

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01843

研究課題名（和文）トポロジカル超伝導体の渦糸芯におけるマヨラナ粒子の検出と実空間制御

研究課題名（英文）Detection and control of Majorana particle in vortex core of topological superconductors

研究代表者

町田 理（Machida, Tadashi）

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・上級研究員

研究者番号：60570695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、走査型トンネル顕微鏡を用いてトポロジカル超伝導体の渦糸芯におけるマヨラナ準粒子の検出と制御を目的としている。トポロジカル超伝導体FeSeTeの渦糸芯でマヨラナゼロモードと矛盾しないゼロエネルギー励起の観測に成功し、このゼロエネルギー励起が磁場の大きさに伴い消失することも明らかにした。この磁場依存性は、磁場によってマヨラナ準粒子を制御できる可能性を示唆している。またマヨラナゼロモードのスピンの偏極性を捉えることを目的とし、極めて高いスピン分解能が期待されるYu-Shiba-Rusinov探針の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ準粒子は、その特異な性質を利用した新たな量子計算技術（トポロジカル量子計算）の基本構成要素として大きな注目を集めている。本研究では、マヨラナ準粒子の重要な特徴であるゼロエネルギー励起の検出に成功し、さらにその外部磁場応答を微視的立場から明らかにした。これらの結果は今後の量子計算技術への応用において極めて重要な知見を与える。さらに新たに開発したYu-Shiba-Rusinov状態を用いたスピン偏極分光技術も今後のマヨラナ準粒子の研究においてその検出法の一翼を担うと期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this project is to establish the ways to detect and control the Majorana quasiparticles in the vortex core of a topological superconductor, using scanning tunneling microscope (STM). We succeeded in observing zero-energy excitations consistent with the Majorana zero mode in the vortex core of the topological superconductor FeSeTe, and also found that these zero-energy excitations disappear with increasing external magnetic field. This magnetic field dependence suggests the possibility of controlling the Majorana quasiparticles by an external magnetic field. In addition, we have established the way to make a Yu-Shiba-Rusinov STM tip with extremely high spin resolution, which provides an unambiguous way to detect the spin polarization of the Majorana zero mode.

研究分野：超伝導

キーワード：トポロジカル超伝導体 マヨラナ粒子 超伝導渦糸 走査型トンネル顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

現在の物性物理学における最重要課題の一つとして、マヨラナ準粒子の検出と制御が挙げられる。これはマヨラナ準粒子が従来のボーズ統計やフェルミ統計とは異なった非可換統計(non-Abelian 統計)に従う粒子であり基礎物理学的な重要性を有すると共に、マヨラナ準粒子の非可換性と非局在性を利用した攪乱に強いトポジカル量子計算に利用できるという産業応用を見据えた重要性を持つためである。これまでに、理論、実験の両側面からマヨラナ準粒子の検出を目指した多数の研究が行われてきた。理論によるとマヨラナ準粒子はトポジカル超伝導体のエッジ及び渦糸芯に局在し、マヨラナゼロモードと呼ばれる準粒子励起スペクトルにおけるゼロエネルギー束縛状態として現れると予想されている。これは原理上、STM を用いた走査型トンネル分光測定(STS)により観察可能である。実際、理論予測に基づき、これまでに一次元及び二次元トポジカル超伝導体のエッジにおいてゼロエネルギー励起が STS 測定により観察されている[S. Nadj-Perge, Science 346, 602 (2014)][G. C. Menerd *et al.*, Nat. Commun. 8, 2040 (2017)]。しかしながら観察されたゼロエネルギー励起がマヨラナゼロモードに起因するかどうかについて、明確な答えが出ていない。この問題の主たる要因は、従来の(自明な)束縛状態もゼロエネルギー付近に現れる可能性があるため、自明な束縛状態とマヨラナゼロモードの区別が難しいことに由来する。これを解決するには、ゼロエネルギーピーク以外に、自明な束縛状態には無く、マヨラナゼロモードのみが有する特徴をとらえる必要がある。このように、マヨラナ準粒子の存在を決定付けるのに十分な確証が得られていないのが現状である。一方で、実際の量子計算を見据えるとマヨラナ準粒子の制御も重要である。これまでに理論的には様々な制御法が提案されているものの、実証例が無いのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、マヨラナ準粒子の舞台としてトポジカル超伝導体に着目し、超高エネルギー分解能 STM を用いて、その渦糸芯に局在したマヨラナ準粒子の検出法を開拓すると共にマヨラナ準粒子の制御を実証することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究の目的達成には、渦糸芯における自明な束縛状態とマヨラナゼロモードのエネルギー差が大きいものを選定する必要があり、さらにこのエネルギー差を十分に分解可能なエネルギー分解能で分光測定を行う必要がある。本研究では表面でトポジカル超伝導状態が期待される $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (FeSeTe)に着目した。この物質はバンド分散の底がフェルミエネルギーに近く、渦糸芯束縛状態間のエネルギー差が $100 \sim 200 \mu\text{eV}$ と通常の超伝導体に比べ二桁大きい特徴を有する。このエネルギー差を十分に分解可能な $20 \mu\text{eV}$ という極めて高いエネルギー分解能を有する希釈冷凍機 STM を用いて、渦糸芯束縛状態の観察を行った。

