

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01029

研究課題名（和文）高密度スキルミオン流の流体力学的輸送特性の研究

研究課題名（英文）hydrodynamic transport properties of high-density skyrmion flows

研究代表者

長尾 全寛（Nagao, Masahiro）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：80726662

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：高密度状態のスキルミオンの運動を流体力学的観点から研究を行った。スパッタリング法によってTa(5)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>(1)/Ta(0.08)/MgO(2)/Ta(5)スキルミオン生成の試料構成を探ったが、高密度スキルミオンの生成は困難であった。そこで、Pt/Co/Taに変更して研究を行った。こちらも最適な密度のスキルミオンを得ることが困難であることが分かった。一方で、合成条件を検討することで、スキルミオン安定化に不可欠なジャロシンスキー・守谷相互作用の増大に成功し、自発的なスキルミオンの生成に成功した。この成果によって、レーストラックメモリで課題であった読み取りエラー検出も可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験において最適なスキルミオン密度を得ることは困難であったものの、研究過程でCMOSとの親和性が高いため工業的に利点があるスパッタリング法でジャロシンスキー・守谷相互作用の増強に成功し、磁場フリースキルミオンの生成に成功したことは、今後のスピントロニクス応用においてデバイス微細化が見込まれ、新たなスピントロニクスデバイスの創製に繋がる成果である。読み取りエラー検出可能なレーストラックメモリの提案はこれら成果によって初めて実現可能となったものであり、今後の省エネルギーコンピューティングの実現へ貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：The study focused on the motion of high-density skyrmion states based on hydrodynamics. Initially, using the sputtering method, skyrmion-hosting Ta(5)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>(1)/Ta(0.08)/MgO(2)/Ta(5) multilayers were prepared. However, it was challenging to achieve high-density skyrmions using these multilayers. As a result, the study explored different multilayers, specifically Pt/Co/Ta, but encountered similar difficulties. Nevertheless, by adjusting sputtering conditions, the study successfully enhance the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, leading to the generation of spontaneous skyrmions. This breakthrough also facilitated the detection of reading error-detectable in racetrack memory.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スキルミオン スピントロニクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、高密度スキルミオン粘性流の観測及びその新規輸送特性の創出に取り組んだ。磁気スキルミオンはトポロジーに保護された安定な粒子としての特性を示すことが知られている。特に、超低密度電流による駆動を示すことから、スキルミオンを情報キャリアとして利用するスピントロニクス応用に集まっている。

### 2. 研究の目的

スキルミオンはスピントロニクス応用として期待されているが、これまでその電流駆動は孤立した(相互作用のない)スキルミオンを対象としていた。応用の観点からはスキルミオンが高密度状態となった際の挙動も重要となる。しかし、スキルミオン粒子間相互作用が存在する高密度スキルミオンの集団的運動による輸送特性は未解明である。高密度スキルミオンの集団的運動は非圧縮性トポジカル粒子流として分野横断的な興味深い舞台を提供し、さらに、高速処理・高記録密度メモリ等の実現を目指す上でその解明は重要な課題である。

### 3. 研究の方法

Ta(5)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>(1)/Ta(0.08)/MgO(2)/Ta(5)と Pt/Co/Ta をスパッタリング法で作製した。実験に最適な合成条件を得るために、試料構成や Ar ガス圧を様々に変更した。得られた多層膜は電流駆動実験のために集束イオンビーム法によって微細加工した。また、スキルミオンおよび磁気構造観察には、ローレンツ電子顕微鏡とスキルミオンの電流印加によるその場観察を可能にするためにプローバーと磁気光学カー効果顕微鏡(垂直磁場印加可能な電磁石を搭載)を一体化させた装置を作製して観察を行った(図1)。



図 1

### 4. 研究成果

Ta(5)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>(1)/Ta(0.08)/MgO(2)/Ta(5)と Pt/Co/Ta を様々な合成条件で作製したが、実験に最適な高密度スキルミオンを得ることは困難であった。また、ある程度の密度を持つスキルミオンにおいて電流駆動の実験を行ったが、見込んだような結果は得られなかった。しかし、スパッタリ

