

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00661

研究課題名(和文) 共鳴X線回折による拡張磁気多極子秩序の研究

研究課題名(英文) Study of extended magnetic multipole orders by resonant x-ray diffraction

研究代表者

田中 良和 (Tanaka, Yoshikazu)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・特別嘱託研究員

研究者番号：90250109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 39,120,000円

研究成果の概要(和文)：キラリティは時間、空間反転をともに破る拡張多極子に内在し、異常輸送現象の発現や磁性絶縁体における非自明な交差相関などの新たな現象を説明する鍵となっている。拡張多極子が織りなすドメインとその制御を行うため、我々は、円偏光を用いた共鳴X線回折による開発研究を行った。軟X線領域においてゾーンプレートによる集光システムを構築し、従来の空間分解能を飛躍的に向上させることができた。拡張磁気秩序の研究として、六方晶フェライトSr₃Co₂Fe₂₄O₄₁、CuOの磁気ドメイン構造、反磁気四極子秩序を示すPb(TiO)Cu₄(P₀₄)₄のドメイン構造、TbB₄のドメイン構造の研究などをおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の研究成果は、共鳴X線回折法の実験技術の開発とそれに伴う研究開発を含んでいる。この方法は物質の性質の担っている電子スピンそのものの対称性を対象としている。そのため、単に偏光顕微鏡で見られるような対称性に基づいたドメインの観察ではないことに意味がある。物性を担う空間分解能を向上させることによってドメインがより詳細に見えるようになった。ゾーンプレートによる集光は、従来の空間分解能を二桁向上させたことになる。また、磁気散乱と電荷散乱の干渉を利用する方法は、いままで見る事ができなかった対称性の破れが観測できるようになった点で、大きな進歩があったと言える。

研究成果の概要(英文)：Chirality, which is inherent in the extended magnetic multipole moment breaking time- and space-inversion symmetry, plays an crucial role for the exotic spin-transport phenomena or unconventional nontrivial electromagnetic effects, etc. We employed resonant X-ray diffraction with circularly polarized X-rays to observe the magnetic domains. For this purpose, we constructed a zone-plate focusing system in the soft x-ray region. As a result, the spatial resolution was improved significantly. For the research of the extended magnetic multipole moment orders, we studied the magnetic domains in an hexaferrite Sr₃Co₂Fe₂₄O₄₁, CuO, Pb(TiO)Cu₄(P₀₄)₄, TbB₄.

研究分野：放射光科学

キーワード：強相関電子系 放射光 共鳴X線回折

1. 研究開始当初の背景

磁性(キラリティ)の概念は、数学、物理、化学、生物、宇宙、素粒子にいたる広範囲の領域で重要な役割を果たしている。従来、物質科学分野ではキラリティが表舞台に現れることはあまりなかったが、近年磁性体中での非自明な磁気構造および、それに誘起される異常輸送現象の発現 [D. Hsieh, et al., (2009)] や磁性絶縁体において、そこに内在する交差相関が電気分極を誘起するマルチフェロイック特性の発現 [T. Kimura, et al., Nature **426**, 55 (2003)] が報告され、物質科学の分野でもキラリティの重要性が認識されている。

一方、今世紀に始まった軟 X 線領域の共鳴 X 線回折は、特定の波長の X 線を使うことによって、物性を担う電子、特に 3d, 4f 電子の秩序状態を直接観察できることから、注目を浴びている。共鳴 X 線回折が有する偏光依存性は非常に強力であり、通常の X 線回折では困難なキラリティを判別することが、極めて容易にできる。我々は 2008 年に円偏光を用いた共鳴 X 線回折が、水晶のキラリティを判別するのに有効であることを示した [Y. Tanaka, et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 145502 (2008)]。この原理を用いると、軌道キラリティ、磁気キラリティの観測が容易である。当初、キラリティドメインの判別は、らせん磁気構造などの単純な空間反転対称性の破れた磁気ドメイン観察に限られていると思われていた。しかし、我々はある種の条件の下で、共線的反磁性磁気構造においてもキラリティ構造が判別できることが発見した [H. Ueda, et al., Phys. Rev. B **98**, 134415 (2018)]。この発見が本研究の端緒となっている。通常、共線的反強磁性のドメイン判別はほぼ不可能に等しい。

