



PRESS RELEASE

2025 年 1 月 20 日 理化学研究所 東北大学

世界最高精度の分解能を持つ中性子イメージング手法開発

一水素・リチウム・ホウ素を含む製品の精密非破壊検査に期待-

概要

理化学研究所(理研)開拓研究本部齋藤高エネルギー原子核研究室の齋藤武彦 主任研究員、アブドゥル・ムニーム国際プログラム・アソシエイト(研究当時、 現光量子工学研究センター中性子ビーム技術開発チーム特別研究員)、東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センターの吉田純也准教授らの国際 共同研究グループは、1マイクロメートル(µm、1µmは1,000分の1ミリメー トル)よりも精細な世界最高精度の分解能を持つ中性子イメージング手法を開 発しました。

本研究成果は、X線では可視化が困難だった水素^[1]、リチウム^[2]、ホウ素^[3]を 含む製品の精密非破壊検査に貢献すると期待されます。

今回、国際共同研究グループは、高い空間分解能を持つ荷電粒子飛跡検出技術 を中性子イメージングに応用し、炭化ホウ素薄膜と蛍光飛跡検出器を組み合わ せた中性子検出器を開発しました。この検出器の分解能を定量的に評価したと ころ、中性子イメージングデバイスの中で世界最高精度でした。

本研究は、科学雑誌『Scientific Reports』オンライン版(1 月 24 日付:日本 時間 1 月 24 日)に掲載されます。



開発した中性子イメージング手法の模式図



背景

物体を壊さずにその内部を可視化する非破壊検査技術は、現代の工業製品の 開発や品質管理に欠かせません。先端的で微細な構造を持つ製品の非破壊検査 には、光学顕微鏡に匹敵するマイクロメートルスケールのイメージング分解能 が求められています。非破壊検査の代表的な手法が X 線透過イメージング(つ まりレントゲン撮影)です。しかしこの方法は、物質中の電子によって X 線が 吸収された影を見るものであり、例えば水素、リチウム、ホウ素といった軽元素 の密度コントラストの低い構造を可視化するのは困難です。これらの元素はそ れぞれ、水素エネルギー、リチウム二次電池、超伝導ワイヤーといった将来の社 会のエネルギーを支える製品に使われており、X 線と相補的な非破壊検査の手 法が求められています。

そこで注目されているのが中性子ビームです。中性子は陽子とともに原子核 を構成する粒子の一つで、電荷がゼロ、単独では 10 分程度の半減期で壊変する といった特徴があります。中性子を原子核から分離して低速の中性子ビーム^[4]を 作り、これを物質に照射すると、水素、リチウム 6、ホウ素 10 といった特定の 原子核によって比較的よく散乱・吸収されます。この性質を利用して、これらの 元素の物体中での空間的分布を透過中性子イメージング^[5]で可視化します。

中性子イメージングの精細化にはいくつかの課題がありました。中性子は電荷を持っておらずそのままでは検出が困難なので、中性子を吸収しやすい原子核に吸収させ、その際に放出される荷電粒子(娘核)を検出に用います。このとき、中性子ビームが照射されている環境下ではγ線やβ線といった放射線が発生するので、使用する検出器はこれら放射線のノイズと中性子のシグナルを区別できる必要があります。また中性子ビームは可視光線ほど容易に屈折させたり反射させたりすることができません。そこで中性子イメージングの先行研究では、中性子吸収事象が発生すると光を発するシンチレータの板を用い、その発光点を光学的にレンズで拡大して CMOS カメラで撮影するという手法が用いられました。この方式の中性子イメージングで最も良い空間分解能は約 2μm でした。

一方、国際共同研究グループは、先行研究とは異なるアプローチで精細化を狙いました。

研究手法と成果

国際共同研究グループは、炭化ホウ素薄膜と蛍光飛跡検出器を組み合わせた 中性子イメージングデバイスを開発しました。この手法は、国際共同研究グルー プが原子核物理学のために培った高精細な荷電粒子飛跡検出技術を、中性子イ メージングに応用したものです(図1)。









図1 炭化ホウ素薄膜と蛍光飛跡検出器を組み合わせた中性子イメージングデバイス

左:画面中央で黒く見えるものが炭化ホウ素薄膜で、シリコン基板の表面に形成してある。その上に黄色の四角に見えるものが蛍光飛跡検出器。縦4mm、横8mm、厚さ0.5mm。

