



スピン流を用いて磁気の揺らぎを高感度に検出することに成功

—スピン流を用いた高感度磁気センサへ道—

1. 発表者：

新見 康洋	(大阪大学大学院理学研究科 准教授、研究当時: 東京大学物性研究所 助教)
木俣 基	(東京大学物性研究所 助教)
大森 康智	(東京大学新領域創成科学研究科物理学専攻 博士課程 1年)
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)
Albert Fert	(パリ第 11 大学 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：

- ◆磁気の乱れが強い「スピングラス」にスピン流を注入することで、超伝導量子干渉素子を用いた磁化測定では観測できなかった磁気の揺らぎを検出することに成功しました。
- ◆本技術を応用することで、将来的にスピン流を用いた高感度磁気センサへの道が開けると期待されます。

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。

東京大学物性研究所の新見康洋助教（研究当時、現：大阪大学大学院理学研究科准教授）、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の研究グループは、磁気の乱れが強い「スピングラス」と呼ばれる状態に、純スピン流を注入することで、超伝導量子干渉素子（SQUID）を用いた磁化測定では観測できなかった磁気の揺らぎを高感度に検出することに成功しました。この技術を応用することで、将来的に純スピン流を用いた高感度磁気センサへの道が開けると期待されます。

本研究成果は、『Physical Review Letters』（11月6日付）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)。この純スピン流は電荷の流れを伴わないために、通常のエレクトロニクス素子で生じる発熱を抑えることができ、次世代低消費電力デバイスとして近年非常に注目を集めています。

②研究の内容

本研究ではこの純スピン流を、磁気の乱れた「スピングラス」と呼ばれる状態に注入しました。スピングラスとは、図2に示す通り、磁気モーメント(注1)をもつ磁性不純物(鉄やマンガンなど)が非磁性体金属(金や銅など)にランダムに混入した場合、不純物の磁気モーメントが温度ゼロの極限でも一様な磁化状態(例えば磁気モーメントが全て平行に揃う強磁性体相、もしくは反平行になる反強磁性体相)を持たず、乱雑なまま固化した状態のことを言います(ちょうどガラス転移のようにバラバラな配列のままで固定されているのでスピングラスと呼ばれます)。また磁気モーメントが固化し始める典型的な温度は、スピングラス温度 T_g と呼ばれます。通常、 T_g は超伝導量子干渉素子(SQUID、注2)を用いた磁化測定で決定され、 T_g 以下では、乱雑に固化した磁化の影響で、磁化の減少が始まります(図3(b))。

このようなスピングラスを示す物質に純スピン流を注入すると、スピングラス温度 T_g よりも高温から磁気モーメントの揺らぎに起因して信号に変化が現れました。スピン軌道相互作用の強い非磁性体に純スピン流を注入すると、逆スピンホール効果(注3)によって、電気信号に変換されます。本研究では、単体で逆スピンホール効果を示さない銅にビスマスを追加すると、ビスマスのスピン軌道相互作用が強いことから、大きな逆スピンホール効果の信号を検出できることを利用しました。さらにそこに磁気モーメントをもつマンガンを追加することで、スピングラス状態を作り出すことができます。図3(a)に示す通り、マンガンを含めない場合、逆スピンホール効果の値は低温で一定となったのに対し、マンガンを含む場合、スピングラス温度 ($T_g = 10$ K) よりも高い温度 ($T^* = 40$ K) から逆スピンホール効果の信号が減少し始めることが分かりました。

理論計算と比較すると、マンガン不純物の磁気モーメントがランダムに固化するよりも高い温度からマンガンの磁気モーメントは揺らいでおり、その揺らぎによって、純スピン流から変換された電流を担う伝導電子のスピンの向きがランダムになり、その結果として逆スピンホール効果の信号が減少することが分かりました(図4)。

③今後の展開

本研究で得られた原理を用いれば、SQUIDよりも高感度に磁気の揺らぎを捉えられるセンサとして用いることができると期待されます。また温度ゼロの極限まで秩序状態を持たないスピ液体と呼ばれる、詳細が未解明な状態に対して純スピ流を注入することで、これまでの磁化測定や比熱測定などでは分からなかった情報を引き出せると期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」（11月6日）

論文タイトル：Strong Suppression of the Spin Hall Effect in the Spin Glass State

著者：Y. Niimi, M. Kimata, Y. Omori, B. Gu, T. Ziman, S. Maekawa, A. Fert, and Y. Otani