上記の発見により、我々は当初話題となっていた**時間、空間反転を破る拡張多極子**による磁気秩序ドメイン観察に適用可能であることを理論的に予想し、本研究課題の申請に至った。我々の実験手法は、他の実験手法では見ることが困難である monopole, quadrupole, toroidal moment, anapole などの磁気拡張多極子を観察し、そのキラリティドメインを観察できる。本来、多極子の一つの原子における波動関数の表記である。例えば、f 電子系では、局在した電気四極子、磁気八極子などが秩序状態を形成し、それがマクロな物性として表れることから多くの研究がなされてきた。これを拡張し複数の近接サイトに広がったクラスター多極子や、軌道角運動量の異なる軌道から構成されるハイブリッド多極子の概念が提唱されている [S. Hayami and H. Kusunose, JPSJ, **87**, 033709 (2018)]。これは、局所的な空間反転対称性に基づいた奇パリティ拡張多極子を定義することによって、交差相関による電気磁気応答、輸送現象、励起構造などの非自明な物理現象を統一的に捉えようとする試みである。

2. 研究の目的

本研究で対象とした拡張多極子は、トロイダルモーメント、磁気四極子、アナポールである。これらの奇パリティ多極子は、空間反転対称性および時間反転対称性を同時に破っている。空間反転対称性を破ることから、広義のキラリティを持っているとみなされる。トロイダルモーメントや磁気四極子による対称性の破れは交差相関現象発現の必要条件となっている。アナポールは金属イオンと配位子、また配位子間を流れる軌道電流が作り出す磁気モーメントによって形成される磁気多極子である。アナポール秩序も、時間、空間反転対称性をともに破る。この特異な磁気秩序は、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ相や 5d 遷移金属酸化物の隠れた秩序相において実現していることが提案されている。基礎科学的に、これらの磁気多極子秩序によるドメインの存在を直接観察することは、秩序形成の明確な証拠となり、それを制御することは、磁気多極子の性質を解明することにつながる。応用の面においては、将来の電子デバイスの開発につながるため、非常に重要である。

我々が見た共鳴 X 線回折における磁気散乱と電荷散乱の干渉効果は、以上で述べた多極子秩序の存在およびその物理的性質を明らかにするとともに、ドメイン観察も可能にする。我々は、(i) 共鳴 X 線回折を用いて、時間、空間反転対称性をともに破る拡張された磁気多極子(トロイダルモーメント、四極子、アナポール)による秩序状態を観察、実証する。さらに、(ii) その秩序状態の外場応答をドメイン観察で検証することによって物理的性質を解明する。

3. 研究の方法

実験手法は、共鳴 X 線回折実験である。この実験では、可変エネルギー光源である放射光 X 線を用いる。共鳴効果は多極子モーメントを形成する各元素の吸収端を用いて得られる。たとえば、CuO のアナポール秩序の観測においては、軟 X 線領域の Cu L_3 吸収端、あるいは硬 X 線領域の Cu K 吸収端を用いる。これらの吸収端における X 線回折は X 線散乱因子に共鳴効果が表れ、X 線磁気散乱強度が明瞭に表れる。

キラリティドメインの観察にはさらに二つの条件が必要となる。一つは、円偏光 X 線である。円偏光は、右と左を切り替えられなければならない。上の背景に述べた磁気散乱と電荷散乱の干渉効果においては、磁気カイリティの符号と、右、左の円偏光が結合するため、円偏光の切り替えによって、磁気ドメインにおけるカイリティの符号が判別できる。もう一つの条件は、電荷散乱が同じ回折条件に存在する必要がある。電荷散乱がなければ、そもそも干渉効果を起こすことができない。電荷散乱が生じる条件として、本来の結晶構造による反射が考えられるが、そ

れ以外にらせん構造やグライド面からの反射も考えられる。これらの反射は通常の X 線回折では見えないが、吸収端近傍では、電子軌道の対称性の破れから有限の値を持つことになる。それによって磁気散乱と電荷散乱の干渉が可能となる。

本研究の目的は、拡張磁気秩序の外部応答をドメイン観察で検証することである。そのため、微小領域に集光された小さな X 線源が必要である。極度に集光された X 線を用い、それを試料表面上で捜査することによって、試料表面に形成されているカイラルドメインの様子を二次元イメージとして捉えることができる。本研究において、我々は従来のミラー集光で得られる 20 ミクロンサイズの集光スポットを、さらに集光し 100 ナノメートル級の集光技術を確立することを目指した。これによって空間分解能を約 1/100 に高める。このために軟 X 線領域においてレンズの役割を果たすゾーンプレートによる集光システムを構築することとした。

