

||||| やあこんにちは |||||

いま、スピントロニクスが熱い！

科学技術振興機構さきがけ研究総括 佐藤勝昭

物質科学研究のなかでいま最も熱い分野がスピントロニクスではないだろうか。ごく最近まで電子のもつ2つの性質である電荷とスピンは別々に取り扱われ、それぞれが独立に発展してきた。電気と磁気の相互変換には Maxwell 方程式に代表される電磁気学が使われてきた。電気信号の磁気情報への変換にはアンペールの法則が、磁気情報の電気信号への変換にはファラデーの電磁誘導の法則が使われた。どちらの変換にもコイルが使われてきた。

金属や磁性半導体において、キュリー温度付近でスピン依存散乱が起き電気抵抗率が高くなること、強磁性体において異方性磁気抵抗効果や異常ホール効果など電気輸送現象が磁化に依存することなど、電気伝導現象にスピンが関与することは 1960 年代にすでにあきらかになっていた。しかし、磁気的な相互作用は物質固有のいわば作りつけの性質であるので、人工的に制御することは不可能であると考えられていた。状況が大きく変わってきたのは、人類がナノサイエンス、ナノテクノロジーを手にした 1980 年代からであった。Gruenberg が強磁性金属/非磁性金属/強磁性金属からなる人工的な超構造において、磁性体層間の反強磁性的な結合を見出したのは 1986 年のことであった 1988 年、Gruenberg と Fert のグループは、独立に磁性体/非磁性体の人工格子において巨大磁気抵抗 (GMR) を見出し、スピントロニクスという新しい分野を切りひらいた。これによって、コイルを使わずに磁気から電気への変換ができるようになったのである。因みに Gruenberg と Fert には 2007 年日本国際賞が授与された。

IBM では GMR を利用した磁界検出素子 Spin Valve を開発し、ハードディスクドライブ (HDD) に実装した。Spin Valve の導入によって HDD の高密度化がそれまでの 10 年 10 倍のペースから 10 年 100 倍のペースに急展開したことは記憶に新しい。

GMR の発見から時を置かずして磁性/非磁性人工格子における磁性層間相互作用が非磁性層の層厚に対して振動的に変化することが発見された。人類は、ついに交換相互作用を人工的に制御する手段を手にしたのである。

磁性と伝導の関係にさらなるブレイクスルーをもたらしたのは、Miyazaki による 1995 年の磁気トンネル接合 (MTJ) における室温での大きなトンネル磁気抵抗効果 (TMR) の発見であった。MTJ とは 2 枚の強磁性体層で極めて薄い絶縁物を挟んだトンネル接合で、磁化が平行と反平行とで電気抵抗が大きく異なる現象である。この発見を機に TMR は、世界の注目するところとなり、直ちに固体磁気メモリ (MRAM) および高感度磁気ヘッドの実用化をめざす研究開発が進められ、TMR ヘッドは 2004 年に、MRAM は 2006 年に市場に投入された。そして 2004 年、Yuasa によって TMR は革命的なブレイクスルーを迎えた。それまで用いられてきたアモルファス Al-O に代えて MgO 結晶をトンネル障壁に用いることで、数百%におよぶ大きな TMR 比を実現したのである。



1999 年、新たなスピントロニクスの分野としてスピン注入磁化反転が登場した。強磁性電極からスピン偏極した電流を反平行なスピンをもつ対極強磁性電極に注入すると、スピン角運動量のトルクが対極電極の磁化にトランスファーされて磁化反転をもたらすという効果である。当初は 10^7A/cm^2 という大電流密度を必要としたが、現在では $10^5 \sim 10^6 \text{A/cm}^2$ にまで低減されてきた。ついに人類は、コイルによらずに、電流を磁気に変換することに成功したのである。また、磁壁を動かすだけであれば、もっと低い電流密度でも十分であることが実証されている。かくして、電気と磁気の相互変換が Maxwell 方程式から解放たれようとしているのである。

最近での最も大きなトピックスはスピン流の制御の概念である。電荷の流れとしての電流は、キャリアの衝突までの平均自由行程によって表される散逸を受ける。これに対し、スピンの流れは電子の不純物やフォノンとの衝突の際に散乱を受けにくいため、スピン拡散長は平均自由行程よりかなり長い。しかも、スピン流の舞台は、磁性体である必要はなく、非磁性の金属でも半導体でもよい。最近ではなんとグラファイトの 1 層 (グラフェン) においてもスピン流を注入できることが明らかになってきた。

スピントロニクスのもう 1 つの流れは、磁性半導体である。1991 年、Munekata, Ohno らは低温 MBE 成長によって InAs に大量の Mn を添加することによってキャリア誘起強磁性を発現することに成功した。Ohno は 1996 年に GaAs:Mn において強磁性を発見した。当初 120K くらいであったキュリー温度は、結晶成長技術の進展によっていまでは 170K 以上にまで高くなっている。特筆すべきは、InMnAs の磁性がキャリア誘起であるために、FET 構造を作ることによって、キャリア密度を制御し、そのキュリー温度、ひいては磁化をゲート電圧で制御できたことである。また、磁性半導体を LED 構造へのスピン注入電極として用い、発光の偏光性が制御できることが明らかにされている。Tanaka らは磁性半導体を用いて TMR 素子を作ることに成功している。磁性半導体の場合、スピン注入磁化反転が金属系より 2 桁低い電流密度でも起きること確認されている。

以上、スピントロニクスの最近の展開を紹介した。スピン注入、スピン蓄積、スピン緩和などスピン流の制御は、CMOS に代表される Si のデバイスが限界を迎えつつあるいま、それに代わる新しい革新的次世代デバイス技術の芽として熱い視線を浴びている分野である。スピン科学がナノの舞台を得て、大きく育ちつつあり、進歩が速すぎて目が離せないほどである。この分野の発展には、Materials Science の確固たるベースが必要である。日本 MRS においても、ぜひともこの分野により多くの研究者が関心を寄せていただくことを期待している。