

令和元年6月19日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19029

研究課題名(和文)磁壁のスピン波制御

研究課題名(英文)Magnetic domain controlled by spin wave

研究代表者

後藤 太一 (Goto, Taichi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00721507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁壁に、磁気波である『スピン波』を流すことで、右や左に磁壁が移動するか、を明らかにすることが最終的な目的である。工学的に見て、絶縁体中の磁壁がスピン波で思い通りに制御ができるようになれば、磁気で磁気情報をシフト出来るようになり、電気と違って密集した配線が不要で、様々なものに応用できる。しかし、実証例は無く、磁壁の移動も確認されておらず、実験的根拠がない。磁壁の移動は一般的なスピン波に比べて遥かに遅く、これまで広く実験されてきた系では難しいと考えた。そこで、電気を流さない磁性絶縁体中を流れるスピン波と磁壁の関係をナノ・マイクロスケールの試料、観察を用いて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私は絶縁磁性体中の磁壁の消失と発生を制御し、光の偏光面状態を高速で切り替えることで、世界で初となる磁壁を使ったQスイッチレーザーを2016年に実証・発表されている。当該レーザー開発の中で、レーザーの出力される周波数(繰り返し周波数)は、100kHzを超えられず、情報処理デバイス応用には障壁がある。本件は、これまで具体の対策がなかった。そこで、着目したのが、電流による磁壁制御である。磁壁のある導体磁性体に電流を流すと、磁壁は移動する。これを絶縁磁性体に適用できれば、アレイ化技術と組み合わせると、レーザーの繰り返し周波数をMHzオーダーに増大でき、社会での小型のレーザーの活躍範囲が広がると考えられる。

研究成果の概要(英文)：It is the final purpose to clarify whether the domain wall moves to the right or left by flowing 'spin wave' which is a magnetic wave in the domain wall. From the engineering viewpoint, if the magnetic domain wall in the insulator can be controlled as desired by the spin wave, the magnetic information can be shifted by the magnetism, and unlike the electricity, the dense wiring is unnecessary, and it can be applied to various things. However, there is no demonstration, and the movement of magnetic domain wall has not been confirmed, and there is no experimental basis. The movement of the domain wall is much slower than that of the general spin wave, and it is considered to be difficult in the system widely tested until now. Then, the relationship between spin wave flowing in the magnetic insulator without electric current and domain wall was clarified using sample and observation of nano micro scale.

研究分野：ナノ・マイクロシステム

キーワード：スピン波 磁壁 磁気ドメイン 強磁性共鳴

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

絶縁磁性体中の磁壁の消失と発生を制御し、光の偏光面状態を高速で切り替えることで、世界で初となる磁壁を使った Q スイッチレーザーを 2016 年に実証・発表した。[Goto 他, Opt. Express 24, 17635, (2016)].

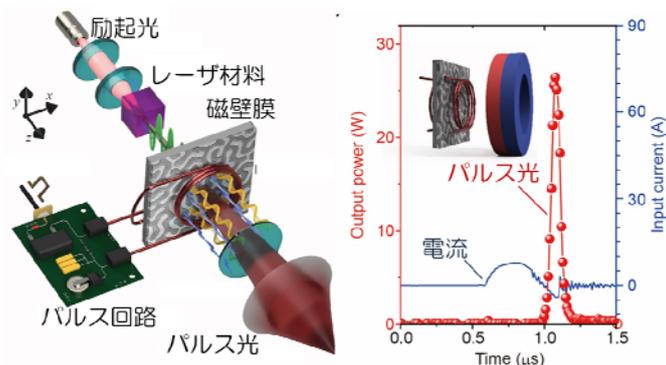


図 1 磁壁を使った Q スイッチレーザー

[Goto 他, Opt. Express 24, 17635, (2016)]

当該レーザー開発の中で、レーザーの出力される周波数（繰り返し周波数）は、レーザー材料のもつ蛍光寿命に制限され、100kHz を超えられず、情報処理デバイス応用には障壁があることが分かった。本件は、デバイスの最終仕様を決定する特性であるにも関わらず、これまで具体的な対策がなかった。そこで、着目したのが、電流による磁壁制御である。磁壁のある導体磁性体に電流を流すと、磁壁はその電流パルス数や電流の大小に応じて移動する。これを絶縁磁性体に適用できれば、アレイ化技術と組み合わせて、レーザーの繰り返し周波数を MHz オーダに増大できると考えた。しかし、絶縁体はその名の通り、電流を流さない。そこで、絶縁体中で電流（スピン流）に変わって、スピンの状態を運ぶ、スピン波に着目した。