設計したゾーンプレートの集光サイズは 170 nm である。これは従来のミラー集光によるビームサイズ 20 μm の 1/100 以下である。これによって空間分解能が飛躍的に向上し、ドメイン形成の動的観察がより詳細に行えることが期待できる。

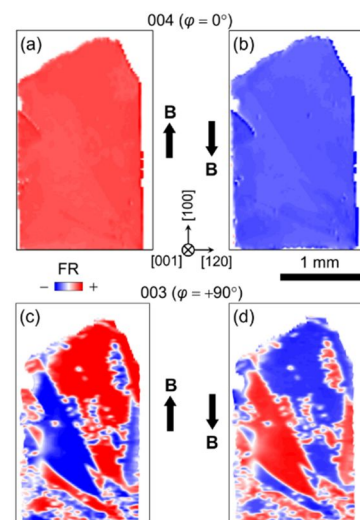
4. 研究成果

共鳴 X 線回折は拡張多極子が形成するドメイン構造を可視化できる一つの手段である。各元素の吸収端を利用することによって拡張多極子を同定し、X 線回折においてマイクロビームによる試料表面の走査によってドメイン構造を観察することができる。ゾーンプレートは軟 X 線ビームに対しレンズの役割を果たし、従来のミラー集光によるマイクロビームをさらに小さいナノビームまで細くすることが可能であり、空間分解能を飛躍的にあげることができる。我々はエネルギーの低い Fe L3 吸収端 (710 eV) とより高エネルギー側の希土類 M5 吸収端 (>1000 eV 程度) の二つエネルギー領域を含む複数のゾーンプレートを製作した。ゾーンプレートの集光においては高次光 (三次、五次光) を除去することでバックグラウンドを落とすことができる。そのためピンホールをゾーンプレートの後方に配置し、その位置は二次元ピエゾ素子を用いて制御できるシステムとした。低エネルギー領域、高エネルギー領域のそれぞれに対して、六方晶フェライト、TbB4 を用いて X 線回折条件において集光試験を行ったところ、1 μm 以下の空間分解能が実現できていることを確認した。広いエネルギー範囲、Fe L3 吸収端 (710 eV) から TbB4 M5 吸収端 (1241 eV) の範囲をカバーしていることがわかった。この結果、従来の湾曲ミラーによるマクロビームと比較し、空間分解能が飛躍的に向上し、拡張多極子が形成するドメイン構造の観察が可能となった。

我々は、共鳴 X 線回折を用いて、多数の拡張磁気多極子秩序の研究をおこなった。室温マルチフェロイック物質である六方晶フェライト Sr3Co2Fe24O41 の多重磁気ドメイン構造の観察、アナポール秩序を示すとされている CuO のドメイン構造、反磁気四極子秩序を示す Pb(TiO)Cu4(P04)4 のドメイン構造と電場磁場によるドメイン制御、さらにモノポール秩序を示す TbB4 のドメイン構造の研究などをおこなった。以下それらの結果について簡単に報告する。