右:炭化ホウ素薄膜と蛍光飛跡検出器を密着させてラミネートフィルムに包み、真空パックして作製した 中性子イメージングデバイス。中性子ビームはこの写真で奥から手前の方向に照射する。実験後にパック を開封し、蛍光飛跡検出器を共焦点レーザー顕微鏡で読み出す。

この手法の特徴の一つは、中性子から娘核への転換部に炭化ホウ素(B₄C)の 薄膜を利用したことです。この膜は厚さ230ナノメートル(nm、1nmは10億 分の1メートル)でホウ素10原子核を濃縮してあり、低速中性子を吸収すると 「¹⁰B+n→⁷Li+α」の反応によって二つの娘核を放出します。これらは互いに正反 対の方向に放出され、検出器に入射したどちらか一方が検出されます。

もう一つの特徴は、蛍光飛跡検出器を利用したことです。今回使用した蛍光飛 跡検出器は、アルミナ(Al₂O₃)を主成分とする単結晶でできており、荷電粒子 がその内部を通過すると粒子の通過の痕跡が残ります。これを共焦点レーザー 顕微鏡と呼ばれる顕微鏡下で、赤いレーザー光を当てると、荷電粒子が通過した 箇所から赤外線が放出されます。この赤外線を読み取ることで飛跡の像が得ら れます。読み出しに、例えば 40 倍の倍率の対物レンズを使い、約 106µm 四方 の領域を約 1,000 画素(ピクセル)の分解能で読み出せば、約 0.1µm の空間分 解能で飛跡を測定できます。なお、この蛍光飛跡検出器は γ 線や β 線といった 環境放射線に対する感度は低い一方、娘核の飛跡は一本一本個別に可視化する ことができます。蛍光飛跡検出器はこれまで荷電粒子検出器として利用されて きましたが、炭化ホウ素の薄膜と組み合わせて中性子イメージングに利用した 例は今回が初めてです。

国際共同研究グループは、開発した中性子イメージングデバイスの性能を評価するため、9µmの周期構造を持つガドリニウムの格子^[6]を使いました。ガドリニウムには天然元素中で中性子を最もよく吸収するガドリニウム 157 原子核が含まれており、この元素で作った物体に中性子ビームを当てると高いコントラストで影が生じます。このガドリニウムの格子は入手可能なガドリニウム製の被写体の中で最も微細な構造を持つ物体だったことから、本中性子イメージング手法のイメージング分解能の評価に用いました。実験は茨城県東海村の実験施設 J-PARC にある物質・生命科学実験施設で行いました。中性子ビームをガドリニウムの格子に照射し、その隙間を通過してできた縞(しま)状の中性子の





模様を、開発した中性イメージングデバイスに記録しました。

図2は、実験に用いた蛍光飛跡検出器を共焦点レーザー顕微鏡下で読み出し て得られた画像です。ここでは期待通りにガドリニウム格子によってつくられ た周期9µmの縞模様が確認できました。暗い帯状の部分がガドリニウムによっ て中性子が遮られた部分で、明るい部分が中性子吸収事象から放出された娘核 の飛跡が記録されている部分です。



図2 共焦点レーザー顕微鏡で撮影した格子の透過中性子イメージ

ガドリニウム格子を透過した中性子ビームの作った縞模様。明るい帯状の部分は中性子吸収事象から放出 された娘核の飛跡が記録されている部分で、暗い部分は中性子が遮られた部分。縞模様の周期はガドリニ ウム格子と同じ 9μm。視野のサイズは約 106μm 四方。照明光は波長 640nm の赤い光で、荷電粒子の影響 を受けた箇所から放出される 750nm の赤外線を検出して画像化した。

国際共同研究グループは、開発した中性子イメージングデバイスの分解能を 評価するため、この縞模様の縁の鮮明さを評価しました(図 3)。得られた画像 の輝度を、縞と平行な方向に射影すると、山と谷が交互に繰り返されるグラフが 得られます。画像の明るい部分がグラフの山に、暗い部分が谷に対応します。こ の山と谷の間の斜面がどれだけ急であるかを定量的に評価することで、得られ た画像の鮮明さの指標としました。ここでは、本手法のイメージング分解能を他 の手法と比較できるように以下の2 通りの指標を用いました。一つ目の指標は 輝度が 10%から 90%に至るまでの距離で、その平均値は 2.27±0.02µm と算出 されました。二つ目の指標は画像の縁のぼけ方が正規分布的だとしたときの標 準偏差に相当する距離で、0.887±0.009µm と算出されました。この値は、これ までに報告されていた最も良い空間分解能である約 2µm よりも小さく、本中性 子イメージングデバイスの空間分解能が世界最高精度であることが示されまし た。









