

いま、スピントロニクスが熱い*

—革新的次世代デバイスに向けて—

佐藤勝昭

東京農工大学大学院工学府

e-mail:satokats@cc.tuat.ac.jp

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¹。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気的な結合を見出したのは 1986 年のことであった²。1988 年、Grünberg 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^{3,4}。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、ついで、ノーベル賞が授与された。

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⁵。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。同じ時期に、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⁶。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⁷。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た。そして 2004 年、Yuasa は TMR に革命的なブレイクスルーをもたらした⁸。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、200%におよぶ大きな TMR 比を実現したのである。その後も TMR は伸び続け、最近では 500%に達している⁹。

1996 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の概念が提案され¹⁰、2000 年に実証された¹¹。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 $10^5\text{-}10^6\text{A/cm}^2$ にまで低減されてきた¹²。これまでは MRAM の記録のためには電流を流してそれが作る磁界で磁化反転をして記録していたので電力消費が集積化のネックであったが、スピントルクを使うと MTJ 素子に電流を流すことによって磁化反転できるので、高集積化が可能になる。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。かくして、電

* この文章は、日本 MRS ニュース Vol.19 No.4 November 2007 の巻頭言に手を加えたものです。

気と磁気の相互変換がMaxwell方程式から解き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はスピン流の制御の概念である¹³。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¹⁴。スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果である。スピンホール効果では磁場がなくても、電流が流れるだけで、スピン軌道相互作用の効果で上向きと下向きのスピンの左右に分離され電流と垂直方向にスピン流を生じる。これによっておきるスピン蓄積は磁気光学的に確認された¹⁵。

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¹⁶。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250Kにまで高くなっている¹⁷。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¹⁸。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¹⁹。磁性半導体の場合、金属系より2桁低い電流密度でスピン注入磁化反転が起きることも確認されている²⁰。

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、大きく育ちつつある。この分野の発展には、材料科学の確固たるベースが必要である。本ナノ拠点でも、この分野への関心をぜひお寄せいただきたい。

参考文献

- ¹ たとえば、G.K. White and R.J. Tainsh: Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 165. および A. Fert and I.A. Campbell: Phys. Rev. Lett. 21 (1968) 1190
- ² P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.
- ³ G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbad, W. Zinn: Phys. Rev. B 39 (1989) 4828.
- ⁴ M.N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friedrich, J. Chazelas: Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2472.
- ⁵ S. S. P. Parkin, Z. G. Li and David J. Smith: Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 2710.
- ⁶ S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche: Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2304.
- ⁷ T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231.
- ⁸ S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando, Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) L588.
- ⁹ Y. M. Lee, J. Hayakawa, S. Ikeda, F. Matsukura, H. Ohno: Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 212507.
- ¹⁰ J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1. および L. Berger: Phys. Rev. B 54 (1996) 9353.
- ¹¹ E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, R. A. Buhrman: Science 285 (2000) 865.
- ¹² 久保田均, 福島章雄, 大谷祐一, 湯浅新治, 安藤功児, 前原大樹, 恒川孝二, D. Djayaprawira, 渡辺直樹, 鈴木義茂: 日本応用磁気学会第145回研究会資料 (2006.1)p.43
- ¹³ たとえば、大谷義近: 第31回MSJサマースクールテキスト(2007.7.11-13)p.109.
- ¹⁴ M. Ohishi, M. Shiraishi, R. Nouchi, T. Nozaki, T. Shinjo, and Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. (Express Letter) 46 (2006) L605.
- ¹⁵ Y.K. Kato, R.C. Myers, A.C.Gossard, D.D. Awschalom: Science 306 (2004) 1910.
- ¹⁶ H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmüller, L.L. Chang, L. Esaki: Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 1849.
- ¹⁷ A. M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka: Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 17201.
- ¹⁸ H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani: Nature 408 (2000) 944.
- ¹⁹ Y. Ohno, D.K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno and D.D. Awschalom, Nature 402 (1999) 790.
- ²⁰ 千葉大地, 北智洋, 山ノ内路彦, 松倉文礼, 大野英男: 日本応用磁気学会第145回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.7.