

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01866

研究課題名(和文) 電流駆動された磁気スキルミオン系における新奇非平衡相の開拓

研究課題名(英文) Study of emergent nonequilibrium phases in current-induced magnetic skyrmions

研究代表者

佐藤 拓朗 (Sato, Takuro)

分子科学研究所・協奏分子システム研究センター・助教

研究者番号：60803749

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、磁気スキルミオンを対象にして、平衡状態から電流駆動下の非平衡状態へと探索の舞台を拡張することで、互いに強く相関するスキルミオンが示す新奇相の開拓を目指すものであった。主な成果は、(1)電流駆動スキルミオンが形成する動的結晶相における非平衡干渉効果(モードロック共鳴)の観測、(2)電流誘起スキルミオン-非スキルミオン相変換現象の発見、の2点である。いずれも平衡相に限定された研究では決して見出せなかった非平衡相固有の現象であり、本研究で基軸にした着眼点の有用性を強く支持している。電流を制御因子にしたスキルミオン非平衡相の開拓において、研究当初の予想を上回る大きな成果が得られたと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で得られた成果は、平衡相においては観測しえない、電流駆動された非平衡相固有の現象である。この新奇物性探索の観点は、決してスキルミオン相に限定されるわけではなく、駆動された粒子系や、非平衡電子系一般に適用可能だと考えられるため、その波及効果は大きい。また近年、電流を制御パラメータにした相制御が盛んに議論されているが、現状の実験結果においては、ジュール熱や試料の不均一性といった外因的影響が無視できず、理論との対応付けが困難であった。本研究の成果(2)は、真に量子スピン系固有の応答によるものであるため、電流誘起相変換一般のモデル現象として機能することが期待される。

研究成果の概要(英文)：This study has focused on the current-induced magnetic skyrmions, one of the well-defined nonequilibrium phases, to explore the new phases of matter formed in strongly-correlated skyrmion system. The main achievements are as follows: (1)the observation of mode-lock resonance in current-induced moving crystal phase in skyrmions, (2)the observation of current-induced non-thermal phase change from skyrmion to non-skyrmion phase. Both of them can be achieved only by investigating the nonequilibrium properties of skyrmions, strongly supporting my idea that the nonequilibrium state of skyrmions potentially provides emergent properties and functionalities.

研究分野：固体物性物理

キーワード：磁気スキルミオン ノイズ測定 非平衡相転移 モードロック共鳴 電流誘起相変換

## 1. 研究開始当初の背景

磁気スキルミオンと呼ばれる渦状のスピンの構造が発見されて以来、主に、スキルミオンの発現機構を拡充するといった視点の研究が精力的に行われ、数多くのスキルミオン形成物質が見出されてきた。一方で、スキルミオンが取り得る状態に目を向けると、原子/分子自由度の結晶・液体・ガラスに対応して、スキルミオン自由度の結晶・液体・ガラスといった多様な状態が存在しうることが理論的に指摘されているにもかかわらず、当時の殆ど全ての物質において、スキルミオン結晶しか観測されていなかった。この状況は、従来の物性探索が熱平衡相の枠組みに限定されていた点にその原因があると睨み、平衡状態から、電流駆動下という非平衡状態へと探索の舞台を拡張することで、さらなる新奇スキルミオン相やスキルミオンが織りなす新たな機能性を開拓できるのではないかという着想に至った。

当時、この作業仮説に従い、最も代表的なスキルミオン物質 **MnSi** における電気抵抗揺らぎの測定を行ったところ、狭帯域雑音と呼ばれるスペクトルが観測され、電流駆動され不均一に運動していたスキルミオン群が、その結晶性を回復し、動的な結晶相（“動的結晶”）へと非平衡相転移することを実証することに成功していた(Sato et al, Phys. Rev. B 2019)。この結果は、電流駆動下の非平衡環境下でスキルミオンが多様な相を発現し得ることを強く示唆しており、研究計画の妥当性を支持するものであった。

## 2. 研究の目的

以上を踏まえ、本課題では、探索の舞台を平衡状態から電流駆動下の非平衡状態へと拡張し、新奇スキルミオン相やスキルミオンが持つ新奇機能性を、“非平衡相として”発見することを目指した。

