

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18695

研究課題名（和文）一方向性の界面スピン流を駆使した超伝導Edelstein効果の実験的開拓

研究課題名（英文）Experimental Exploration of the Superconducting Edelstein Effect Utilizing Unidirectional Interfacial Spin Currents

研究代表者

廣部 大地（Hirobe, Daichi）

静岡大学・理学部・助教

研究者番号：70823235

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）：空間反転対称性の破れた伝導体では電子の角運動量と運動量とが結合し、電流誘起角運動量偏極が現れる。その検出を、本研究では空間反転対称性の破れから予想される一方向性の界面スピン流に基づき試みた。磁気抵抗超伝導デバイスを用いて、超伝導体/強磁性体の接合界面におけるスピン依存磁気抵抗の観測を目指し、これを支持する結果を論文として出版した。実験結果と理論予想の比較検討から、非従来型の非線形スピン伝導が関与する可能性を見出した。また、非従来型の非線形電気伝導が生じる可能性も検討し、その仮説検証から、軌道磁気モーメントが特異な輸送現象を生み出すことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の完遂は、超伝導体を用いた電気-スピン変換に立脚する超伝導スピントロニクス発展に寄与するものである。また、本実験の検出原理は超伝導Edelstein効果に限定されるものではなく、スピン三重項Cooper対を選択的に検出する方法論の可能性も示唆しており、関連する実験及び理論研究にも波及効果を有する。他方、軌道磁気モーメントが誘発する特異な電気伝導は、相対論的補正としてのスピン軌道結合を必要としない。したがって、軽元素のみを用いて引き出すことが原理的には可能であり、物質群のさらなる拡張が期待される。

研究成果の概要（英文）：In conductors with broken inversion symmetry, the coupling between electron angular momentum and momentum results in current-induced angular momentum polarization. In this study, we attempted to detect this phenomenon based on the unidirectional interfacial spin currents expected from the broken inversion symmetry. Using magnetoresistance devices, we observed spin-dependent magnetoresistance at the superconducting/ferromagnetic junction interface. A comparison of the experimental results with theoretical predictions revealed the potential involvement of unconventional nonlinear spin transport. Additionally, we investigated the possibility of unconventional nonlinear electrical conduction, demonstrating that orbital magnetic moments can give rise to unique transport phenomena.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：キラリティ

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスサブフィールドとして、超伝導特有の無散逸性や長距離性を生かした超伝導スピントロニクスがある。スピン角運動量を担うことのできるような、すなわちスピン活性な超伝導状態を作り出す方法が複数提案されており、そのうちのひとつにバルク原子配列が空間反転対称性を破った超伝導体を用いるというものがある。一般に、空間反転対称性の破れた伝導体では電子の角運動量と運動量とが結合しうる。同様の結合が空間反転対称性の破れた超伝導体でも生じることによってスピン活性となりうる。その結果、超伝導電流を入力、スピン角運動量偏極を出力とした輸送応答が存在すると予想されており、この効果は超伝導 Edelstein 効果と呼ばれる。超伝導 Edelstein 効果の利用は、たとえば磁化反転による情報書き込みの消費電力を飛躍的に低減に道をつけるものであり、超低消費電力を標榜するスピントロニクスの希求に資すると期待される。

2. 研究の目的

空間反転対称性の破れた超伝導体を用いた輸送実験により、超伝導 Edelstein 効果に由来するスピン信号の検出に挑むとともに、逆効果の検出にも挑戦する。その検出原理は、Edelstein 効果の対称性から予想される一方向性の界面スピン流に基づくものである。本研究の完遂は、超伝導体を用いた電荷 - スピン変換に立脚する超伝導スピントロニクスの発展に寄与するものである。また、本実験の新しい検出原理は超伝導 Edelstein 効果に限定されるものではなく、スピン三重項 Cooper 対から構成される超伝導 - スピン三重項超伝導の実験および理論的研究にも資すると期待される。

3. 研究の方法

κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ (κ -NCS) という巨視的なキラル有機超伝導体における、カチオンとアニオンの組み合わせからなるキラル三次元構造を利用した。伝導層内の巨視的な波動関数が層間トンネル過程で弱く結合があれば、原理的には伝導層と平行な電気伝導にキラルな補正が加わる。これが電流誘起スピン偏極効果を生み出すことと、超伝導特有の巨視的な相関が長距離スピン分離を可能にすると期待し、測定を実行した。

