

2023年度（第48回）學術研究振興資金 學術研究報告

学 校 名	関 西 学 院 大 学	研究所名等	
研 究 課 題	X線自由電子レーザーによるX線誘起フェムト秒磁気ダイナミクス	研 究 分 野	理学(理工系)
キ ー ワ ー ド	①X線自由電子レーザー ②放射光 ③磁気ダイナミクス ④円偏光X線 ⑤光誘起磁化 ⑥逆ファラデー効果		

○研究代表者

氏 名	所 属	職 名	役 割 分 担
鈴木 基 寛	工 学 部	教 授	総括・手法開発・実験

○研究分担者

[illegible]

X線自由電子レーザーによるX線誘起フェムト秒磁気ダイナミクス

1. 研究の目的

本研究では、新たな原理に基づくスピン制御技術の構築を目指し、フェムト秒からピコ秒での元素選択的なスピンドYNAMIKSの観測、および超高速スピン制御原理の探求を目的とする。

- (1) 円偏光した超短パルスX線自由電子レーザー (XFEL) を磁性体試料に照射することによるスピン偏極した励起状態、すなわち「X線誘起磁化」を瞬間的に生成し、その動的現象をフェムト秒の時間分解能で解析するための計測手法を開発する。
- (2) 開発した測定手法をフェリ磁性体 GdFeCo 薄膜に適用し、フェムト秒からピコ秒の時間スケールでのスピン選択的な内殻励起状態とその緩和過程を観測する。得られた結果を解析することで、超高速スピン制御に関わる磁気素過程を元素選択的に解明する。これにより従来の 100 倍以上高速なデバイスのためのスピン制御原理を提示する。

2. 研究の計画

本研究では、円偏光XFELパルスを励起光とし、可視光パルスレーザーを検出光とするポンプ・プローブ法を用いる。XFELパルスを試料に照射することで瞬間的な磁性変化を誘起し、高精度の可視光領域の磁気ファラデー効果により磁性変化の時間分解計測を行う。このような実験は過去に例がないため、新たな実験配置および光学系の開発が研究の重要な要素となる。そのために、2023年度は実験装置および光学系の開発と性能評価を行う。また、測定試料として用いるGdFeCo薄膜の磁性を評価するための計測系を構築するとともに、磁気光学特性の測定を行う。

- (1) 磁性変化検出のための磁気顕微光学系とパルス磁場印加装置の開発
 - ① 高感度CMOSカメラによる磁気光学信号の検出感度の向上と性能評価
 - ② XFELパルス周波数(30 Hz)に同期して磁場を印加するための、パルス電磁石の開発
- (2) GdFeCo フェリ磁性合金試料の磁気光学特性の評価
 - ① 高感度磁気ファラデー回転角計測装置の構築
 - ② GdFeCoフェリ磁性合金薄膜の磁気光学特性の組成・膜厚依存性の測定

3. 研究の成果

- (1) 磁性変化検出のための磁気顕微光学系パルス磁場印加装置の開発
 - ① XFELパルスが照射される微小領域の磁性変化をワンショットで観察するために用いる、顕微磁気光学系の開発を行った。本装置は面積 $300 \times 450 \text{ mm}^2$ の光学ブレッドボード上に、50倍の顕微鏡対物レンズ、ウォラストン偏光プリズム、高感度冷却CMOSカメラ2台を配置することで構築された。偏光プリズムで試料透過光の垂直、水平偏光成分を分離し、各カメラで測定した画像を演算することで、ファラデー回転角の計測を行う。ヘリウムネオンレーザーを用いて、開発した顕微磁気光学系の空間分解能およびファラデー回転角計測精度の評価を行った。テストチャートの観察により、空間分解能は $0.9 \text{ }\mu\text{m}$ と評価された。対物レンズの光学的性能から妥当な値であり、直径数ミクロンのXFEL照射スポットを十分に解像することができる。また、測定に用いるGdFeCo薄膜の磁区画像の取得に成功した。測定された画像では、正負の磁区に対して良好なコントラストが得られており、ファラデー回転角の検出精度は 0.1° と評価された。以上の結果から、開発した偏光顕微光学系は、XFELによる磁性変化検出に適用可能な性能を有すると結論した。さらに、開発した光学系をTiサファイアパルスレーザー光源と組み合わせることで、可視光励起・近赤外検出によるポンプ・プローブ時間分解実験を行った。GdFeCo薄膜に対して本装置を用いることで、 400 nm のパルスレーザーを照射することによる 1 ps 以内の超高速磁性変化を検出できることを実証した。
 - ② XFELパルス周波数(30 Hz)に同期して磁場を印加するため、パルス電磁石の製作を行った。通常の一体型の鉄芯を用いた電磁石では、電磁石鉄心の渦電流による交流損失のために、30 Hz において目的の磁場強度 ($> 50 \text{ mT}$) を得ることは難しい。この問題を解決するため、積層した珪素鋼板を鉄芯とする構造を採用した。市販の交流電源トランスを

