

三次元組織解析の最前線 後編

中性子イメージングによる3次元可視化技術

篠原武尚*

1. はじめに

中性子イメージングは中性子ビームを用いた観察技術であ り、X線と同様に観察対象内部の2次元/3次元形状情報を 非破壊で観察する技術である.特に,中性子は電気的に中性 であるために優れた物質透過能力を有するだけでなく、軽元 素に対する高い感度や同位体識別能力を有することから、他 の放射線プローブとは異なる透過画像を与え、水をはじめと する液体の分布や挙動の可視化や、X線が透過できない金 属製の物体の欠陥探査等に利用されてきた. これまで,中性 子イメージング(より厳密には「中性子ラジオグラフィ」)で は、原子炉等の定常中性子源からの白色中性子をそのまま利 用して,透過画像を取得してきた.しかしながら,新しい大 強度の中性子線源の建設や中性子関連デバイスの高性能化に よる中性子線源自体の増強と利用効率の向上により、中性子 エネルギー/波長を選択した単色中性子イメージングが実用 段階になった結果、これまでの中性子イメージングが形状情 報の観察であったのに対して、観察対象内部の物理特性を反 映した画像の取得が可能となった.これは、物質と中性子と の相互作用(吸収, 散乱, 屈折, 反射, 干渉など)の多くは中 性子エネルギー/波長に依存してその大きさが変化するた め,相互作用の結果として生じる中性子透過率変化を画像コ ントラストとして有効に活用することが可能となったことに よる. さらに、エネルギー/波長スキャンにより単色イメー ジングはエネルギー選択型中性子イメージングに発展し、得 られた位置毎の中性子透過スペクトルの解析を通じて観察対 象内部の結晶組織構造の違いの空間分布を可視化することに つながった(ブラッグエッジイメージング)⁽¹⁾⁻⁽³⁾.また,中 性子スピンの情報を利用した磁場イメージングもこの単色中 性子イメージングの実現により可能となった⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

一方、我が国においては、北海道大学や高エネルギー加速

器研究機構の加速器中性子実験施設においてパルス中性子ビ ームを用いたイメージング技術の開発が進められた.パルス 中性子は中性子の発生時刻からの飛行時間(Time-of-Flight, ToF)の分析によりそのエネルギーを知ることができるた め,飛行時間ごとの画像を取得することによって,原子炉等 からの定常中性子を単色化するのと比較して高いエネルギー 分解能と実験効率を実現することができ,エネルギー依存性 を解析する上では非常に有利であった(このようなイメージ ング法をエネルギー選択とは区別して,エネルギー分析型中 性子イメージング⁽⁶⁾と呼ぶ).そして,パルス中性子は定常 中性子と比べて広いエネルギー範囲の中性子を一度に利用す ることができるため, eV から keV 程度のエネルギーを持つ 熱外中性子領域において起こる中性子共鳴吸収反応を用いた 原子核種選択型イメージング⁽⁷⁾⁽⁸⁾や対象核種の熱振動状態を 解析する温度のイメージング⁽⁷⁾⁽⁸⁾や対象核種の熱振動状態を

このような先行研究を基に J-PARC のパルス中性子実験 施設である物質・生命科学実験施設(MLF)には,世界に先 駆けてパルス中性子イメージング専用実験装置である「エネ ルギー分析型中性子イメージング装置(RADEN)」が建設さ れ,本格的なエネルギー分析型中性子イメージングの実用化 とユーザー利用が開始された⁽¹¹⁾.本稿ではこのエネルギー 分析型中性子イメージングを利用した3次元での物理的情 報の可視化の研究開発について紹介する.

2. 中性子を用いた3次元可視化技術

最初に、基本的な中性子イメージングについて述べる. 一 般的な中性子イメージングの撮像系はX線イメージングと 同様に、中性子を可視光に変換するシンチレータ、光を中性 子ビーム軸から避けるためのミラー、光学レンズ、そして CCDや CMOS センサーを用いたデジタル画像撮像カメラか ら構成される. 視野範囲は1 cm 角~30 cm 角程度であり、

* 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター;研究主幹(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4)

Three-dimensional Visualization Technique Based on the Neutron Imaging; Takenao Shinohara (*J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai)

Keywords: *pulsed neutron, energy-resolved neutron imaging, bragg edge, strain tomography, polarized neutron, polarimetric tomography* 2021年11月12日受理[doi:10.2320/materia.61.78]