## 3. 研究の方法

非平衡相における時間ドメインに関する知見を得るため、超伝導ボルテックスフローや電荷密度波のスライディングといった古くからの研究トピックで威力を発揮した、電気抵抗揺らぎ（ノイズ）測定を実験手法の核とする。単純な直流電流下の測定に加え、直流+交流電流下でのノイズ測定をスキルミオン系に対して実施し、非平衡相固有の共鳴現象の検出を狙う。また、上述の時間ドメイン測定と相補的な手法として、直流電流下におけるスキルミオン相の電磁気応答を、直流電流に重畳させて微小な交流電流によって検出することも試み、巨視的な特性評価を狙う。

## 4. 研究成果

### (1) 電流駆動スキルミオンが形成する動的結晶相における非平衡干渉効果(モードロック共鳴)の観測

研究代表者のこれまでの研究から明らかになっていた、電流駆動されたスキルミオンが形成する動的結晶相に焦点を当て、非平衡相固有のモードロック共鳴と呼ばれる干渉効果の観測を行った。スキルミオンに一定の直流電流を印加すると、スキルミオンの並進運動が駆動され、ある閾電流以上では動的固体相が形成される。この状態では、運動するスキルミオン格子が不純物ポテンシャルと相互作用することで駆動速度が周期的に変調され、電圧ノイズ上で狭帯域雑音と呼ばれるピーク構造が生まれる。すなわち、スキルミオン格子の運動に起因して、電流の直流成分から交流成分が生じたとみなすことができる。理論的には、スキルミオン運動によって生じた交流成分と、直流電流に重畳させた外部交流電流との間に、非自明な干渉効果が生じ得ることが知られている。これが、モードロック共鳴と呼ばれる非平衡干渉効果である。まずは、代表的なスキルミオン形成物質  $\text{MnSi}$  を用いて直流+交流電流下のノイズ測定を行い、モードロック共鳴を実験的な検出を試みた。

図 1(a, b)に、直流のみ、および直流+交流電流下で検出された典型的なノイズスペクトルをそれぞれ示す。直流電流のみの場合は、狭帯域雑音スペクトルのピーク周波数(これは動的固体の速度に対応する)は、電流に対して単調に増大する。一方で、700 Hz の交流電流をさらに加えた場合は、狭帯域雑音周波数が、700 Hz の半分である 350 Hz に一致したとき、その線幅が減少し、さらにピーク周波数が 350 Hz に固定される様子が観測された。交流電流の影響は、狭帯域雑音周波数、 $f_{\text{NBN}}$  の直流電流依存性[図 1(c)]からも明らかである。直流+交流電流を印可した場合、 $f_{\text{NBN}}$  と交流周波数の比が、単純な整数比に一致したとき、非自明な階段上の構造が生じる様子が見て取れる。以上の結果から、共鳴時には、スキルミオン速度が交流電流の周波数によって固定され、直流電流に依存しなくなるとともに、運動のコヒーレンスが増大する様子が確認され、モードロック共鳴の基本的帰結を同定できたと結論付けた。また、得られた実験結果は、古典的な剛体球モデルによって良く記述できることが明らかになり、これまで定性的にしか捉えられていなかったスキルミオン運動を、より微視的に理解するために基盤が確立したと言えるだろう。電流下の非平衡スキルミオンが発現する、新しい電磁気応答を捉えることに成功したという点で、重要な実験結果であると考えている。

