

世界最高分解能・透過型中性子イメージングの確立と今後の展望



齋藤 武彦*¹
Saito R. Takehiko



吉田 純也*²
Yoshida Jun'ya



アブドウルムニーム*¹
Abdul Muneem

1 はじめに——透過型中性子イメージングの高分解能化が切り拓くもの

非破壊で内部構造を可視化する透過イメージングは、材料・デバイス開発の広い領域で不可欠な計測手段となっている。とりわけ透過型中性子イメージングは、X線では捉えにくい水素・リチウム・ホウ素等、軽元素の分布が重元素材料内部であっても透過像として可視化できる場合があるので、X線と相補的な情報を与える点で大きな価値を有する。一方で、透過型中性子イメージングを微細構造解析へ本格的に拡張するうえで長年の障壁となってきたのが空間分解能である。一般的なシンチレータと光学撮像を組み合わせた方式では空間分解能が数 μm 程度に制約され、2 μm 級が到達点の1つとして報告されてきた（詳細は後述の *Scientific Reports* 誌論文¹参照）。つまり、従来の枠組みのままでは、50 μm 程度のスケールからサブ μm 領域までを連続的にカバーする確立された手法は限られており、透過型中性子イメージングの高分解能化は挑戦的課題として残っていた。

更に、 μm 領域の高分解能化は、薄膜シンチレータや高倍率光学系、単一中性子吸収事象のイベント検出と再構成、更には中性子光学系等、検出器・光学・解析を統合した特殊な構成を要する場合が多い。その結果、装置は高価かつ複雑になりやすく、産業応用を見据えた汎用的な実装は必ずしも容易ではない。こうした背景から、よりコンパクトで再現性の

高い中性子検出器を用いて高分解能イメージングを実現することが強く望まれてきた。

本稿では、 ^{10}B の中性子吸収反応と、そこで発生する荷電粒子飛跡の精密測定に基づく高分解能中性子イメージング技術について述べる。特に、微粒子原子核乾板を用いたサブ μm 分解能の実証と、蛍光飛跡検出器（Fluorescent Nuclear Track Detector、以下FNTD）を用いた世界最高分解能の更新、及び再利用可能化に至る技術的経緯を整理し、今後の展開を示す。中心成果は *Scientific Reports* 誌の原著論文に基づき¹、概要は理化学研究所のプレスリリースでも解説されている²。

2 ^{10}B 吸収反応に基づく飛跡検出型中性子イメージングと高分解能化への道筋

透過型中性子イメージングの分解能をサブ μm 領域へ押し上げるうえで重要なのは、検出器内部で生じる中性子反応点をどこまで精密に決定できるか、という点である。本研究では、 ^{10}B の中性子吸収反応 $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + ^4\text{He}$ を利用する（図1）。 ^{10}B が中性子を吸収すると、 ^4He と ^7Li の荷電粒子が発生する。これらの荷電粒子飛跡を精密に記録し、その起点を再構成すれば、中性子が吸収された位置、すなわち中性子入射位置を高精度に推定できる。この考え方では、 ^{10}B を含むコンバータ薄膜と荷電粒子飛跡を高精度で記録できる媒体を密着させることが本質となる。中性子反応点の空間情報は荷電粒子飛跡として保存されるため、従来のシンチレータ方式に

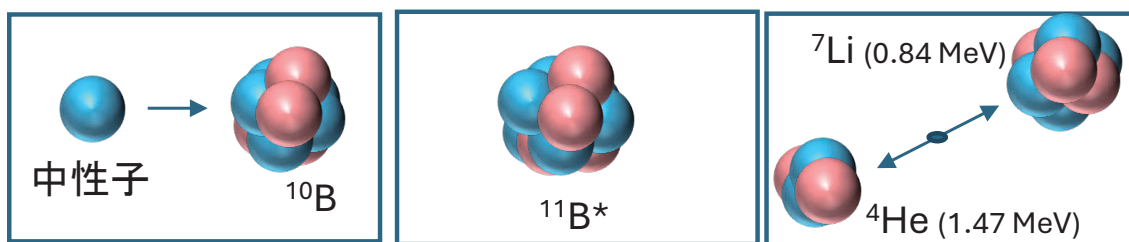


図1 ^{10}B 中性子吸収反応と生成粒子 (^4He , ^7Li)

