

スピン伝搬距離の新しい決定方法を確立

—次世代量子情報やスピントロニクス素子の実現に貢献—

1. 発表者：

新見 康洋（東京大学物性研究所 助教）
魏 大海（東京大学物性研究所 博士研究員）
井土 宏（東京大学物性研究所 博士課程2年）
若村 太郎（東京大学物性研究所 博士課程1年）
加藤 岳生（東京大学物性研究所 准教授）
大谷 義近（東京大学物性研究所 教授）

2. 発表のポイント：

- ▶ スピンの情報が乱されることなく伝搬する距離（スピン伝搬距離）を決定する新たな手法を開拓
- ▶ 新しい手法を用いれば、これまで困難だった正確なスピン伝搬距離の決定が簡便にできる
- ▶ 今後の量子情報やスピントロニクス素子の実現に大きく貢献することが期待される

3. 発表概要：

電子は電荷とスピンという2つの属性を持ちます。近年盛んに研究が行われている量子情報やスピントロニクスと呼ばれる分野では、電子がどれだけ遠くまでスピンの情報を運べるか、すなわち『スピン伝搬距離』が、将来のデバイスへの応用という観点からも極めて重要な量になります。しかしこれまでの研究では、測定手法の違いや、スピン伝搬距離を決定する際の変数の数が多すぎることなどが問題で、スピン伝搬距離を正確に決定するという基本的なことがなされておらず、その値をめぐって激しい論争が続いていました。

東京大学物性研究所の大谷義近教授、加藤岳生准教授、新見康洋助教らは、強磁性体を使用する従来の方法とは異なり、調べたい物質の抵抗を精密に測定するという単純な手法でスピンの伝搬距離を決定することに成功しました。伝導を担う金属中の電子は、低温の極限で僅かに局在することが知られています。この僅かな局在効果は、電子のもつスピンと軌道との相互作用の大きさに依存します。本研究では、その依存性に着目し、スピンの伝搬距離を様々な物質で測定しました。この手法を用いれば、必要な変数が少なく正確に値を決定できます。また、先行の理論研究で、局在効果下で得られるスピンの伝搬距離は、強磁性体を用いて得られるスピン伝搬距離と微妙に異なり、両者にはある関係式が成り立つことが示唆されていました。今回の研究でその関係式が初めて実験的に明らかになり、従来の強磁性体を用いて得られていたスピン伝搬距離の値を説明できるようになりました。この結果は、スピン伝搬距離の決定方法に新たな指針を与えるとともに、スピン伝搬距離についての根本的な理解を深める重要な成果で

す。さらに今後の量子情報やスピントロニクス分野において、大きな役割を果たすと考えられます。

この研究成果は、Physical Review Letters 誌（1月3日付け：日本時間1月4日）に掲載されました。

4. 発表内容：

①研究の背景と経緯

近年盛んに研究が行われている量子情報やスピントロニクスと呼ばれる分野では、電子がどれくらい遠くまでスピンの情報を伝搬できるか、つまり『スピン伝搬距離』が、将来のデバイス応用の観点からも非常に重要な指標となっています。スピントロニクス分野では、このスピン伝搬距離は通常強磁性体を用いて決定されます。例えば図1に示すように、2つの強磁性体を、スピン伝搬距離を調べたい物質で架橋し、その距離を変えることで、伝搬距離を求めることができます。しかしながらこの手法の場合、強磁性体の特性や強磁性体と調べたい物質との界面の特性にも依存するため、一度に決定すべき変数が増えてしまい、結果としてスピン伝搬距離を正確に決定することが難しくなります。また、図2のような強磁性体と調べたい物質との2層構造で強磁性共鳴（注1）曲線を測定し、それを詳細に解析することでもスピン伝搬距離が得られています。しかしこの場合、前者に比べて得られる値が1桁程度小さく、現在に至るまでどちらの手法で得られたスピン伝搬距離が正しいかをめぐって激しい論争が繰り返されています。特にスピン伝搬距離は、スピントロニクス分野で重要な物理現象の1つである『スピンホール効果（注2）』の大きさを決定するのに不可欠なため、この距離を正しく求めることは、基礎学問の立場からも応用上の立場からも非常に重要になってきます。

