

# X線・EUV結像光学ニューズレター

No. 54 2022年1月発行

## 太陽フレアを見る！！飛翔体に搭載する秒角分解能を目指した

### 高精度X線ミラーと高速度X線カメラの開発

国立天文台 成影 典之

JAXA 宇宙科学研究所 坂尾 太郎

名古屋大学大学院 理学研究科 三石 郁之

JAXA 宇宙科学研究所 渡辺 伸

東京大学カブリIPMU 高橋 忠幸

#### はじめに

太陽は地球に生きる生命にとって母なる恵みの星である。しかし時に、太陽フレアと呼ばれる太陽系最大の爆発を起こす(図1)[1]。この爆発は数分から数十分間の現象にも関わらず、解放されるエネルギーは時に  $10^{30}$  erg 以上にもおよび、これは地球で消費する電力量のおよそ1,200年間分以上に匹敵する(1回のフレアのエネルギーを  $10^{30}$  erg、世界の年間消費電力を2万3千テラワット時で計算)。このような太陽フレアは、コロナと呼ばれる太陽大気に蓄えられた磁場のエネルギーが爆発的に解放されることによって発生する。その結果、急激な加熱、大質量の放出、粒子の加速、電磁波の大量放射など、大規模でダイナミックな現象を引き起こす。そして時に、地球周辺の宇宙環境に大きな影響を及ぼすこともある。このような磁場をエネルギー源とした爆発現象は宇宙の至る所で見つかっており、太陽フレアは宇宙の活動そのものと言っても過言ではない[2]。

そこで我々は、太陽フレアで起きているエネルギーの解放・変換・伝搬の物理を理解することを目指し研究を進めている。その科学的意義は、太陽で起きている現象の理解を目指す太陽物理学の観点、地

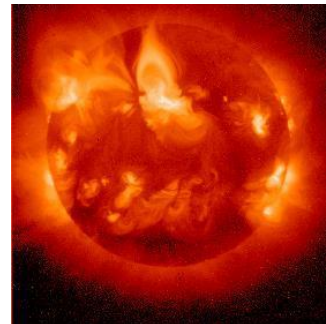


図1 日本の太陽観測衛星「ようこう」が捉えた大規模太陽フレアの軟X線画像。色は疑似カラー。太陽直径は約30分角。太陽面の中央上部に位置する「とんがり帽子」が太陽フレアによって生み出された構造で、フレアの規模に応じて数十秒角～数百秒角(太陽面上で数万km～数十万km)の大きさにまで成長する。

球周辺の宇宙環境変動の理解とその影響把握といった宇宙天気観点、そして太陽フレアを宇宙活動の一つのサンプルとして宇宙プラズマの物理を理解するという観点、と多角的であり、既存の研究分野の枠組みを超えた連携体制で研究を進めている。

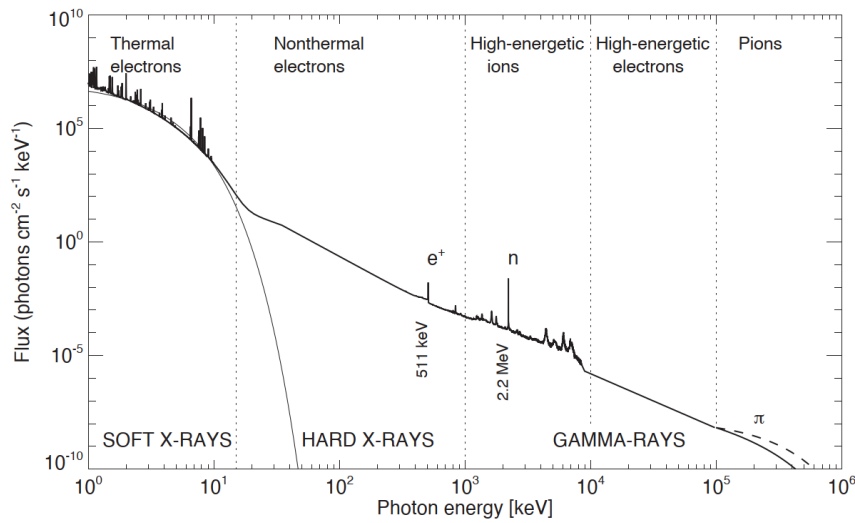


図 2 太陽フレア時のスペクトル [1]。軟 X 線帯域のスペクトルは数千万度のプラズマによって生み出されており、輝線と連続光成分で構成される。一方、硬 X 線帯域のスペクトルは、加速された電子によって生み出されており、冪型（両対数グラフで直線）のスペクトルを持つことが知られている。より高エネルギーのガンマ線帯域になると、イオンや相対論的電子の情報が得られる。

### 我々の研究手法

地球に最も近い恒星である太陽は、どの天体よりも明るい上、大規模エネルギー解放現象（フレア）を広い視野で、空間分解、時間分解して観測できる唯一の天体である。この点が、太陽が持つ研究対象としての魅力のひとつである。

図 2 は、太陽フレア時の X 線～ガンマ線帯域の放射スペクトルを示したものである。その放射の背景を簡単に説明する。太陽フレアが生じる前のコロナ環境は数百万度の熱的平衡プラズマである。そして一旦フレアが発生すると、数千万度に達するプラズマの生成、プラズマ塊の噴出、粒子の加速などが生じる。これらが X 線～ガンマ線帯域のスペクトルを形成するが、スペクトル（輝線群の強度や連続光成分の傾き）を測定することでプラズマの物理量を引き出すことが出来る。

一方、フレアによって生じる構造・現象のサイズは小さなもので数千 km（視野角で秒角）程度であり、それらが 1 秒間以下～10 秒間程度の時間で時々刻々と変化していく。

これらの現象の物理量を観測から見積もり、定量

的に物理を議論していくことが我々の研究手法である。そのためには、太陽フレアで生じる現象・構造を、空間・時間分解した上で、十分にエネルギー分解された X 線スペクトルを計測する必要がある。また構造によって X 線の輝度が桁で異なるため、暗い構造も明るい構造も同時に観測できる能力（ダイナミックレンジ）も求められる。以上をまとめると、表 1 を満たすような観測能力が必要ということになる。なおダイナミックレンジは、鏡を用いた直接撮像型装置（集光型望遠鏡）では、主に鏡で生じる散乱光（鏡の低散乱性能）で決まる。

しかし、このような高い空間分解能と高い時間分解能、そして高いダイナミックレンジが求められる天体観測用の X 線装置は前例がない。そこで我々は、高精度 X 線ミラーと X 線用高速度カメラの組み合わせによる太陽観測用 X 線集光撮像分光装置により、新機軸の太陽フレア観測の実現を目指している。

なお、X 線は地球の大気に吸収されるため、太陽を始めとする天体を観測するためには、宇宙空間からの観測が不可欠である。そこで、キー技術単体の基礎開発はもちろんのこと、観測ロケットを用いた

観測能力	要求値
軟X線・硬X線用の装置に共通の項目	
時間分解能	スペクトルの時間変化を追う場合 < 10 秒 強度の時間変化を追う場合 < 1 秒
軟X線用の装置に対する項目	
エネルギー範囲	0.5 keV – 10 keV
エネルギー分解能	< 0.2 keV (FWHM)
空間分解能	< 2 秒角 (FWHM)
ダイナミックレンジ	> 10 <sup>4</sup>
スペクトル毎の光子数	> 1600 個
硬X線用の装置に対する項目	
エネルギー範囲	5 keV – 30 keV
エネルギー分解能	< 1 keV (FWHM)
光源位置の決定精度	< 2 秒角
空間分解能	< 4 秒角 (FWHM)
ダイナミックレンジ	> 10 <sup>3</sup>
スペクトル毎の光子数	> 3200 個

