

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05244

研究課題名(和文)磁性体/層状超伝導体複合構造におけるコヒーレントスピン依存量子現象

研究課題名(英文) Spin-dependent quantum coherent phenomena in ferromagnet/layered superconductor hybrids

研究代表者

入江 晃亘 (Irie, Akinobu)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：90241843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、磁性体/固有ジョセフソン接合/磁性体構造を作製し、固有ジョセフソン接合列における層間結合と多数接合にわたる長距離結合の両観点からスピン流が固有接合特性に及ぼす影響を明らかにした。固有ジョセフソン接合列の臨界電流の磁場依存性において、上下磁性層の磁化が反平行となるときの臨界電流が局所的極小値をとることを示すと同時に、スピン流は70接合程度までは一様に流れることを明らかにした。また、観測された臨界電流の磁場依存性は、磁性体からの誘導磁場とスピン蓄積に伴うジョセフソン接合の結合強さの寄与を考慮したモデルにより説明できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの磁性体/超伝導体接合や磁性体バリアのジョセフソン接合、並びに磁性体/金属(半導体)接合におけるスピン輸送に関する研究は、高度な高品質薄膜作製技術を駆使して行われている。本研究では、高温超伝導体において原子層スケールで自己形成されたナノ超構造に着目することで、同構造に発現するジョセフソン効果とスピン流の巨視的量子現象の相互干渉を明らかにした。これは、スピン流に基づく物質の新機能性の探索に加え、高温超伝導体単結晶のスピン트로ニクス応用への可能性を示すものであり、高温動作が可能な超伝導エレクトロニクスの創出が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we fabricated ferromagnet/intrinsic Josephson junctions/ferromagnet structure and find the influence of spin current on intrinsic Josephson properties from both point of views of the interlayer coupling between intrinsic Josephson junctions and long-rang coupling over several junctions. In the magnetic field dependence of the critical current of the intrinsic Josephson junctions, it is shown that the critical current takes a local minimum when the magnetization of the upper and lower magnetic layers becomes antiparallel, and the spin current flows uniformly up to about 70 junctions. It was also shown that the observed magnetic field dependence of the critical current can be explained by a magnetic coupling model for the intrinsic Josephson junctions that considers the contribution of the induced magnetic field from ferromagnets and the influence of spin accumulation on Josephson coupling strength.

研究分野：超伝導電子工学

キーワード：高温超伝導体 スピン트로ニクス 固有ジョセフソン接合 ナノ構造 超伝導材料・素子 低温物性

1. 研究開始当初の背景

近年、磁性と超伝導を組み合わせた超伝導スピントロニクス素子はエネルギー効率の極めて高い次世代電子デバイスの実現に大きく寄与するものとして期待されており、その研究開発が世界的規模で展開されている。これまで、金属系超伝導体を用いた磁性体/超伝導体(F/S)複合構造において巨大スピンホール効果やスピン三重項近接効果他、異種材料に発現する量子状態を融合した様々な物理現象が発見・観測されるなど多くの成果が得られている(Linder & Robinson, Nature Physics **11**, 307 (2015))。一方、デバイス応用上重要かつ学術的にも興味深いより高い臨界温度と超伝導エネルギーギャップをもつ高温超伝導体を対象とした研究も進められているものの、試料作製の困難さからそのスピン輸送物性はほとんど明らかにされていない。

劈開することで平滑な清浄面を比較的容易に得られるBi系高温超伝導体($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (BSCCO))バルク単結晶の特徴は、結晶構造に起因した原子層スケールのジョセフソン接合(固有ジョセフソン接合: Intrinsic Josephson Junction (IJJ))を自己形成することである。我々は、この固有ジョセフソン接合を構成する超伝導層の厚さが0.3nmと極めて薄いことに着目し、同接合におけるスピン注入効果に関する研究を進めてきた結果、磁性体/固有ジョセフソン接合列構造において、磁性体の磁化反転過程に依存した固有接合の臨界電流の変化を観測することに成功した。これは、スピン流注入により固有ジョセフソン接合特性が変調されたことを意味しており、固有ジョセフソン接合特性を介してスピン流を高感度に検出しているとも言える。

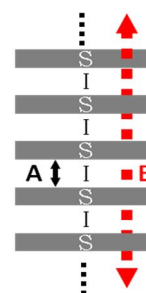


図1 固有ジョセフソン接合列における電磁氣的結合(A:層間結合, B:長距離結合)
S:超伝導層, I:絶縁層

ところで、固有ジョセフソン接合列を流れる超伝導電流は、隣接する超伝導層間のジョセフソン結合の強さ(図1A)と隣接する接合間の相互作用により協働現象をもたらす多数接合にわたる長距離の電磁氣的結合(図1B)の強さに依存するが、スピン流がこれら両者の結合に影響を及ぼしていることが示唆されるものの、固有ジョセフソン接合列におけるスピン流の振る舞いは完全に解明されるまでには至っていない。

本研究では、「電磁氣的に結合した多重積層ジョセフソン接合系においてスピン流はどのように振る舞うのか」を研究課題の核心のなす学術的問いと据え、固有ジョセフソン接合列におけるスピンの依存した量子輸送現象を明らかにすることを計画した。

