

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：84502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20603

研究課題名（和文）コヒーレントX線パルスによる磁気テクチャーの時空間分割計測

研究課題名（英文）Time- and spatially- resolved measurements of magnetic texture using ultrafast coherent X-ray pulse

研究代表者

横山 優一（Yokoyama, Yuichi）

公益財団法人高輝度光科学研究センター・データ駆動科学グループ・研究員

研究者番号：20824163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電子がもつ自由度のスピンに着目し、スピンの渦構造（磁気スキルミオン）やスピンのドメイン構造（磁区）を、時間的および空間的に分解して計測するシステムの構築と解析手法の開発を行った。計測システムについては、空間分解計測までは実現できたが、時間分解計測への展開は新型コロナウイルスの影響により中断した。一方、解析手法については、磁気スキルミオンや磁区がもつスパースな性質を事前情報として活用することで、スパースモデリングに基づく位相回復アルゴリズムを開発した。開発した手法の有用性について、論文や解説記事の発表に加え、国内外の学会でも発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したスパースモデリングに基づく位相回復アルゴリズムは、従来型的手法では対処不可能なノイズと情報欠損を含む回折像から、実空間像の再構成を可能にする画期的な手法である。開発した手法によって、シングルショットのコヒーレントX線回折イメージングによる時空間分解計測データから、スピンのダイナミクスの情報抽出が可能になるため、スピントロニクスデバイスの実現に向けた磁性材料開発に役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：This project aimed to construct a spatio-time-resolved measurement system and develop analytical methods for magnetic textures such as vortex structures of spin (magnetic skyrmions) and domain structures of spin (magnetic domains). Although we constructed the spatio-resolved measurement system, development of the time-resolved system was interrupted due to COVID-19. On the other hand, for the analytical methods, we developed phase retrieval algorithms based on sparse modeling by utilizing the sparseness of magnetic skyrmions and magnetic domains as prior information. To introduce the effectiveness of the developed methods, we published the paper and the explanatory article, in addition to the presentations at domestic and international conferences.

研究分野：放射光科学、機械学習

キーワード：位相回復アルゴリズム スパースモデリング シングルショットイメージング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子の自由度の一つであるスピンを情報媒体として活用するスピントロニクスは、高速制御・高密度化・低消費電力の観点から注目され盛んに研究されている。スピントロニクスでは、磁気交換相互作用やスピン軌道相互作用など様々な因子によって決定されるスピンの時間的・空間的な分布が、デバイスの動作性能を決定する要因となっている。例えば、スピン波(マグノン)やスピンの渦(磁気スキルミオン)は情報や熱を運ぶ媒体として期待され、光過レーザーによる磁気スキルミオン生成などが理論的に予測されている。磁気スキルミオンによるハードディスク等の実現に向けて、外場印加による磁気スキルミオンの生成・消滅の仕組みをフェムト秒スケールで明らかにすることが必要不可欠である。また、スピントロニクスデバイスの応用に適する材料を探索する上で、高い時間分解能と空間分解能を持ちつつ短時間で計測できる手法の確立が重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では電子のもつ自由度のスピンに着目し、スピンの渦構造(磁気スキルミオン)やスピンのドメイン構造(磁区構造)などの磁気テクスチャーを時間的・空間的に分解して計測するシステムの構築と解析手法の開発を目指す。磁気スキルミオンは孤立粒子のように振る舞うため情報を運ぶ媒体として機能するが、次世代デバイスへの応用には光などの外場による磁気スキルミオンの制御が不可欠である。そこで、X線自由電子レーザーを用いたフェムト秒スケールの時間分解コヒーレント回折イメージング手法を開発し、外場印加後の超高速スピンドYNAMICSを解明する。さらに、スパースモデリングを取り入れた位相回復アルゴリズムを開発して時間分解計測と組み合わせることにより、X線シングルショットで磁気スキルミオン位置や磁気ドメイン壁の情報抽出が可能な計測手法確立することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### ・時間分解コヒーレント共鳴軟X線小角散乱装置の開発

X線自由電子レーザー-SACLAのBL1において、高いコヒーレンスとフェムト秒スケールの軟X線パルスを活用したポンププローブ型時間分解共鳴軟X線小角散乱装置を開発する。可視のレーザー光(ポンプ光)と軟X線(プローブ光)を試料上で重ね合わせ、ポンププローブ光間の時間遅延を変化させることによって、フェムト秒スケールでスピンドYNAMICSを観測可能なシステムを構築する。

