

# 磁石の磁化方向を電界で直接制御することに世界で初めて成功

大野 英男

磁石の性質をもつ半導体（強磁性半導体）の磁化の方向を電界によって直接制御することに、東北大学電気通信研究所の大野英男教授らのグループが世界で初めて成功した。外部磁界や電流を使う従来の方法と異なり、電力消費の極めて低い次世代磁気メモリの開発に道を開くもので、成果は *Nature* 2008 年 9 月 25 日号<sup>1</sup> に掲載された。大野教授に研究の意義、展望を聞いた。

## 電界だけで、強磁性半導体の磁化の向きを 10° 変換

**Nature Digest** — 今回の研究は、次世代メモリ開発につながる大きな成果ですね。

**大野** — コンピュータに不可欠なメモリは大きく分けて、電源を切ると記憶保持機能を失う「揮発性メモリ」と、電源に関係なく記憶内容を保持する「不揮発性メモリ」があります。前者の代表はパソコンのメインメモリ「DRAM」で、世界 3 兆円市場といわれるほど広く使われています。後者はフラッシュメモリが主流です。不揮発性メモリは一般的に省エネルギーですが、電荷の有無を「0」「1」に置き換えているフラッシュメモリの場合、高速に書き換えができない、書き換え回数に制限がある、などの点がネックとなっていました。これを解決するのが不揮発性の記憶装置、ハードディスク（HDD）で使われている磁気を利用したメモリというわけです。微少磁石の磁化の向きを「0」「1」として情報を蓄える仕組みです。次世代の大容量メモリ「MRAM」開発に

は、磁化の向きを制御することが重要となってきます。現在、HDD の磁気ヘッドのような外部磁界での制御技術が実用化されていますが、結局は電磁石を使いますので消費電力が減らせません。そこで外部磁界を必要としない、微小な電力消費でできないかの研究が世界的に進んでいます。その中で、一歩先を行っているのが「スピン注入磁化反転法」です。

**ND** — それはどのような手法ですか？

**大野** — 電子はスピンという微小磁石の性質をもっており、上向き、あるいは下向きの状態を取りますが、どちらかに電子の向きが偏った電流（スピン偏極電流）を高密度にデバイスに流すことで、磁化の向きを反転させます。ほかに強磁性体薄膜を機械的に引き伸ばしたり（磁歪）、偏光の光を照射したりして磁化を制御できることが報告されています。最近、東京大学の十倉好紀先生らはマルチフェロイクス（強磁性と強誘電性をあわせもった物質）が磁界によって電気が分極するふるまいを見つけました<sup>2</sup>。その逆の電界による磁化制御に期待がかかりますが、まだ成功の報告はありませんでした。こうした中で、我々は電界で磁化の向きを約 10° 変えることに成功しました。ねらいは 180° の反転ですが、90° でもそれ以下でも、安定な点の間での磁化制御（スイッチング）を「0」「1」に置き換えることができれば実用化の可能性は開けることになります。大きな前進といえます。

**ND** — 成功の秘訣は？

**大野** — 我々は、ガリウムヒ素（GaAs）の一部を磁性元素のマンガンで置き換えた（Ga,Mn）As が、磁石と半導体の性質をもった強磁性半導体であることを見つけ、研究してきました。この物質の磁化方向を決める磁気異方性（磁化の向きやすい方向のこと）は、物質内部の正孔（プラスの電荷をもつキャリア）濃度に依存することがわかってきました。そこで、我々は電流を印加することで、素材内の正孔濃度を増減させて、磁気異方性を変化できないかと考えたわけです。デバイス作りが最も重要になりますが、我々のデバイスは、GaAs の基板上に作った（Ga,Mn）As の強磁性半導体薄膜の上に、高い比誘電率の性質をもつ絶縁膜（ZrO<sub>2</sub>）と金属ゲート電極（Au/Cr）を載せた構造（図 1）となっています。（Ga,Mn）As の磁化方向は薄膜の表面内にあり、磁気異

