

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14410

研究課題名（和文）トポロジーと熱ゆらぎの協奏による電磁応答の開拓

研究課題名（英文）Interplay between topology and thermal fluctuation in skyrmion-hosting materials

研究代表者

大池 広志 (Oike, Hiroshi)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：70725283

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、トポロジーと熱ゆらぎの協奏によって生まれる現象を探索することである。磁気スキルミオン物質中の伝導電子は、真空中とは異なるトポロジーの空間に拘束されながら伝導することに起因して、あたかも磁場を感じているかのように振舞う。本研究では、この創発磁場に対する熱ゆらぎの効果を実験・理論の両側面から検証した。すると、温度上昇とともに創発磁場の強度が弱まることが明らかになり、その原因が熱ゆらぎによるトポロジー変化であることが示唆された。本研究の成果は、トポロジカル物性の研究においてあまり考慮されてこなかった熱ゆらぎの効果が、定量的な理解・設計に重要であることを意味している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、理想的な系の考察に基づく「トポロジー」という概念と、現実の系に内在する「ゆらぎ」という概念を融合させたことである。このような異なる前提から導かれた概念を融合することは、新たな研究領域の開拓に繋がる可能性を秘めている。また、本研究の社会的意義は、トポロジカルな性質に基づく材料開発の新たな指針を提示したことである。磁気スキルミオン物質中における電子の応答は、熱電変換の新原理としての応用が期待される一方で、低温極限でしか定量的な理解が実現されていなかった。本研究で定量評価が可能な温度域を拡張したことは、高効率な熱電変換材料の設計指針の確立に繋がると考えている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to search for electromagnetic response derived from interplay between topology and thermal fluctuations. Conduction electrons in skyrmion materials are confined in a topological space that is different from those in vacuum, and consequently behave as if they feel a magnetic field. In the present study, the effect of thermal fluctuations on this emergent magnetic field was examined from both experimental and theoretical aspects. It was found that the strength of the emergent magnetic field weakens with increasing temperature, and suggested that the temperature dependence is due to topology changes caused by thermal fluctuations. These results mean that the effects of thermal fluctuations, which have not been considered much in the study of topological properties, are important for quantitative understanding and designing of them in materials at finite temperatures.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジー 非平衡 磁性 準安定 熱ゆらぎ スキルミオン ゲージ場 ベリー位相

### 1. 研究開始当初の背景

トポロジーの視点は、コストリッツ・サウレス転移やトポロジカル欠陥など、相転移現象における新しい概念をもたらしてきた。近年では、カイラル磁性体において磁気スキルミオンと呼ばれる渦状の磁気構造が発見され、磁気構造のトポロジーが強磁性・反強磁性・螺旋磁性などと異なるため注目を集めている。磁気スキルミオン中を運動する伝導電子は、波動関数の位相のトポロジーの性質に由来して、あたかも数10テスラにも及ぶ磁場中に存在しているかのように振る舞う。この伝導電子が感じている場は創発磁場と呼ばれ、外部磁場や磁化がなくても発現するホール効果(トポロジカルホール効果)として観測されている。このように、トポロジーの視点で磁気スキルミオン物質の物性が開拓されてきた一方で、熱ゆらぎの効果がどのような影響をもたらすかについては未開拓な問題であった。熱ゆらぎはトポロジーの変化を誘起するため、トポロジーの視点だけでは理解できない現象を引き起こすことが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、磁気スキルミオン物質中において、熱ゆらぎが創発磁場に与える影響を解明することを目的とした。伝導電子と局在スピンの相互作用が強い場合、伝導電子のスピンは磁気構造を構成する局在スピンと同じ方向を向く。すると、伝導電子のスピンは位置に依存して変化することになり、その結果、波動関数の位相の空間依存性に磁気構造と同様のトポロジーの構造が現れる。この位相の空間依存性を持つトポロジーが、創発磁場の起源である。一方で、熱ゆらぎが誘起するスピン反転を伴う伝導電子の散乱現象は、上記のような連続変形に基づいた議論では考慮されておらず、創発磁場に非自明な影響を与えられと考えられる。このように、連続変形の性質から理解される電磁応答の物理を拡張し、スピン反転という不連続な変化に着目した点、従来のトポロジカル物性の探索とは異なっている。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、以下2つの理由からカイラル磁性体 MnSi を対象物質とした。1つ目の理由は、スキルミオン物質の中でもトポロジカルホール効果が明瞭に観測されている物質だからである。MnSi において急冷で準安定磁気スキルミオンを生成すると、低温で大きなトポロジカルホール効果が発生することが知られている。2つ目の理由は、残留抵抗率が小さいことである。残留抵抗率の起源である不純物散乱の頻度を減らすことで、熱ゆらぎによる散乱の効果が顕在化することが期待される。

