

令和元年6月10日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19068

研究課題名(和文) skyrmionダイナミクスを利用した新規多値メモリ素子の提案

研究課題名(英文) Feasibility study on multilevel memory based on skyrmion dynamics

研究代表者

岡本 聡 (Okamoto, Satoshi)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：10292278

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)：本研究では、トポロジカルスピン構造の一つであるskyrmionを利用した新規多値メモリ素子の提案を行うことを目的に研究を行った。まずシミュレーションをベースにskyrmionが安定に生成されるための条件を決定し、その条件の下で磁気ディスクへのマイクロ波を使ったskyrmionの生成・消去手法が可能であることを実証した。次にGdFeCoアモルファス合金薄膜を用いた素子を作製し、マイクロ波に対する磁化応答を検出する実験を行った。実験的にskyrmionを確認するには至らなかったものの、マイクロ波による磁化反転など基本動作原理の実証は確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

skyrmionは近年、大きな注目を集めているトポロジカルスピン構造の一つであり、これを基にした新規多値メモリの原理実証を行った。シミュレーションによって、skyrmionのマイクロ波に対する挙動を計算した結果、磁気ディスク内にskyrmionの生成・消去が可能であることを示すことができた。さらに実験により、マイクロ波応答に対する基本動作原理の確認をすることができた。

研究成果の概要(英文)：We studied the feasibility of a novel multilevel memory device based on skyrmion which has recently attracted much attention as one of the topological spin structures. We firstly studied the condition for the stable existence of skyrmion on a magnetic thin film through the micromagnetic calculations. Next, under thus determined stable condition of skyrmion, we explored the microwave response of the skyrmions. Consequently, we successfully demonstrated that generation and erasing of skyrmions inside the magnetic disk was possible by applying a microwave pulse. We had tried to study the microwave response of skyrmions experimentally. For this purpose, we fabricated a device using a GdFeCo amorphous alloy thin film. Unfortunately, it was difficult to observe the skyrmions on the GaFeCo amorphous disk. However, the control of magnetization direction by applying the microwave was clearly confirmed as a fundamental operation of skyrmion memory.

研究分野：磁気工学

キーワード：skyrmion スピンダイナミクス 多値メモリ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

磁気 skyrmion (以降, skyrmion) は, Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)によって発現するトポロジカルスピン構造の一つであり、実験的にその存在が実証されてからまだ間もない非常に新しい分野であるが、ナノスケール領域でトポロジカル安定性を有していることから、メモリキャリアとしての応用が期待されている。しかし、当初は特異な材料、極低温、バイアス磁場下などのごく限られた狭い条件でのみ skyrmion の生成が確認されていた。このような状況に対し、ごく最近になりスピントロニクス研究で比較的多く研究されている汎用的な材料を用いて室温で安定な skyrmion 形成が報告され、その結果、実現可能性のある大容量ストレージメモリ素子として世界中で研究が活性化し始めている。その一方、現在、主流で研究されている skyrmion メモリ素子はレーストラック型と呼ばれるものであるが、レーストラック型メモリ素子自体が未だに実用に至っていないことから明らかなように、解決すべき多くの問題・課題を抱えているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、レーストラック型とは異なる新原理に基づく skyrmion 多値メモリ素子の提案を行うものである。具体的には、磁性ディスク内に複数の skyrmion を蓄積させ、その個数に多値メモリ情報を対応させる。また信号検出は、skyrmion ダイナミクスを利用した周波数検波方式を用いる。単純な素子構造のため、レーストラック型で問題であった多くの課題は、本素子では問題とならないと期待できる。まずはシミュレーションを用いて、本提案の実現可能性について検討し、要素技術について実験による検証を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に基づくシミュレーションを実施し、以下項目について検討した。(1) 磁性薄膜において skyrmion が安定に生成される条件の探索、(2) 磁性ディスクに複数の skyrmion を配置した際の共鳴周波数変化の調査、(3) マイクロ波印可による skyrmion 生成ならびに消去の可能性検討。次に実験では、GdFeCo アモルファス合金薄膜を用いた素子を作製し、マイクロ波に対する応答を調べた。GdFeCo アモルファス合金薄膜は、垂直磁化を示すことに加え、近年、DMI の存在が実験的に確認されており、skyrmion に対する候補材料として今回取り上げた。