#### ・スパース性を取り入れた位相回復アルゴリズムの開発

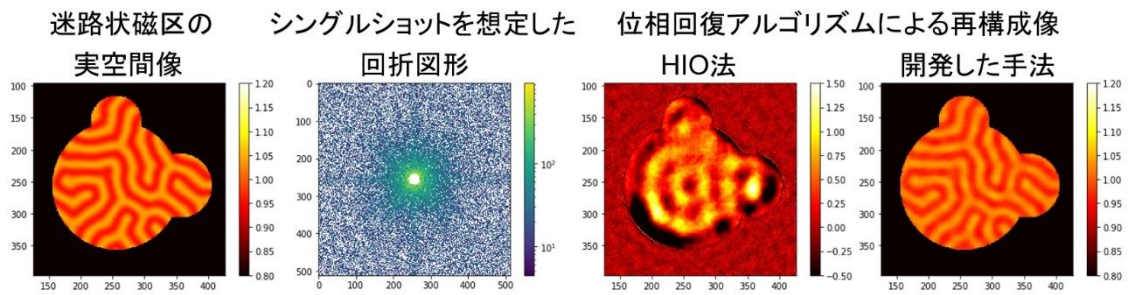
コヒーレントX線回折イメージングによって得られる空間情報は逆空間のものであり、実空間に変換するのに必要な位相情報が失われている。そこで、実空間の情報を得るために、独自の位相回復アルゴリズムを開発する。従来の最急降下法では局所的な解に陥りやすい欠点があり、それを発展させたHybrid Input Output (HIO)法でさえもノイズや情報欠損に弱いという問題がある。そこで、新たにスパースモデリングを組み合わせた位相回復法を開発する。このアルゴリズムでは、計測対象のスパース性を事前情報として取り入れるため、事前情報に合わない偽の解を排除することができ、ノイズへの過学習を抑制すると共に少ない情報量からの位相回復が可能になると期待される。

### 4. 研究成果

2019年度には、放射光施設 SPring-8 の BL07LSU と X線自由電子レーザー-SACLA の BL1 において、コヒーレント共鳴軟X線小角散乱装置の開発を行い、SACLAではシングルショットイメージングに成功した。また、スパース性をL1正則化として取り入れた磁気スキルミオン用のスパース位相回復アルゴリズムについて、放射光X線を用いた研究に関する世界最大級の国際会議 VUVX19 で口頭発表を行った。

2020年度からは、新型コロナウイルスの影響を受け、装置開発を中断することになった。そこで、位相回復アルゴリズムの開発に主眼を置いて取り組み、代表的な磁気テクスチャーである磁区に適用可能なスパースモデリングに基づく位相回復アルゴリズムの開発を進めた。このアルゴリズムは、磁区の画像は一見するとスパース(まばら)では無いが、隣接ピクセルとの差分をとった画像はドメインの境界以外ほとんど値を持たずスパースであるという洞察に基づくものである。

2021年度には、磁区構造のスパース性をTV正則化によって取り入れ、透過強度に関する事前情報をL2正則化によって取り入れたTV-L2法による位相回復アルゴリズムを完成させた。シングルショット計測を想定したシミュレーションを行い、従来型のHIO法では対処できないようなノイズと情報欠損を含むシングルショット回折像からでも実空間像の再構成が可能となること(図参照)パターン形状が迷路状から島状まで変化しても有効に機能することを明らかにし、Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)から論文を発表した。



図：迷路状磁区パターンのシングルショット計測を想定した位相回復シミュレーション。

論文発表と同時にプレス発表を行い、日刊工業新聞の2022年2月7日版やOPTRONICS ONLINE等に掲載された。国内の学会やワークショップ等でも研究成果の情報発信を行い、第71回SPring-8先端利用技術ワークショップでは、スパースモデリングの活用法について招待講演を行った。

2022年度には、本研究で開発したスパースモデリングの技術を、関連手法であるブラッグコヒーレント回折イメージング法に適用した。TV正則化によって実データに含まれるノイズを除去することに成功し、位相回復結果の大幅な改善が実現した。また、本研究で開発した位相回復アルゴリズムを国内外に紹介し、スパースモデリングの普及啓発活動を行った。国際会議OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022の専門会議であるLSC2022において招待講演を行い、スパース性を事前情報として取り入れる方法についての解説記事を日本結晶学会誌から発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 YOKOYAMA Yuichi	4. 巻 64
2. 論文標題 Phase Retrieval Algorithm based on Total Variation Regularization for Ferromagnetic Domain Patterns	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nihon Kessho Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 109 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5940/jcrsj.64.109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yokoyama Yuichi, Yamasaki Yuichi, Okada Masato, Mizumaki Masaichiro	4. 巻 91
2. 論文標題 Phase Retrieval Algorithm based on Total Variation Regularization for Ferromagnetic Domain Patterns	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.034701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yokoyama Yuichi, Yamasaki Yuichi, Okada Masato, Mizumaki Masaichiro
2. 発表標題 Phase Retrieval Algorithm based on Total Variation Regularization for Ferromagnetic Domain Patterns
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022 (LSC2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山優一、山崎裕一、岡田真人、水牧仁一朗
2. 発表標題 磁区構造の軟 X 線回折図形に対する TV-L2 正則化位相回復法
3. 学会等名 第 13 回放射光学会若手研究会「先端的レーザー分光測定技術の進化とその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山優一、山崎裕一、岡田真人、水牧仁一朗
2. 発表標題 TV + L2正則化を用いたCDI像位相回復法
3. 学会等名 第71回SPRing-8先端利用技術ワークショップ/「第3回データ駆動科学によるデータ解析高度化」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山優一、山崎裕一、岡田真人、水牧仁一朗
2. 発表標題 迷路状磁区構造の軟 X 線回折図形に対するTV-L2 正則化位相回復法
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 横山優一、山崎裕一、岡田真人、水牧仁一朗
2. 発表標題 迷路状磁区構造の軟X線回折図形に対するTV正則化位相回復法
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 Yuichi Yokoyama
2. 発表標題 Sparse phase retrieval algorithm for observing isolated magnetic skyrmions
3. 学会等名 The 40th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------