6. 用語解説：

(注1) 磁気モーメント（もしくは磁気）

磁石の強さとその向きを表すベクトル量のこと、図2で言うと、矢印のことを意味する。

(注2) 超伝導量子干渉計（SQUID）

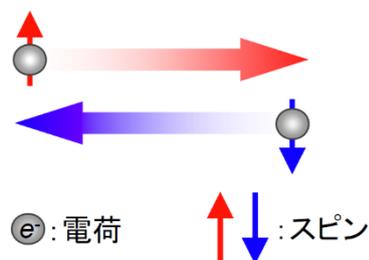
弱く結合した2つの超伝導体をリング状にした素子で、リングを貫く磁束が量子化した値しか許されないために、非常に感度良く磁化の状態を調べられる磁気センサ。

(注3) 逆スピホール効果

スピホール効果とは、スピ軌道相互作用の強い物質（例えば白金）に電流を流すと、スピアップとスピダ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の量子化軸に直交する方向に、純スピ流（スピアップ電流とスピダウン電流の差）が生じる。ただし非磁性体中では、スピアップとスピダ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純スピ流を生じることができれば、その逆過程によって、スピの流れを電気信号に変換できる。この現象のことを逆スピホール効果と言う。この時、純スピ流と、電気信号を検出する向きに直交する方向に、スピの量子化軸を向けると電気信号が最大となる。本研究のように、このスピの量子化軸の向きが、スピングラスの磁気の揺らぎにより乱雑になると、電気信号の大きさが減少する。

7. 添付資料：

純スピ流



スピ角運動量のみの流れ



$$I_c (= I_{\uparrow} + I_{\downarrow}) = 0$$

$$I_s (= I_{\uparrow} - I_{\downarrow}) \neq 0$$

I_{\uparrow} : アップスピ電流

I_{\downarrow} : ダウンスピ電流

図1：純スピンの概念図。スピナップとスピンドアンの電子が同数個だけ、逆方向に流れている場合、電荷の流れ I_C は相殺されてゼロとなるが、スピンの流れ I_S はゼロにはならない。これを純スピン流と呼ぶ。

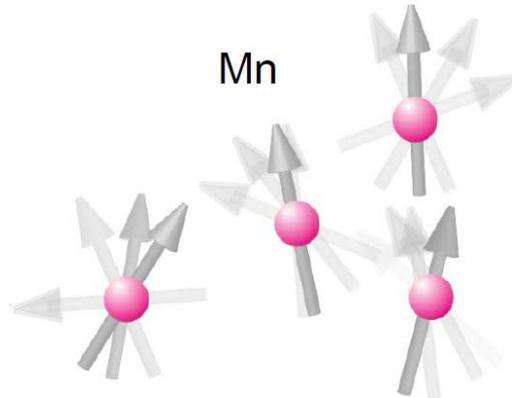


図2：マンガン Mn は磁性の基になる磁気モーメントをもつ。Mn の磁気モーメント間には、距離によって決まる相互作用が働く。Mn が銅の中にランダムに配置している時、Mn 間に働く相互作用の大きさもバラバラなので、あるところでは強磁性体的（平行に揃える相互作用）に、あるところでは反強磁性体的（反平行に揃える相互作用）に配向しようとする結果、図2のように向きがそろわず、低温でバラバラに固化する。磁気モーメントが固化する温度（濃いグレーの矢印の配置になる温度）はスピングラス温度 T_g と呼ばれ、例えば SQUID による磁化測定で決定できる。またそれ以上の温度では、薄いグレーの矢印で記したように、磁気モーメントは固化せず揺らいだ状態となる。