図3 縞模様の縁の鮮明さでイメージング分解能の性能を求めた解析

ガドリニウム格子を透過した中性子ビームの縞模様の画像の輝度を、縞と平行な方向に射影し、山と谷が 交互に繰り返されるグラフを得る。画像の明るい部分がグラフの山に、暗い部分が谷に対応する。この山 と谷の間の斜面がどれだけ急であるかを定量的に評価した。この画像の赤枠で示した場所では、斜面の距 離は 2.66±0.67μm と算出された。この解析を得られた 543 組全ての縞に対して行った上で、イメージン グ分解能を 2 通りの指標で算出した。一つ目の指標は斜面の 10%から 90%の高さに至るまでの距離で、 その平均値は 2.27±0.02μm と算出された。また二つ目の指標は縞の縁のぼけ方が正規分布的だとしたと きの標準偏差を表す値で、0.887±0.009μm と算出された。

今後の期待

今回の研究で、炭化ホウ素薄膜と蛍光飛跡検出器を組み合わせたデバイスに よって、1µm を下回る空間分解能の中性子イメージングが実現できることが明 らかになりました。国際共同研究グループは今後、この手法の実用化に向けた研 究を進めていきます。具体的には、デバイスの大面積化、顕微鏡による読み出し の高速化、どこまで高密度に飛跡を記録できるかの検出器の応答の評価、飛跡の 消去⁷⁷法の確立などです。

本中性子イメージングデバイスは、水素、リチウム、ホウ素といった軽元素を 含む製品の精密非破壊検査に応用されることが期待されます。これらの元素は、 将来の社会のエネルギーを支える重要な製品に用いられている一方、X線によ る非破壊検査が困難です。そこで今後の開発によって精細な中性子イメージン グが実現すれば、非破壊検査を通じてこれらの製品の開発や改良に貢献できる と考えられます。

また理研では、RANS(ランズ)^[8]と呼ばれる小型中性子源の開発・運用も行っています。国際共同研究グループは、RANSの研究チームとも連携し、将来的に小型中性子源を用いた中性子イメージングへの応用も見据え、中性子源から 画像処理までを包括した中性子イメージング技術の開発を行う予定です。







論文情報

<タイトル>

Advancing Neutron Imaging Techniques to Highest Resolution with Fluorescent Nuclear Track Detectors

く著者名>

Abdul Muneem, Junya Yoshida, Takehiko R. Saito, Hiroyuki Ekawa, Masahiro Hino, Katsuya Hirota, Go Ichikawa, Ayumi Kasagi, Masaaki Kitaguchi, Kenji Mishima, Jameel-Un Nabi, and Manami Nakagawa

<雑誌>

Scientific Reports

<DOI>

10.1038/s41598-024-84591-x

補足説明

[1] 水素

原子番号1の元素。燃焼させて熱を発生させたり、燃料電池を用いて電気を発生させたり、一時的に余剰になった電気エネルギーの貯蔵に使われたりするなど、将来のエネルギー戦略上の重要な物質として位置付けられている。中性子を散乱しやすい。

[2] リチウム

原子番号3の元素。携帯電話やノート PC などの電源として広く普及しているリチウムイオン二次電池に利用されている。天然のリチウム中に約7.5%含まれるリチウム 6原子核が中性子を比較的よく吸収する。

[3] ホウ素

原子番号5の元素。39 ケルビン(K:絶対温度の単位)という比較的高い温度でも超 伝導を示すニホウ化マグネシウムに使われており、この物質は電力損失のない超伝導 ケーブルの素材の候補とされている。天然のホウ素中に約20%含まれるホウ素10原 子核が中性子を比較的よく吸収する。

[4] 低速の中性子ビーム

中性子源から放出される中性子の流れを中性子ビームと呼ぶ。もし中性子源が常温で 熱平衡に達している場合、放出される中性子の平均速度は約2,200m 毎秒となり、こ れを熱中性子ビームと呼ぶ。熱中性子ビームを基準として低速の中性子ビームは冷中 性子ビーム(平均速度は100m 毎秒程度)と呼ぶ。中性子は速度に反比例して原子核 に吸収されやすくなるので、透過中性子イメージング([5]参照)には熱・冷中性子ビ ームを用いるのが効果的である。

