

共鳴軟 X 線小角散乱による磁気スキルミオンの観測

山崎裕一^{1,2,3}, 中尾裕則⁴

¹物質・材料研究機構統合型材料研究・情報基盤部門, ²理化学研究所創発物性研究センター, ³科学技術振興機構さきがけ,

⁴高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所

Observation of Magnetic Skyrmion by Resonant Soft X-ray Small-angle Scattering

Yuichi YAMASAKI^{1,2,3}, Hironori NAKAO⁴

¹Research and Services Division of Materials Data and Integrated System (MaDIS), NIMS,

²Center for Emergent Matter Science (CEMS), RIKEN,

³Precursory Research for Embryonic Science and Technology (PRESTO), JST,

⁴Photon Factory (PF), Institute of Materials Structure Science, KEK

Abstract

磁性体の中においてナノメートルスケールで磁気モーメントが渦を巻いている構造である磁気スキルミオンが近年注目されている。磁気スキルミオンはトポロジカルに安定な構造であるとともに、電場や電流、温度勾配に対して巨大な応答を示すため、次世代スピントロニクスデバイスの新たな情報媒体へと応用が期待されている。実デバイス応用への道筋を付けるために、高い時空間分解能で磁気スキルミオンの外場応答を明らかにしていくことが求められる。我々は、放射光の特性を活かして磁気スキルミオンのダイナミクスを実空間観測することを目指し、PF BL-16Aにおいて透過型共鳴軟 X 線小角散乱装置の開発を行ってきた。本稿では、本装置を用いて得られた磁気スキルミオンの磁気回折図形観測、電場や一軸応力による磁気スキルミオンの構造変化、コヒーレント軟 X 線回折イメージングによる実空間観測の研究成果を紹介する。

磁気スキルミオン

磁気スキルミオンは磁性体の中で Fig. 1(a) のように磁気モーメントが渦のように回転しながら配列しているナノメートルスケールの構造体である。ある種の磁性体において磁気スキルミオンが発現することが理論的に予言されていたが、2009年にドイツ Pfeider らによってカイラルな結晶構造を有する B20 型合金 MnSi において磁気スキルミオンが実現している可能性を示唆する実験結果が示された [1]。彼らは中性子小角散乱実験によって六回対称な磁気散乱を観測し、磁気スキルミオンが物質中で三角格子 [Fig. 1(b)] を形成することを提唱した。その後、ローレンツ型電子顕微鏡により磁気スキルミオンが確かに三角格子を形成していることが実空間観測され、さらに強磁性体中においてスキルミオンが孤立して存在する状態も観測された [2]。磁気スキルミオンはトポロジカルに安定な構造のため外乱要因に乱されにくく、不純物をよけるように物質中を動けるため低い電流によって駆動できることも報告されている [3]。磁気スキルミオンは磁性体中で結晶とはあまり相関なく独立な粒子として振る舞うため、強磁性体中における一種の位相欠陥と見ることができ。そのような特性から、スピントロニクスデバイスへの応用が期待され盛んに研究されるようになった。他にもスピン偏極走査型トンネル電子顕微鏡、磁気力顕微鏡など、様々な実験手法でスキルミ