空間分解能は撮像素子のピクセル数と視野範囲,シンチレー タ厚に依存し,10µm~300µm 程度である.観察対象を回 転させながら透過像を撮像することにより中性子を用いたト モグラフィも可能である.飛行時間分析を用いたイメージン グでは,撮像系に時間分解能が必要であるため,カメラ型で はなくガス検出器等の中性子イベントを記録する2次元検 出器を利用することが多い.中性子イメージングの基本的な 撮像技術については,日本アイソトープ協会刊行の「中性子 イメージングカタログ/中性子施設ハンドブック」に詳しく 説明されているので,興味がある方はこちらを参考された い⁽¹²⁾.

さて、X線と中性子の大きな違いは物質との相互作用断 面積の違いであり、先にも述べたように中性子は金属でもよ く透過する.たとえば、X線がほとんど透過しないPbは中 性子にとっては非常に透過しやすい物質であり、また、数 cm厚程度の鉄板でも中性子は容易に透過することができ る.そのため、身の回りの機械部品などがそのまま観察対象 となる.中性子トモグラフィの例としてアルミニウム合金製 鋳造品⁽¹³⁾と付加製造技術により製作したマルエージング鋼 製の部品の結果を図1に示す.アルミニウム合金製鋳造品で は内部の空隙が明瞭に観察され、マルエージング鋼製の部品 の観察では厚肉部の部分の空隙率(porosity)の違いや微細構 造の違いによるコントラストが確認されている⁽¹⁴⁾.CT値 の定量性に関しては、白色中性子を用いた場合にはスペクト ルの影響を受けるために絶対値での議論は難しいが、定性的



図1 中性子 CT の実施例.上:アルミニウム合金製鋳造 品⁽¹³⁾.(a):外観写真,(b):CT 再構成結果の立面 像,(c):断層像.下:付加製造技術により製作された マルエージング鋼製の部品⁽¹⁴⁾.左:X線CT の結果, 右:中性子 CT の結果.X線は分解能が高く表面の粗さ や先端部の鋭さをよく表現する一方で,中性子では材料 内部の空隙率の違いがよく表現されている.(オンライン カラー)



図2 金属製中性子 CT 用 round robin 試験体を用いた元素毎のCT コントラストの相違. Pb のような重金属についても中性子を用いることでCT 再構成が可能である⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾.

には断面積の違いを反映したコントラストを得ることがで き、図2のように各種金属製ロッドをCT値によって識別す ることが可能である⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾.定量性を厳密に議論する場合に は単色中性子を用いて実験することが望ましいが,結晶構造 による散乱等の透過率スペクトルには多くの情報が含まれる ため十分な注意が必要である.

3. 中性子を用いた物理的情報の3次元可視化

エネルギー分析型中性子イメージングは、中性子透過率の エネルギー依存性を解析することで観察対象内部の物理的性 質の空間分布を可視化する.中性子透過率のエネルギー依存 性において,低エネルギー領域(おおむね 0.1 eV 以下の熱・ 冷中性子領域)には中性子回折による透過中性子の減少を反 映した鋸刃のような構造(ブラッグエッジ)が見られ,一方, 高エネルギー領域(1 eV~数 10 keV の熱外中性子領域)には 共鳴吸収反応による鋭い中性子吸収が見られる. そのため, ブラッグエッジのプロファイルをフィッティングすること で、結晶構造、ひずみ、結晶子サイズ、選択配向に関する情 報を得ることができる(1)-(3).特に、パルス中性子を利用す ると、高いエネルギー分解能で正確な透過率スペクトルを得 ることができるため、高い精度での定量解析が可能であ る⁽¹⁷⁾.この解析を場所ごとに行い,得られたパラメータを マッピングすることで、結晶組織情報の2次元空間分布を 画像化することができる. 共鳴吸収反応は原子核種に依存す るため,吸収が起こるエネルギーと吸収の大きさ(断面積)か ら核種とその量を同定することができる. そのため, 共鳴吸 収を利用したイメージングは元素分布の定量解析に利用する ことができる. さらに、共鳴吸収は多くの場合鋭いピークで あり,その線幅は原子核の熱振動によるドップラー効果によ り変化する.そのため,吸収線幅の解析から特定元素の温度 の情報を知ることができ、高温領域に限定されるものの、構 成元素を用いた温度分布の可視化にも利用することが可能で ある⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾. これら以外にも,偏極中性子を用いたイメージ ングでは磁場可視化に応用できるが,磁場中でのスピンの挙 動は中性子速度(すなわちエネルギー)に依存するため本質的 にエネルギー依存性の解析が必須である⁽⁴⁾⁽⁵⁾. また,中性子 の干渉現象を用いた位相イメージングにおいても,干渉条件 は顕に中性子エネルギーに依存するため,これも本質的にエ ネルギーの選択が必要である⁽¹⁸⁾. つまり,中性子透過強度 から観察対象に関する物理的な情報を抽出する際には,中性 子エネルギー依存性を積極的に考慮した解析が必須であり, 解析を通じて得た物理量は定量的な取り扱いが可能である. つまり,エネルギー分析型中性子イメージングは物理的な情 報を定量化し,その空間分布を可視化する技術ということが できる.

