

# スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成

## — 究極のグリーン IT 機器の実現に向けて —

湯浅 新治\*、久保田 均、福島 章雄、薬師寺 啓、長浜 太郎、鈴木 義茂、安藤 功兒

不揮発エレクトロニクスによる究極のグリーンIT機器の実現を目指して、スピントロニクスの本格研究を行った。不揮発エレクトロニクスの中核となる大容量・高速・高信頼性の不揮発性メモリを実現するために、酸化マグネシウム (MgO) を用いた高性能の磁気抵抗素子とその量産技術を開発した。この技術を用いた超高密度ハードディスク (HDD) 磁気ヘッドはすでに製品化され、現在究極の不揮発性メモリ「スピンRAM」の研究開発が精力的に進められている。

**キーワード:** スピントロニクス、磁気抵抗効果、ハードディスク (HDD)、MRAM、スピン RAM、不揮発エレクトロニクス、グリーン IT

## Creating non-volatile electronics by spintronics technology

– Toward developing ultimate green IT devices –

Shinji Yuasa\*, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima,  
Kay Yakushiji, Taro Nagahama, Yoshishige Suzuki and Koji Ando

We have been promoting *Full Research* to develop ultimate green IT devices based on non-volatile electronics. A core technology of non-volatile electronics is a non-volatile memory possessing features such as large capacity, high-speed operation, and high endurance. To develop such an ultimate non-volatile memory, we developed a novel high-performance magnetic tunnel junction device based on magnesium oxide (MgO) and the underlying mass-manufacturing technology. This technology has already been commercialized for the production of the magnetic heads of ultra-high density hard disk drives (HDD). Now we are also performing intensive R & D activities for developing the ultimate non-volatile memory called Spin-RAM.

**Keywords:** Spintronics, magnetoresistance, hard disk drive (HDD), MRAM, Spin-RAM, non-volatile electronics, green IT

### 1 はじめに

#### 1.1 不揮発エレクトロニクスの必要性

シリコン LSI テクノロジーを中核とした現在のエレクトロニクスは、基本的に“揮発性” (電源を切ると記憶が消失してしまう性質のこと) である。これは、コンピュータや情報家電などの機器で用いられている汎用メモリの DRAM<sup>1)</sup> や高速メモリの SRAM<sup>2)</sup>、さらに CPU 内の論理演算回路などの電子デバイスが全て揮発性であるからである (図 1)。一般に電子機器は、入力“待ち時間”が非常に長い。例えば、パソコンで文書などの作成を行っている場合、キー入力から次のキー入力までの大半の時間、パソコンは次の入力を待っているだけで何の仕事もしていない。しかし、このような“待機中”でも電子機器の電源は入っており、電力を消費している。これは、電子機器が揮発性であり、瞬時に電源を切れないことに起因している。もし仮に、コンピュ

ータや情報家電を構成する電子デバイスを全て“不揮発性” (電源を切っても記憶が保持される性質のこと) にできれば、必要に応じて瞬時に電源のオン/オフができる“クイック・オン”や、「電源オフの状態を基本状態にして、演算をする瞬間だけ電源をオンにする」という“ノーマリー・オフ”の基本設計が実現できる (図 1)。特に“ノーマリー・オフ”の概念は、電源オンを基本とした現在のエレクトロニクスとは対極にある新しい概念であり、電力をほとんど消費しない究極のグリーン IT になるはずである。

このような夢のノーマリー・オフ電子機器を実現するためには、(i) コンピュータのメインメモリ (DRAM と SRAM) の不揮発化、(ii) 論理演算回路の不揮発化、という不揮発エレクトロニクス技術の開発が必要となる。産総研では、ノーマリー・オフを目指した研究開発の第一段階として、(i) の「大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた不揮発性メモリ」

産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

Nanoelectronics Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail: yuasa-s@aist.go.jp

Original manuscript received May 11, 2009, Revisions received June 30, 2009, Accepted July 1, 2009

を実現するための研究開発を遂行している。ここで、「高信頼性」とは主に「書き換え耐性」のことである。コンピュータのメインメモリとして用いられる DRAM や SRAM に代わるものには、「 $10^{15}$  回書き換えても壊れない、事実上無限回書き換えが可能」という優れた書き換え耐性が要求される。ちなみに、現在外部ストレージとして用いられているフラッシュメモリの書き換え耐性は  $10^4 \sim 10^6$  回しかないため、とてもメインメモリとして使えない。また、既に製品化されている不揮発性メモリの代表格である強誘電メモリ (FeRAM) の書き換え耐性は  $10^8$  回程度であるため、やはりコンピュータのメインメモリとして用いるには難がある。現在開発中の不揮発性メモリである相変化メモリ (PRAM あるいは PCRAM と呼ばれる) も、書き換え回数に制限がある。これに対して、スピントロニクス技術 (後述) を用いれば、無限回書き換えが可能な不揮発性メモリの開発が可能となる。

ところで図 1 に示すように、不揮発性・大容量の外部ストレージとして、ハードディスク駆動装置 (HDD) が現在の主流である。今後、小容量や高付加価値の用途ではフラッシュメモリを用いた SSD<sup>用語3</sup> が HDD に代わっていくと予想されるが、使用台数が多い大容量・低価格の用途では今後もしかばらくは HDD が外部ストレージの主役を担うと予想されている。しかし、HDD はその消費電力の大きさが問題視されている。HDD を低消費電力化するには、とにもかくにも記録媒体ディスクのサイズ (直径) を小さくすることが重要であり、そのためには HDD のさらなる高記録密度化が鍵となる。現在の主流は大容量の 3.5 インチ HDD (ディスク直径が 3.5 インチという意味) であるが、3.5 インチ HDD は消費電力が非常に大きい (典型的な数値として、1 台あたり 5 ワット前後)。一方、2.5 インチ HDD の

消費電力は 3.5 インチ HDD の 5 分の 1 程度と小さい。HDD を高記録密度化することによって現在主流の 3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD に置き換えることができれば、HDD 全体で大幅な消費電力の低減が可能となる。産総研では、HDD の高記録密度化を目指した研究開発も行っている。

## 1.2 不揮発エレクトロニクスを実現するスピントロニクス技術

「スピントロニクス」とは、電子の持つ電氣的性質 (電荷) と磁氣的性質 (電子スピン) の両方を活用して新しい機能を創出する新しい分野である (図 2)。電子の電荷のみを利用したシリコン・エレクトロニクスは IT 技術の基盤であるが、不揮発記憶を苦手としている。一方、電子スピンのみを利用した磁気工学は不揮発記憶を得意としているが、論理演算や低消費電力性は不得意分野である。これらの従来技術に対して、スピントロニクス技術を用いれば、不揮発性と高信頼性、低消費電力、論理演算などの特徴を同時に実現できる可能性がある。大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた不揮発メモリは、究極のノーマリー・オフを目指した不揮発エレクトロニクスの中核となる。

スピントロニクス分野では、電荷とスピンの相互作用を活用するために何らかの量子力学的な現象 (量子効果) を利用する。その中でも最も重要な効果が「磁気抵抗効果」である。磁気抵抗効果 (Magnetoresistance を略して MR 効果とも呼ばれる) とは、固体物質や固体素子に磁界を印加することにより電気抵抗が変化する現象であり、その電気抵抗の相対的な変化率を「磁気抵抗比」あるいは「MR 比」という。磁気抵抗効果を利用すれば磁界信号を電気信号に変換できるため、ハードディスク (HDD) の磁気センサ素子 (再生磁気ヘッド) などに利用できる。さらに、