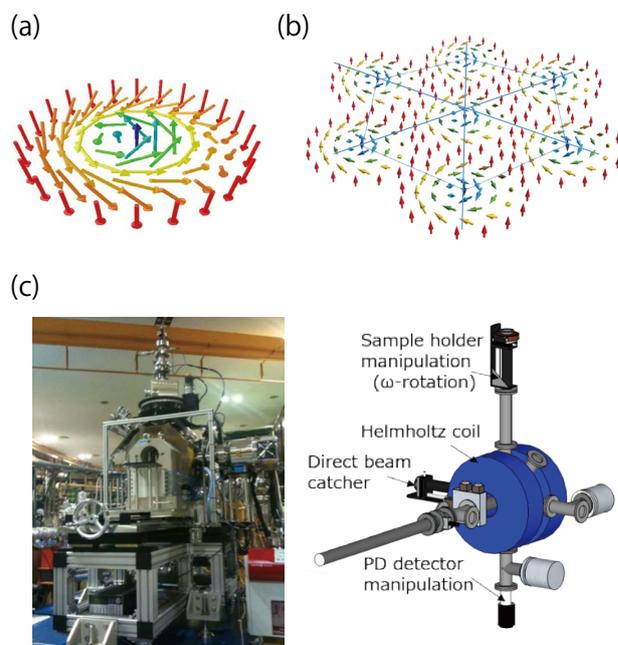


Figure 1 Magnetic structure of (a) single skyrmion and (b) triangle crystal of skyrmion. (c) Picture and schematic representation of resonant soft x-ray small-angle scattering.

オンが観測され多角的手法で研究が展開されている。

磁気スキルミオンが観測されている B20 型合金（空間群は P2₁3）は、空間反転対称性がないキラルな立方晶の結晶構造である。そのため、磁気モーメントをひねるように作用するジャロシンスキー・守谷 (Dzyaloshinskii-Moriya) 相互作用が働き、磁気モーメントを平行に揃えようとする強磁性的な相互作用と競合するため、結果として磁気モーメントが回転しながら空間的に変化するヘリカル磁気構造となる。磁気モーメントが一回転する長さは、ジャロシンスキー・守谷相互作用の強さと強磁性相互作用の強さの大きさの比で決まり、磁気スキルミオンが発現する典型的な物質では数十ナノメートルから数百ナノメートル程度となっている。ヘリカル磁気構造の変調ベクトルは磁気異方性が弱い場合にはあらゆる方向を向いているが、磁場を印加すると磁場と平行になるように揃い、磁気モーメントが円錐のように変調するコニカル磁気構造になる。この状態にさらに磁場を印加していけば、最終的に磁気モーメントの方向がすべて揃った強磁性状態となる。ある温度・磁場の条件下においては磁気スキルミオンが発現し、それらが三角格子を形成する磁気スキルミオン格子が実現する。磁気スキルミオン格子は、試料の二次元性が高いほど安定化するため、三次元的なバルク結晶に比べて二次元的な薄膜結晶で発現する温度・磁場領域が拡大することが知られている [4]。

共鳴軟 X 線小角回折実験用試料加工と実験手法

共鳴軟 X 線散乱は対象となる元素の吸収プロセスを介して散乱されるため、元素選択的にスピンや電荷、電子軌道を観測することができる手法である。また、Photon-in-photon-out の検出法であるため様々な試料環境での測定が可能であり、放射光のパルス特性を活用し外場印加に伴うダイナミクス計測にも適している。我々は、共鳴軟 X 線散乱の特長を活かして磁気スキルミオンを観測することを目指し、透過型の共鳴軟 X 線小角散乱装置の開発を BL-16A において行ってきた [Fig. 1(c)]。本装置は真空チャンバー内に冷却可能なサンプルホルダーと、下流で透過してきた回折図形を観測するための二次元 CCD 検出器、ダイレクトビームから CCD 検出器を保護するためのキャッチャーが設置されている。真空チャンバーの外側には磁場を印加するためのヘルムホルツ型電磁石を搭載し、試料位置において 0.4 T までの磁場が印加できるようになっている。軟 X 線の透過実験を行うには測定する吸収端近傍の軟 X 線が透過できるような薄い試料を準備する必要がある。今回の実験で用いた試料は 3d 電子系の遷移金属が磁気モーメントを有しており、それらの吸収端 (500 ~ 1000 eV) における減衰長 (入射した光が 1/e になる厚さ) はおおよそ数百ナノメートルとなっている。回折強度は試料の体積にお透過率を乗じたものに比例するために減衰長に近いほど強くなる。そこで、我々は透過型電子顕微鏡の観察試料作製に使われる収束イオンビーム (FIB) 加工装置を用いて薄片の試料を準備した。試料を置く基板に直径数マイクロメ