表 1 太陽フレア観測に求められる性能

実証実験の機会も活用し、技術を磨いている。今回は、最新の開発状況と将来計画について紹介する。

### 軟X線用 ガラス研磨型 高精度ミラー

図 1 のように、軟X線帯域の観測は太陽のダイナミックな姿を見せてくれる。一方で、その観測に求められる要求は表 1 のように厳しい。そこで我々は、わが国に蓄積のあるナノテクノロジー技術を用い、高い空間分解能と低散乱特性という 2 つの優れた性能を持つ高精度斜入射X線ミラー（ガラス研磨による一体型の Wolter I 型ミラー）の国産開発を進めてきた（図 3）[3]。これまでの要素試作で、放物面部・双曲面部とも 3cm × 1cm 程度のごく小さな有効領域に対してであるが、天文観測用途として世界最高レベルの結像性能を達成した（ミラー単体で、8 keV のX線に対してHPD 0.2秒角、オフ軸角 10 秒角で散乱光レベルはピーク強度のほぼ 10<sup>-4</sup>）。また、試作を通じて精密 Wolter 表面創成の技術およびシンクロトロンX線による評価計測手法も獲得した。

このミラーは表 1 の要求を十分に満たしており、太陽フレア領域を詳細かつ鮮明に捉えることが可能となる。特に、太陽フレアにおける最重要観測領域

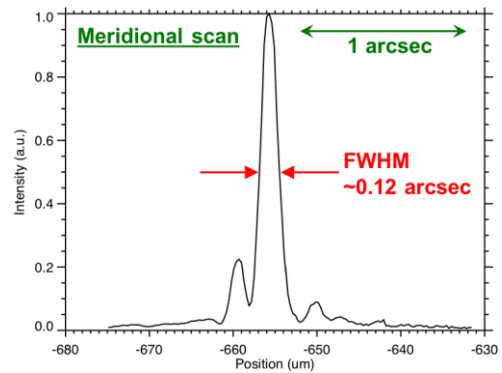
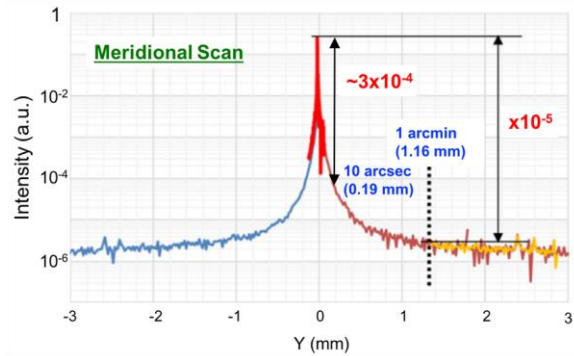
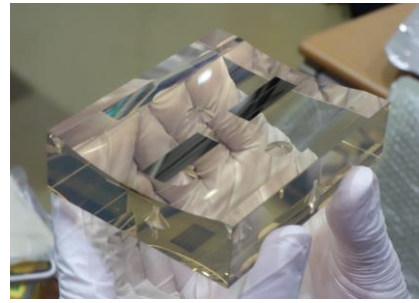


図 3 軟X線用 ガラス研磨型 高精度ミラーの試作品。

上段の写真：試作ミラーの写真。一体化した Wolter I 型ミラーで、手前側と奥側の金属コーティングされた長方形部分は、それぞれ精密に磨かれた放物線鏡面と双曲線鏡面となっている。

中段のプロット：8keV の平行X線を集光した際のX線の強度分布。

下段のプロット：8keV の平行X線に対する点拡がり関数（Point spread function、PSF）。

であるエネルギー解放領域は相対的にX線輝度が低く、既存の望遠鏡では観測が難しかった。本ミラーを用いた望遠鏡が実現すれば、科学的に極めて大きなインパクトを与えることは間違いない。

### 硬X線用 電気鋳造型 高精度ミラーと高精度ミラー保持機構

太陽フレアにおける硬X線の輝度は軟X線に比べ桁で小さいため、硬X線望遠鏡には空間分解能に加え集光力も同時に求められる。そのため我々は軟X線ミラーより大型の一体型 Wolter I 型高精度ミラーの開発を進めている。さらに、1つのミラーでは有効面積が足りないため、口径の異なる複数のミラーを5~10枚程度精度良く同心円状に配置するためのミラー保持機構もあわせて開発を進めている。

まず高精度ミラーについては、直径10mmスケールの地上用小型X線結像系開発にて培われた国産超高精度電気鋳造技術 [4] に着目し、大型化を図ることで天文観測用途への応用を進めている。すでに最重要技術課題である直径の大型化について、従来の6倍もの直径に相当する60mmのニッケルミラーを試作している。形状評価の結果、特に周方向の形状

誤差は全面にわたりRMS値にて  $3\ \mu\text{m}$  (設計焦点距離2mを仮定すると0.3秒角に相当) 程度以下と本手法世界最高精度を実現している。またX線結像イメージにおいても、結像点のピークの鋭さを示すFWHMは4秒角程度 (図 4 左参照) と、これまでの飛翔体搭載用X線望遠鏡と同程度を達成し、今後世界最高感度に並ぶうる感触を得ている。ただし、散乱光成分の寄与がより大きくなるHPDについては、母線方向の形状誤差により、局所的 (全体の3%に相当する領域に照射) には 30秒角、更に領域を限れば 20秒角 (0.5%) 程度が実現されているにも関わらず、全体では 50秒角程度以上となり、金型の加工精度や電気鋳造前後での転写精度の向上が必要となる。すでに新たな金型研磨法や厚膜ミラーの試作など、その大幅な改善を確認しており、さらなる改善を目指し開発中である。

高精度ミラー保持機構については、ミラー組み込み前後での性能劣化や複数ミラー間の結像点のばらつき抑制、さらには過酷な宇宙環境への耐性も同時に求められる。例えば表 1の要求性能を実現するためには、ミラー間の中心軸を  $\ll 40\ \mu\text{m}$  精度で保持しなければならない。現在は1枚鏡を想定しての基本

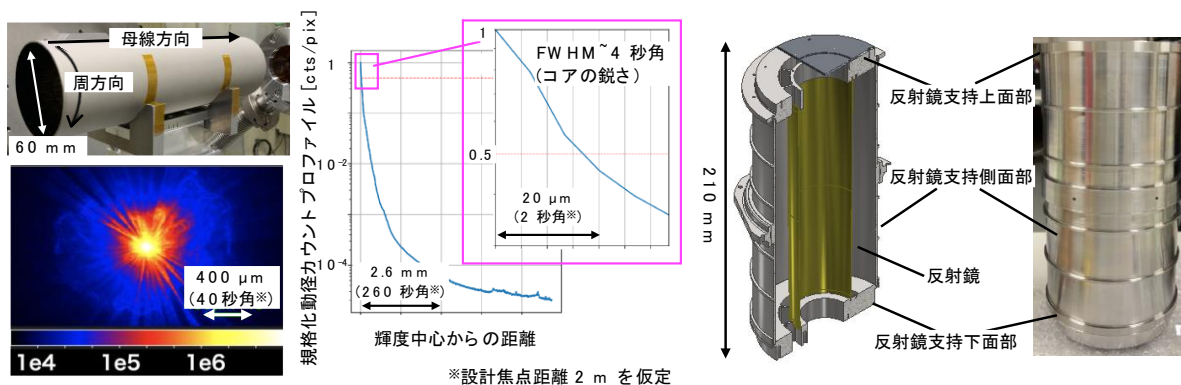


図 4 硬X線用 電気鋳造型 高精度ミラー (左) と高精度ミラー保持機構 (右) の試作品。  
 左図：直径 60mm 試作ニッケルミラーの写真 (左上) と 15keV X線結像イメージ (左下)、およびその点拡がり関数と中心拡大図 (右)。これらは現在執筆中の投稿論文から一部抜粋 (Mitsuishi et al., in prep.)。  
 右図：1枚鏡用の高精度ステンレス製ミラー保持機構のデザインとその試作品。



