

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20107

研究課題名（和文）軟X線回折イメージングによる反強磁性秩序ダイナミクスの観測

研究課題名（英文）Observation of antiferromagnetic order dynamics by soft x-ray diffraction imaging

研究代表者

石井 祐太 (Yuta, Ishii)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：40847232

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、時分割X線回折を用いた反強磁性秩序のダイナミクスの実空間イメージングを、最終目標に設定している。本研究では、まず時分割XMCDを用いた強磁性秩序のダイナミクスの時分解測定を確立した。これにより、マイクロ波に応答した磁化歳差運動の様子を実時間で観測することに成功した。更に、外部磁場依存性やエネルギースペクトルを測定することで、試料の物性評価を行うことを可能にした。また、ホログラフィー測定を用いて欠陥構造から生成された軟X線光渦の観測手法を確立した。これらの成果は、反強磁性秩序やその欠陥構造のダイナミクスの観測に、非常に重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、時分割XMCDにより、強磁性秩序中のマイクロ波に対する応答を直接観測することに成功した。更に、軟X線光渦に対するホログラフィー測定を行い、秩序状態中の欠陥構造に対するユニークな測定手法を確立した。これらの成果は、スピントロニクスデバイスやトポロジカル欠陥構造の物理に対する、新たな測定手法として位置づけられ、今後これらの新しい物理が切り開かれることが期待できる。また、本研究では達成できなかったが、反強磁性体のダイナミクスに対しても、本成果は非常に重要であり、今後の展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study is real-space imaging of the dynamics of antiferromagnetic ordering using time-resolved X-ray diffraction. In this study, we first established time-resolved X-ray measurements for the dynamics of ferromagnetic ordering using a time-resolved XMCD technique. This technique enables to directly observe a magnetization precession in response to microwaves. Furthermore, by acquiring external magnetic field dependence and time-resolved XMCD energy spectra, we succeeded in evaluating the physical properties of the samples. These results are very important for the application to the dynamics to antiferromagnetic order.

研究分野：磁性

キーワード：時分割XMCD 強磁性共鳴 磁化ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

近年、スピンと格子が強く結合したマルチフェロイック物質において、レーザー照射により、マグノンスピン流がポンピングされるエレクトロマグノン共鳴[1]やカリラルソリトン格子の生成[2]等のスピンダイナミクスが示唆されている。このような反強磁性秩序により示されるダイナミクスは、その時間スケールが fs-ps であり、一般的な強磁性体の場合(ps-ns)と比べて非常に速い。従って、超高速スピン制御として注目を集めている。しかしながら、このような速い時間スケールの反強磁性ダイナミクスが直接可視化された事は未だに無く、エレクトロマグノン共鳴等の微視的機構は明らかになっていない。これを観測するには、反強磁性秩序がつくるメゾスコピック領域での構造の時間変化を観測する手法の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時分割 X 線回折イメージングにより、反強磁性秩序に起こるダイナミクスの可視化である。本研究の当該期間では、反強磁性秩序のダイナミクスを可視化する前段階として、(1) 強磁性秩序のダイナミクスの時分割測定手法と、(2) 反強磁性秩序の欠陥構造の測定に有効な軟 X 線光渦のホログラフィー測定手法を確立した。

3. 研究の方法

(1) 時分割 XMCD 測定

周波数が数 GHz 帯のマイクロ波を磁性体に照射すると、電子のスピンが歳差運動を始める(強磁性共鳴)。これを放射光施設 PhotonFactory (PF)において時分割 XMCD 測定により、直接観測を行った。実験セットアップを、図 1(a)に示す。PF では、30 ps 程度のパルス幅を持つパルス X 線が、約 500MHz で入射する。実験では、この X 線入射に同期された放射光マスターオシレーション信号(500MHz)を用いる。この信号をファンクションジェネレータにトリガーとして入力し、マイクロ波を試料に入力する。このマイクロ波の位相を X 線入射に対して徐々に遅延することで、マイクロ波によって誘起された磁化歳差運動の様子を実時間で観測できる。またマイクロ波の位相変調を行うことで、試料を透過した XMCD 信号を精度良く捉えることが可能になる。