ートル程度のピンホールを加工し、それを覆うように薄片の試料を固定した。BL-16A におけるビームサイズは数百マイクロメートルであり、この中にピンホールが完浴している限り、常に数マイクロメートルで切り出された軟 X 線が試料に照射されることになる。そのため、試料が振動する影響を受けにくく、温度変化や磁場印加などの試料位置が変化しやすい実験にも適した計測手法となっている。また、BL-16A における軟 X 線のコヒーレント長は短く見積もっても 5 マイクロメートル程度はあることを確認しており、数マイクロメートルの軟 X 線を切り出すことで波面がそろったコヒーレントな軟 X 線が試料に照射されることになる。これにより、コヒーレント軟 X 線回折イメージングを行うことも可能になってくる。

共鳴軟 X 線小角回折によるスキルミオン格子の観測

本研究では初めに、磁気スキルミオンが比較的室温に近い温度から発現するカイラル磁性体 FeGe において透過型共鳴軟 X 線小角散乱による磁気スキルミオン格子の観測を

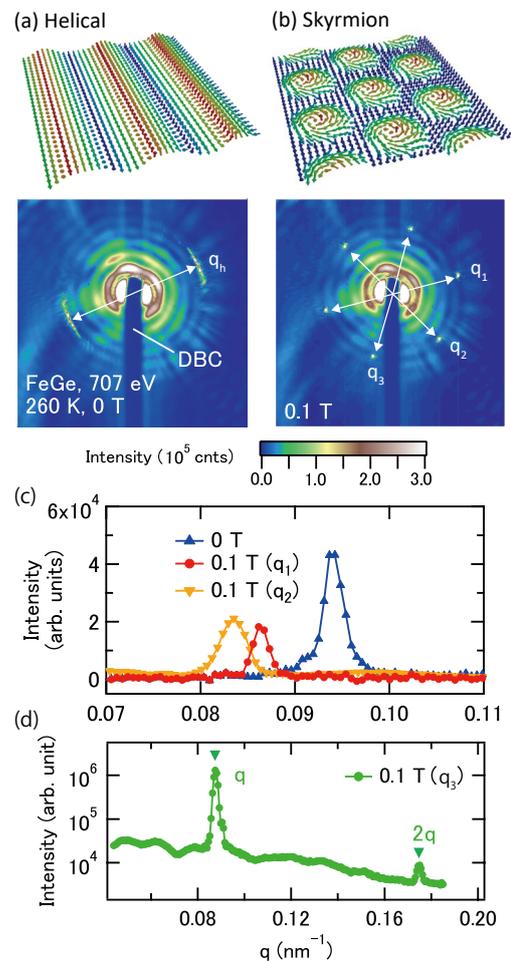


Figure 2 Observed CCD images of resonant soft x-ray small-angle scattering and corresponding schematic illustrations of magnetic structures for (a) helical and (b) skyrmion crystal (SkX). (c) Peak profile of resonant soft x-ray small-angle scattering for the helical (0 mT) and the SkX (0.1 T) phases. (d) The peak profile from the SkX along the q_3 including high- q region.

行った [5]。Fig. 2(a)にはFeのL₃吸収端(707 eV近傍)で観測した透過型の磁気回折図形を示している。中心付近に見えるのはダイレクトビームキャッチャーの陰であり、同心円に振動しているのはピンホールからのコヒーレント回折パターンである。磁場がない状況(0 mT)ではヘリカル磁気構造に対応した三日月状の磁気散乱が観測されており、磁場を印加すると磁気スキルミオンの三角格子形成に伴う六個の磁気散乱が観測される [Fig. 2(b)]。平行度の高い放射光の特性により逆格子空間における角度分解能が高く磁気回折スポットがシャープであることがわかる。ピークの半値幅から見積もられる磁気秩序の相関長は試料と同程度のサイズと見積もられ、観測されたスキルミオンは試料全体で単一ドメインであることを示唆している。高い角度分解能のおかげで、中性子小角散乱やローレンツ型電子顕微鏡では観測されていなかったヘリカル相とスキルミオン相での磁気変調ベクトルの微小な変化も検出することができている [Fig. 2(c)]。また、Fig. 2(d)に示すように高次の磁気回折を観測しており、観測した磁気構造が単純な正弦波の重ね合わせではなく、孤立波(ソリトン)のように磁気スキルミオンが存在し、三角格子を形成していることを示唆している。