設計とその試作(図 4 右参照)までが完了している。またステンレス製の本試作保持機構と前述の試作ニッケルミラーを組み合わせでのX線照射試験を実施し、その前後でのX線性能に顕著な劣化が見られないことを確認している。今後は光線追跡シミュレータを用いての設計パラメータの最適化、高精度ミラー位置測定・調整システムの導入、および振動や熱等の宇宙環境耐性評価試験前後の性能評価を実施し、ミラー固着条件や組み込み方法の確立を目指す。

さて、ここからは検出器について紹介する。ミラーで集光されたX線は焦点面で像を結ぶが、我々はX線のスペクトルも取得したい。そのためには分光を行う必要があるが、空間・時間分解能も求められるため、検出器による光子計測という手法を採用する。これは入射したX線のエネルギーに比例した信号を出力することが可能な半導体検出器を用い、検出器の同一区画(例えば、同一ピクセル)に複数個のX線光子が入射するよりも十分に短い間隔で露光することで、個々のX線光子がもつエネルギー情報を取得するというものである。

### 裏面照射型CMOS検出器を用いた 軟X線用 高速度カメラ

軟X線については2秒角以下の空間分解能が求め

られるため、1秒角以下でのサンプリング、すなわち検出器面上で $10\mu\text{m}$ 程度のサンプリングが必要となる(望遠鏡の焦点距離を3mとした場合、1秒角離れた光源は、焦点面で約 $15\mu\text{m}$ 離れて結像する)。そこで、我々は $11\mu\text{m}$ 角のピクセルをもつ裏面照射型シリコンCMOS検出器を用いた高速度カメラを開発した(図 5) [5]。CMOS検出器は、ピクセル毎の高速読み出しが可能のため、例えば我々が用いた検出器では、 $2048\text{ピクセル}\times 2048\text{ピクセル}$ の全画素に対して毎秒48枚の読み出しが可能である。読み出す画素を制限し $384\text{ピクセル}\times 2048\text{ピクセル}$ とすると毎秒250枚の読み出し、すなわち4ミリ秒露光での高速連続撮像が可能となる。これにより、各ピクセルで毎秒3個程度のX線光子を検出することが出来る。このカメラを6台用意すれば、2秒角四方の領域( $3\times 3$ ピクセルの領域)に対して、10秒間毎に、1,600個以上の光子( $\sim 3\text{個}/\text{ピクセル}/\text{秒}\times 6\text{台}\times 9\text{ピクセル}\times 10\text{秒間}$ )を集めることができ、太陽フレア観測に必要な性能を満たす。

今回用いたCMOS検出器は、もともと可視光用・紫外線用として開発されたものであるが、裏面照射型であること、受光面側に施されたコーティングが薄いことを考えるとX線に対する感度が十分に期待された。そこで我々は、 $^{55}\text{Fe}$ 線源(5.9keV)や、放

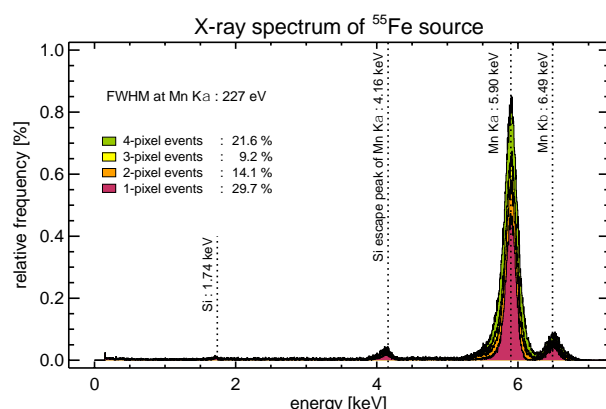
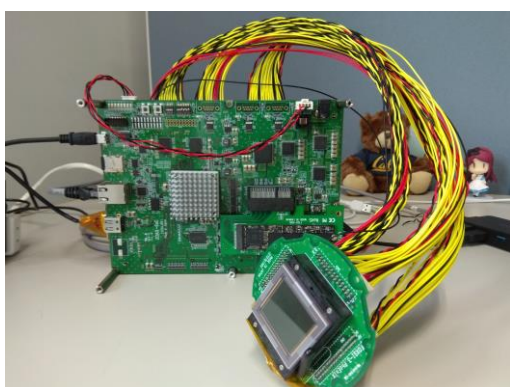


図 5 裏面照射型 CMOS 検出器を用いた 軟X線用 高速度カメラ。

左側の写真：観測ロケット実験 FOXSI-3 に搭載した裏面照射型 CMOS 検出器(手前の円形の基板に取り付けられた正方形の構造)と、検出器の駆動とデータ保存を担うカメラボード(後ろの長方形のボード)。右側のプロット： $^{55}\text{Fe}$ 線源を照射した際に得られたスペクトル。Mn K $\alpha$ 線と Mn K $\beta$ 線が分離しており、Si エスケープピークや、Si のラインも検出できている。信号の広がりには 4 ピクセル以内に収まっている。

射光（分子科学研究所UVSORのビームラインBL-2A；0.8keV～4keV）を用いた評価試験を行い、0.8keV～6keVのX線に対し、X線に対する十分な感度と光子計測能力を有することを見出した [6][7]。この検出器を用いた軟X線カメラは、後述する観測ロケット実験FOXSIに搭載し、世界初の太陽コロナの軟X線撮像分光観測を成功させた。

現在は、CMOS検出器の感受層の完全空乏化や厚みの増強など、性能向上に向けた開発を続けている。

### 狭ピッチ両面ストリップCdTe検出器を用いた 硬X線用 高速度カメラ

先にも述べたが、太陽ではエネルギーが高くなる（硬X線）ほど輝度が減少するため、硬X線用の検出器には高い感度が求められる。そこで原子番号が大きく、硬X線を効率的に止めることが可能なCdTeを用いた検出器が最適である。また太陽観測に必要な空間分解能も確保するため、CdTe半導体に狭ピッチの両面ストリップ構成を取ることで優れた撮像能力を実現させる。この様なコンセプトで開発を行ったCdTe検出器は、60 $\mu\text{m}$ という世界最小のピッチ幅を達成した [8]。読み出し方式については、太陽で硬X線が輝く領域は限定的なことを踏まえ、セルフトリガー方式（光子の入射を検出し自動で読み出す方式）とすることで、高速読み出しを可能と

した。こうして開発した硬X線用高速度カメラは、過去2回にわたって観測ロケット実験FOXSIに搭載、太陽硬X線集光撮像分光観測を成功させてきた（図6）。

現在、この検出器のさらなる性能向上を行っている。その一つが空間分解能の向上である。既存のCdTe検出器を評価したところ、複数ストリップに信号がまたがるイベントを用いれば、ストリップピッチより細かい位置分解能が達成できる見通しが得られている。そこで、CdTe検出器のストリップ電極形状を工夫することで、30 $\mu\text{m}$ の位置分解能を目指す。もう一つが、光子検出速度の向上である。将来の太陽フレア観測に向けては、従来比の10倍である5,000光子/検出器/秒にまで高速化する必要がある。そこで信号処理ASICの制御ロジックの改良を行い、高速の読み出しに対応する。

また検出器製造における歩留まりの改善にも取り組んでいる。既存の検出器を調査した結果、CdTe素子に熱と圧力がかかってしまうバンプ接合に歩留まり悪化の原因の可能性があることが判った。そこで、熱と圧力が極力かからない接合方法を開発するとともに、CdTe素子表面の電極へのワイヤーボンディングにも成功し、課題解決の見込みを得た。