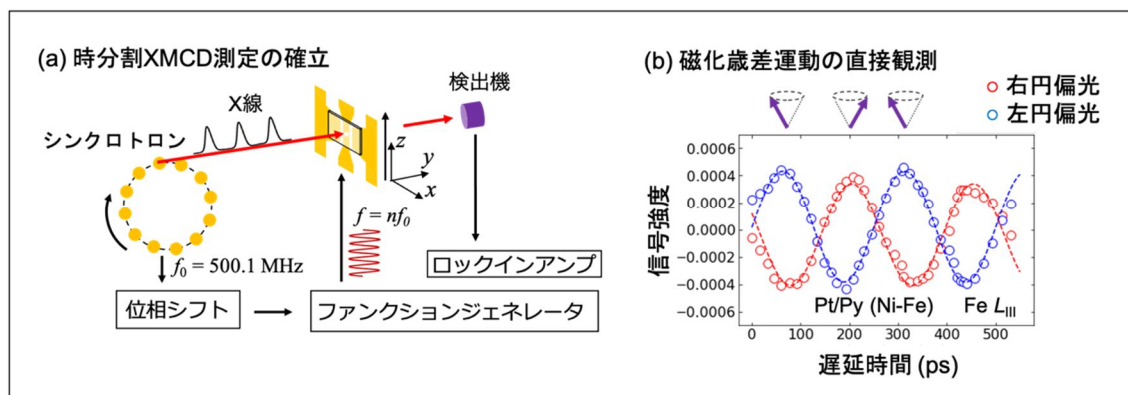


図 1. (a) 時分割 XMCD 測定の実験セットアップと(b)Pt/Py 薄膜に対する磁化歳差運動の直接観測

(2). 軟 X 線光渦のホログラフィー測定

秩序状態の欠陥構造に光を照射することで、波面がスパイラルな光渦が生成される。これを反強磁性秩序に応用することで、反強磁性体中の欠陥構造に敏感な手法になる。更に、上述した時分割測定と組み合わせることで、反強磁性秩序に対する時分割測定に繋がる。

そのために、軟 X 線光渦の位相可視化のため、ホログラフィー測定系を立ち上げた(図 2(a))。ホログラフィー測定では、X 線を光学素子(フレネルゾーンプレート)により集光し、焦点位置の後ろにサンプルを設置する。更に下流に二次元検出器を設置することで、サンプルからの回折とサンプル周りを透過するダイレクトビームの干渉パターンを観測する。この干渉パターンには、サンプルからの回折光の位相情報が含まれており、もし回折光が光渦であるならば、その位相分布が可視化できる。

4. 研究成果

本研究の成果として以下の 2 点が挙げられる。

- (1) 強磁性共鳴ダイナミクスに対する時分割 XMCD 測定手法を確立
- (2) 軟 X 線光渦のホログラフィー測定

(1) 図 1(b)に時分割 XMCD 測定により得られた Pt(10nm)/Ni-Fe(30nm)薄膜に対する実験結果を示す。試料には、4GHz の周波数のマイクロ波を入力した。実験結果を見ると、マイクロ波の 4GHz に対応して、250ps の周期で信号強度が振動していることが分かる。更に、X 線の左右円偏光を変えると、信号強度が位相 180 度分だけずれることが分かる。このことから、時分割 XMCD 測定により、強磁性共鳴によって誘起されたスピンの歳差運動を直接観測することに成功したと結論づけた。また、外部磁場依存性や、時分割 XMCD エネルギースペクトルを取得することで、物質の緩和定数等の物性を評価することが可能であることを確かめた。

(2) ホログラフィー測定では、反強磁性秩序の前段階として、フォーク型回折格子から生成される光渦の観測を行なった[1,2]。フォーク型回折格子に通常の光を入力すると、その回折方向に光渦が生成される。図 2 (b)に実際に得られた回折光とダイレクトビームの干渉パターンから抽出した軟 X 線光渦の位相分布を示す。 $\ell = \pm 1$ は、 ± 1 次の回折光として生成された光渦の位相分布を表す。両者とも、スパイラルな位相分布が得られ、その中心に位相が定義できない位相特異点が存在することが分かる。更に、 $\ell = \pm 1$ で回転の方向が反転することが分かる。このように、ホログラフィー測定を用いることで、フォーク型回折格子から生成された軟 X 線光渦の位相分布を可視化することに成功した。