磁気スキルミオンに対する電場と一軸応力の効果

FeGeは電流を流す伝導物質であり、電流によってスキルミオンを駆動する研究が報告されている [6]。他方で電流を流さない絶縁体の場合ではどうであろうか。絶縁体では電流でなく電場が印加されることになるが、もし電場によって直接的に磁気構造を制御できれば、ジュール熱による発熱を伴わない低消費電力のデバイス応用が期待される。絶縁体で磁気スキルミオンが発現する物質は数が少ないが、カイラル磁性体Cu₂OSeO₃は絶縁体でありながら磁気スキルミオンが発現する物質として良く知られている [7]。この物質においては、電場により磁気スキルミオンの構造転移が起きている可能性が電場を印加しながらの磁化測定によって報告された [8]。しかし、実際に磁気スキルミオンがどのように構造変化したか明らかでなかったため、本研究では透過型共鳴軟X線小角散乱法で電場を印加しながら磁気回折の観測を行った [9]。

Fig. 3(a)は電場を印加するために電極を付けたCu₂OSeO₃の薄片試料である。電極を加工したSiNメンブレン上に厚さ200ナノメートル程度の試料をタングステンで接着している。本実験では100マイクロメートル程度離れた電極間に最大150Vの電圧を印加したので最大1.5 kV/mmの電場印加に対応している。Cu₂OSeO₃の試料は(110)面を用いており、磁場は[110]軸方向に、電場は[001]軸方向に印加している。

Fig. 3(b)には磁気スキルミオンが発現する54 K, 30 mTにおける磁気回折図形を示しており、磁気スキルミオン格子の形成による六角形の磁気散乱が観測されている。ここでは、それぞれ±q₁, ±q₂, ±q₃の磁気散乱と呼ぶことにする。この状態に±1.5 kV/mの電場を印加した時

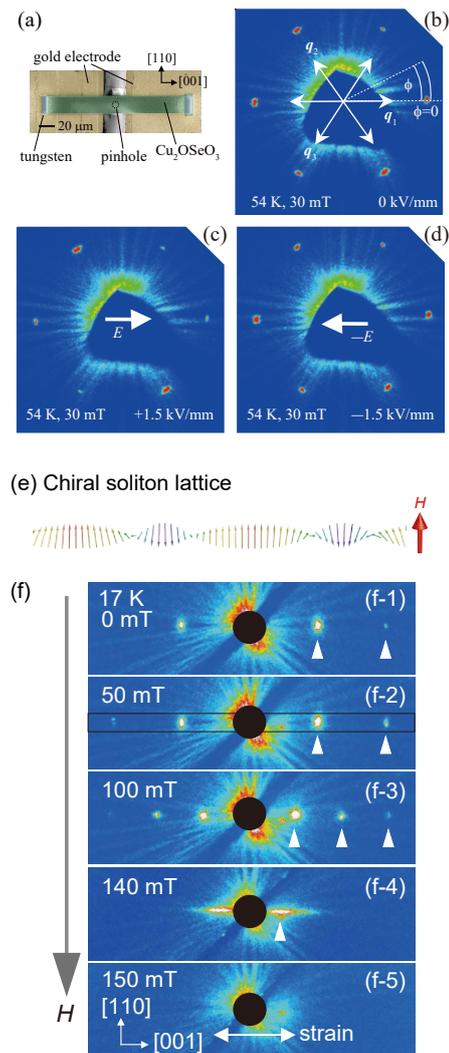


Figure 3 (a) Picture of the thin plate of Cu₂OSeO₃ fabricated by focused ion beam thinning technique. Diffraction patterns at 54 K and 30 mT under E = 0 kV/mm (b), +1.5 kV/mm (c), and -1.5 kV/mm (d). (e) Schematic illustrations of chiral soliton lattice. (f) The magnetic-field variation of the diffraction patterns at 17 K in the strained sample. Diffraction spots existing at the right side are highlighted by white arrows.

