

しかしながら、上記のような常伝導状態の金属やグラフェンといった新物質に比べ、超伝導体中におけるスピン輸送現象に関する研究(特に実験的研究)に関してはその数が極めて少ない。一方、理論的な研究はいくつか行われており、例えば超伝導状態におけるスピン緩和時間の増大が予測され[1]、本研究室でその実験的実証に成功した[2]。また特にスピンホール効果については、超伝導状態でその大きさが非常に増大することが理論的に予測されているため[3]、応用面からも超伝導体中でのスピン輸送、スピンホール効果に関する研究は重要な課題と言える。

本稿では、これまで本研究室で得られた超伝導体中へのスピン注入に関する知見をもとに、今回我々が観測に成功した超伝導体中でのスピンホール効果に関する実験結果を超伝導体中でのスピン輸送の概念とともに解説する。

実験結果

本研究では、スピン軌道相互作用が強いニオブの合金である窒化ニオブ(NbN)を超伝導体として使用し、NbN に超伝導状態と常伝導状態の両方でスピン注入を行い、逆スピンホール効果によって生成される信号が超伝導状態と常伝導状態でどのように変化するのかについて考察した。図 2a に実験で用いた素子の概略図を示す。この素子は強磁性体(ニッケル-鉄合金、Py: Permalloy)/非磁性体(銅、Cu)/超伝導体(NbN)で構成され、強磁性体/非磁性体間に電流(スピン注入電流 I)を流すことにより、強磁性体/超伝導体部分を架橋する Cu 中に純スピン流が生成される。生成された純スピン流は非平衡状態にあり、急速に緩和することでエネルギー利得が高くなるため、スピン軌道相互作用が小さい Cu の下に NbN などスピン軌道相互作用が大きい物質を挿入すると、Cu 中を流れるスピン流の一部は NbN に吸収される。このような手法を用いることにより、スピン軌道相互作用が大きい物質に純スピン流を注入することが出来る(スピン吸収法)。注入されたスピン流は、NbN 中で逆スピンホール効果により電流に変換され、NbN 両端に電圧を生じる。注入されたスピン流の向きをベクトルで \mathbf{J}_s 、スピン偏極方向を \mathbf{s} 、逆スピンホール効果によって生じる電流を \mathbf{J}_c とすると、これらの間の関係は

$$\mathbf{J}_c \propto \mathbf{s} \times \mathbf{J}_s \quad (1)$$

で表される。NbN の強いスピン軌道相互作用により、スピン流は NbN に吸収された直後、面内方向に広がる前に緩和し電流に変換されてしまうため、 \mathbf{J}_s の向きは図 2a で NbN/Cu 界面に垂直方向になる。このため NbN の長軸方向の両端で電圧を観測するためには、(1)の関係から \mathbf{s} の向きを NbN の長軸方向に垂直に向ける必要がある。 \mathbf{s} はスピン流を発生させる強磁性体の磁化方向を反映するため、実際の測定では強磁性体の長軸方向に垂直方向に面内外部磁場 \mathbf{H} を印加し、 \mathbf{s} の方向に対する NbN 両端の電圧の依存性を測定することにより、逆スピンホール信号が得られる。

まず初めに、この素子の NbN の超伝導転移温度($T_c = 10$ K)よりも高い温度(20 K)における常伝導状態の NbN の逆スピンホール信号を図 2b 上に示す。NbN 細線両端に生じる電圧をスピン注入電流で規格化した逆スピンホール信号は、強磁性体の磁化状態を反映して外部磁場の負側と正側で逆符号を生じ、また強磁性体の磁化が飽和する磁場以上の磁場では \mathbf{s} の向きも一定となるため、一定の信号を生じる。強磁性体の磁化状態との対応は、図 2b 下の強磁性体の異方性磁気抵抗効果との対応からも分かる。

