

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14011

研究課題名（和文）非共線スピン構造の磁気ゆらぎを利用した量子伝導現象の開拓

研究課題名（英文）Exploration of quantum transport phenomena utilizing magnetic fluctuations of non-collinear spin textures

研究代表者

藤代 有絵子 (Fujishiro, Yukako)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：00883646

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、らせん磁性などの非共線磁気構造に着目し、磁気揺らぎ・スピンドायナミクスを利用した新しい電荷輸送特性の探索を行った。具体的には、超高圧印加によるらせん磁性・スキルオンの量子相転移を探索することで、量子揺らぎが発達する領域において、短距離磁気相関のみで時間反転対称性を破るような特異な異常ホール効果を発見した。また、電流駆動スピンドायナミクスによる創発インダクタについても探索を行い、ミクロな磁気構造の変化に応じた符号変化など新規な応答を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

絶対零度近傍における量子揺らぎを利用した新規な異常ホール効果の発見は、これまで強磁性・反強磁性などの単純な磁気構造に注目してきた量子相転移の研究をより多彩な磁気構造に拡張するという点で学術的意義があると考えられる。また、電流駆動スピンドायナミクスによる創発電場の発生は、インダクタ素子の微細化への応用が期待できるため、電子デバイスの小型化に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on non-collinear magnetic structures such as helical magnetism and explored new charge transport properties using spin dynamics. Specifically, by investigating the quantum phase transition of helical magnetism and skyrmions under ultra-high pressure, we discovered a peculiar anomalous Hall effect that breaks time-reversal symmetry with only short-range magnetic correlations in regions where quantum fluctuations are developed. Additionally, we explored emergent inductors driven by current-induced spin dynamics and observed novel complex sign changes depending on the microscopic magnetic structures.

研究分野：物性物理学

キーワード：らせん磁性 スピン揺らぎ 電荷輸送特性 超高圧 収束イオンビーム加工 量子臨界

1. 研究開始当初の背景

近年の物性物理学においては、磁気構造・電子構造の幾何学的性質に由来した量子位相の効果が注目を集めている。特に、らせん磁性体や、スキルミオンなどのトポロジカル磁気構造に代表される非共線磁気構造がもたらすゲージ場(「創発電磁場」)は、基礎学理・応用の両面から盛んに研究が行われてきた。従来の研究では長距離磁気秩序を持つ物質の設計・分類と、対応した静的な創発電磁場の効果に重点が置かれてきたが、短距離磁気秩序や創発電磁場のダイナミクスが電子系に与える影響は未解明の部分が多かった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非共線磁気構造の磁気揺らぎの効果を利用した新規電荷輸送現象の開拓とデバイス応用にむけた基礎学理の構築を行うことである。

3. 研究の方法

非共線磁気構造の磁気揺らぎの効果を最大化させ、新たな量子伝導現象の発現を狙うための独自の戦略として下記の2つの研究課題を設定した。それぞれについて研究手法を記載する。

(1)非線形磁気構造の量子相転移近傍における量子伝導現象

(2)電流駆動スピンドYNAMICSによる創発電場

(1)では、キュービックアンビルセルやダイヤモンドアンビルセルを用いた超高压の印加によりらせん磁性・スキルミオンといった長距離の非共線磁気構造を破壊し、量子相転移近傍における量子揺らぎを利用した新規量子伝導現象の探索を行う。具体的には電気抵抗に加え、磁気抵抗・ホール抵抗などの磁気輸送特性を測定する。対象物質としては、高い磁気転移温度($T_c \sim 278$ K)をもつカイラル磁性体らせん磁性 FeGe に着目する。

(2)では、様々な非共線磁気構造をもつ物質の単結晶を収束イオンビーム(FIB)によりマイクロデバイスに加工し高密度な電流($\sim 10^8$ A/m²)を印加する。これにより電流駆動スピンドYNAMICSによる創発電場を誘起し、ロックインアンプ等を用いてインピーダンスの虚部を測定する。

4. 研究成果

(1)非線形磁気構造の量子相転移近傍における量子伝導現象

本研究課題を遂行するにあたり、まず超高压発生装置であるダイヤモンドアンビルセルの立ち上げ・技術習得に取り組んだ。磁気抵抗・ホール抵抗を測定するためには5端子以上の電極を製作する必要があるが、約50 GPaの到達を目指す場合、試料サイズが数十 μ m程度と非常に小さくなるため、FIBの蒸着システムを用いて電極を製作する独自の手法を開発した。これにより、比較的静水圧性の高い液体媒体を用いて約50 GPaまで磁気輸送特性を測定することが可能になった(図1)。この技術は高压測定分野において世界的にみても先駆的であり、今後多彩な量子物質の超高压領域の磁気輸送特性を明らかにする可能性を秘めた重要な実験基盤であると言える。