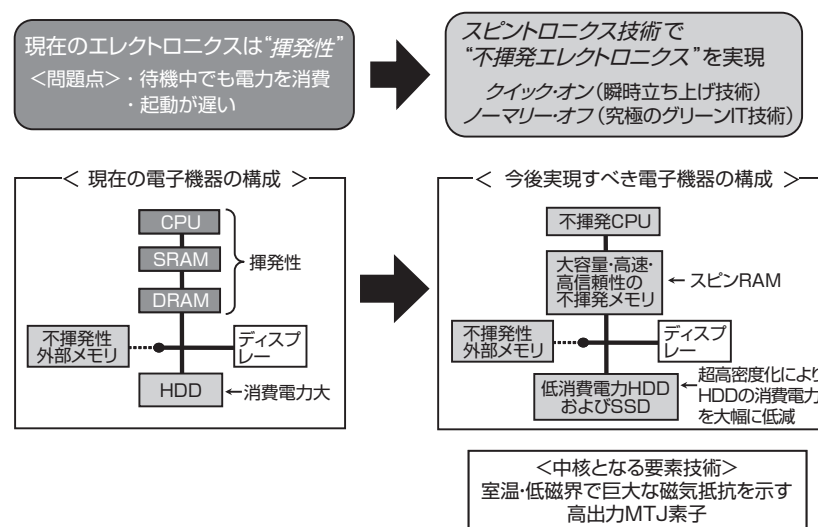


図1 現在のエレクトロニクスと将来実現すべき不揮発エレクトロニクス

強磁性体が持つ磁気ヒステリシス (履歴) 特性を活用すれば、磁気記録と同様の不揮発記憶が可能となる。

磁気抵抗効果のデバイス応用において、室温かつ低磁界 (数ミリ T (テスラ) 以下) における MR 比が応用上の性能指数となる。これは、通常の電子回路の中で生成できる磁界がせいぜい数ミリ T と小さいためである。室温・低磁界の MR 比が大きければ大きいほど、より高性能なデバイスの開発が可能となる。この応用上重要な室温・低磁界の MR 比は、かつてはわずか 1~2% しかなかったため、応用上有用とは考えられなかった。ところが、1988 年に A. Fert らと P. Grünberg らは磁性金属多層膜の巨大磁気抵抗効果 (GMR 効果) を発見し、室温・低磁界において従来よりも 1 桁大きな 10% 前後の MR 比を実現した。この発見により、A. Fert と P. Grünberg は 2007 年にノーベル物理学賞を授与されている。GMR 効果は、発見後約 10

年で HDD の再生磁気ヘッド (GMR ヘッド) として実用化され、その後の HDD の急速な大容量化をもたらした (図 3)。また、GMR 効果の発見が契機となって磁気抵抗効果の研究開発が世界規模で精力的に行われ、室温における TMR 効果 (後述) の実現にもつながった (図 3)。GMR 効果については本稿では割愛するので、詳しくは 2007 年ノーベル物理学賞の公式資料<sup>[1]</sup>を参照されたい。TMR 効果については、次節以降で詳しく述べる。

### 1.3 室温TMR効果の実現とその応用

厚さ数 nm 以下の絶縁体層 (トンネル障壁) を 2 枚の強磁性金属層 (強磁性電極) で挟んだ素子を、「磁気トンネル接合素子 (Magnetic Tunnel Junction (MTJ) 素子)」と呼ぶ (図 4)。絶縁体は通常は電流を通さないが、絶縁体の厚さが数 nm 以下の極薄になると量子力学的な効果によって微小な電流が流れる。この現象は「トンネル効果」と呼ばれ、この効果によって生ずる電流と電気抵抗を、それぞれ「トンネル電流」、「トンネル抵抗」という。電極層が強磁性体の場合、平行磁化状態 (P 状態: 図 4 (a)) ではトンネル抵抗が小さくなり、より大きな電流が流れる。一方、反平行磁化状態 (AP 状態: 図 4 (b)) ではトンネル抵抗が大きくなり、トンネル電流は減少する。この現象を、「トンネル磁気抵抗効果」(英語の Tunnel Magneto Resistance の頭文字を取って TMR 効果) という。MTJ 素子に磁界を印加すれば P 状態と AP 状態の間をスイッチできるため (図 4 (d))、磁気抵抗が生じる。また、強磁性体は磁気ヒステリシス特性を持つため、零磁界において P 状態と AP 状態の 2 値安定状態を持つことができ、

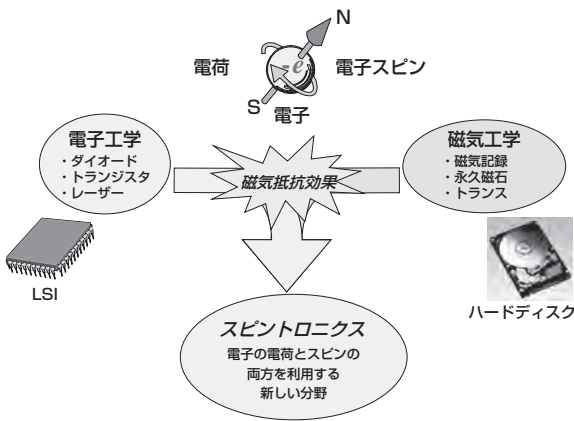


図 2 スピントロニクスと磁気抵抗効果

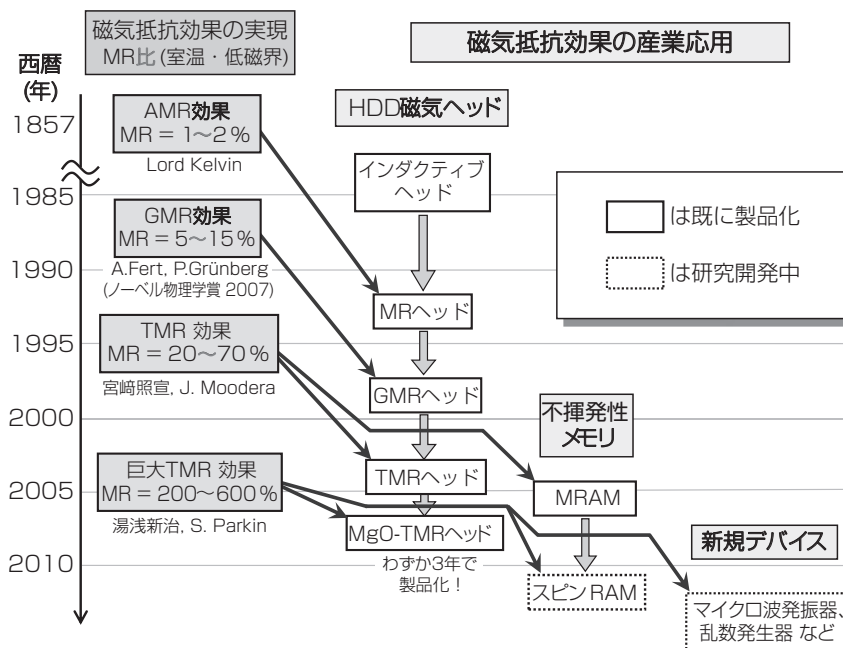


図 3 磁気抵抗効果とその産業応用の歴史と展望

MTJ素子は1ビットの情報を“不揮発”に記憶することができる。

低温でTMR効果が発現することは1970年代から知られていたが、室温で磁気抵抗が得られなかったため、その後10数年の間あまり注目されることはなかった。しかし、1988年に上述のGMR効果が発見され、これを用いた磁気センサー(HDD磁気ヘッドなど)の研究開発が盛んになるにつれて、TMR効果にも再び注目が集まるようになった。1995年に宮崎ら<sup>[2]</sup>とムデーラ(J. Moodera)ら<sup>[3]</sup>は、トンネル障壁にアモルファス(原子の配列がランダムな物質)の酸化アルミニウム(AI-O)、強磁性電極に多結晶のFeやCoなどの遷移金属強磁性体を用いたMTJ素子を作製し、室温・低磁界で20%近いMR比を実現した(図3)。これが室温MR比の最高値(当時)であったため、TMR効果が一躍脚光を浴びることとなった。その後、AI-Oトンネル障壁の作製法や電極材料の最適化が精力的に研究され、現在までに室温で70%を超えるTMR効果が実現されている。

室温TMR効果は、実現から約10年後の2004年にHDD再生磁気ヘッド(TMRヘッド)として実用化され(図5)、このTMRヘッドと垂直磁気記録媒体の組み合わせによって、記録密度が100 Gbit/inch<sup>2</sup>の高密度HDDが実現された。さらに、2006年にはMTJ素子を用いた比較的小容量(4 Mbit ~ 16 Mbit程度)の不揮発性メモリMRAM(図6)が製品化され、高信頼性(無限回書き換