②研究の内容

本研究では、これまでの強磁性体を使用する上記の手法とは全く異なり、調べたい物質の細線の磁気抵抗を精密に測定するという比較的単純な手法で、スピン伝搬距離を決定しました。金属中の電子は、低温の極限になると不純物や格子欠陥の影響で、僅かに局在し、定在波を形成することが知られています（図3(a)-(c)参照）。この現象は弱局在効果として知られており、実際に金属の抵抗が低温で僅かに大きくなります。電子のスピン角運動量と軌道角運動量の相互作用が無視できるほど小さい物質であれば、通常この定在波は磁場を印加することによって、左回りと右回りの波が互いに異なる位相を獲得するために干渉が解け（図3(d)、図4左図のように抵抗が磁場とともに小さくなります。一方で、スピンと軌道の相互作用が強い物質の場合には、上記の局在効果を妨げ、図4右図のように、逆に抵抗が低温で僅かに小さくなります。この現象を『弱反局在効果』と呼びます。スピンにとっては、軌道角運動量との相互作用がデコヒーレンス（注3）の要因となります。今回の研究ではこの弱反局在効果を用いてスピンの伝搬距離を求めました。強磁性体を用いて得られる通常のスピン伝搬距離（図5左図）と、弱反局在効果で得られる距離（図5右図）が本当に同じものなのか、どのような関係で結びついているのかということはこれまで知られておらず、実験的に確かめた例はありませんでした。

今回研究グループは、スピンと軌道の相互作用が異なる銀、銅、白金の3種類の物質を用いて、2つの方法でスピン伝搬距離を調べました。その結果、図1の強磁性体を用いて得られるスピン伝搬距離と、弱反局在効果を用いて得られるスピンの伝搬距離は、約0.9（ $=\sqrt{3}/2$ ）倍

だけ異なること、この関係式を用いれば2つの手法で得られた値が定量的に一致することを確かめました。さらに、スピンと軌道の相互作用が比較的小さい銅を用いれば、その厚みを変えることによって、電気伝導率の大きさを変えることができます。銅のスピン伝搬距離の伝導率依存性を測定したところ、線形に変化することを初めて実験的に証明しました（図6参照）。

③今後の展開

本研究で使用した手法を用いれば、どんな物質のスピン伝搬距離も正確に求めることが、比較的簡単にできます。量子情報やスピントロニクス分野では、スピンのデコヒーレンスの問題は非常に重要であるため、どのような物質・形状を用いれば、デコヒーレンスをより抑えられるかの指針を与えることができるのではないかと考えています。

