

# 磁石と半導体

— MRAMが切り拓く世界 —

東京理科大学 工学部 電気工学科 教授 **かわはら 河原** **たかゆき 尊之**

## いきなりトンネル磁気抵抗効果

本稿の主演は、磁性体膜（磁石）を用いた極微のサンドイッチ構造です。

薄い磁性体膜を2枚用意します。これまた薄い絶縁体膜をこの間に挟みます。このとき、磁石には向きがありますので、図1のように、2枚の磁性体膜の磁石の向きが同じものと逆のもの2組作ることができます。この膜に垂直に電気を流してみましょ。すると、磁石の向きが同じのは抵抗が低く（大きな電流が流れる）、反対のものは抵抗が高い（流れる電流は小さい）ことが分かります。これは“トンネル磁気抵抗効果”と呼ばれています。

今、この磁性体膜と絶縁体膜のサンドイッチ構造の素子およびここで起こる“トンネル磁気抵抗効果”を利用することに、世界中の研究者・技術者が開発競争をくりひろげています。ちなみに、トンネルという言葉が入っ

ているのは、絶縁体膜が挟まっているのに電流が流れていますが、これは量子力学で説明できるトンネル効果によるものだからです。

では、これは何に使えるのでしょうか。

皆さんが使っているスマホやPCでは、内部の情報は“0”と“1”の2つの値を使って取り扱われることは知っていると思います。この情報を蓄えているのがメモリ（記憶装置）です。また、図1は同じ構造の2つの状態を示しているとも見ることができます。2つの磁石の向きが互いに同じ状態と反対の状態です。そこで、例えば情報“0”を磁石の互いの向きが同じ状態に（抵抗は低い）、情報“1”を向きが反対の状態に（抵抗は高い）、それぞれ対応づけます。次に、この情報の出し入れのために半導体素子で小さなスイッチを作り、この3層のサンドイッチ構造に繋がります。こうすると、“0”か“1”を覚えることができる1個の記憶素子（メモリセル）のできあがりです。このメモリセルをひ

とつの半導体チップの上に極めて多数個並べ、制御回路とともに集積化して作ったものが、磁気メモリ（MRAM）です。半導体の上に微細な磁石を載せたメモリとなります。

そして、このMRAM、かなりの優れものなのです。

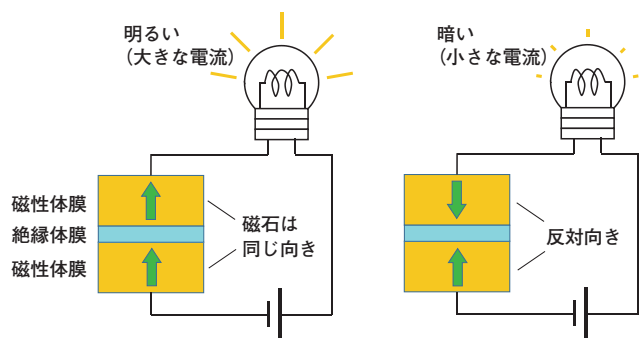


図1 トンネル磁気抵抗効果

## ナノの世界

MRAMで使う磁性体膜を用いた

極微のサンドイッチ構造をもう一度見てみましょう。

薄い磁性体膜を2枚用意し、薄い絶縁体膜を間に挟みました。この絶縁体膜、実は厚さが1～2ナノメートルです。ナノという言葉は、最近、いろいろな分野（ハイテクはもちろん、化粧品まで）で聞くことができます。これは、1/1,000,000,000（ゼロが9つ並ぶ）を意味する接頭語です。そして、磁性体膜もまた各層は数ナノメートルの厚さなのです。

このナノメートルの領域であることが重要となります。MRAMが製品として実際に作られるようになったのは2006年であり、最近の製品の主流と言われる方式（STT-RAMと言います）となったのが2012年です。この理由のひとつが、半導体の微細加工技術の発展によりナノメートル領域でも安定した製造が行えるようになったことなのです。この領域に磁石を持ち込むことで大きな変革が起きました。ナノテクの大きな成功分野のひとつでしょう。電子がスピンという物理量（量子数）を持つことが、ナノメートルの領域で表舞台に出てきたのです。

ナノメートル領域がなぜ重要なかを説明します。まずは、高校物理の復習です。1個の電子は、ある量の電荷を持っています。この電気量の大きさを電気素量と呼ぶことは習った人もいるでしょう。この電子の流れが電流です。電流の大きさは、単位時間あたりに導体の断面を通過する電気量でした。そして、皆さんはあまり気にしていないかも知れませんが、1本の金属線（導体）に流してみますと、金属線の一端での電流量と他端での電流量は同じです。これは、上記から、一端で入れた電荷は保存されて他端から出てきていることとなります。

