



スピン流を用いた高感度磁気センサーの原理を解明

—超伝導量子干渉計の感度をはるかに越えるセンサーの提案—

1. 発表者：

魏 大海（東京大学物性研究所 博士研究員）

新見 康洋（東京大学物性研究所 助教）

顧 波（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 研究員）

Timothy Ziman（CNRS-Laue Langevin 研究所 教授）

前川 禎通（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター センター長）

大谷 義近（東京大学物性研究所 教授）

2. 発表のポイント：

- スピン流には、磁気転移温度で異常が現れることを発見
- 超伝導量子干渉計（SQUID）では観測できない磁気測定が可能に
- スピン流を用いた超高感度磁気センサー実現への第一歩

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。通常のエレクトロニクス素子では電荷のみの性質を利用しますが、近年注目を集めているスピントロニクス素子ではスピンに依存した電子の伝導が重要な役割を果たします。その中でも、電荷の動きを伴わないスピンのみの流れを『純スピン流』と呼び、低消費電力素子へ応用が期待されています。

この純スピン流の代表的な応用例が、ごく最近話題になっているスピンゼーベック効果です。この効果を用いることで、熱の流れを、純スピン流を介して電圧信号に変換することが可能となります。しかし、純スピン流を用いたその他の応用例はこれまで報告されていませんでした。

東京大学物性研究所の大谷義近教授、日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの前川禎通センター長らは、この純スピン流を利用して、常磁性体から強磁性体に転移する温度付近で電圧信号に異常が現れることを発見しました。この異常はごく微量の強磁性体でも非常に敏感に現れ、今日、高感度磁気センサーとして利用されている超伝導量子干渉計（SQUID）をはるかに凌駕する感度を持ち、さらには SQUID では得られない情報を引き出すことができるため、超高感度磁気センサーとしての応用が期待されます。

この研究成果は、Nature Communications（9月11日付け：日本時間9月12日）に掲載されます。

4. 発表内容：

①研究の背景と経緯

電子は電荷とスピンという 2 つの属性を持ちます。前者は電気素子として、後者は磁気の起源となるため磁気素子としてそれぞれ個別の分野で古くから研究・利用されてきました。近年の微細加工技術の発展に伴って、これら 2 つの性質を積極的に組み合わせることにより、従来のエレクトロニクス素子を凌駕するデバイスの実現が可能となってきました。このような分野はスピントロニクスと呼ばれ、この分野での代表的な成功例が、ハードディスクドライブの磁気ヘッドや磁気ランダムアクセスメモリであり、これらの起源となる巨大磁気抵抗効果の発見に対して 2007 年にはノーベル物理学賞が与えられています。次世代スピントロニクス素子の実現において、極めて重要な物理量がスピン流と呼ばれる量です。電流は電荷の流れであり、これまでの電気素子では電流が全ての情報を運びますが、スピントロニクスではスピン流と呼ばれるスピンの流れが情報を運びます。その中でも電荷の流れを伴わないスピンのみの流れを『純スピン流』と呼びます（図 1 参照）。この純スピン流は電荷の流れを伴わないために、低消費電力デバイスとして近年非常に注目を集めており、この純スピン流を利用した応用例として、熱の流れを電圧信号に変換するスピンゼーベック効果（注 1）が挙げられます。しかしながら、この他の応用例はこれまで報告されていませんでした。

