

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18753

研究課題名(和文)空間反転対称性の破れによるトポロジカル相転移の探索

研究課題名(英文) Search for topological phase transition induced by broken inversion symmetry

研究代表者

笠原 裕一 (Yuichi, Kasahara)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10511941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：空間反転対称性の破れの人工導入によるトポロジカル相の連続制御やエキゾチック超伝導状態の創成を目的とし、重い電子系物質を用いた人工超格子を作製した。CeCoIn<sub>5</sub>/YbCoIn<sub>5</sub>/YbRhIn<sub>5</sub>三色超格子では、グローバルな空間反転対称性の破れを二次元重い電子系超伝導に人工的に導入することに成功し、理論的に指摘されている高磁場超伝導相の出現を示唆する振る舞いが観測された。また、CeCoIn<sub>5</sub>と反強磁性体CeRhIn<sub>5</sub>を交互積層した人工超格子では、界面を通じて反強磁性体層の反強磁性ゆらぎが隣接する超伝導層に注入され、電子対間の相互作用が大きく増大することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間反転対称性の破れの人工導入や界面を通じた反強磁性揺らぎの注入により、超伝導状態を大きく制御できることが明らかとなった。特に前者ではトポロジカル超伝導の発現が理論的に指摘されているが、通常の物質では空間反転対称性の破れは結晶構造によって決定されてしまうため、空間反転対称性の破れを制御することが困難な状況であり、物質探索に依存していた状況であった。これに対し、人工超格子を用いた手法は連続制御が可能であり、トポロジカル超伝導の新しい探索手法を提示するものである。

研究成果の概要(英文)：We have fabricated artificial superlattices using heavy-fermion superconductors to control topological phase transition and to create exotic superconducting state by artificially introducing broken inversion symmetry. In CeCoIn<sub>5</sub>/YbCoIn<sub>5</sub>/YbRhIn<sub>5</sub> tricolor superlattice, global inversion symmetry breaking is artificially introduced in two-dimensional heavy fermion superconductors. We found an anomalous enhancement of the upper critical field at low temperature, suggesting the appearance of a new high-field superconducting phase, which has been theoretically predicted in superconductors without inversion symmetry. In superlattices comprised of heavy-fermion superconductor CeCoIn<sub>5</sub> and antiferromagnet CeRhIn<sub>5</sub>, pairing interaction is largely enhanced by injecting the antiferromagnetic fluctuations into superconducting layer from adjacent antiferromagnetic layer through the interfaces.

研究分野：低温物理

キーワード：トポロジカル物性 超伝導

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

物質のトポロジカルな性質は電子バンド占有状態の波動関数によって決定されるが、物質の対称性と極めて密接に関係していることが明らかとなってきた。それゆえ、対称性を外部パラメータにより人工的に破ることで、トポロジカルに非自明な相と自明な相との間の相転移(トポロジカル相転移)が期待される。相転移近傍では、ディラック半金属やワイル半金属などの特異な電子状態が期待されるとともに、高移動度をもつエッジ伝導チャンネルの形成が期待されるため、外部パラメータによるトポロジカル相転移の連続制御は、トポロジカル相転移の基礎学理を構築する上でも応用面でも極めて重要である。これまで化学ドーピングや磁場による研究が主に行われてきたものの、トポロジカル相転移の強力な証拠が得られたとは言い難い状況にある。

### 2. 研究の目的

近年、空間反転対称性の破れによってトポロジカル相転移が制御可能であることが明らかとなってきたが、実験的観測には至っていないのが現状である。このような背景のもと本研究で目的とするのは、空間反転対称性を破る外部パラメータを用いてトポロジカル相転移を観測し、連続制御することである。特に超伝導体を対象とし、トポロジカル超伝導体の探索を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、空間反転対称性の破れを導入する手法として、一軸応力、電場、および超格子構造による非対称ポテンシャル勾配を用いる。トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体の候補物質に対して、それぞれに有効な外部パラメータを印加することでトポロジカル相転移を実現し、量子スピンホール状態やトポロジカル超伝導状態におけるトポロジカルエッジ状態、例えばフェルミアークに関する検出実験を行う。

### 4. 研究成果

重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  と 2 種類の通常金属  $\text{YbCoIn}_5$ ,  $\text{YbRhIn}_5$  を用いた 3 種の異なる物質を交互積層した超格子構造を作製することにより、 $\text{CeCoIn}_5$  における二次元超伝導にグローバルな空間反転対称性の破れを人工的に導入することに成功した。上部臨界磁場測定より、バルク物質では実現されてこなかったヘリカル超伝導相の実現を示唆する結果が得られた。空間反転対称性の破れの度合いを連続的に制御することができるため、理論的に示唆されている空間反転対称性の破れた物質におけるトポロジカル超伝導の強力な探索手法となることが明らかとなった。さらに超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  と反強磁性体 ( $\text{CeRhIn}_5$  または  $\text{CeIn}_3$ ) を交互積層した人工超格子を作製し、界面を通じて反強磁性体層の反強磁性ゆらぎが隣接する超伝導層に注入され、超伝導と反強磁性の相互作用を調べることが可能であることを示した。準二次元反強磁性体  $\text{CeRhIn}_5$  を用いた  $\text{CeCoIn}_5/\text{CeRhIn}_5$  超格子では、圧力を印加し  $\text{CeRhIn}_5$  層の反強磁性転移が消失する量子臨界点近傍に近づけると、超伝導層に注入された量子臨界反強磁性ゆらぎにより電子対を形成する電子間引力が大きく増大することが明らかとなった。一方、三次元反強磁性体  $\text{CeIn}_3$  を用いた  $\text{CeCoIn}_5/\text{CeIn}_3$  超格子では、反強磁性ゆらぎは注入されているものの、電子間引力はほとんど変わらないことが明らかとなった。以上の結果は、二次元的な反強磁性ゆらぎが  $\text{CeCoIn}_5$  における電子対形成に本質的に重要であることを初めて直接的に示すものである。