特有の光拡散や結像光学の制約から独立に、分解能の極限を押し上げられる可能性がある。

このコンセプトは新しいものではなく、先行研究として広田らが微粒子原子核乾板と ^{10}B 薄膜を組み合わせた中性子検出器を用い、クオーツチップ内部に配置された直径 $30\ \mu\text{m}$ の金ワイヤーを観測することに成功している³⁾。しかし、この先行研究ではイメージング分解能を定量的に議論するための体系的な評価は十分に行われていなかった。

そこで筆者らは、広田らと同じコンセプトの中性子検出器（微粒子原子核乾板と ^{10}B 薄膜を組み合わせた検出器）を、広田らを共同研究者として含む体制で作製し、分解能を定量的に評価することに取り組んだ。具体的には、J-PARC Materials and Life Science Experimental Facility（以下 MLF）のビームライン 5（BL05）において、 $9\ \mu\text{m}$ ピッチのガドリニウム（Gd）グレーティングを対象に透過型中性子イメージングを実施し、得られた像から空間分解能を定量評価した。その結果、微粒子原子核乾板を用いたこの検出器により、サブ μm 分解能の中性子イメージングが可能であることを示した⁴⁾。一方、微粒子原子核乾板及び原子核乾板は化学現象が必要で再利用できず、運用上の制約が残るため、分解能を維持・向上しつつ実用性を備える方式、とりわけ再利用可能な飛跡検出媒体への転換が次の課題となった。

3 FNTD と ^{10}B 薄膜の組合せ——世界最高分解能の更新と再利用可能化

前記の課題を解決するうえで鍵となったのが、FNTD である。FNTD は荷電粒子飛跡を固体素子中に記録し、その情報を光学的に読み出せる検出媒体であり、適切な条件で飛跡情報を消去して再利用できる可能性を持つ。実はこの FNTD との出会いには、筆者の 1 人（齋藤）の個人的な記憶が関係している。齋藤がドイツの GSI の研究者だった 2016 年、中国・

蘭州にある近代物理学研究所を訪問し、重粒子線を用いたがん治療研究を行う研究者と雑談する機会があった。荷電粒子飛跡の精密測定が話題となり、原子核乾板の議論に及んだ際、彼が原子核乾板と同じように荷電粒子飛跡を記録でき、しかも飛跡を消せる物質があると話した。しかし、彼はその場では物質名を思い出せず、後日齋藤に届いたメールには 1 行だけ FNTD と記されていた。当時はその意味を深追いしなかったが、微粒子原子核乾板でサブ μm 分解能に到達した後、再利用可能な飛跡媒体の必要性が決定的になったとき、このメールの記憶が蘇った。齋藤は当時のメールを掘り出して FNTD について調査を開始し、FNTD 素子をランダウア社から購入し、 ^{10}B 薄膜と組み合わせた中性子検出器の開発に着手した。

FNTD は酸化アルミニウム単結晶に基づく飛跡検出器であり、荷電粒子が結晶中に形成する蛍光中心を共焦点レーザー走査顕微鏡等で 3 次元的に読み出すことができる¹⁾。筆者らは ^{10}B を含む四炭化ホウ素薄膜 ($^{10}\text{B}_4\text{C}$) を中性子コンバータとして形成し、FNTD と密着させた検出器を開発した（図 2）。この検出器を用い、同じく J-PARC MLF BL05 にて、 $9\ \mu\text{m}$ ピッチのガドリニウム（Gd）グレーティングを対象に透過型中性子イメージングを実施した。照射後に FNTD 内の飛跡を読み出すことで、グレーティング構造を明瞭に解像できることを示した（図 3）¹⁾。分解能はエッジの 10~90% 応答長 L （10~90%）を指標とし、台形フィットにより統計的に評価した結果、 $0.887 \pm 0.009\ \mu\text{m}$ (1σ) を得た¹⁾。これは微粒子原子核乾板方式 ($0.945\ \mu\text{m}$) を上回り、透過型中性子イメージングとして世界最高分解能を更新するものである¹⁾。

FNTD 方式の技術的意義は、分解能更新に加え、化学現象が不要である点、そして適切な処理により再利用可能である点にある。一方で課題として、現

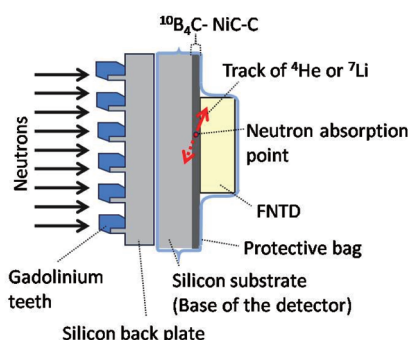


図2 FNTDと¹⁰B薄膜を用いた検出器構造の模式図（ガドリニウム（Gd）グレーティング（teeth）を含む）

時点では共焦点レーザー走査顕微鏡による読み出しが必要であり、測定スループット（撮像速度）が実装へ向けた鍵となる。原著論文でも高速スキャナの開発が重要であることが指摘されている¹⁾。この点について筆者らは、読み出し高速化に向けて企業との共同開発も進めている。