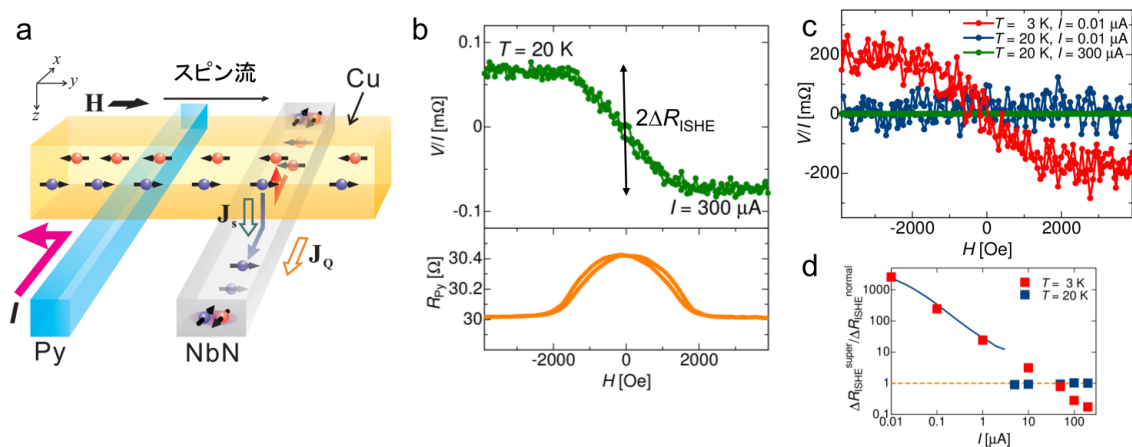


図 2: a, 超伝導 NbN における逆スピンホール効果観測のための素子構造。b, $T = 20$ K での逆スピンホール信号(上図)と Py の異方性磁気抵抗(下図)。c, $T = 3$ K での逆スピンホール信号(赤線)と比較のための $T = 20$ K での逆スピンホール信号(青線、緑線)。d, $T = 3$ K と $T = 20$ K での逆スピンホール信号のスピン注入電流(I)依存性。

うな信号を確認出来ない。一方、図 3c のように、NbN が常伝導状態にある場合には 2 つの素子から測定された信号はほぼ同様の値を示した。このことから、超伝導がこの巨大な逆スピホール信号の観測に寄与していることが確認された。

まとめ

紙面の都合により駆け足となってしまったが、本稿では超伝導 NbN における巨大なスピホール効果の観測について解説した。実験結果については、特に超伝導状態における逆スピホール信号の異常な電流依存性を既存の理論で全て説明することが出来ず、今後の理論研究が待たれる。また実験面では、NbN/Cu 界面の制御が本効果の測定において非常に重要であり、またこれにより超伝導近接効果を正しく評価することが出来ることから、安定した NbN/Cu 界面の作製は今後の素子作製での課題である。本稿で取り上げる事の出来なかった本研究成果の詳細については[4]を参照されたい。

謝辞

本研究は東京大学物性研究所大谷研究室と名古屋大学工学研究科藤巻研究室赤池宏之准教授、藤巻朗教授、東北大学金属材料研究所 Bauer 研究室の高橋三郎助教、日本原子力研究機構先端基礎研究センターの前川禎通センター長との共同研究として行われました。素子作製の面では特に赤池准教授に様々なアドバイスを頂き、またニオブやニオブ系合金の特性や加工に関する有益な情報を教えていただきました。本研究の元となる理論提言を行なわれた高橋助教、前川センター長には実験データに関する理論的解釈の点でお力添えを頂きこの場を借りて御礼申し上げます。また大谷研究室の新見康洋元助教(現大阪大学准教授)、大森康智君(大学院博士課程)には一部計算や実験結果に関する議論など研究の様々な面でご協力いただきました。感謝申し上げます。

[1] T. Yamashita, S. Takahashi, H. Imamura and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **65** 172509 (2002).

[2] T. Wakamura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 036602 (2014).

[3] S. Takahashi and S. Maekawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 010110 (2012).

[4] T. Wakamura *et al.*, *Nat. Mater.* **14**, 675 (2015).