の磁気散乱を Fig. 3(c),(d) に示している。正方向の電場(E = +1.5 kV/mm)を印加したときには、q₂方向の磁気散乱強度が少し強くなり、q₁, q₃方向の磁気散乱が弱くなっている。一方で負方向に電場(E = -1.5 kV/mm)を印加したときには、q₁方向の磁気散乱が強くなっていることが見て取れる。この結果は、正の電場を印加した時にはヘリカル磁気構造が安定化し、負の電場を印加した時には磁気スキルミオン格子が安定化していることを示唆している。この現象を理解するためには、それぞれの磁気構造における強誘電性分極の大きさを考える必要がある。Cu₂OSeO₃はヘリカル磁気構造の発現に伴って強誘電性分極が発現するマルチフェロイクス物質であることが知られている。さらにその電気分極の大きさや方向は磁気変調ベクトルの向きによって変化することがわかっている。自発分極を有する誘電体に電場を印加した場合、静電エネルギーを安定化す

るように電気分極が変化するため、マルチフェロイクス物質 Cu_2OSeO_3 では電場を印加することによって磁気変調構造が変化すると理解できる。

本実験では、電場を印加するために接着した電極の効果によって副次的な磁気構造の変化も観測された [10]。試料は電極によって基板となる SiN メンブレンに固定されているため、試料を冷却すると試料と基板の熱収縮率の違いによって結果的に試料に対して電極方向に一軸の引っ張り応力が印加される。磁気スキルミオンに対する一軸圧力の効果は電子顕微鏡 [11] や中性子散乱 [12] でも観測されており、磁気スキルミオンは圧力印加によっても変化しやすい特性を有することが知られている。本実験では一軸の応力によってヘリカル磁気構造が安定化し、Fig. 3(e) のような磁気カイラルソリトン格子と呼ばれる磁気構造が新たに発現することを発見した [10]。ヘリカル磁気構造に対して磁気変調ベクトルと垂直方向に磁場を印加するとスピンのひねりとひねりの間隔が拡大していきスピンのひねりが孤立した状態となる。この孤立したスピンのひねりがソリトンとなり、等間隔に並んだ状態がソリトン格子である。Fig. 3(f) には電極によって一軸応力が印加された状態の試料に対して、ヘリカル磁性体から磁場を上昇させたときの磁気回折の変化を示している。B = 0 mT でヘリカル磁気回折に由来する $\pm q$ の磁気回折が観測されているが、磁場を印加していくと $\pm q$ の磁気回折が中心に向かって動き、それに伴って高次の磁気回折が観測されるようになってきている。磁気カイラルソリトン格子の磁気構造はスピンハミルトニアンから解析的に解けることが知られており、磁気変調ベクトルに対する高次磁気回折の強度が解析解として導出できる [13]。実験値と理論がよく一致することが確認でき、確かに磁気カイラルソリトン格子が形成されていることを示唆している。カイラルソリトン格子ができるためには磁気変調ベクトルがある方向に固定されなければならないが、電極からの一軸の引っ張り応力によって磁気異方性が変化して磁気変調ベクトルが固定されたと考えられる。

コヒーレント軟 X 線回折イメージング

数マイクロメートルのピンホールで切り出すとコヒーレントな軟 X 線が得られるため、コヒーレント軟 X 線回折イメージングによる磁気スキルミオンの実空間観測を試みた。光の波面が揃っているコヒーレントな軟 X 線を試料に入射すると、十分に遠方の検出面において試料からのコヒーレント回折パターン（フランフォーファー回折）が観測される [14,15]。コヒーレント軟 X 線回折イメージングは、2次元検出器で得られた回折パターンをフーリエ変換して、試料像を再構成する X 線顕微鏡手法であり、レンズなどの軟 X 線を集光するための光学素子を必要とせず、光学素子の性能や装置の振動による制限を受けにくいなどの特長がある。フランフォーファー回折パターンは、試料像の 2次元フーリエ変換により得られる磁気構造因子の絶対値の二乗に比例した計数として観測される。一般的に構造因子