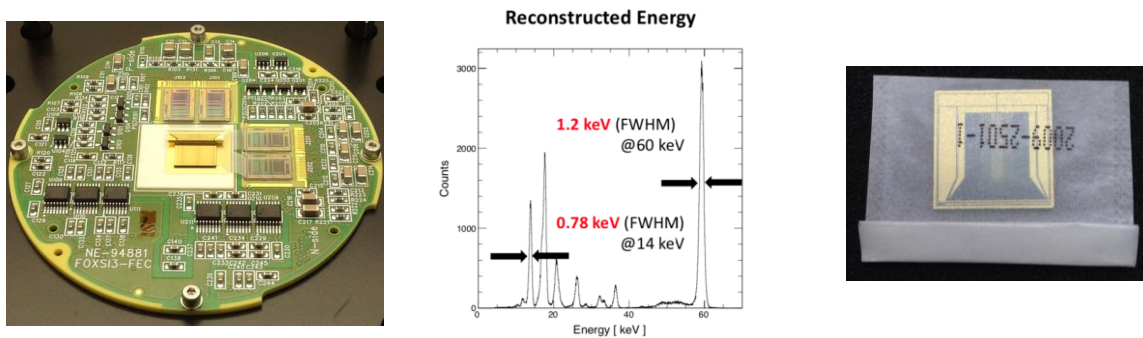


図 6 狭ピッチ両面ストリップ CdTe 検出器。

左側の写真：観測ロケット実験 FOXSI-3 に搭載した硬 X 線観測用の CdTe 検出器

中央のプロット：線源を用いた検出器の性能評価結果。

右側の写真：現在開発中の新規 CdTe 検出器。サブストリップレベルの位置決定精度と歩留まりの向上を目指して開発を進めている。

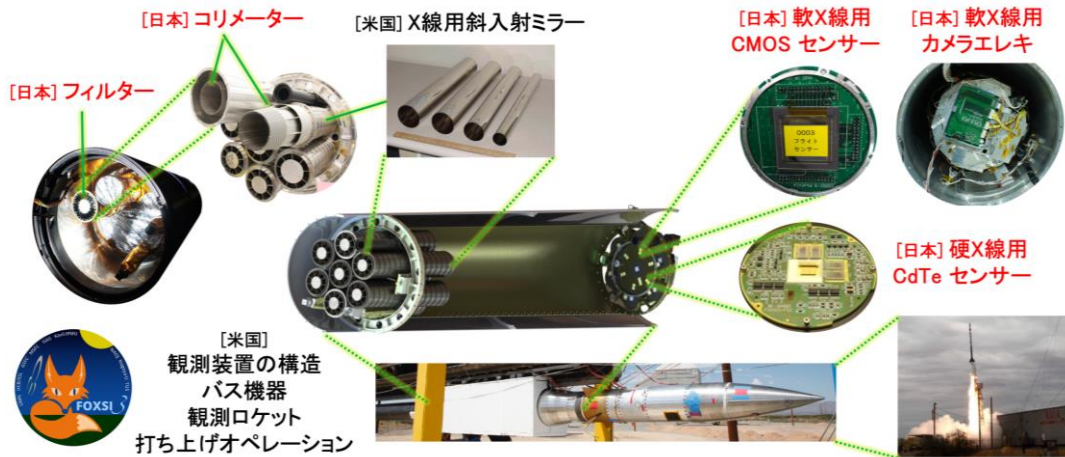


図 7 FOXSI の観測装置。望遠鏡を 7 本持ち、ミラーや検出器の種類を変えることで、様々な X 線観測を同時に実現できる。この図は、2018 年に実施した直近の FOXSI の飛行時 (FOXSI-3) の構成を示す。

### 高速データ処理システムの開発

我々はロケット実験のために小型化した高速データ収集 (DAQ) システムの構築にも取り組んでいる。軟 X 線用 高速度カメラ用には、CMOS 検出器からの大量のデータを処理するために汎用 SoC 搭載 I/O ボードと専用 FPGA IP の開発を進めている。また、硬 X 線用 高速度カメラでは、我々が開発した物理計測用 FPGA ボードを用いて CdTe 検出器の読み出しと機上でのデータ収集を行う。これらの開発においては汎用性と拡張性にも配慮しており、実際、宇宙科学研究所の大気球実験装置や国立天文台「すばる望遠鏡」の新型焦点面カメラの開発にも貢献している。

### 観測ロケット実験 FOXSI の機会を用いた実際の太陽観測

さて、新しい装置が完成すれば、実際に太陽を観測したいと思うのが研究者の自然な欲求であるが、X 線は地球大気によって吸収されてしまうため、観測装置を高度 150km 以上に持っていく必要がある。これは容易なことではないが、その方法のひとつに観測ロケットを用いた実験がある。衛星と違い、弾道飛行中 (打ち上げてから地上に落ちてくるまでの放物運動中) に観測を行うロケット実験では、観測時間は 5 分程度に限られる。しかし、衛星と比べ飛行機会が多いこと、衛星と比べコストが安価なこと、

観測装置の回収が可能で、再飛行が可能なことなど、新しい観測装置の実証の機会として最適である。実際、我々が開発した観測装置の一部については、日米共同・太陽 X 線集光撮像分光観測ロケット実験 Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) に搭載し (図 7)、太陽コロナ (太陽フレアは発生していない状態) の観測を行ってきた [9][10]。FOXSI は、NASA の観測ロケットを用いる実験で、これまでに過去 3 回の飛行を行ったが、毎回最新の観測装置を搭載し、そのたびに世界初の観測を実現してきた。その例を紹介する。

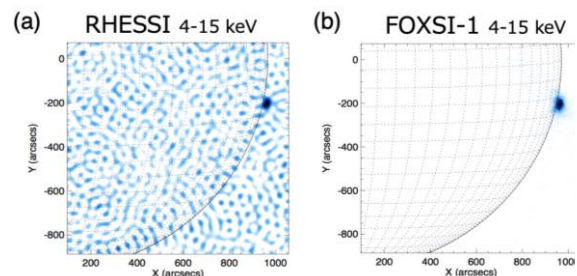


図 8 FOXSI による硬 X 線観測性能の向上。(a) 「すだれコリメータ」を用いた RHESSI 衛星による観測 (b) ミラーで集光して観測した FOXSI による観測





図 9 Nature Astronomy の表紙を飾った FOXSI-2 の成果 (Ishikawa et al. 2017)

2012年に実施したFOXSI最初の飛翔 (FOXSI-1) では、鏡を用いた世界初の太陽硬X線集光観測を試みた。それ以前の観測は「すだれコリメーター」を用いた間接撮像方式であり、像を作るには像合成が必要な上、輝度の低い領域にノイズが顕著に現れた。このため高いダイナミックレンジの達成が困難であった。FOXSI-1ではこの点の改善を目指し、電気鏡

造X線ミラーを用いた直接撮像に挑み、図 8 のようなノイズの無い硬X線像の取得に成功した [11]。

2014年に打ち上げた2回目の飛翔 (FOXSI-2) では、先に述べたCdTe検出器を用いた硬X線高速度カメラを搭載し、感度の大幅な向上をもたらした。その甲斐があり、フレア (エネルギー解放) が発生していないように見える領域において、超高温のプラズマを発見した。これは太陽コロナの加熱のメカニズムに繋がる発見で、Nature Astronomy 誌に掲載されるだけでなく、その表紙も飾った (図 9) [12]

2018年には、3回目の飛翔 (FOXSI-3) を行った。この飛翔から、軟X線の観測装置 (裏面照射型CMOS検出器を用いた軟X線用高速度カメラ) も搭載した (図 7)。そして、世界初となる太陽コロナの軟X線帯域での集光撮像分光観測に成功した (図 10) [13]。これにより、軟X線～硬X線帯域に及ぶ集光撮像分光観測技術が確立した [14][15]。

