

# 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、中性子は電氣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)<sup>(1)-(3)</sup>。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<sup>(4)-(5)</sup>。

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<sup>(6)</sup>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<sup>(7)(8)</sup>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技術の開発<sup>(9)(10)</sup>がなされた。

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<sup>(11)</sup>。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、 $10\ \mu\text{m}$ ~ $300\ \mu\text{m}$ 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<sup>(12)</sup>。

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<sup>(13)</sup>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<sup>(14)</sup>。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

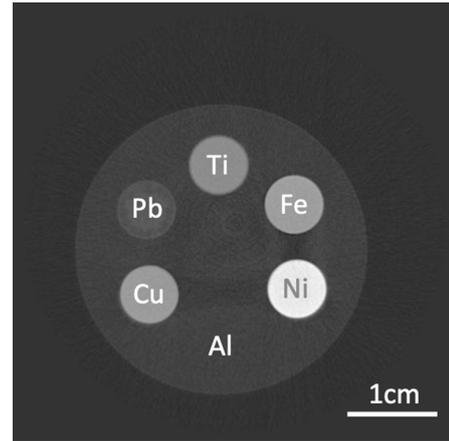


図2 金属製中性子CT用 round robin 試験体を用いた元素毎のCTコントラストの相違。Pbのような重金属についても中性子を用いることでCT再構成が可能である<sup>(15)(16)</sup>。

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<sup>(15)(16)</sup>。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 $0.1\ \text{eV}$ 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( $1\ \text{eV}$ ~数 $10\ \text{keV}$ 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<sup>(1)-(3)</sup>。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<sup>(17)</sup>。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

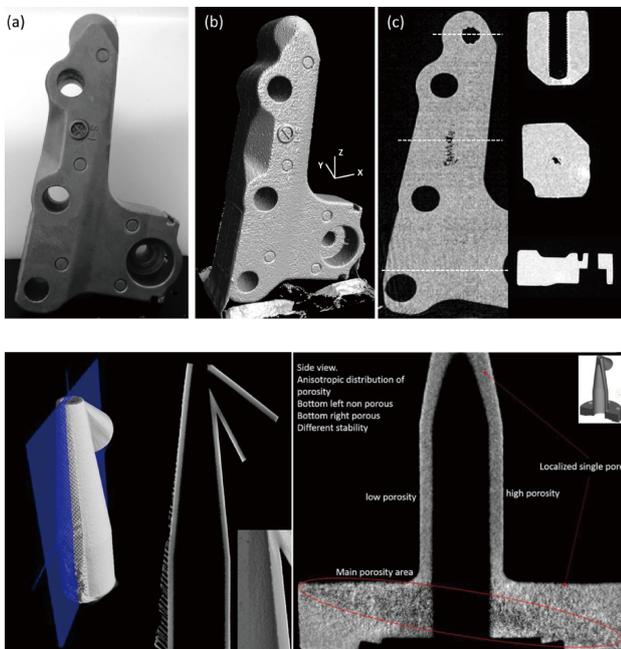


図1 中性子CTの実施例。上：アルミニウム合金製鋳造品<sup>(13)</sup>。(a)：外観写真，(b)：CT再構成結果の立面像，(c)：断層像。下：付加製造技術により製作されたマルエージング鋼製の部品<sup>(14)</sup>。左：X線CTの結果，右：中性子CTの結果。X線は分解能が高く表面の粗さや先端部の鋭さをよく表現する一方で、中性子では材料内部の空隙率の違いがよく表現されている。(オンラインカラー)

ある<sup>(7)-(10)</sup>。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<sup>(4)(5)</sup>。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、干渉条件は頭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<sup>(18)</sup>。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える。

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<sup>(19)-(22)</sup>。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、トモグラフィと組み合わせることで、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<sup>(図3)</sup><sup>(23)</sup>。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<sup>(図4)</sup><sup>(24)</sup>。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<sup>(図5)</sup><sup>(25)</sup>。アルゴリズムの詳細はここ

