

# 論文の内容の要旨

論文題目：

超伝導体を用いた複合構造におけるスピン蓄積状態の研究

氏 名：大西 紘平

本論文は、強磁性体と非磁性体の界面に生じるスピン蓄積状態と超伝導状態との関係を実験的に明らかにしたものである。以下に、研究の背景および内容の要旨を述べる。

## 【背景・目的】

エレクトロニクスデバイスでは、電子の持つ電荷の流れを制御・利用することが様々な機能を実現するうえで必要不可欠となっている。一方、電子は電荷以外にスピンというもう一つの自由度をもっているが、スピンは電荷と異なり電氣的な制御が容易ではなかった。しかし、近年の微細加工技術や微小信号検出技術の発達により、電子スピンの依存した現象を電氣的に検出・制御することが可能となり、電子の電荷とスピンの両方の性質に着目した「スピントロニクス」という新しい分野が注目されている。スピントロニクスは最近の研究において目覚ましい発展を遂げており、応用的な発展のみならず、基礎研究の観点からも新しい物理現象が数多く発見されている<sup>[1]</sup>。

これまでのスピントロニクスの研究の舞台はおもに金属や半導体中であつたが、近年、舞台を超伝導体に移した超伝導スピントロニクスが注目され始めている。本来、超伝導状態とスピン偏極状態は相反するものだが、メゾスコピック系における超伝導スピントロニクスでは、これらの競合により様々な興味深い現象が理論的に予想されており、また新しい機能性素子の提案もなされている<sup>[2]</sup>。しかし、そのような理論的研究に対して、実験的研究は现阶段でいくつかの結果が示されている程度であり、十分になされているとはいえない。

その一つの要因に、超伝導体としておもに AI が用いられてきたことが挙げられる。AI は試料中に酸化層の作製が容易である一方で、測定においては超伝導ギャップが小さく、磁場や温度といった外

的要因に対して超伝導状態が非常に敏感であった。また、先行研究はおもに超伝導体と強磁性体を積層させた縦型構造の試料に直接電流を流すものであったが、この場合にはスピン状態に依存した信号に加えて通常の電流による信号も観測される。一般に、スピン状態に依存した信号は電流による信号に比べて非常に小さいため、上記のようにそれらが重畳している場合には、スピン状態に依存した信号のみを検出することは困難である。

そこで本研究では、超伝導体と強磁性体を面内に配置し、それらを非磁性体で架橋するような構造を用いて、超伝導状態とスピン蓄積状態の関係を調べた。このような面内多端子構造では、スピン状態に依存した信号のみをより正確に取り出すことが可能になる。また、超伝導体としてAlよりも高い転移温度と大きい超伝導ギャップを有するNbを超伝導体として用いた。

## 【スピン流】

スピンに依存した伝導現象はスピン角運動量の流れであるスピン流という概念によって説明される。図1のような強磁性体細線と非磁性体細線の十字構造において、強磁性体細線から非磁性体細線へ電流を流したとき、強磁性体と非磁性体のフェルミ面における状態密度の違いからスピン蓄積状態が強磁性体/非磁性体界面に励起される。このスピン蓄積状態は非平衡状態であるため、非磁性体細線中を緩和しながら拡散していく。これがスピン流であり、減衰長はスピン拡散長とよばれる。このとき、図1中の非磁性体細線左側ではスピン流と電流が存在しているためスピン偏極電流と呼ばれる一方で、非磁性体細線右側ではスピン流のみが存在することとなり純スピン流とよばれる。

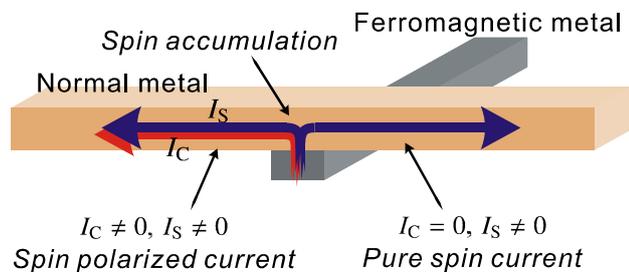


図1: 面内構造におけるスピン流。非磁性体中の右側では純スピン流が流れる。

## 【試料作製】

スピン流による現象を面内構造で測定するためには、試料の大きさをスピン拡散長と同程度のサブミクロンスケールにする必要がある。そのため、試料作製にはおもに電子線描画装置による電子線リソグラフィ技術とリフトオフ法など微細加工技術を用いた。また上述したように超伝導体としてNb、強磁性体と非磁性常伝導体にはそれぞれPy (Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>)とCuを用いた。

