

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14588

研究課題名（和文）偏光依存全光型磁化反転の新展開

研究課題名（英文）New development of all-optical helicity-dependent magnetization switching

研究代表者

山田 貴大（Yamada, Kihiro）

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：40874722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、膜構造・パルス幅・波長の3条件のアップデートを目指し、特に波長の観点から偏光依存全光型磁化反転の新展開を創出できた。円偏光X線パルスを用いて内核電子励起に由来する全光型磁化反転をはじめて実現し、磁化反転がX線磁気二色性に由来することを明らかにした。さらに、独自構築した時間分解測定システムを用いて、円偏光依存スピンドYNAMICSを実時間で測定し、円偏光X線パルス誘起の磁化反転が多パルス課程により生じることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質の内核電子を強く励起することで発現する現象は多くあるが、光の基本特性である偏光状態を活用した例はない。高強度のX線自由電子レーザーの利用が可能となった今日は、X線を用いた強誘起現象にますます注目が集まっており、X線の円偏光状態を活用した本成果の波及効果は磁性分野に留まらず大きいと予想される。X線自由電子レーザーを用いた磁性体の超高速分光はヨーロッパのチームが先導してきたが、SACLAを用いた本成果を先駆けて発表できれば、新たな研究分野のフラグシップとしてSACLAの存在を強く世界に向けてアピールできる。

研究成果の概要（英文）：This research initially aimed to refine three parameters critical to all-optical helicity-dependent magnetization switching: film structure, pulse width, and wavelength. Specifically, in the context of wavelength, we achieved a significant breakthrough by the discovery of all-optical magnetization reversal. This magnetization reversal is triggered by the excitation of core electrons using circularly polarized x-ray pulses. The all-optical magnetization is rooted in x-ray magnetic circular dichroism. Furthermore, using our unique pump-probe measurement system, we demonstrated that the switching process is accomplished by multiple pulses rather than a single pulse.

研究分野：超高速分光

キーワード：全光型磁化反転

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光を磁気ビットの書き込み動作に利用する試みは古くからなされてきた。しかし、ここでの光の役割は、室温では難しい磁化反転を微小空間で実現するための局所加熱用の熱源であり、依然として磁場により磁化を反転させている。一方で、近年、円偏光パルス単体での磁化反転[1]が報告された。この偏光依存全光型磁化反転(HD-AOS)を磁気ビットの書き込みへと応用できれば、磁気記録媒体の技術革新へと発展する可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、膜構造・パルス幅・波長の3条件をアップデートし、HD-AOSの磁気記録媒体への応用と同時にその物理の発展に貢献する新展開を創出することである。

### 3. 研究の方法

パルス光照射による多層膜の磁気構造の変化を、磁気光学効果により生じる偏光回転を解析してカメラを用いて可視化した。磁化ダイナミクスの測定には、独自に構築したポンプ・プローブ磁気光学システムを用いた。ここでは、光学遅延を変えながら、励起光と同期した検出光を用いることで、ストロボスコープに磁化ダイナミクスを測定できる。

### 4. 研究成果

本研究では、課題の実現可能性や展望を考慮に入れながら、以下の3つ課題に主に取り組んだ。

#### (1) 円偏光 X 線パルスによる磁化反転

近赤外から可視領域のパルス光により外殻内の電子が励起された結果、HD-AOSが生じる。それでは、内核電子の励起によりHD-AOSが実現できるのだろうか。この問いに答えるために、X線自由電子レーザー(XFEL)を用いて、HD-AOSの実証を目指した。

Pt(1.0 nm)/[Co(0.5 nm)/Pt(1.0 nm)]<sub>3</sub>多層膜試料をガラス基板上にスパッタ法で作製した。Co層の磁気モーメントは膜面直方向に揃っており、磁気近接効果によりPt層には磁気モーメントが誘起される。通常Ptは非磁性体であるが、近接効果により磁石となる。実験にはSPring-8 SACLAを利用した。SACLAでは、フェムト秒の時間幅を持つ高輝度な円偏光パルス硬X線が利用可能である。実験ハッチ内に白色光源を用いた磁気光学顕微鏡を組み上げ、硬X線パルス照射による磁気構造の変化を観察した。光子エネルギーは、PtのX線磁気二色性を利用するために、Pt L<sub>3</sub>吸収端(2p<sub>3/2</sub>内殻→5d伝導帯)周辺に設定した。円偏光XFELパルスを多層膜上でゆっくりと掃引すると、掃引後の磁気構造がXFELの円偏光状態に応じて変化した。さらに、光子エネルギーを変化させながら、同様の実験を行うと磁気構造の変化とX線磁気二色性との間に強い相関があることがわかった。これにより、内核電子の円偏光励起によるHD-AOSが実在することを証明できた。

#### (2) 円偏光 X 線パルス誘起磁化反転のダイナミクス測定

X線パルスによる超高速な磁化の変化を捉えるために、XFELと撮像用のCMOSカメラを同期しながら測定するポンプ・プローブ磁気光学システムを独自に構築した。SACLAのシステムから励起用のXFELパルスと同期した検出用のTi:sapphireレーザーからの近赤外光パルスがそれぞれ30Hzと60Hzの繰り返し周波数で試料に照射される。水平偏光させた近赤外光パルスの光学遅延を変えながら、試料を透過した光の垂直偏光成分と水平偏光成分を分離して、2台の冷却CMOSカメラで撮像すれば、ストロボスコープに磁性と透過率の変化を別々に測定できる。冷却CMOSカメラの制御と画像取得はユーザー持ち込みPC上でのLabVIEWソフトウェアにより行う。LabVIEWはSACLAの制御システムと同期しており、2台のCMOSカメラが60Hzのトリガ信号を受けて画像を取得する。

