

千葉 大地

東京大学 大学院工学系研究科 准教授



電界印加による 磁気特性の制御

磁性を自在に制御し、そのポテンシャルを引き出す

研究の背景

半導体のMOS構造では、ゲート電界により半導体層表面のキャリア濃度を制御することができる。これは電界効果トランジスタのチャンネルのゲーティング(電流のスイッチング)に広く用いられている。一方、磁性体は自発磁化を持っていることが最も重要な性質であり、その方向を制御するために(特に磁気記録においては情報を書き込むために)、電流磁界を加えたり、スピン偏極電流を流してトルクを加える[1, 2]などの手法が用いられてきた。しかし、これらは電流を必要とするために、ジュール損失が避けられない。冒頭で述べた半導体における電界効果は、損失の少ない手法であったからこそ広く用いられているわけである。磁性体における電界効果を見出し、それを活用できないか、それが本研究を開始する発端となった。次の「研究の成果」で述べるように、磁性体における様々な電界効果が見つかり、分野の拡大と同時に、用いる材料も半導体磁石から身近な金属磁石まで広

がりを見せつつある。「一度作った磁性体の性質は後から変えられない」という常識は、すでに過去のものとなりつつある。

研究の成果

本研究の重要な成果は、電界により磁力をスイッチできるということを見出したことである。つまり、電界を変えることで、磁石を磁石ではない(常磁性)状態にしたり、もとに戻したりすることができるようになった。これまでも、温度を変えたり、作る段階で合金の組成を変えれば、磁石⇄非磁石の状態はもちろんコントロールできたが、一度作った磁石の状態を電氣的に後から制御することができるようになった。

図1は素子の基本構造と電界による磁性制御のイメージである。ゲート電極/絶縁膜/強磁性電極からなるキャパシタンス構造となっている。ゲート電圧を加えると、強磁性層のキャリア濃度が増減し、磁化の方向や、磁力が変化(若しくは強磁性状態そのものが消失)する。このような現象ははじめ、強磁性

半導体を用いて得られた[3-5]。GaAsやInAsなどの化合物半導体にMnを%オーダーでドーブしたものが代表的である。どれも原理実証としては世界初であったが、そのキュリー温度が低いために、動作は室温よりはるかに低い温度に限定されていた。

特に磁気記録データの書き込み用途に電界を利用するためには、当然、室温で動作する材料を用いなければならない。そこで筆者らは身近な金属の磁性体、特に3d遷移金属強磁性体を用いて実験を継続した。金属では遮蔽効果が大きいため、超薄膜を用いて実験を行った。図2は、2原子層程度のコバルト超薄膜における、室温付近での実験結果である[6]。正のゲート電圧では矩形のループを描いているのに対し、負の電圧ではループが完全に消失している。これは磁界と磁化の方向が平行になったり垂直になったりして変化しているためでは? と、結果が得られた当初は期待した。つまり、磁化の方向が電界で変化しており、当初の目論見通りではないかと喜んだ。しかし、よく調べてみると、負の電圧のときは、磁力そのも