### 4. 研究成果

#### (1) シミュレーション結果

まず磁性薄膜の代表的なパラメータ(飽和磁化  $M_s$ 、磁気異方性定数  $K_u$ 、DMI 定数  $D$ )を変化させて安定な磁化状態について調べ、skyrmion 生成に適していると想定される条件の絞り込みを個なった。次に、この条件を基に、磁気ナノディスクに対する skyrmion の安定生成条件について調べた。図1は、その一例であり、128 nm 径の磁気ナノディスクに対して  $K_u$  と  $D$  に対する安

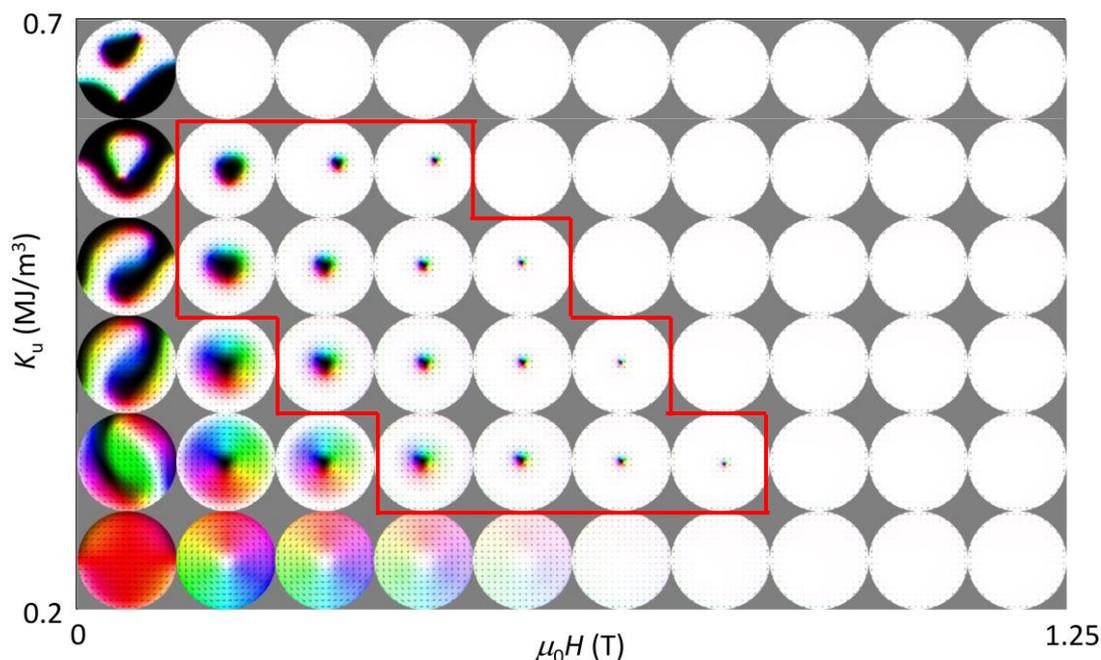


図1 磁気ナノディスク(128 nm 径)のバイアス磁場  $H$  と磁気異方性定数  $K_u$  に対する安定な磁化状態の調査結果。赤枠で囲んだ領域において skyrmion 生成が確認できる。