え可能)を有する唯一の不揮発性メモリとして注目されている。ここで、MRAMが無限回書き換え可能な理由は、スピンの向き反転(つまり書き込み)には材料劣化のメカニズムが全くないためである。また、MRAMの動作速度はDRAMよりも速く、現在CPU内で用いられている高速メモリSRAMに近い動作速度も実現可能である。しかし、アモルファスAI-Oトンネル障壁を用いた従来型MTJ素子の性能(室温MR比)の改善はほぼ飽和していたため、これがHDDやMRAMのさらなる高性能化に向けて深刻な問題となっていた。例えば、アモルファスAI-OやTi-O障壁を用いたMTJ素子では、200 Gbit/inch<sup>2</sup>より高い記録密度のHDDやGbit級の大容量MRAMを開発することは困難であった(図4)。この限界を超えて、より高集積・高速・低消費電力の次世代デバイスを開発するためには、より高いMR比の実現が不可欠であった。

このように行き詰まりを見せていたアモルファスのトンネル障壁とは別に、結晶性のトンネル障壁を用いた単結晶MTJ素子に関する第一原理の理論計算が2001年前後に発表され、1000%を超える巨大なMR比が理論的に予測された。2004年に産総研において、結晶性の酸化マグネシウム(MgO)をトンネル障壁に用いたMTJ素子で巨大な室温TMR効果が世界で初めて実験的に実現され、TMR効果の応用研究が大きく進展することとなった。本稿では次章以降、結晶MgOトンネル障壁を用いた超高性能MTJ素子の研究開発における第1種基礎研究、第2

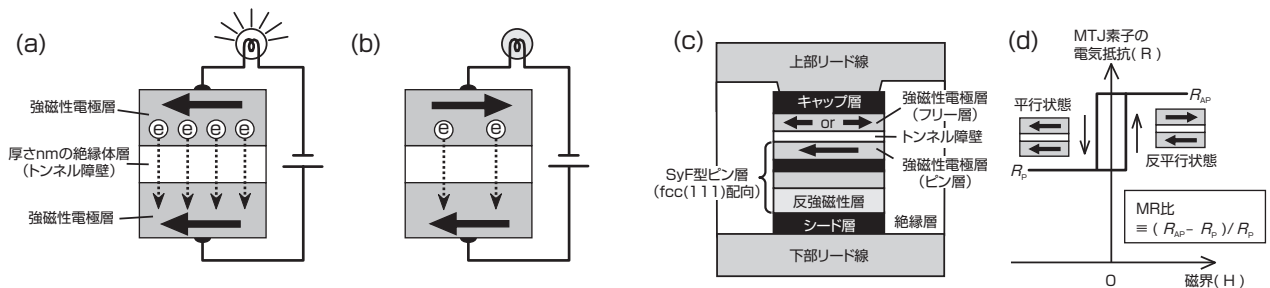


図4 磁気トンネル接合(MTJ)素子のトンネル磁気抵抗(TMR)効果

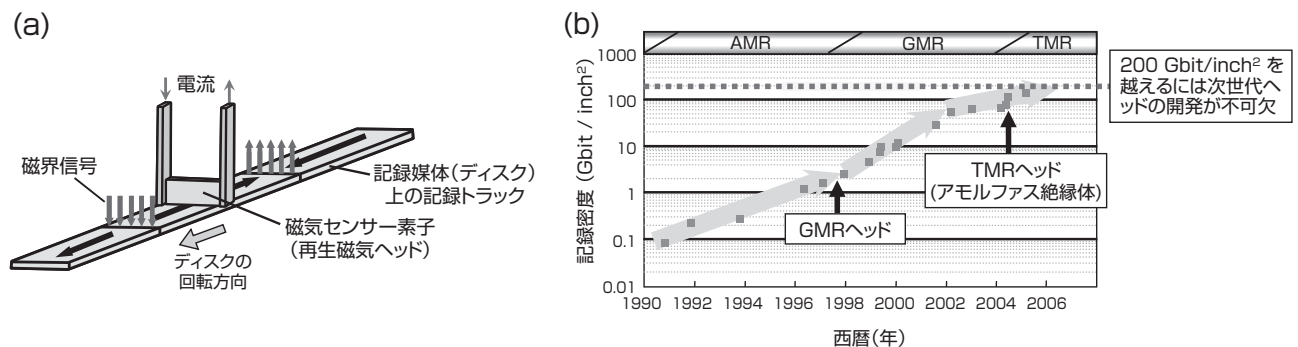


図5 (a) ハードディスク(HDD)の再生磁気ヘッドの仕組み。(b) HDDの記録密度と再生磁気ヘッドの変遷

種基礎研究、製品化の順で紹介し、本格研究<sup>[4]</sup>をいかに遂行したかについて解説する。

産総研エレクトロニクス研究部門スピントロニクスグループでは、産総研第2期について次の2つのアウトカムを掲げて研究開発を行った。

- (1) 超高密度HDDのための次世代磁気ヘッドの実用化  
HDDの超高密度化・小型化による消費電力の低減を実現するために、200 Gbit/inch<sup>2</sup>を超える超高密度HDD用の次世代磁気ヘッドの実用化を目指す。
- (2) 究極の不揮発メモリ（スピンRAM）の基本技術の開発  
不揮発エレクトロニクスの中核技術となる大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた究極の不揮発性メモリ“スピンRAM”の基本技術を開発する。

これら2つのアウトカムを創出するために、(i) 画期的な高性能MTJ素子の開発と(ii) その量産技術の開発の2つが研究開発目標となる。

## 2 要素技術の開発

### 2.1 酸化マグネシウム (MgO) トンネル障壁のTMR効果の理論

本節では、TMR効果の物理理論について説明する。体心立方晶 (bcc) Fe の (001) 結晶面と酸化マグネシウム (MgO) の (001) 結晶面は結晶格子の整合性が良いため、高品質な Fe (001) /MgO (001) /Fe (001) 構造の全単結晶 MTJ 薄膜が実験的に作製可能である。Fe や Co を主成分とする合金の bcc (001) 電極層と MgO (001) トンネル障壁の組み合わせでも、同様に高品質の単結晶 MTJ 薄膜の作製が可能である。2001 年に Butler ら<sup>[5]</sup>と

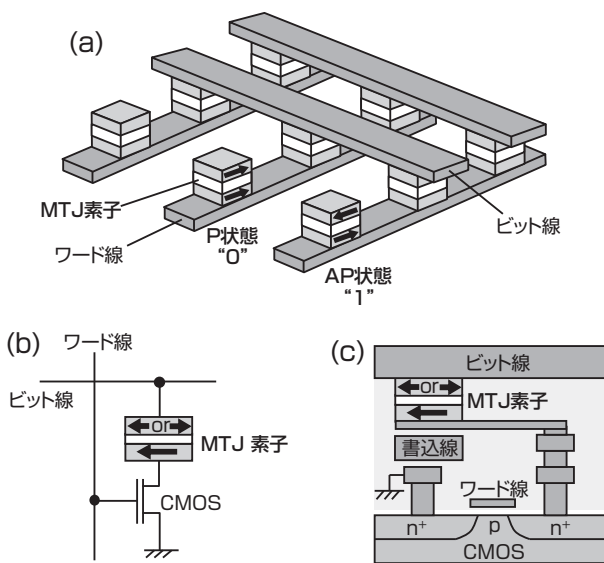


図6 不揮発性メモリ MRAM の (a) 概略図、(b) 回路図、(c) 断面図

Mathon ら<sup>[6]</sup>は、Fe (001) /MgO (001) /Fe (001) 構造の単結晶 MTJ 素子に関する第一原理の理論計算を行い、1000 % を超える巨大な MR 比が理論的に期待できることを示した。この巨大 TMR 効果の物理機構は、以下に述べるように従来のアモルファス Al-O トンネル障壁の場合とは異なるものである。