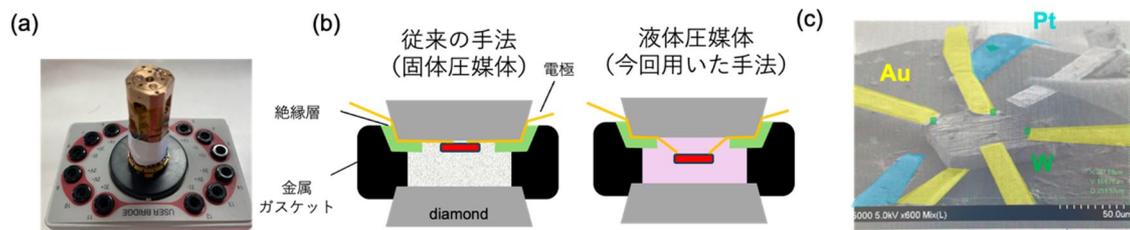


図1 (a) 使用したダイヤモンドアンビルセルの外観図。(b) 超高压(~ 50 GPa)を発生する際の従来手法と今回用いた手法の対比。従来は固体圧媒体によって試料と電極を圧着することで電氣的接触を得ていたが、今回は液体媒体中に試料を吊るしながら、比較的静水圧性の高い環境で磁気輸送特性を測定した。(c) FIB装置を用いてダイヤモンド上で電極を製作している際のSEM画像。金箔と試料をタングステン蒸着により固定し、電氣的接触を実現している。

上述の実験技術を用いて FeGe に圧力を印加しながら電気抵抗を測定したところ、約 50 GPa までの印加で残留抵抗値は三桁ほど上昇し、金属絶縁体転移を観測した (図 2(a))。通常は圧力によってトランスファー積分が大きくなり、絶縁体が金属化することが多いため、今回のように金属が絶縁化する例は珍しい。この起源としては、交換分裂の大きさが圧力によって減少し、ギャップがあいたことによるものであることが我々の第一原理計算によっても確認された。さらに、磁気抵抗・ホール抵抗の圧力下測定を行ったところ、長距離のらせん磁性・スキルミオンの磁気秩序が消失する量子相転移の近傍 ($P \sim 19$ GPa) において、負の磁気抵抗が増大する様子が捉えられた (図 2(b))。これは磁気揺らぎが増大したことによるものであると考えられる。加えてカイラルな短距離磁気相関が発達する $P = 20\text{--}30$ GPa の領域において、ゼロ磁場で有限の成分をもつ異常ホール効果を観測した (図 2(c))。長距離の磁気秩序が存在しないにも関わらず、時間反転対称性を破るような自発的異常ホール効果が見られることは予想外の結果であり、短距離磁気秩序相で磁場誘起のトポロジカルホール効果のみが報告されている MnSi と対照的な結果である。さらに、観測された異常ホール伝導度は、量子相転移点に近づくほど急激に増大することから、量子揺らぎに起因した新規な輸送特性である可能性が高いと考えられる。

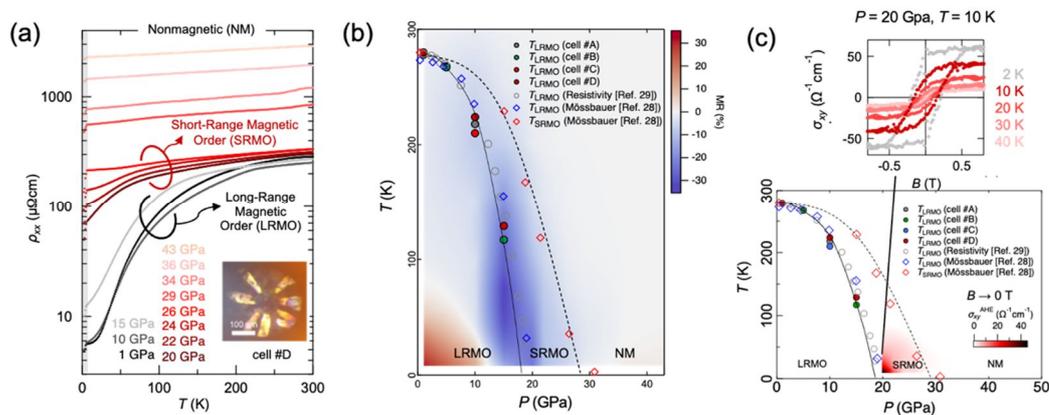


図 2 (a) FeGe の圧力下電気抵抗。圧力印加により、残留抵抗値が三桁ほど上昇し、金属絶縁体転移が見られた。LRMO, SRMO, NM はそれぞれ長距離磁気秩序、短距離磁気秩序、非磁性を示す。(b) FeGe の圧力温度相図における磁気抵抗 (MR) のカラープロット。長距離磁気秩序が壊れる量子臨界点 ($P \sim 19$ GPa) の近傍において、増大したスピン揺らぎによる負の磁気抵抗が見られた。(c) 短距離磁気秩序相でのみ見られる自発的異常ホール効果。圧力温度相図における、ゼロ磁場での異常ホール伝導度のカラープロット。量子臨界点にむけて急激に増大する様子が見られる。