Nbは高融点材料であるため、通常の金属と異なり試料作製が容易ではない。そこで、本研究ではスパッタおよびArイオンミリングによる繰り返しリフトオフを組み合わせた手法と斜め蒸着法の2通りの試料作製方法を試みた。一般に、繰り返しリフトオフを組み合わせた方が複雑な構造の作製が容易である一方、斜め蒸着法では大気暴露せずに複数材料の蒸着を行うことが可能であるため、作製される界面の特性が良いとされる。実際にそれぞれの方法で作製した試料の特性を調べた結果、斜め蒸着法によって作製された試料の方が、界面特性が優れていることが確認できた。そこで、以下の準粒子緩和過程に関する実験では繰り返しリフトオフ法を用い、界面状態がとくに重要になるスピン流吸収過程に関する実験では斜め蒸着法によって試料を作製した。

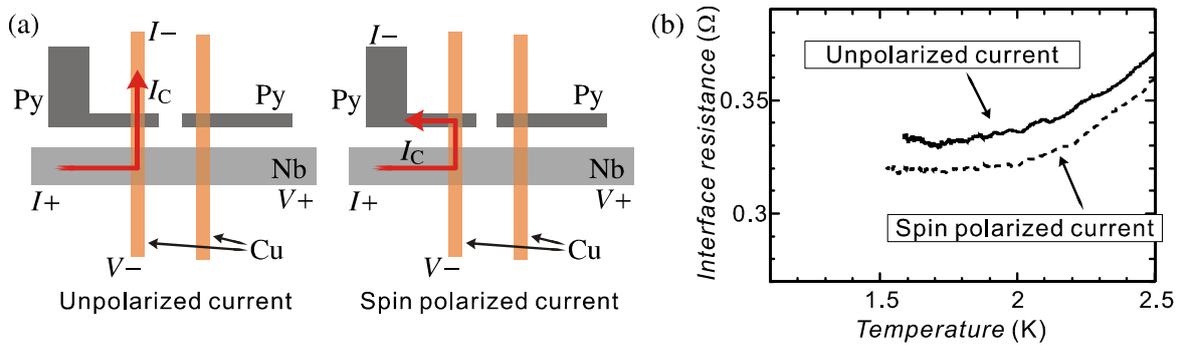


図 2: (a) スピン偏極していない電流とスピン偏極した電流による界面抵抗測定の模式図。(b) 界面抵抗の温度依存性の実験結果。

### 【超伝導状態における準粒子流の緩和過程】

超伝導状態中におけるスピン流の振る舞いを理解するために、スピン偏極準粒子の緩和過程に関する実験を行った。

図 2(a) に示すような端子配置により同一試料においてスピン偏極率の異なる電流を超伝導/常伝導体界面に流し、励起された準粒子による抵抗を測定した。その結果、図 2(b) に示すように準粒子のスピン偏極成分由来と考えられる抵抗差が測定された。抵抗の増加分から超伝導状態におけるスピン拡散長を計算したところ、常伝導状態のそれよりも長くなった。しかし、Nb/Cu 接合界面の超伝導状態、励起電流による影響、注入される純スピン流の量などが明らかではなかったため、定量的議論を十分に行うことは不可能であった。

### 【超伝導状態への純スピン流吸収過程】

上述の実験結果を踏まえ、斜め蒸着法によって界面特性を向上させた試料を用い、超伝導状態へのスピン流の注入過程について実験を行った。具体的には、超伝導ギャップによって純スピン流の吸収がどのように抑制されるかを調べた。

吸収過程の測定には非局所スピバルブ測定を用いた。非局所スピバルブ測定とは、図 3(a) に示すような面内構造において励起電流を流すことによって非磁性体中に純スピン流を励起し、その大きさをもう一方の強磁性体端子で非局所電圧として測定する方法である。非局所電圧は 2 本の強磁性体の磁化状態に依存し、非局所電圧を電流で除算した非局所抵抗の磁場依存性を測定すると図 3(b) に示すようになる。ここで、測定される抵抗差はスピン蓄積信号と呼ばれ、検出用強磁性体におけるスピン流の量と比例関係にある。このとき、2 本の強磁性体細線間にある Nb 細線への純スピン流の吸収があれば、検出されるスピン蓄積信号は減少する<sup>[3]</sup>。したがって、非局所スピン蓄積信号の変化を測定することで超伝導状態にある Nb 細線へのスピン流の吸収量を調べることが可能である。

