

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05253

研究課題名（和文）超伝導渦系フローが生み出す新しいスピン流の理論的探求

研究課題名（英文）Theoretical quest for new spin currents produced by superconducting vortex flows

研究代表者

安立 裕人（Adachi, Hiroto）

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

研究者番号：10397903

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：スピン-重厚クーバー対はスピン偏極を持っていないため、これらの超伝導体では秩序変数の運動によるスピン流を考えられない。しかし、第二種超伝導体の渦系状態では渦系の内部にスピン偏極をもつことができるため、超伝導渦系の運動によってスピンを運ぶことが可能となる。この超伝導渦系の運動が引き起こすスピホール効果を渦系スピホール効果と名付け、この現象を微視的に調べ上げた。具体的には、超伝導渦系が運ぶスピン流演算子を微視的に計算し、これが熱流演算子と強い類似性を持つことを示した。更に、久保公式を用いて渦系スピホール伝導度を計算し、渦系スピホール伝導度が渦系ネルンスト伝導度に比例することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、超伝導の量子渦系にスピンを閉じ込めて輸送するという、全く新しいスピン輸送の原理を理論的に明らかとした。この成果により、これまでにない有効なスピン情報の輸送手段が付け加えられたといえる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have clarified a new spin-transport principle employing superconducting vortices. In a superconducting vortex state, while the Cooper pair itself does not carry spins, the vortex core can host spin polarization. Therefore, we can think of a spin current carried by the motion of superconducting vortices. We have microscopically calculated spin current operator carried by the superconducting vortices, and found that the spin current operator has a similar form as the heat current operator. Moreover, we have evaluated the vortex spin-Hall conductivity using the Kubo formula, and revealed that the vortex spin-Hall conductivity is proportional to the vortex Nernst conductivity because of the similarity between the spin-current and heat-current operators.

研究分野：スピントロニクス、超伝導

キーワード：スピン流 スピホール効果 超伝導渦系

### 1. 研究開始当初の背景

スピンホール効果とは電流から垂直方向へスピン流(スピンの流れ)を生成する現象であり、スピン流・電流変換を可能にする極めて重要な物理現象である。研究開始当初、超伝導体(NbN)/強磁性体( $Y_3Fe_5O_{12}$ )接合系のスピンゼーベック効果(温度勾配からスピンホール効果を介して熱起電力を生成する現象)で観測された超伝導転移付近での顕著なピーク構造[1]の起源が大きな謎となっていた。実験報告の時点で、この実験結果は、超伝導体へのスピンポンピングの際に生じるコヒーレンスピーク効果とその起源であるとされていた。しかし、マグノンのエネルギーが超伝導転移温度よりも十分に小さいスピンポンピングとは異なり、ゼロ温度から超伝導転移温度までの広いエネルギーにわたるマグノンが寄与するスピンゼーベック効果では、コヒーレンスピーク効果は生じ得ないことが理論的に示されていた[2]。それゆえ、上記実験の解釈が、超伝導体でのスピン輸送にまつわる大問題として存在していた。

### 2. 研究の目的

一般に、スピン三重項超伝導体では秩序変数そのものがスピン偏極を持てるため、秩序変数の運動によるスピン流を自然に考えられる。しかし、世の中の大半の超伝導体ではスピン一重項のクーパー対が実現しており、これはスピン偏極を持ってない。従って、そのような超伝導体では秩序変数の運動によるスピン流を考えることができない。ところが、第二種超伝導体では磁場下で超伝導渦糸状態が実現し、超伝導渦糸はその内部にスピン偏極を持つことができるため、超伝導渦糸の運動によってもスピンを運ぶことができるはずである。

本研究では、上記のような直観的描像に基づき、超伝導の量子渦糸にスピンを閉じ込めて輸送することが可能か否かを理論的に解明する。そして、この「渦糸スピンホール効果」によって、文献[1]の実験が説明可能であるのかを明らかとする。

### 3. 研究の方法

物理系としてs波超伝導体を仮定し、その渦糸状態を、超伝導のBCS-Gor'kov理論により記述する。そして、久保公式を用いて超伝導渦糸状態におけるスピンホール伝導度を計算することで、この渦糸スピンホール伝導度が有限に残るのか否かを微視的に明らかとする。