エネルギー分析型中性子イメージングにより得られた画像 を元に3次元的な立体画像を再構成する取組みはこれまで にいくつもなされているが、今の段階では3次元画像化の 実現は限定的である⁽¹⁹⁾⁻⁽²²⁾.これは、通常のCTの再構成で は対象とする量がスカラー量であるが、エネルギー分析型イ メージングが扱う数値のいくつかはスカラー量では無く、観 察方向や配置に依存するために観察対象を単純に回転させな がら透過スペクトルを撮像するだけでは再構成に必要な情報 が不足する、もしくは原理的に取得できない場合があるから である.次節以降に、エネルギー分析型中性子トモグラフィ に関する最近の研究例について紹介する.

(1) 結晶組織情報の3次元可視化

エネルギー分析型中性子イメージングで最も応用研究例が 多いのがブラッグエッジイメージングである.中性子回折・ 散乱に伴う透過率変化のエネルギー依存性を利用するもので ある.中性子透過率は回折限界の波長の前後で大きく変化す るためにスペクトルにはエッジのような構造が現れるが,回 折が起こる指数毎にエッジができるため、透過率スペクトル はギザギザの鋸の刃のような形になる.エッジが現れる中性 子波長から結晶相の情報が得られるが、エッジの高さ(透過 率の大きさ)から結晶相の体積分率を知ることができるた め、トモグラフィと組合せることで、結晶相の3次元的な 分布やその体積比率を表現することができる(図3)⁽²³⁾.た だし、配向の強い試料については正確な分布が得られている ことが保証されない点は注意しなければならない.

ブラッグエッジイメージングではエッジの位置の微小なず れからひずみ量を解析することもできる.(ただし,ブラッ グエッジの生じる波長は散乱角 $\theta=90^{\circ}($ すなわち完全な後方 散乱)の条件であるため、観察しているひずみの方向につい ては注意しておく必要がある.)ブラッグエッジイメージング で観測するひずみの方向はビームの入射方向に依存するが, 束縛条件を与えることによりひずみのトモグラフィも可能で ある.豪州ニューキャッスル大学のグループは、J-PARC MLF の長期課題の制度を利用して、複数年のプロジェクト を実施し、ブラッグエッジによるひずみ量分布の評価を3 次元に拡張する技術開発を進めた.まず,C字型の形状の鉄 鋼試料に荷重を印加した状態で回転させながらブラッグエッ ジイメージングを実施し、独自に開発したアルゴリズムを用 いてひずみ分布の断層像を得た.この結果と有限要素法によ る数値解析結果, CT 再構成により得た断層像から変形量を 求めデジタル画像相関法(DIC)から導出した値を比較し、弾 性ひずみのトモグラフィが可能であることを示した(図 4)⁽²⁴⁾. その後, 弾性ひずみから残留ひずみへと展開するた め,1軸方向に塑性変形させたリングと焼きばめ試料を用 い,トモグラフィの試験を実施した.得られた結果は豪州の 研究用原子炉 OPAL に設置された工学回折装置 KOWARI で求めたひずみ分布と比較され、両者の値はおおむね一致す ることが確認された(図5)⁽²⁵⁾.アルゴリズムの詳細はここ