創発磁場が伝導電子の輸送現象に与える影響を多角的に調べるために、ホール効果とネルンスト効果の両方を測定した。ホール効果は電流に対して、ネルンスト効果は熱流に対して垂直方向に電圧が発生する効果である。磁場下では伝導電子の運動が曲がるため、電流/熱流と垂直方向にホール電圧/ネルンスト電圧が発生する。いずれの効果においても磁場に比例した電圧が発生するが、流れを担う伝導電子の運動量-エネルギー分布が異なるため、電圧と磁場の比例係数が異なる。したがって、これらの比例係数を比較することで、伝導電子のフェルミオロジーと創発磁場の関係性の情報を得ることができる。

また、伝導電子のエネルギー分布と輸送現象を理論的に調べるために、第一原理計算に基づいた輸送現象の解析を行った。MnSi の磁気スキルミオンの中には  $10^4$  個程度の原子が含まれるために、磁気スキルミオンのような長周期構造を第一原理計算で扱うのは難しい。そこで、第一原理計算で求められた強磁性状態の電子構造に対して、磁気スキルミオンに由来する空間的に一様な創発磁場が印加されていると近似して輸送係数を求めた。強磁性状態ではスピン偏極が不完全であるため、多数スピン(磁気構造と平行)の伝導電子と、少数スピン(磁気構造と反平行)の伝導電子が混在する。波動関数のトポロジーの議論からは、多数スピンと少数スピンの創発磁場の符号が逆になることが知られている(図1)。

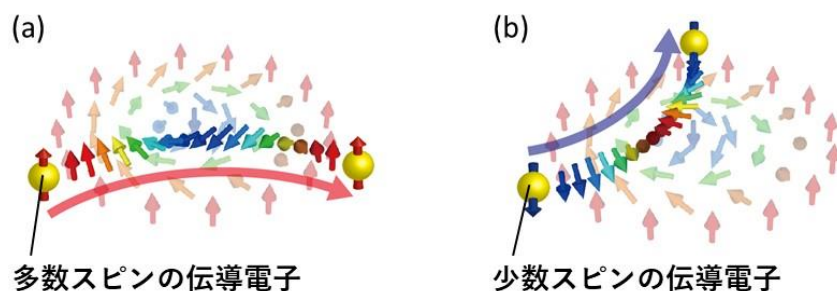


図1、磁気スキルミオン中を伝導する電子 (a)多数スピン (b)少数スピン  
磁気スキルミオンと相互作用しながら運動する伝導電子は、スピンの方向が位置とともに変化することに起因して、あたかも磁場中にいるかのように振舞う。この創発磁場の符号は、スピンの向きに依存する。

#### 4. 研究成果

初年度は、創発磁場に由来するホール効果とネルンスト効果の温度依存性を調べた。観測されたホール係数とネルンスト係数から、創発磁場に由来する成分（トポロジカル成分）を抽出した（図2 (a, b)）。この結果から創発磁場の大きさを見積もると、ネルンスト効果から見積もられる値の方がホール効果の値よりも大きく、創発磁場が通常の磁場と異なる性質を持つことが明らかになった。また、ネルンスト係数の温度依存性はホール抵抗率とは大きく異なっており、創発磁場の温度依存性以外の要因が温度依存性に寄与していることが示唆された。

