

「何ができる?どこがすごい?」～各装置の紹介～

パルス中性子エネルギー選択イメージング装置 ES-IMAGE†

鬼柳善明*

1. ES-IMAGEで何ができる?

本装置はパルス中性子源の特性を利用した中性子エネルギー選択型イメージング(Energy Selective Image)装置である。まだ建設が決まっていないので名称なども暫定である。これが、設置された時には、世界最高クラスの強度のパルス中性子を用いたイメージング装置となる。現在、中性子源特性測定装置 NOBORU(ビームライン10:BL10)などのビームラインを使用して開発実験が行われている。

パルス中性子を用いた透過撮影(ラジオグラフィ)によるイメージングでは、透過してくる中性子の到達時間(波長に比例)を画素毎に記録することによって、原子炉などの定常中性子源を用いたものと違って、エネルギー選択的な画像が一度の測定で取得できる。J-PARC 中性子源を用いることによって高エネルギー中性子から低エネルギー中性子までのエネルギー選択画像が得られる。この特徴を生かして次のようなことができる⁽¹⁾。

(1) エネルギー依存、即ち、コントラストの違う画像が一度にとれる。これは被写体物質の区別、同定を容易あるいは可能とする。

(2) 遅い中性子(波長で概ね0.2-0.6 nm)に対しては、中性子断面積に特徴的なブラッグエッジが表れる。このエッジはブラッグの式、 $n\lambda = 2d \sin \theta$ でブラッグ角が90度に対応する。このエッジ付近の強度や形から相転移や結晶成長画像を、また、定量的に解析することによって結晶子の向きなどの情報を得ることができる。さらに、高波長分解能測定を行えば、 d の微小変化を調べることによって歪み分布を得ることができる⁽²⁾。

(3) 中性子エネルギーが高い所では、特定のエネルギーで中性子の吸収が強くなる共鳴吸収が中性子断面積に表れる。共鳴吸収エネルギーは核種毎に異なり、また、その幅は温度とともに広がる。これらの情報を解析することによって温度

分布、核種分布を得ることができる。

(4) 位相コントラストによるエッジを強調したイメージの測定や偏極中性子による磁気イメージングなどが行い易い。

本装置は、また、準備研究が進められている段階であり、被写体試料に対する特殊環境などについては整備されていない。被写体の大きさ、また可能な測定は使用できる検出器によるので、検出器について紹介しておく。高計数率で測定ができるものとして、空間分解能が2.2 mm 角で $8 \times 8 = 64$ ピクセル(有効エリア:18 mm \times 18 mm)と3 mm 角で $16 \times 16 = 256$ ピクセル(有効エリア:48 mm \times 48 mm)の二種類の検出器がある。これよりは計数率が劣るが空間分解能が0.8 mm 角程度で有効エリアが10 cm \times 10 cmの検出器がある。また、波長分解能は劣るが、空間分解能が0.1 mmを切るイメージインテンシファイア検出器も利用可能となる予定である。波長依存イメージはとれないがイメージングプレートを用いた撮影も可能である。

2. ES-IMAGE はどこがすごい?

エネルギー選別型では、画素ごとにエネルギー依存の中性子透過率がえられるため、それを利用して様々の情報が得られるのが、これまでの定常中性子源を用いたイメージングと異なるところである。

図1は屈曲した鉄を元に戻したサンプルである。これを使って模擬実験を行った。図2は位置によって変化する中性子断面積を示している。屈曲部から離れたところでは、ブラッグエッジから短波長側で丸みを帯びた形となっていて、近づくにつれてエッジ近辺が鋭くなって行くという傾向を持っている。これは、結晶子の向きの分布に依存していると考えられ、鋭くなる方が結晶は等方的になっている。図3は結晶子向きの異方性を分布として示したものである。また、図4はブラッグエッジの位置の変化から結晶面の歪みを求めたものである。厚さ方向の平均の値になるが、一度に広い面積につ

* 北海道大学大学院工学研究科; 教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Energy Selective Imaging by Using a Pulsed Neutron Source; Yoshiaki Kiyonagi (Division of Quantum Beam Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo)

Keywords: energy selective imaging, neutron cross section, Bragg edge, crystal structure, texture, preferred orientation, spatial distribution

† 略称は今後、変更の可能性有り。

2009年2月26日受理

いて分布を得ることができるのが本手法の大きな特徴である。残留応力測定は中性子回折を用いて行われているが、本手法によって歪み分布を広い範囲で測定し、詳細測定を行う位置を事前に決定することは、測定の効率アップに非常に役立つものと考えられる。

J-PARCでは高強度のパルス中性子源の特徴を生かすことで、エネルギー選択イメージングが高分解能、ハイスピードで実施できるようになる。物質の中性子断面積の特性を利用することによって、現在考えられていないような応用も出現する可能性もある。被写体内部の物質形状だけでなく、材料の内部組織のトモグラフィー測定も可能になっていくものと期待される。

