

## 超伝導体へのスピン注入に成功・スピン情報保持時間の増大を実証

### — 次世代量子情報素子の実現に貢献 —

#### 1. 発表者：

若村 太郎（東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程 2年）  
長谷川 徳信（東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程 2年）  
大西 紘平（当時：東京大学大学院新領域創成科学研究科）  
新見 康洋（東京大学物性研究所 助教）  
大谷 義近（東京大学物性研究所 教授）

#### 2. 発表のポイント：

- ・超伝導体（注1）へのスピン注入に成功し、スピン情報保持時間が超伝導体に転移すると飛躍的に長くなることを実証
- ・電子のスピン情報保持時間を算出する信頼性の高い新しい手法を開発
- ・スピン論理回路や量子情報素子の実現に期待

#### 3. 発表概要：

超伝導は、物質の温度を下げていくと電気抵抗がゼロになる現象（この現象が観察される温度を転移温度という）で、超伝導体（注1）を用いれば発熱によるエネルギーの損失なく大電流を流せることから、今後の省エネルギー社会で大きな役割を果たすと期待されています。一方で近年、電子の電荷を用いるエレクトロニクスに代わり、電子のスピンを用いるエレクトロニクスとして「スピントロニクス」という分野が注目を集めています。スピントロニクスは、発熱の原因となる電流を流さずに、スピンを用いた情報の制御・伝達が可能なため、従来のエレクトロニクスより省電力でより高い性能を発揮する素子を作製できる可能性を秘めています。学術的にも応用上も重要な超伝導とスピントロニクスを結ぶ研究は、残念ながらこれまであまり多く行われてきませんでした。電子のスピンは磁性に関係しており、超伝導と磁性は通常の状況では共存できないことも1つの要因となっていました。

今回東京大学物性研究所の大谷義近教授のグループは、微小な磁化と超伝導転移温度が比較的高いニオブを用いてスピン輸送現象（注2）を測定し、超伝導ニオブにスピンを注入することに成功しました。詳細な実験データの解析から、ニオブが超伝導体に転移すると通常の電気伝導状態に比べて、スピンの情報を保持できる時間が通常の伝導状態の4倍以上に増大することが分かりました。この成果は、今後のスピン論理回路や量子演算素子の発展に寄与することが期待されます。

この研究成果は、Physical Review Letters 誌（1月24日付け：日本時間1月25日）

に掲載され、Editors' Suggestion（編集者が特に読者に推薦する論文）に選ばれました。

#### 4. 発表内容：

##### ① 研究の背景と経緯

近年発展が著しいスピントロニクスでは、電子のスピン情報をいかに長い時間保持し、遠くまで伝達させるかが重要となってきます。物質中では、電子のスピンに対してスピン軌道相互作用（注3）や磁性をもつ不純物などスピンの情報を擾乱させる要因が存在するため、スピンの情報はある一定時間（スピン情報保持時間）が経過すると乱されてしまい元の情報は消えてしまいます。このスピンを擾乱させる要因は物質によって異なるため、より長いスピン情報保持時間や伝達距離を持つ物質の探索や、これらの物質にスピンを外部から注入する手法に関する研究が精力的に行われてきました。

今回大谷教授らのグループでは、これまであまり注目されてこなかった超伝導体でのスピン輸送に着目しました。超伝導状態では、電子の有効的な速度は通常よりも遅くなるため外部からの擾乱の影響を受けにくくなり、スピン情報保持時間が長くなることが理論的に予言されていました。しかし、これまで行われた実験では電子の電荷に起因する効果など正確な測定を阻害する要因が多く、統一的な見解が得られていませんでした。

##### ② 研究内容

本研究では電荷を伴わないスピンのみの流れ、「純スピン流」（注4）を超伝導体に注入することに成功し、また得られた信号から電荷に起因する効果を伴わずにスピン情報保持時間を求める新しい手法を開発しました。上記の手法で実験結果を解析することで、超伝導体中では転移温度以下でスピン情報保持時間が変化し、転移温度以上の値に比べて4倍以上長くなることを実証しました。