東北大学 大野英男

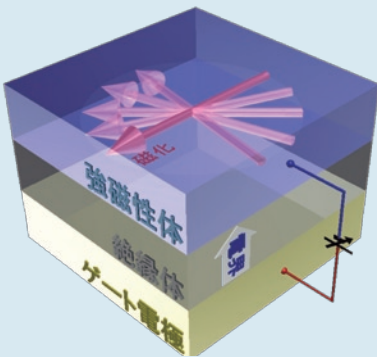
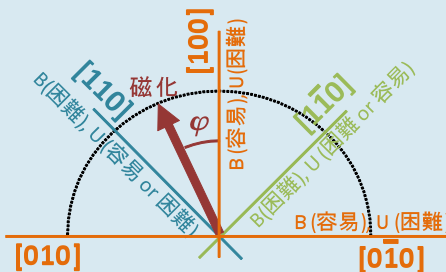
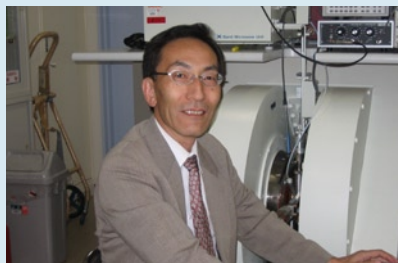


図 1 電界によって磁化方向を制御するデバイスの構造模式図。（Ga,Mn）As の強磁性半導体薄膜の上に高い比誘電率の性質をもつ絶縁膜（ZrO<sub>2</sub>）と金属ゲート電極（Au/Cr）を載せた構造（図は、上下が逆）。（Ga,Mn）As の磁化方向は薄膜の表面内にあり、電流を印可することで磁化の向き（矢印）が変化した。

図 2 （Ga,Mn）As の磁化の向きやすい方向は、B [水平方向（0°、180°）と垂直方向（90°）] の二軸の磁気異方性と U [45°、135°] の一軸磁気異方性の 2 種類ある。電界によって磁化の向きは、角度 φ だけ変化した。





大野 英男／(おおの・ひでお)  
東北大学電気通信研究所教授。工学博士。1954年、東京都生まれ。1977年、東京大学工学部電子工学科卒業。1982年、同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年、北海道大学工学部講師、翌年、同助教授。1988年～1990年、米国IBMトーマス・J・ワトソン研究所客員研究員。1994年、東北大学工学部電子工学科教授。1997年～2000年、文部省特定領域研究「スピン制御半導体」領域代表者。2002年～2006年、文科省ITプログラム「高機能・超低消費電力メモリの開

発」プロジェクトリーダー、2006年、中国科学院半導体研究所名誉教授。2008年、東北大学ディステイニングイシュープロフェッサー。

磁石の性質をもつ強磁性半導体を開発し、その後、一貫してスピントロニクス分野を切り開く開拓者として活躍。1988年、日本IBM科学賞(エレクトロニクス分野)。2005年、日本学士院賞(榊裕之氏と共同受賞)、日本人3人目となる欧州物理学会のアジレント欧州物理学賞など受賞歴多数。

方性は2つ(図2)存在しています。1つは、[010](図では角度 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ )と[100]( $90^\circ$ )の2つの方向に向きやすい二軸と、[110]( $45^\circ$ 、 $135^\circ$ )に向きやすい一軸の磁気異方性です。素材に電流を印加し、磁化の向きを測定する(プレーナーホール抵抗による観測)と、一軸の磁気異方性の大きさを表す磁界は、電界に応じて変化し、符号も制御することができました。それに伴い、磁化の角度 $\varphi$ も電界に応じて変化する、つまり電界依存性をもつことを確認しました。簡単にいえば、磁気特性が電荷キャリア濃度に依存している、強磁性半導体を使ったことが成功につながったわけです。