②研究の内容

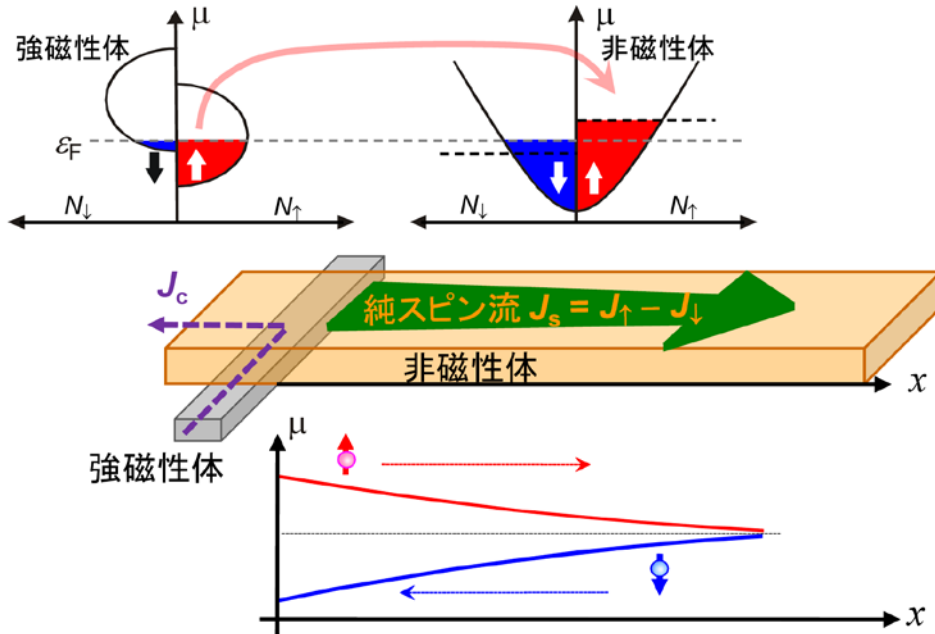
本研究では、純スピン流を電圧信号に変換できる逆スピンホール効果（注 2）という現象を用いて、弱い強磁性体として知られるニッケルとパラジウムの合金が常磁性体から強磁性体へと転移するキュリー温度（注 3）付近でのみ、電圧信号に異常が現れることを発見しました（図 2 参照）。この異常は、キュリー温度付近で強磁性体のスピンの揺らぎに起因するもので、この揺らぎを、伝導を担う電子のスピンを介して、電圧信号として検出しました（図 3 参照）。このようなスピンの揺らぎは一般に、超伝導量子干渉計（SQUID；注 4）を用いて観測されます。SQUID を用いると、磁場を印加した時に、それに比例して応答する線形帯磁率（0 次の帯磁率）が測定されますが、本研究で検出される物理量は、2 次の帯磁率（注 5）という高次の帯磁率に対応します。通常このような高次の帯磁率は信号自体が非常に小さく、また低次の帯磁率の寄与が大きいため、高次の項だけを測定するのは至難の技で、従来の測定手段では正確に 2 次の帯磁率まで測定した例はありませんでした。本研究で用いた純スピン流を用いると、線形帯磁率や 1 次の帯磁率の項は電圧信号には寄与せず、2 次だけの帯磁率を測定することが可能です。実は、このような議論は今から 50 年前に「近藤効果」（注 6）でよく知られる近藤淳東邦大学名誉教授によって示唆されていました。当時は純スピン流という概念が存在しなかったために、強磁性体に電流を流した時に異常ホール効果として現れる 1 次の帯磁率だけが議論されていました。しかしながら、近年の純スピン流という新しい概念によって、もう 1 つ次数の高い 2 次の帯磁率まで正確に測定できるということが分かりました。

③今後の展開

本研究で得られた原理を用いて高次帯磁率を測定することにより、線形帯磁率だけでは分かり得ない物理的な情報を引き出せるという魅力があります。例えば、線形帯磁率だけでは理解しにくかったスピングラスやスピンアイス（注 7）など複雑なスピンの構造を持つ物質で、スピンのように揺らぎ、物性に影響を及ぼしているかを調べるのが可能になります。さらに今回検出に用いた磁気モーメントの大きさ（ 10^{-14} emu）は、通常 SQUID などで検出できる

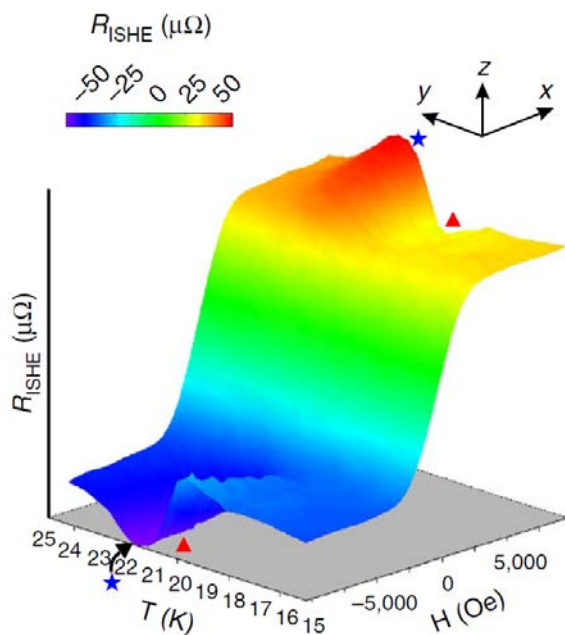
磁気モーメントの大きさ (10^{-8} emu) よりもはるかに小さいため、この原理を用いた超高感度磁気センサーとしての応用も期待されます。

