

磁気ゆらぎの強い系でのスピン変換

新見 康洋

■ スピン変換とは

物質の電気的特性(つまり、金属、半導体、もしくは絶縁体のどれか)は、電荷の流れ方によって決まる。一方、物質の磁気的特性(つまり、磁石になり得るかどうか)は、電子のもつスピンの配置によって決まる。電荷とスピンはそれぞれ、エレクトロニクス素子と磁気記録素子として個別に利用され、発展してきた。

1990年代に入ると、電荷とスピンを組み合わせたスピントロニクスという新しい分野が登場した。現在この技術はハードディスクドライブの読みとりヘッドな

どに応用され、われわれの生活に欠かすことのできないものになっている。さらに2000年代に入ると、スピン角運動量のみの流れである「スピン流」をとり出すことができるようになってきた。スピン流の概念図を〈図1a〉に示す。スピン流は、スピンアップとスピンダウンの電荷数に違いがない物質(非磁性体)中で、局所的なアンバランス(スピン蓄積)が生じたとき、これを緩和させる過程で発生する流れである。このとき電荷の流れをともなわない。したがって次世代の低消費電力素子への応用も期待されている。しかし、スピン流は電流とは異なり保存量で

はなく、一般には非常に短い長さ(ナノメートル程度)で消失してしまう。そのためスピン流を何らかの手法を用いて、測定可能な量に変換する必要がある。これをスピン変換¹⁾とよぶ。これまでに、スピン流と電流の相互変換を可能にする「スピンホール効果」(図1b,c)、トポロジカル絶縁体表面やスピン軌道相互作用の強い物質と弱い物質の界面などで発現する「スピン運動量ロッキング」²⁾が、高効率なスピン変換を可能にする現象として研究されている。高効率スピン変換が可能になれば上述の応用研究に非常に有用であるが、基礎学問に目を向けると、スピン流を用いることで、物質の磁性に関連した情報を電気的にとり出せる「プローブ」としての役割を担わせることもできる。以下で弱い強磁性体であるPdNi合金の非磁性相から強磁性相への転移温度(キュリー温度 T_C)近傍のスピン変換³⁾と、スピンがランダムに配列したスピングラス合金におけるスピン変換⁴⁾の2つの研究を紹介する。

■ キュリー温度近傍のスピン変換

磁気状態を探るプローブとしてスピン流を利用するため、ここでは T_C 近傍の磁気状態をとり上げる。 T_C 近傍では、磁気ゆらぎが強いと考えられている。そこで弱い強磁性体のPdNi合金にスピン流を注入することで、 T_C 近傍のスピンホール信号(スピン流電流変換信号)を観測した。スピン流の注入には、非局所測定法⁵⁾を用いた。〈図2a〉に、Pd₉₂Ni₈合金($T_C = 21\text{ K}$)のスピンホール信号の温度変化を示す。 T_C 以下の強磁性相でも、 T_C 以上の非磁性相と同様のスピンホール信号が観測されている。一方、 T_C のごく近傍では、これとは異なるふるまいが観測された。通常のスピンホール信号に重畠するように、 T_C 直下と直上でそれぞれ信号の減少と増加が観測された(〈図2a〉³⁾。また同様のふるまいは、Ni濃度を制御してPdNi合金の T_C を変化させても観測さ

*1 磁化率は、物質に磁場を印加したときの磁化の応答係数である。印加磁場と磁化の関係がたんに線形のときは磁化の1次微分係数の χ_0 を議論するが、一般には非線形形も存在し、 χ_n ($n = 1, 2, \dots$)、つまり磁化の($n + 1$)次微分係数を議論できる。