### 2. 研究の目的

磁気材料の N 極と S 極の境界に存在する『磁壁に、磁気の波である『スピン波』を流すことで、右や左に磁壁が移動するか？を明らかにする』ことが最終的な目的である。工学的に見て、絶縁体中の磁壁がスピン波で思い通りに制御ができるようになれば、磁気で磁気の情報『シフト』出来るようになり、電気と違って密集した配線が不要で、超低消費電力のレーストラックメモリや、スピン波光シャッター、レーザー向け薄膜 Q スイッチなどに応用できる。導体中のスピンの流れを DC のスピン（スピン流）とするならば、絶縁体中のスピンの流れは AC のスピン（スピン波）とみることができ、エジソンとテスラが見せた AC 電流伝送と、DC 電流伝送の、対応関係にあたる。DC のスピンによる磁壁移動は、すでに実証されており、スピン流から磁壁への角運動量の受け渡しで説明できる。このアナロジーで、絶縁体中でスピン角運動量の受け渡しができるキャリアは、スピン波であると予想できる。系（システム）として美しいが、実証例は無く、磁壁の移動も確認されておらず、実験的根拠がない。磁壁の移動は一般的なスピン波に比べて遥かに遅く、これまで広く実験されてきた系では難しいと考えた。そこで、本応募では、電気を流さない磁性絶縁体中を流れるスピン波によって磁壁が移動可能かどうかをナノ・マイクロスケールの試料、観察によって明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

磁壁を発現する組成の単結晶磁性ガーネット膜を用意し、これを、化学的機械研磨することで膜厚の異なる試料を作製した。作製した試料の膜厚を光学顕微鏡により測定し、100 μm から 1 μm オーダの膜厚をもつ試料であることを確認した。これと並行し、パルスレーザーデポジション法で、膜厚が 1 μm 以下の単結晶磁性ガーネットも作製した。作製した試料の強磁性共鳴吸収スペクトルを印加する磁界を変化して測定した。このときの磁界は、試料表面に対して垂直になるように印加した。作製した試料の磁気ドメインを、偏光顕微鏡を用いて観察した。観察には、ハロゲンランプの光を分光した波長 740 nm の光を用いた。顕微鏡では、試料の透過光を用いて観察を行った。以上を整えた後、2つの実験系を合体し、強磁性共鳴を磁性ガーネット中で起こし、同時に、磁気ドメインを、偏光顕微鏡を用いて観察した。

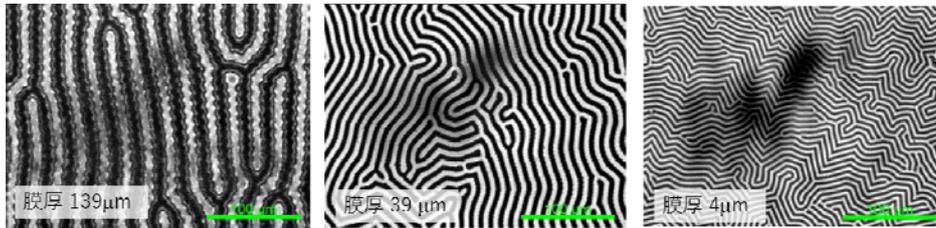


図2 磁気ドメインサイズを変化した磁性ガーネット試料

#### 4. 研究成果

用意した試料を用いて、磁気ドメインが生じる磁性ガーネット中で生じた強磁性共鳴を測定した。本成果は、[Advanced Electronic Materials, 4, 1800106 (2018)]にて発表した。磁性ガーネットが、膜面に垂直方向に磁気飽和していない状態で、磁性ガーネット中を伝搬するスピン波が確認できた。さらに、これは、磁気飽和状態で伝搬するスピン波に比べて帯域が広く強度も同等かそれ以上に高いことが分かった。このことから、非飽和状態の磁性ガーネット中を流れるスピン波および強磁性共鳴の応用の可能性が示唆された。

次に、膜厚を薄くするにつれて、磁性ガーネット中の磁気ドメインのサイズが小さくなることが確かめられた。偏光顕微鏡で磁性ガーネットを観察し、強磁性共鳴スペクトルと対応させることで、非飽和状態での強磁性共鳴が生じることを確認した。測定で得られた結果と、異方性磁界を考慮した強磁性共鳴分散関係の計算結果とを比較すると、非飽和状態では、実験と計算に大きな差があることが分かった。この差を調べるために、マイクロマグネティクスを使った大規模計算（クラスタ計算）を行った。実際に使用した試料と同スケールのモデルを作成し、これを使った磁気ドメインの計算を行った。シンプルな一様膜を想定した場合でも、膜厚が薄くなると、膜厚が厚いときとは明らかに異なる結果が得られた。これは、今回用いた偏光顕微鏡では観察が難しいより小さいスケールものに起因する可能性が高く、これが、非飽和状態におけるスピン波伝搬及び強磁性共鳴に強く関係していると考えられる。本結果は、論文にまとめ発表予定であり、より高分解能な偏光顕微鏡を用いることで、詳細な原理が判明するものと期待している。