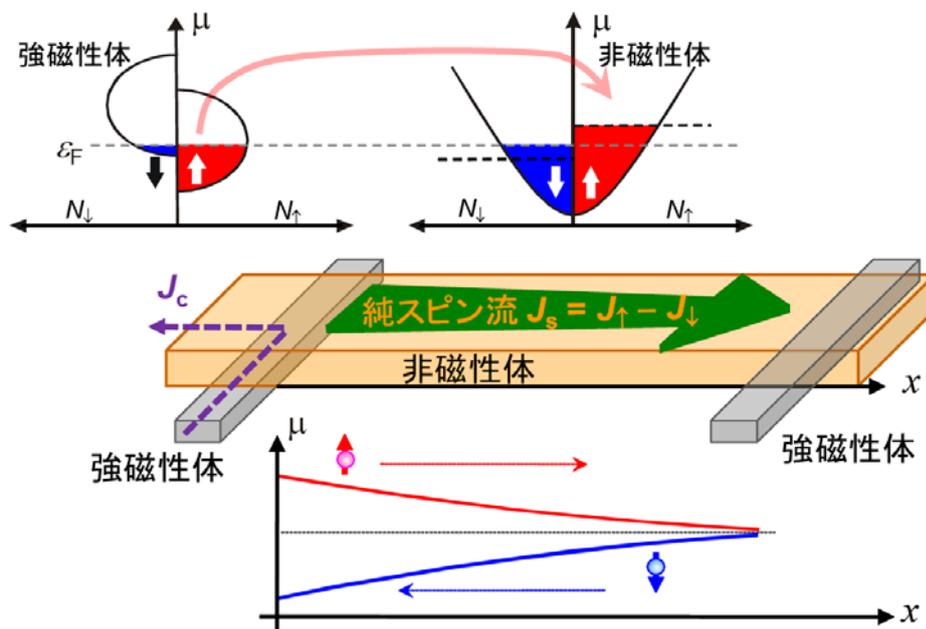


図1：図のように強磁性体から非磁性体（銀、銅、白金など）の左側に電流 J_c を流すと、強磁性体と非磁性体の電気化学ポテンシャル (μ) の違いから、非磁性体の右側には電流が流れていないにもかかわらず、スピン角運動量のみの流れが生じる。この流れを『純スピン流』と呼ぶ。純スピン流は非磁性体の中で、スピン伝搬距離の範囲で緩和し、減衰していく。従来の方法では、スピン伝搬距離の範囲内で右側の強磁性体の位置を変えることで、スピン伝搬距離を決定することができる。