### 4. 研究成果

本研究で扱う渦糸スピンホール効果(超伝導渦糸の運動が引き起こすスピンホール効果)を議論するためには、超伝導渦糸が運ぶスピン流演算子を微視的に導出しておく必要がある。この作業には、超伝導のクーパー対が2つのフェルミ粒子(電子)から成る複合ボーズ粒子であることを反映して、多体問題の理論手法に基づく微視的計算が必要とされる。具体的には、図1のファインマンダイアグラムで表されるスピン流演算子を評価する必要があるが、この作業は、スピン流演算子の運ぶ松原周波数を解析接続するという手続きにより実行される[3]。この際、スピン流演算子は複素平面上で多数の切断を持つため、それぞれの切断を跨ぐ際の解析性を分類する緻密な計算が要求される。我々は、この煩雑な計算を実行し、スピン流演算子を解析的に導出した。

結果として、超伝導渦糸が運ぶスピン流演算子は、超伝導渦糸が運ぶ熱流演算子に渦糸芯のスピン偏極を掛けたものとして与えられることを導き出した。この成果により、渦糸スピンホール効果は、超伝導渦糸の運動で引き起こされる渦糸ネルンスト効果と強い類似性を持つことが明らかとされた。

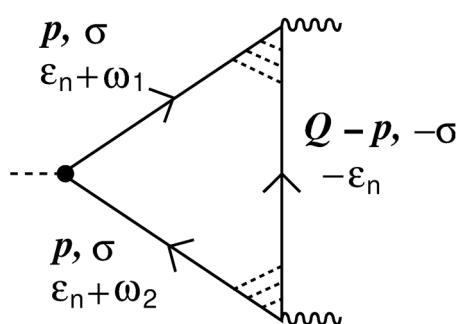


図1: 超伝導渦糸が運ぶスピン流演算子を表すファインマンダイアグラム。

次に、渦糸スピンホール効果を理論的に特徴づけるため、対応する渦糸スピンホール伝導度を計算した。この際、既に求めてあるクーパー対の運ぶスピン流演算子を用い、久保公式に基づいて渦糸スピンホール伝導度を計算した。具体的には、図2のファインマンダイアグラムで表され

る過程を、超伝導 揺らぎを最も簡便にかつ高い信頼度で計算できる近似法(自己無撞着 Hartree 近似法)を用いて計算した。

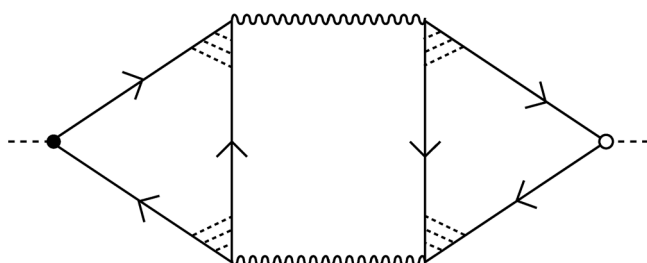


図 2: 渦糸スピンホール効果を表すファインマンダイアグラム.

結果として、転移点付近で超伝導揺らぎが顕著に増幅されることを反映して、スピンホール伝導度は 発散的な振る舞いを示し、また実験で測定されるべきスピンホール電圧は高温側から低温側へとスムーズに増大して一定値に落ち着くことを明らかとした [図 3]。更に、理論計算の中にもめるのが困難な渦糸ピン留め効果を考慮すると、逆スピンホール電圧は超伝導転移温度付近で顕著なピーク構造を示すことを明らかとした [図 3 (b)破線]。これにより、文献[1]で謎とされていた超伝導体(NbN)/強磁性体( $Y_3Fe_5O_{12}$ )のスピンゼーベック効果における超伝導転移温度付近での信号のピークが、渦糸スピンホール効果のシナリオにより説明可能であることが示された。