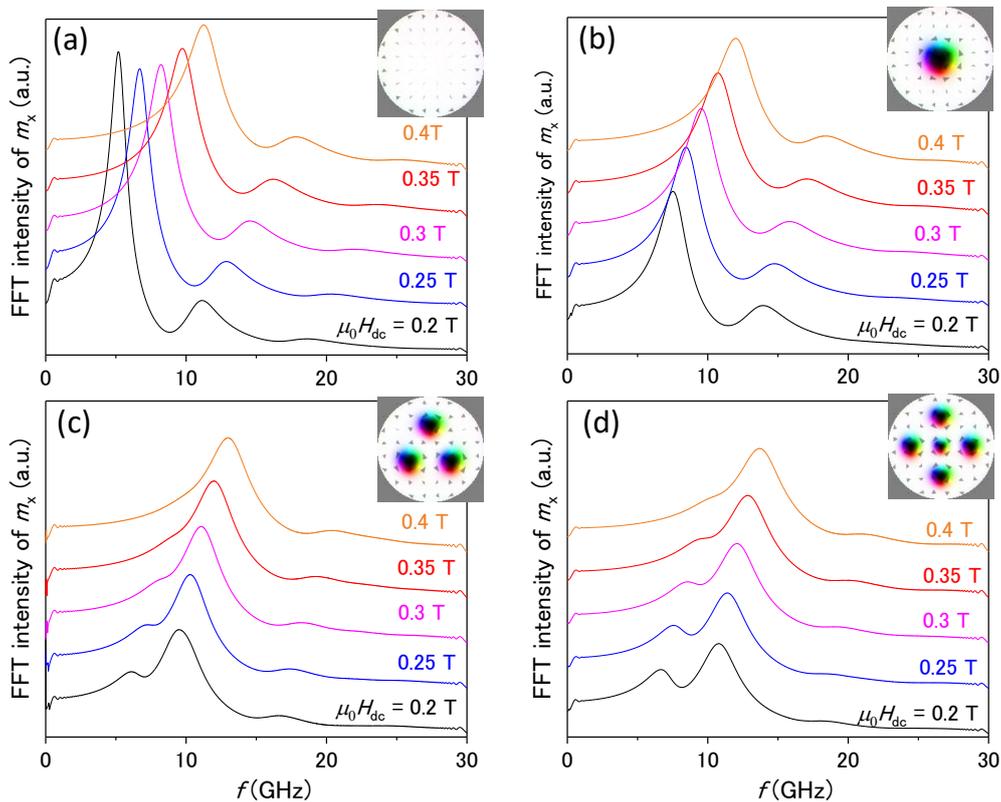


図2 複数個の skyrmion が同時生成している状態における磁気共鳴スペクトルの計算結果。

定な磁化状態を調べた結果である。赤線で囲まれた領域において、skyrmion が安定化していることが分かる。次に、磁気ナノディスクに対して複数個の skyrmion 生成可能性について検討したところ、128 nm 径の磁気ナノディスクにおいて最大で9個の skyrmion が同時生成しうることが分かった。このような複数個の skyrmion が同時生成している状態において、磁気共鳴スペクトルを計算した結果を図2に示す。図2 (a)の skyrmion が存在していない場合では、高周波側と低周波側にそれぞれエッジモードとセンターモードの2つの共鳴ピークが確認できる。ピーク強度はセンターモードの方が大きい。これに対して、図2 (b)-(d)に示すように複数個の skyrmion が存在する場合、ピーク強度だけでなく、ピーク位置、つまり共鳴周波数が大きく変化していることが分かる。これは、磁気ディスク内に存在する skyrmion の個数に対応して、共鳴周波数が変化しており、周波数検波により skyrmion の個数に対応する情報を「検出」できることを意味している。

次に、マイクロ波パルスを印可した際の skyrmion 状態の挙動を計算した結果を図3に示す。初期状態を1個の skyrmion とし、マイクロ波磁場振幅 100 mT、周波数 6.0 GHz の条件でパルス幅を (a) 0.5 ns、(b) 3 ns としたときの結果である。パルス幅 0.5 ns の時には skyrmion が消滅しており、パルス幅 3 ns の時には skyrmion が2個となっていることが分かる。つまり、マイクロ波パルスによる skyrmion の消去、生成が行えることを意味している。

以上、磁性ナノディスクにおける skyrmion の消去、生成、さらに周波数検波による個数検出が可能であり、本研究で目的としている skyrmion 多値メモリの基本的な動作実証に成功した。

## (2) GdFeCo を用いた実験

GdFeCo 薄膜はスパッタ法で成膜し、ナノドット形状に微細加工を施した。さらに絶縁層を介してマイクロ波線路を形成し、GdFeCo ナノディスクにマイクロ波印可可能な素子を作製した。磁気信号はナノドット下部に形成した十字型電極を用いて異常 Hall 効果測定により検出した。