そして、2024年春、FOXSIの4回目の飛翔 (FOXSI-4) によって、我々はいよいよ大本命である太陽フレアの観測に挑む。そのため、現在、国産による電気

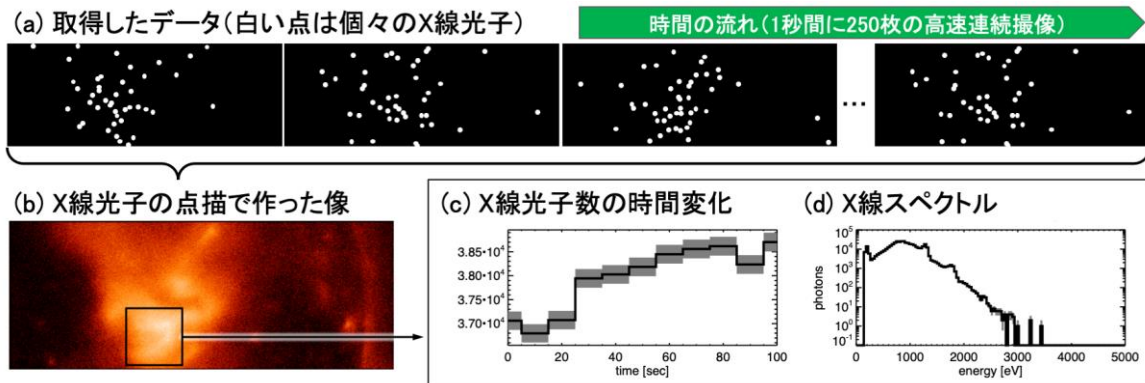


図 10 FOXSI-3 で実施した太陽軟 X 線に対する集光撮像分光観測

FOXSI-3 で取得した世界初の軟 X 線集光撮像分光データの一例。FOXSI-3 に搭載した CMOS 検出器は、1 秒間に 250 枚 (1 枚あたり 4 ミリ秒) のデータを約 6 分間取得した。図(a)は実際に取得したデータであるが、白い点 1 つ 1 つが 1 個の X 光子で、検出された信号の強度が X 線のもつエネルギーに比例する。つまり、このデータから X 線光子 1 個 1 個のもつ位置・時間・エネルギー情報を得ることが出来る。こうして計測した光子を空間上に配置すると、X 線の太陽画像が作れる (図(b))。また、領域毎に「X 線の時間変化を調べたり (図(c))」、「エネルギースペクトルを求めたりすること (図(d))」が出来る。



鋳造型ミラーの高空間分解能化と、検出器の高速化・高感度化に取り組んでいる。これらが完成すれば、データの質の大幅な向上が期待できる（図 11）。

なお観測時間が約5分間に限られる観測ロケットを用いて、発生の予測が困難である太陽フレアを観測することは容易ではない。FOXSI-4では、観測ロケットを打ち上げ可能状態で待機させ、リアルタイムで太陽の状態を監視、フレアの発生と同時に打ち上げるというNASAにとっても初めてのロケット打ち上げオペレーションにチャレンジする [16]。

### 太陽フレアをX線で定常的に観測する衛星計画

観測ロケット実験FOXSIシリーズの将来展開として、我々は衛星を用いた定常的な太陽フレア観測も計画している。この計画は、PhoENiX計画と名付けられ、2030年代前半の太陽活動が活発になる時期に打ち上げるべく、現在、検討を進めている [17]。この計画では、本稿で紹介したガラス研磨型のミラーも使用する予定で、図 11にも増した、まだ誰も見たことがない世界最高レベルの太陽X線画像の取得が期待できる。

読者の皆様は、X線計測技術に強い関心をお持ちと思いますが、我々が開発を進めている新しい技術と、それによってベールを脱ぐ誰も見たことがない太陽の姿に、ぜひご期待下さい。

### 謝辞

本研究は、国立天文台、JAXA 宇宙科学研究所、東京大学カブリ IPMU、名古屋大学、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校、NASA マーシャル宇宙航空飛行センター、NASA ゴダード宇宙航空飛行センターの共同研究によるものである。軟 X 線用 ガラス研磨型 高精度ミラーは、大阪大学大学院工学研究科の山内和人先生、名古屋大学大学院工学研究科の松山智至先生、および両研究室の皆様とともに開発を進めている。加えて硬 X 線用 電気鋳造型 高精度ミラー開発は、産学連携で進めており、東

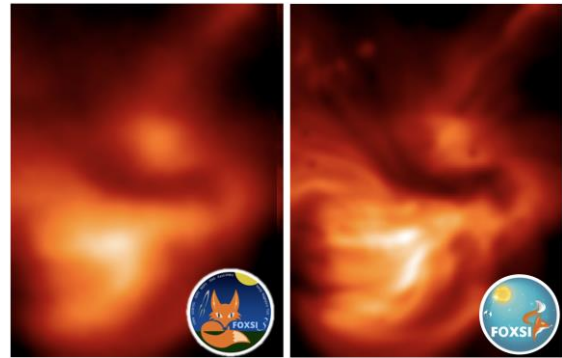


図 9 FOXSI-4 で期待される観測データ。左が FOXSI-3 で取得した実際のデータで、右が FOXSI-4 で期待されるデータの画質。

京大学大学院工学系研究科 三村秀和先生と山口豪太氏、夏目光学株式会社 テクノロジーセンターに多大なるご協力をいただいている。また、国立天文台・先端技術センター、分子科学研究所・UVSOR (BL2A)、理化学研究所 SPring-8 (BL29XU, BL20B2)、JAXA 宇宙科学研究所、名古屋大学・全学技術センターの施設利用によって実施している。そして、JSPS 科研費 21KK0052, 21H04486, 20H00153, 19H05609, 18H03724, 18H05463, 17H04832, 16H02170, 16H03966, 15H03647, 26247031, 24654053, 24244021, 21540251, 20244017、JAXA 宇宙科学研究所 小規模計画、戦略的開発研究経費、名古屋大学 宇宙地球環境研究所 国際共同研究の助成を受けている。最後に、研究を一緒に進めている学部生・大学院生・技術補佐員、開発にご協力頂いているメーカーの方々に感謝申し上げます。

### References

- [1] M.J. Aschwanden, “Physics of the Solar Corona. An Introduction”, by. Published by Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK, and Springer-Verlag Berlin ISBN..3-540-22321-5 (2004).
- [2] T. Tajima and S. Shibata, “Plasma astrophysics”, Cambridge, Mass. : Perseus Publishing (2002).

- [3] T. Sakao, et al., "Development of precision Wolter mirrors for solar x-ray observations", Proceedings of the SPIE, Volume 10386, id. 103860E 11 pp. (2017).
- [4] H. Mimura, Y. Takei, T. Kume, Y. Takeo, H. Motoyama, S. Egawa, Y. Matsuzawa, G. Yamaguchi, Y. Senba, H. Kishimoto, and H. Ohashi, "Fabrication of a precise ellipsoidal mirror for soft X-ray nanofocusing", Review of Scientific Instruments, 89, 093104-1 – 093104-7 (2018).
- [5] S. Ishikawa, et al., "High-speed X-ray imaging spectroscopy system with Zynq SoC for solar observations", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 912, 191–194 (2018).
- [6] N. Narukage, et al., "High-speed back-illuminated CMOS sensor for photon-counting-type imaging-spectroscopy in the soft X-ray range"; Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 950, 162974 (2020).
- [7] N. Narukage and S. Ishikawa, "Evaluation of a Flight High-Speed Back-Illuminated CMOS Sensor in a Soft X-Ray Range for FOXSI-3 Sounding Rocket Project", UVSOR ACTIVITY REPORT 2017, page 33 (2017).
- [8] K. Furukawa, et al., "Development of 60  $\mu$  m pitch CdTe double-sided strip detectors for the FOXSI-3 sounding rocket experiment", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 924, p. 321–326 (2019).
- [9] S. Christe. et al., "FOXSI-2: Upgrades of the Focusing Optics X-ray Solar Imager for its Second Flight", Journal of Astronomical Instrumentation, Volume 5, id. 1640005-625 (2016).
- [10] 観測ロケット実験 FOXSI のホームページ : <https://phoenix-project.science/foxsi>
- [11] S. Krucker, et al., "First Images from the Focusing Optics X-Ray Solar Imager", The Astrophysical Journal Letters, 793L, 32 (2014).
- [12] S. Ishikawa, et al., "Detection of nanoflare-heated plasma in the solar corona by the FOXSI-2 sounding rocket", Nature Astronomy, 1, 771–774 (2017).
- [13] FOXSI-3 観測成功のリリース : <https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3-data-release-jp-20190115/>
- [14] 成影, 「太陽X線光子を数える!新しい太陽コロナ観測の幕開け」, 国立天文台ニュース 2019 年 5 月号 [https://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao\\_news\\_0310.pdf](https://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao_news_0310.pdf)
- [15] Narukage, N., "Connecting the Dots: FOXSI-3 Data Points Add Up to Unprecedented Image of Solar Corona", Space Research Today, Volume 205 (2019).
- [16] A. Winebarger, L. Glesener, and K. Reeves, "A White Paper on the Scientific Motivation and Feasibility of Introducing Routine Solar Flare Campaigns for Sounding Rockets", <https://rscience.gsfc.nasa.gov/keydocs/SolarFlareCampaign.pdf>
- [17] 衛星計画 PhoENiX のホームページ : <https://phoenix-project.science/>