(1) Sr3Co2Fe24O41

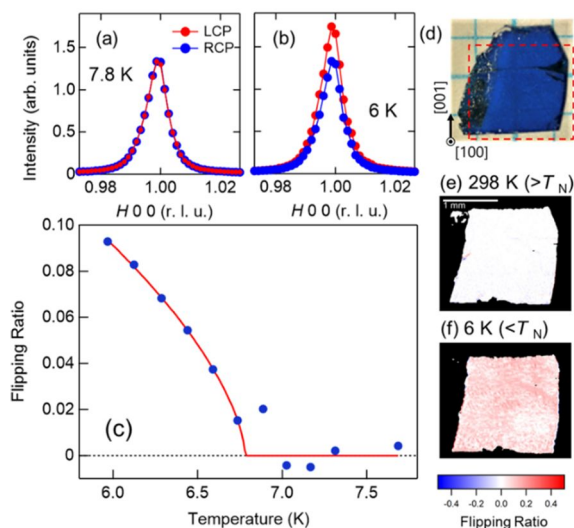
マルチフェロイック物質では、磁気秩序、強誘電性を含む複数の秩序変数が存在し、それらの秩序変数が結合し、非自明な電気磁気効果を誘起することが知られている。磁場による強誘電性の誘起については、(i) スピンカレント (Inverse Dzyaloshinskii-Moriya (I-DM) 相互作用)、(ii) 交換歪み、(iii) d-p 混成の三種類が知られている。どの誘起機構が支配的であるかを理解するためには、物質内の秩序状態を詳しく観察する必要がある。磁場や電場などの外場がない状態では、対称性が破れた複数の秩序変数はさまざまな安定状態を取り得るため、結晶内で不均一な空間分布、つまりドメインを形成する。六方晶フェライト Sr3Co2Fe24O41 は、マルチフェロイック物質の一つであり、室温において電気磁気応答を示す。この結晶構造は Z 型と呼ばれ、その空間群は P63/mmc である。磁気構造は、コーン構造を形成し、コーンの主軸は ab 面から上下に少し傾いた構造になっている。この構造を分解すると、c 軸方向のサイクロイダル成分、ab 面内のヘリカル成分、c 軸に垂直なフェリ磁性成分、c 軸に平行なフェリ成分の 4 つに分けることができる [H. Ueda et al., J. Appl. Physics, 128, 174101 (2020)]. これらの各成分は時間反転対称性と空間反転対称性をやぶるため、磁気ドメインを形成する。右図 (a), (b) は 004 反射強度の試料表面マップ、(c), (d) は 003 反射強度の試料表面マップである。これらの強度は反射強度それ自体ではなく、Flipping ratio (FR) = (I(+)-I(-))/(I(+)+I(-)) を表している。I(+), I(-) はそれぞれ右円偏光、左円偏光に対する回折強度である。FR を取ることで、試料表面の結晶の荒さから生じるゆれを打ち消している。(a) と (b), (c) と (d) はそれぞれ試料に印加した磁場の向きが逆である。004 反射による。この FR 強度は ab 面内のフェリ磁性成分と電荷散乱成分の干渉効果によって生じる右左円偏光の差を示している。図 (a) と (b) の比較から外部磁場の印加によってフェリ磁性成分が試料全体



に単一ドメインを形成し、それが磁場反転とともに逆転している様子がわかる。003 反射による FR 強度は c 軸方向のサイクロイダル成分と電荷散乱との干渉を表している。図(c)と(d)に示されたドメイン構造はサイクロイダル成分のカイラリティの符号の違いを示し、それらの符号が磁場反転とともに逆転している様子を示している。以上二つの磁気構成成分によるドメイン構造の観察から、両者が外部磁場の印加によって同時に反転することが判明した。このことは、ab 面内のフェリ磁性成分と c 軸方向のサイクロイダル成分は強く結合していること、つまり、コニカル構造の磁場反転機構は c 軸周りの 180° の回転であることを示している。一方、ab 面内に印加した磁場とお互いに垂直な [100] 軸方向と [120] 軸方向の電気分極測定の結果では、磁場反転により [100] 軸方向の電気分極は符号がそのまま保持されるのに対し、[120] 軸方向の電気分極は符号が反転することがわかっている。以上の結果からマルチフェロイック物質における三種類に磁場による強誘電性の誘起機構を考えると Z 型六方晶フェライト Sr3Co2Fe24O41 の電気磁気応答は、主に d-p 混成機構によって支配されており、それに比べ小さな I-DM 相互作用機構も存在していること結論できた。[H. Ueda et al. PRB 100, 094444 (2019)].