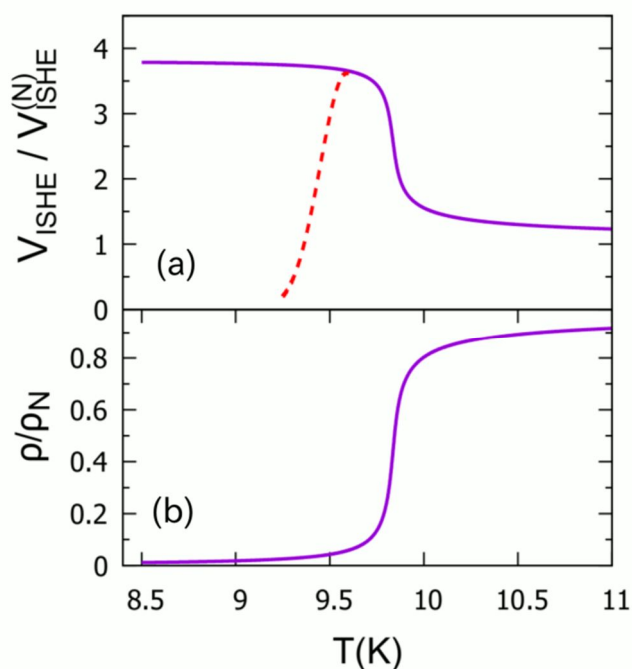


図 3: (a)渦糸スピンホール効果が誘起する逆スピンホール効果の温度依存性の計算結果.破線は渦糸ピン留め効果を考慮した際に期待される振る舞い.(b)渦糸スピンホール効果を計算した際と同じパラメータを使用して計算した電気抵抗の温度依存性.

本研究により、渦糸スピンホール効果という、超伝導渦糸に閉じ込めたスピンの示すスピンホール効果の存在を初めて明らかとされた。これまで知られているスピンホールは、物質中のスピン軌道相互作用に基づくものであった。本研究が明らかとした渦糸スピンホール効果はスピン軌道相互作用を必要としないため、研究対象物質群を大きく広げたと言える。これまでに実験された物質は NbN という転移温度の低い物質であるが、今後、より転移温度の高い銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体において、渦糸スピンホール効果の研究が進展すると期待される。

<引用文献>

[1] M. Umeda et al., Appl. Phys. Lett. 112, 232601 (2018).  
 [2] T. Kato et al., Phys. Rev. B 99, 144411 (2019).  
 [3] T. Taira et al., Phys. Rev. B 103, 134417 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Yamamoto Yutaka, Ichioka Masanori, Adachi Hiroto	4. 巻 105
2. 論文標題 Antiferromagnetic spin Seebeck effect across the spin-flop transition: A stochastic Ginzburg-Landau simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104417(1-14)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.104417	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 Taira Takuya, Kato Yusuke, Ichioka Masanori, Adachi Hiroto	4. 巻 103
2. 論文標題 Spin Hall effect generated by fluctuating vortices in type-II superconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134418(1-12)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.134417	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 Fujimoto Yusei, Ichioka Masanori, Adachi Hiroto	4. 巻 101
2. 論文標題 Spin pumping into a spin glass material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184412(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.101.184412	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 Yutaka Yamamoto, Masanori Ichioka, and Hiroto Adachi	4. 巻 100
2. 論文標題 Spin Seebeck effect in paramagnets and antiferromagnets at elevated temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064419(1-9)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.064419	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 Yuuki Hashitani, Kenta K. Tanaka, Hiroto Adachi, and Masanori Ichioka	4. 巻 101
2. 論文標題 Variation of zero-energy density of states of a d-wave superconductor in a rotating in-plane magnetic field: Effect of nonmagnetic impurities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060501(R)(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.060501	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11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 H. Adachi, T. Taira, Y. Yamamoto, Y. Kato, and M. Ichioka
2. 発表標題 Spin transport using antiferromagnetic magnons & superconducting vortices
3. 学会等名 Spin Caloritronics XI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Taira, Y. Kato, M. Ichioka, and H. Adachi
2. 発表標題 Spin Hall effect in the superconducting vortex state
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平拓也, 加藤雄介A, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 Vortexスピンホール効果とその実験的検出方法
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本督, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 反強磁性ネール温度近傍におけるスピンゼーベック効果の数値シミュレーションII
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市岡優典, 世良泰明, 上田貴裕, 安立裕人
2. 発表標題 ネマティック超伝導体の渦糸状態での非磁性不純物効果
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本督, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 反強磁性ネール温度近傍におけるスピンゼーベック効果の数値シミュレーション
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 市岡優典, 上田貴裕, 安立裕人
2. 発表標題 ネマティック超伝導体の渦糸状態での局所状態密度
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 平拓也, 加藤雄介, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 超伝導渦糸状態におけるスピホール効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本督, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 反強磁性ネール点近傍におけるスピゼーバック効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本悠星, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 スピングラス物質へのスピポンピングの理論
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平拓也, 竹井聡, 市岡優典, 安立裕人
2. 発表標題 超伝導体中のスピ拡散方程式: $T_c$ 近傍の解析
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	大江 純一郎  (OHE JUN-ICHIRO)  (40510251)	東邦大学・理学部・教授    (32661)	

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