2. 研究の目的

本研究では、Bi系高温超伝導体固有ジョセフソン接合列を用いた磁性体/固有ジョセフソン接合列/磁性体構造において、層間結合と多数接合にわたる長距離結合の両観点からスピン流が固有接合特性に及ぼす影響を探求し、同接合列におけるスピン依存量子輸送現象を明らかにすることを目的とする。また、スピン依存量子輸送現象の制御方法を検討し、同接合を利用した新奇なスピン機能素子応用への展開を目指す。

3. 研究の方法

BSCCO 固有ジョセフソン接合列におけるスピン流の伝搬距離および多数接合のコヒーレント動作(協働現象)の評価

構成接合数の異なる磁性体/固有ジョセフソン接合列/磁性体構造(図2)を作製し、各試料の固有ジョセフソン接合列の電流-電圧特性を測定することによりスピン流が協働現象に及ぼす影響を評価した。

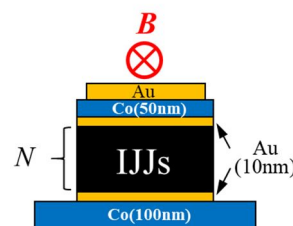


図2 磁性体/固有ジョセフソン接合列/磁性体構造

超伝導層間のジョセフソン結合強さに対するスピン注入効果の評価

Pb添加量の異なる($\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x$) $_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (BPSCCO)を用いた磁性体/固有ジョセフソン接合列構造を作製し、そのスピン依存伝導特性を調べることで、ジョセフソン結合強さのスピン輸送特性に対する影響を評価した。

磁気結合固有ジョセフソン接合モデルを用いた多数接合列におけるスピン輸送特性の解析

磁気結合固有ジョセフソン接合モデルに磁性体の磁化特性の寄与を組み入れたモデルにより、固有ジョセフソン接合の臨界電流の磁場依存性を解析した。

4. 研究成果

BSCCO 固有ジョセフソン接合列におけるスピン流の伝搬距離および多数接合のコヒーレント動作(協働現象)の評価

構成接合数が 40 ~ 300 の試料の 77K における電流 電圧特性を測定したところ、多重ブランチ構造及び各構成接合の臨界電流に対応するブランチの最大電流値の磁場依存性は、70 接合程度を境に傾向が異なることがわかった。図 3 は、作製した試料(接合数 300)の 77K における臨界電流の磁場依存性と 300K における磁化特性である。これより、臨界電流は磁化特性に対応して変化しており、上部と下部磁性層の磁化が反平行のときスピン非平衡状態となり、臨界電流の局所的な最小値が現れている。接合数が 70 以下の試料においては、試料内の各接合の臨界電流は磁場に対し同様の変化を示すのに対し、接合数が 70 以上の試料では、低電圧側の臨界電流と高電圧側の臨界電流の磁場依存性に若干の差異が観測された。これより、固有ジョセフソン接合列におけるスピン流は、70 接合程度(約 10nm)までは、ほぼ一様に伝搬し、それ以上になると減衰することが示唆された。

また、準粒子トンネル特性の微小な変化を明瞭に観測するために作製した、磁性体と固有ジョセフソン接合間の接触抵抗の影響を排除可能な 4 端子構造試料における臨界電流の磁場依存性は、通常の 3 端子メサ型素子のそれとは異なっていた。これは、3 端子素子では固有ジョセフソン接合の接合面に一様にスピンが注入されるのに対し、4 端子構造では、電流注入電極部分からのみスピンが注入され、スピン注入効果が空間的に不均一に生じることに起因していると考えられる。

超伝導層間のジョセフソン結合強さに対するスピン注入効果の評価

FZ 法並びに自己フラックス法を用いて BPPSCO 単結晶の大型化に取り組んだ。焼成温度を調整することで、面積約 $4.5 \times 7 \text{ mm}^2$ 程度と従来に比べ大きい単結晶を得ることができ、組成分析、X 線回折測定により 2212 相であることを確認した。また、得られた BPPSCO 単結晶の臨界温度は 83~90K であり、メサ構造に加工することで、BPPSCO 固有ジョセフソン接合に比し高臨界電流密度の固有接合を作製することができたが、磁性体との大きい接触抵抗により明瞭なスピン注入効果を観測するまでには至らなかった。そのため接触抵抗の軽減が今後の課題である。

磁気結合固有ジョセフソン接合モデルを用いた多数接合列におけるスピン輸送特性の解析

上下磁性体層の誘導磁場による接合の内部磁場およびスピン蓄積によるジョセフソン接合の結合強さへの寄与を考慮した磁気結合固有ジョセフソン接合モデルを用いて臨界電流の磁場依存性を数値計算した。計算結果を図 4 に示す。これより、臨界電流の磁場依存性はヒステリシスを示すとともに磁化が反平行となる磁場で臨界電流の局所的な最小値が現れており、定性的に実験結果を再現する結果が得られた。