は複素数量であり、その絶対値と位相の情報を両者とも知ることができれば、逆フーリエ変換によって実像を再構成することが可能である。しかし、計測で検出可能な物理量は構造因子の絶対値のみであり、位相情報は直接的には観測することができない。これがいわゆるコヒーレント回折イメージングにおける位相問題である。

位相問題を解決する方法は、大きく分けて二つ知られている。一つは、試料からの回折波とピンホールからの参照波を干渉させるホログラフィー計測である。得られる回折強度には、試料とピンホールからの構造因子を掛け合わせた干渉項が含まれるため、これをフーリエ変換すると試料とピンホールを畳み込んだ（コンボリューションした）実空間像が得られる [16]。つまり、空間分解能がピンホールのサイズとなる実空間像が観測できる。この計測手法は、フーリエ変換をするだけで実空間像が得られるため解析が簡単であるが、試料の他にピンホールを準備する必要があり、また空間分解能もピンホールサイズによって決定してしまう。高分解能の実空間像を得ようとピンホールのサイズを小さくしてしまうと、参照波の強度が弱くなってしまい、干渉項の強度も減少してしまう。その問題を解決するために、ピンホールを何個も開けることやスリット状のピンホールを使う手法も提案されている [17]。位相問題を解決するもう一つの手法が反復フーリエ変換による位相回復アルゴリズムである。試料の前に設置するピンホール形状などの事前情報を拘束条件に使い、計算によって位相問題を解く手法である [18]。本手法は参照波を必要としないため空間分解能がピンホールサイズに制限されることはない。本稿では、反復的位相回復アルゴリズムによる磁気イメージングの結果について示していく。

反復的位相回復アルゴリズムを簡単に説明しておこう。この解析手法は、実験を行う上ですでに判明している試料形状などの事前情報と観測によって得られた回折パターンを、それぞれ実空間と逆空間における拘束条件としてフーリエ変換と逆フーリエ変換を繰り返していく手法である。初めに 2次元検出器（本実験では CCD カメラ）のピクセル数と同じサイズの実空間画像を変数として準備して各ピクセルに乱数を割り当てる。この初期画像を 2次元高速フーリエ変換（FFT）によって回折パターンを計算する。当然ながらランダムな複素構造因子が計算される。ここで、その絶対値だけを観測値（強度の平方根）に置き換え、位相情報はそのまま残しておく。次にこれを 2次元の逆高速フーリエ変換（IFFT）によって実空間に戻すことを行う。実空間では、試料が存在する範囲（軟 X 線が透過してくる領域）が事前情報なので、その範囲外の強度はゼロになるという拘束条件を適用する。そこで得られた実空間像を、再度 FFT し、観測値の拘束条件を課し、IFFT して実空間の拘束条件を課す、というプロセスを何度も繰り返すことで最終的に位相問題が解けるというアルゴリズムである。この計算では、観測された回折パターンと計算によって得られた回折パターンの残差を最急降下法で最小化していくことに対応している。最急降下法であるために準安定解に

陥りやすい問題があるが、その欠点を解決するために実空間の拘束条件を甘くすることで準安定解に留まることを回避するHIO (Hybrid-input-output) 法が開発された [18]。この解析手法では収束速度は遅いが最安定解まで到達しやすいことが知られており、位相回復法ではよく用いられている。

位相回復アルゴリズムの実空間の拘束条件として使っているピンホールの形状を工夫すると位相回復アルゴリズムの収束性が向上することが分かっている [19]。ピンホールの対称性が高いと解の可能性がいくつか存在するため、正しい解への収束性があまり良くないが、面内に対称操作がない低対称性のピンホールを用いると解が限られる