またゼロエネルギー励起以外のマヨラナゼロモードの特徴として、理論的に予想されているマヨラナゼロモードのスピンの偏極性に着目し、これまでにないスピン分解性能が期待できる STM 探針の開発も行った。

4. 研究成果

(1) FeSeTe の渦糸芯束縛状態の高エネルギー分解能測定

FeSeTe は非従来超伝導を示す鉄系超伝導体として盛んに研究されてきた物質であるが、最近になって、トポジカル超伝導体としても注目を集めるようになった。Se への Te 置換効果によって表面にスピン偏極したトポジカル表面状態が現れ、その表面状態に超伝導ギャップが開くことで、カイラル p 波のトポジカル超伝導状態が表面で誘起される。このためこの物質における渦糸芯ではマヨラナゼロモードの存在が期待される。これまでにないエネルギー分解能で渦糸芯束縛状態を測定した結果、離散化した束縛状態の分離に世界で初めて成功し、マヨラナゼロモードと矛盾しないゼロエネルギー励起と有限エネルギーの自明な束縛状態の存在を明らかにした。また、数百個の渦糸芯において高エネルギー分解能測定をしたところゼロエネルギー励起を有する渦糸と持たない渦糸が共存し、外部磁場の増加に伴ってゼロエネルギー励起を有する渦糸芯の割合

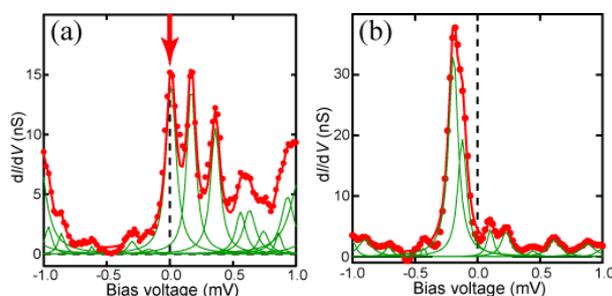


図 1. 渦糸芯におけるトンネルスペクトル。(a) ゼロエネルギー励起を有する場合。(b) ゼロエネルギー励起がない場合。

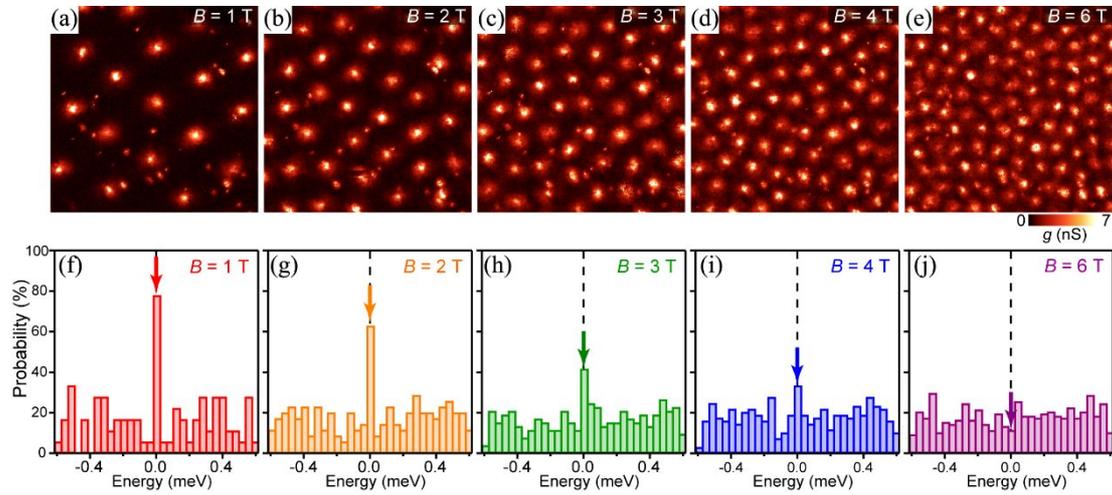


図2. ゼロバイアスコンダクタンスの磁場依存性. (a) 1 T, (b) 2 T, (c) 3 T, (d) 4 T, (e) 5 T. (f)-(g) 各磁場における任意のエネルギーに現れるピークの出現確率を示したヒストグラム.