また、独自の MBE を用いた希土類化合物薄膜作製技術と STM 測定装置を組み合わせた MBE-STM システムを立ち上げ、薄膜のその場電子状態観測を行った。重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  の非磁性不純物効果を調べ、不純物周りの局所電子状態は銅酸化物高温超伝導体とは大きく異なることを見出した。さらに重い電子系反強磁性体  $\text{CeRhIn}_5$  の電子状態の直接観測を行った。長年、反強磁性状態における重い電子状態形成の有無が問題とされてきたが、重い電子状態が形成されていることを直接的に示し、反強磁性状態においても f 電子がフェルミ面形成に寄与していることを示した。本研究ではバルク物質では困難であった広い原子レベルで平坦な面が得られており、MBE-STM 装置がエッジ状態を観測する上で非常に強力なシステムであることが実証された。

量子ホール効果に代表されるトポロジカル状態においては、特異な準粒子励起が現れ、トポロジエによって保護されたエッジ状態をもたらすと期待される。特にトポロジカル励起が電荷中性の粒子による場合、熱ホール効果が強力な手法となる。本研究では磁性絶縁体におけるスピン液体状態について熱輸送測定を行った。パイロクロア格子  $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  では、熱伝導率測定からフォトン、電気・磁気モノポールといった 3 つの創発準粒子励起が観測された。キタエフ・量子スピン液体候補物質  $\alpha\text{-RuCl}_3$  では、熱ホール効果が通常の量子ホール効果状態で期待される値の半分の値に量子化される「半整数熱量子ホール効果」を観測し、マヨラナ粒子によるエッジ伝導を実証することに成功した。これらの結果は、熱輸送測定がトポロジカル励起

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計7件)

M. Naritsuka, T. Ishii, S. Miyake, Y. Tokiwa, R. Toda, M. Shimozawa, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Kasahara, Emergent exotic superconductivity in artificially engineered tricolor superlattices, *Physical Review B*, 査読有、96 巻、2017、174512/1-10  
DOI: 10.1103/PhysRevB.96.174512

M. Haze, Y. Torii, R. Peters, S. Kasahara, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, In situ STM observation of nonmagnetic impurity effect in MBE-grown CeCoIn<sub>5</sub> films, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有、87 巻、2018、034702/1-4  
DOI: 10.7566/JPSJ.87.034702

Y. Tokiwa, T. Yamashita, D. Terazawa, K. Kimura, Y. Kasahara, T. Onishi, Y. Kato, M. Halim, P. Gegenwart, T. Shibauchi, S. Nakatsuji, E.-G. Moon, Y. Matsuda, Discovery of Emergent Photon and Monopoles in a Quantum Spin Liquid, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有、2018、87 巻、2018、064702/1-5  
DOI: 10.7566/JPSJ.87.064702

Y. Kasahara, K. Sugii, T. Ohnishi, M. Shimozawa, M. Yamashita, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, M. Motome, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Unusual Thermal Hall Effect in a Kitaev Spin Liquid Candidate  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>, *Physical Review Letters*, 査読有、120 巻、2018、217205/1-6  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.217205

Y. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizukami, O. Takana, S. Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid, *Nature*, 査読有、559 巻、2018、227-231

DOI: 10.1038/s41586-018-0274-0

M. Naritsuka, P. F. S. Rosa, Y. Luo, Y. Kasahara, Y. Tokiwa, T. Ishii, S. Miyake, T. Terashima, T. Shibauchi, F. Ronning, J. D. Thompson, Y. Matsuda, Tuning the Pairing Interaction in a d-Wave Superconductor by Paramagnons Injected through Interfaces, *Physical Review Letter*, 査読有、120 巻、2018、187002/1-6  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.187002

M. Haze, R. Peters, Y. Torii, T. Suematsu, D. Sano, M. Naritsuka, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有、88 巻、2019、014706/1-5  
DOI: 10.7566/JPSJ.88.014706

### [学会発表](計20件)

笠原裕一、近藤超格子による超伝導の人工制御とエキゾチック超伝導状態、京都大学基礎物理学研究所研究会「超伝導研究の最先端：多自由度、非平衡、電子相関、トポロジ、人工制御」、京都大学基礎物理学研究所、2017年6月19日