再利用可能化に関しては、FNTDに記録された蛍光中心が熱処理又は光学的ブリーチングにより低減できることに基づく。既知の手法としては650℃以上の高温による熱ブリーチング、及び紫外レーザーを用いた光学ブリーチングがある⁵⁾。筆者らは過去に詳細が研究されていなかった光学的ブリーチング装置を構築し、ブリーチング回数に伴うS/N比（Signal-to-Noise Ratio）の変化を系統的に調べ、再利用可能性を示した⁵⁾。実運用の観点では高温による熱ブリーチングの方が取扱いが容易で、1度に多くのFNTDを処理できるため、筆者らも高温ブリーチングを実際に用いている。現在、高温ブリーチングを繰り返した場合にS/N比がどのように変化していくか、再利用回数の上限や支配要因が何かについて研究を進めている。

4 今後の展望と小型中性子源での実施に向けた技術課題

FNTDと¹⁰B薄膜を組み合わせた本手法は、軽元素（水素、リチウム、ホウ素）を含む材料・デバイスの内部微細構造を、透過像として直接議論できる可能性を開く。現時点で筆者らが想定している展開先は、例えば、リチウム全固体バッテリーの構造分析、半導体（特にホウ素を含むP型半導体）の構造分析、超伝導体ワイヤー（特にホウ素を含むマグ

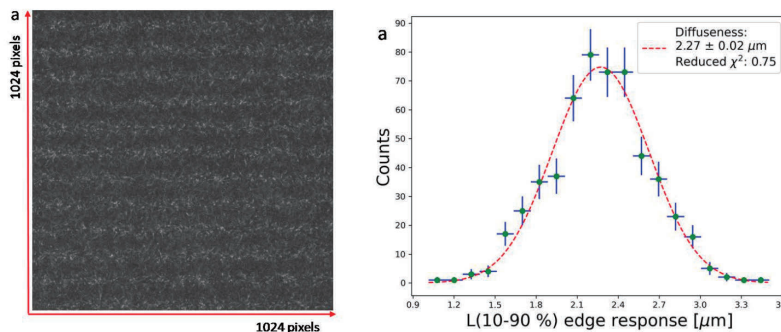


図3 FNTD飛跡像とL(10-90%) edge response 分布

ガウシアンフィッティングにより空間分解能である $0.887 \pm 0.009 \mu\text{m}$ (1σ) が導き出された

ネシウムジボライド (MgB_2) の品質検査、水素吸蔵合金中の水素の微細分布の可視化、小生物中の水分分布の観察等である。

これらの応用を現実の計測へつなげるうえで、筆者らが特に重視しているのが、理研の中性子源RANSのような小型中性子源での精密中性子イメージングの実施である。小型中性子源は柔軟な運用やアプリケーション指向の実験設計が可能であり、応用展開の観点から魅力が大きい。一方で小型中性子源ではバックグラウンドとなるX線やγ線等が相対的に高くなり得る。最近の筆者らの実験的検討から、FNTDは高バックグラウンド環境下で電子-正孔対が大量に生成され、信号が飽和することで、¹⁰B吸収反応由来の荷電粒子飛跡への感度が低下し得ることが分かってきた。この問題に対しては、FNTDを含む検出器を遮蔽体で十分に覆うことが1つの方策となるが、遮蔽体の配置は測定系の幾何学を制約し得るため、分解能を維持しつつ最適化する設計指針が必要となる。これらの課題を解決できれば、小型中性子源での精密中性子イメージングが現実のものとなり、応用展開を大きく押し広げることができる。

参考文献

- 1) Abdul Muneem., *et al.*, *Scientific Reports* **15**, 2103 (2025)
- 2) 理化学研究所プレスリリース「世界最高精度の透過型中性子イメージングを実現」2025-01-24. https://www.riken.jp/press/2025/20250124_2/index.html
- 3) K. Hirota., *et al.*, *Journal of Imaging*, **7**, (4) (2021)
- 4) Abdul Muneem., *et al.*, *Journal of Applied Physics*, **133**, 054902 (2023)
- 5) Abdul Muneem., *et al.*, *Radiation Measurements*, **158**, 106863 (2022)

(*¹ 理化学研究所, *² 東北大学)