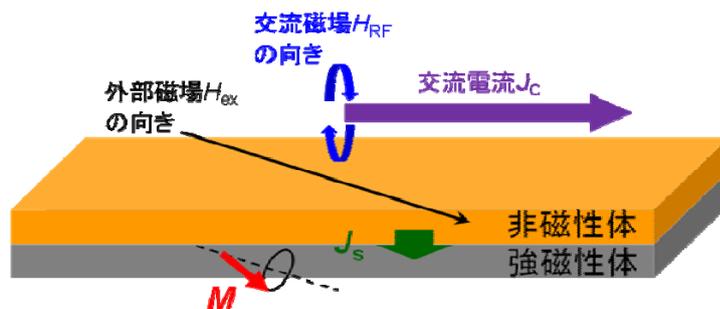


図2：強磁性体/非磁性体2層構造で非磁性体のスピン伝搬距離を測定する時の模式図。

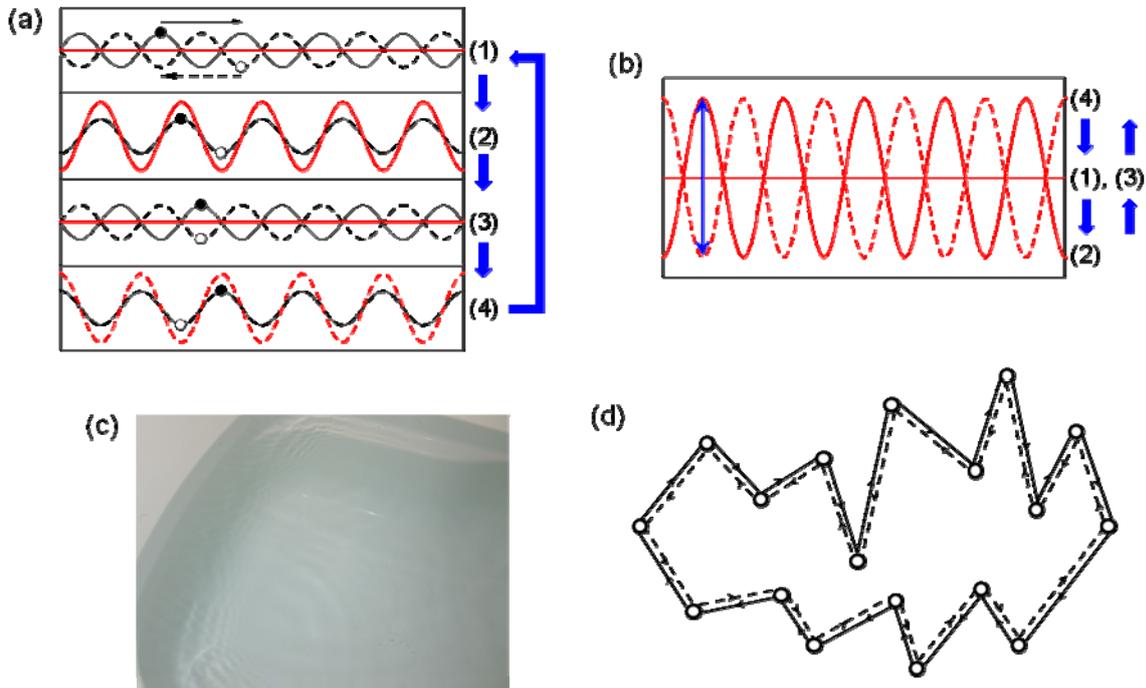


図 3 : (a)-(c) 定在波のイメージ図。(a) 左から右に進む波（実線）と逆方向に進む波（点線）は互いに干渉し合い、時間の経過とともに(1) → (2) → (3) → (4) → (1)のようになる。赤線が二つの波を足し合わせたもの。実際には、図(b)のように一部だけが振動しているように見える。これを定在波と呼ぶ。定在波の例として身近なところでは図(c)のような水面に立つさざ波がある。(d) 金属中の電子は、低温の極限になると不純物（○印）に当たって、散乱される。電子には波の性質もあるため、不純物での散乱が弾性的であれば、図の実線のようなループを作ることができる。一方、電子の中にはそれとは全く逆の経路で進むものもある（点線）。そのような 2 つの状態が定在波を形成して干渉し合い、この範囲の中で電子は僅かに局在する。これを弱局在効果と呼ぶ。この効果によって、金属中の抵抗は僅かに低温で上昇する。しかし、図のような定在波を形成する確率は非常に小さく、通常の抵抗の 1000 分の 1 くらいの大きさの抵抗変化しかない。そのため精密に抵抗を測定する必要がある。

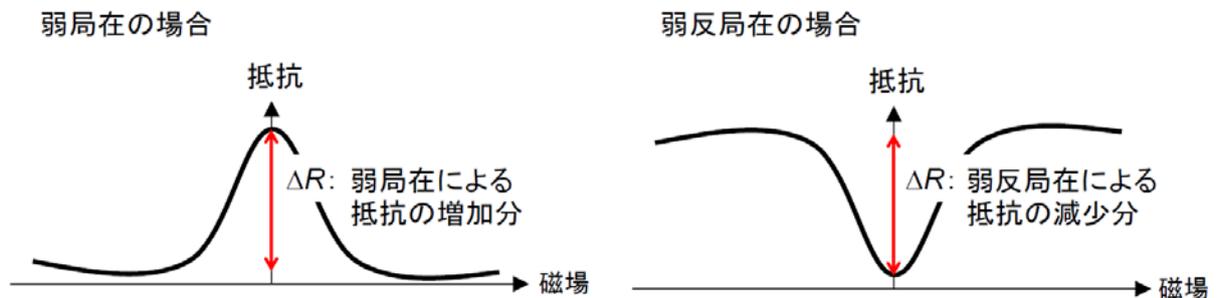


図 4 : スピンと軌道の相互作用が無視できるほど小さい場合には、図 2 で説明したように低温で抵抗が僅かに上昇する。磁場を印加することによって、図 2 のような干渉パターンは崩れてしまい、左図のような抵抗変化を示す。一方、スピンと軌道の相互作用が無視できない場合には、抵抗は低温の極限で僅かに減少する。これを弱反局在効果と呼ぶ。弱局在効果と同様に磁場を印加すれば、干渉パターンが崩れて、右図のような抵抗変化を示す。