Yuichi Kasahara, Emergent exotic superconductivity and magnetism in Kondo superlattices, *International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)*, 東京工業大学、2017年5月10日

笠原裕一、Exotic superconductivity in Kondo superlattices, *CEMS Topical Meeting on Emergent 2D Materials 2017*, 理化学研究所大河内ホール、2017年7月20日(招待講演)  
大西隆史、笠原裕一、杉井かおり、下澤雅明、山下穰、常盤欣文、栗田伸之、田中秀数、那須讓二、求幸年、芝内孝禎、松田祐司、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>のKitaevスピ液体状態におけるマヨラナカイラルエッジ電流、日本物理学会2017年秋季大会、2017、岩手大学上田キャンパス、2017年9月21日

末松知夏、土師将裕、鳥井陽平、笠原成、笠原裕一、寺嶋孝仁、芝内孝禎、花栗哲郎、松田祐司、STMから見る近藤格子系CeCoIn<sub>5</sub>における磁性不純物周りの電子状態、日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、2017年9月22日

土師将裕、末松知夏、鳥井陽平、笠原成、笠原裕一、花栗哲郎、芝内孝禎、寺嶋孝仁、松田祐司、STMから見る重い電子系超伝導体CeCoIn<sub>5</sub>における磁性不純物効果、日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、2017年9月22日

鳥井陽平、末松知夏、土師将裕、笠原成、笠原裕一、寺嶋孝仁、芝内孝禎、花栗哲郎、松田祐司、重い電子系化合物CeRhIn<sub>5</sub>薄膜のSTM/STS測定、日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、2017年9月22日

橋本浩法、土師将裕、柏谷聡、三宅亮、芳賀芳範、寺嶋孝仁、芝内孝禎、笠原裕一、松田祐司、Micro SQUIDを用いたURu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>におけるカイラルエッジ電流の検出、日本物理学会2017年秋季大会、岩手大学上田キャンパス、2017年9月22日

Yuichi Kasahara, Half-integer thermal Hall conductance in a Kitaev spin liquid - Evidence for chiral Majorana edge current -, *CIFAR-EPiQS joint meeting on Quantum*

Materials, Half Moon Bay, CA, U.S.A., 2017年11月7日(招待講演)

Yuichi Kasahara, Half-integer thermal Hall conductance in a Kitaev spin liquid - Evidence for chiral Majorana edge current -, Symposium on Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017)、京都大学基礎物理学研究所、2017年11月10日(招待講演)

笠原裕一、キタエフスピン液体状態におけるマヨラナカイラルエッジ電流、新学術領域「トポロジギーが紡ぐ物質科学のフロンティア」第9回トポロジギー連携研究会「ナノ構造・エッジ伝導・マヨラナモード」、京都大学東京オフィス、2017年12月19日(招待講演)

笠原裕一、キタエフスピン液体における半整数量子熱ホール効果、第二回量子スピン液体研究の新展開、東京大学本郷キャンパス、2017年12月13日(招待講演)

笠原裕一、キタエフスピン液体における半整数量子熱ホール効果、日本物理学会第73回年次大会(招待講演)、東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日

石井智大, 橋本浩法, 土師将裕, 柏谷聡, 三宅亮, 芳賀芳範, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 笠原裕一, 松田祐司, カイラル超伝導体におけるエッジ電流の検出に向けた微小 SQUID の作製、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018年3月24日

馬斯嘯, 笠原裕一, 大西隆史, 杉井かおり, 下澤雅明, 山下穰, 栗田伸之, 田中秀数, 那須讓治, 求幸年, 芝内孝禎, 松田祐司, Kitaev スピン液体における半整数量子熱ホール効果の観測、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018年3月24日

末松知夏, 佐野大樹, 鳥井陽平, 土師将裕, 笠原成, 笠原裕一, 寺嶋孝仁, 芝内孝禎, 花栗哲郎, 松田祐司, STM を用いた CeRhIn<sub>5</sub> における混成ギャップの観測、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018年3月24日

Y. Kasahara, K. Sugii, T. Ohnishi, M. Shimozawa, M. Yamashita, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Observation of half-integer thermal Hall conductance in a Kitaev quantum magnet, The American Physical Society March Meeting 2018, Los Angeles, U.S.A., 2018年3月9日

Yuichi Kasahara, Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid, Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology, 東京大学柏の葉キャンパス、2018年4月10日(招待講演)

中村聡史, 成塚政裕, 笠原裕一, 寺嶋孝仁, 松田祐司, CeCoIn<sub>5</sub>/CeIn<sub>3</sub> 超格子における圧力下超伝導状態、日本物理学会2018年秋季大会、同志社大学京田辺キャンパス、2018年9月10日

中村聡史, 成塚政裕, 笠原裕一, 寺嶋孝仁, 松田祐司, CeCoIn<sub>5</sub>/CeIn<sub>3</sub> 超格子における反強磁性揺らぎの2次元超伝導への影響、日本物理学会2019年年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019年3月17日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php?>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 成塚 政裕

ローマ字氏名: Naritsuka, Masahiro

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。