[5] 透過中性子イメージング

物体に中性子ビームを照射し、透過してきた中性子を検出することで、物体内部にある中性子を吸収しやすい物質の分布を非破壊で可視化する手法。

[6] ガドリニウムの格子





中性子を吸収しやすいガドリニウムを格子状に配置したもので、今回はガドリニウム を約 5µm の幅で 9µm 周期で並べたものを用いている。元は中性子位相イメージング のために開発されたものだが、入手可能なガドリニウム製品の中で最も微細な構造を 持つことから、今回のイメージング分解能の評価に利用した。このガドリニウム格子 は斜め蒸着法と呼ばれる精密加工によって作製されたが、その形状は完全な長方形で はないので、得られた画像のぼけは検出器のイメージング分解能とともに、ガドリニ ウム格子の角の鈍りの影響も含まれる。

[7] 飛跡の消去

本研究で使用した蛍光飛跡検出器は、紫外線レーザーを照射することで飛跡を消去し 再利用ができる。国際共同研究グループは独自の紫外線レーザー照射システムを構築 し、α線飛跡を100µm四方に1万本の高密度で記録した状態でも紫外線レーザーに よって飛跡が消去できること、飛跡と消去のサイクルを少なくとも7回繰り返しても 検出器が再利用できることを実証した^{注)}。

[8] RANS(ランズ)

理研で開発された小型中性子源システム。加速器によって加速した陽子線を標的に照 射し、原子核を破砕することで中性子ビームを生成する。RANS は RIKEN acceleratordriven compact neutron systems の略。

注) Abdul Muneem, Junya Yoshida, Hiroyuki Ekawa, Masahiro Hino, Katsuya Hirota, Go Ichikawa, Ayumi Kasagi, Masaaki Kitaguchi, Satoshi Kodaira, Kenji Mishima, Jameel-Un Nabi, Manami Nakagawa, Michio Sakashita, Norihito Saito, Takehiko R. Saito, Satoshi Wada, Nakahiro Yasuda,Study on the reusability of fluorescent nuclear track detectors using optical bleaching, *Radiation Measurements*, Volume 158,2022

国際共同研究グループ

理化学研究所 開拓研究本部 齋藤高エネルギー原子核研究室 基礎科学特別研究員(研究当時、現 特別研究員) 江川弘行(エカワ・ヒロユキ) 大学院生リサーチ・アソシエイト(研究当時、現 客員研究員) 笠置 歩(カサギ・アユミ) 齋藤武彦(サイトウ・タケヒコ) 主任研究員 中川真菜美(ナカガワ・マナミ) 基礎科学特別研究員(研究当時) 国際プログラム・アソシエイト(研究当時) アブドゥル・ムニーム(Abdul Muneem) (現 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム 特別研究員) 東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター 吉田純也(ヨシダ・ジュンヤ) 准教授 (東北大学 大学院理学研究科 助教(研究当時)、 理研 開拓研究本部 齋藤高エネルギー原子核研究室 客員研究員(研究当時)) 京都大学 複合原子力科学研究所 日野正裕(ヒノ・マサヒロ) 教授

高エネルギー加速器研究機構







外部連携推進部 特任上席 URA 物質構造科学研究所 研究員 特別准教授(研究当時)

広田克也(ヒロタ・カツヤ)

市川 豪(イチカワ・ゴウ) 三島賢二(ミシマ・ケンジ)

名古屋大学 大学院理学研究科・名古屋大学 現象解析研究センター 准教授 北口雅暁(キタグチ・マサアキ)

University of Wah(パキスタン) 教授

ジャミールアン・ナビ(Jameel-Un Nabi)

研究支援

本研究グループのメンバーである吉田准教授は、日本学術振興会(JSPS)科学研究 費助成事業新学術領域研究(研究領域提案型)「ストレンジ・ハドロンクラスターで探 る物質の階層構造(研究代表者:田村裕和)」の助成を受けました。

発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。 理化学研究所 開拓研究本部 齋藤高エネルギー原子核研究室

主任研究員 齋藤武彦(サイトウ・タケヒコ)
国際プログラム・アソシエイト(研究当時)
アブドゥル・ムニーム(Abdul Muneem)
(現 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム 特別研究員)

東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター 准教授 吉田純也(ヨシダ・ジュンヤ)



齋藤武彦



アブドゥル・ ムニーム



吉田純也







<機関窓口> 理化学研究所 広報室 報道担当 Tel: 050-3495-0247 Email: ex-press [at] ml.riken.jp

東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター 総務係 Tel: 022-752-2331 Email: sris-soumu [at] grp.tohoku.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。

