

スピエレクトロニクスが先導する高効率デバイス開発の未来

バリア材料にはMgOが必須である



安藤康夫教授

東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻
教授 工学博士 安藤 康夫氏

高性能トンネル磁気抵抗 (TMR : Tunneling Magnets Resistance) 素子に代表される、電子の持つ電荷とスピンを利用して、エレクトロニクスデバイスの応用を目的とする技術分野が「スピエレクトロニクス」である。大容量、高速、低消費電力、メモリや磁気ヘッドの高性能化を可能にするものとして、活発な研究開発が進められている。さらに、高周波マイクロ波発振器、量子コンピュータ、高感度磁場センサなど、これまでにない全く新しいスピエレクトロニクスデバイスの創出も期待されているのである。

【TMR素子開発の歴史】

従来からの物理的限界を打破する、新しい原理に基づくデバイス研究

ハードディスクでは磁性体中の電子のスピンを利用した技術が応用され、その技術の向上には新しいデバイス開発が欠かせない。そのデバイス技術のひとつがMRAMであり、それを支えるTMR素子の技術向上が期待される。

年表	内容
1980年代前半	MRAMが提案される
1980年代後半	DRAMの置き換えを狙ったMRAMの開発 (IBM, Motorola, Hewlett Packardなどが中心)
1988年	巨大磁気抵抗効果 (GMR) の発見 (Feなどの強磁性体金属とCrなどの非磁性体金属をナノオーダーで積層したデバイスにおいて、磁場の変化で磁気抵抗が何倍にも変化する現象を発見)
1994年	GMR膜を使ったMRAMをHoneywellが開発・製品化 (しかし、読み出し/書き換え時間が遅く、集積度が低いため、軍事・宇宙分野で使用された)
1995年	宮崎照宣氏 (東北大学) がトンネル磁気抵抗効果 (TMR) で、室温で18%の抵抗比を発見
1998年	IBM、MRAMのランダム・アクセス性を立証
1999年	IBM、144ビットメモリで読み書きを確立、1KビットメモリLSIを試作
2001年	アメリカにて、「酸化マグネシウムから形成されるTMR素子において100%の磁気抵抗比が得られる可能性がある」という予測がなされ、TMR素子の絶縁膜に酸化マグネシウムを利用する研究が始まる
2004年	湯浅新治氏 (産総研) が、酸化マグネシウムを利用した高品質TMR素子の開発に成功。室温での磁気抵抗比88%を達成
2005年	磁気ヘッドに最適な高性能TMR素子を開発
2007年	日立製作所と東北大学、スピン注入磁化反転方式を用いた2メガビットの不揮発性RAMチップの試作に成功 TDKと米IBM、次世代MRAMの共同研究開発を開始

※GMR: Giant Magneto-Resistance
※MRAM: 現在開発中の新しいランダム・アクセスメモリ (RAM) 技術 (特徴) ・高密度記録が可能 (理由: 記録セルの高速磁化反転が可能だから) ・書き換えによる記録媒体の劣化もほとんどない

先端産業を担うTMR素子

そして、このスピエレクトロニクスは、日本が発信する画期的な技術なのである。1994年夏、東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻の宮崎照宣教授 (当時・現在は同大学大学院客員教授) が世界で初めて室温でのTMR効果の現象を確認、95年3月に論文を発表した。この発見を基礎として、2004年3月には産業技術総合研究所 (茨城県つくば市) の湯浅