が系統的に減少することも新たに解った. [T. Machida, et al., Nature Materials 18, 811 (2019)]. 観察されたゼロエネルギー励起がマヨラナゼロモードと仮定すると, この磁場依存性の結果はマヨラナゼロモード間の相互作用に起因したマヨラナゼロモードの消失と解釈することができる. このように上記した結果は, 外部磁場によってマヨラナゼロモードを制御できる可能性を示唆しているだけでなく, 実際の量子計算においてマヨラナ準粒子同士を交換操作する際に十分にマヨラナ準粒子同士の距離を離す必要があることを示している. [C.-K. Chiu, T. Machida *et al.*, Science Advances 6, eaay0443 (2020)]

(2) Yu-Shiba-Rusinov STM 探針の開発と評価

一般に, 超伝導体中に磁性不純物が存在するとクーパーペアの電子のスピンと磁性不純物のスピンとの間の交換相互作用により局所的に超伝導が抑制され, 準粒子スペクトルには所謂 Yu-Shiba-Rusinov (YSR) 状態と呼ばれる不純物束縛状態が超伝導ギャップ内の正負対称のエネルギーに対となって形成される. この YSR 状態は, 正負のエネルギーで互いに逆向きに 100% スピン偏極した状態にあるため, この状態をスピン偏極 STM 探針として用いることができればこれまでにない究極のスピン分解能でスピン偏極分光が可能となる. 本研究では, この YSR 状態の性質に着目し, 超伝導体 STM 探針の先端に一つだけ磁性原子を付着させ YSR 状態を作る方法を確立した. 具体的には, 先鋭化した超伝導体 Nb 探針を Cu(111) 表面に僅かに蒸着した Fe 原子に近づけ +2V のパルスバイアス電圧を印可させて, 超伝導探針 (Nb) で磁性原子 (Fe) を拾い上げる. この方法により得られた探針の Cu(111) 上におけるトンネルスペクトルの磁場依存性を図 3 に示す. ゼロ磁場

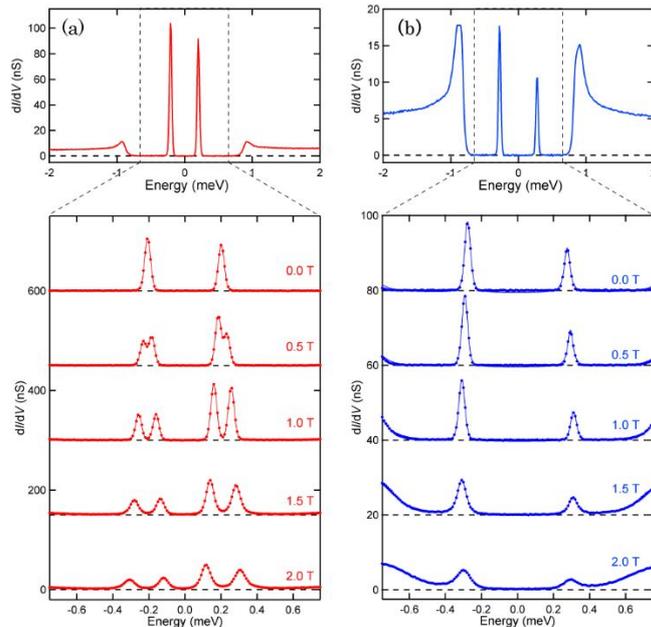


図3. 二種類のYSR探針のトンネルスペクトル. (a) 磁場中でZeeman分裂をしめすもの. (b) 磁場中でZeemanシフトをしめすもの.