一方で、これは大学に入ってから学ぶことですが、1個の電子は図2左上に示したようにスピンという物理量も持っています。少し

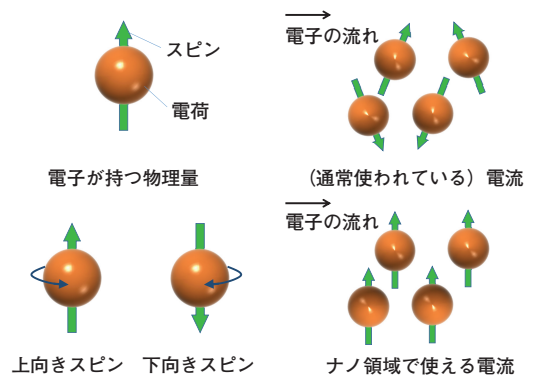


図2 電子と電流

例えを入れた説明となりますが、このスピンには図2左下に示したように、上向きスピンと下向きスピンの電子が何個であり、下向きスピンの電子が何個であると数えることができる量です。そしてこのスピンというのは、小さな磁石と見て良いのです。実はスピンが発見されたのは、不均一な磁場中に電子を走らせたところ、磁場に反応する連続でない2値の物理量を電子が持つことが分かったためでした。そしてその後の研究でこのスピンこそ磁性の起源を担っていることが分かったのです。

しかし、電子のこの磁石としての性質はすぐには活用できませんでした。この電子の1個1個のスピン、多くの電子で見るとその向きはばらばらとなっています。いくつかの方法で多くの電子のスピンの向きをひとつの方向に揃えることはできるのですが、すぐにばらばらになってしまうのです。このため、多くの電子で見ると全体としてはスピンはゼロであり、分からないということだったので、図2の右上の状態です。電子の電荷という物理量の流れは電流として利用されましたが、電子のスピンという物理量の流れはなかなか電流のように扱えませんでした。しかしながら、すぐにばらばらになるとは言いましたが、スピンをひとつの方向に揃えることができるとその後数十ナノメートルくらいはこの状態を保持して進むことはできるのです。

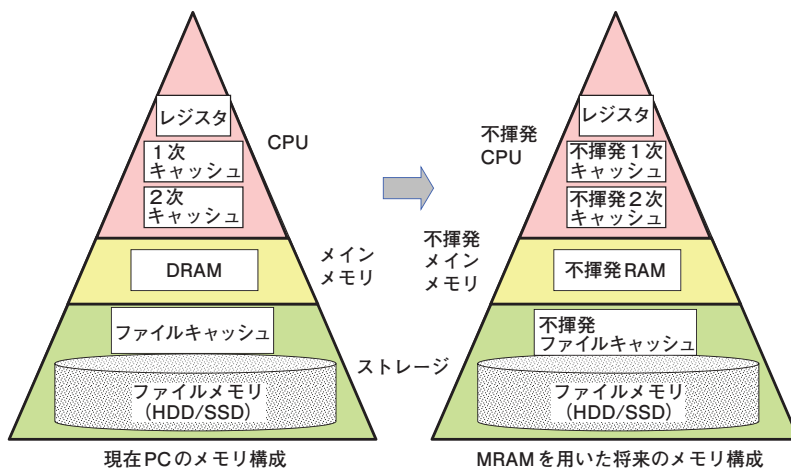


図3 メモリシステム構成

(図2右下)。この距離の内であれば大丈夫です。電子の電荷に加えて、スピンを活用することができます。磁石の性質を扱えます。

ナノテク時代となり、今やこの領域を扱うことができるようになりました。“トンネル磁気抵抗効果”も、発見そのものは実は古いのですが、この発展の中で活用できるようになったもののひとつです。電子の電荷の制御(エレクトロニクス)とスピンの制御を同列で扱えるようになったこの技術分野を、スピントロニクスと呼びます。今、ホットな分野です。

そして応用へ向けた検討の中で、先頭を切って製品化まで研究開発が進んだのがMRAM(最新の方式はSTT-RAM)です。さらに、このMRAM, 単にスピントロニクスという最新のナノテク分野というだけでなく、情報処理の仕組みを抜本的に変えてしまうというとんでもないポテンシャルを備えたものだったのです。これを見るために、次節では情報処理におけるMRAMを含めたメモリの役割から話を始めます。