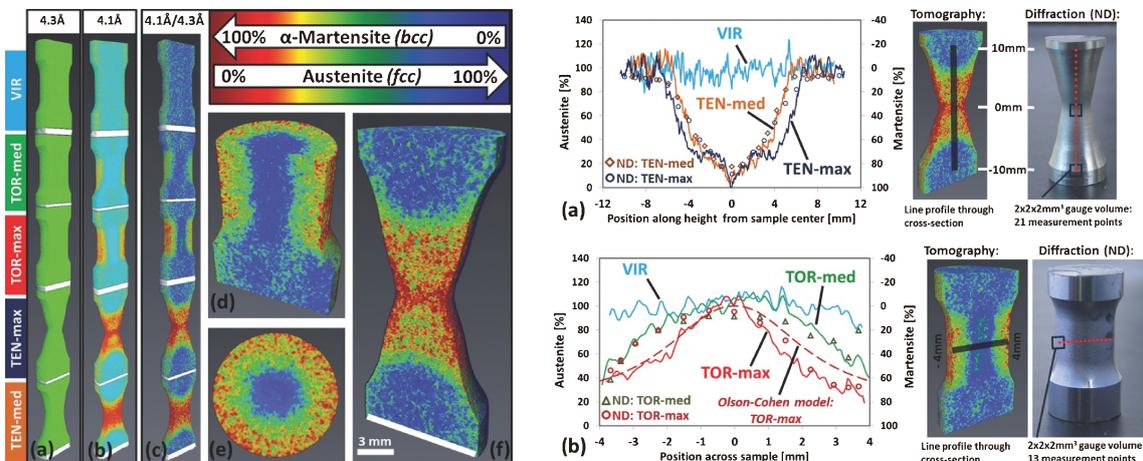


図3 エネルギー選択型中性子トモグラフィにより求めた結晶相の分布<sup>(23)</sup>。左図(a), (b) : オーステナイト相のブラッグエッジ前後の波長でのCT再構成像。左図(c)~(f) : (a)と(b)の比から求めた結晶相の体積分率の分布。右図(a) : 引張試験試料の再構成から得た体積分率。右図(b) : ねじり試験試料の体積分率。試料中心に沿った再構成結果のプロファイル(実線)と回折から求めた結果(マーカー)の比較を行っている。VIRは初期状態、-maxは最大負荷を印加した状態で、-medはその中間の負荷条件での結果。(オンラインカラー)

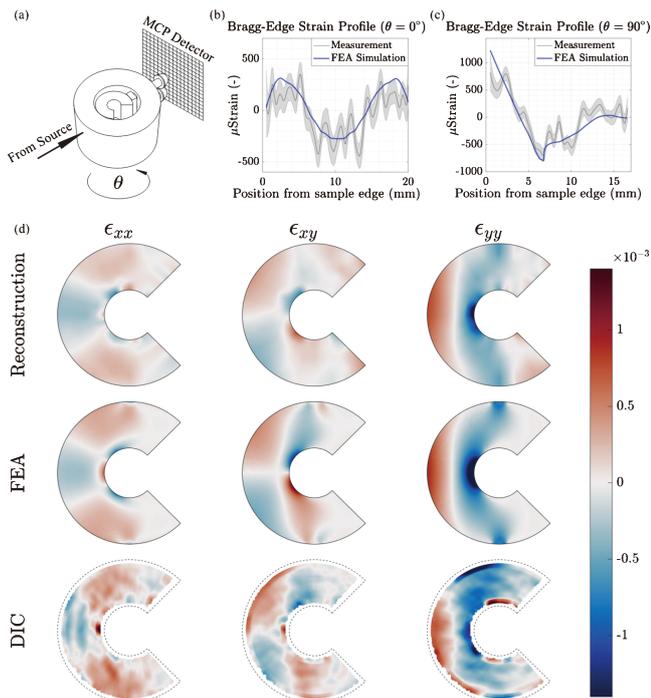


図4 ブラッグエッジスペクトル解析による弾性ひずみのトモグラフィ結果<sup>(24)</sup>。(a)：実験模式図，(b)ブラッグエッジ解析から求めたひずみ量の投影プロファイル( $q=0^\circ$ および $90^\circ$ )，(d)トモグラフィ再構成結果と有限要素法による数値解析結果(FEA)，デジタル画像相関法により求めた結果(DIC)の比較。再構成結果はFEA，DICの結果とおおむね一致し，弾性ひずみ分布のトモグラフィによる評価が実証された。(オンラインカラー)

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<sup>(26)</sup>。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)<sup>(27)</sup>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<sup>(28)</sup>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<sup>(29)</sup>。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

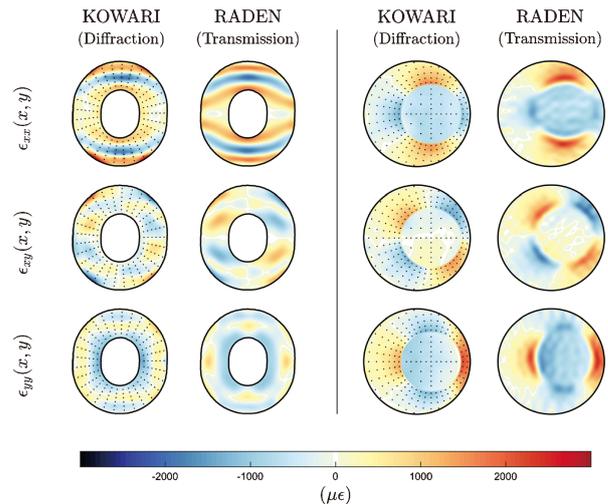


図5 ブラッグエッジスペクトル解析による残留ひずみのトモグラフィ結果<sup>(25)</sup>。圧縮により変形したリング試料(左)と冷やしばめ試料(右)についての中性子回折結果(KOWARI)と再構成結果(RADEN)の比較。再構成結果にはアーチファクトが見られるものの，ひずみの分布は良い一致を示している。(オンラインカラー)