では超伝導ギャップ内に正負対称のエネルギーに YSR 状態が形成されていることが確認できる. しかし, 外部磁場印可により Zeeman 分裂するもの(図 3(a))と Zeeman シフトを示すもの(図 3 (b))の二種類の YSR 状態が存在することが新たに解った. これは超伝導体中の電子と付着磁性原子間の交換相互作用の大きさが探針ごとに異なっており, 超伝導体中の電子による遮蔽効果(近藤遮蔽)の大きさに由来した多体量子相転移に由来するものであると考えられる. また観察された YSR 状態のスピン偏極性も Cu (111) 上に残留している Fe 原子の上でトンネルスペクトル測定を行って確認した. 期待されるように, 極めて大きなスピン分解性能が確認された. 今後は, この YSR 探針を用いたマヨラナゼロモードのスピン偏極性の検証へと研究の展開が期待される.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Machida, Y. Sun, S. Pyon, S. Takeda, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, T. Sasagawa and T. Tamegai	4. 巻 18
2. 論文標題 Zero-energy vortex bound state in the superconducting topological surface state of Fe(Se,Te)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 811-815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-019-0397-1	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 Ching-Kai Chiu, T. Machida, Yingyi Huang, T. Hanaguri, and Fu-Chun Zhang	4. 巻 6
2. 論文標題 Scalable Majorana vortex modes in iron-based superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaay0443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aay0443	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
1. 著者名 T. Machida, Y. Yoshimura, T. Nakamura, Y. Kohsaka, T. Hanaguri, C.-R. Hsing, C.-M. Wei, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, A. Takayama	4. 巻 105
2. 論文標題 Superconductivity near the saddle point in the two-dimensional Rashba system Si(111)- 3×3 -(TI,Pb)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 64507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.064507	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
1. 著者名 町田理	4. 巻 65
2. 論文標題 超低温走査型トンネル顕微鏡を用いた トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ準粒子探索	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 53-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.65.53	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16件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 T. Machida, Y. Nagai, and T. Hanaguri
2. 発表標題 Zeeman effects on Yu-Shiba-Rusinov states
3. 学会等名 ISSP Workshop "Frontier of scanning probe microscopy and related nano science" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 町田理, 永井佑紀, 花栗哲郎
2. 発表標題 Yu-Shiba-Rusinov状態に対するZeeman効果
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 町田理
2. 発表標題 走査型トンネル顕微鏡を用いたトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子探索
3. 学会等名 キタエフ量子スピン液体研究の新展開 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Machida
2. 発表標題 Searching for Majorana quasiparticle in Iron-based superconductors
3. 学会等名 CMTc Talks - Janet Das Sarma Conference Series: Searching for Topological Majorana Zero Modes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田理
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体Bi ₂ Se ₃ 上のPb薄膜における走査トンネル分光
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Machida
2. 発表標題 Tunneling spectroscopy on Pb thin films on topological insulator Bi ₂ Se ₃
3. 学会等名 American Physical Society March meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田理
2. 発表標題 超低温走査トンネル分光によるRashba系表面長構造の超伝導状態観察
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田理
2. 発表標題 鉄系超伝導体Fe(Se,Te)におけるマヨラナ準粒子の探索
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Machida
2. 発表標題 Nature of zero-energy vortex bound state in the superconducting topological surface state of Fe(Se,Te)
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Machida
2. 発表標題 Zero-energy vortex bound state in the superconducting topological surface state of Fe(Se,Te)
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 町田理
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体Fe(Se,Te)におけるゼロエネルギー渦糸芯束縛状態
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Machida
2. 発表標題 Search for vortex Majorana bound state using ultra-low temperature STM
3. 学会等名 IBS-RIKEN Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 町田理, 孫悦, 卞舜生, 竹田駿, Ching-Kai Chiu, 幸坂祐生, 花栗哲郎, 笹川崇男, 為ヶ井強
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体Fe(Se,Te)におけるゼロエネルギー渦糸芯束縛状態への渦糸芯相互作用による影響
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 Tadashi Machida
2. 発表標題 Nature of zero-energy vortex bound state in superconducting topological surface state of Fe(Se,Te)
3. 学会等名 Research Frontier of Advanced Spectroscopies for Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Machida
2. 発表標題 Nature of zero-energy vortex bound state in superconducting topological surface states of Fe(Se,Te)
3. 学会等名 Spectroscopies on Novel Superconductors (SNS) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadashi Machida
2. 発表標題 Nature of the zero-energy vortex bound state in the superconducting topological surface state of Fe(Se,Te)
3. 学会等名 17th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (Vortex2019) (招待講演) (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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