

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01818

研究課題名(和文)超高速電子顕微鏡によるスキルミオンダイナミクスの観測と制御

研究課題名(英文)Observation and control of the skyrmion dynamics by ultrafast electron microscopy

研究代表者

下志万 貴博 (Shimajima, Takahiro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：70581578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁気スキルミオンは粒子のように振る舞う安定なスピン渦として知られており、磁気メモリ素子の新たな情報担体として注目されています。実際の材料では格子欠陥や端面においてスキルミオンが容易に変形することが知られていますが、その柔軟な性質はよくわかっていません。本研究では、意図的に格子欠陥を導入したCo₉Zn₉Mn₂薄片に対してナノ秒パルスレーザーを照射し、磁気スキルミオンが変形する過程を超高速ローレンツ電子顕微鏡により時分割計測しました。その結果、スキルミオンの生成、収縮、ドリフト、クラスタ形成、消滅までの一連の過程がナノ秒からマイクロ秒の時間スケールで繰り返し生じることを発見しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気スキルミオンは粒子のようにふるまう安定なスピン渦として知られており、次世代磁気メモリの情報担体として注目されています。一方で、実際の材料やデバイスでは、格子欠陥や端面においてスキルミオンが容易に変形することが知られています。このようなスキルミオンの挙動を調べることは応用上重要な課題でした。本研究では、超高速時間分解ローレンツ電子顕微鏡を用いて柔軟なスキルミオンが変形する可逆な過程をナノ秒の精度で追跡することに成功しました。本研究成果は、光によるスキルミオンの高速繰り返し制御の可能性を示しており、次世代磁気メモリ素子の開発に貢献すると期待できます。

研究成果の概要(英文)：Magnetic skyrmions are the self-organized topological spin textures behaving like particles. When there are any imperfections in the system such as defects, disorders, edges, interface roughness, skyrmions become flexible due to the weakened topological protections. Understanding the flexible skyrmion dynamics has been an important issue in skyrmion-based applications. Here we successfully track skyrmions dynamics in defect-introduced Co₉Zn₉Mn₂, by using pump-probe Lorentz transmission electron microscope. Following the nanosecond-photothermal excitation, we resolve skyrmion's proliferation at <1 ns, contraction at 5 ns, drift from 10 ns to 4 microsecond and coalescence at 5 microsecond. These motions relay the multiscale arrangement and relaxation of skyrmion clusters in a repeatable cycle of 20 kHz. Such repeatable dynamics of skyrmions, arising from the weakened but still persistent topological protection around defects, enables us to visualize the whole life of the skyrmions.

研究分野：超高速電子顕微鏡

キーワード：超高速電子顕微鏡 ローレンツ電子顕微鏡法 ポンププローブ法 スキルミオン

1. 研究開始当初の背景

磁気スキルミオンはナノメートルサイズのスピントワールであり、密集して格子を組んだり孤立して粒子のように振る舞ったりする性質があります。一度生成されると寿命が長い上に、電流や熱により搬送できる点から、次世代磁気メモリの情報担体としての利用が期待されています。これまではクリーンな系のスキルミオンが盛んに研究され、その有用性が示されてきました。一方で、実際の材料に含まれる格子欠陥、端面、界面などの近くでは、スキルミオンの安定性が乱されて容易に変形することが知られています。スキルミオンを現実の電子デバイスの中で利用するには、このようなスキルミオンの柔軟な挙動を調べ、より良く制御するための指針を得ることが重要です。そのためには、スキルミオンの挙動を実時間で直接観測する必要があります。しかし、スキルミオンが外場に応答する時間スケールはナノ秒程度と、ごく短いことが理論的に予想されています。これまで、このような現象を観測するための高い時間・空間分解能を両立する磁気イメージング手法は非常に限られていました。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ秒・ナノメートルの分解能を有する超高速時間分解ローレンツ電子顕微鏡を開発し、スキルミオンの柔軟な挙動を明らかにすることを目指します。

3. 研究の方法

Ga イオン照射により意図的に格子欠陥を導入したキラル磁性体の $\text{Co}_9\text{Zn}_9\text{Mn}_2$ 薄膜に対してナノ秒パルスレーザーを照射し、試料を急速に加熱しました。そして、超高速時間分解ローレンツ電子顕微鏡法を用いて、熱に駆動されるスキルミオンを観測しました。本実験では、スキルミオンを熱的に駆動する目的のレーザーパルスと、スキルミオンの応答を検出する目的の電子パルスを用いました。両パルス間の時間差を制御することで、10 ナノ秒の精度で過渡的なスキルミオンの状態を追跡できます。得られるローレンツ電子顕微鏡像では、スキルミオンの形状が画像コントラストとして現れます。

4. 研究成果

レーザー照射前は、格子欠陥の影響により歪んだスキルミオンが観測されます。ここにナノ秒パルスレーザーを 5 mJ/cm^2 の強度で照射すると、試料は急速に熱せられます。その結果、歪んだスキルミオンが、270 ナノ秒後にはほぼ6回対称のクラスター構造に近づくことを見いだしました。レーザー照射直後、楕円形のスキルミオンが収縮または分裂し、その後ドリフトして、より対称性の高いスキルミオンクラスターを構成することが判明しました。さらに、これら一連のダイナミクスがナノ秒オーダーの遅延時間(ある動作から次の動作に移るまでの待ち時間)を示すことが明らかになりました。これは外力が加わることにより生じる電子スピンの擾乱に起因しており、スキルミオン間の摩擦に相当する現象を捉えたものと考えられます。

また、レーザー照射により分裂していたスキルミオンが、約5マイクロ秒後には再結合することを見いだしました。クリーンな系では長時間安定であるスキルミオンが、格子欠陥の影響によりマイクロ秒の短い寿命に変わったと考えられます。対称性の高いスキルミオンクラスターが、レーザー照射の7,820 ナノ秒後には元の歪んだスキルミオンに戻ることから、柔軟なスキルミオンの生成から消滅に至る一連の過程が繰り返し可能であることが明らかになりました。

た。

本研究では、超高速時間分解ローレンツ電子顕微鏡を用いた実時間観測から、格子欠陥周辺の柔軟な磁気スキルミオンがナノ秒からマイクロ秒の時間領域で可逆な生成・消滅サイクルを示すことを明らかにしました。今後、スキルミオンの柔軟性を活かした繰り返し可能な高速制御により、次世代磁気メモリ素子の開発に貢献することが期待できます。

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 T. Shimojima, A. Nakamura, X. Z. Yu, K. Karube, Y. Taguchi, Y. Tokura, K. Ishizaka	4. 巻 7
2. 論文標題 Nano-to-micro spatiotemporal imaging of magnetic skyrmion's life cycle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 abg1322, 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abg1322	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 下志万 貴博, 中村 飛鳥, 于 秀珍, 軽部 皓介, 田口 康二郎, 十倉 好紀, 石坂 香子
2. 発表標題 超高速電子顕微鏡による光駆動スキルミオンダイナミクスの観測
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 飛鳥, 下志万 貴博, 千足 勇介, 上谷 学, 酒井 英明, 石渡 晋太郎, 李 瀚, 押山 淳, 石坂 香子
2. 発表標題 超高速電子顕微鏡による1T'-VTe2のコヒーレント音響フォノンの観測
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Shimojima
2. 発表標題 Photo-induced skyrmion dynamics studied by ultrafast Lorentz electron microscopy
3. 学会等名 Superstripes 2019（招待講演）（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
---------	---------