従来のアモルファス Al-O トンネル障壁および結晶 MgO (001) トンネル障壁中の電子のトンネル過程の違いを図7に模式的に示す。強磁性電極中には種々の波動関数の対称性を持った伝導電子の状態（ブロッホ状態という）が存在する。アモルファス Al-O トンネル障壁の場合、障壁中では原子配列の対称性が崩れているため、電極中の種々のブロッホ状態が混ざり合ってトンネル伝導してしまう(図7(a))。電極中の各ブロッホ状態は、その軌道対称性に依存して正や負の MR 比を生じる。アモルファス Al-O 障壁では、これらのブロッホ状態が混ざり合って全てトンネル伝導してしまうため、各ブロッホ状態の MR 比の平均値(つまり MTJ 素子の MR 比) は大きな値にはならず、室温で 70 % を大きく超える MR 比は得られない。

一方、トンネル障壁を結晶性の MgO (001) にすると、全く違った特性が理論的に予想される。図7(b)は、単結晶 MTJ 素子のトンネル過程を模式的に示したものである。トンネル電子は自由電子と仮定されることが多いが、実際の絶縁体トンネル障壁のバンドギャップ中に存在する電子の浸み出し状態（エヴァネッセント状態という）は特有の軌道対称性と特有のバンド分散を持っており、自由電子とは性質が大きく異なる。MgO (001) バンドギャップ内には、 $\Delta_1$  (*spd* 混成の高対称状態)、 $\Delta_5$  (*pd* 混成状態)、 $\Delta_2$  (*d* 電子的な低対称状態) という3種類のエヴァネッセント状態が存在する。これらの状態のトンネル障壁中での状態密度の減衰率は各状態の軌道対称性に大きく依存し、 $\Delta_1$  エヴァネッセント状態は、トンネル障壁中での状態密度の減衰が最も緩やかである(つまり減衰距離が長い)。したがって、この  $\Delta_1$  状態を介してトンネル電流が支配的に流れる

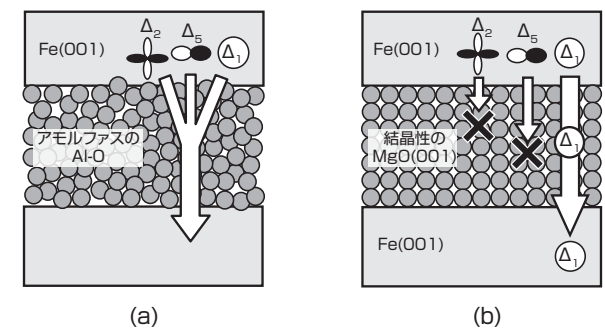


図7 電子のトンネル伝導の模式図。(a) アモルファス Al-O トンネル障壁の場合、(b) 結晶 MgO (001) トンネル障壁の場合

ことになる(図7(b))。理想的なトンネル過程では、Fe(001)電極中の $\Delta_1$ ブロッホ状態のみがMgO中の $\Delta_1$ エヴァネッセント状態と結合することができるため、支配的なトンネル経路はFe- $\Delta_1 \leftrightarrow$  MgO- $\Delta_1 \leftrightarrow$  Fe- $\Delta_1$ となる。ここで注目すべきは、Fe(001)電極中の $\Delta_1$ ブロッホ状態が非常に大きな正のMR比を生み出すことができる特殊な電子状態であるという点である。したがって、図7(b)のように $\Delta_1$ 対称性を持った電子だけが選択的にMgOトンネル障壁を透過することにより、1000%を超えるような巨大なMR比が理論的に期待される。なお、このような巨大なMR比の出現が理論的に期待されるのはbcc Fe(001)電極に限ったことではなく、FeやCoをベースにしたbcc構造の強磁性金属・合金の多くで、同様の巨大なMR比が理論的に予想される。

## 2.2 MgOトンネル障壁の巨大TMR効果の実現

2001年に出された結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果の理論予測と前後して、実際に単結晶Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)構造のMTJ素子を作製する試みが欧州の公的研究機関を中心に行われたが、不成功であった。従来のアモルファスAl-Oトンネル障壁を超える室温MR比は実現されなかったため、結晶MgOトンネル障壁に対する期待が失われていくとともに、巨大TMR効果の理論予測に対して懐疑的な見解も出されるようになった。このような状況下でも産総研では結晶MgOトンネル障壁の実験研究を続け、2004年に分子線エピタキシー(MBE)法を用いて高品質の単結晶Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)-MTJ素子の作製に成功した(図8)<sup>[7][8]</sup>。この単結晶MgO-MTJ素子を用いて、2004年初頭にアモルファスAl-O障壁を超える室温MR比を世界で初めて実現した(図9の①)<sup>[7]</sup>。この論文で、高い再現性や優れた電圧特性などの実用性も同時に実証されたため、結晶MgOトンネル障壁が大きく脚光を浴びる歴史的な転換点となった。産総研ではその後、結晶MgOトンネル障壁をさらに高品質化することにより、2004年の後半には室温で180%というさらに巨大なMR比を実現した(図9の②)<sup>[8]</sup>。一方、この産総研の成果とほぼ同時期にIBMのParkinら

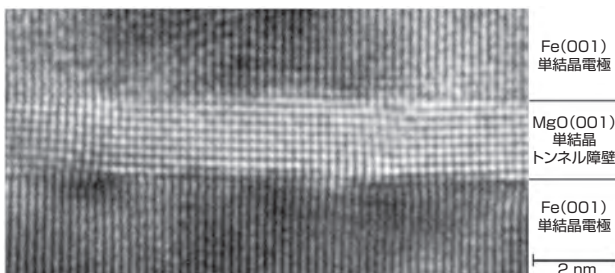


図8 単結晶Fe/MgO/Fe-MTJ素子の断面の電子顕微鏡写真<sup>[8]</sup>

は(001)結晶面が優先配向した多結晶(配向性多結晶)MgO(001)トンネル障壁を用いてMTJ素子をスパッタ法により作製し、室温で220%のMR比を実現した(図9の③)<sup>[9]</sup>。微視的に見れば配向性多結晶MTJ素子は単結晶MTJ素子と基本的に同じ構造であるため、同じ機構で巨大TMR効果が発現しているものと考えられる。このような結晶MgOトンネル障壁の非常に大きなTMR効果は、従来のTMR効果とは区別して「巨大TMR効果」(giant TMR effect)とも呼ばれている(著者らが命名)。なお、図9の①、②、③の成果(文献<sup>[7][9]</sup>)は2007年ノーベル物理学賞の公式文書<sup>[1]</sup>の中でも紹介されており、歴史的な論文として世界的に認知されている。

また産総研では、高品質の単結晶MgOトンネル障壁を用いて種々の第1種基礎研究を行い、巨大TMR効果以外にも、MgO障壁の厚さに対するTMR効果の振動現象<sup>[8][10]</sup>や、トンネル電子が媒介する層間換結合<sup>[11]</sup>、複雑なスピン依存トンネルスペクトル<sup>[12]</sup>など、アモルファスAl-Oトンネル障壁では観測されたことのない新現象の観測に成功している。これらの現象の物理機構の理解が進めば、トンネル効果の物理のさらなる発展につながると期待される。

## 2.3 結晶MgO-MTJ素子の量産技術の開発

上述のように、産総研では2004年に巨大TMR効果の実現という画期的な第1種基礎研究の成果をあげたが、この時点ではまだ結晶MgO-MTJ素子の産業応用に対して懐疑的な見方が産業界では支配的だった。その主な理由は、産総研が開発した単結晶MgO-MTJ素子およびIBMが開発した配向性多結晶MgO-MTJ素子は、どちらもデバイス応用には適さない素子構造であったためである。HDD磁気ヘッドやMRAMへの応用では、「SyF型ピン層」と呼ばれる下部構造(図4(c))が必須となる(詳細は割愛)。