最終年度は、輸送係数の温度依存性の原因を伝導電子の運動量-エネルギー分布の観点から追究するために、第一原理計算に基づいた解析を行った。すると、創発磁場に由来する熱流垂直方向の電圧が、多数スピンと少数スピンで強め合っていることが明らかになった（図2 (c, d)）。これは、実験で得られた大きなネルンスト効果と整合する計算結果である。直観的には、多数スピンと少数スピンは感じる創発磁場の符号が逆であるため、それぞれの電圧を打ち消すような寄与をすることが予測される。しかし、本研究で確かめられた実験結果と計算結果の整合性は、スピンの依存した伝導電子の運動量-エネルギー分布を考慮すると、直観に反する効果が起こり得ることを意味している。

また、上記のような伝導電子の運動量-エネルギー分布の考察に基づいて、輸送係数の温度依存性を見積もった。すると、ホール係数とネルンスト係数の温度依存性の背景にある創発磁場の温度依存性は共通であり、運動量-エネルギー分布の違いが見かけ上の温度依存性の違いを引き起こしていることが分かった。従来の断熱近似に基づいた創発磁場の描像においては、MnSi において観測された創発磁場の温度依存性を説明することが難しい。しかし、熱ゆらぎによって非断熱過程が摂動的に誘起されることを考慮すると、トポロジーの定義が不明瞭になり、言わば「トポロジーゆらぎ」によって創発磁場が弱められると理解することができる。このように、トポロジカルな性質に対する熱ゆらぎの効果と、創発磁場の温度依存性が結び付けられることを示し、本研究課題の目的が達成された。

さらに、研究計画には含まれていなかったが、電流や熱流を大きくすると磁気スキルミオンの崩壊現象が観測され、その条件は試料形状に依存することが分かった。このような流れの中での非摂動的な現象や、試料形状のような境界条件への鋭敏さは、磁気スキルミオン物質以外でも観測されており、特にトポロジーと結びつけてどのように理解されるかは今後の研究の方向性として重要であると考えている。

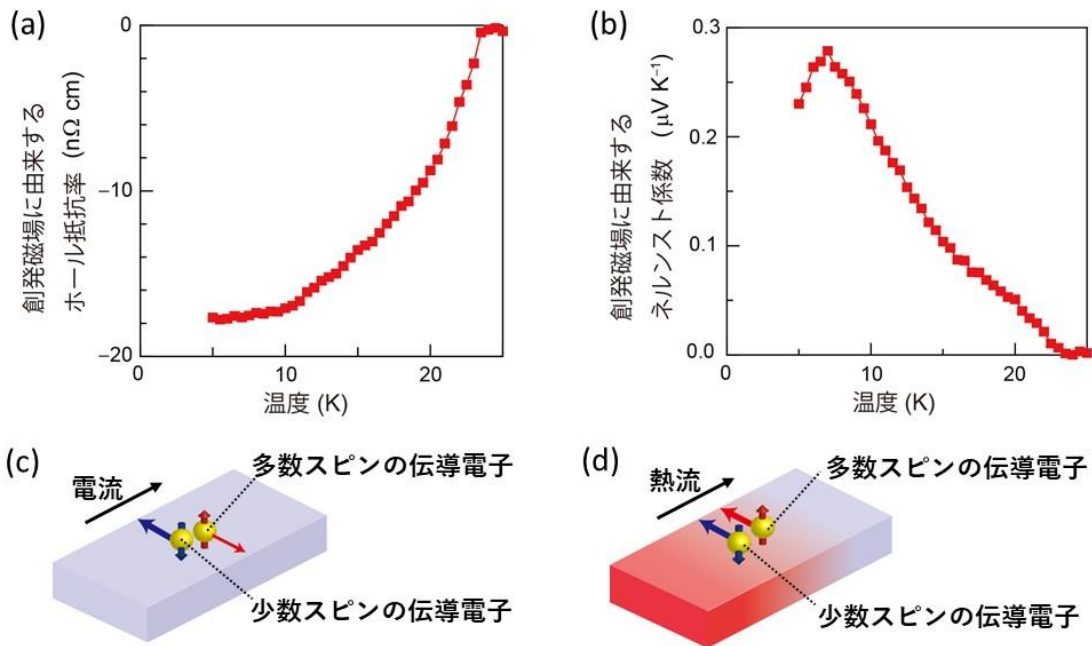


図2 創発磁場に対する熱ゆらぎの効果 (a)創発磁場に由来するホール抵抗率の温度依存性 (b)創発磁場に由来するネルンスト係数の温度依存性 (c)スピン分解したホール電圧の寄与の概念図 (d)スピン分解したネルンスト電圧の寄与の概念図