## X線磁気トモグラフィーによる3次元磁区構造観察

関西学院大学工学部

鈴木基寛

放射光 X 線トモグラフィーの特長は、材料の内部を高い空間分解能で観察でき、さらに試料の状態までも解析できる点にある。近年では XAFS とトモグラフィーを組み合わせることで、密度や元素分布の3次元観察だけでなく化学状態や価数状態までも3次元的に可視化することが可能となっている[1,2]。一方で、磁気イメージング法の歴史は古く、X線以外にも可視光の偏光や電子線、中性子、磁気力顕微鏡などを用いて磁性体の磁区構造やスピン配列の観察が広く行われている。しかし、従来の手法で観察できるのは、試料表面での2次元的な磁区構造に限られていた。バルク磁性体の内部では一般的には立体的な磁区構造が形成され、系の磁性と密接に関係している。磁区構造の3次元観察は磁性研究者の誰もが望んでいたが、長らく実現できなかった課題であった。しかし最近になって、X線磁気円二色性(XMCD)とトモグラフィーを組み合わせた3次元磁気観察、すなわちX線磁気トモグラフィー法がいくつかのグループから報告されるようになった[3-7]。本稿では、われわれが開発した硬X線円偏光集光ビームを用いた走査型の磁気トモグラフィー法[8-10]について、これまでの成果を紹介する。

X線磁気トモグラフィー法の開発は SPring-8 の BL39XU 磁性材料ビームライン[9]で行った。このビームラインではダイヤモンド移相子による円偏光 X 線が得られ、硬 X 線領域の XMCD 分光による磁性研究に主に用いられている。光源から 74 m の距離にある第二実験ハッチ(ナノ分光ステーション)では、KB ミラー集光により 100 nm 径の X 線ナノビームが得られる。BL39XU は硬 X 線領域でナノ集光された円偏光ビームが得られる世界でも例を見ない実験ステーションであり、焼結磁石の磁気イメージング[11]、ビットパターン材料等の微小磁性試料の元素選択的磁気ヒステリシス解析[12]、および磁性

マイクロディスクの時間分解測定[13]等の研究に活用されている。

X線磁気トモグラフィー測定の開発は、BL39XU に既設のナノビーム走査型 XMCD 磁気イメージングのセットアップに、試料の精密回転機構を付加することで行われた。図 1(a)にダイヤモンド移相子以降の光学系を、図 1(b)に試料ステージ周りの写真を示す[8-9]。真空封止アンジュレーターからの直線偏光 X 線を Si 111 二結晶分光器で単色化し、ダイヤモンド移相子により右または左回りの円偏光 X 線に変換し、最後に KB ミラーによる集光を行う。試料位置で水平、垂直方向とも 100~150 nm(半値幅)のナノビームが定常的に得られている。図 1(b)に示すように、われわれが導入したトモグラフィー装置では、試料と小型の電磁石が精密回転ステージと X-Z 並進ステージの上に設置されており、電磁石と試料は一体となって回転と並進を行う。筐体内部のコイルからの漏れ磁束により試料位置に磁場を印加するプロジェクション型の電磁石を用いているため、試料の高さには磁極等の部品が存在しない。そのため、X 線のビーム高さにおいて水平面内 360° 全周にわたり自由な空間が確保でき、X 線が遮られることなくトモグラフィー測定を行うことができる。

走査型磁気トモグラフィー測定では、試料位置を入射 X 線ビームに垂直な X-Z 平面上で走査し、各位置での透過 X 線強度および XMCD 信号を測定することで、試料の吸収係数(XAS)および磁化分布に相当する2次元の投影像をそれぞれ取得する。そして、多数の試料角度  $\theta$  において測定した2次元投影像から、トモグラフィー再構成計算によって3次元像を得る。XMCD 信号の測定には偏光変調法[14]を用い、試料透過 X 線強度を検出する PIN フォトダイオードの出力のうち円偏光変調と同期した交流信号成分をロックインアンプで測定した。XAS 信号は



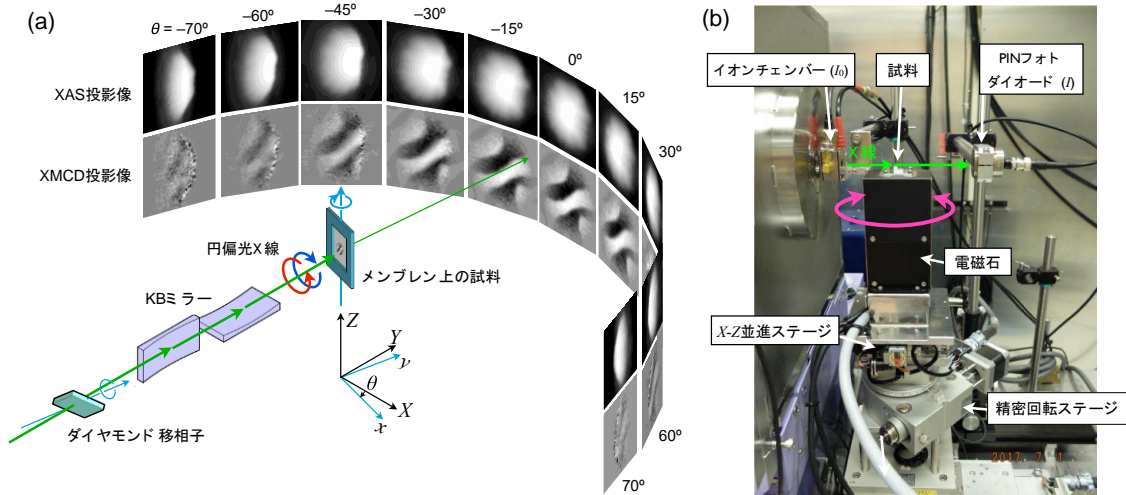


図 1: (a) 走査型X線磁気トモグラフィー実験のセットアップ。異なる試料角度に対する XAS および XMCD 投影像を模式的に示す。(b) 試料およびステージ回りの様子。左側に写っているのは KB ミラーの真空チェンバー。

PIN フォトダイオードの直流成分を検出することで、XMCD と同時に測定した。走査型磁気トモグラフィー測定では、投影像 1 枚あたりの測定時間は 20 分～30 分であり、全角度のデータを取得するのに半日程度を要する。したがって、高精度な測定を実現するためには試料位置や集光ビームの長時間の安定性が非常に重要である。試料位置のドリフトを低減するため、装置が設置されている実験ハッチには断熱シールドと精密空調が施されており、ハッチ内の気温変動は $\pm 0.05^\circ\text{C}/\text{日}$ 以内に抑えられている。