図3 エネルギー選択型中性子トモグラフィにより求めた結晶相の分布⁽²³⁾. 左図(a),(b):オーステナイト相のブラッグエッジ 前後の波長でのCT 再構成像. 左図(c)~(f):(a)と(b)の比から求めた結晶相の体積分率の分布. 右図(a):引張試験試料 の再構成から得た体積分率,右図(b):ねじり試験試料の体積分率. 試料中心に沿った再構成結果のプロファイル(実線)と 回折から求めた結果(マーカー)の比較を行っている. VIR は初期状態,-max は最大負荷を印加した状態で,-med はその 中間の負荷条件での結果.(オンラインカラー)



図4 ブラッグエッジスペクトル解析による弾性ひずみのト モグラフィ結果⁽²⁴⁾.(a):実験模式図,(b)ブラッグエ ッジ解析から求めたひずみ量の投影プロファイル(*q*= 0°および90°),(d)トモグラフィ再構成結果と有限要素 法による数値解析結果(FEA),デジタル画像相関法に より求めた結果(DIC)の比較.再構成結果はFEA, DICの結果とおおむね一致し,弾性ひずみ分布のトモ グラフィによる評価が実証された.(オンラインカラー)

では触れないが,再構成方法の開発は引き続き進められてお り、最終的には、回転軸方向に等方的な試料だけではなく, より一般化された、3次元的なひずみ分布の再構成がデモン ストレーションされている⁽²⁶⁾.ただし、この3次元ひずみ 分布の再構成には、2軸での試料の回転が必要であるため非 常に長い測定時間を要する.これが任意の試料への展開への 大きな障壁の一つとなっている.

一方、多結晶試料の結晶粒の形状と方位の分布を解析する 3次元中性子回折(3DND)法の開発が進められている.この 技術は放射光を用いた3次元X線回折(3DXRD)⁽²⁷⁾を中性 子に展開したものであり、J-PARC MLF の単結晶中性子構 造解析装置 SENJU⁽²⁸⁾において、デンマーク工科大メンバー を中心としたグループにより実施されている⁽²⁹⁾.3DXRD との大きな違いは取り扱うことができる試料の大きさや種類 であり、中性子の高い物質透過能力を最大限に活かすこと で、ミリメートルからセンチメートル程度の大きさの試料を 扱うことができるだけでなく、タングステン等の重元素を観 察対象として使用することができる.パルス中性子の飛行時 間分析と SENJU の大きな検出器バンクを利用することで非 常に広い散乱角範囲をカバーすることができ、多数の回折点 を一度に取得できる.粒子形状は、試料の下流に飛行時間分 解能を有する高空間分解能の2次元検出器を配置すること で試料透過像を取得して判別する.これは、ブラッグエッジ



図5 ブラッグエッジスペクトル解析による残留ひずみのト モグラフィ結果⁽²⁵⁾. 圧縮により変形したリング試料 (左)と冷やしばめ試料(右)についての中性子回折結果 (KOWARI)と再構成結果(RADEN)の比較. 再構成結 果にはアーチファクトが見られるものの,ひずみの分 布は良い一致を示している.(オンラインカラー)



図6 飛行時間分析型 3DND による Fe ロッド内の結晶粒分 布の可視化結果⁽²⁹⁾. 左の(a)~(d)は表示する粒サイズ の範囲を変えた図であり,(e)はすべての粒サイズを含 む最終的な再構成結果を示す.(e)の上部の赤色で示す 領域は,結晶粒サイズが微細で粒子形状が判別できな い粉末状の領域である.(オンラインカラー)

と同様に飛行時間に応じて回折による透過中性子強度にも変 化が起こるため,結晶粒形状を反映した透過率変化が観察さ れることを利用している.回折点と結晶粒の対応関係を調べ てグルーピングし,各結晶粒の3次元的な位置,形状,方 位を決定して,マッピングすることで,最終的な試料内の結 晶粒の分布を得る.例として,図6に直径1 cmのFe 円柱 についての再構成結果を示す⁽²⁹⁾.

現在の 3DND ではビーム発散度や透過中性子用画像検出 器の空間分解能により,再構成可能な結晶粒サイズは 200 µm~数 mm と X 線に比べて大きいが,検出器性能の向上や 測定条件の最適化でより小さい結晶粒の再構成が可能にな る.また,将来的には外場の印加や変形過程の時間変化のよ うな *in-situ* 観察への応用だけでなく,磁気散乱を利用した 磁気構造分布や磁区のマッピングへの展開が期待されている.

