

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14109

研究課題名(和文) 高効率スピン注入によるスピン偏極超伝導電流生成の実現

研究課題名(英文) Spin-polarized supercurrent induced by effective spin injection

研究代表者

大西 紘平(Ohnishi, Kohei)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：30722293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、おもに超伝導体を含む多層膜に対してスピン注入を行い、スピン偏極超伝導電流の生成と検出について、その有効性を調べた。その結果、(1)スピン注入とその検出が超伝導状態の探索において有効であることを示した。(2)高スピン偏極材料CoFeAlと高い超伝導転移温度を示すNbNを用い、超伝導転移温度近傍におけるスピン吸収に関するモデル構築を行った。(3)複数のスピン吸収手法を駆使することでスピン偏極超伝導電流の検出に同方法が有効であることを示した。(4)理論グループとの積極的な議論により、新たなスピン偏極超伝導電流の生成と測定方法について示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでスピン偏極超伝導電流の形成は、限られたトリプレット超伝導体や特定の試料構造においてのみ観測されてきた。本研究の成果により、より自由度の高い試料構造が可能となり、クーパー対の変調やスピン偏極超伝導電流の形成に関する物性値の測定が容易となった。今後、これらの研究成果を踏まえることにより、様々な方法を用いてスピン偏極超伝導電流の生成を制御可能となり、超伝導位相制御素子等を含めた新たな超伝導スピントロニクス提案へと広がりをもつ。

研究成果の概要(英文)：In this research, a generator and a detector of spin-polarized supercurrent have been demonstrated by investigating micro-fabricated multi-layers under spin injection. (1) The spin current can be an efficient detector for the superconducting state especially at the normal metal / superconductor interface. (2) A comparison of the spin injections into Nb and NbN can be explained by a simple model of superconducting gap at the interface just below the transition temperature. (3) Several structures for spin absorption show the temperature- and structure-dependent spin signals, which indicates the spin polarized supercurrent may be detected in these structures. (4) Based on the discussion with the theoretical groups, new ways to control spin-polarized supercurrent have been provided.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 超伝導 トリプレットクーパー対 スピン偏極超伝導電流 スピントロニクス スピン依存伝導

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

いわゆる BCS 超伝導体では、電子はシングレットクーパ対を形成するため、全体としてスピン無偏極状態にある。そのため、スピン偏極状態にある強磁性体と組み合わせることで、スピン状態の競合による新奇物性現象が観測される。そのひとつが、超伝導体 / 強磁性体界面において生成されるトリプレットクーパ対 (図 1) と、それによるスピン偏極超伝導電流である。

スピン偏極超伝導電流の形成は、巨視的量子状態間のコヒーレントな遷移を示しており、基礎物理学的な観点から非常に興味深い現象であり、さらにエネルギー散逸なく電荷とスピンの両方を長距離にわたって伝送できるため、応用上も様々な革新が期待できる。しかしながら、本研究開始当初、国内では実験的研究を行っているグループは皆無であり、世界的にみても間接的にスピン偏極超伝導電流の存在を示す実験結果が報告されているのみであった。そのため、超伝導体 / 強磁性体界面におけるスピン偏極超伝導電流を制御するには全く至っていなかった。

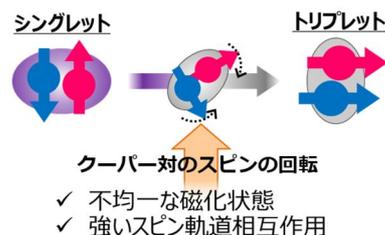


図 1: スピン偏極超伝導電流の形成。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記のような背景を鑑み、スピン偏極超伝導電流制御の観点から、超伝導体 / 強磁性体界面における生成のより詳細なメカニズムを明らかにすることを目的とした。とくに具体的には、研究代表者の有するスピントロニクス技術と超伝導体微細加工技術を組み合わせることで、同一試料中でのスピン偏極超伝導電流の有無や生成効率を外部からの制御可能とし、系統的な測定を実現することを目指した。