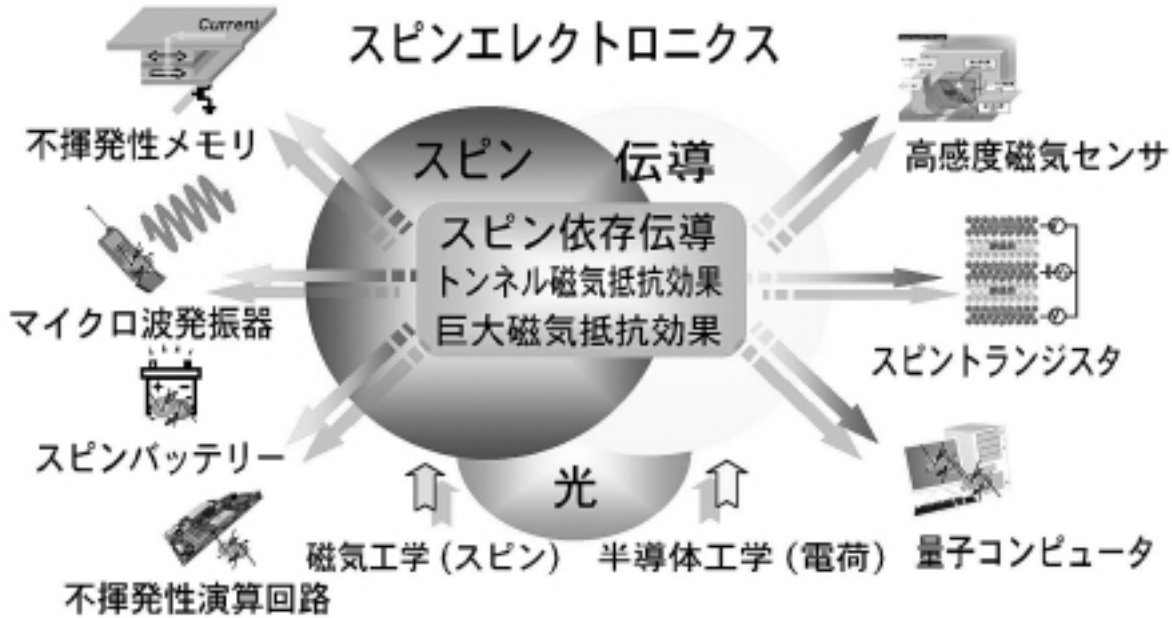
新治氏 (本誌 25に既報) を中心とする研究グループが高品質TMR素子の開発に成功している。この後も日本のエレクトロニクスメーカーは実用化を目指し、開発競争に鎗を削っている。また、ナノメートル技術として、東北大学の金属材料研究所の高梨弘毅教授 (同 26に既報) などにより、新しい金属材料の創出も進められている。

酸化マグネシウム (MgO) は、このスピエレクトロニクスにおける絶縁膜材料 (酸化物など) として使われている。例えば、TMR素子では、トンネル障壁として、あるいは単原子積層膜のバリア層などがあげられる。

では、今後もMgOはスピエレクトロニクスにとって重要な存在として位置付けられるであろうか。そこで、宮崎氏とともに世界初の室温TMR効果を発見した安藤康夫教授に訊くことにした。安藤氏は、1986年に東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程前期修了、同年小西六写真工業 (現・コニカホールディング) 入社、1992年に同大学同研究室に助手となり、助教授を経て2007年4月、教授に就任した。

- スピンエレクトロニクスデバイスの創製 -

安藤研究室HPより



専門は磁性材料であり、スピネレクトロニクス研究開発の第一人者である。

東北大学は、エレクトロニクス研究の面で、世界トップレベルにあり、日本の半導体の父と呼ばれた西澤潤一氏をはじめとする多くの人材を輩出している。TMR素子を代表とするスピネレクトロニクス分野でも先進的役割を果たしている。そして、MgOが材料として重要な役割を果たしているの

である。安藤研究室は東北大学の青葉山キャンパスにある。研究室名を正確にいうと、東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻・東北大学工学部情報知能システム総合学科学科ナノサイエンスコース・スピネレクトロニクス分野である。研究テーマは、電子の有するスピン(微小磁石)と電荷の両者を積極的に利用する。『スピネレクトロニクス』と呼ばれる分野において最新のナノテクノロジーを駆使して、これまでにない新しい電子デバイスの創出を目指す(安藤研究室HPより)とする。研究内容は、「ハーフメタル強磁性体の開発」「低電流スピン注入磁化反転技術の開発」「スピンドYNAMIKス測定」からなる。

