

# 科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025  
課題番号：21H05021  
研究課題名：回転スピ流による再構成可能な超伝導量子デバイスの創成  
研究代表者氏名（ローマ字）：木村 崇（KIMURA Takashi）  
所属研究機関・部局・職：九州大学・理学研究院・教授  
研究者番号：80360535

## 研究の概要：

本研究では、強磁性体/常磁性常伝導体/超伝導体からなる三層構造におけるスピン偏極準粒子とクーパ対の共存状態に、スピン吸収効果や回転スピ流などの純スピ流制御技術を適用することで、スピン三重項クーパ対やパイ接合ジョセフソン回路などの機能性が高い量子状態を実現する。更に、それらをコヒーレンス制御技術へと高度化することで、再構成可能な革新的高機能量子デバイスの実現を目指す。

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピ流、スピントリプレット状態、ジョセフソン接合、多端子スピ注入

## 1．研究開始当初の背景

超伝導と強磁性は、どちらも代表的な量子力学的現象で、様々な魅力的物性を生み出すのみならず、無損失送電や超伝導磁石、磁気記録や永久磁石等、様々な重要技術に応用されている。これら2つの特性を融合させることができれば、更に魅力的な物性が発現するのは疑いようがない。しかし、双方を接続すると、強磁性体による強い内部磁場の影響で超伝導特性が破壊されるため、両特性を維持することが困難になる。このような本質的制約から、両現象は互いに相性が悪いものとして理解されていたが、この問題を解決する手法として、本研究では、両物性現象と相性の良い銅などの常磁性常伝導金属を用いた構造に着目する。

代表者は、これまでに、高効率なスピ流生成技術、及び各種機能性物質への効果的なスピ注入技術などを数多く開発し、その有効性を確認している。本系におけるスピ注入においても、スピ注入時に発生する発熱を最小限に抑えることで、超伝導体がスピ流を完全反射するスピ絶縁体であること、巨大スピ流を注入することで超伝導ギャップの抑制が可能であること、近接効果により超伝導体状態となった物質中の準粒子もスピ偏極が可能であることなどを報告してきた。ここでは、これらの技術を高度化して、超伝導状態にスピ情報を組み込んだ量子演算素子を実現し、超伝導量子デバイスに革新をもたらす技術の創成を目指す。

## 2．研究の目的

本研究の目的は、申請者が有する世界最高レベルの純スピ流制御技術を駆使して、クーパ対のスピン偏極状態（スピン三重項状態）を形成し、ジュール損失や散逸の無い超スピ流を実現すること、更に、その超スピ流を用いて、重ね合わせ状態や位相制御など量子演算に関連する新奇な要素技術を開発し、革新的な量子ビットや再構成可能な超伝導量子デバイスを開発することである。

## 3．研究の方法

まず、申請者が開発した強磁性体/常磁性常伝導体/超伝導体を用いて、トリプレット・スピ流の実現を目指す。超伝導ジョセフソン素子における常伝導端子に、磁化容易軸が直交した2つの強磁性体ドットを近接させて作製する。このような2つの強磁性端子から非局所スピ注入法によりスピ流を形成するが、両端子の電流比を調整することで、蓄積スピンの量子化軸の回転が可能となる。このようなスピ蓄積により形成される有効磁場を近接効果により形成されたスピ三重項クーパ対に作用させることで、三重項クーパ対を形成する。（図1）

このようにして得られた超伝導体中のスピ・トリプレット状態における重ねあい状態を反映した重金属を用いて効果的に検出し、スピ量子ビットの実現を目指す。また、多端子スピ注入端子を有する同構造をジョセフソン $\pi$ 接合へと高度化し、スピ流の強度を調整することで、同じ接合においても、0接合から $\pi$ 接合へと自在に変化させる技術を確認する。さらに、同接合を複数組み合わせさせた超伝導リングデバイスを作製し、再構成可能な量子演算回路を実現する。

## 4．これまでの成果

これまでに以下の代表的な成果を得ることに成功している。

1. Nb 細線におけるスピ偏極準粒子緩和長の測定
2. NbN 薄膜を用いたスピ吸収効果の効率的遮断
3. 非磁性チャネルの微細化によるスピ蓄積効果の増大
4. Nb 細線の準粒子状態密度を反映したスピ吸収効果の飛躍的増大

1 に関しては、Nb そのものの準粒子緩和長に関する報告が殆どなく、非常に有益な結果になると考えられる。特に、常伝導端子が信号電圧に大きな影響をもたらすのは、本実験が初めての指摘であり、今後、様々な超伝導物質の準粒子緩和長や超伝導ギャップの温度依存性等を調べる上で、非常に有効になると考えられる。更に、準粒子のスピンの偏極が緩和過程に影響することを実験的に確認したことは、予想通りの結果とは言え、その意義は大きい。