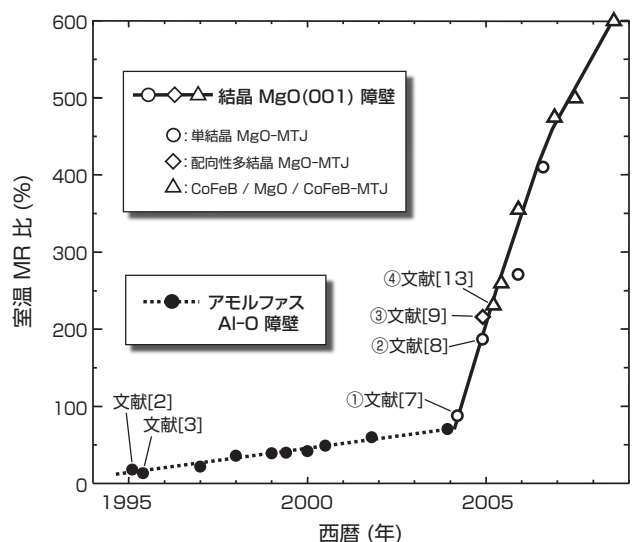


図9 室温MR比の改善の歴史

ここで、この“実用的な下部構造”の上に、MgO-MTJ 素子を作製できないという深刻な問題があった。その理由は、SyF 型ピン層が (111) 面配向した面心立方晶 (fcc) を基本構造としているためである。fcc (111) 構造は面内 3 回転対称の結晶構造を持つため、その上に結晶対称性が異なる MgO (001) 層 (面内 4 回転対称構造) を成長できない、という結晶成長上の根本的な問題があった。

産総研では当初、「面内 4 回転対称を持つ下部構造を新たに開発すればよい」と考え、デバイスメーカーに対して MgO-MTJ 素子技術の“売り込み”を行った。しかし、デバイスメーカーからの反応は、「下部構造の信頼性は、製品 (HDD や MRAM) の信頼性に直結する。これまで約 10 年の研究開発の末にようやく SyF 型ピン層という信頼性のある下部構造を開発したのだから、今さら新しい下部構造を開発することはできない (そんな余裕はない)」というものであった。確かに、製品化のためにはたくさんある要求を全て満たすことが必須となる。たとえ飛び抜けた性能を持つ新技術であっても、致命的な欠点の一つでもあると製品化にはたどり着けず、“死の谷”の中で文字どおり死ぬことになる。この点が本格研究を遂行する上での最難関であることは頭では分かっていたが、実際に経験してみても改めて実感させられた。この時点で“定石的な解決手段”は、

(i) 面内 4 回転対称構造の下部構造を力づくで新規開発する、(ii) 面内 3 回転対称の SyF 型ピン層の上に作製可能な新しいトンネル障壁を開発する、の 2 つであったが、どちらの場合も少なくとも 5 ~ 10 年の開発期間を要するであろう難題である。さらに、デバイスメーカーの要求は、「すぐに開発・生産ラインに導入できるレベルの完成された技術」というものであったため、そのようなソリューションを

産総研単独で開発することはほとんど不可能であった。このような状況下で、産総研は製造装置メーカーのキヤノンアネルバ (株) と共同研究を開始し、以下に述べる“画期的な解決策”を実現した。

製造装置メーカーという「製造装置を作っているだけ」と思われがちであるが、現在の製造装置メーカーは装置開発だけでなく、新材料や新デバイスの生産プロセス技術の開発という重責も担っている。本研究開発では、産総研の持つ優れた材料・デバイスの技術シーズと製造装置メーカーの持つ優れた製造プロセス技術・装置を統合することによって、上述の難題の解決を目指した (図 10)。特に、同社の生産用スパッタ装置は HDD 産業界における世界標準の製造装置であったため、同装置を用いて量産技術を開発できれば速やかにデバイスメーカーの生産ラインに技術移管することが可能となる。

キヤノンアネルバ (株) との共同研究で、下部の強磁性電極にアモルファス CoFeB 合金を用いると、その上に高品質の配向性多結晶 MgO (001) トンネル障壁層を室温で成長できることを発見した (図 11 (a))<sup>[13]</sup>。この極めて特殊な結晶成長様式を用いた CoFeB/MgO/CoFeB 構造の MTJ 素子は、下部電極層がアモルファスであるために任意の地下層の上に作製することができ、しかも室温スパッタ成膜で作製できるために生産プロセス適合性と生産効率は理想的である。この CoFeB/MgO/CoFeB - MTJ 素子を 250°C 以上の温度で熱処理すると、図 11 のように界面からアモルファス CoFeB 層の結晶化が起り、MgO (001) 層との格子整合が良い bcc CoFeB (001) 構造に結晶化する<sup>[14]</sup>。図 11 (b) の素子構造は、前述の単結晶 MgO-MTJ 素子や配向性多結晶 MgO-MTJ 素子と基本的に同じ構造であるた

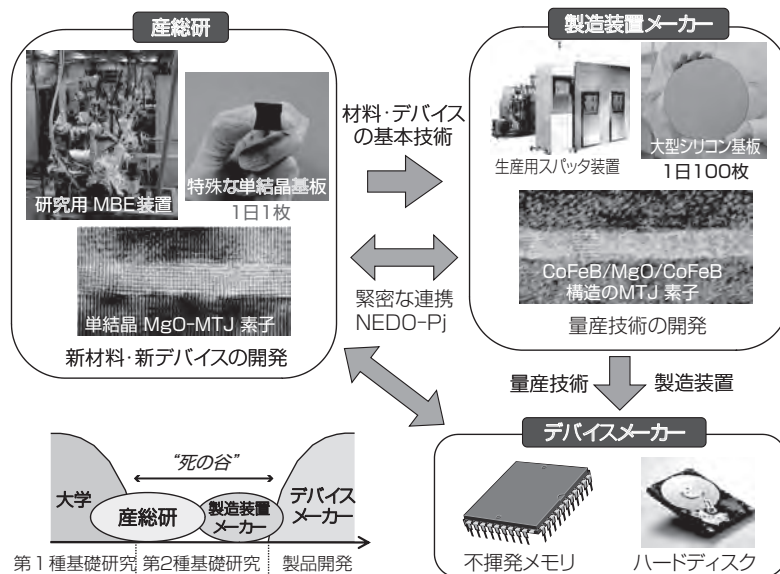


図 10 MgO-MTJ 素子に関する本格研究

め、同じ物理機構によって巨大 TMR 効果が発現する(図9の④)<sup>[13]</sup>。この薄膜作製法は、「下地層から上に向かって順番に結晶成長させる」という結晶成長の常識を覆す独創的な手法である。

現在、この CoFeB/MgO/CoFeB 構造の MTJ 素子がスピントロニクス応用の主流技術となっており、これを用いた様々な研究開発が世界規模で精力的に進められている。その結果、現在までに室温で 600 % に達する巨大な MR 比が実現されている。ちなみに、キヤノンアネルバ(株)と共同研究を開始してから CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子の開発に成功するまでに要した期間は、わずか1年弱であった。このことは、結晶 MgO トンネル障壁の“素性の良さ”に依るところも大きい。産総研と製造装置メーカーの組み合わせが第2種基礎研究を遂行するのに非常に適していることも証明している。

### 3 アウトカムの創出

#### 3.1 超高密度HDD用のMgO-TMRヘッドの製品化

産総研とキヤノンアネルバ(株)が共同で開発した CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子と同社の製造装置は速やかに HDD メーカーの製品開発ラインに導入され、そこで製品開発に活用された(図10)。そこで精力的な製品開発が行われた結果、HDD メーカー各社は2007年に MgO-MTJ 素子を用いた第二世代の TMR ヘッド(MgO-TMR ヘッド)の製品化に成功した。この MgO-TMR ヘッドが第一世代の TMR ヘッドに比べて格段に高性能であったため、最新の垂直記録媒体と組み合わせることで 250 Gbit/inch<sup>2</sup> (従来の2倍)を超える超高密度 HDD が実現された<sup>[15]</sup>。さらに将来的に 1 Tbit/inch<sup>2</sup> の次々世代 HDD まで開発が可能となった。このような HDD の高記録密度化によって、現在主流の 3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD で置き換えても、十分な大容量が得られるようになった。その結果、大容量 HDD の市場でも近い将来 2.5 インチ HDD が主流になると予想されている。1.1 節で述べたように、2.5 インチ HDD の消費電力は 3.5 インチ HDD の5分の1と小さいため、3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD に置き換えることによって HDD 全体で大幅な消費電力の

低減が可能となる。また、HDD は DRAM や CPU と並ぶ巨大な市場を持つ産業である(市場規模は約3兆円/年)。磁気ヘッドは HDD の中で最も値段の高い部品であり、磁気ヘッド市場だけでも、約6千億円/年という巨大な市場規模を持つ。現在生産されているほぼ全ての HDD に MgO-TMR ヘッドが搭載されており、このことが本研究成果の社会的なインパクトの大きさを最もよく表している。