磁気抵抗効果向上を目指す

安藤教授は新機能磁性材料の中でも、主に磁気抵抗効果の研究に取り組んでいる。1994年に「世界で初めて室温で大きなトンネル磁気抵抗効果」を観測し、その後「HDD用の磁気ヘッド」や「磁気メモリー(MRAM)」に応用するための研究がされている。このように新しい電子デバイスの創出を目指す分野を「スピネレクトロニクス」という。「当初、アルミニウムを酸化して得られるアモルファスで成功し、非常にインパクトのある結果を得ましたが、トンネル磁気抵抗比が70~80%で頭打ちになり、そのときからMgOのバリアを使用するようになり「磁気抵抗効果を上げるためにMgOの存在が大きい。このようにMgOの使用はここ3年くらいで急増した」という。その理由は以下に述べるホイスラー合金成膜用の基板にある。

「ホイスラー合金+MgOで“スパー”磁気抵抗比

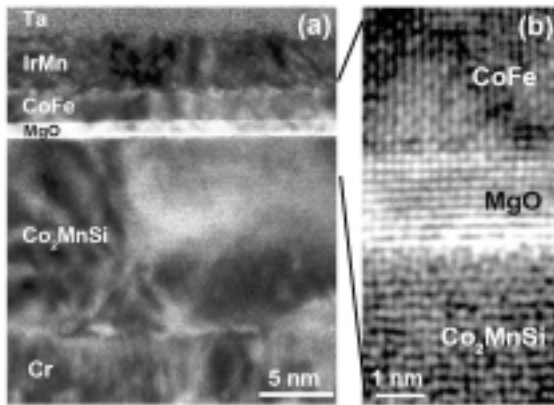
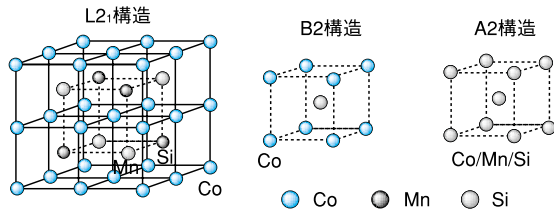
安藤研究室でのメインの研究のひとつはハーフメタル材料として期待されるホイスラー合金である。うまく成長させることによつ

- ハーフメタル電極強磁性トンネル接合素子 -

安藤研究室HPより

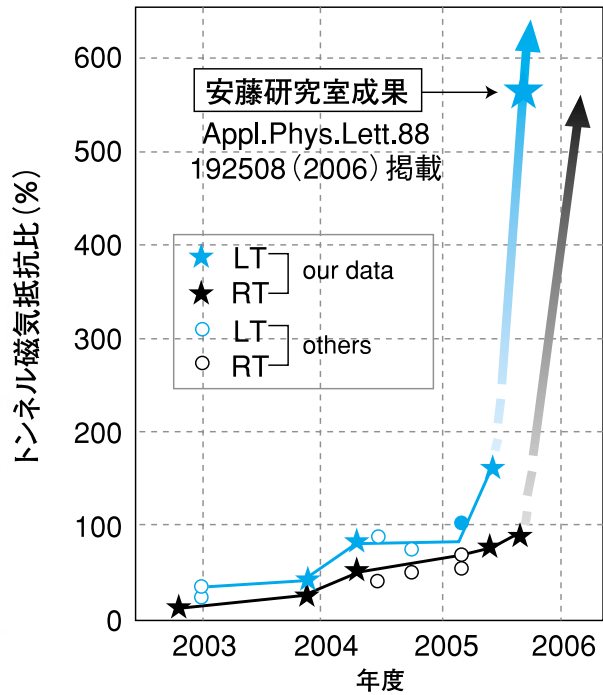
安藤研究室では、ホイスラー合金を用い、世界最高のトンネル磁気抵抗比570%の観測に成功した(右グラフ)