(2) 磁場情報の3次元可視化

先に述べた通り,中性子はスピン磁気モーメントを有する ため磁場と直接相互作用することができる. その結果, 非一 様磁場中においては磁場勾配の大きさと方向に依存した加速 度を受けてビーム軌道が変化し、また、中性子スピンは磁場 ベクトルを軸として回転運動(Larmor 歳差運動)をする.い ずれにおいても中性子の状態の変化は磁場ベクトルと中性子 のスピン,運動状態(中性子の速度)に顕に依存するため、中 性子スピンの初期状態が既知である時に中性子ビームの軌道 変化やスピンの回転を検出することができれば、中性子が通 過した経路中の磁場に関する情報を得ることができる。 つま り、中性子スピンの状態の変化を位置毎に調べることで磁場 の分布を可視化することが原理的に可能である.実際には, スピンの初期状態を規定するためにスピン偏極した中性子 (偏極中性子)を入射ビームとして利用し、観察対象を通過後 の中性子の偏極度(スピン量子化軸への射影)を解析すること でスピン状態の変化を取得するが,磁場は「強さ」と「向き」 を持つベクトル量であるため,偏極度もまた3次元に拡張 してベクトルとして取扱う必要がある⁽³⁰⁾.そのため, J-PARC の RADEN にはパルス中性子のスピンの量子化軸を 3次元的に制御可能な3次元中性子偏極度解析装置が導入さ れている(31). この装置を用いた磁場の3次元可視化技術(3 次元偏極度解析中性子トモグラフィ(3DPNT))の開発が進め られている.この技術は磁場の強さと向きのそれぞれについ ての3次元分布を可視化するものであり、3次元偏極度解析 を試料を回転させて実施する. つまり, 各試料回転角に対す る合計18スピン条件で撮像し、その結果を用いて磁場の再 構成を行うことになる.

線で作製したソレノイドコイルであり、ここに電流を印加し て発生した磁場の3次元分布を再構成した.図から分かる ように、ソレノイドコイル内部だけでなくその周辺の磁場も 再現されており、空間磁場という境界が存在しない対象にお いても3次元分布を表現できている.再構成して得られた 磁場強度はビオ・サヴァールの法則を用いて計算した結果お よび磁場プローブを用いて計測した値とよく一致し、定量性 においても信頼性があることは特筆すべき特長である.この 再構成アルゴリズムは偏極度とスピン回転角との間の線形性 が保たれる範囲、言い換えると歳差回転角が π (=180°)を超 えない磁場強度の範囲(Phase wrapping limit)に限定され, 1mT以下の弱磁場のみ適用可能であった.しかしながら, 偏極度の中性子波長依存性を考慮し、順投影計算と逐次近似 に基づく再構成法の開発により歳差回転角が π を超える強 度の磁場を扱うことが可能となり,再構成可能な磁場強度の 範囲の上限が緩和された⁽³³⁾.

磁場の3次元分布を可視化する技術には,磁場プローブ を走査させる手法や(放射光や可視光の)偏光特性を用いた方 法などが開発されているが,いずれも万能な技術ではなく可 視化可能な対象は限定的である.ここで紹介した偏極中性子 を用いた手法も未だ開発段階の技術であり,応用例はソレノ イドコイル中の空間磁場に限定されている.しかしながら, 中性子は物質内部を進入して磁場と直接相互作用することが できるため,閉鎖空間中だけでなく磁性体や超伝導体等の物 資内部の磁場分布を可視化する可能性を持ち,これまではシ ミュレーションでしか評価できなかった磁場分布を実験的に 評価することが可能になると考えられる.

4. おわりに

中性子を用いた3次元可視化技術はエネルギー選択/分 析やスピン偏極などのビーム制御技術と組合せることによ



図7 3DPNT によるソレノイドコイル内部の磁場分布の3次元可視化結果⁽³²⁾. 再構成により求められた*x*, *y*, *z*の各方向の磁場 成分(B_x , B_y , B_z)の分布((a)~(c))と図中の灰色出示した断面の B_x , B_y , B_z 成分の2次元分布((e)~(h))を示す. コイル 内部の磁場はほぼ B_x 成分のみで表現されるが, コイルの端部には B_y , B_z 成分が現れることが分かる. また, コイルがわず かに xz 面内で傾いているため, B_z 成分もコイル内部にも現れている. (オンラインカラー)