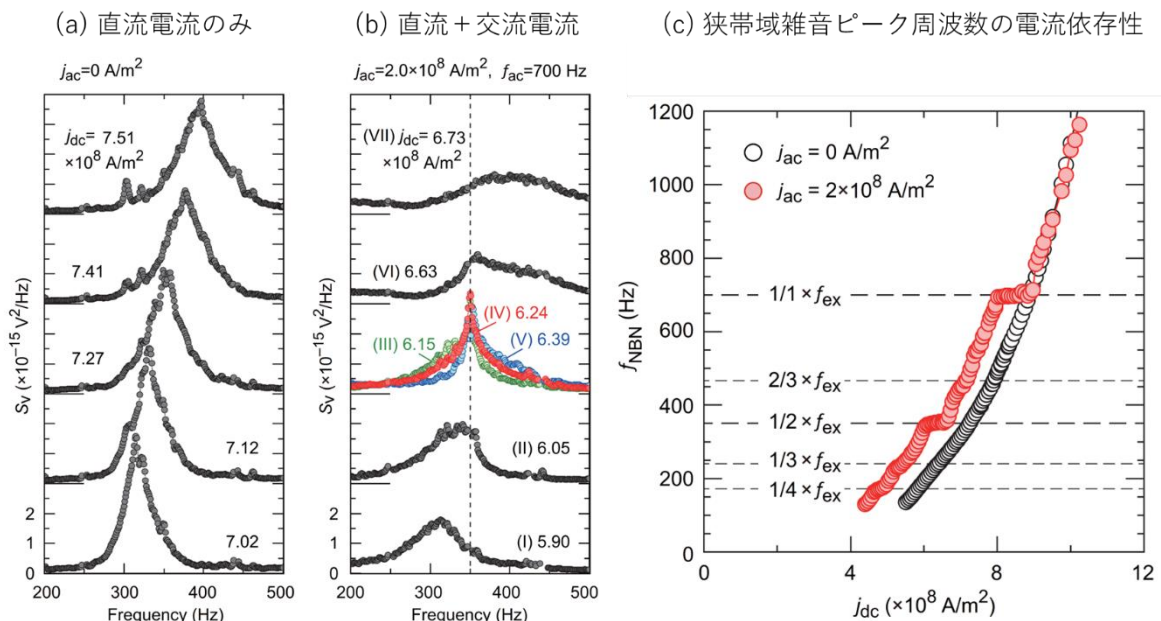


図 1 : (a) 直流電流および(b) 直流+交流電流下における狭帯域雑音スペクトルの変化と、(c) 狭帯域雑音ピーク周波数の直流電流依存

## (2) 非熱的な経路による、電流誘起スキルミオン-非スキルミオン相変換の実現

古典的な非平衡状態の1つである熱対流下において、ベナール対流に象徴されるように、流れの下で秩序構造そのものが変化するという現象が知られている。この現象との類推から、量子スピン系でそのアナロジーが展開できるのではないかと考えた。すなわち、電流印加によって、“スキルミオン”-“非スキルミオン”相の磁気変換現象を実験的に観測することを目指した。スキルミオン相の変換は、スキルミオン形成のホールマークであるトポロジカルホール抵抗が、大きな直流電流下で消失するかどうかを調べることで確認することができる。図 2(a)に、磁気転移温度以下におけるホール抵抗測定の結果を示す。まず、微小交流電流のみを印可した場合のデータ(実線)を見てみると、スキルミオン相が発現する温度(22.5 K)では、途中の磁場領域で、トポロジカルホール抵抗に由来する急峻な信号の変化が観測される。しかし、大きな直流電流と微小交流電流を印可した場合、トポロジカルホール抵抗成分が消失し、磁気抵抗は単調な振る舞いへと変化する。大きな直流電流を印可することでホール抵抗に変化が生じたのはスキルミオン相においてのみであり、例えば、27.5 Kや17 Kでは、直流電流の有無で有意な差は観測されなかった。この実験を、スキルミオン相を含む幅広い温度、磁場領域で実施し、カラーマップにまとめた結果が図 2(b)である。直流電流で、スキルミオン相が消失したことを明確に示している。