Co₂MnSiホイスラー合金の結晶構造



(a) 作製した素子の断面TEM写真と(b)その拡大

ハーフメタル材料を用いたトンネル接合の磁気抵抗比の推移



で、磁気抵抗比が無限大に高まる可能性を秘める。現在、MgOバリアを使用した素子の磁気抵抗比は平均して2~300%、世の中の最高では500%前後まで値を出せるようになってきている。一方、このホイスラー合金は数年前から世の中で注目されているのだが、室温で大きな磁気抵抗効果を出すことが非常に難しい材料でもある。一般的に、今後の技術開発は、磁気抵抗比を上げるために現状のMgOバリアを使うか、ハーフメタル材料を使ってトンネル素子を作るかという2つのアプローチにかかっているとも言えるのだ。

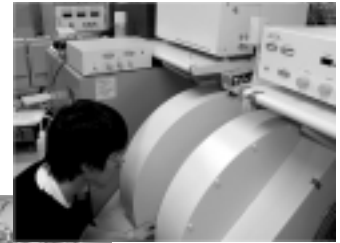
それを安藤研では、ハーフメタル材料を使用しながらMgOバリアを使用する方法をとる。低温で570%の磁気抵抗比を得るために、安藤研ではホイスラー合金の基礎構造をつくることに尽力し、特性を出すことに成功したのだ。アプローチは、まずMgO基板の表面を平坦にし、その上にコバルトマンガンシリコンを積層した。その際に難しかった表面の平坦化も、クロムを表面に積層し700~800℃熱処理することによって、事前に表面が平坦化する特徴を利用して解決に向かった。

そしてエピタキシャル成長を用いた「ホイスラー合金+MgO+ホ

イスラー合金」という形で、室温での磁気抵抗比も200%超まで出来上がりつつある。「現在、トライしているのがコバルトマンガンシリコンの上に、MgOバリアをエピタキシャルで付けて、その上にホイスラー合金をそのままエピタキシャルで付けるというやり方です。この方法だと界面の制御がしやすく非常にフラットになることがわかっていきます。ホイスラーとMgOバリアを接合することで、従来を超えたスーパースペシャルな磁気抵抗比を実現したい」と、安藤教授は豊富を語る。それだけ磁気抵抗比が与える影響は大きい。

MRAMの性能を左右する磁気抵抗比

磁気ランダムアクセスメモリ(以下MRAM)は電源を切っても情報が消えないという不揮発性の特長を持つことは良く知られたことであるが、その機能をより充実させるためにはTMR素子の技術開発が待たれるところであることは、あまり知られていないかもしれない。TMR素子が出す磁気抵抗比が大きいほど、MRAMの大容量・高速・低消費電力化が可能になる。こうなれば全ての電子機器にMRAMが搭載されることも現実味を帯びてくる。そのため



強磁性共鳴装置



MRAMテストチップ用
超高真空スパッタ装置

の開発に安藤研が主導するスピ
ンエレクトロニクス分野の発展は、
いま待たれている次世代の技術開
発へと直接結びつく。

MRAMの動向について、安藤
教授は冷静に見つめている。「競
合するメモリーも非常に多いの
で、技術うんぬんだけでは決まら
ない状況です。マーケットがどれ
だけあるか、会社として投資に対
してバックがあるかというところ
まで含めて考えねばならない。
我々はそういう市場で、将来の1
ギガを実現するため、技術を構築
していく必要性を感じています。
そのために国家プロジェクトに参
画し、また同時に企業との共同研
究も進めています。」「将来の1ギ
ガ」に対し、現在、出力は達成し

