

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18727

研究課題名（和文）ワイル磁性体におけるエッジ電流の観測

研究課題名（英文）Study of edge current in Wyle magnets

研究代表者

芝内 孝禎（Shibauchi, Takasada）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：00251356

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、近年発見されたワイル磁性体候補物質Mn3Snにおいて、ベリー位相に由来するエッジ電流に伴う軌道磁化の初観測を目的とした。走査型磁気顕微鏡を用いることにより、Mn3Snの試料表面の磁場分布を精密に測定した結果、通常の磁化成分だけでは説明できない、新しい磁化成分の存在を明らかにした。この新しい磁化成分の温度依存性、磁場依存性を詳細に調べ、反磁場の効果をセルフコンシステントに取り入れたシミュレーション計算と比較することで、ベリー位相を起因とする軌道磁化が存在するという結論が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波動関数が獲得する幾何学的位相であるベリー位相に起因して、様々な新しい物性が現れることが近年盛んに研究されている。そのような中、ベリー位相を起因とするエッジ電流による軌道磁化の存在は、理論的には古くから予言されている反面、未だ実験的に観測されていない。この新しい軌道磁化を観測するためには、時間反転対称性の破れた系が必要であるが、通常の強磁性体においては、通常の磁化成分が圧倒的に大きいためその観測は困難であった。本研究では、通常磁化の成分が小さい系に着目して、世界で初めて軌道磁化の観測に成功した。本研究結果は、磁性におけるベリー位相の寄与の理解を格段に進歩させるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to observe the orbital magnetization due to edge currents induced by the Berry phase, for the first time, in recently discovered Wyle magnet candidate Mn3Sn. By using scanning Hall microscopy, we investigate the detailed distributions of the surface of Mn3Sn, and find that there is an additional component that cannot be explained by the usual magnetization. From the temperature and magnetic field dependence of this additional component, which we compare with the self-consistent simulation including the demagnetization effect, we conclude that the orbital magnetization caused by the Berry phase exists.

研究分野：物性物理学

キーワード：ベリー位相 軌道磁化 ワイル磁性体 カイラル磁性 エッジ電流 走査型顕微鏡 ホール素子

1. 研究開始当初の背景

(1) 閉じた経路を1周するとき波動関数が獲得する量子力学的な位相であるベリー位相の重要性は、近年物性物理学において非常に高まっており、様々な物理現象との関連が明らかとなっている。特に、磁化に比例しない異常ホール効果や、量子振動の位相シフトなどの観測がベリー位相により説明されている他、電気分極や磁化といった非常に基本的な物理量のミクロな起源にもベリー位相の関連が指摘されている。このような中、理論的には長く提唱されてきているが実験的に未観測であるのが、エッジ電流による軌道磁化という概念である。磁性体の磁化には、ベリー位相によって試料のエッジに電流が誘起されることで軌道磁化という新しい磁化成分が存在することが理論的に指摘されている[1]。この軌道磁化は、ベリー位相の元となるベリー曲率と直接関連しているため、その観測は非常に重要であるにもかかわらず、未だに報告例がない。

(2) この新しい軌道磁化を観測するためには、時間反転対称性の破れた系が必要である。しかし、強磁性体においては、通常磁化成分が圧倒的に大きいことが知られており、エッジ電流による軌道磁化の観測は極めて困難である。一方、カゴメ格子構造を有するカイラル反強磁性体 Mn_3Sn では、磁化の大きさが強磁性体に比べて桁違いに小さい。それにも関わらず、磁化に比例しない巨大な異常ホール効果が室温においても観測されており、その要因として、ワイル点に起因するトポロジカルな性質がもたらす有限のベリー曲率が考えられている[2]。このベリー曲率は、通常磁化と同程度の大きさで逆向きの軌道磁化を誘起することが第一原理計算で指摘されており、ワイル磁性体の候補物質である Mn_3Sn でなら、ベリー曲率による軌道磁化の観測が初めて可能になると期待される。

2. 研究の目的

これらの背景から、本研究の目的は、今まで観測されたことのない、ベリー曲率を起源とするエッジ電流による軌道磁化の観測を行い、物性物理学におけるベリー位相の寄与の理解を格段に進歩させることである。この観測を可能にする重要なポイントは、通常磁化と軌道磁化が互いに逆向きで、その大きさがほぼ同程度であることと、通常磁化と軌道磁化が作る試料外部の磁力線分布がわずかに異なることである。後者については、反磁場の効果でスピンによる磁気モーメントが試料内で一様でなくなり、通常磁化による磁力線の空間分布が変化するためである。

3. 研究の方法

(1) 本研究の目的達成のためには、室温から極低温まで広い温度範囲における表面磁場分布の高精度測定が必要となる。そのために、まず、極低温でのみ動作可能な超伝導量子干渉素子(SQUID)に肉薄する磁気感度を有し、室温で動作可能なトンネル磁気抵抗(TMR)素子を用いた走査型磁気顕微鏡の開発に取り組んだ。共同研究者の下澤雅明(東京大学物性研究所助教(2019年9月より大阪大学基礎工学研究科准教授))の協力のもと、市販のTMR素子の基礎特性の評価を行ったところ、ゼロ磁場に近い微小磁場では磁場感度が非常に高い反面、本研究対象である Mn_3Sn で試料表面に現れる数ミリテスラ程度の磁束密度になると、感度が落ちるとともに、磁場に対する信号がヒステリシスを示すことが明らかになった。特にヒステリシスが見られたことは、本研究の磁場分布を定量評価する際に大きな問題となる。

