

## 有機磁性体でスピンの流れを作る

中 惇 (早稲田大学高等研究所 naka@aoni.waseda.jp)

電子は電荷だけでなくスピンの自由度を持っている。我々の身の回りの電子機器のほとんどは、このうち電荷の流れである電流によって動作しているが、もしもこれをスピンの流れである**スピン流**に置き換えられれば、ジュール発熱によるエネルギー損失が極めて少ない理想的な省エネルギー機器が実現できる可能性がある。これは遠い先の目標だが、そのための第一歩はまずスピン流の性質を電流と同じように深く理解し、自在に作り出すことである。

スピン流が広く知られるようになったきっかけは、スピンホール効果と呼ばれる物性現象の発見である。これは特定の半導体や金属に電場を印加すると、電場と垂直な方向にスピン流が発生するという現象であり、20世紀後半に理論的に提案され、その後21世紀に入ってすぐに実験で実証された。スピンホール効果の起源は、原子核と電子との間に働く電磁気学的な**スピン軌道結合**である。これが物質中を伝播する電子に対して実効的な磁場として作用することで、スピン方向に応じて電子の運動方向を変化させ、スピン流を発生させる。しかしながら、スピン軌道結合は一般に核電荷が大きいほど強くなる傾向があり、大きなスピンホール効果を得るにはプラチナなどの希少金属が必要となる。さらにスピン軌道結合が大きいとスピン流の拡散因子となるためスピン流が物質中を伝わる距離が著しく縮まってしまうというジレンマが付きまとう。

この課題に対して我々は、スピン軌道結合によらない新しいスピン流の生成機構を提案した。そのアイデアは、スピン軌道結合が極めて小さい水素や炭素といったあり

ふれた軽元素から構成される有機化合物が持つ、特徴的な分子の配向と磁性を活用することである。

舞台となるのは、BEDT-TTFと呼ばれる分子がペアを形成し、滑り止め板の模様に似た $\kappa$ 型と呼ばれるパターンで配列した有機化合物 $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Clである。この物質は典型的な**有機モット絶縁体**としてよく知られた物質であり、実験で観測される金属絶縁体転移、超伝導、および反強磁性などの性質は、分子の配向を無視して単純化したモデルに基づいて理解できることが半ば定説であった。

それに対し、これまであまり注目されてこなかった分子の配向を取り入れたモデルに立ち返り、この物質の電子状態を調べた結果、反強磁性状態では、たとえスピン軌道結合が存在しなくても、電子や磁気励起のエネルギーバンドにスピン方向に依存した分裂が生じることを見出した。このスピン分裂は、伝導電子やマグノンが物質中を伝播する時、運動しやすい方向がスピンの方向に依存して変化することを示している。この性質を利用すると、この状態に電場や温度勾配を印加することで、キャリアのスピンを整流しスピン流を取り出すことができる。また、印加する外場の方向を結晶軸に対して回転させると、発生するスピン流の方向はこれと逆向きに回転する。これは、外場とスピン流が常に垂直となるスピンホール効果とは大きく異なる。

本研究の結果は、従来スピン軌道結合が小さいためにスピン流の研究対象外であった有機化合物をはじめとする多くの物質を、スピントロニクス材料として再考察するきっかけを与える。

## 用語解説

## スピン流:

電荷や熱の流れを伴わない純粋なスピンの流れ。純スピン流とも呼ばれる。上向きスピンと下向きスピンを持つ電子の流れをそれぞれ $J_{\uparrow}$ ,  $J_{\downarrow}$ と定義すると、普通の電流はこれらの和で $I=J_{\uparrow}+J_{\downarrow}$ と表されるのに対して、スピン流は差で $I_{\text{spin}}=J_{\uparrow}-J_{\downarrow}$ となる。 $J_{\uparrow}=-J_{\downarrow}$ の場合、電流はゼロとなってスピン流だけが残る。つまり異なるスピンの電子を逆向きに流す(整流する)ことが、スピン流を作るための基本指針となる。

## スピン軌道結合:

原子核と電子の間に働く相対論的な相互作用で、電子が核近傍に局在して運動量が増加するほど強くなる。このため核電荷が大きい重い元素では強度が大きくなる傾向がある。物質中では電子に対してそのスピン方向によって符号が変わる有効的な磁場のように作用し、電子の運動方向を曲げることでスピン流を発生させる(スピンホール効果)。

## 有機モット絶縁体:

軽元素からなる有機分子を結晶の構成単位とする物質において、伝導電子がクーロン斥力によって反発し合い、各分子上に局在することで実現する絶縁体。原子からなる無機化合物のモット絶縁体と比べて単純な電子構造を持ちながら、金属絶縁体転移、超伝導、反強磁性などクーロン斥力に由来する多様な物性を示す。スピン軌道結合は一般に小さく、スピン流の生成には原理的に向かないとされてきた。