以上のように、今回新たに、ナノ・マイクロスケールの非飽和状態での強磁性共鳴およびスピン波の伝搬は、シンプルな系での理論では説明ができず、実際の試料スケールのモデルを用いた大規模計算を用いて考える必要があることが分かった。今回、磁壁のスピン波制御を目指し、磁壁をもつ磁性絶縁体中を流れるスピン波および強磁性共鳴の基礎的な特性を明らかにした。磁壁中のスピン波伝搬を調べる過程や、試料形成の過程で得られた知見および当初想定していなかった新しい結果は、下記の論文や学会発表等によって報告した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- (1) T. Goto, K. Shimada, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "One-dimensional magnonic crystal with Cu stripes for forward volume spin waves," *Physical Review Applied*, 11, 014033 (2019/01/17). [査読あり]  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.014033
- (2) R. Morimoto, T. Goto, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, and M. Inoue, "Crystalline and magneto-optical characteristics of  $(\text{Tb, Bi})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$  deposited on  $(\text{Y, Nd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ," *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 061101 (2018/05/18). [査読あり]  
DOI: 10.7567/JJAP.57.061101
- (3) T. Yoshimoto, T. Goto, K. Shimada, B. Iwamoto, Y. Nakamura, H. Uchida, C. A. Ross, and M. Inoue, "Static and dynamic magnetic properties of single-crystalline yttrium iron garnet films epitaxially grown on three garnet substrates," *Advanced Electronic Materials*, 4, 1800106 (2018/05/17). [査読あり]  
DOI: 10.1002/aelm.201800106
- (4) R. Morimoto, T. Goto, T. Taira, J. Pritchard, M. Mina, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, and M. Inoue, "Randomly polarised beam produced by magneto-optically Q-switched laser," *Scientific Reports*, 7, 15398 (2017/11/13). [査読あり]  
DOI: 10.1038/s41598-017-15826-3
- (5) T. Yoshimoto, T. Goto, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, C. A. Ross, and M. Inoue, "Thermally stable amorphous tantalum yttrium oxide with low IR absorption for magnetophotonic devices," *Scientific Reports*, 7, 13805 (2017/10/23). [査読あり]  
DOI: 10.1038/s41598-017-14184-4
- (6) Z. Shirakashi, T. Goto, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, and M. Inoue,

"Reconstruction of non-error magnetic hologram data by magnetic assist recording," Scientific Reports, 7, 12835 (2017/10/09). [査読あり]

DOI: 10.1038/s41598-017-12442-z

- (7) N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "The role of Snell's law for a magnonic majority gate," Scientific Reports, 7, 7898 (2017/08/11). [査読あり]  
DOI: 10.1038/s41598-017-08114-7
- (8) S. Sakai, H. Takagi, K. Nakamura, T. Goto, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, and M. Inoue, "Development of a wide-viewing-angle magnetophotonic crystal for a magneto-optic three-dimensional display," IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 137, 398-403 (2017/07/01). [査読あり]  
DOI: 10.1541/ieejfms.137.398
- (9) Y. Nakamura, Z. Shirakashi, H. Takagi, P. B. Lim, T. Goto, H. Uchida, and M. Inoue, "Error-free reconstruction of magnetic hologram via improvement of recording conditions in collinear optical system," Optics Express, 25, 15349-15357 (2017/06/26). [査読あり]  
DOI: 10.1364/OE.25.015349
- (10) K. Shimada, T. Goto, N. Kanazawa, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "Extremely flat transmission band of forward volume spin wave using gold and yttrium iron garnet," Journal of Physics D: Applied Physics, 50, 275001 (2017/06/15). [査読あり]  
DOI: 10.1088/1361-6463/aa7505

[学会発表] (計 87 件)

- (1) T. Goto, "Logic gate and Q-switch laser using iron garnet films," in Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) 124 委員会 The 514th 研究会, 東京工業大学田町キャンパス (2017). [招待講演]
- (2) T. Goto, R. Morimoto, J. W. Pritchard, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Magneto-optical Q-switch lasers generating kW order pulses based on domain motions in rare-earth iron garnet," in Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Magnetics Conference (Intermag), Convention centre Dublin, Dublin, Ireland, (2017). [招待講演]
- (3) T. Goto, R. Morimoto, J. Pritchard, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Development of thin Q-switched laser driven by magnetic domains," in 応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, (2017). [招待講演]

[その他]

・ 後藤太一 Researchmap

<https://researchmap.jp/taichigoto/?lang=japanese>

・ スピン・エレクトロニクス グループ (所属グループ) ホームページ

<http://www.spin.ee.tut.ac.jp/>

・ 後藤太一 個人ホームページ

<http://taichigoto.boj.jp/wordpress/>

・ 後藤太一 Twitter

<https://twitter.com/taichigoto>

※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、研究者個人に帰属されます。