2 に関しては、NbN の超伝導ギャップの温度依存性に関して、スピン流を用いて検出したのは世界初であり、更に、超伝導スピントロニクスとも相性がよいことも確認できた意義は大きい。これらの準粒子緩和長等に関しては、今後の課題となっているが、Nb と同程度の特性を持つと期待している。

3 に関しては、スピン注入時の発熱を抑制するうえで、ピラー型素子の役割は非常に大きく、今回、本素子の欠点であったスピン拡散の拡がりを抑制できる構造を実証できた意義は非常に大きい。これらは、超伝導スピントロニクスだけでなく、スピントロニクス全般において、スピン流を制御する新構造として大いに期待できる。

4 に関しては、予想外の結果であったが、準粒子準位のエネルギーを分布を考えると観測されて然るべき結果であった。ただし、これらは温度の精密な変化に加え、界面での Cu と Nb の混合層の形成も関係していると考えられる。このように、超伝導/常伝導層の作製には、成膜順序が界面に大きく影響することも判明し、これらは今後の研究を効果的に進めるうえで、非常に有効である。

## 5 . 今後の計画

これまでの研究で得られた知見から、Nb 細線内のスピン偏極準粒子が長いスピン緩和長を持つことが確認されたが、Nb 自体のスピン拡散長が短いため、スピン偏極の有無により、10% 程度の違いしか観測されていない。新たに納品された He3 冷凍機を用いて、スピン軌道相互作用の小さい Al 細線を用いて同実験を行い、スピン偏極の有無による準粒子緩和長の広範な調整を試みる。また、ギャップ近傍の大きな準粒子準位を反映した巨大スピン吸収効果に関して、巨大スピンホール効果の観測結果も得られている。一方で、磁場印加による超伝導特性の変化がもたらす信号の重畳もあり、解析が複雑になっているため、より系統的な実験を行って、着実な成果につなげていく。加えて、独自に開発した圧力セルを用いて各種物性パラメータの性能向上や界面品質を改善させ、各種デバイスの高性能化を目指す。また、ごく最近成功したスパッタ法による超伝導 YBCO 薄膜を用いて、d 波が持つ軌道角運動量とスピン流のスピン角運動量変換の実現を目指した実験も進め、新機能としてデバイス化を検討する。

再構成可能な超伝導回路に関しては、Josephson 接合の実現がカギとなるが、すでに、4 He を用いて超伝導電流の観測に成功している。この Josephson 超伝導電流がスピン蓄積によって調整されるかの確認が必要であるが、現時点、発熱に伴う超伝導電流の減少の影響が大きく、十分な結果が得られていない。これを克服するために、He3 装置を用いた更なる素子の冷却、更に、終端検出器を用いた高精度イオンミリング装置による、高品質なナノピラー型のスピン注入素子を作製する。これにより、発熱を最小化した状態でスピン蓄積の最大化を達成し、ゼロパイ接合への周期的転移の観測を目指す。

## 6 . これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Ariki, T., Nomura, T., [Ohnishi, K.](#) & [Kimura, T.](#), Effective modulation of spin accumulation using a ferromagnetic/nonmagnetic bilayer spin channel, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 55, 9, 095302. (2022) 査読有
2. Cui, X., Hu, S. & [Kimura, T.](#), Enhanced spin accumulation in nano-pillar-based lateral spin valve using spin reservoir effect, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 55, 16, 165004. (2022) 査読有
3. Kamruzzaman, M., Hu, S., [Ohnishi, K.](#) & [Kimura, T.](#), Experimental Evaluation of 3D Heat Flow Using Magneto-Thermoelectric Effects in a Ferromagnetic Nanowire, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*. 16, 2100608 (2022) 査読有
4. Iimori, R., Obinata, S., Mitsuda, A. & [Kimura, T.](#), Pressure-induced enhancement of spin-charge conversion efficiency in CoFeB/Pt bilayer, *Applied Physics Express*. 15, 3, 033003. (2022) 査読有
5. Iwahori, T., Mizokami, K., Matsuda, R., [Ohnishi, K.](#) & [Kimura, T.](#), Relaxation Process of Spin-Polarized Quasiparticles in a Superconducting Nb Wire, *IEEE Transactions on Magnetics*. 58, 2 (2022) 査読有

他 7 編

## 7 . ホームページ等

該当なし