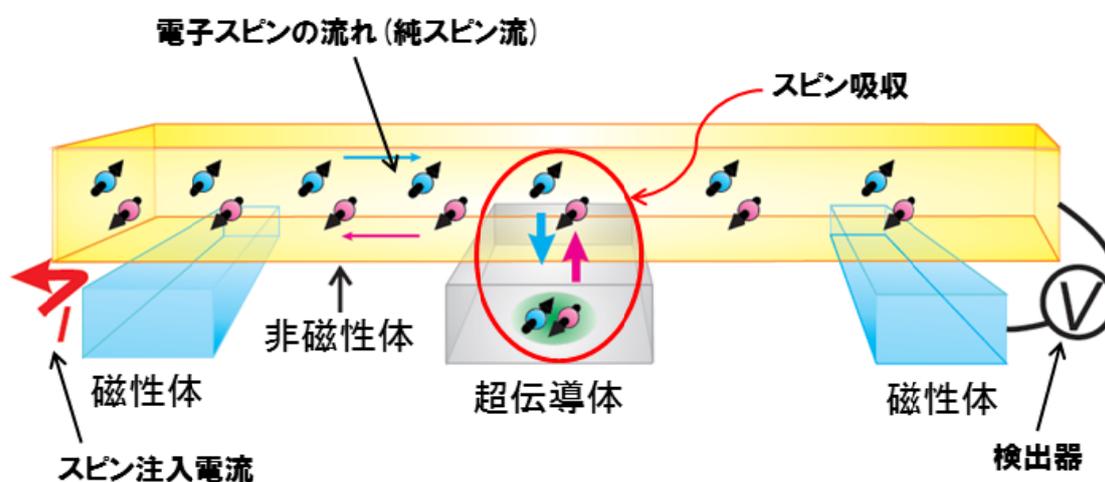
実際の実験では、超伝導体として金属の中で超伝導転移温度の高いニオブを用いて、微細加工した磁性体、非磁性体（銅）、超伝導体細線を組み合わせた「面内スピンバルブ素子」を作製しました（図1）。この素子を用いると、これまでの実験でスピン情報保持時間を正確に決定することを阻害してきた効果を排除することが可能です。素子の磁性体/非磁性体間に電流（スピン注入電流）を流すことにより、銅の細線中には純スピン流が発生します。発生した純スピン流は、銅/ニオブ界面を通じ銅側からよりスピン緩和が強いニオブ側へ吸収されます。超伝導状態ではニオブ側にあるエネルギーギャップが障壁となり、電圧などをかけない限り通常スピンが超伝導体側に入ることはありません。本研究で用いた素子では、超伝導体ニオブ直上に非磁性体の銅を張り付けることにより界面近傍でニオブの超伝導性が弱まり、エネルギーギャップが小さくなります。これによって純スピン流を非磁性体（銅）から超伝導体（ニオブ）に吸収させることが可能になりました（図2）。

スピン吸収は通常、スピン注入電流に依存しませんが、吸収させる物質に超伝導体を用

いると、超伝導状態でのみスピン吸収がスピン注入電流に依存するという奇妙な振る舞いが見られました。これは、スピン注入電流が大きい場合には電子の感じる有効的な温度が上昇してしまうためにスピン吸収は通常の伝導体のときと変わりませんが、スピン注入電流を十分小さくすると、電子の感じる有効的な温度が小さくなり超伝導体のエネルギーギャップがスピン吸収に極めて重要な役割を果たすためです。これまでの実験では、上記のエネルギーギャップの変化を含めた非磁性体/超伝導体間のスピンの輸送に関しては解析が難しいためあまり取り扱われることはありませんでしたが、この効果を考慮することで正確なスピン情報保持時間を求めることが可能となりました。解析の結果、スピン情報保持時間は超伝導体中では通常の伝導状態の4倍以上大きくなることが実証され（図3）、これまで理論的に予言されていたものと一致しました。

### ③今後の展開

本研究で示した手法を用いることで、これまであまり研究の進んでいなかった超伝導とスピントロニクスを組み合わせた研究をより一層進展させることが可能となります。また超伝導とスピントロニクスの両方の長所を生かすことで、電力消費の少ない次世代の量子演算素子の実現やスピン論理回路への応用が期待されます。



**図 1:** 面内スピバルブ素子の構造。磁性体細線を非磁性体細線（銅）で架橋し、非磁性体細線の下に超伝導体（ニオブ）を配置している。磁性体-非磁性体間にスピン注入電流 ( $I$ ) を流すことで非磁性体中に純スピン流が発生し、もう一つの磁性体と非磁性体間の電圧を測ることでスピンに由来する信号のみが得られる。非磁性体下にニオブがある場合、純スピン流はニオブに部分的に吸収されるため、検出器で観測される信号はニオブがない場合に比べて減少する。

