

# スピン流によらないスピホール（ネルンスト）効果の定式化

下出 敦夫<sup>†</sup> (分子科学研究所 shitade@ims.ac.jp)

スピンを回転させたり、動かしたりといった操作は電子のスピン自由度を活用するスピントロニクスの中核をなす課題である。その中で盛んに研究されているのが、**スピン軌道相互作用**を通じて電場と垂直にスピン流が誘起されるといわれるスピホール効果である。直感的には、スピン軌道相互作用が↑スピンには下向きの、↓スピンには上向きの磁場としてはたらく、ローレンツ力によるホール効果によってそれぞれ左向きの電流 $J_{\uparrow}$ が、右向きの電流 $J_{\downarrow}$ が生じると考えればよい。電流 $J = J_{\uparrow} + J_{\downarrow}$ は打ち消しあうが、「スピン流」 $J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ が生成される。この現象を利用すれば、一見スピン自由度をもたない非磁性体において電氣的にスピンを動かすことができる。

上述の「スピン流」はスピンの保存する場合に妥当であるが、スピン軌道相互作用がある場合、スピンは保存せず、連続の式に基づいてスピン流を一意的に定義することはできない。理論では「通常のスピン流」とよばれる定義を選び、**久保公式**を用いてスピホール伝導度を計算することが多い。一方、「保存するスピン流」とよばれる別の定義を選ぶと、異なる結果が得られる。スピン流の正しい定義は何だろうか。そもそもこの問題に答えはあるのだろうか。

この問題が顕著に現れるのが、ラシユバ型とよばれるスピン軌道相互作用をもつ電子ドープされた半導体界面である。この系に電場をかけたとき、それと垂直方向の両端に逆向きのスピンの蓄積することが実験で見出された。スピン流が直接観測されたわけではないが、このスピン蓄積はスピホール効果によってスピンの端に流れ込み緩和したものと解釈されている。一方、非磁性不純物による散乱の効果を取り入れてスピホール伝導度を計算すると、上述のふたつの定義のどちらを用いても零になるので、この解釈に従うとスピン蓄積は起こらないことが示唆される。スピン流だけを

考えているのは、スピン蓄積という実験を説明することはできない。

スピネルンスト効果は温度勾配と垂直にスピン流が誘起される現象といわれており、温度勾配と垂直に電流が誘起されるネルンスト効果のスピン版といえる。久保公式を用いて「通常のスピン流」のスピネルンスト伝導度を計算すると、絶対零度に向かってほとんど必ず発散し、物理的な結果を得ることはできない。このような発散はネルンスト効果でよく知られており、久保公式を補正することで絶対零度で零になる**一般化されたモットの関係式**が得られる。スピネルンスト効果についてもこのような解決法が模索されてきたが、解決には至っていない。

このように、スピン流を定義してスピホール（ネルンスト）効果を定式化することは筋が悪いように思われる。そこで視点を変えて、スピン流を定義することをやめ、代わりに実験で直接観測されており、一意的に定義されるスピン蓄積に着目しよう。有限の大きさの系に一樣に電場をかけたとき、端には電場勾配が存在するので、端で起こるスピン蓄積は電場勾配によって生じていると考えるのである。このような電場勾配に対するスピンの応答係数はバルクの波動関数を用いて評価することができる。ふたつの定義のスピンホール伝導度がいずれも零になる上述の設定に対しても、実験と整合する非零の応答係数が得られた。スピネルンスト効果についても、温度勾配の勾配に対するスピンの応答を考え、一般化されたモットの関係式と**オンサーガーの相反定理**を示した。

本研究で提案した応答係数は、散逸を特徴づける緩和時間を除いて第一原理的に計算し、実験で直接観測して比較することができる。スピントロニクスの分野における理論と実験の乖離が少しでも縮まることを期待したい。

## 用語解説

### スピン軌道相互作用：

起源は原子核によるクーロンポテンシャルがある場合のディラック方程式の非相対論的極限をとること得られる。スピンと軌道角運動量の相互作用。ここではより広くスピンと電子の運動の相互作用を指しており、ラシユバ型のスピン軌道相互作用は半導体界面などで現れる。

### 久保公式：

外場によって生じる密度行列の変化、ひいては物理量の応答を摂動的に計算する一般的な公式。電場に対する電流の応答を考えれば電気（ホール）伝導度を、電場に対するスピン流の応答を考えればスピホール伝導度を計算することができる。

### 一般化されたモットの関係式：

熱電効果の文脈において、非弾性散乱がない場合に電気伝導度と熱電伝導度の間に成り立つ関係式。現在ではさまざまな物理量について、電場に対する応答係数と温度勾配に対する応答係数の間に同じ関係式が成り立つことがわかってきている。この関係式が成り立つのであれば、温度勾配に対する応答係数は絶対零度で零になるので、少なくとも熱力学の第三法則と矛盾しない物理的な結果であるといえる。

### オンサーガーの相反定理：

時間反転対称性がある場合に、ある応答とその逆応答の係数が等しい、あるいは符号を変えて等しいという定理。符号は時間反転に対する物理量の偶奇によって決まる。

<sup>†</sup> 現所属：大阪大学産業科学研究所