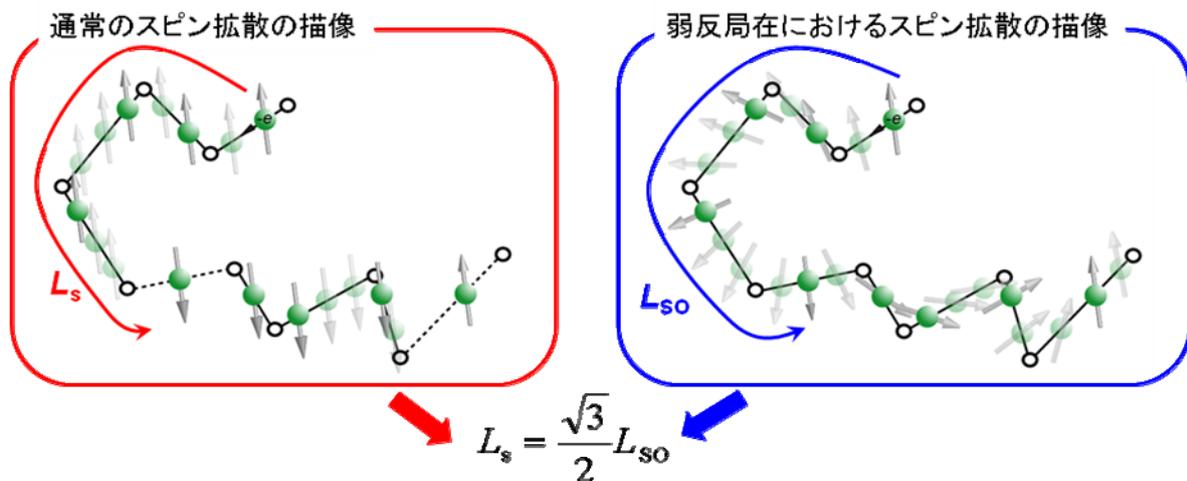


図 5：強磁性体を用いて得られるスピン伝搬距離 (L_s) と弱反局在におけるスピンの伝搬距離 (L_{so}) はほぼ同じであるが、約 0.9 ($=\sqrt{3}/2$) 倍ほど異なることを初めて実験的に確かめた。

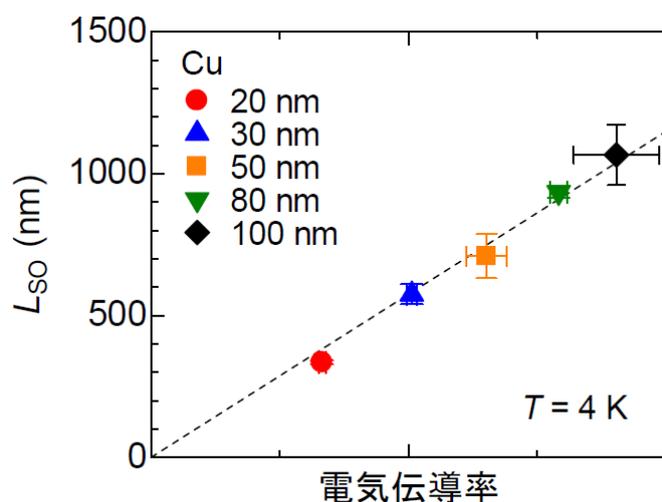


図 6：銅で測定されたスピン伝搬距離の電気伝導率依存性。銅の膜厚を変えることで、伝導率を変えることができ、スピン伝搬距離が伝導率に線形に変化することを初めて実験的に明らかにした。測定は、格子振動の影響が無視できる温度 (4 K) で行われた。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」 (1月3日)

論文タイトル：Experimental Verification of Comparability between Spin-Orbit and Spin-Diffusion Lengths

著者：Yasuhiro Niimi, Dahai Wei, Hiroshi Idzuchi, Taro Wakamura, Takeo Kato, and YoshiChika Otani

DOI 番号：DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.016805

アブストラクト URL：http://prl.aps.org/abstract/PRL/v110/i1/e016805

6. 問い合わせ先 :

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

東京大学物性研究所

准教授 加藤 岳生

Tel: 04-7136-3255

Fax: 04-7136-3259

e-mail: kato@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

7. 用語解説 :

(注1) 強磁性共鳴

強磁性共鳴とは、強磁性体に外部直流磁場を印加して一様に磁化させた状態で、直流磁場と垂直な面内に交流磁場を印加したとき、強磁性体の固有振動数（共鳴周波数）が交流磁場の振動数と一致したときのみ強磁性体中のスピが一斉に同じ位相で歳差運動をする現象。強磁性体共鳴を用いる手法では、強磁性共鳴曲線を異なる膜厚で調べることによって、スピン伝搬距離を算出する。

(注2) スピンホール効果

スピンホール効果とは、スピン軌道相互作用の強い物質（例えば白金）に電流を流すと、スピンアップとスピンドアウンの電子が別々の端に散乱され、蓄積する現象。このとき電流とスピンの量子化軸に直交する方向に、スピン流（スピンアップとスピンドアウン電流の差）が生じる。ただし非磁性体中では、スピンアップとスピンドアウン電子は同数個存在するので、この差を電気信号として検出することはできない。逆に何らかの方法でスピン流を生じることができれば、その逆過程によって、スピンの流れを電圧に変換できる。この現象のことを逆スピンホール効果と言う。

(注3) デコヒーレンス

ある均一に揃った状態が、系の擾乱によって、バラバラになってしまうこと。

8. 添付資料 :

詳しくは東京大学物性研究所大谷研究室のホームページをご覧ください。

(<http://www.riken.jp/lab-www/nanomag/indexjpn.html>)