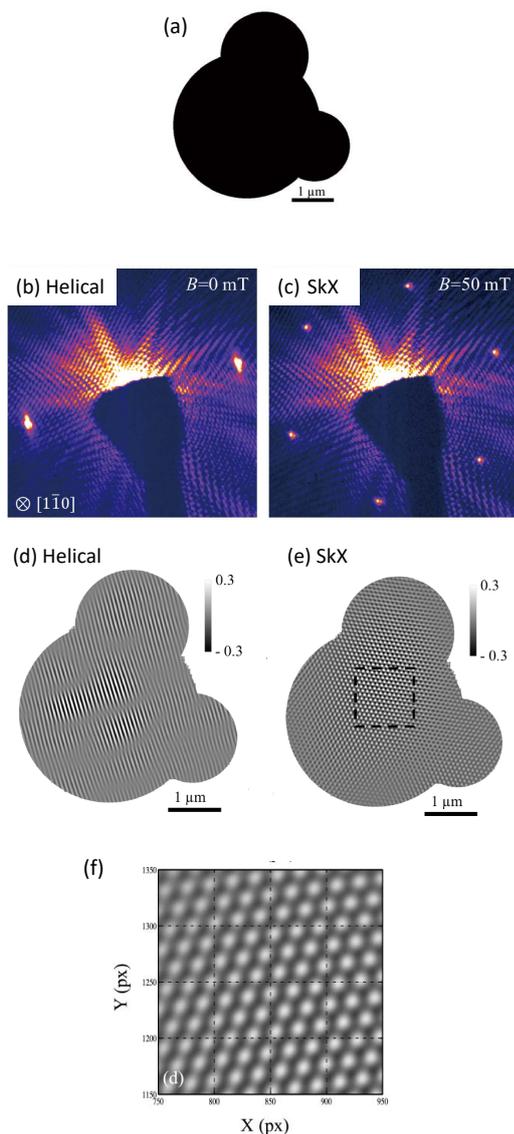


Figure 4 (a) Real-space support used for iterative phase retrieval. Resonant soft x-ray small-angle scattering patterns measured at $T = 280$ K and (b) $B = 0$ mT corresponding to the helical phase of FeGe; (c) $B = 50$ mT corresponding to the skyrmion crystal (SkX) phase. (d) Imaginary part of the reconstruction of the magnetic texture of FeGe at $B = 0$ mT (helical phase) and (e) $B = 50$ mT (SkX phase). The grayscale bar is given in arbitrary units. (f) Magnification of the real-space image of the skyrmion lattice obtained by the iterative phase retrieval.

ため収束性が向上する。本実験では Fig. 4(a) のようにクマの形をした低対称なピンホールを準備し、その上に FeGe の薄片試料を固定することを行った [20]。クマの耳が同じサイズであると鏡像の対称性が残ってしまうので、あえて耳のサイズは異なるようにしている。Fig. 4(b), (c) には実際にクマ型のピンホールに配置した FeGe からの共鳴軟 X 小角散乱の回折図形を示している。磁場がない状態 ($B=0$ mT) においてヘリカル磁気構造に由来する 2 つの磁気散乱が観測されており、50 mT の磁場を印加すると磁気スキルミオン格子に由来する六角形の磁気散乱が発現していることがわかる。クマ型のピンホール形状を事前情報として実空間の拘束条件に使い、反復的位相回復アルゴリズム (HIO 法) によって得られたヘリカル磁気構造と磁気スキルミオン構造の実空間イメージングの結果を Fig. 4(d), (e) ((f) は (e) の一部分を拡大したもの) に示している。ヘリカル磁気構造では縞状、磁気スキルミオン構造では三角格子を形成している様子が見取れる。今回の測定では倍波領域までの回折図形を使っているため、数十ナノメートル程度の空間分解能で実空間イメージングできていると評価される。