#### 3.2 究極の不揮発メモリ“スピンRAM”の研究開発

不揮発エレクトロニクスの中核技術となる大容量・高速・高信頼性を兼ね備えた究極の不揮発性メモリ「スピンRAM」の実現を目指して、産総研(株)東芝などと共同で NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトを遂行している。ここで、スピンRAMとは、「スピントルク磁化反転」という新しい物理現象を書き込み技術に用いた MRAM のことであり、従来の磁界書き込み型 MRAM に比べて大容量化に適している。Gbit 級の大容量スピン MRAM を実現するには、MgO-MTJ 素子の巨大 TMR 効果による読出し出力の増大のほかに、スピントルク磁化反転による低電力書き込み技術の実用化が不可欠となる。スピントルクとは、MTJ 素子に電流を流した際に伝導電子から磁性層の局在磁気モーメントにスピン角運動量が転移されることにより生ずるトルクのことであり、このスピントルクを用いることによって強磁性電極のスピンへの向き反転(つまり書き込み)が可能となる。スピントルク磁化反転は以前から GMR 素子や Al-O 障壁 MTJ 素子を用いて実現されていたが、磁化反転に必要な電流密度が非常に高かったため実用化は困難と考えられてきた。産総研では2005年に MgO-MTJ 素子におけるスピントルク磁化反転を世界に先駆けて実現した<sup>[16][17]</sup>。さらに、産総研と大阪大学が共同で、スピントルクの定量的測定手法の開発<sup>[18][19]</sup>や、スピントルクを用いた大出力マイクロ波発振の実証<sup>[20]</sup>にも成功している。また最近では、ソニー(株)や東北大学など多数の機関の精力的な研究開発によってスピントルク磁化反転の低電流化が進められている。

現在、産総研は NEDO プロジェクトの支援のもと(株)東芝らと共同で、新規開発の“垂直磁化電極”と結晶 MgO トンネル障壁を組み合わせた“垂直磁化 MgO-MTJ 素子”を用いて究極のスピン RAM の開発を進めている。現在進行中の産官学プロジェクトであり秘密事項も多いため、研究開発の詳細は割愛するが、すでに低電流かつ高速のスピントルク書き込みや優れたデータ保持特性などが実証されている。我々は、この垂直磁化 MgO-MTJ 素子を用いて究極の不揮発メモリの実現を目指し、長期的にはノーマリー・オフ電子機器による究極のグリーン IT 機器の

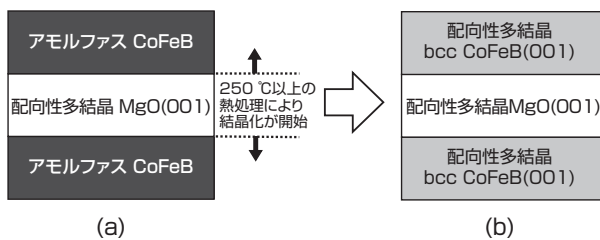


図11 CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子の構造



実現を目指して研究開発を続けている。

#### 4 おわりに

本章では、本格研究を完遂した自らの体験に基づいて感想を述べたい。産総研の掲げる本格研究のシナリオはあくまで概念論であり、実際にこれを遂行する具体的な方法は現場の個々の研究開発者が暗中模索しなければならない。概念論も重要ではあるが、差し迫った難題を数多く抱える研究開発の現場ではすぐに役に立つものではない。実際に基礎研究の成果を製品化に繋げようとする、技術的な課題だけでなく、社会ニーズとのマッチングの問題、さらに組織間の利害関係や人間関係などの複雑な要素が絡んでくる。特に組織間の利害関係が障壁となった場合、組織の上層部に任せていても膠着状態になるだけで何も進展しない。最後は現場の人間が組織に働きかけて問題の解決を図る必要があるため、現場の研究開発者間の信頼関係が重要となる。つまり、最後は“人対人”の問題である。

技術的な課題について言えば、基礎研究と製品開発の間にある“死の谷”は想像した以上に広く深く、産総研だけで死の谷を渡りきることはほとんど不可能と感じられた。特にエレクトロニクスのような成熟した産業では、製造装置メーカー、素材メーカー、デバイスメーカー、ファウンドリ、というような分業体制が進んでいるため、研究開発の各段階で適切な相手と連携することが必須となる。今回我々が行ったような産総研と製造装置メーカーがタッグを組むというやり方は、第2種基礎研究の一つのモデルケースと言える。製造装置メーカーの重要性はまだ一般には十分認識されていないため、今回のような成功事例を通じて産総研としても積極的に発信していくべきであると感じられた。

最後になるが、今回の研究開発において第1種基礎研究の成果から僅か3年という短期間で製品化に結びついた成功の要因を分析してみたい。成功の鍵を極論すれば、「技術シーズの筋の良さ」に尽きると言える。第1種基礎研究では何か飛び抜けた性能が一つあれば脚光を浴び、もてはやされる。しかし、製品開発においては、少なくとも10以上ある重要な項目の全てにおいて合格点を取らなければならない、致命的な欠点の一つでもあると製品化は不可能となる。たとえ著名な学術雑誌に論文が掲載されて脚光を浴びた“画期的な新技術”でも、その大半は何らかの致命的な欠点を持っており、ほとんどの場合、死の谷を越えることができない。ごく希に存在する本当に筋の良い技術シーズだけが死の谷を越えるポテンシャルを有しているが、この場合でも多くの協力者や賛同者が産業界から集まらなければ実用化は不可能である。ここで、いかにして有能な協力者や賛同者を集めるかが鍵となるが、技術シーズが本当に

筋の良いものであれば、適切なタイミングで適切な成果発信を行っていけば“自然に人は集まってくる”、というのが我々の感想である。筋の良い技術シーズは、有能な人間を引き寄せるものである。産業界には保守的な人間も多く、新技術に対して懐疑的な見解や批判が浴びせられることも多いが、新技術の筋の良さを見抜いて適切に評価できる開発者やマネージャーもまた必ず存在する。もし、技術シーズをいくら成果発信しても有力な協力者が集まらず産業界が全く動かないのであれば、それを産業界の保守性のせいにする前に、まず自分の技術シーズの筋が悪いのではないかと疑ってみた方がよい。

#### 付記

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) さきがけ、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ナノテク・先端部材実用化研究開発 (ナノテク・チャレンジプロジェクト)、ならびに NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトの支援により行われた。また本研究の一部は、キヤノンアネルバ (株)、および (株) 東芝との共同研究の一環で行われた。

#### 用語説明

用語1: DRAM: コンピュータに用いられている大容量メモリ。キャパシタに電荷を蓄えることで情報を記憶する。電源を切ると、電荷が放電されるために記憶情報が消失する (揮発性メモリ)。

用語2: SRAM: CPU 中のキャッシュなどに用いられている揮発性メモリ。フリップ・フロップ回路の2値安定状態を用いて情報を記憶する。高速で高信頼性という利点を持ち、論理回路との整合性にも優れるが、高集積化に不向き、消費電力が大きいなどの欠点も持つ。

用語3: SSD: フラッシュメモリを記録媒体に用いた外部ストレージ。ハードディスク (HDD) と違い、機械的な駆動部分がないため、Solid State (固体) Drive の頭文字をとって SSD と呼ばれる。HDD に比べて消費電力が少なく、衝撃にも強いという利点を持つ。一方、容量当たりの単価は、現在のところ HDD に比べて1桁高い。

#### 参考文献

- [1] [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2007/phyadv07.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/phyadv07.pdf)
- [2] T. Miyazaki and N. Tezuka: Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe junction, *J. Magn. Magn. Mater.*, 139, L231-L234 (1995).
- [3] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong and R. Meservey: Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 3273-3276 (1995).