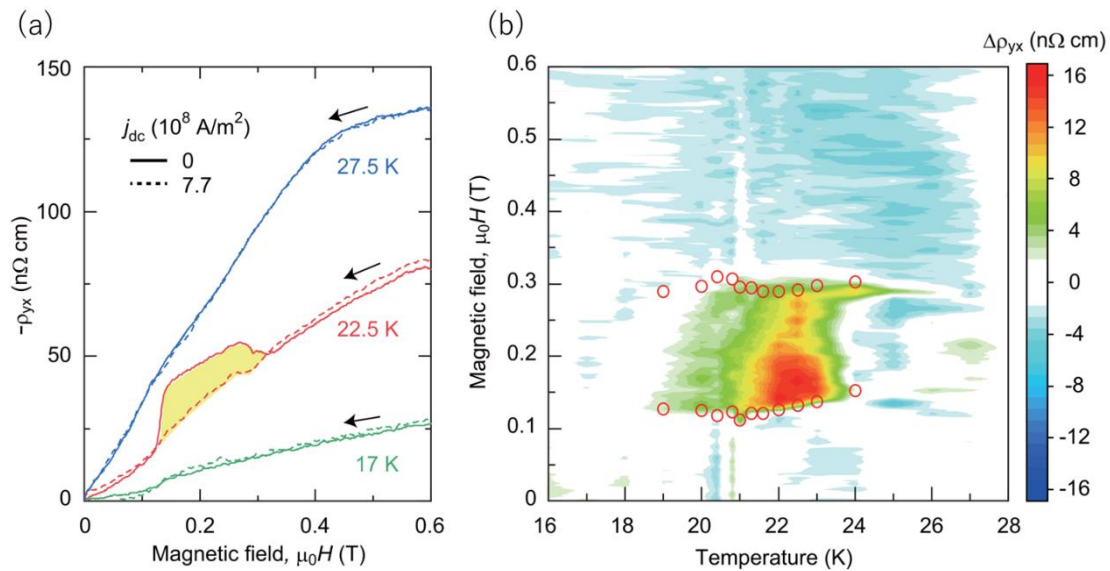


図 2: (a) 直流電流および直流+交流電流下におけるホール抵抗の磁場依存性と、(b) 直流電流におけるホール抵抗の変化率の温度-磁場カラーマップ。

類似した挙動は、スキルミオンが運動した際に生じる創発電場によっても発現しうるが、今回観測されたトポロジカルホール抵抗の消失は不揮発であり、すなわち、いったんスキルミオンが消失すると直流電流印可を止めた後も、印可前の状態が持続することが明らかになった。そのため、スキルミオンが電流で並進運動し続けているのみ生じる創発電場、今回のトポロジカルホール抵抗の消失に寄与していないことが結論付けられる。一度消失したスキルミオンは、その後数時間という時間スケールに渡って変化しないことから、スキルミオンがトポロジカルに守られており、その生成には大きなエネルギーギャップを超える必要があるという描像を強く支持している。

なお、本実験において、電流印可による発熱は無視できるほど小さく、単純な温度シフトによってスキルミオン相が消失したわけではないことを付記しておく。電流で“非熱的”にスキルミオンを“消す”という報告は本研究が初めての例であり、スキルミオンの新たな電流制御法の開拓という視点に加え、電流を制御パラメータにした非平衡相転移というより大局的な枠組みにおいても、極めて重要な進展だと考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato Takuro, Kikkawa Akiko, Taguchi Yasujiro, Tokura Yoshinori, Kagawa Fumitaka	4. 巻 102
2. 論文標題 Mode locking phenomena of the current-induced skyrmion-lattice motion in microfabricated MnSi	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180411
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.180411	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 Sato Takuro, Koshibae Wataru, Kikkawa Akiko, Taguchi Yasujiro, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori, Kagawa Fumitaka	4. 巻 106
2. 論文標題 Nonthermal current-induced transition from skyrmion lattice to nontopological magnetic phase in spatially confined MnSi	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.144425	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 Nakajima R., Hirobe D., Kawaguchi G., Nabei Y., Sato T., Narushima T., Okamoto H., Yamamoto H. M.	4. 巻 613
2. 論文標題 Giant spin polarization and a pair of antiparallel spins in a chiral superconductor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 479 ~ 484
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-022-05589-x	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 Malatong Ruttapol, Sato Takuro, Kumsampao Jakkapan, Minato Taketoshi, Suda Masayuki, Promarak Vinich, Yamamoto Hiroshi M.	4. 巻 -
2. 論文標題 Highly Durable Spin Filter Switching Based on Self Assembled Chiral Molecular Motor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2302714
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/smll.202302714	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 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔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		
タイ	VISTEC		