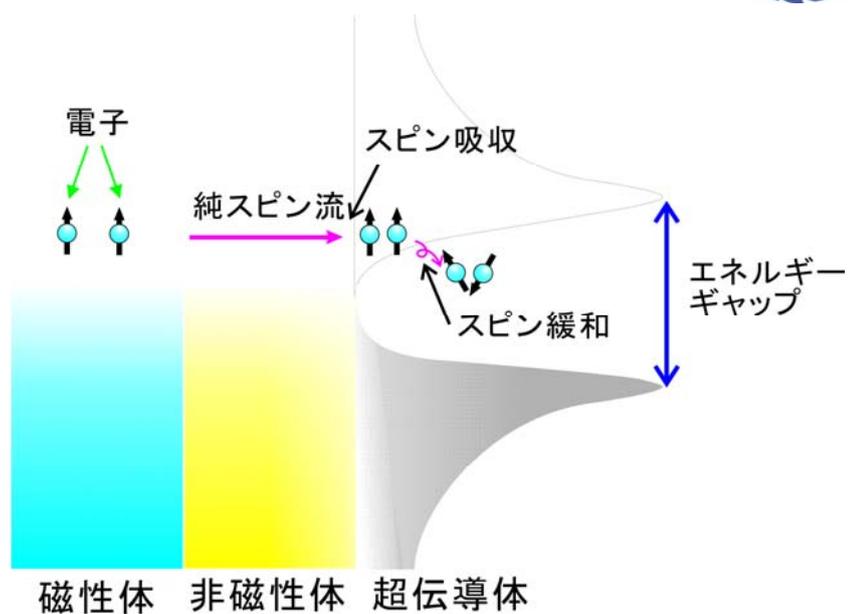


図 2: 超伝導体へのスピンの吸収の概念図。超伝導体中存在するエネルギーギャップは電子が超伝導体へ入る際障壁となるが、これを小さくすることでスピンの吸収が可能となる。

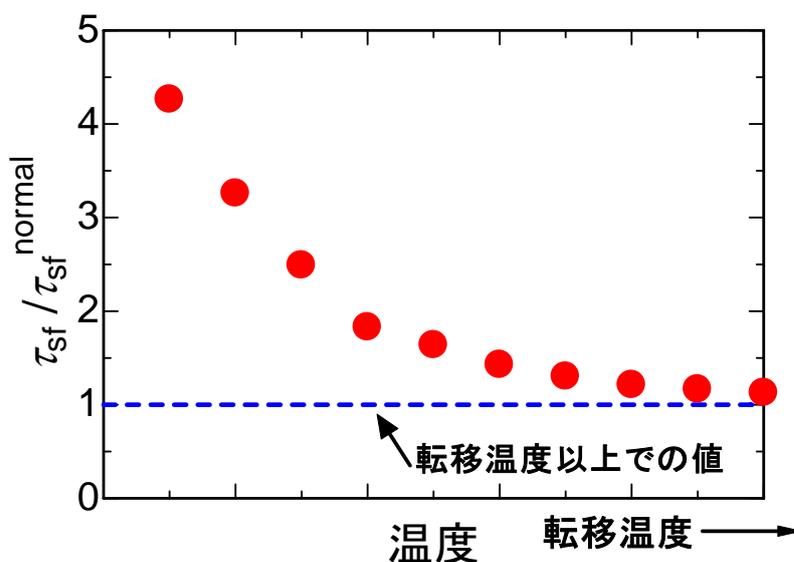


図 3: スピン情報保持時間( $\tau_{sf}$ )と温度の関係。縦軸は超伝導転移温度以上での値( $\tau_{sf}^{normal}$ )で割ったもの。この図では横軸の温度は超伝導転移温度以下の温度を表している。転移温度以下では温度が下がるにつれスピンの情報保持時間が劇的に増大する。

5. 発表雑誌 :

雑誌名 : 「Physical Review Letters (Editors' Suggestion)」 (1月24日)

論文タイトル : Spin Injection into a Superconductor with  
Strong Spin-Orbit Coupling

著者 : Taro Wakamura, Norinobu Hasegawa, Kohei Ohnishi, Yasuhiro Niimi and  
YoshiChika Otani

DOI 番号 : 10.1103/PhysRevLett.112.036602

アブストラクト URL : <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v112/i3/e036602>

6. 問い合わせ先 :

東京大学大学院新領域創成科学研究科

博士課程2年 若村 太郎

Tel: 04-7136-3507

Fax: 04-7136-3506

e-mail: [t-waka@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:t-waka@issp.u-tokyo.ac.jp)

東京大学物性研究所

助教 新見 康洋

Tel: 04-7136-3507

Fax: 04-7136-3506

e-mail: [niimi@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:niimi@issp.u-tokyo.ac.jp)

東京大学物性研究所

教授 大谷 義近

Tel: 04-7136-3488

Fax: 04-7136-3475

e-mail: [yotani@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:yotani@issp.u-tokyo.ac.jp)

7. 用語解説 :

(注1) 超伝導体

通常物質に電流を流すと電気抵抗が生じるが、超伝導体ではある温度よりも低い温度では電気抵抗が完全に消失する。通常電気伝導に寄与する電子は、超伝導体中ではクーパ一対と呼ばれる対を組み、このクーパ一対が電子に代わって電気伝導に寄与する。このため、超伝導体には電気伝導に寄与するエネルギーを持つ電子が存在しないエネルギー領域(エネルギーギャップ)が存在する。



(注 2) スピン輸送現象

物質中での電子のスピンの伝搬や緩和といったスピンの輸送に関わる現象。

(注 3) スピン軌道相互作用

物質中で、電子の運動と電子のスピンの運動を結びつける相互作用で、スピンの情報を緩和させる原因になる一方、電流から純スピン流を生成する素（もと）となる。

(注 4) 純スピン流

電荷の流れを伴わない電子のスピンの流れ。ある方向に運動する電子のスピンの向きと、それと運動の向きもスピンの向きも逆転した電子のスピンの向きが存在することで、実効的な電荷の流れはゼロとなり、スピンの流れのみが現れる。