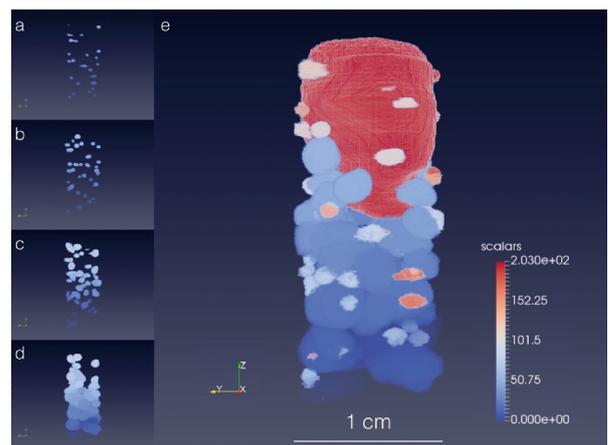


図6 飛行時間分析型3DNDによるFeロッド内の結晶粒分布の可視化結果<sup>(29)</sup>。左の(a)~(d)は表示する粒サイズの範囲を変えた図であり，(e)はすべての粒サイズを含む最終的な再構成結果を示す。(e)の上部の赤色で示す領域は，結晶粒サイズが微細で粒子形状が判別できない粉末状の領域である。(オンラインカラー)

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を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1cmのFe円柱についての再構成結果を示す<sup>(29)</sup>。

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 $\mu\text{m}$ ~数mmとX線に比べて大きい，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<sup>(30)</sup>。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<sup>(31)</sup>。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。

実験結果の例を図7に示す<sup>(32)</sup>。観察対象はアルミニウム

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 $\pi(=180^\circ)$ を超えない磁場強度の範囲(Phase wrapping limit)に限定され、1 mT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 $\pi$ 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<sup>(33)</sup>。

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質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み合わせることによ

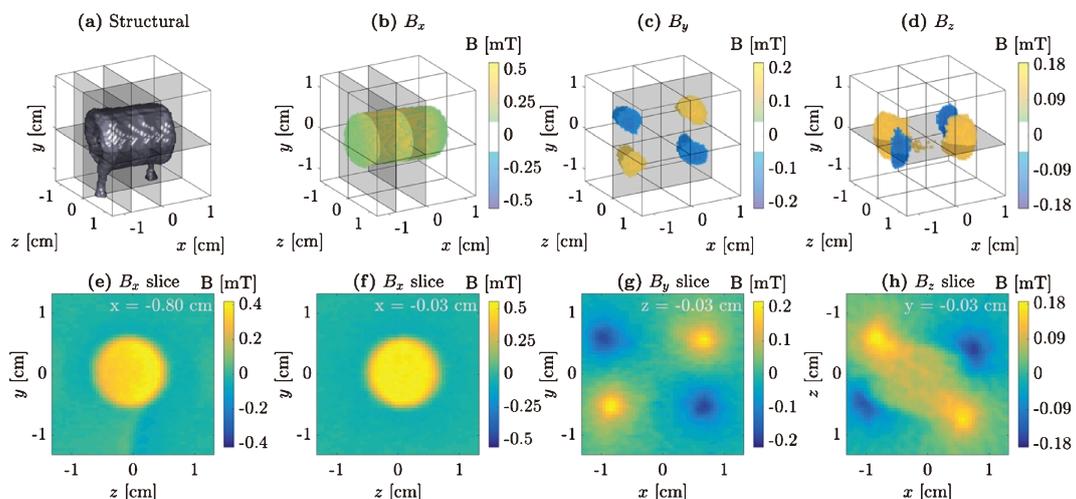


図7 3DPNTによるソレノイドコイル内部の磁場分布の3次元可視化結果<sup>(32)</sup>。再構成により求められた $x$ ,  $y$ ,  $z$ の各方向の磁場成分( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ )の分布((a)~(c))と図中の灰色出示した断面の $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ 成分の2次元分布((e)~(h))を示す。コイル内部の磁場はほぼ $B_x$ 成分のみで表現されるが、コイルの端部には $B_y$ ,  $B_z$ 成分が現れることが分かる。また、コイルがわずかに $xz$ 面内で傾いているため、 $B_z$ 成分もコイル内部にも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