- [4] 吉川 弘之: 第2種基礎研究の原著論文誌, *Synthesiology*, 1, 1-6 (2008).
- [5] W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess and J. M. Maclaren: Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches, *Phys. Rev. B*, 63, 054416-1-12 (2001).
- [6] J. Mathon and A. Umerski: Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction, *Phys. Rev. B*, 63, 220403R-1-4 (2001).
- [7] S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando and Y. Suzuki: High tunnel magnetoresistance at room temperature in fully epitaxial Fe/MgO/Fe tunnel junctions due to coherent spin-polarized tunneling, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, L588-L590 (2004).
- [8] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando: Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, *Nature Mater.*, 3, 868-871 (2004).
- [9] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant and S.-H. Yang: Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, *Nature Mater.*, 3, 862-867 (2004).
- [10] R. Matsumoto, A. Fukushima, T. Nagahama, Y. Suzuki, K. Ando and S. Yuasa: Oscillation of giant tunneling magnetoresistance with respect to tunneling barrier thickness in fully epitaxial Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 252506-1-3 (2007).
- [11] T. Katayama, S. Yuasa, J. Velez, M. Y. Zhuravlev, S. S. Jaswal and E. Y. Tsymlar: Interlayer exchange coupling in Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 112503-1-3 (2006).
- [12] Y. Ando, T. Miyakoshi, M. Oogane, T. Miyazaki, H. Kubota, K. Ando and S. Yuasa: Spin-dependent tunneling spectroscopy in single-crystal Fe/MgO/Fe tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 142502-1-3 (2005).
- [13] D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki and K. Ando: 230 % room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, *Appl. Phys. Lett.*, 86, 092502-1-3 (2005).
- [14] S. Yuasa and D. D. Djayaprawira: Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40, R337-R354 (2007).
- [15] <http://www8.cao.go.jp/cstp/sangakukan/sangakukan2008/award.html>
- [16] H. Kubota, A. Fukushima, Y. Ootani, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki: Evaluation of spin-transfer switching in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, L1237-L1240 (2005).
- [17] H. Kubota, A. Fukushima, Y. Ootani, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and Y. Suzuki: Magnetization switching by spin-polarized current in low-resistance magnetic tunnel junction with MgO [001] barrier, *IEEE Trans. Magn.*, 41, 2633-2635 (2005).
- [18] A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and S. Yuasa: Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions, *Nature*, 438, 339-342 (2005).
- [19] H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki: Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions, *Nature Phys.*, 4, 37-41 (2008).
- [20] A. M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira and N. Watanabe: Bias-driven high-power microwave emission from MgO-based tunnel magnetoresistance devices, *Nature Phys.*, 4, 803-809, (2008).

#### 執筆者略歴

湯浅 新治 (ゆあさ しんじ)

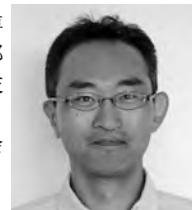
1996年3月慶応義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(理学)取得。1996年4月工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)に入所。これまでトンネル磁気抵抗効果を中心としたスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。これまでの受賞歴は、内閣総理大臣賞(産学官連携功労者)



(2008)、朝日賞(2007)、日本IBM科学賞(2007)、東京テクノフォーラム21賞(2006)、産総研理事長賞(2006)、丸文学術賞(2006)、市村学術賞(2005)、文部科学大臣若手科学者賞(2005)、つくば奨励賞(2003)、他10件。本論文では、MTJ薄膜作製、磁気抵抗効果の測定、キャノンアネルバ(株)との連携およびNEDOナノテク・チャレンジプロジェクトの責任者、全体構想の取りまとめを担当した。

久保田 均 (くぼた ひとし)

1994年3月東北大学大学院工学研究科博士課程修了、工学博士取得。東北大学工学部助手、助教授などを経て、2004年4月産業技術総合研究所に入所。これまでスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。日本磁気学会論文賞(2007)、原田研究奨励賞(1998)、日本応用磁気学会学術奨励賞(1997)を受賞。本論文では、スパッタ法によるMTJ薄膜の作製、MTJ素子のナノ加工、スピントルク磁化反転およびスピントルクの測定を担当した。



福島 章雄 (ふくしま あきお)

1991年3月東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士取得。1993年4月工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)に入所。これまでにスピントロニクスの応用研究に従事。応用物理学会論文賞(2007)を受賞。本論文では、MTJ素子のナノ加工技術の開発、スピントルク磁化反転およびスピン・ダイナミクスの測定技術の開発を担当した。



薬師寺 啓 (やくしじ けい)

2001年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了、工学博士取得。東北大学金属材料研究所 助手などを経て、2006年6月産業技術総合研究所に入所。これまでにスピントロニクスの応用研究に従事。トーキン科学技術振興財団研究奨励賞(2006)、原田研究奨励賞(2005)、応用物理学会講演奨励賞(2004)、日本応用磁気学会優秀講演賞



(2003)、他1件を受賞。本論文では、垂直磁化 MTJ 素子の開発、スピントルク磁化反転の研究、(株)東芝との共同研究開発を担当した。

長浜 太郎 (ながはま たらう)

1999年3月京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員などを経て、2002年3月産業技術総合研究所に入所。これまでにスピントロニクスの基礎研究に従事。応用物理学会論文賞(2005)、日本応用磁気学会論文賞(2002)を受賞。本論文では、MTJ 薄膜の作製と磁気抵抗効果の測定を担当した。



鈴木 義茂 (すずき よししげ)

1984年3月筑波大学理工学研究科修士課程攻修了。1984年4月工業技術院電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)に入所。博士(工学)。エレクトロニクス部門スピントロニクス研究グループ長などを経て、2004年3月より大阪大学大学院基礎工学研究科教授、産業技術総合研究所 客員研究員を兼務。これまでにスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。内閣総理大臣賞(産学官連携功労者)(2008)、応用物理学会論文賞(2005, 2007)、他2件を受賞。本論文では、スピントルク磁化反転およびスピン・ダイナミクスの測定・評価手法の開発を担当した。



安藤 功児 (あんどう こうじ)

1975年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。1975年4月電子技術総合研究所(現産業技術総合研究所)に入所。工学博士。1984年11月エレクトロニクス研究部門 副研究部門長。これまでに磁気光学効果と磁性半導体を中心としたスピントロニクスの基礎と応用の研究に従事。応用物理学会フェロー表彰(2008)、日本応用磁気学会業績賞(2007)、応用物理学会論文賞(2005)を受賞。本論文では、NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトおよび(株)東芝との共同研究の責任者、全体構想の取りまとめを担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 ブレークスルーの達成

質問・コメント(小林 直人:早稲田大学研究戦略センター)

本研究開発は、① MgO を用いた巨大 TMR 効果の実現と、② CoFeB/MgO/CoFeB という極めて大きな2重のブレークスルーを達成することによって、短期間に実際に売れる商品の開発というアウトカムまで結びついた稀有な例であると思います。そのそれぞれのブレークスルーがなぜ達成できたのかは本文で概ね理解できましたが、その材料やプロセスの選択課程(他の材料やプロセスを排除した理由なども含めて)を(必要であれば研究開発体制を含めて)説明していただけますか。また有効なセレンディビティなどもあったのであれば、是非記述をお願いします。

回答(湯浅 新治)

成功要素の半分は狙って達成したもの、残りの半分は幸運(セレンディビティ)によるもの、という認識です。理論的には MgO 以外にも有望な結晶性のトンネル障壁材料が幾つもあります。まず考えるべきことは、どの理論予測が正しいか(どの理論予測に賭けるべきか)、という問題です。さらに、実用化のためには、(i) 厚さを nm まで薄くしてもピンホールが空かないこと、(ii) 金属電極材料との界面で反応や原子拡散が起こらないこと、(iii) 低温成膜で結晶化すること、

(iv) 破壊電圧が十分に高いこと、(v) 製品レベルでの信頼性、などいろいろな要求を満たす必要があります。我々のこれまでの経験や知見の蓄積に基づいて、どの材料系が最も有望であるかを多角的に考察した結果、「結晶 MgO 以外は難しい」という結論を実験を開始する前に導き出しました。ただし、「MgO なら問題ない」ということでは決してありませんでした。研究開発の開始前に危惧された最大の問題は「生産プロセス適合性」でしたが、この点はキャノンアネルバ(株)との共同研究で CoFeB/MgO/CoFeB が開発されたことにより解決されました。CoFeB/MgO/CoFeB 開発の成功要因は、キャノンアネルバ(株)の優秀なエンジニアの活躍によることも大きいですが、セレンディビティの要素も大きかったと思います。また、製品レベルでの信頼性は、研究開発の最終段階にならないと判断がつかない問題ですが、研究開発の初期段階から「MgO の信頼性は高い」という感触は持っていました。これは、論理的な考察に基づいた結論ではなく、研究現場の人間だけが感じ取れる直感です。