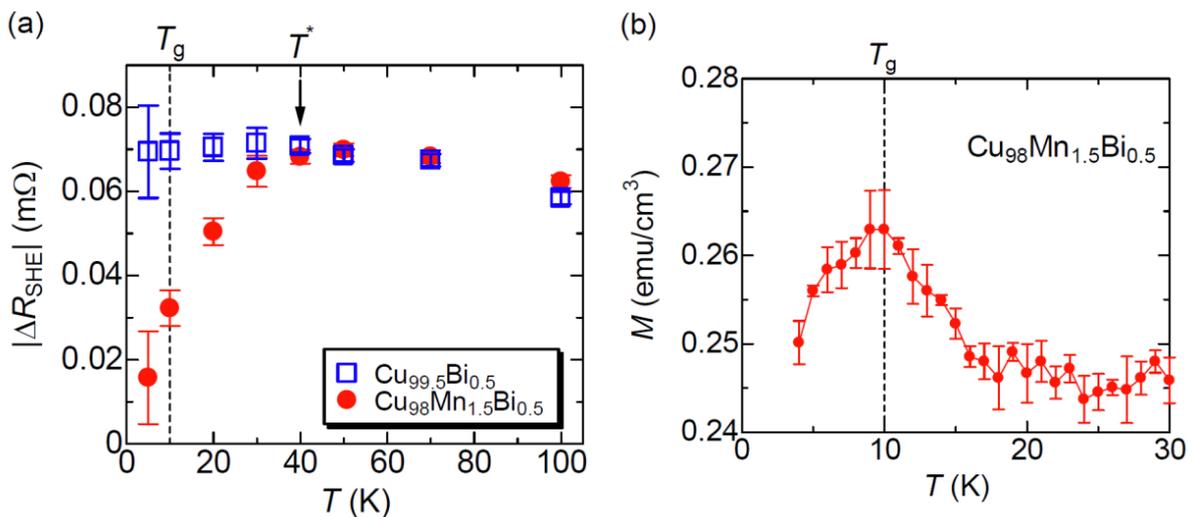


図3：(a) ビスマス Bi を銅 Cu に添加した合金 ($\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$) で測定された逆スピホール効果（白抜き四角）と、さらにマンガン Mn を添加した合金 ($\text{Cu}_{98}\text{Mn}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}$) で測定された逆スピホール効果（赤塗り丸）の温度依存性。ある温度 (T^*) までは両合金とも同じ信号を示すが、 T^* 以下で両者に違いが現れる。(b) $\text{Cu}_{98}\text{Mn}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}$ の磁化測定の結果。 T_g はスピングラス温度で、 T_g 以下で磁化が減少を始め、固化が始まっていることを意味している。本研究では、 $T_g = 10 \text{ K}$ に対し、 $T^* = 40 \text{ K}$ と4倍異なっている。

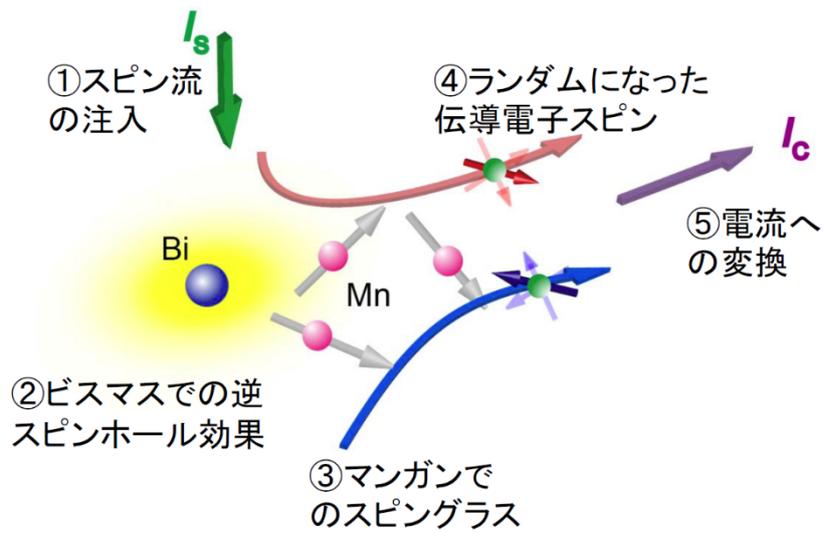


図4：逆スピホール効果の信号が減少するメカニズム。マンガン Mn がいない場合、注入されたスピ流はビスマス Bi で電流に変換されるだけだが（①→②→⑤）、Mn の磁気モーメントがあると、固化していなくても、磁気の揺らぎを感じて（③）、スピ流から変換された電流を担う伝導電子のスピンがランダムになる（④）。従って、逆スピホール効果の信号が減少する（⑤）。一方、 T^* 以上の温度で揺らぎを感じないのは、揺らぎの周波数があまりに高すぎて、伝導電子のスピンが追随できないことが理由である。