

## スピントロニクスへの期待

佐藤勝昭

国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)

スピントロニクスは、電子のもつ電荷とスピンの双方の性質を考慮した学問分野である。長い間、電荷の輸送をベースとする半導体デバイスと、スピンのもたらす磁性は、独立に発達してきた。

電子の持つ電荷とスピンの2つの性質を用いた固体素子を目差した研究は、1960年代に  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  や  $\text{EuS}$  に代表される第1世代の磁性半導体の研究に端を発する。これらの磁性半導体は大きな磁気抵抗効果を示すなど、スピンと電子輸送が絡み合う新しい物性をもたらしたが、キュリー温度が室温より低く実用的なデバイスには繋がらなかった。その後、宗片・大野らが発見した III-V 族系磁性半導体によって、磁性の電氣的制御が実現したが、それでもキュリー温度の低さが実用を阻んでいる。

スピントロニクスの革新的展開は、1988年 Fert, Grünberg らの磁性金属/非磁性金属ハイブリッド構造における巨大磁気抵抗効果(GMR)によって開かれた。数年のうちに GMR はスピンバルブとしてハードディスクの高密度化に貢献、人類はコイルを用いずに効率よく磁気情報を電気信号に変換する手段を得たのである。続いて、宮崎らにより室温におけるトンネル磁気抵抗効果(TMR)が見出され、新たな不揮発性メモリ素子 MRAM を生むきっかけとなる。さらに、TMR は、 $\text{MgO}$  をトンネル障壁に採用する湯浅らの研究によって大幅な改善が得られ大きく進展した。現在市販されているハードディスクの再生用磁気ヘッドのほとんどには、 $\text{MgO}$  障壁 TMR 素子が搭載されている。

これに次ぐ革新的展開は、スピントランスポールトック(STT)を用いた磁化反転現象の理論的予言と実験的検証によりもたらされた。この現象を用いた STT-MRAM は、磁界発生用の電流線が不要であるため、DRAM をしのぐ高密度集積も可能であるとされる。また、「ノーマリオフコンピュータ」を目指す半導体論理回路への導入も企画されている。ついに人類は、コイルなしに電気信号を磁気情報へ変換する道を手にしたのである。また、最近、STT とは異なる原理を用いて電流の代わりに電圧を用いて磁気を制御する道もひらかれつつある。

これまで、スピンの流れは電荷の流れに付随するものであったが、電荷の流れを伴わない純粋のスピン流の存在が理論予測され、ここ10年ほどの間に実験的に検証された。純粋スピン流を用いれば、ジュール熱を伴わずに情報を伝送できるので、集積回路の高密度化・微細化による金属配線によるエネルギー散逸の問題を解決できるものと期待されている。このスピン流の発生と検出には、スピンホール効果、逆スピンホール効果の理論と実験的検証が大きく寄与した。これらの効果には、ベリー位相の概念がバックにあり、固体の中に宇宙論が成立するとされる。さらには、熱スピン流によるスピンゼーベック効果の発見、スピン波の運ぶスピン流、さらには、スピン波とフォノンの相互作用、トポロジカル絶縁体など、スピントロニクスのベースとなる学理は大きく飛躍しつつある。これらスピン流に関しては齊藤英治氏の解説に譲りたい。

スピントロニクスにおいては日本人研究者の活躍がめざましいが、スピンに関する科学・技術研究は、わが国において滔々たる地下水脈が流れる数少ない領域の一つである。このスピンに関する科学技術を何らかの形で化学反応の制御に使うことができれば、未踏の新しい学問領域が創出できるのではないかと、化学研究者たちの挑戦に期待している。