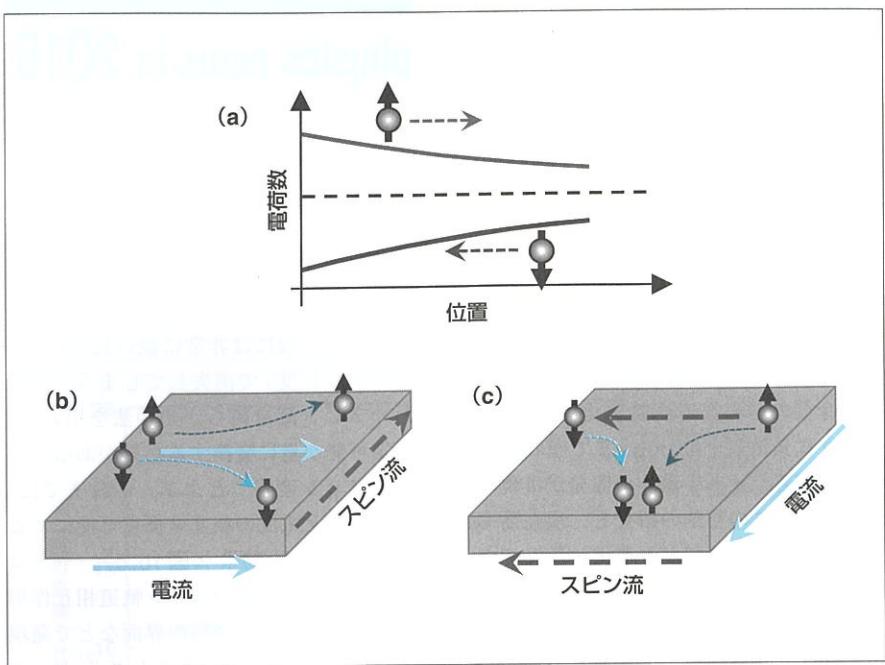


図1) スピン流とスピン変換の概念図

(a) スピン流の生成方法。スピン蓄積が緩和する過程でスピン流が生成される。(b, c) スピン軌道相互作用の強い非磁性体で生じる(b)電流からスピン流への変換と(c)スピン流から電流への変換。(b)では、物質中のスピン軌道相互作用によって、スピンドアップとスピンドウンの電荷が逆向きに散乱され、電流およびスピンの量子化軸と直交する方向にスピン流が生成される。実際の実験では(c)に示すように、スピン流を注入し、電流に変換される信号を観測した。

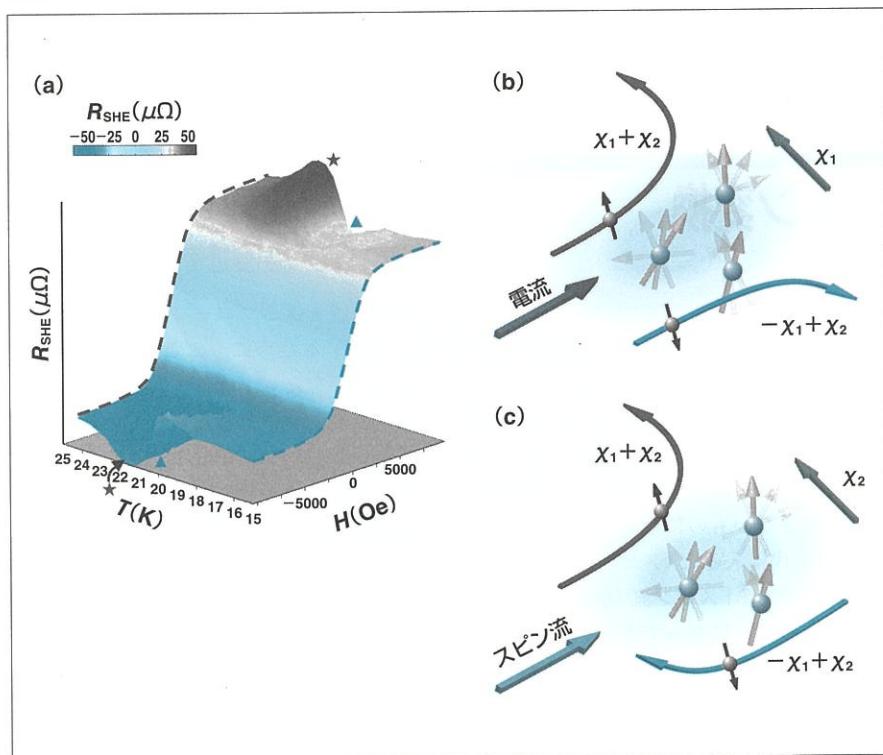


図2) キュリー温度近傍のスピン変換

(a) $Pd_{92}Ni_8$ 合金のスピンホール信号(R_{SHE})の温度依存性。 T_C は21 K。 T_C 以下(図中青点線)と T_C 以上(図中灰色の点線)で同様の R_{SHE} が観測されている。一方で、 T_C 直下(▲)と T_C 直上(★)では、 R_{SHE} にわずかな減少と増加が高磁場側で観測された。(b, c) T_C 近傍の(b)異常ホール効果と(c)スピンホール効果の概念図。

れた。

強磁性体中の縦抵抗およびホール抵抗が T_C 近傍で特異なふるまいをもつことは1960年代にすでに知られており、それぞれ線形(0次)磁化率 χ_0 と1次磁化率 χ_1 に比例する^{*1}。とくに T_C 直下のホール抵抗に関しては、1962年に近藤淳によって詳細な理論が発表されている⁶⁾。スピンドアップとスピンドウンの電荷はそれぞれ $\chi_1 + \chi_2$ と $-\chi_1 + \chi_2$ に比例して、スピンドの量子化軸と電流に直交する方向に散乱される(図2b, c)。ここで χ_2 は2次磁化率である。異常ホール効果はスピンドアップとスピンドウンの散乱頻度の差分を検出するので χ_1 に比例する(図2b)。一方、スピン流をPdNiに注入すると、スピンドアップとスピンドウンの電荷は同じ方向に散乱されるので、スピンホール信号は χ_2 に比例する(図2c)。すでに50年以上前に近藤によって、 χ_2 もホール信号に現れ得ることは指摘されていたが⁶⁾、対称性から異常ホール効果では、 χ_1 しか検出されていなかった。今回、スピンホール信号を測定することで、高次磁化率の χ_2 を直接検出することに成功した。