まとめ

BL-16A において開発してきた透過型共鳴軟 X 線小角散乱装置によって観測した磁気スキルミオン格子、及び、その電場や一軸応力応答、コヒーレント軟 X 線回折イメージングによる実空間観測について紹介した。磁気スキルミオンが発現する物質では、磁場、電場、圧力によって多彩な磁気構造が発現し、放射光の特性を活かすことで高精度に解明することができるようになってきた。今後は、外場を印加した状態でのコヒーレント軟 X 線回折イメージングを行うことにより磁気スキルミオンが空間的にどのように動いているかを観測することがターゲットになってくる。将来的には、放射光の短パルス特性を活用し、高速ダイナミクス計測を視野に装置開発を進めて行く。

謝辞

本研究は、Victor Ukleev (理研)、岡村 嘉大 (東大)、本田孝志 (KEK)、岡本淳 (台湾 NSRRC)、須田山貴亮 (産総研)、村上洋一 (KEK)、森川大輔 (東北大)、柴田基洋 (理研)、賀川史敬 (理研)、関真一郎 (理研)、金澤直也 (東大)、川崎雅司 (東大/理研)、十倉好紀 (東大/理研)、有馬孝尚 (東大/理研) の各氏との共同研究である。また、本稿の執筆においては、横山優一氏に助言を頂いた。本研究の一部は、日本学術振興会の最先端研究開発支援プログラム (FIRST) 及び科研費 (21224008, 22740243, 24224009(S), 25286090, 15H05456, JP15H05885) より助成を受けている。本研究における実験は、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 Photon Factory の研究課題 (課題番号: 2012S2-005, 2015S2-007) のもと BL-16A で行った。

引用文献

- [1] S. Muhlbauer *et al.*, *Science* **323**, 915 (2009).
- [2] X. Z. Yu, *et al.*, *Nature* **465**, 901 (2010).
- [3] J. Iwasaki; M. Mochizuki; N. Nagaosa, *Nature Nanotechnology* **8**, 742 (2013).
- [4] X. Z. Yu, *et al.*, *Nature materials* **10**, 106 (2011).
- [5] Y. Yamasaki, *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 220421 (2015).
- [6] K. Shibata *et al.*, *Nano Letters* **18** (2), 929-933 (2018).
- [7] S. Seki, *et al.*, *Science* **336**, 198 (2012).
- [8] Y. Okamura, *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 12669 (2016).
- [9] Y. Okamura, *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 184411 (2017).
- [10] Y. Okamura, *et al.*, *Phys. Rev. B* **96**, 174417 (2017).
- [11] K. Shibata, *et al.*, *Nature Nanotechnology* **10**, 589 (2015).
- [12] Y. Nii *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 8539 (2015).
- [13] Y. A. Izyumov, *Phys. Usp.* **27**, 845 (1984).
- [14] J. Miao, *et al.*, *Science* **348**, 530 (2015).
- [15] H. N. Chapman, *et al.*, *Nature* **432**, 885 (2004).
- [16] S. Eisebit *et al.*, *Nature* **432**, 885 (2004).
- [17] M. Guizar Sicaïros and J. R. Fienup, *Opt. Lett.* **33**, 2668 (2008).
- [18] J. R. Fienup, *Appl. Opt.* **21**, 2758 (1982).
- [19] S. Flewett, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 223902 (2012).
- [20] V. Ukleev, *et al.*, *Quantum Beam Sci.* **2**, 3 (2018).

(原稿受付日：2018年3月25日)

著者紹介

山崎裕一 Yuichi YAMASAKI

物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

e-mail: YAMASAKI.Yuichi@nims.go.jp

略歴：2009年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，2009年高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所助教，2014年東京大学大学院工学研究科量子相エレクトロニクス研究センター特任講師，理化学研究所創発物性研究センターユニットリーダー，2017年より現職。

最近の研究：コヒーレント軟X線回折，計測インフォマティクス，強相関物質。

中尾裕則 Hironori NAKAO

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

e-mail: hironori.nakao@kek.jp

略歴：1999年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了，高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 助手，東北大学 大学院理学研究科助教を経て，2009年より現職。
最近の研究：共鳴X線散乱を利用した構造物性研究。