(2) Pb(TiO)Cu4(PO4)4

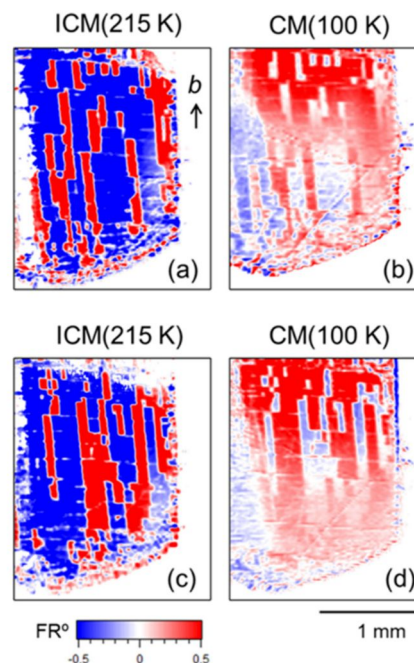
Pb(TiO)Cu₄(PO₄)₄ の空間群は $P4_21_2$ である。転移温度 $T_N \approx 7$ K 以下において磁気四極子モーメントを単位胞内に内包した磁気秩序を形成する。この磁気秩序は拡張された磁気四極子と見なすことができ、時間、空間反転対称性をともに破る。この物質では磁気四極子モーメントは強的な秩序状態を示し、符号の異なる二種類のドメインを形成する。これらドメインは線形電気磁気効果の電気磁気 (ME) 係数 α の符号がそれぞれ異なることが知られている。さらにこの物質は、らせん軸 2_1 を含むため結晶構造自体に右、左結晶の二種類のカイラリティがあり、磁気秩序としては二重のカイラリティが存在することになる。我々は、禁制反射である 100 反射について円偏光共鳴 X 線回折を用いて磁気四極子モーメントが形成するドメイン観察を行った。X 線のエネルギーは Cu L3 吸収端である。磁気四極子が形成するドメインのカイラリティを判別するためには、磁気散乱だけではなく、電荷散乱と磁気散乱の干渉効果を利用する必要がある。通常の X 線回折では、H00 反射において H が奇数の場合は禁制であるが、らせん構造 2_1 があるため、Cu L3 吸収端では禁制が解除される。そのため、H00 反射 (H が奇数) には電荷散乱は有限であり、さらに反強磁性転移以下の温度ではそれに磁気散乱が加わり、干渉が起こる。この二つの散乱の干渉は、X 線が円偏光である場合に限り回折強度に加わる。上図は、右結晶の 100 反射の結果を表している。温度が転移温度以上では、右、左円偏光の違いによる反射強度の違いは見られないが (a, e)、転移点以下では磁気散乱が加わることによって円偏光の向きによる差がはっきりと見られる (b, f)。図 (a, b) は それぞれ温度 7.8 K と 6 K における 100 反射の回折プロファイルである。(e, f) はそれぞれ温度 7.8 K と 6 K における 100 反射による結晶表面の Flipping ratio 強度のマップである。(c) は FR の温度変化である。(d) は測定した結晶の写真である。ここで、I(+), I(-) はそれぞれ右円偏光、左円偏光に対する回折強度を表している。図 (f) のように試料表面全体が、左円偏光による回折強度が右円偏光よりも回折強度が強い結果となった。左結晶を用いて同様の実験を行うと、右、左円偏光の強度比の関係が逆転することが判明した。これは、上に説明したように、この物質特有の二重の磁気秩序カイラリティが存在するためである。そのため、電荷散乱と磁気散乱の間に二重の干渉効果が存在する。したがって回折強度に結晶カイラリティにより反転する項と、磁気秩序カイラリティと結晶カイラリティの両方で反転する項の二種類ある。実験の結果、前者が支配的であり、後者がそれよりも弱いことが判明した。[R. Misawa et al. PRB 103, 174409 (2021)].



(3) CuO

アナポール秩序は、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ相や 5d 遷移金属酸化物の隠れた秩序相において実現していることが提案されている。この秩序は時間、空間反転対称性をともに破る。我々は、先行研究でアナポール秩序 (orbital current order) がある報告があった CuO について磁気秩序とそのドメイン分布の研究を行った。CuO の結晶構造は monoclinic であり、空間群は $C2/c$ である。低温で二つの磁気秩序相転移があり、 $T_{N2} = 230$ K で Cu スピンによるスパイラル磁気非整合秩序、 $q_{ICM} = (0.506, 0, -0.483)$ 、 $T_{N1} = 213$ K で整合共線の反強磁性秩序 $q_{CM} = (0.5, 0, -0.5)$ が生じる。この二つの磁気秩序相、スパイラル磁気非整合秩序相 (ICM 相)、整合共線の反強磁性秩序相 (CM 相) において円偏光 X 線を用いた共鳴磁気回折による磁気ドメインのマップ測定を行った。用いたエネルギーは Cu L₃ 吸収端近傍の 928.9 eV である。右図は試料表面上の磁気回折強度マップである。(a), (b) はそれぞれ ICM 相 ($T = 215$ K), CM 相 ($T =$