ランダムスピン系におけるスピン変換

キュリー温度近傍とともに磁気ゆらぎが本質的な役割を果たす好例が、スピングラス相である。スピングラスとは、母体の非磁性金属に、微量の磁性不純物をランダムに添加したとき、スピン状態が乱雑なままある種の秩序をもち、ガラス転移のように温度ゼロの極限まで基底状態が一意に決まらない系である。もっとも一般的に用いられるのは磁化測定で、スピンが自由に動けなくなり始める特徴的な温度、スピングラス温度 T_g で磁化にカスペ構造が現れる。このようなスピングラス相にスピン流を注入した場合、どのようなスピン変換が期待されるだろうか?

図3a)は典型的なスピングラスであるCuMn合金に、微量のBiを添加した

CuMnBi合金におけるスピンホール信号の温度依存性である。磁化のカスプが観測される T_g よりも4倍程度高い温度(T^*)から、スピンホール信号が減少し始めることがわかった⁴⁾。これは(図3b)に示すように、スピンが凍結を始める T_g よりもずっと高い温度 T^* からMnスピンはゆらいでおり、伝導電子スピンはそのゆらぎを感じて、スピンの量子化軸を注入前と同じ方向に保てないことが原因である。

■まとめと展望

これまでのスピン変換では、スピン軌道相互作用の強い非磁性体でのスピンホール効果や、トポロジカル絶縁体中などのスピン運動量ロッキングのように、磁化の向きは固定され、ゆらぎを考慮する必要はなかった。しかし上記の研究によって、スピン流を磁気ゆらぎの強い系に注入することで、伝導電子スピンを介して磁気ゆらぎを電気的に検出できることが明らかになった。今後は、伝導電子スピニンと局在モーメントの結合が強い4f電子系や、量子スピン系とよばれる物質群に対して同様の測定を行うことで、これまでの実験手法では明らかにならなかつた、スピンのゆらぎに関する情報を得ることを計画している。



本稿で紹介した研究は大谷義近氏、Dahai Wei氏、木俣基氏、大森康智氏、前川禎通氏、Timothy Ziman氏、Bo Gu氏、Albert Fert氏との共同研究である。

参考文献

- 1) Y. Otani *et al.*: Nat. Phys. **13**, 829 (2017).
- 2) 近藤浩太、軽部修太郎、大谷義近：日本物理学会誌 **72**, 320 (2017).
- 3) D. H. Wei *et al.*: Nat. Commun. **3**, 1058 (2012).
- 4) Y. Niimi *et al.*: Phys. Rev. Lett. **115**, 196602 (2015).
- 5) 大谷義近、新見康洋：固体物理 **50**, 575 (2015).
- 6) J. Kondo: Prog. Theor. Phys. **27**, 772 (1962).

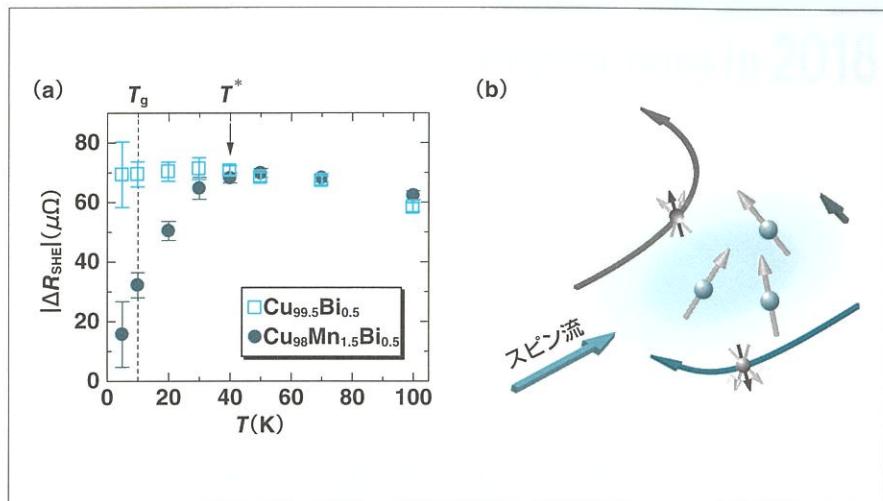


図3) スピングラス相におけるスピン変換

(a) Cu₉₈Mn_{1.5}Bi_{0.5}合金のスピンホール信号。比較のためにCu_{99.5}Bi_{0.5}合金のスピンホール信号もプロットしてある。(b) スピングラス相におけるスピン変換の概念図。ランダムに配置されたMnスピンによって、伝導電子スピンの量子化軸がゆらいだ結果、スピンホール信号が減少する。