これまでの量子相転移の研究は、低い磁気転移温度 (典型的には数ケルビン程度) の共線的磁気構造 (強磁性・反強磁性など) を対象に行われてきた [M. Brando et al., Rev. Mod. Phys. **88**, 025006 (2016)]。一方今回の研究では、高い磁気転移温度をもつ非共線的磁気構造の量子相転移に着目し、結果として既存の概念では説明のできない異常ホール効果を発見した。その起源については今後更なる理論的・実験的検証が必要であるが、カイラルな短距離磁気相関、量子ゆらぎ、電子構造変化などが絡み合った特殊な量子相転移を超高圧の印加によって実現したことは特筆すべき点である。今後、同様に高い磁気転移温度をもつ物質の量子相転移を探索することで、更なる新規量子伝導現象の発見が期待される。なお、本成果はプレプリントとして公開済みである [Y. Fujishiro et al., arXiv:2310.04823]。

(2) 電流駆動スピンドायナミクスによる創発電場

非線形磁気構造の時間変化は、スピンの立体角の変化分に比例した創発電場をもたらすことが知られており、近年電流駆動らせん磁性がもたらす誘導電圧の効果 (インダクタンス効果) であり [T. Yokouchi et al., Nature **586**, 232–236 (2020)] が注目を集めている。これまで、非常に短い磁気周期 (数 nm) を持つらせん磁性体 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ と YMn_6Sn_6 で実験的に報告されているが、物質例が少なく、創発インダクタンスの設計指針が十分に確立されているとは言い難い。特に、インダクタンスの特性 (大きさ、符号、周波数特性) を決めるミクロな要素の理解が求められている。本研究では、複雑ならせん磁気構造を持つ Eu 化合物における巨大な創発インダクタンスを観測し、ミクロな磁気構造の変化に応じた創発電場の符号変化を観測することに成功した。これまで報告されている創発インダクタ効果は主にインダクタンスの符号が負であったが、今回の物質では正のインダクタ効果が広い温度・磁場領域において見えているため、創発インダクタの符号の起源を探索する上でも興味深い対象物質となることが期待される。今後は、より多彩な物質で創発インダクタの探索を行い、特に周波数特性の改善を目指すことで、デバイス応用にむけた基礎学理の構築を行いたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kanazawa Naoya, Fujishiro Yukako, Akiba Kazuto, Kurihara Ryosuke, Mitamura Hiroyuki, Miyake Atsushi, Matsuo Akira, Kindo Koichi, Tokunaga Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 91
2. 論文標題 Topological Phase Transitions and Critical Phenomena Associated with Unwinding of Spin Crystals by High Magnetic Fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.101002	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 S. Aji, T. Oda, Y. Fujishiro, N. Kanazawa, H. Saito, H. Endo, M. Hino, S. Itoh, T. Arima, Y. Tokura, T. Nakahima	4. 巻 -
2. 論文標題 Direct observations of spin fluctuations in spin-hedgehog-anti-hedgehog lattice states in MnSi _{1-x} Ge _x (x = 0.6 and 0.8) at zero magnetic field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Pomjakushin V., Plokhikh I., White J. S., Fujishiro Y., Kanazawa N., Tokura Y., Pomjakushina E.	4. 巻 107
2. 論文標題 Topological magnetic structures in MnGe: Neutron diffraction and symmetry analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.107.024410	査読の有無 無
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5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Fujishiro
2. 発表標題 Emergent transport phenomena and phase transitions in topological chiral magnets
3. 学会等名 Workshop on topology in magnetic materials（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Fujishiro
2. 発表標題 Versatile topological spin textures and emergent transport phenomena in pressure controlled cubic chiral magnets
3. 学会等名 Symposium on Quantum Material Synthesis 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Fujishiro, C. Terakura, A. Miyake, M. Tokunaga, N. Kanazawa, N. Ogawa, K. Shimizu, Y. Tokura
2. 発表標題 Quantum phase transition and magneto-transport properties in a chiral helimagnet FeGe under high pressure
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤代有絵子, 寺倉千恵子, 三宅厚志, 徳永将史, 金澤直也, 小川直毅, 清水克哉, 十倉好紀
2. 発表標題 カイラルらせん磁性体FeGeにおける 圧力誘起量子相転移と多彩な磁気輸送現象
3. 学会等名 第63回高圧討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Fujishiro, C. Terakura, A. Miyake, M. Tokunaga, N. Kanazawa, K. Shimizu, Y. Tokura
2. 発表標題 Quantum phase transition and magneto-transport properties of a chiral helimagnet FeGe under pressure
3. 学会等名 29th International Conference on LOW TEMPERATURE PHYSICS
4. 発表年 2022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
---------	---------