### スマートフォンやPCのメモリ

スマホは何を隠そうコンピュータです。しかもかなり性能が高いものです。一般にスマホやPCにはメモリが積まれています。SSD

の容量が128GB(ギガバイト, ギガは10の9乗)であるとか, HDDの容量が1TB(テラバイト, テラは10の12乗)であるとかなどは, 機器を選ぶときに気にされたことがあるかも知れません。

図3はPCでの例なのですが, 搭載されているメモリは他にもあります。これらのメモ

りは大きく2つの種類に分かれます。不揮発性メモリと揮発性メモリです。SSDやHDDは不揮発性です。つまり, 電源を切っても電池が放電し切っても, 記憶した内容は保持されています。便利ですね。しかも, 先の数字のように極めて大容量です。では, なぜ, 他のメモリがあるのでしょうか。この理由は, 記憶できる回数の制限と読み書き速度の遅さにあります。記憶できる回数は, SSDでは, メモリセルあたり, 特殊品を除いてせいぜい1万回です(この理由は後で述べます)。一方, PC内部であらゆるデータを処理または処理を制御している半導体であるCPUは, ギガヘルツの速度で動いています。これは, 1ナノ秒以下ごとに1回の演算を行っていることになります。もし, このCPUの動作周波数ごとに, 処理前後のデータの記憶をSSDに行わせるとどうなるでしょうか。一瞬で書き換え可能な回数に達してしまいます。また, 速度については, SSDやHDDは共に遅いです。情報にアクセスするのに, その最初の情報に行くには, SSDで数ミリ秒, HDDでは数十ミリ秒以上必要です。1ナノ秒以下ごとに1回の演算を行っているCPUとは, とてもじゃありませんが, 必要な情報を直接やり取りできません。

そこで, よく使う情報は書き換え回数に制



限がなく、高速である揮発性メモリに置きます。ただ、高速なほどメモリセルが大きくなってしまふので、CPUの近くに高速・低容量、次に中速・中容量と段階的に置いていきます。これらが、レジスタ、キャッシュメモリ、メインメモリと呼ばれるものです。レジスタはCPUの一部でもあり、CPUに直結

した記憶素子です。そこへキャッシュメモリから今処理したいデータを渡します。CPUの手元に置き、すぐにデータが取り出せる箱のようなものです。当面使うデータでキャッシュには入りきらないものはメインメモリに置きます。メインメモリは、机の上に広げたまざまなメモ書きやデータの表などのイメージです。すると、SSDやHDDは本棚か場合によっては図書館のイメージとなりましょう。必要に応じて、机の上に持って来たり、返したりします。

現在のメモリの構成(図3左)では、書き換え回数と速度の制限から、メインメモリ以降は揮発性メモリとなります。電源を落としたり消えてしまうのです。PCにスイッチを入れるとしばらく起動に時間がかかりますが、これは本棚であるSSDやHDDから当面使うデータを机の上に広げている状態です。使っている途中でも同様な動作が行われます。また、実はCPUの動作の中には、不揮発性メモリに格納しないと動作終了とは見なさないというものがあります。この場合、机の上には不揮発性メモリの領域がないので、本棚まで情報を移さないとその動作を完了できません。全体の性能を落としてしまいます。

携帯機器の一部には、いつでもすぐに使えるようにメモリには常に電源を供給するモードを備えているものもあります。ただし、何もしなくても電力を消費します。さらに、揮発性メモリで大きな容量が搭載されるDR

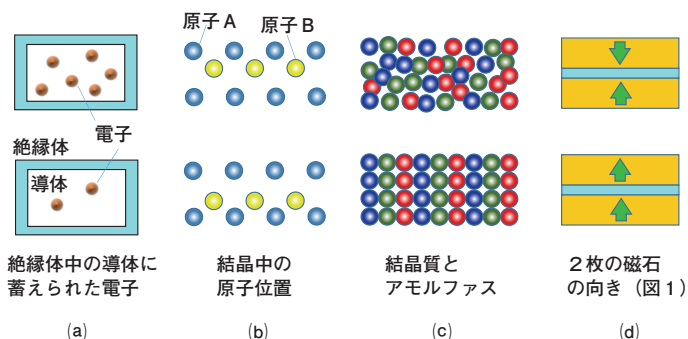


図4 不揮発性メモリの記憶原理

AMでは、一定時間ごとに内容を再度書いてあげる必要があります、これも電力を消費します。

このような課題からすべて不揮発にできないかと切望されてきました(図3右)。しかし、不揮発性メモリでは、速度はメモリセルを大きくすればある程度解決できるものの、書き換え回数に制限があるということが、これを極めて難しいものになっています。