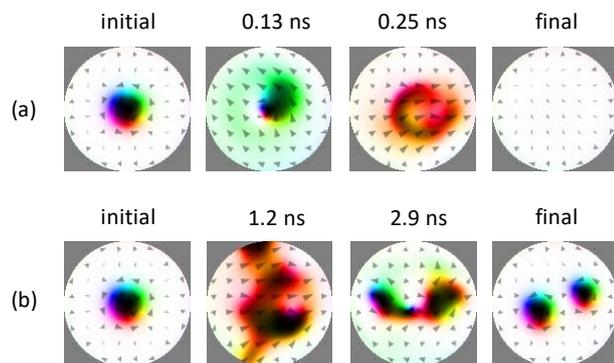


図3 1個の skyrmion 状態にマイクロ波パルスを印可し、その時間変化を計算した結果。(a) パルス幅 0.5 ns、(a) パルス幅 3 ns。

図4は3000 nm径のGdFeCo ナノディスクの強磁性共鳴スペクトルの測定結果である。低周波側と高周波側に2つのピークを持つスペクトル形状が得られた。この結果からは skyrmion 生成に関する情報は得られず、また磁気力顕微鏡などの手法を用いた観測でも、skyrmion が実際に生成しているかどうかの確認は残念ながら取れなかった。次にこの試料に対して 36 mT のマイクロ波を印可した際の磁化挙動を図5に示す。赤領域ならびに青領域は、それぞれ上向き磁化、下向き磁化状態に対応している。マイクロ波周波数によって磁化反転が明瞭に促進されており、マイクロ波周波数によって磁化状態を制御できることを実証した。

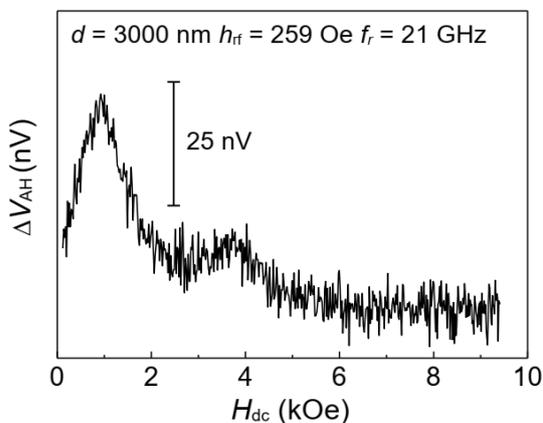


図4 GdFeCo ナノディスクの強磁性共鳴スペクトルの測定結果。

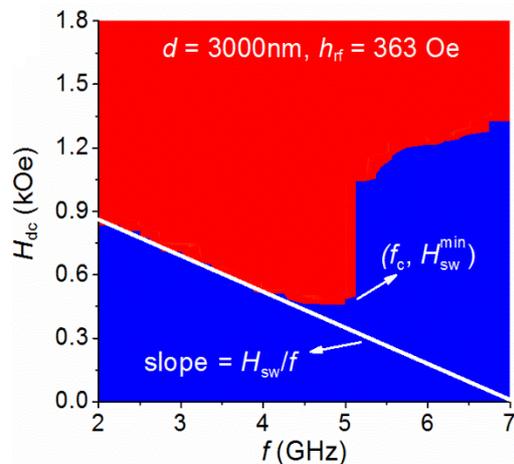


図5 GdFeCo ナノディスクのマイクロ波に対する磁化状態の測定結果。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① N. Kikuchi, K. Shimada, T. Shimatsu, S. Okamoto, O. Kitakami, Frequency dependence of microwave-assisted switching in CoCrPt granular perpendicular media, Japanese Journal of Applied Physics, (2018), 09TE02, 10.7567/JJAP.57.09TE02

[学会発表] (計 8 件)

- ① N. Kikuchi, T. Yomogita, D. Kanahara, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, H. Osawa, M. Suzuki, Time- and spatially resolved hard X-ray MCD with pulsed rf field excitation on a Co/Pt multilayer dot, 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (2017)
- ② N. Kikuchi, K. Shimada, S. Kikuchi, K. Sato, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Microwave assisted switching behavior of CoCrPt based granular media, The 29th magnetic recording conference (TMRC2018), (2018)
- ③ 岡本 聡, Lu Yuming, 菊池伸明, 北上 修, 島津武仁, 積層磁性膜におけるマイクロ波アシスト磁化反転, 電気学会全国大会, (2018)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 <http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/kitakami/>

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：加藤 剛志

ローマ字氏名 : Kato Takeshi  
所属研究機関名 : 名古屋大学  
部局名 : 工学研究科  
職名 : 准教授  
研究者番号 (8桁) : 50303665

(2)研究分担者  
研究分担者氏名 : 北上 修  
ローマ字氏名 : Kitakami Osamu  
所属研究機関名 : 東北大学  
部局名 : 多元物質科学研究所  
職名 : 教授  
研究者番号 (8桁) : 70250834

(3)研究分担者  
研究分担者氏名 : 菊池 伸明  
ローマ字氏名 : Kikuchi Nobuaki  
所属研究機関名 : 東北大学  
部局名 : 多元物質科学研究所  
職名 : 助教  
研究者番号 (8桁) : 80436170

(4)研究協力者  
研究協力者氏名 : 佐藤 利江  
ローマ字氏名 : Sato Rie

※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。