スピンの依存したフェルミオロジーに基づく、スキルミオン物質 MnSi においては、多数スピンと少数スピンの発生させる熱流垂直方向の電圧が強め合う向きに発生することが予測される。このようなスピン依存性を考慮すると、一見異なるホール抵抗率とネルンスト係数の温度依存性が、共通の創発磁場の温度依存性によって理解することができる。

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 Matsuura Keisuke, Oike Hiroshi, Kocsis Vilmos, Sato Takuro, Tomioka Yasuhide, Kaneko Yoshio, Nakamura Masao, Taguchi Yasujiro, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori, Kagawa Fumitaka	4. 巻 103
2. 論文標題 Kinetic pathway facilitated by a phase competition to achieve a metastable electronic phase	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L041106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L041106	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 Oike H., Takeda K., Kamitani M., Tokura Y., Kagawa F.	4. 巻 127
2. 論文標題 Real-Space Observation of Emergent Complexity of Phase Evolution in Micrometer-Sized IrTe2 Crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 145701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.127.145701	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12件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大池広志
2. 発表標題 有機強相関電子系における新奇電子相の開拓と制御に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大池広志
2. 発表標題 非平衡動力学に基づいた不揮発量子相制御
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西澤葉, 大池広志, 賀川史敬
2. 発表標題 フェーズフィールド法を用いた1次相転移ダイナミクスの体積・冷却速度依存性の研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古澤千晶, 大池広志, 賀川史敬
2. 発表標題 準安定スキルミオンの崩壊過程のLLGシミュレーションによる研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海老野哲朗, 大池広志, 吉川明子, 田口康二郎, 十倉好紀, 賀川史敬
2. 発表標題 MnSiにおける準安定磁気スキルミオン相で生じるトポロジカルネルンスト効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田和大, 大池広志, 上谷学, 十倉好紀, 賀川史敬
2. 発表標題 IrTe <sub>2</sub> 微小結晶における確率的相転移ダイナミクスの実空間観測
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西澤葉, 松浦慧介, 大池広志, 三宅厚志, 徳永将史, 車地崇, 十倉好紀, 賀川史敬
2. 発表標題 MFMによる $(\text{Fe}_{0.95}\text{Zn}_{0.05})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の磁気ドメインの実空間観測
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古澤千晶, 大池広志, 佐藤拓朗, 松浦慧介, 吉川明子, 田口康二郎, 十倉好紀, 賀川史敬
2. 発表標題 準安定スキルミオンの電流下での崩壊過程に関するFIB試料を用いた研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田和大, 大池広志, 上谷学, 十倉好紀, 賀川史敬, Meng Wang, Shuyun Zhou
2. 発表標題 遷移金属カルコゲナイド $\text{MTe}_2$ ( $\text{M}=\text{Mo}, \text{Ir}$ ) の走査型ラマン像測定による格子歪みの相転移ダイナミクスへの影響の研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森春仁, 武田和大, 大池広志, 賀川史敬, 房前勲, 鈴木雄介, 伊藤哲明, 加藤礼三
2. 発表標題 ( $\text{DMe-DCNQI-d8}$ ) $2\text{Cu}$ における電流印加下の非平衡定常状態のラマンイメージング
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋安徳, 大池広志, 諏訪秀磨, 渋谷圭介, 賀川史敬
2. 発表標題 WドーブV02薄膜における相競合を利用した準安定金属状態の生成
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大池広志
2. 発表標題 CuPyで高速化したPythonコードを用いた量子物質の過冷却現象の研究
3. 学会等名 NVIDIA秋のHPCWeeks (招待講演)
4. 発表年 2021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