenn, E. and Vontobel, P., Nucl. In-

strum. Methods Phys. Res., A542, 264-270 (2005)

- Kiyanagi, Y., Mizukami, K., Kamiyama, T., Hiraga, F. and Iwasa, H., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 316-319 (2005)
- 6) Kiyanagi, Y., Sakamoto, N., Iwasa, H., Kamiyama, T., Hiraga, F., Sato, S., Sagehashi, H., Ino, T., Furusaka, M., Suzuki, J., Gorin, A., Manulov, I., Ryazantsev, A., Kuroda, K., Sakai, K., Tokanai, F., Miyasaka, H., Adachi, T., Oku, T., Ikedas, K., Suzuki, S., Morimoto, K. and Shimizu, H. M., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **52**, 371-374 (2005)
- McDonald Jr., T. E., Brun, T. O., Claytor, T. N., Farnum, E. H., Greene, G. L. and Morris, C., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A424, 235-241 (1999)
- Loveman, R., Bendahan, J., Gozani, T. and Stevenson, J., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B99, 765-768 (1995)
- Hall, J., Rusnak, B. and Fitsos, P., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T333 (2006)
- Kardjilov, N., Baechler, S., Bastürk, M., Dierick, M., Jolie, J., Lehmenn, E., Materna, T., Schillinger, B. and Vontobel, P., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A501, 536-546 (2003)
- Santisteban, J. R., Edwards, L., Fizpatrick, M. E., Steuwer, A. and Withers, P. J., *Appl. Phys.*, A74 [Suppl.], S1433-S1436 (2002)
- 12) Kockelmann, W., Santisteban, J. R., Frei, G., Lehmann, E. H. and Vontobel, P., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T113 (2006)
- 13) Kiyanagi, Y., Kamiyama, T., Nagata, T., Sakuma, K., Iwasa, H. and Hiraga, F., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T325 (2006)
- 14) Kamiyama, T., private communication
- Treimer, W., Strobl, M., Kardjilov, N., Hilger, A. and Manke, I., *Appl. Phys. Lett.*, 89, 203504 (2006)
- 16) Strobl, M., Treimer, W., Kardjilov, N., Hilger, A. and Manke, I., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T135 (2006)

- 17) Kamiyama, T., Ito, J., Noda, H., Iwasa, H., Kiyanagi, Y. and Ikeda, S., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A542, 258-263 (2005)
- 18) Stone, H. J., Tucker, M. G., Le Godec, Y., Méducin, F. M., Cope, E. R., Hayward, S. A., Ferlat, G. P. J., Marshall, W. G., Manolopoulos, S., Redfern, S. A. T. and Dove, M. T., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A547, 601-615 (2005)
- 19) Kamiyama, T., Sato, H., Miyamoto, N., Iwasa, H., Kiyanagi, Y. and Ikeda, S., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October16-19, NIST, Gaithersburg, USA, P023 (2006)
- 20) Tamaki, M., Iida, K., Mori, N., Lehmann, E., Vontobel, P. and Estermann, M., *Nucl. Instrum. Meth*ods Phys. Res., A542, 320-323 (2005)
- 21) 玉置昌義, RADIOISITOPES, 56, 417-429 (2007)
- 22) Grünauer, F., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A542, 342-352 (2005)
- 23) Damato, A., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T215 (2006)
- 24) Hussey, D. S., Jacobson, D. L., Coakley, K. J. and Arif, M., Proceedings (DVD) of 8th World Confer-

ence on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, P027 (2006)

- 25) Grünauer, F., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A566, 654-661 (2006)
- 26) Vanier, P. E., Dioszegi, I. and Forman, L., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T213 (2006)
- 27) Pfeiffer, F., Weitkamp, T., Bunk, O. and David, C., *Nature Phys.*, 2, 258-261 (2006)
- 28) Grünzweig, C., David, C., Pfeiffer, F., Bunk, O., Johnson, I., Frei, G., Kühne, G., Lehmenn, E. and Rønnow, H., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T112 (2006)
- 29) Pushin, D. A., Cory, D. G., Huber, M. G., Do, C. W., Jacobson, D. L. and Arif, M., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T212 (2006)
- 30) Ballhausen, H., Proceedings (DVD) of 8th World Conference on Neutron Radiography, October 16-19, NIST, Gaithersburg, USA, T315 (2006)