分解し、鉄芯として使われている珪素鋼板を取り出し、電磁石に適したU字型の形状に切断し、再び積層して絶縁テープで固定したものを鉄心とした。直径 0.8 mm のポリウレタン線を正負の磁極に対してそれぞれ90回巻き、電磁石として組み上げた。ガウスメータによる磁場パルス波形の計測結果から、SACLA のパルス繰り返し周波数の2倍の周波数である60 Hzにおいて、パルス幅 4 ms、磁場強度80 mTのパルス磁場が得られることが示された。

(2) GdFeCo フェリ磁性合金試料の磁気光学特性の評価

- ① XFEL誘起磁気ダイナミクス実験に用いるGdFeCo合金試料は、窒化シリコン基板上に成膜された厚さ20~30 nmの薄膜である。膜厚およびGdとFeの組成比によって、試料の磁気特性や磁気光学特性が変化することが知られている。SACLAでのビームタイムは限られるため、XFEL実験に適した性質をもつGdFeCo試料を前もって特定しておく必要がある。この目的を実現すべく、磁性薄膜試料の磁性評価のための磁気ファラデー回転角計測装置を構築した。試料のファラデー回転角は 1° 以下であり、高い計測精度が要求される。そこで、われわれはウォラストン偏光プリズムとバランス型光検出器を組み合わせた光学系を採用することで、 $\pm 0.03^\circ$ のファラデー回転角の計測精度を達成した。光源にはヘリウムネオンレーザーを用い、試料への磁場印加には電磁石を用いた。
- ② Gd組成および膜厚の異なる数種類のGdFeCo薄膜試料について、上記の装置を用いて磁気ファラデー回転角の磁場依存性を測定した。Gd組成 23%~26% (対応する補償温度 230~400 K)、膜厚 20 nmおよび30 nmの試料について、計測した磁気ヒステリシスループから飽和磁化状態でのファラデー回転角、および保磁力を決定した。

4. 研究の反省・考察

(1) 磁性変化検出のための磁気顕微光学系パルス磁場印加装置の開発

- ① 開発した磁気顕微光学系について、空間分解能0.9 μm 、磁気ファラデー回転角検出精度 0.1° 以下という性能が得られた。XFEL照射スポット径が2~3 μm 、測定対象とするGdFeCoのファラデー回転角が 0.5° 程度であることから、XFEL誘起磁気ダイナミクスの検出に利用可能な装置の開発が行えた結論できる。
- ② 作製したパルス電磁石では、繰り返し周波数 60 Hz、最大磁場 800 Oe、パルス幅4 msの性能が得られており、パルス磁場自体の性能に関してはSACLAでの実験において使用可能な仕様を満たしている。一方で、上記の性能での運転時には電磁石本体が発熱し、運転開始後数分間で手で触ることが難しいほど温度が上昇した。実用化のためには適切な冷却機構を付加する必要がある、今後の課題として残った。

(2) GdFeCo フェリ磁性合金試料の磁気光学特性の評価

- ① 厚さ数10 nm の磁性薄膜の磁気特性評価を行うための、高精度磁気ファラデー回転角計測系を構築した。 $\pm 0.03^\circ$ のファラデー回転角の計測精度が得られており、本研究で対象とするGdFeCo薄膜試料の評価に十分な性能であると結論できる。
- ② 数種類のGdFeCo薄膜について、ファラデー回転角による磁気ヒステリシスループから、試料間での飽和磁化や保磁力を決定した。膜厚依存性や組成依存性を議論するに足る精度のデータが得られた。一試料の測定時間は10分程度であり、今後新たな試料が追加された場合にも迅速に試料の物性評価を行える環境が整備された。今後、ヘリウムネオンレーザー以外のレーザー光源や白色光源を用いることで、ファラデー回転角の波長依存性計測が可能なシステムへと発展させる計画である。

5. 研究発表

(1) 学会誌等

なし

(2) 口頭発表

- ① 小林玲、山田貴大、吉川大貴、小幡竜世、後長葵、金島圭佑、富樫格、久保田雄也、塚本新、田中義人、鈴木基寛、日本物理学会第78回年次大会、2023年9月16日~19日、東北大学
- ② M. Suzuki, A. Izumi, K. T. Yamada, K. Kaneshima, R. Kobayashi, Y. Kubota, T. Togashi, T. Ohkochi, I. Matsuda, Y. Tanaka, MRM2023/IUMRS2023 Grand Meeting,

11-16 December 2023, Kyoto.

- ③ 小林玲、山田貴大、吉川大貴、小幡竜世、後長葵、笹倉颯太、秋山裕輔、竹村海輝、金島圭佑、富樫格、久保田雄也、塚本新、田中義人、鈴木基寛、第37回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2024年1月10日～12日、アクリエひめじ

(3) 出版物

なし