測定電圧の磁場依存性は、キラリティ誘起スピン偏極を一定のまま、ニッケルの磁化だけを反転したときに得られるものと整合した。同様の磁場依存性を様々な磁場角度に対して取得することで、スピン偏極方向の空間分布を決定した。薄膜結晶の上端と下端それぞれでみるとスピン偏極方向は同じであり、かつ両端で比較するとスピン偏極は反転する。この結果は巨視的な反平行スピン対の形成と整合する。さらに、電流励起端子と電圧検出端子を空間的に分離した非局所配置で実験を行った。一方の結晶端で電流を流し、もう一方の結晶端で電圧を測定する。この配置でも電圧信号は生じ、かつその磁場依存性は局所配置のそれと一致する。この結果は、電氣的に生成したスピン偏極が励起端子から離れた場所にまで及ぶことを支持しており、巨視的な反平行スピン対の形成の必要条件を満たす。さいごに非局所配置と空間マッピングを組み合わせた。結晶の中心付近を電流励起し、検出端子を結晶両端に取り付けてスピン偏極方向の空間分布を決定すると、この場合もやはり結晶の両端でスピン偏極が反転する。これは、一箇所の電流励起からスピン偏極が結晶全体へと広がり、その極性は結晶の両端で逆向きであることを支持し

ており、反平行スピン対の形成を支持するものである。測定では交流電流を印加し、直流電圧を検出した。この交流 直流下方変換を再現するミニマムのモデルは、生じるスピン偏極が印加電流の偶数次で与えられるというものである。これらの特徴は、反転対称性の破れた伝導体で予言されている非線形スピン流生成の特徴と合致する。その予言の描像に基づくと、時間反転に対して偶のスピン流がまず生成され、結晶端におけるスピン散乱を経て時間反転に対して奇のスピン蓄積が生じる という解釈になる。さらに Barron によるキラリティの再定義に照らし合わせると、時間反転に対して奇のキラリティ 偽のキラリティ を反平行スピン対が表現しているといえる。本実験結果と突き合わせると、「非線形スピン流生成とスピン散乱の組み合わせが時間反転に対して奇の反平行スピン対を与え、これが偽のキラリティとして作用し左右分別を可能にする」という一つの可能性が見えてくる。想定していた超伝導 Edelstein 効果を大きく超えて、キラリティ誘起電荷 - スピン変換一般の機構解明に資すると期待される。

4 . 研究成果

本成果は、超伝導特有の無散逸性や長距離性を生かした超伝導スピントロニクスや、キラリティという二値性を組み込んだキラルスピントロニクスの発展に寄与する。キラリティを情報担体、超伝導を情報伝送に用いる量子デバイスのプロトタイプを本研究は提供したともいえる。また、本実験の検出原理は超伝導 Edelstein 効果に限定されるものではなく、スピン三重項 Cooper 対を選択的に検出する方法論の可能性も示唆しており、関連する実験及び理論研究にも波及効果を有する。

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 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 Hirobe Daichi, Nabei Yoji, Yamamoto Hiroshi M. | 4. 巻 106 |
| 2. 論文標題 Chirality-induced intrinsic charge rectification in a tellurium-based field-effect transistor | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 L220403 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.L220403 | 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6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 広部大地 |
| 2. 発表標題 Chirality-induced intrinsic charge rectification in a tellurium-based field-effect transistor |
| 3. 学会等名 ISSPワークショップ |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 D. Hirobe |
| 2. 発表標題 A Pair of Antiparallel Spin Polarizations in a Chiral Organic Superconductor |
| 3. 学会等名 Trends in Topological Materials Science and beyond (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 D. Hirobe |
| 2. 発表標題 Gate-controlled charge rectification in elemental tellurium |
| 3. 学会等名 IEEE Intermag 2023 (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 D. Hirobe |
| 2. 発表標題 Spin-related nonlinear transport in chiral materials |
| 3. 学会等名 Japan-Germany Workshop on Trends in Quantum Materials and beyond (招待講演) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 広部大地 |
| 2. 発表標題 キラル材料デバイスにおけるスピン依存非線形伝導 |
| 3. 学会等名 JST CREST さきがけ Zoom Webinar (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 広部大地 |
| 2. 発表標題 鞍点構造を有するキラル半導体における非線形電気伝導 |
| 3. 学会等名 応用物理学会2024年春季大会 |
| 4. 発表年 2024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 |
|---------|---------|
|---------|---------|