本手法を反強磁性秩序に応用するために、ナノメートルスケールの磁気渦構造であるスキルミオン格子に応用したシミュレーション結果を図 2(c)に示す。磁気スキルミオン格子が三角格子を形成し整列している場合、生成される回折光は通常の光であるが(図 2 (c)-(a))、磁気スキルミオン格子に欠陥構造がある場合、回折光として生成される光は、光渦となることが分かる(図 2(c)-(b))。このことは、反強磁性体から生成される回折光の位相分布を可視化することで、元の磁気構造の欠陥構造の情報に迫れることを示しており、これまでに無いユニークな手法になることが期待できる。また、上述した時分割測定と組み合わせることで、反強磁性体の欠陥構造のダイナミクスに迫ることが可能になる。

以上のように、本研究では、強磁性体の磁化ダイナミクスに対する 30ps 程度の時分割測定の確立と、軟 X 線光渦を用いたホログラフィー測定手法の確立を行なった。今後は、これらの手法を活用し、反強磁性秩序におけるダイナミクスの時分割実時間観測手法の確立を目指す。

[1] Y. Ishii, et.al., PRApplied 14, 064069 (2020).

[2] Y. Ishii, et.al., Sci. Rep. 12, 1044 (2022).

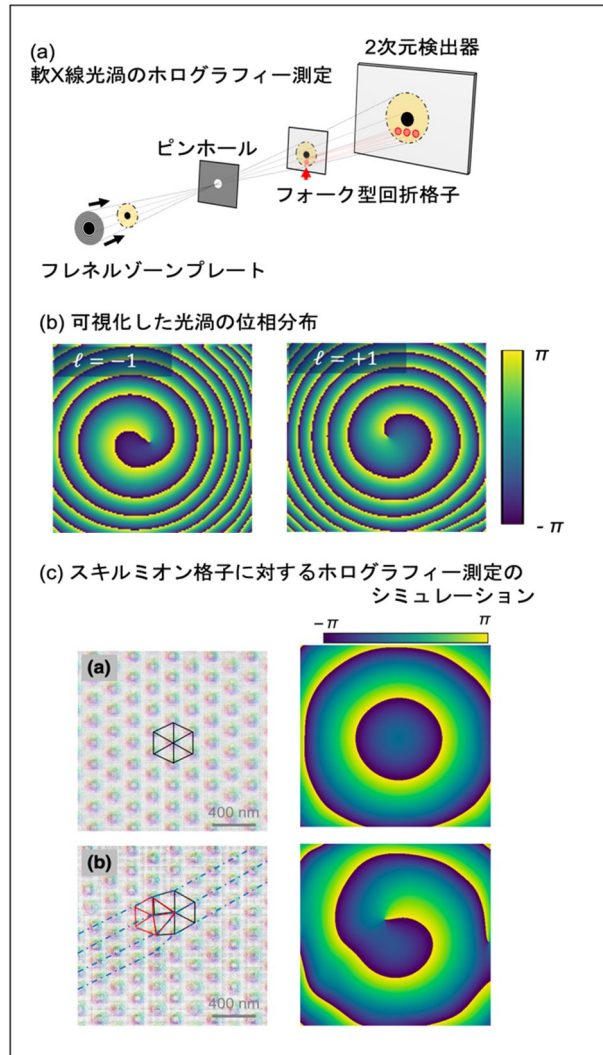


図 2. (a) ホログラフィー測定のセットアップと、フォーク型回折格子から生成された軟 X 線光渦の位相分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishii Yuta, Nakao Hironori, Mizumaki Masaichiro, Wakabayashi Yusuke, Arima Taka-hisa, Yamasaki Yuichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Topological charge of soft X-ray vortex beam determined by inline holography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-04933-5	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Ishii, Y. Yamasaki, Y. Kozuka, H. Nakao, J. Lustikova, Y. Nii, Y. Onose, Y. Wakabayashi
2. 発表標題 Time-resolved XMCD measurements for magnetization oscillation
3. 学会等名 Summit of Materials Science 2022 and GIMRT User Meeting 2022 Affiliated with KINKEN WAKATE 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井祐太, 山崎裕一, 小塚裕介, Lustikova Jana, 新居陽一, 小野瀬佳文, 中尾裕則, 若林裕助
2. 発表標題 時分解XMCDを用いた強磁性共鳴における磁化歳差運動の直接観測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井祐太, 木村宏之, 深谷亮, 足立純一, 中尾裕則
2. 発表標題 マルチフェロイック物質Tb _{0.5} Gd _{0.5} Mn ₂ O ₅ の光誘起電気磁気効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020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
---------	---------