そして、磁石と半導体の結びつきこそが、これを奇跡的に解決できるのではと考えられているのです。

### 不揮発RAM

ここで、不揮発性メモリがどのような仕組みで不揮発性、つまり電源を切っても情報を保持できているかについて述べます。アイデアの宝庫でありますので、現在実用化されている主要な方式についてです。

図4に、情報の出し入れに使うトランジスタ部分以外の記憶素子につき、MRAMも含めて4つの方式を示しています。

(a)は、導体を絶縁体で挟んだものを記憶素子にするもので、フラッシュメモリと呼ばれているものです。日本の研究者によって発明されました。情報の書き換えは、少し厚めの絶縁体の中の導体にトンネル効果を用いて、電子を叩き込んだり叩き出したりして行います。読み出しは、導体中の電子の有無により、絶縁体の外から見た電界の伝わり方が

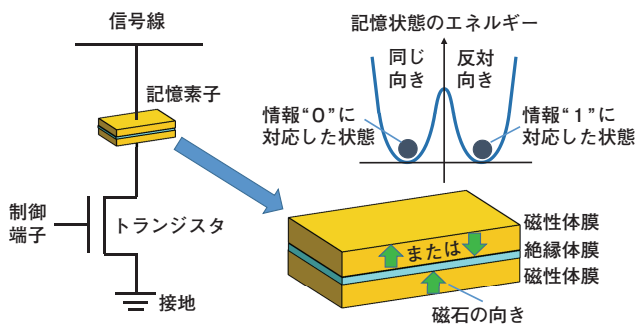


図5 STT-RAM (最新のMRAM) メモリセル構成

異なりますので、これを検知して行います。この方式は構造が単純なのでとても小さくできます。しかし、書き換え回数が課題となります。“電子を叩き込む”と書きましたが、やや無理な厚さの絶縁体膜を通過させているので、書き換えを繰り返すたびに絶縁体膜は劣化してしまうのです。ある回数を越えると絶縁体膜に穴が開いてしまいます。ただし、皆さんは画像データを取り込んだとしてこれを小まめに消すことはないでしょう。このようなデータに対しては、実用上は問題のないように作られています。高度な製造技術が必要であり、実用化できているのは限られたメーカーとなります。

(b) は、大きな電界を加えて、結晶の原子の場所を極めて微小ながら変えてしまうものです。強誘電体メモリといいます。原子の場所の違いにより電界の伝わり方が異なりますので、これを検知して読み出します。こちらも書き換えを行うたびに原子の場所を変えているので、その変化は微小であるものの、やはりある回数を越えると結晶が壊れてしまいます。

(c) は、メモリセルを構成する物質に、最初に数百度に達する熱を加えて急冷するか、しばらく一定の温度（こちらも最初よりは低いものの数百度）で保つかで、2つの状態を作るものです。急冷するとアモルファスと呼ばれる物質になり、しばらく一定の温度で保つと結晶化した物質になります。両者は、電

気抵抗が異なりますので、これを情報に対応させます。こちらも焼いたり冷ましたりしていることもあり、ある回数を越えるとやはり壊れてしまいます。

このように、一般に不揮発性メモリと呼ばれるものは、その書き換えの原理が原因となり、書き換え回数に制限があります。読み出しはほぼ大丈夫です。もちろん、画像データ、音楽データ、またはプログラムなどはCPUの動作に応じて頻繁に書き換えを行うことはなく、これらを蓄えておくには十分な書き換え回数は保証されています。

しかし、これらはCPUの手元のメモリとしては通常は使えません。そのため、フリップフロップ回路という書き換えに制限のない電子回路で記憶させたり (SRAM)、あるいはコンデンサを用意して電荷を入れてあるか否かで記憶させたり (DRAM) しています。これらは、電源を切ると当然その内容はなくなってしまいます。

一方で、(d) にも示しましたMRAMはどうなのでしょう。MRAMは不揮発性メモリです。不揮発にて記憶できる原理は、サンドイッチ構造の2枚の磁性体膜の磁石の向きが同じなのか、反対なのかでした。つまり磁石の相互の向きを情報に応じて変えて記憶しました。では、磁石の向きは何度変えても大丈夫なのでしょう。実はこの磁石の向きは、磁性体膜中の電子のスピン分布、上向きスピンを持った電子数と下向きスピンを持った電子数の差、で決まります。遍歴電子と呼ばれる電子が取り得る物理量が制限を受けてしまい、スピンの取り得る分布に差が生じるのです。このあたりの詳細は今後の理学部の先生による解説を期待することにして、ここで重要なのは、磁石の向きを変えることは、電子の内部状態を変えるのみだということです。何回も変える