以下では、磁気トモグラフィー法開発のためのモデル試料として用いた GdFeCo 合金マイクロディスクを例として、測定結果と磁化分布の再構成計算について述べる[8]。試料として用いた GdFeCo は垂直磁気異方性を示すフェリ磁性体である。日本大学 塚本研究室にて SiN メンブレン基板上への成膜を、京都大学化学研究所の小野研究室にて、フォトリソグラフィと Ar イオンミリングによる微細加工を行った。

X 線のエネルギーは Gd の  $L_3$  吸収端での XMCD 信号が最大となる  $7.247\text{ keV}$  に設定した。XAS および XMCD 投影像を $-70^\circ \sim +70^\circ$  の範囲で $5^\circ$  ステップで測定した。得られた投影像のいくつかを図 1(a) に示す。XAS 投影像は試料の密度分布を、XMCD 投影像は磁化分布を反映している。X 線が試

料に垂直に入射する  $\theta = 0^\circ$  において XMCD 投影像のコントラストが最大となっており、試料の磁化が円盤面と垂直に向いていることを示唆している。

一般的なトモグラフィー法では X 線吸収投影像というスカラー量の測定値から(電子)密度というスカラー量の分布を再構成計算によって得る。それに対して、磁気トモグラフィー測定では、測定値として得られる XMCD 投影像はスカラー量であるが、元の磁化分布はベクトル量であるという点が異なる。XMCD 信号は磁化ベクトルの X 線の進行方向への射影成分に比例するため、次式が成り立つ。

$$\Delta\mu = \mu^+ - \mu^- \propto \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{m} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta\mu$  は XMCD 信号の振幅、 $\mu^+$ 、 $\mu^-$  はそれぞれ(+)回りおよび(-)回りの円偏光に対する吸収係数、 $\mathbf{e}_k$  は X 線の進行方向の単位ベクトル、 $\mathbf{m}$  は磁化ベクトルである。また、磁化ベクトルの大きさを $|\mathbf{m}|$ 、X 線と磁化ベクトルの成す角を $\alpha$ とすると、

$$\Delta\mu \propto |\mathbf{m}| \cos \alpha \quad (2)$$

と表される。式(2)から分かるように、元の 3次元磁化ベクトルは3つの自由度を持つのに対して、射影をとることで2つの自由度(変数)に減ってしまう。つまり、XMCD の投影像には、磁化ベクトル分布の一部の情報しか含まれていないことを意味する。したがって、磁化ベクトルが任意の大きさと方向を取りうる一般的な場合には、一軸回りの XMCD 投影

像のデータセットから3成分の磁化ベクトル分布を再現することはできない。少なくとも異なる2軸回りの投影像のデータセットを測定する必要がある[4,7,15]。一方で、われわれはある限定された条件について成立する再構成法を考案し、一軸回りのトモグラフィーデータセットから3次元の磁化分布を得る方法を提案した。詳細は文献[8]を参照いただきたいが、試料の磁化が $\mathbf{m} = (0, m_y, 0)$ のように1成分だけ有限な値をもち、他の2成分がゼロである場合には、XMCDのX線方向に沿った投影は、

$$\Delta\mu(X, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} m_y(x, y) \cos\theta dY \quad (3)$$

と表される。ここで、 $(X, Y, \theta)$ は測定系の座標であり、 $(x, y)$ は試料に固定された座標である。この式は、 $\cos\theta$ の係数以外は通常のラドン変換の表式と同じである。われわれは、代数的逐次近似法のアルゴリズムに $\cos\theta$ の係数を考慮した修正を施すことで、3次元の磁化分布を再構成することに成功した。以下で紹介する研究の対象試料は全て一軸磁気異方性をもち、ただ一つの磁化ベクトル成分だけをもつという上記の条件を満たす。

このようにして得られた、GdFeCo マイクロディスクの3次元再構成像を図2に示す[8]。図2(a),(b)

は XAS 投影像から通常の再構成アルゴリズムによって得られた試料の3次元密度分布とその断層図である。円盤の直径は  $6.7\ \mu\text{m}$ 、中心部の厚さは  $2.5\ \mu\text{m}$  である。断層図から、試料内部が均一な密度分布をもつことがわかる。図2(c),(d)に示すのは、XMCD 投影像から得られた3次元の磁化分布である。試料は熱消磁状態であり、測定時に磁場は印加していない。赤と青のカラースケールは、円盤面に垂直な磁化成分の強度と符号を表している。磁区像の断層図(図2(d))から、垂直磁区が円盤試料の厚さ方向に貫通して形成されていることが直接に示された。正負の磁区の境界が空間分解能よりも十分に急峻だという仮定のもと、3次元磁区像の空間分解能は  $360\ \text{nm}$  と見積もられた[8]。

次に紹介するのは、永久磁石材料であるネオジム焼結磁石 ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) の単一粒子の観察結果である。図3に実験から得られた再構成像を示す[9]。直径  $6\ \mu\text{m}$  の磁石粒子を焼結磁石のバルク試料から取り出し、SiN メンブレン上に散布したのち樹脂で固定した。磁気トモグラフィー測定は Nd  $L_2$  吸収端で行った。図3(a)は XAS トモグラフィーによる Nd 密度の3次元分布である。試料内部に Nd 濃度の高い領域が2箇所見られ、Nd が直径  $500\ \text{nm}$  かそれ以下の

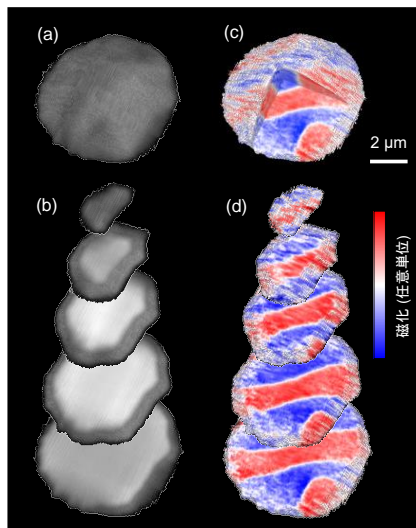


図2: GdFeCo 合金マイクロディスクの3次元再構成像[8]。(a)XASトモグラフィーによる密度分布および(b)その断面像。(c)磁気トモグラフィーによる3次元磁化分布および(d)断面像。

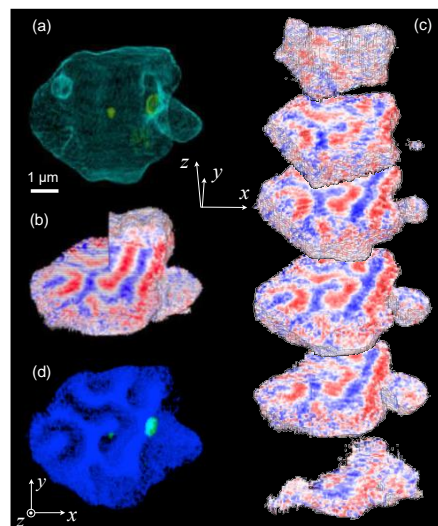


図3: ネオジム磁石粒子の3次元再構成像[9]。(a)Nd密度分布、(b)磁化分布、(c)磁化分布の断層像、(d)高Nd密度部位(水色)と負の磁区を重ね合わせて表示した図。

大きさを偏析している。図 3(b),(c)は3次元磁区像であり、磁化容易軸に沿った方向に幅 500 nm 程度の迷路状の磁区が貫通している。熱消磁状態では迷路状の磁区がネオジム磁石粒子表面に形成されることはよく知られているが、磁区が粒子内部に貫通していることを直接観察したのは本研究が初めてである。図 3(d)に、負の磁区と Nd の濃度分布を重ねた図を示す。Nd の偏析部位は、磁区の境界とよく一致している。これは、偏析 Nd が欠陥となり、磁壁の移動をピン留めしている可能性を示している。バルク磁性体の内部で3次元的な磁壁のピン留めサイトを直接観測した初めての例だと言える。