100 K)の Flipping Ratio (FR) 強度分布である。FR の定義は上に述べた通りである。図に示されたように ICM 相では明確な右、左円偏光に対する強度差が現れ、スパイラル構造のキラリティの符号によるドメイン分布が明瞭に見られる。CM 相では弱いながら、同様に右、左円偏光に対する強度差が現れ、ドメイン分布があることが確認された。また(a), (b)両者のドメイン分布には、相関関係があることが認められるが、符号については、同一の領域と、逆転している領域がある。この状態から一度温度を室温に戻し、つまり常磁性状態とした後、再び測定した ICM 相、CM 相の磁気ドメインのマップがそれぞれ(c), (d)である。図(a)と(c)あるいは(b)と(d)を比較すると磁気ドメインのマップが別のパターンになっていることがわかる。このように磁気ドメインマップは、低温状態において ICM 相と CM 相に相関があるが、常磁性状態に戻すことでパターンがあらたに形成されることがわかった。このことによって、CM 相の円偏光依存性を複屈折効果であるとした理論的解釈は成立しない。



次に円偏光依存性の起源について述べる。ICM 相では、スパイラル構造であるため空間反転対称性の破れによりそのキラリティが明確に定義できる。円偏光 X 線による共鳴回折においてその偏光と磁気構造のキラリティが結合するため、磁気ドメインのキラリティは回折強度の強弱として観察される。ところが CM 相では磁気モーメントが共線的であるため、そもそもキラリティは存在せず、観察できないはずである。したがって、観測された右、左円偏光 X 線によるキラルドメインは、何らかの空間反転対称性のやぶれを反映していると考えられる。さらに円二色性が観測できるためには、3. 研究方法で述べたようになんらかの干渉効果が存在する必要がある。実際、ICM 相の反射 0.506 0 -0.483 と CM 相の反射 0.5 0 -0.5 のエネルギースペクトルを比較すると、ICM 相は、単純に E1-E1 遷移で説明されるのに対し、CM 相は右、左円偏光の強度差がエネルギーとともに逆転するため、E1-E1 遷移だけでは説明できない。先行研究 [V. Scagnoli et al. Science 332, 696 (2011)]では E1-E1 遷移と E1-M1 遷移の干渉であるとし、対称性のやぶれの起源をアナポール, orbital current とした。しかし、その後理論の報告では E1-M1 遷移は非常に弱いと予測されるためアナポール秩序説は否定的である。我々は E1-E1 遷移と E1-M1 遷移の干渉効果を調べるため、共鳴磁気回折の方位角依存性(散乱ベクトル周りの試料の回転)を行った。その実験結果は、E1-E1 遷移と E1-M1 遷移の干渉として説明できないことがわかった。以上まとめると**アナポール秩序が存在しているかもしれないが、CuO の CM 相における磁気ドメインの起源については、さらに詳細な研究が必要である**。[R. Misawa et al. PRB 106, 104401 (2022)].