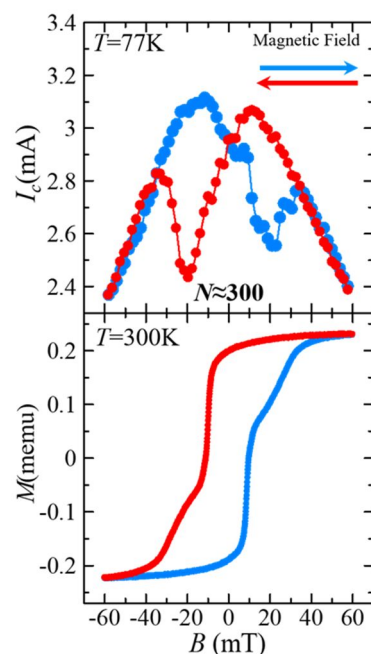


図 3 作製した試料の臨界電流の磁場依存性(上)並びに磁化特性(下)

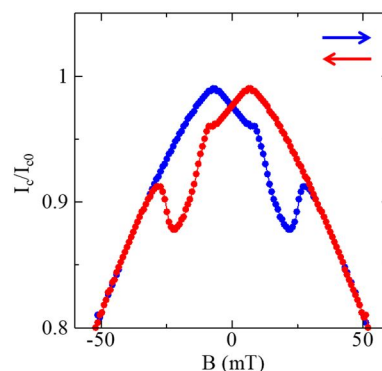


図 4 磁性体からの誘導磁場とスピン蓄積に伴うジョセフソン接合の結合強さの寄与を考慮したモデルにより求めた臨界電流の磁場依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamaki Kazuhiro, Mochiku Takashi, Tezuka Keitaro, Irie Akinobu	4. 巻 580
2. 論文標題 Preparation of superconducting RuGd-1222 single crystals by partial melting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica C: Superconductivity and its Applications	6. 最初と最後の頁 1353798 ~ 1353798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physc.2020.1353798	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 Unuma Takeya, Sasaki Takumi, Yamaki Kazuhiro, Irie Akinobu, Ishida Hiroki, Kato Takahiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Dielectric properties of crystalline BiOCl in the terahertz region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 2646 ~ 2646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.399616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Funahashi Shugo, Mochiku Takashi, Matsushita Yoshitaka, Bamba Yoshihiro, Tezuka Keitaro, Kitamura Michihide, Yamaki Kazuhiro, Irie Akinobu	4. 巻 59
2. 論文標題 Bulk superconductivity in RuGd-1212 single crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 073002 ~ 073002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9848	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 Rahmonov I. R., Tekic J., Mali P., Irie A., Plecenik A., Shukrinov Yu. M.	4. 巻 101
2. 論文標題 Resonance phenomena in an annular array of underdamped Josephson junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174515 ~ 174515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PHYSREVB.101.174515	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 M. Nashaat, Yu. M. Shukrinov, A. Irie, A. Y. Ellithi, Th. M. Sherbini	4. 巻 45
2. 論文標題 Microwave induced tunable subharmonic steps in superconductor-ferromagnet-superconductor Josephson junction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1246 ~ 1251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.0000203	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 I. R. Rahmonov, J. Tekiic, P. Mali, A. Irie, Y. M. Shukrinov	4. 巻 101
2. 論文標題 ac-driven annular Josephson junctions: The missing Shapiro steps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024512-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.024512	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 Kazuhiro Yamaki, Takashi Mochiku, Yoshitaka Matsushita, Michihide Kitamura, Akinobu Irie	4. 巻 562
2. 論文標題 Synthesis and structure of rutheno-cuprate (RE,Ce)2Sr2RuCu2010- (RE=Gd,Eu) single crystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica C: Superconductivity and its Applications	6. 最初と最後の頁 25 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physc.2019.03.007	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 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Akinobu Irie
2. 発表標題 Spin-dependent behaviors in Ferromagnet/Intrinsic Josephson junctions/Ferromagnet Hybrids
3. 学会等名 10th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 由利 謙弥, 八巻 和宏, 入江 晃巨
2. 発表標題 バイアス電流分布の固有ジョセフソン接合特性に与える影響
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八巻 和宏, 入江 晃巨
2. 発表標題 部分熔融によるルテニウム系銅酸化物RuGd-1222単結晶の合成
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田 篤実, 八巻 和宏, 入江 晃巨
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合スタックアレイの作製
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八巻 和宏, 茂筑 高士, 松下 能孝, 北村 通英, 入江 晃巨
2. 発表標題 層状ルテニウム系銅酸化物超伝導体の単結晶合成の現状
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八巻 和宏, 谷 勝也, 入江 晃亘
2. 発表標題 部分溶融とFZ法によるEuSr ₂ Cu ₂ NbO ₈ -d単結晶の育成
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 下山淳一, 荻野 拓, 内藤方夫, 飯田和昌, 日高睦夫, 寺井弘高, 小林慎一, 飯島康裕, 熊倉浩明, 安達成司, 入江晃亘, 筑本知子, 淡路 智, 大嶋重利, 圓福 敬二, 鷗澤佳徳, 福田大治, 藤巻 朗, 吉原文樹, 川畑史郎	4. 発行年 2021年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 396
3. 書名 超伝導技術の最前線 [応用編]	

〔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
---------	---------