図1 磁性の電界効果に用いた素子の基本構造と、電界効果のイメージ

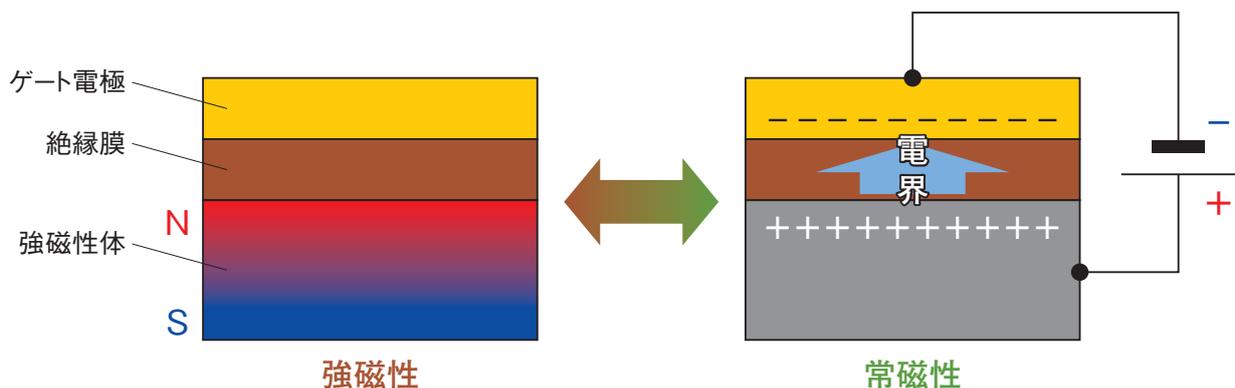


図2 コバルト超薄膜の各ゲート電圧印加時の磁気ヒステリシス曲線。縦軸はホール抵抗であり、異常ホール効果により磁化に比例する

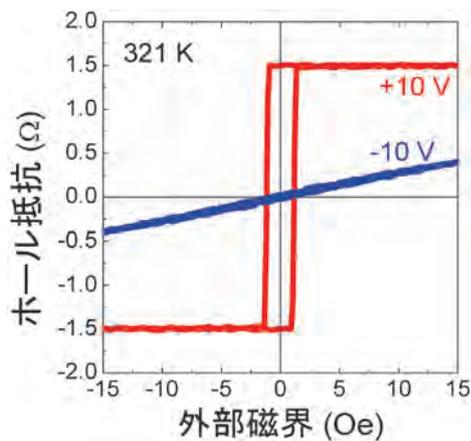
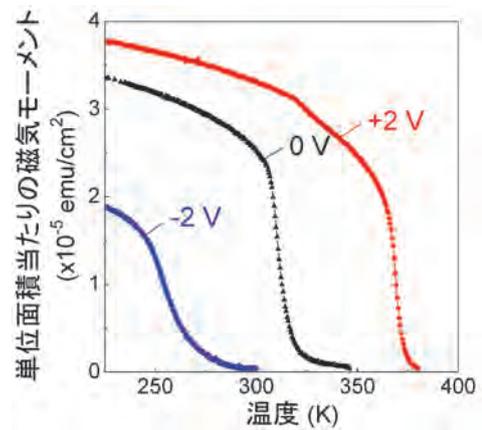


図3 コバルト超薄膜の各ゲート電圧印加時の磁気モーメントの温度依存性



のが消失している=磁石ではなくなっていることが分かった。つまり、温度を変えることなく、室温付近で磁石の性質自体がスイッチできることが実証された。

その制御ウィンドウを拡大するため、電気二重層キャパシタ構造を用いた。イオン液体をコバルト超薄膜と金箔で挟み込み、電圧を加えると、イオンが移動してコバルト表面付近に密集する。これにより、コバルト表面の電子密度を制御するやり方である。これにより強力な電界を加えることが可能である。図3は、各ゲート電圧印加時の磁気モーメントの温度依存性である。室温を挟んで約100度もの温度範囲で、磁石⇄非磁石状態がオンオフできていることが確認できた[7]。この時、ゲートキャパシタンスから見積もられる電子数変化量は、コバルト原

子1個あたり平均で0.1個弱であった。

将来の展望

このように、現在は金属原子一個が持つ電子の数を10%に迫るオーダーで変えることができる。この技術を応用し、様々な磁石の性質を大きく変えることができると期待される。最近は多くのグループが磁性の電界制御を試みており、室温で磁化方向を連続的にスイッチすることも可能になってきた[8, 9]。このような電界による散逸の少ない磁石の制御手法は、現在開発が進んでいる磁石をメモリとして用いる集積回路において近い将来使われるようになるかもしれない。材料科学の観点からは、これまで天然には磁石として存在しな

かったものが電界効果により磁石となるかどうか、これが次の興味である。あらゆる物質の磁性を自在に制御することを試み、その技術を蓄積することで、その事実と技術が材料の利用の幅を広げることに繋がるともかもしれない。やってみて実感したことはあるが、このようにして磁石の性質を自在に制御する手法を開拓することは、ギリシャ時代から用いられてきた磁石を人為的に制御する「現代の手法」として、材料科学の分野に新たな光を灯すものとなるのではないかと期待している。

本研究は、東北大学電気通信研究所・大野英男教授研究室、京都大学化学研究所・小野輝男教授研究室、東京大学の私の研究室において行われました。共同研究者の皆様方に深く感謝申し上げます。

References (参考文献)

- [1] J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater. 159, L1 (1996).
- [2] L. Berger, Phys. Rev. B 54, 9353 (1996).
- [3] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, and K. Ohtani, Nature 408, 944 (2000).
- [4] D. Chiba, M. Yamanouchi, F. Matsukura, and H. Ohno, Science 301, 943 (2003).
- [5] D. Chiba, M. Sawicki, Y. Nishitani, Y. Nakatani, F. Matsukura, and H. Ohno, Nature 455, 515 (2008).
- [6] D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi, and T. Ono: Nat. Mater. 10, 853 (2011).
- [7] K. Shimamura, D. Chiba, S. Ono, S. Fukami, N. Ishiwata, M. Kawaguchi, K. Kobayashi, and T. Ono: Appl. Phys. Lett. 100, 122402 (2012).
- [8] Y. Shiota, T. Nozaki, F. Bonell, S. Murakami, T. Shinjo, and Y. Suzuki, Nature Mater. 11, 39 (2012).
- [9] S. Kanai, M. Yamanouchi, S. Ikeda, Y. Nakatani, F. Matsukura, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett. 101, 122403 (2012).