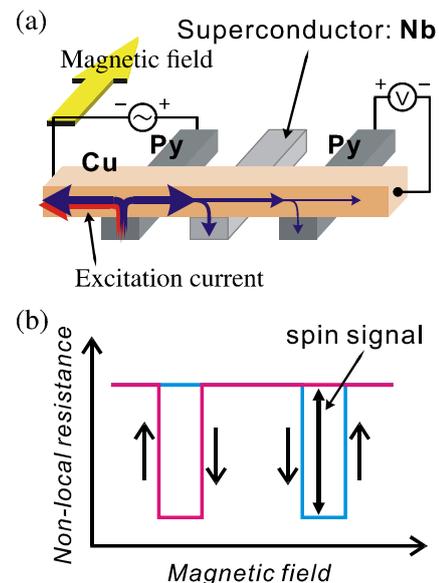


図 3: (a) 非局所スピバルブ測定と (b) 測定結果の模式図。

実際の測定の結果、図 4(a) に示すように、測定温度が超伝導転移温度より十分低いにも関わらず、スピン蓄積信号は常伝導状態における測定とほぼ等しく、一方でスピン流のための励起電流を減少させると、超伝導状態における測定でのみスピン蓄積信号が増大した。図 4(b) に、このスピン蓄積信号の励起電流依存性を詳細に測定したものを黒丸で示す。図中に示すように、励起電流を減少させていくとスピン蓄積信号は単調に増加した。これらの結果は、超伝導状態であってもスピン流が吸収されており、また励起電流を減少させたときにスピン流の吸収が抑制されることを示している。超伝導ギャップの方がスピン蓄積の大きさと比較して非常に大きいいため、一見すると上記の結果は直観と反するが、これらは非磁性体中におけるスピン蓄積状態にエネルギー分布を取り入れることにより説明できる。図 4(b) の実線は、励起電流による誘導磁場の影響、スピン蓄積による超伝導ギャップの抑制効果、励起電流によるジュール熱の影響を考慮して計算を行ったスピン蓄積信号の励起電流依存性である。図から明らかであるように計算結果は実験結果を非常によく説明しており、非局所純スピン流の吸収現象が超伝導状態によって抑制されること、またそれがエネルギー分布を考えたモデルによって説明可能であることが明らかとなった。

数値計算との一致は常伝導状態における様々な式が超伝導状態においても適用可能であることを示唆している。また、超伝導状態中に対して一部の純スピン流が吸収されることは、非局所にスピン偏極した準粒子を超伝導状態中に励起できることを示している。

【まとめ】

本研究では超伝導体として Nb を用いて、超伝導体におけるスピン蓄積状態について実験を行った。高品質 Nb 細線と Nb/Cu 界面の作製プロセスを確立し、超伝導状態に対してスピン蓄積状態がどのように振る舞うかを明らかにした。本研究の成果により、超伝導状態におけるスピン流の研究が促進されるとともに、これまで強磁性体が不可欠であった物理現象をスピン蓄積状態によって誘起できる可能性を示せた。

【参考文献】

[1] S. A. Wolf *et al.*, Science **294**, 1488 (2001); I. Žutić *et al.*, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004).  
 [2] T. Yamashita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 097001 (2005); F. Giazotto *et al.*, Phys. Rev. B **77**, 132501 (2008).  
 [3] M. Morota, *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 174405 (2011).

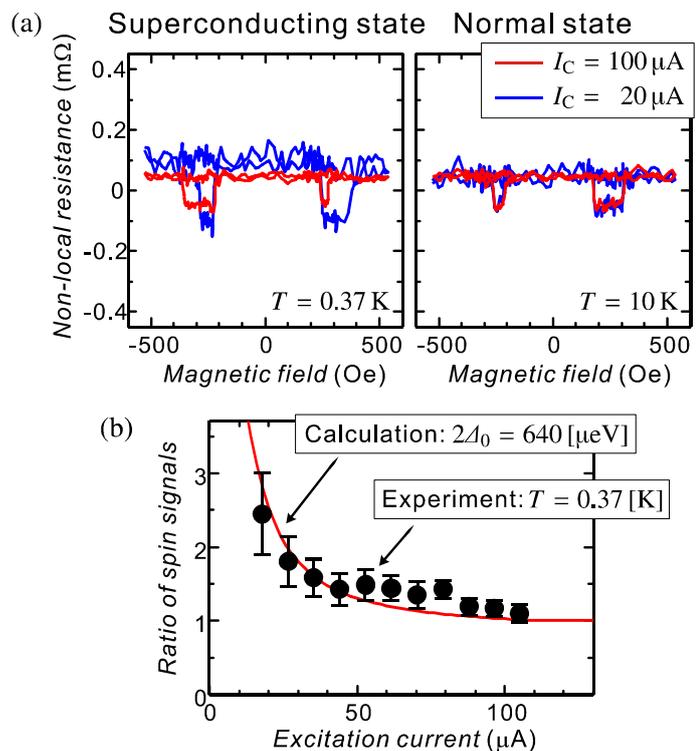


図 4: (a) 超伝導状態と常伝導状態におけるスピン非局所スピンバルブ測定の結果。(b) スピン蓄積信号の励起電流依存性。縦軸は常伝導状態におけるスピン蓄積信号で規格化した値である。黒丸が実験結果、実線が数値計算の結果を示している。