#### 磁化制御のスイッチングが将来の課題

ND — 今後の課題は何ですか？

大野 — 先ほども触れましたが、磁気メモリに応用するには、磁化制御をスイッチのように1つの安定点から別の安定点に移動させることが不可欠です。我々は、デバイスにもう1つ、符号を制御できる一軸の磁気異方性を追加すれば、磁化の角度を $180^\circ$ 変化させられることをシミュレーションで確認しました。それにはMnの組成率を調整したり、正孔キャリア濃度を変えるなどして、新たな薄膜の研究が必要になってくると思っています。

ND — 今回の成果は、ホットなスピントロニクス分野の研究ですね。

大野 — 半導体は電子の電荷を使って情報処理、記録をしますが、磁性体(磁石)は電子のスピンを利用して記録します。この2つをナノテクノロジーで融合させ、新しいデバイスを作ろうというのがスピントロニクスです。フランスで1988年に報告された「巨大磁気抵抗効果」と、我々の強磁性半導体の発見などがスピントロニクスの発展に寄与しています。磁場によって導電性が大きく変化する現象である巨大磁気抵抗は2007年のノーベル物理学賞につながりましたが、この分野の研究は興味深いものが多いですね。磁石の磁化の向きの制御は、スピントロニクスの重要な柱といえます。

ND — 基礎研究だけでなく、実用化研究も同時に進めていますね。

大野 — 最近、スピントロニクス技術を用い、不揮発性の集積回路(IC)の試作に世界で初めて成功しました。現在のICは、基板上の演算素子(ロジック部)と記憶素子(メモリ部)が分離されているため素子間のデータ移送に時間がかか

り、消費電力が大きかったのですが、シリコンのロジック部と不揮発性の磁気メモリ部を重ねることでこの弱点を克服しました。こうしたスピントロニクス分野の研究進展は、大容量で次世代メモリ「MRAM」開発に大きく貢献します。DRAM並みの大容量のMRAMが普及すれば、省エネなど人類に役に立つわけです。電機メーカーと共同で日本発の新しい電子デバイスを開発できればと思っています。

#### スピントロニクス研究は興奮の連続

ND — この分野に進んだ経緯と若手へのメッセージは？

大野 — もともと半導体の結晶成長、量子構造などに興味があったのですが、1988年に江崎玲於奈先生のいるIBMの研究所に行き、「今までと違うことをやろう」と思い、III-V族半導体に磁性をもたせる研究を始めました。最初はそういうものができたらおもしろだろうなという、単なる好奇心の延長でしたが、インジウムヒ素にMnを添加した(In,Mn)Asが常磁性体になること見つけたときは手応えを感じました<sup>3</sup>。数年後には強磁性体になることも発見<sup>4</sup>、さらに(Ga,Mn)Asも低温で強磁性体になることを確認しました<sup>5</sup>。そのときはそんなに注目されたわけではありませんが、Mnの添加で半導体が強磁性体になる仕組みを発表した<sup>6</sup>後は、論文の引用が急激に増えました。その後、文部科学省の特定領域研究の領域代表を務め、多彩なメンバーに恵まれ多くの成果を上げることができました。

材料科学は日本が得意とし、世界的にリードしている分野です。競争も激しいですが、未知の発見や興奮の連続で、興味が尽きません。自らが未踏の世界を切り開いている実感があります。これから多くの発見やブレイクスルーがありそうです。この分野に限らず、若い人には、世界の科学や技術に自分が貢献するのだという気概と、自分の貢献により科学や技術が変わるのだという実感をもって、さらに先に進んでもらいたいと思っています。

ND — ありがとうございます。 ■

聞き手は、長谷川聖治(読売新聞科学部記者)。

1. Chiba D. et al. *Nature* **455**,515-518(2008)
2. Tokura Y. et al. *Science* **312**,1481-1482(2006)
3. Munekata H. et al. *Phys. Rev. Lett.* **63**,1849-1852(1989)
4. Ohno H. et al. *Phys. Rev. Lett.* **68**,2664-2667(1992)
5. Ohno H. et al. *Appl. Phys. Lett.* **69**,363-365(1996)
6. Dietl T. et al. *Science* **287**,1019-1022(2000)