ES-IMAGEに対応する既設の装置はどこにもない。その



図1 鉄サンプルの写真。

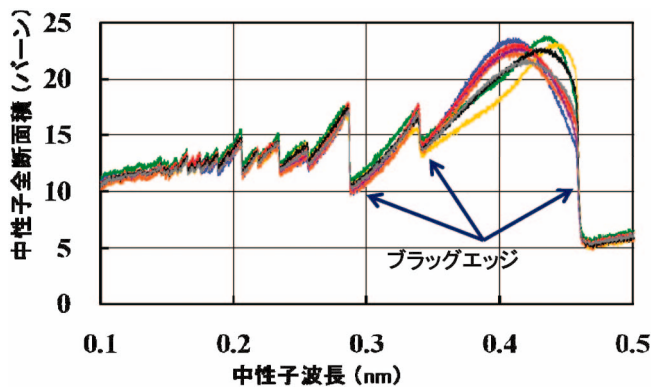


図2 場所による中性子断面積の変化。

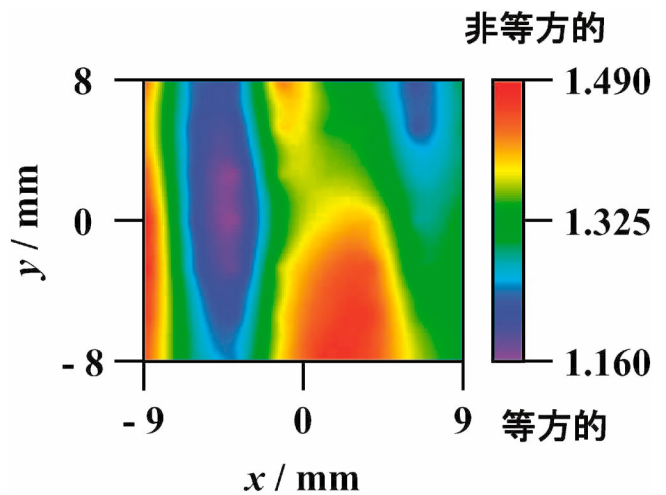


図3 鉄内の結晶子の向きの分布。

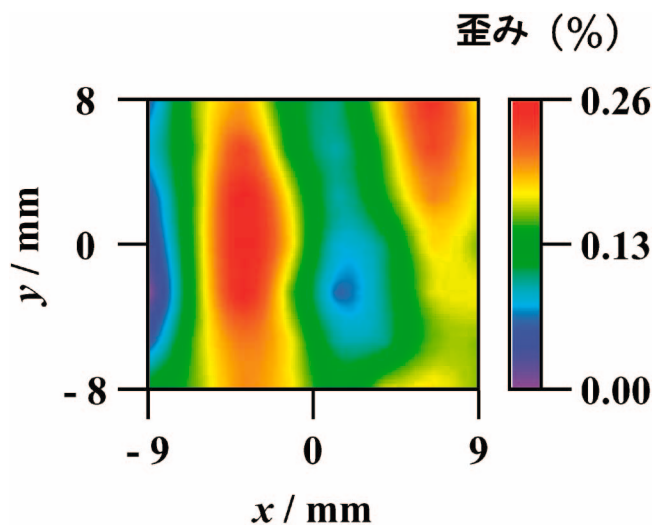


図4 結晶歪み $\delta d/d$ の分布。

表1 ES-IMAGEで何ができる? どこがすごい?

	JRR-3 TNRF	J-PARC ES-IMSGE
測定対象 測定領域	中性子透過イメージ 熱中性子領域	中性子透過イメージ 冷中性子から高速中性子
中性子波長(またはエネルギー)および試料位置でのフラックス	0.025 eV 付近をピークとする熱中性子領域 $1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$	0.0006 eV~約 1 keV 上限エネルギーは未確定 $4.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ at 1 MW 波長分解能は約0.3%
得られる情報	高位置分解能の熱中性子透過画像	エネルギー選択イメージ, コントラストの違う画像の一挙取得, 結晶組織情報, 核種分布, 温度分布など
対象研究分野	工業機器, 材料, 植物, 考古学関連のものなど	同左
試料サイズ	400 mm × 400 mm × 500 mm	概ね100 mm × 100 mm, 厚さは試料による。
測定時間	数秒から数分(対象物と測定内容に依存)	数分から数時間@1 MW(対象物と測定内容に依存)
装置特徴	コリメーター比(L/D): 176(水平)・153(鉛直) ビームサイズ: 255 mm(水平) × 305 mm(鉛直)	コリメーター比(L/D): 140(水平・鉛直)最大コリメーター開口時. コリメーターによって調整可能 ビームサイズ: 100 mm × 100 mm が最大で可変
装置稼働状況	年間160日程度稼働(年によって変動)	年間110日程度(年によって変動)

ため、対等な比較検討ができないが、JRR-3の熱中性子ラジオグラフィー施設(TNRF)をモデルにして比較してみた。表1にそれをまとめている。

3. ES-IMAGE を活用するために

エネルギー選択型イメージングは、J-PARCでの本格的稼働を目指して、現在は中性子源特性試験装置NOBORU⁽³⁾で実験が進められている。そこで実験を行うためには、J-PARCの課題申請を行う必要がある。行いたい実験が実施可能かどうかについては、事前に著者かあるいはNOBORU担当者にお問い合わせ頂きたい。

パルス中性子を用いたエネルギー選択イメージングは、最近本格的に開発されてきた手法であり、北大加速器中性子源

とイギリスのパルス中性子源で行われているだけである。今後はアメリカの大型中性子源SNSなどでも設置されることが予定されている。手法に関連した文献は、(1)(2)であり、(3)はNOBORUに関するURLである。

文 献

- (1) Y. Kiyonagi, T. Kamiyama, H. Iwasa and F. Hiraga: *Key Engineering Materials*, **270-273**(2004), 1371-1375. パルス中性子を利用したイメージング法に関する論文.
- (2) J. R. Santisteban, L. Edwards, A. Steuwer and P. J. Withers, *J. Appl. Cryst.* **34**(2001), 289. パルス中性子透過を用いたブラッグエッジ解析による面間隔導出に関する論文.
- (3) <http://j-parc.jp/MatLife/ja/instrumentation/bl10/bl10.html>: 中性子源特性試験装置NOBORUの説明