一方で、(d) にも示しましたMRAMはどうなのでしょう。

MRAMは不揮発性メモリです。不揮発にて記憶できる原理は、サンドイッチ構造の2枚の磁性体膜の磁石の向きが同じなのか、反対なのかでした。つまり磁石の相互の向きを情報に応じて変えて記憶しました。では、磁石の向きは何度変えても大丈夫なのでしょう。実はこの磁石の向きは、磁性体膜中の電子のスピン分布、上向きスピンを持った電子数と下向きスピンを持った電子数の差、で決まります。遍歴電子と呼ばれる電子が取り得る物理量が制限を受けてしまい、スピンの取り得る分布に差が生じるのです。このあたりの詳細は今後の理学部の先生による解説を期待することにして、ここで重要なのは、磁石の向きを変えることは、電子の内部状態を変えるのみだということです。何回も変える

ことで、電子が壊れてしまうことはありません。厚めの絶縁体膜にトンネル効果で電子を叩き込んだり、結晶中の原子を動かしたり、数百度に焼いたり急冷したりはしません。磁石全体として向きを変えることでわずかばかりの影響はありますが、書き換えによって電子の内部状態が変わるのみという原理によりMRAMの書き換え回数は揮発性メモリと同等の回数に達するのです。

図5にSTT-RAMと呼ばれる現在の主流であるMRAMの一種につきそのメモリセルの構成を示しました。

MRAMは、よって、CPUのキャッシュメモリやメインメモリとして使えます。基本回路から一体化しレジスタを含めてCPUもMRAMをベースとすることも検討されています。電源を落としても情報は消えません。SSDやHDDとのやり取りも大幅に減ります。電力と性能の問題を一挙に解決できる素晴らしいメモリになるのではと期待されています。

### 広がるスピントロニクスの研究

メモリ製品化の成功を受けて、電子が持つスピンを活用する多くの試みが行われています。いくつかの例を挙げますと、ある種の金属に電流を流すとスピンの向きが分離する現象があり、これを次のメモリに利用できないか、スピンドで動くトランジスタを作成できないか、電子回路の機能はそのまま部品数を大幅に減らすことはできないか、空間的に安定な特殊なスピンのかたまりを作りこれで信号処理ができないか、などです。また、低次元系と呼ばれる物質でのスピンの振る舞い自体の研究や、人間の脳磁場を高精度に検出しようというものもあります。

ここ東京理科大学工学部電気工学科でもひとつの試みが行われています。写真1は、葛飾キャンパスにある筆者の研究室でスピントロニクスの実験装置と、測定を行っていた大

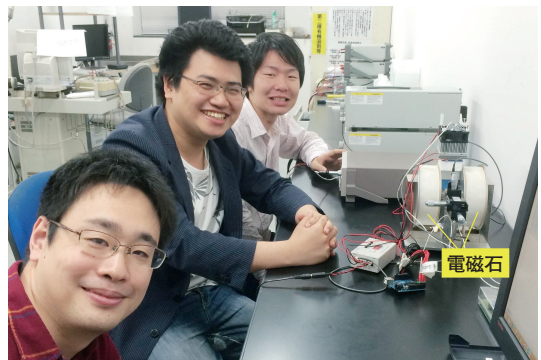


写真1 スピントロニクス評価装置と研究室の学生  
葛飾キャンパスにて

学院修士課程学生と卒業研究生（4年生）を写したものです。装置の丸い部分は電磁石であり、またスピンに刺激を与える装置がついています。これによって生じる集団としてのスピンの向きの揃い方の性質を調べています。

この写真では楽しく笑っていますが、実験を行うときは真剣な表情であり、その後の議論では侃々諤々<sup>かんかんがくがく</sup>という表現がぴったりの状態となります。彼らは所属する工学部電気工学科（就職が良いことで知られる学科です）での学生生活の総仕上げとしてスピントロニクスの発展に貢献しており、この貴重な経験を元に社会に出てそれぞれの分野で活躍して行くでしょう。

### 終わりに

半導体（加工）技術がナノの領域に達したことで、電子がスピンという物理量（量子数）を持つことを活用し、磁石と半導体（エレクトロニクス）の両方の良い点を利用できる時代となりました。スピントロニクスという技術分野ができ、活発な研究開発が現在進められています。まだ、若い分野であり今後の発展が期待されています。

この中で、製品化レベルまで達したMRAMは、不揮発かつ書き換え回数が実用上無限大であるため、情報機器のシステム構成にまで影響を与えています。