(4) TbB4

TbB4 の結晶構造は、正方晶構造(空間群:P4/mbm)であり、幾何学的フラストレーションを有する Shastry-Sutherland 格子と等価なネットワークを形成している。そのため、磁気構造が時間反転対称性と空間反転対称性の両方を破るため、線形磁気電気効果(ME)を示すことが知られている。温度 $T_{N1} = 44$ K において Tb の磁気モーメントが $\langle 110 \rangle$ 方向に非共線的に配列し、その伝播ベクトルが $Q = 0$ となるノンコリニア反強磁性(AFM)秩序を示す(AFM1 相)。AFM1 相の磁気点群は $4/m'm'm'$ であり、時間反転対称性と空間反転対称性の両方が破れ、一対の AFM ドメインを形成する。この磁気構造を拡張磁気多極子としての観点から見ると、モノポール秩序と見ることができる。さらに $T_{N2} = 23$ K 以下では、Tb モーメントは a 軸または b 軸に向かって面内でわずかに傾く(AFM2 相)。その結果、4 対称性が破れ、磁気点群は $2/m'$ に低対称化する。AFM2 相においても時間反転対称性と空間反転対称性がともに破れている。 T_{N2} の転移は、Tb 原子の電気四重極モーメントの強制的秩序に由来すると考えられ、温度 T_{N2} 以下では二重の反強磁性ドメインがあると考えられる。我々は、二つの磁気秩序相において円偏光 X 線を用いた共鳴 X 線回折を用いたドメイン観察とその制御を行った。この物質は[100]方向に 2_1 らせん構造があるため、本来禁制反射である H00 反射(H は奇数)が共鳴回折において許容される。従って、電荷散乱と磁気散乱の干渉効果を利用することによって磁気キラリティの判別が可能である。実験は、Tb の L3 吸収端近傍および M5 吸収端近傍で行った。前者は硬 X 線領域であり、後者は軟 X 線領域である。実験の結果明瞭な磁気構造のキラリティ由来のドメインが観察された。この結果については論文を執筆中であるため、詳細はこの報告書では省かせていただく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ueda Hiroki, Tanaka Yoshikazu, Wakabayashi Yusuke, Tsurumi Junto, Takeya Jun, Kimura Tsuyoshi	4. 巻 128
2. 論文標題 Multiple magnetic order parameters coexisting in multiferroic hexaferrites resolved by soft x rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 174101 ~ 174101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 上田大貴, 田中良和, 木村剛	4. 巻 33
2. 論文標題 マルチフェロイック物質における共鳴X線回折による磁気ドメイン観察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本放射光学会誌	6. 最初と最後の頁 334-343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Misawa R., Ueda H., Kimura K., Tanaka Y., Kimura T.	4. 巻 103
2. 論文標題 Chirality and magnetic quadrupole order in Pb(TiO)Cu ₄ (P04) 4 probed by interference scattering in resonant x-ray diffraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174409~174409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.174409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Ueda, Yoshikazu Tanaka, Yusuke Wakabayashi, and Tsuyoshi Kimura	4. 巻 100
2. 論文標題 Insights into magnetoelectric coupling mechanism of the room-temperature multiferroic Sr ₃ Co ₂ Fe ₂₄ O ₄₁ from domain observation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.094444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Misawa, K. Arakawa, H. Ueda, H. Nakajima, S. Mori, Y. Tanaka, and T. Kimura	4. 巻 106
2. 論文標題 Magnetic domains in two distinct antiferromagnetic phases of CuO	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.104401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 三澤龍介, 上田大貴, 田中良和, 木村健太, 木村剛
2. 発表標題 正四角台塔型反強磁性体 $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ における円偏光軟 X 線共鳴回折
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三澤龍介, 上田大貴, 田中良和, 木村健太, 木村剛
2. 発表標題 磁気四極子型反強磁性体 $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ における 円偏光軟 X 線共鳴回折の外場効果
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三澤龍介, 上田大貴, 荒川慶人, 伊賀文俊, 玉作賢治, 田中良和, 木村剛
2. 発表標題 円偏光共鳴X線回折の干渉効果を利用したTbB4における 磁気秩序状態の観測
3. 学会等名 第35回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三澤龍介, 荒川慶人, 上田大貴, 伊賀文俊, 玉作賢治, 田中良和, 木村剛
2. 発表標題 非共線型反強磁性体 TbB4 における円偏光共鳴 X 線回折
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三澤龍介, 上田大貴, 田中良和, 中島宏, 木村健太, 木村剛
2. 発表標題 CuO の反強磁性相における円偏光軟 X 線共鳴回折
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kimura, H. Ueda, Y. Tanaka, and Y. Wakabayashi
2. 発表標題 Insights into magnetoelectric-coupling mechanisms of multiferroic hexaferrites from domain observations
3. 学会等名 The 11th APCTP Workshop on Multiferroics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Misawa, H. Ueda, Y. Tanaka, H. Nakajima, K. Kimura, and T. Kimura
2. 発表標題 Resonant x-ray diffraction using circularly polarized soft x-rays in the antiferromagnetic phase of CuO
3. 学会等名 The 20th Korea-Taiwan-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Misawa, H. Ueda, Y. Tanaka, K. Kimura, and T. Kimura
2. 発表標題 Magnetic quadrupole order on chiral antiferromagnets probed by utilizing circularly polarized resonant x-ray diffraction
3. 学会等名 REXS2022, Resonant Elastic X-ray Scattering (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大浦 正樹 (Oura Masaki) (50250113)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・チームリーダー (82401)	
研究分担者	田中 義人 (Tanaka Yoshihito) (80260222)	兵庫県立大学・理学研究科・教授 (24506)	
研究分担者	木村 剛 (Kimura Tsuyoshi) (80323525)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------