Pt(0.5 nm)/[Co(0.5 nm)/Pt(0.5 nm)]<sub>10</sub>をSiNメンブレン上にスパッタ法により作製した多層膜試料を実験に使用した。光子エネルギーは、Pt L<sub>3</sub>吸収端においてX線磁気二色性が最大化される値に設定した。独自構築したシステムを用いて、300 fsでの超高速な減磁が観測され、試料の磁化がほぼゼロにまで減少することが明らかになった。そして、磁気緩和過程に有意な円偏光依存性が確認された。ポンプ・プローブ測定の結果に磁化反転の傾向が確認できなかった。このことから、内核電子励起の場合も外殻電子励起の場合と同様に、数多の円偏光パルスの効果が蓄積された結果としてマクロな磁化が反転すると考えられる。

さらに、独自構築したシステムを用いて、フェリ磁性GdFeCo合金におけるX線誘起磁化ダイナミクスの測定にも挑戦した。Fe副格子とGd副格子で反対向きの磁気モーメントをもち、試料全体の磁化はこれらの差によって与えられる。本研究では、X線の内殻吸収によって、FeもしくはGdの副格子を選択的に励起する点に特色がある。XFELのエネルギーをFe K吸収端(1s内殻→4p伝導帯への遷移)、およびGd L<sub>3</sub>吸収端(2p内殻→5d伝導帯)に共鳴させ選択的に励起す

る。これにより、格子の磁気モーメントが極端にアンバランスな状態が瞬間的に生成され、その状態を経て XFEL 誘起磁化反転が実現する可能性がある。SiN メンブレン上にスパッタ法により作製した膜厚 30nm の Gd<sub>25</sub>FeCo 合金試料を使用した。光子エネルギーを Gd L<sub>3</sub> 吸収端に設定した円偏光 XFEL を照射し、磁性の変化を観測することに成功した。今後は、さらに光子のフルーエンスを増加させて、Gd<sub>25</sub>FeCo の超高速磁化反転の実現を目指していく。

### (3) 円偏光ナノ秒レーザーを用いた磁化反転の試み

HD-AOS にはフェムト秒よりもピコ秒の幅の光パルスの方が適している [2]。そこで、さらにパルス幅をナノ秒まで広げた場合に HD-AOS が可能かを調査した。Q スイッチ Nd:YAG レーザー (パルス幅: 10 ns) を使用し、ガラス基板上に作製した Pt (3 nm) / Co (0.6 nm) / Pt (3 nm) 多層膜試料を励起した。磁気ドメインに変化が生じるよりも低いフルーエンスで薄膜がダメージを受け、保磁力が永続的に変化した。ナノ秒光パルスの吸収により膜内に蓄積された熱のために、膜がダメージを受けたと考えられる。このことから、パルス幅どこまでも大きくできるわけではなく、膜のダメージ閾値が HD-AOS を制限することがわかった。

### <引用文献>

[1] C. H. Lambert et al., *Science* **345**, 1337-1340 (2014).

[2] R. Medapalli et al., *Phys. Rev. B* **96**, 224421 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Mao Huiling, Sasaki Yuta, Kobayashi Yuta, Isogami Shinji, Ono Teruo, Moriyama Takahiro, Takahashi Yukiko K., Yamada Kihiro T.	4. 巻 123
2. 論文標題 Ultrafast spin-to-charge conversion in antiferromagnetic (111)-oriented L12-Mn3Ir	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 212401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0168138	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 Hiraoka Toshiki, Kainuma Ryo, Matsumoto Keita, Yamada Kihiro T., Satoh Takuya	4. 巻 93
2. 論文標題 Sublattice-Selective Inverse Faraday Effect in Ferrimagnetic Rare-Earth Iron Garnet	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 23702
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.93.023702	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 Mochizuki Soichiro, Obayashi Takafumi, Sugiura Itaru, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Ono Teruo, Satoh Takuya, Yamada Kihiro T.	4. 巻 aa
2. 論文標題 Four-terminal sensing of laser-induced anomalous-Nernst voltages	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (INTERMAG Short Papers)	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/INTERMAGShortPapers58606.2023.10308523	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kihiro Yamada
2. 発表標題 Exciting magnetic materials by XFEL
3. 学会等名 SACLA Users' meeting 2023（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kihiro T. Yamada, Akira Izumi, Tetsuya Ikebuchi, Sumiyuki Okabe, Masaki Kubo, Ryusei Obata, Rei Kobayashi, Yoshito Tagahashi, Yao Lyuxian, Yuya Kubota, Takuo Ohkochi, Yoichi Shiota, Takahiro Moriyama, Teruo Ono, Iwao Matsuda, Tadashi Togashi, Yoshihito Tanaka, Motohiro Suzuki
2. 発表標題 Magnetization switching by circularly polarized x-ray free electron laser
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1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
---------	---------