### 3. 研究の方法

おもに図 2(a)および(b)に示す面内スピナルブ構造を用いて実験を行った。両構造とも、注入端子から非磁性体に電流を流すことで、非磁性体中にスピン流を誘起することが可能である。このとき、図中に示す端子配置で測定することで、2 つの強磁性体の磁化配列 (平行・反平行) に依存した非局所電圧を測定できる (図 2(c))。磁化配列による抵抗差は、スピン信号と呼ばれ、非磁性体中のスピン流の量に比例する。ここで Cu 層に接合させるスピン吸収層として超伝導体を用いることで、その超伝導状態に依存したスピン吸収が生じるため、スピン信号を介して超伝導状態を調べられると期待される。

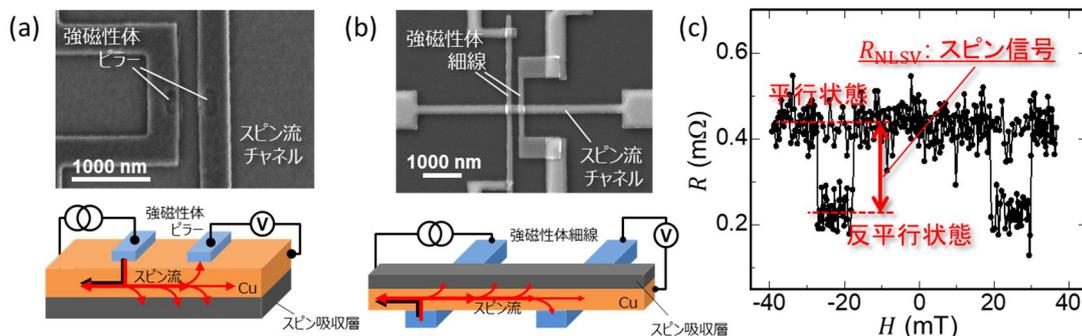


図 2. スピントリプレット状態の検出を可能とする (a)ピラー型、および、(b)細線型面内スピナルブ構造の電子顕微鏡像と模式図。両構造ともに、スピン流の注入と検出には 2 つの強磁性体を用い、スピン流の伝導チャンネルは多層膜構造としている。(c)実際に測定した非局所電圧の面内磁場依存性。赤矢印の抵抗差がスピン信号と呼ばれる。

### 4. 研究成果

以下に、研究期間に得られた具体的な成果を挙げる。

(1) 図 2(a)において、強磁性体端子として NiFe を用い、スピン吸収層として Nb を用いた構造を作製し、スピン偏極状態が実効的にクーパー対に影響を与えることを確認した。

スピン注入による超伝導状態の変化の大きさを考慮し、図 3 に示すように、強磁性体ピラーを 3 つ作製した。これにより、ピラーの磁化配列を制御することで、バイアス電流を変えずにスピン注入量の増減が可能となり、ジュール熱の影響を差し引くことが可能となる。測定の結果、超伝導状態を示すバックグラウンド抵抗に違いがみられ、反平行状態となるスピンを注入した際にクーパー対の形成が促進される様子が見られた。このことから、スピン偏極状態がクーパー対の状態にも影響を与えうることが示せた。

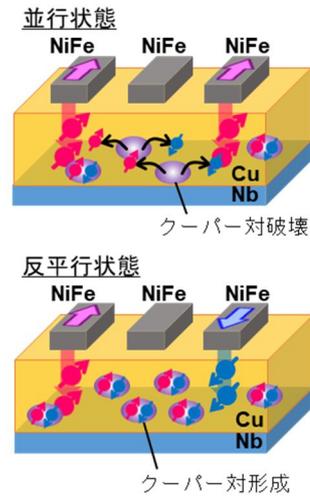


図 3. 強磁性体ピラーを 3 つ有する面内スピンバルブ構造。両端のピラーの磁化配列により、中央ピラー下のスピン偏極状態を制御できる。

(2) スピン注入量の増大をおもな目的として、スピン偏極材料である CoFeAl を強磁性体ピラーとして図 2(a)の構造を作製し、その有効性を示した。また並行して、NbN の成膜環境を構築し、より大きなバイアス電流の印加も可能とした。