(2) そこで、仏エコールポリテクニークの Marcin Konczykowski 一級名誉ディレクターとの共

同研究により開発した、微小ホール素子走査型顕微鏡を用いて、積算回数を工夫することにより高磁場感度の磁場分布測定を系統的に行うことに成功した。この微小ホール素子顕微鏡は、広い温度範囲で磁気特性が線形であり、定量評価に適している。さらに、理論的な考察のために、東京大学物性研究所の多田靖啓助教の協力のもと、ベリー位相を起源とする軌道磁化成分を取り入れたセルフコンシステントなシミュレーション計算を行い、得られた実験結果と比較を行った。

4. 研究成果

(1) 様々な条件下で、微小ホール素子顕微鏡を用いて Mn_3Sn 単結晶試料の表面磁場分布の測定を行った。カゴメ格子の辺に沿って外部磁場を印加したのちに磁場をゼロに戻した状態で、辺方向に沿ってホール素子をスキャンした結果、試料中心付近における磁場勾配が、通常の磁性体とは異なる分布を示すことを明らかにした。この結果を理解するために、反磁場の効果をセルフコンシステントに取り入れた磁場分布のシミュレーション計算を行ったところ、通常磁化成分と、それとは反対向きに発生している別の磁場成分の 2 つを考えれば実験結果をうまく説明できることが分かった。この新しい磁場成分は、試料端にのみ電流が流れているときに発生する磁場と非常によく一致しており、本実験結果はこの系で期待されるベリー位相由来のエッジ電流による軌道磁化の存在を強く示唆するものである。さらに、温度依存性や磁場依存性などの系統的な測定結果は、この系で観測されているベリー位相に起因すると考えられる異常ホール効果の温度依存性、および磁化の磁場依存性との比較から、軌道磁化の存在を裏付けるものであることが明らかとなった。これらの結果は、長年未観測であったベリー位相を起因とするエッジ電流による軌道磁化の存在を実験的に明らかとしたものであり、磁性におけるベリー位相の寄与の理解を大きく進めるものである。本成果は現在論文として準備中であり、国際的なジャーナルへ投稿予定である。

(2) 本研究のもう一つの目標である磁場分布測定法の開発に関する成果として、走査型顕微鏡とは全く異なる手法の開発に成功したので、それについても報告する。この手法はダイヤモンド中の窒素空孔欠陥を用いるものであり、欠陥中の電子スピン状態を光検出磁気共鳴 (ODMR) の手法を用いて調べることにより、その場所の磁場の大きさと方向を検出するものである。この手法を、圧力発生手法であるダイヤモンドアンビルセル (DAC) と組み合わせることにより、高圧・極低温・磁場中における試料表面付近の磁場分布の測定を可能にした。そのデモンストレーションとして超伝導体の反磁性の様子を測定した結果を *Science* 誌にて発表を行った[3]。なお本研究は香港中文大学の Swee Goh 准教授らとの共同研究である。この手法を用いれば、極限環境での様々な物質の磁場分布測定が可能になることが期待できる。

<引用文献>

- [1] D. Xiao, M.-C. Chang, and Q. Niu, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1959 (2010).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, *Nature* **527**, 212 (2015).
- [3] K. Y. Yip, K. O. Ho, K. Y. Yu, Y. Chen, W. Zhang, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, S. K. Goh, and S. Yang, *Science* **366**, 1355-1359 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Y. Yip, K. O. Ho, K. Y. Yu, Y. Chen, W. Zhang, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, S. K. Goh, and S. Yang,	4. 巻 366
2. 論文標題 Measuring Magnetic Field Texture in Correlated Electron Systems under Extreme Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1355-1359
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.aaw4278	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Shibauchi
2. 発表標題 Field-angular variations of heat capacity and thermal Hall conductance in the Kitaev material α -RuCl ₃
3. 学会等名 The 2nd Workshop on Spin-Orbit Coupled Topological States (SOCTS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Shimozawa, K. Sugii, J. Kondo, Y. Suzuki, M. Yamashita, T. Nakamura, S. Katsumoto, Y. Tada, M. Ikhras, T. Higo, T. Tomita, S. Nakatsuji, M. Konczykowski, Y. Matsuda, K. Mukasa, K. Matsuura, Y. Mizukami, T. Shibauchi, M.-T. Suzuki, and R. Arita,
2. 発表標題 Itinerant orbital magnetization in topological antiferromagnetic state
3. 学会等名 Topological Materials Science, The Fourth Annual meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芝内孝禎
2. 発表標題 -RuCl ₃ における磁場中比熱：マヨラナギャップの角度依存性
3. 学会等名 第12回トポロジー連携研究会「マヨラナ励起の実証に向けて」
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

芝内研究室
<http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp/index.html>

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