### 議論2 電力消費の低減

質問・コメント(小林 直人)

不揮発性メモリを開発することが究極のグリーン IT 機器の実現に繋がることの記述があります。確かに不揮発性メモリが実用化することによってメモリ動作に必要な電源電力の大幅な低減は実現されるでしょうが、一方で図1に書かれているような不揮発 CPU の実現がないと全体での電力消費の低減は望めないと思います。そこで質問です。①現状でスピン RAM の実現で達成される消費電力低減と、将来不揮発 CPU の実現によりさらに低減される消費電力の割合はどの程度になるのでしょうか。②将来の不揮発 CPU の実現には、スピン FET などの実現が不可欠かと思われます。その分野の研究開発の展望はいかがでしょうか。

回答(湯浅 新治)

① DRAM・SRAM を MRAM・スピン RAM で置き換えるだけでは、消費電力の低減はあまり期待できません。ご指摘のとおり、抜本的な低消費電力化のためには、メモリの不揮発化と CPU の不揮発化をセットで実現する必要があります。その第一段階として DRAM・SRAM の不揮発化がある訳ですが、これ自体のメリットとしては (i) 近い将来訪れる SRAM・DRAM のスケーリング限界の打開、(ii) システム LSI 中のメモリをスピン RAM だけで構成することによる高集積化と低価格化、などがあげられます。

② スピン FET のような不揮発記憶機能を持ったスイッチング素子を実現されれば理想的ですが、既にある記憶素子(MTJ 素子や強誘電メモリ素子など)と CMOS を組み合わせることで不揮発性論理回路の設計が可能という意見もあります。いずれにせよ、CPU の不揮発化によるノーマリー・オフの実現は、相当な時間と投資を要する壮大なプランですので、20年スケールでの研究開発が必要と予想されます。

質問・コメント(大蒔 和仁:東洋大学総合情報学部)

特に「はじめに」において、ノーマリー・オフのコンピュータの基幹技術として TMR 技術が提案されています。今のコンピュータはキー入力で止まっているように見えますが、その間通信回線を覗いたり、表示装置の走査をしたり、たまには暗号化のアルゴリズムを計算していたり、と忙しく働いていて、必ずしも止まっているわけではないと思います。ノーマリー・オフのコンピュータについてアーキテクチャ上の若干の説明補強が必要と感じました。

回答(湯浅 新治)

私のデスクトップパソコンには液晶モニター、HDD2台、DVDドライブ、LANケーブル、USBメモリが接続されており、ウィンドウズ上ではワープロソフト、インターネット・ブラウザ、メールソフト、プレゼン資料作成ソフト、表計算ソフトが同時に起動していますが、それでも CPU 使用率をモニターすると通常1~4%程度しか使われてお

らず、5%を越えることは希です。つまり、バックグラウンドで様々な処理をしても、大半の時間はCPUが待機状態ということです。揮発性を基本とした現在のエレクトロニクスでは、低負荷時にはCPUのクロックや電源電圧を下げることで消費電力の低減を計っていますが、この手法には必ずと限界があります。長期的には、ノーマリー・オフによる抜本的なグリーンIT技術の実現が必要と考えます。

### 議論3 スイッチングスピード

質問・コメント(大蒔 和仁)

門外漢が感じることは、磁気の動きを利用するときのスイッチングスピードの問題だと思います。TMR素子のように、磁気を使って省エネ、ノーマリー・オフコンピュータの実現は達成されるとして、そのスイッチングスピードは、現在のシリコン技術と比べて明る見通しがあるでしょうか。その言及が欲しいと思いました。

回答(湯浅 新治)

磁気のスイッチングスピードは本質的に高速であり、数ナノ秒より早いスイッチングスピードが実現できます。現在CPU内で用いられている高速メモリSRAMと同程度の動作速度を持つ不揮発メモリが実現可能です。ただし、現在のシリコン技術よりも画期的に速くなることはありません。つまり、現在技術と同程度の動作速度を維持しながら、不揮発性による画期的な低消費電力化を実現することが目標となります。動作速度について、1.3節に簡単な説明を加えました。

### 議論4 理論的背景

質問・コメント(小林 直人)

最初のブレイクスルーであるMgOを用いた巨大TMR効果の実現の契機は、ButlerやMathon等による第一原理計算があったからとの説明がありますが、彼等がMgOを取り上げた背景等について説明してもらえるとよいと思います。我が国では、理論的な寄与はあまりなかったのでしょうか。

回答(湯浅 新治)

ButlerやMathonらは最初から巨大TMR効果を予想していたわけではなく、厳密な第一原理計算が可能な典型例としてFe/MgO/Fe構造を最初にしたようです。従来のアモルファスAl-Oトンネル障壁では、アモルファスの無秩序構造のために第一原理計算が不可能でした。これに対してFe/MgO/Fe構造は格子整合の良い結晶であり、しかも実験的にも実現できる可能性があったため、Fe/MgO/Fe構造を選んだと聞いています。このような理由からFe/MgO/Feの理論計算が行われた結果、巨大TMR効果が理論的に予言されたことは、セレンディピティの一種と言えます。2001年当時、日本国内でこのような理論計算を行った研究者は、残念ながらいませんでした。計算技術自体は特に難しいものではなく、むしろ「当たり前すぎる理論計算」とも言われていたと記憶しています。しかし、これは「コ

ロンブスの卵」のようなものであり、当たり前すぎる計算を実際に行って、その結果を実験家に提示したことには、高く評価されるべきことだと思います。

### 議論5 技術シーズを見極める目

質問・コメント(小林 直人)

5章「おわりに」に、「技術シーズの筋の良さ」が極めて重要であると言う興味深い指摘があります。そこで質問です。①本研究開発は「技術シーズの筋」が極めてよかったということは非常によく分かりますが、それは「偶々(たまたま)うまく行った」からだと考えられないでしょうか。あるいは、最終ゴールまでたどり着いたものだけが、結果的に「技術シーズの筋が良かった」ということにはならないでしょうか。もしそうでないとすると、「技術シーズの筋の良さ」を予め見極める目、勘の良さやセンス(江崎玲於奈氏が言っているテイスト?)は、どのように養ったらよいでしょうか。②実際に技術シーズの筋がよいかどうかは、ある程度まで技術開発が進まないとわからないものだと思います。死の谷を乗り越えるためには、いくつものハードルを乗り越えなくてはいけません。そのそれぞれの段階で「技術シーズの筋の良さ」をどのように判断できるでしょうか。つまり技術開発を継続するか断念するかの「見極め」はどのように判断すればよいでしょうか。

回答(湯浅 新治)

ご質問の①と②について、まとめてお答えします。議論1のところでも簡単に述べましたが、実用化のために必要な多種多様な要求性能のうち、製品レベルでの信頼性や歩留まりなどの項目を満たせるかどうかは、本格研究の最終段階にならないと分かりません。したがって、本当に筋が良い技術かどうかは製品化にたどり着いてみないと分からない、と言うこともできます。しかし、逆に「かなり筋の悪い技術」については、研究開発の開始前、あるいは初期段階で判断できると思います。私自身は、たくさんある技術シーズの中で筋の悪い技術は早い段階でどんどん切り捨てるように心がけています。技術の筋の善し悪しを見抜くには、広い見地で多角的かつ論理的に事象を分析できるセンスが必要だと思います。これは、一つの事象を深く掘り下げる能力とは相反するものかもしれません。これら二つの能力の両方が本格研究の遂行には欠かせませんが、一人の研究者がその両方を持つことは難しいかもしれません。一つの事象を深く掘り下げる能力にたけた研究者の方が多数派で、広い見地で多角的に事象を分析できる研究者は少数派のように思われます。研究者が技術の筋のよしあしを判断するセンスに欠けている場合は、研究開発マネージャーがその部分を補完すべきと考えます。技術シーズの筋を判断するセンスをどのように養えばよいかは私にはよく分かりませんが、研究開発マネージャーになる人はそういうセンスを持って欲しい、というのが私からの希望です。