強磁性体として NiFe を用いた場合、バイアス電流によるジュール発熱の影響から、スピン注入量の増加には限界があった。そこで強磁性体として CoFeAl を用いた試料を作製し、NiFe を用いた試料におけるスピン信号と比較した。その結果、明らかにスピン信号は CoFeAl を用いた試料の方が大きく、低いバイアス電流であっても高効率にスピン注入可能であることが確認された。また、そのスピン信号の変化から、観測されるスピン信号が Nb/Cu 界面に形成される超伝導ギャップに強く依存することが明らかとなった。さらに、新たに成膜可能とした NbN をスピン吸収層として用いた試料を作成・測定し、Nb を用いた試料と比較することで、超伝導転移温度近傍において界面に形成される超伝導ギャップとスピン吸収量の関係を、簡単なモデルで説明できることを示した。

(3) 研究期間後半には、英国ケンブリッジ大学との共同研究を開始し、当該グループにおいて報告されたスピン軌道相互作用によるスピン偏極超伝導電流の生成について実験を行い、スピン偏極超伝導電流の生成効率制御と生成量評価を同一サンプルで行う手法を確立した。

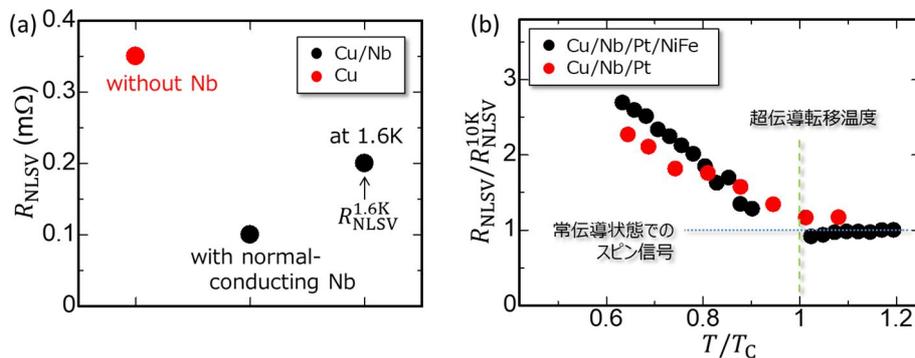


図 4. (a)細線型スピンバルブ構造での測定結果。Nb 層がない試料 (赤) と Nb 層が接合された試料 (黒) でのスピン信号。1.6 K でのスピン信号は常伝導状態のものよりも大きい。(b)ピラー型スピンバルブ構造での測定結果。横軸は温度、縦軸がスピン信号である。比較のため、それぞれ、超伝導転移温度と常伝導状態でのスピン信号で規格化している。

実際に作製した試料では、図 2(a)および(b)の構造において、スピン吸収層に Nb/Pt/NiFe 複合膜を接合した。本構造では、Pt 層によるスピン軌道相互作用とスピン注入によるスピン偏極状態から、Nb 層中にスピン偏極超伝導電流が流れることが期待され、スピン注入量およびスピン信号から、それぞれ、スピン偏極超伝導電流生成の制御および生成量の評価が可能になると期待される。まず、より実験結果から容易に定量的評価を行える図 2(b)の構造について試料を作製し、実験を進めた。その結果、図 4(a)に示すように、超伝導状態を示す温度でのスピン信号は、常伝導状態の値より大きい一方で、Nb 層のない試料と比較して小さかった。このことから、図 2(b)の構造では、強磁性体細線において生じるジュール熱によって実効的な試料温度が上昇し、超伝導状態が抑制されるために、スピン流の一部が吸収されることがわかった。そこで次に、超伝導転移によるスピン信号の変化をより正確に観測するため、図 2(a)の構造を作製し、測定を行った。その結果、図 4(b)に示すように、NiFe 層の有無による有意な差異は見られなかったものの、温度の減少に対してスピン信号が明らかに増大しており、効果的に超伝導状態によってスピン吸収が抑制されている様子が観測できた。

(4) その他、ケンブリッジ大学滞在期間も含めた研究期間全体を通じて、スピン偏極超伝導電流の新たな制御方法に関して、海外の理論グループと積極的な議論を繰り返し行った。その結果、非磁性対中に形成された磁性体クラスタへのスピン注入を用いる方法や、Fe/Cr 界面に形成されるスピングラス状態を用いる方法等の着想を得た。理論的な研究も含めて国内での同様の研究を行っているグループはいまだ限られていることから、多くの知見を得られる機会であり、実際、Fe/Cr 層を用いたスピン偏極超伝導電流生成は、報告者のグループにおいても面内ジョセフソン構造で確認できた(図 5)。これは、面内スピンバルブ測定による超伝導電流のスピン偏極率測定の可能性を示唆しており、今後の超伝導スピントロニクス分野拡大に繋がる有意義な結果である。