ング法における Ar ガス圧を変更すると、ジャロシンスキー・守谷相互作用が増大することが分かった。

図 2 は Pt/Co/Ta を Ar ガス圧 0.4 Pa(左)と 2.0 Pa(右)で作製した試料のロー

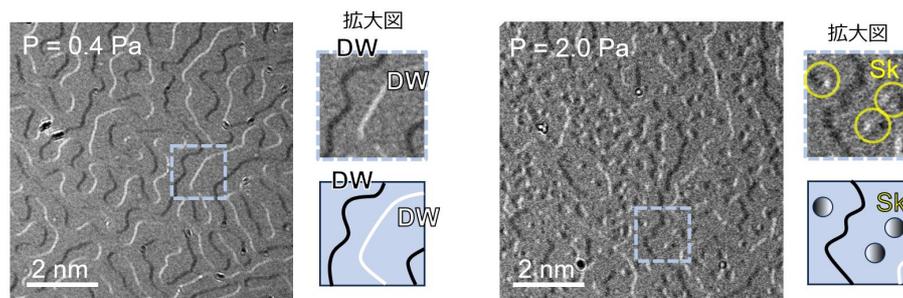


図 2. Pt/Co/Ta の磁気構造。左 : 0.4 Pa 合成。右 : 2.0 Pa 合成

レンツ電子顕微鏡像である。0.4 Pa で合成した試料は通常のネール型磁壁のみが観察されたが、2.0 Pa で合成した試料は無磁場においてネール型磁壁とネール型スキルミオンが共存していることが分かる。このことは、スキルミオンを安定化させるジャロシンスキー・守谷相互作用が増大していることを示しており、磁場フリーのスキルミオンが実現可能であることを示すものである。デバイス応用において、磁場の存在は他の素子に影響を与えるため磁気シールドが必須となり大型化が避けられないが、本研究過程において見いだされた磁場フリースキルミオンの実現はスキルミオンデバイスの小型化において貢献するものである。また、これらの試料を高角環状視野走査透過型電子顕微鏡で観察する

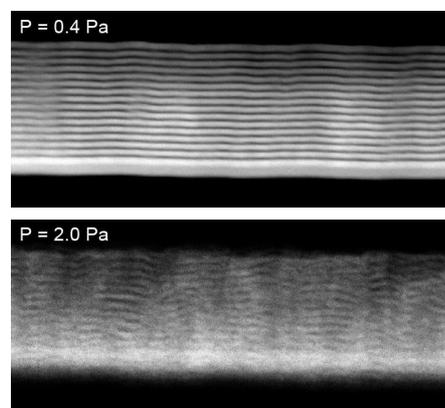


図 3. Pt/Co/Ta HAADF-STEM 像

と、高 Ar 圧では、層の乱れと欠陥が観察され（図 3） これらがジャロシンスキー・守谷相互作用を増大させることが示唆された。また、図 2 右のように磁壁とスキルミオンの共存状態が初めて観察されたことから、この結果を基にして磁壁がクロック機能の役割を果たす読み取りエラー検出可能なレーストラックメモリを提案し、ナノワイヤを作製して磁気構造を実現した（図 4）。このメモリは省エネルギーコンピューティングを実現する可能性を秘めている。

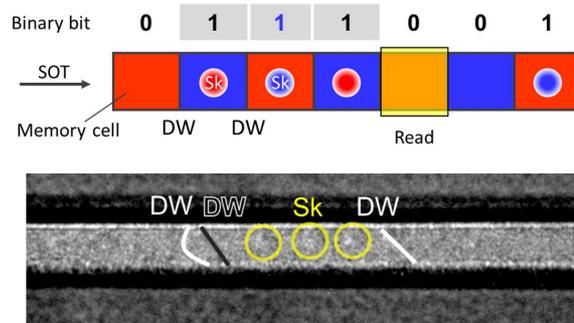


図 4. 読み取りエラー検出可能なレーストラックメモリの概念  
図（上）とナノワイヤ中の磁気構造の実現（下）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Shimizu Daigo, Nagase Tomoki, So Yeong-Gi, Kuwahara Makoto, Ikarashi Nobuyuki, Nagao Masahiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Nanoscale Characteristics of a Room-Temperature Coexisting Phase of Magnetic Skyrmions and Antiskyrmions for Skyrmion-Antiskyrmion-Based Spintronic Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 13519 ~ 13528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.2c03162	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 Oshima Daiki, Kato Takeshi, Ikarashi Nobuyuki, Nagao Masahiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Fabrication of $\gamma$ -Mn type Co-Zn-Mn(001) film on MgO single crystal substrate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025331 ~ 025331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000488	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 狩野達郎、清水大瑚、大島大輝、加藤剛志、五十嵐信行、長尾全寛
2. 発表標題 磁性多層膜におけるスキルミオン・バッグ及びその関連構造の実現とその応用
3. 学会等名 IEEE Magnetism Society 名古屋支部 若手研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 狩野 達郎、清水 大瑚、大木 彩加、大島 大輝、狩野 絵美、加藤 剛志、五十嵐 信行、長尾 全寛
2. 発表標題 内部クロックを有する磁区格納型スキルミオンレストラックメモリ
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Daigo Shimizu, Nagao Masahiro
2. 発表標題 Electron microscopy investigation of domain wall dynamics in two-dimensional sliding ferroelectrics
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究分担者	大島 大輝 (Oshima Daiki) (60736528)	名古屋大学・工学研究科・助教  (13901)	

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
---------	---------