最後に、最近報告されたスキルミオンひも構造の3次元形状の直接観察[10]について紹介する。近年、磁気スキルミオンと呼ばれるナノスケールの渦状スピン構造が発見され盛んに研究が行われている[16]。スキルミオンは理想的な2次元系ではトポロジカルに安定な粒子として振る舞い、結晶表面や薄膜について、ローレンツ電顕、光電子顕微鏡、中性子回折、コヒーレント X 線回折等によるスキルミオン渦構造の観察が報告されている。一方で理論計算によれば、バルク結晶のような3次元系では、図 4(a)のようにスピンの竜巻状に配列した、「スキルミオンひも」と呼ばれるひも状の構造が発現することが予測されている[17]。しかし、従来の2次元的なイメージング手法では、スキルミオンひもの3次元的な形状を実験的に可視化することはできなかった。そこでわれわれは、室温でスキルミオンひも構造の形成が予測されている Mn-Pt-Pd-Sn 合金に磁気トモグラフィー法を適用することで、バルク内部のスキルミオンひもの3次元形状を観察することに初めて成功した。

図 4(b)に、ウェッジ状に微細加工した Mn-Pt-Pd-Sn 合金試料の3次元磁区構造を示す[10]。BL39XU において、PtL<sub>3</sub>吸収端で行った磁気トモグラフィー測定によって得られた結果である。試料の[001]方向に沿って 437 mT の磁場を印加した状態で測定を行った。この磁場下において、[001]方向に沿って試料内部に形成された直径 500 nm 程度のスキルミオ

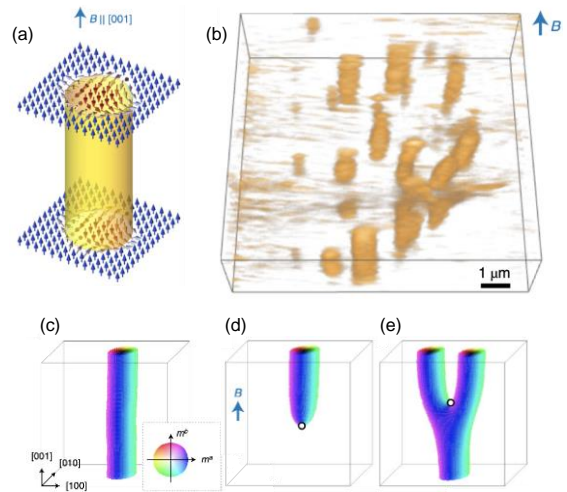


図 4: (a)スキルミオンひものスピン構造の模式図。(b)磁気トモグラフィー方によって観測された Mn-Pt-Pd-Sn 合金のスキルミオンひもの3次元形状。(c),(d),(e)理論的に予測される様々なスキルミオンひもの形状 [10]。

ンひも構造を可視化することに成功した。この観察結果から、試料内部をほぼ真つすぐに貫通した形状のスキルミオンひもの存在が初めて実験的に証明された。ひもの内部では、平均として周囲とは逆方向にスピンの配列しており、理論計算の予測(図 4(c))と一致している。さらに、途中でひもの形状が途切れたり、分岐したりといった様々な欠陥構造が存在することが明らかになった。これらの構造も理論的な予測(図 4(d),(e))と一致している。磁気トモグラフィー法によって、従来、実験的に未解明だったスキルミオンひもの3次元形状の直接観察が可能となった。今後も外場による応答などに研究を進展させることでスキルミオンの情報担体としての性質のさらなる理解に貢献することが期待される。

X 線磁気トモグラフィー法は、本稿で紹介した以外にも、バルク焼結磁石や磁性膜など様々な実用磁性材料への適用が可能である。今後の課題として、数テスラの強磁場印加条件下での磁気トモグラフィー測定の開発が挙げられる。これによって高性能永久磁石材料の磁区形成過程の3次元観察による保磁力発現機構の解明につながる。測定時間短縮のために走査型に代わってフレネルゾーンプレートや Advanced KB ミラー [18,19] を用いた結像型の磁気トモグラフィー法の開発も行っていきたい。さら



に、再構成アルゴリズムに関しても、より精度の高い解析や適用材料の拡大のために、ベクトル再構成法[3,4,7]を採り入れていく必要がある。

本研究は、京都大学化学研究所 小野輝男教授、日本大学 塚本新教授、東京大学大学院 関真一郎准教授、東北大学 中村哲也教授らとの共同研究として行われました。ネオジム磁石試料は日立金属株式会社から提供いただきました。また、科研費（17H02823, 20H00349）、元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM)、(課題番号 JPMXP0112101004)の支援を受けました。

#### 参考文献

- [1] H. Matsui et al., *Angew. Chem. Inter. Ed.* 56 (2017) 9371.
- [2] M. Hirose, et al., *Commun Chem* 2, (2019) 50.
- [3] C. Donnelly et al., *Nature* 547 (2017) 328.
- [4] C. Donnelly and V. Scagnoli, *J. Phys. Cond. Mat.* 32 (2020) 213001.
- [5] C. Donnelly, et al., *Nature Nanotech* 15, (2020) 356.
- [6] C. Donnelly, et al., *Nat Phys* 17 (2020) 316.
- [7] A. Hierro-Rodríguez et al., *Nat Comms* 11 (2020) 6382.
- [8] M. Suzuki et al., *Appl. Phys. Express* 11, (2018) 036601.
- [9] M. Suzuki et al., *Synchrotron Rad. News* 33 (2020) 4.
- [10] S. Seki, M. Suzuki, T. Ono et al., *Nat Mater*(2021). <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01141-w>

- [11] M. Suzuki et al., *Acta Mater.* 106 (2016) 155.
- [12] M. Suzuki, Y. Kondo, and J. Ariake, *J. Appl. Phys.* 120 (2016) 144503.
- [13] N. Kikuchi et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 59 (2020) SEED03.
- [14] M. Suzuki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 37 (1998) L1488.
- [15] C. Donnelly et al., *New J. Phys.* 20 (2018) 083009.
- [16] S. Seki et al., *Science* 336 (2012) 198.
- [17] P. Milde et al., *Science* 340 (2013) 1076.
- [18] S. Matsuyama et al., *Sci. Rep.* 7 (2017) 46358.  
J. Yamada et al., *Optica* 7 (2020) 367.

## 編集部より

---

原稿をご提供いただいた、成影先生、鈴木先生に感謝いたします。そして、諸事情で出版が遅くなったことをお詫びいたします。去年に引き続き、今年も COVID-19 の影響で、国際会議は軒並み対面開催は中止、ほとんどオンラインになってしまいました。この形だと、会議全体に参加する方は減り、会議全体に対する俯瞰的な報告を書いて頂ける方を探すことが困難でした。去年に引き続き今号でもやむを得ず国際会議報告の掲載をあきらめざるをえませんでした。ご容赦ください。オミクロン株の流行が日本でも懸念され、2022 年も予断は許されませんが、早いうちに COVID-19 が収まり、通常通りの研究活動が再開されることを願っております。編集部一同、読者のみなさまのご健康を願っております。今後ともよろしく願いいたします。

(文責・松本浩典)

### 【メーリングリスト（登録メールアドレスの変更などについて）】

本ニュースレターは原則、メーリングリスト (xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp) によるメール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部 (xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp) までご連絡ください。メーリングリストは、研究会のお知らせなど、会員全員に情報を配信したいときなどにも便利なので、積極的にご活用ください。

---

X線・EUV 結像光学ニュースレター  
No. 54 (2022 年 1 月)

発行 一般社団法人日本光学会 X線・EUV 結像光学研究グループ  
(代表 兵庫県立大 籠島靖)

編集部 木村 隆志 (東京大学)、齋藤 彰 (大阪大)、  
高野 秀和 (理研)、西野吉則 (北海道大)、  
東口 武史 (宇都宮大)、松本 浩典 (大阪大)、  
山内 和人 (大阪大)  
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

---