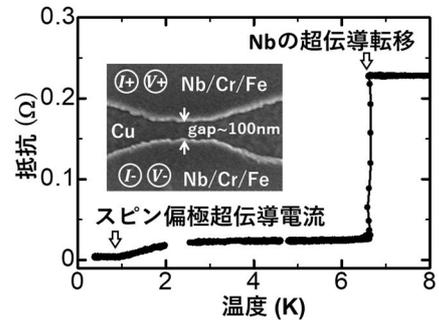


図 5: Fe/Cr 層を有する面内構造におけるスピン偏極超伝導電流の観測結果。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Ohnishi Kohei, Sakamoto Michiko, Ishitaki Masayuki, Kimura Takashi	4. 巻 969
2. 論文標題 Possibility of Cooper-pair formation controlled by multi-terminal spin injection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012028 ~ 012028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012028	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 Ishitaki Masayuki, Ohnishi Kohei, Kimura Takashi	4. 巻 57
2. 論文標題 Temperature evolution of the charge and spin transport in Cu/Nb interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 060310 ~ 060310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.060310	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 Hu Shaojie, Zhao Jingyan, Wang Lei, Cui Xiaomin, Ohnishi Kohei, Ariki Taisei, Min Tai, Xia Ke, Kimura Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Substantial enhancement of thermal spin polarization in Py/Cu interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104403 ~ 104403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.104403	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 Asam Nagarjuna, Yamanoi Kazuto, Ohnishi Kohei, Kimura Takashi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Thermal Spin-Valve Effect in Magnetic Multi-layered Nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Superconductivity and Novel Magnetism	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10948-019-5016-5	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 Phu P., Yamanoi K., Ohnishi K., Hyodo J., Rogdakis K., Yamazaki Y., Kimura T., Kurebayashi H.	4. 巻 485
2. 論文標題 Bolometric ferromagnetic resonance techniques for characterising spin-Hall effect at high temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 304 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2019.04.070	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 Kurokawa Yuichiro, Wakae Masakazu, Sumi Satoshi, Awano Hiroyuki, Ohnishi Kohei, Yuasa Hiromi	4. 巻 58
2. 論文標題 Spin?orbit torque-driven current-induced domain wall motion in Gd?Fe magnetic wires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 030905 ~ 030905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aafa91	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10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kohei Ohnishi
2. 発表標題 Experimental demonstration of a Josephson junction under spin current injection
3. 学会等名 Superconducting Spintronics Mini Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大西紘平, 木村崇
2. 発表標題 超伝導体 / 常伝導体界面におけるスピン流
3. 学会等名 IEEEマグネティクス 福岡/広島ジョイントチャプタ キックオフセミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大西紘平, 矢野大吾, 木村崇
2. 発表標題 Nb系超伝導細線における電荷およびスピン不均衡状態の観測
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 大西紘平, 矢野大吾, 木村崇
2. 発表標題 Spin-dependent quasi-particles injection into superconducting Nb
3. 学会等名 平成30年度 スピン変換年次報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ohnishi, M. Sakamoto, M. Ishitaki, and T. Kimura
2. 発表標題 Possibility of Cooper-pair formation controlled by multi-terminal spin injection
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西紘平, 石瀧真之, 木村崇
2. 発表標題 Spin injection into proximity-induced superconducting Cu film
3. 学会等名 平成29年度「ナノスピン変換科学」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西紘平
2. 発表標題 超伝導体 / 常伝導体界面におけるスピン伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西紘平, 石瀧真之, 矢野大吾, 木村崇
2. 発表標題 超伝導体 / 磁性体界へのスピン注入
3. 学会等名 第11回 物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大西紘平, 矢野大吾, 石瀧真之, 木村崇
2. 発表標題 超伝導体NbN/常伝導体Cu界面におけるスピン吸収の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ohnishi, T. Iwahori, D. Yano, and T. Kimura
2. 発表標題 Transport properties in submicron Nb superconducting wire with ferromagnetic electrode
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS) 2020 (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
--	---------------------------	-----------------------	----