ている。あとは、より高密度とな
った場合、TMR素子ひとつのサ
イズを小さくしなければならぬ
ことが重要視される。そのとき問
題となるのが、顕在する熱ゆらぎ
に対抗できるための磁気異方性を
つけるなどして対処策を考えねば
ならないことである。もうひとつ
は書き込みの技術で、これには1
ギガのスケールに耐えるために電
流値を充分に下げるのだが、当然
バリアを薄くする必要がある。そ
のときさまざまな材料を模索して
いくが、間違いなく、バリア材料
はMgOが必須である。今のところ
MgO以上に界面をフラットに保ち
充分な特性を維持したまま、適度
な磁気抵抗比を出す材料は見つか
っていないからだ。

しかし、MRAMだけを見据え
るのではなく、その用途を視野に
入れたとき、磁気抵抗比が100
0%であっても足りないと
いえる。MRAM自身をロジック
回路に使用するか、スイッチなど
の機能を持たすかでその求められ
る容量も幅広い。そのための材料
の模索、そして性能の向上は常に
付きまとう問題だということだ。
MgOに求められることを伺って
みた。「品質の向上です。もとも
と理論予測による磁気抵抗比は1
000%でした。理論上はまだ値

を上げることができ。しかし5
00%前後が現状の今、その原因
がトンネル接合のMgOと磁気材料
の界面での制御なのか、あるいは
MgO自身の品質の制御の結果なの
かというところを見極めることがで
きれば、もう一歩のところまで持
つていくことが可能でしょうね」
と、今後の展望を交え技術開発に
かかるMgOの存在を教えられた。

Future of development of highly efficient devices led by spin electronics

Professor Yasuo Ando, Department of Physics, Industrial research, Graduate Division

The spin electronics field is typified by high capacity Tunneling Magnets Resistance (TMR) elements. This area is in the limelight making for high capacity memory and magnetic heads possible. In addition, this is a field which holds expectations for the creation of completely new devices not seen up to now.

Spin electronics is a ground breaking technology emerging from Japan. In 1994, Mr. Terunobu Miyazaki of Tohoku University first confirmed the phenomenon of the TMR effect at room temperature in the world. Based on this discovery, in 2004 a research group lead by Mr. Shinji Yuasa of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) succeeded in the development of high quality TMR element.

Magnesium oxide (MgO) is used as the insulation film material within this spin electronics, (such as oxidative product). Regarding the characteristics of the MgO material, we interviewed Professor Yasuo Ando who, in conjunction with Mr. Miyazaki, made the first discovery of the TMR effect at room temperature in the world.

Professor Ando noted that MgO was extremely important in raising the magnetic resistance effect. The reason is the substrate for use with the Heusler alloy. This is because the Heusler alloy contains the potential for raising the magnetic resistance effect without limit. The current magnetic resistance ratio is an average 200-300%, but this is a material whereby it is extremely difficult to bring out a large magnetic resistance effect at room temperature. At the Ando research lab, using a composition of Heusler alloy, MgO, and Heusler alloy, as well as using epitaxial growth, the current magnetic resistance exceeding 200% was brought about at room temperature. Professor Ando noted goals that, "By combining the Heusler alloy and MgO barrier, we would like to bring about a ratio of magnetic resistance with a super high figure which we could not bring about up to now."

As for what is happening with MRAM which is one of the applications of TMR, he said that, "When MRAM has reached a higher density, we will have to make the TMR particles one size smaller. At that time, we will need measures such as adding magnetic anisotropy and making the barrier thinner. Without doubt, however, MgO will be absolutely necessary for the barrier." This is because as of now they have not yet found a material which brings out a suitable magnetic resistance, while having maintained a sufficient setup, maintaining the interface flatter than MgO.

Looking at applications other than MRAM, a magnetic resistance of even 1,000% would not be enough. What they are looking for regarding MgO is a raising of the quality. "According to a theoretical prediction, even under the present circumstances, a value of 1,000% has come out as a possibility. Reasons for not reaching that far might be the control at the interface of the MgO and the interface or perhaps the effect of the control of the quality of the MgO itself. We would like to distinguish between these," said Professor Ando.