実験結果の例を図7に示す(32). 観察対象はアルミニウム

り、これまでのように観察対象の形状情報を非破壊で取得す るのではなく、対象内部の結晶組織の情報や磁場情報、ま た、本稿では詳しく紹介しなかったが、元素分布や温度分布 等を取り扱うことができる技術へと展開しつつある.そし て、ひずみや磁場のトモグラフィの開発においては、それら の空間分布を画像として表現するだけでなく、再構成により 求められた絶対値の妥当性についても評価され、応用例はま だ限定的であるが定量的な3次元可視化がなされた.その ため、中性子を用いたトモグラフィは、今後のさらなる技術 開発により他の技術では到達することができない対象物深部 の物理的な情報とその分布を3次元的に抽出する新しいア プローチとなる可能性を有する.

一方で、中性子ビームの強度は放射光などの他の放射線プ ローブと比較して依然として弱く、またビーム発散度が大き いことや光学的制御の難しさなどによる実験効率の低さのた め、エネルギー分析型中性子トモグラフィの実験には非常に 長い時間が必要である.そのため、中性子画像検出器や光学 素子等の要素技術の高度化と再構成手法の改良による実験効 率の改善がこの技術の利用展開には不可欠であり、これによ り一般的な試料に適用する障壁は大きく緩和され、多くの研 究に応用されるようになると考えている.

文 献

- J. R. Santisteban, L. Edwards, A. Steuwerb and P. J. Withers: J. Appl. Cryst., 34(2001), 289–297.
- (2) 岩瀬謙二: Isotope News, **725**(2014), 7-11.
- (3) W. Kockelmann, G. Frei, E. H. Lehmann, P. Vontobel and J. R. Santisteban: Nucl. Instrum. Meth. A, **578**(2007), 421–434.
- (4) 篠原武尚: Isotope News, **732**(2015), 9-14.
- (5) M. Strobl, H. Heimonen, S. Schmidt, M. Sales, N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke, T. Shinohara and J. Valsecchi: J. Phys. D: Appl. Phys., 52(2019), 123001.
- (6) Y. Kiyanagi, H. Sato, T. Kamiyama and T. Shinohara: J. Phys.: Conference Series, 340(2012), 012010.
- (7)甲斐哲也: Isotope News, 727(2014), 16-19.
- (8) A. S. Tremsin, J. Rakovan, T. Shinohara, W. Kockelmann, A. S. Losko and S. C. Vogel: Scientific Reports, 7 (2017), 40759.
- (9) T. Kai, K. Hiroi, Y. Su, T. Shinohara, J. D. Parker, Y. Matsumoto, H. Hayashida, M. Segawa, T. Nakatani, K. Oikawa, S. Zhang and Y. Kiyanagi: Physics Procedia, 88 (2017), 306–313.
- (10) T. Kamiyama, J. Ito, H. Noda, H. Iwasa, Y. Kiyanagi and S. Ikeda: Nucl. Instrum. Meth. A, 542 (2005), 258–263.
- (11) T. Shinohara, T. Kai, K. Oikawa, T. Nakatani, M. Segawa, K. Hiroi, Y. Su, M. Ooi, M. Harada, H. Iikura, H. Hayashida, J. D. Parker, Y. Matsumoto, T. Kamiyama, H. Sato and Y. Kiyanagi: Rev. Sci. Instr., **91**(2020), 043302.
- (12) 中性子イメージングカタログ/中性子施設ハンドブック、日本アイソトープ協会 https://www.jrias.or.jp/report/cat1/218.html
- (13) Y. Matsumoto, M. Segawa, T. Kai, T. Shinohara, T. Nakatani,
 K. Oikawa, K. Hiroi, Y. Su, H. Hayashida, J. D. Parker, S. Zhang and Y. Kiyanagi: Phys. Procedia, 88(2017), 162.
- (14) F. Grazzi, C. Cialdai, M. Manetti, M. Massi, M. P. Morigi, M. Bettuzzi, R. Brancaccio, F. Albertin, T. Shinohara, T. Kai, A. Fedrigo, A. D. Giovanni, F. Arneodo, R. Torres, O. Al-Ketan, J. Elhashemi, F. Taccetti and L. Giuntini: Rend. Fis. Acc.

Lincei, **32**(2021), 463–477.