図 1



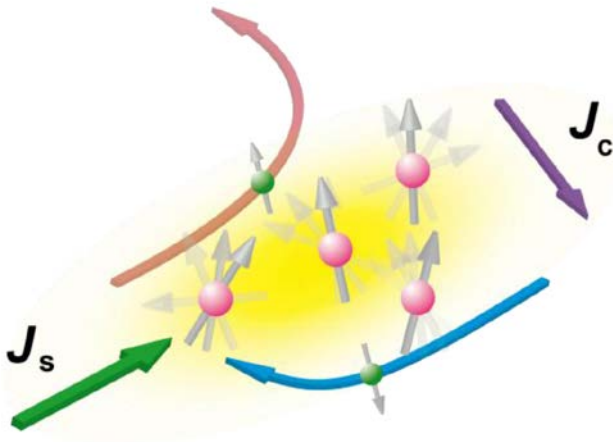
図のように強磁性体から非磁性体の左側に電流 J_c を流すと、強磁性体と非磁性体の電気化学ポテンシャル (μ) の違いから、非磁性体の右側には電流が流れていないにもかかわらず、純スピンのみが誘起される。

図 2



$\text{Ni}_{0.08}\text{Pd}_{0.92}$ 合金で測定された逆スピンホール効果。強磁性体から常磁性体に転移する温度 $T=21$ K 付近 (図中★と▲) で逆スピンホール効果に異常が現れているのが明らかに分かる。

図 3



強磁性体スピン（ピンク球と長い矢印）がキュリー温度付近で揺らいでいるところに、純スピン流 J_s つまり J_r (赤矢印) - J_t (青矢印) を注入すると、それによって生じる信号 (J_c) に異常が生じる。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」 (9月11日)

論文タイトル：The spin Hall effect as a probe of nonlinear spin fluctuations

著者：D. H. Wei, Y. Niimi, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, and Y. Otani

DOI 番号：DOI: 10.1038/ncomms2063

アブストラクト URL：<http://www.nature.com/ncomms/journal/v3/n9/full/ncomms2063.html>

6. 注意事項：

日本時間 9月12日 (水) 午前0時 以前の公表は禁じられています。

7. 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

教授 大谷 義近

Tel: 04-7136-3488

Fax: 04-7136-3475

e-mail: yotani@issp.u-tokyo.ac.jp

CNRS-Laue Langevin 研究所

教授 Timothy Ziman

e-mail: ziman@ill.fr

日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター
センター長 前川 禎通

Tel: 029-282-5093

Fax: 029-282-5927

e-mail: maekawa.sadamichi@jaea.go.jp

8. 用語解説：

(注1) スピンゼーベック効果

強磁性体試料端に温度の勾配をつけると、スピン流が誘起され、このスピン流が逆スピンホール効果によって、電圧信号に変換される現象。

(注2) 逆スピンホール効果

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、スピナ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（スピナ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、スピナ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) キュリー温度

強磁性体から常磁性体に転移する時の転移温度。

(注4) 超伝導量子干渉計 (SQUID)

弱く結合した2つの超伝導体をリング状にした素子で、リングを貫く磁束が量子化した値しか許されないために、非常に感度良く磁化の状態を調べられる磁気センサー。

(注5) 帯磁率

外部から物質に磁場を印加したときの応答する割合。通常は、磁場の大きさに比例する線形帯磁率（0次の帯磁率）を議論することが多いが、ここで言う2次の帯磁率とは印加磁場の3乗に比例する係数のこと。

(注6) 近藤効果

非磁性体金属に磁性不純物が僅かに混入した系では、電気抵抗が低温で上昇することが1930年代から知られてはいたが、その原因が何であるかはっきりしていなかった。近藤は伝導電子と不純物電子との相互作用ハミルトニアンを2次の項まで行うことで、初めて低温で温度が上昇する理由を明らかにした。

(注7) スピングラス、スピナイス

非磁性体の金属に磁性不純物を混入した場合、その不純物によるスピンが温度ゼロの極限でも秩序化せずに、乱雑なまま固化した状態のことをスピングラス状態と呼ぶ。このとき系の乱雑

さを表すパラメータ（エントロピー）はゼロにならない。これは通常温度ゼロの極限では、エントロピーはゼロになる熱力学第三法則に反している。磁性不純物によるスピンの配列が、ちょうどガラスのようにバラバラな配列のまま固定されているのでスピングラスと呼ばれる。スピニアイスも同様に低温の極限でエントロピーが有限の値に残る。ちょうど氷の分子構造のように水素の位置には2つの自由度があり、この構造と類似した結晶構造をもつ物質はスピニアイスと呼ばれる。

9. 添付資料：

詳しくは東京大学物性研究所大谷研究室 ホームページ

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

及び日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター ホームページ

(<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/mori-gr/index.html>) をご覧下さい。