- (15) 篠原武尚,及川健一,松本吉弘:金属,アグネ技術センター, 91 (2021), 214-220.
- (16) A. P. Kaestner, et al.: Phys, Proc., 43, (2013), 128-137.
- (17) H. Sato, T. Kamiyama, K. Iwase, T. Ishigaki and Y. Kiyanagi: Nucl. Instrum. Methods A, 651 (2011), 216–220.
- (18) Y. Seki, T. Shinohara, J. D. Parker, W. Ueno, T. Samoto, W. Yashiro, A. Momose, Y. Otake and Y. Kiyanagi: Europhys. Lett., **123** (2018), 12002.
- (19) H. Sato, M. Sato, Y. H. Su, T. Shinohara and T. Kamiyama: ISIJ Int., **61**(2021), 1584–1593.
- (20) J. D. Parker, M. Harada, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, T. Mizumoto, H. Nishimura, T. Oku, T. Sawano, T. Shinohara, J. Suzuki, A. Takada, T. Tanimori, K. Ueno and T. Uchida: J. Phys.: Conference Series, **502**(2014), 012048.
- (21) H. Sato, T. Kamiyama and Y. Kiyanagi: Nucl. Instrum. Meth. A, **605**(2009), 36–39.
- (22) R. F. Ziesche, A. S. Tremsin, C. Huang, C. Tan, P. S. Grant, M. Storm, D. J. L. Brett, P. R. Shearing and W. Kockelmann: J. Imaging, 6(2020), 136.
- (23) R. Woracek, D. Penumadu, N. Kardjilov, A. Hilger, M. Boin, J. Banhart and I. Manke: Adv. Mater., 26 (2014), 4069–4073.
- (24) J. N. Hendriks, A. W. T. Gregg, C. M. Wensrich, A. S. Tremsin, T. Shinohara, M. Meylan, E. H. Kisi, V. Luzin and O. Kirsten: Phys. Rev. Materials, 1(2017), 053802.
- (25) A. W. T. Gregg, J. N. Hendriks, C. M. Wensrich, A. Wills, A. S. Tremsin, V. Luzin, T. Shinohara, O. Kirstein, M. H. Meylan and E. H. Kisi: Phys. Rev. Appl., **10**(2018), 064034.
- (26) J. N. Hendriks, A. W. T. Gregg, R. R. Jackson, C. M. Wensrich, A. Wills, A. S. Tremsin, T. Shinohara, V. Luzin and O. Kirsten: Phys. Rev. Mater., 3(2019), 113803.
- (27) H. F. Poulsen: J. Appl. Cryst., 45(2012), 1084-1097.
- (28) T. Ohhara, R. Kiyanagi, K. Oikawa, K. Kaneko, T. Kawasaki, I. Tamura, A. Nakao, T. Hanashima, K. Munakata, T. Moyoshi, T. Kuroda, H. Kimura, T. Sakakura, C. H. Lee, M. Takahashi, K. Ohshima, T. Kiyotani, Y. Noda and M. Arai: J. Appl. Cryst., 49 (2016), 120–127.
- (29) A. Cereser, M. Strobl, S. A. Hall, A. Steuwer, R. Kiyanagi, A. S. Tremsin, E. B. Knudsen, T. Shinohara, P. K. Willendrup, A. B. S. Fanta, S. Iyengar, P. M. Larsen, T. Hanashima, T. Moyoshi, P. M. Kadletz, P. Krooß, T. Niendorf, M. Sales, W.W. Schmahl and S. Schmidt: Scientific Reports, 7 (2017), 9561.
- (30) M. Th. Rekveldt: Z. Phys., **259**(1973), 391–410.
- (31) T. Shinohara, K. Hiroi, Y. Su, T. Kai, T. Nakatani, K. Oikawa, M. Segawa, H. Hayashida, J. D. Parker, Y. Matsumoto, S. Zhang and Y. Kiyanagi: J. Phys.: Conference Series, 862 (2017), 012025.
- M. Sales, M. Strobl, T. Shinohara, A. Tremsin, L. T. Kuhn, W.
 R. B. Lionheart, N. M. Desai, A. B. Dahl and S. Schmidt: Scientific Reports, 8(2018), 2214.
- (33) M. Sales, T. Shinohara, M. K. Sørensen, E. B. Knudsen, A. S. Tremsin, M. Strobl and S. Schmidt: J. Phys. D: Appl. Phys., 52 (2019), 205001.

