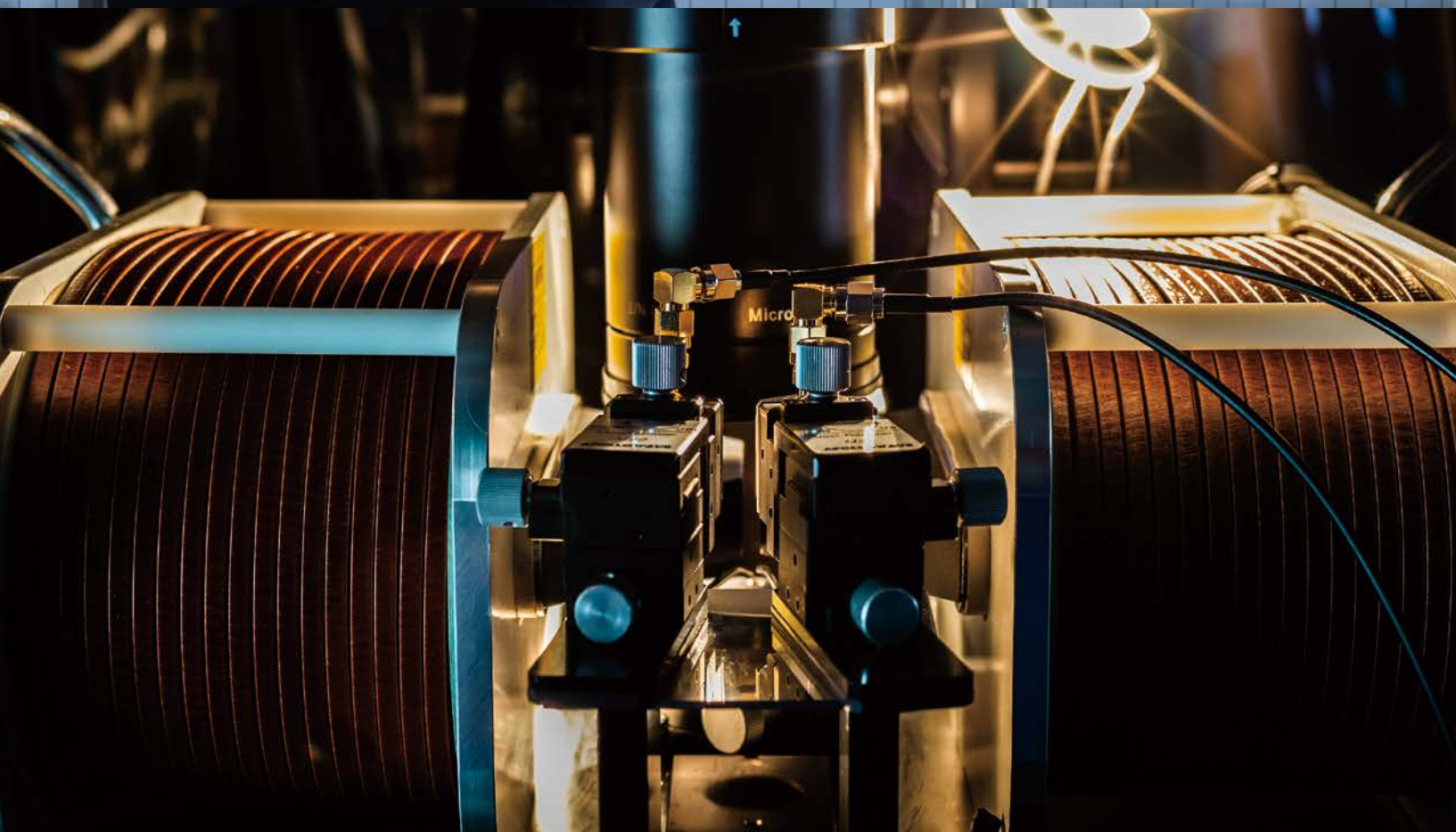


ゆるぎ スピン 舵をとれ

磁力の源、電子スピンを操る
磁性材料の挑戦



ゆらぐスピンの 舵をとれ

磁力の源、電子スピンを操る磁性材料の挑戦

ただの金属の塊のようであり、物にくっついたり反発したりする性質を持つ、磁石。
紀元前にさかのぼる磁石の発見は、羅針盤を皮切りとした磁気デバイス開発のはじまりでもあった。

20世紀に入り、日本において世界初の人工磁石が誕生。
さらに、磁石の力の正体である電子の“スピン”という性質が明らかになった。
磁性材料は自動車のモーターや発電機、ハードディスク等のデータストレージなど、あらゆる場で活躍している。
現代社会において、私たちが磁性材料から受けている恩恵は計り知れない。

今、磁性材料はさらなる飛躍が求められている。
電気自動車用途での需要拡大による資源問題への懸念や、IoT 社会におけるデジタル情報量の増加に伴い
これまでの限界を打ち破る高い性能を示す磁性材料とデバイスが必要とされているのだ。

課題解決のカギは、ミクロ・ナノ・原子レベルでの磁性材料の構造制御と電子スピンの制御にある。
それに対し、創製技術と解析技術、理論計算、それぞれ高度に発展を遂げた各分野の力を結集し、
総力を挙げて挑むのが、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究拠点である。

原子ひとつひとつを見つめ、理論的な戦略をもとに生まれゆく材料とは——。
革新的な応用先開拓にも期待高まる、磁性・スピントロニクス材料研究の今に迫る。

写真:3次元アトムプローブで解析したジスプロシウム(Dy)フリーネオジム磁石の原子マップ。
ネオジム(Nd:緑)、鉄(Fe:紫)、銅(Cu:赤)の分布が見てとれる。Feを多く含む強磁性相の間に、NdとCuを多く含む非強磁性層を形成させ、磁気的な結合を切ることによって、希土元素であるDyを使わずに強力な磁力を発揮するネオジム磁石の開発に成功した(提供:磁性材料解析グループ p15)。



NIMS Award 受賞 特別鼎談

世界最強磁石の発明と スピントロニクス開幕



佐川真人

Masato Sagawa

大同特殊鋼株式会社 顧問

1972年、東北大学にて博士号を取得。富士通、住友特殊金属を経て、インターメタリックス社を設立。2016年より大同特殊鋼株式会社 顧問。国家プロジェクト「元素戦略磁性材料研究拠点」アドバイザーを務める。

宮崎照宣

Terunobu Miyazaki

東北大学 名誉教授

1972年、東北大学にて博士号を取得。1991年から東北大学 教授。2007年から2013年まで、東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) 教授。2007年から東北大学 名誉教授。

宝野和博

Kazuhiro Hono

物質・材料研究機構 (NIMS) 理事
磁性・スピントロニクス材料研究拠点 拠点長

1988年ペンシルベニア州立大学にて博士号を取得。NIMSにおいて、磁性・スピントロニクス材料研究拠点 拠点長を務める。2018年から理事。「元素戦略磁性材料研究拠点」解析グループリーダー。

世界で初めての人工磁石は、1917年に東北大学の本多光太郎氏が開発した「KS鋼」である。以来、磁性材料とそれに関連する分野における、日本人研究者の貢献は大きい。その中で、佐川真人氏による最強ネオジム磁石の開発と、宮崎照宣氏の室温での巨大トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果の観測とその素子の開発、さらにこれをきっかけにしたスピントロニクス分野の発展は、特筆すべき出来事である。

2018年、物質・材料科学において飛躍的な進歩をもたらした研究に贈られるNIMS Awardの受賞が決まった両氏に、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究拠点の宝野和博拠点長が話を聞いた。

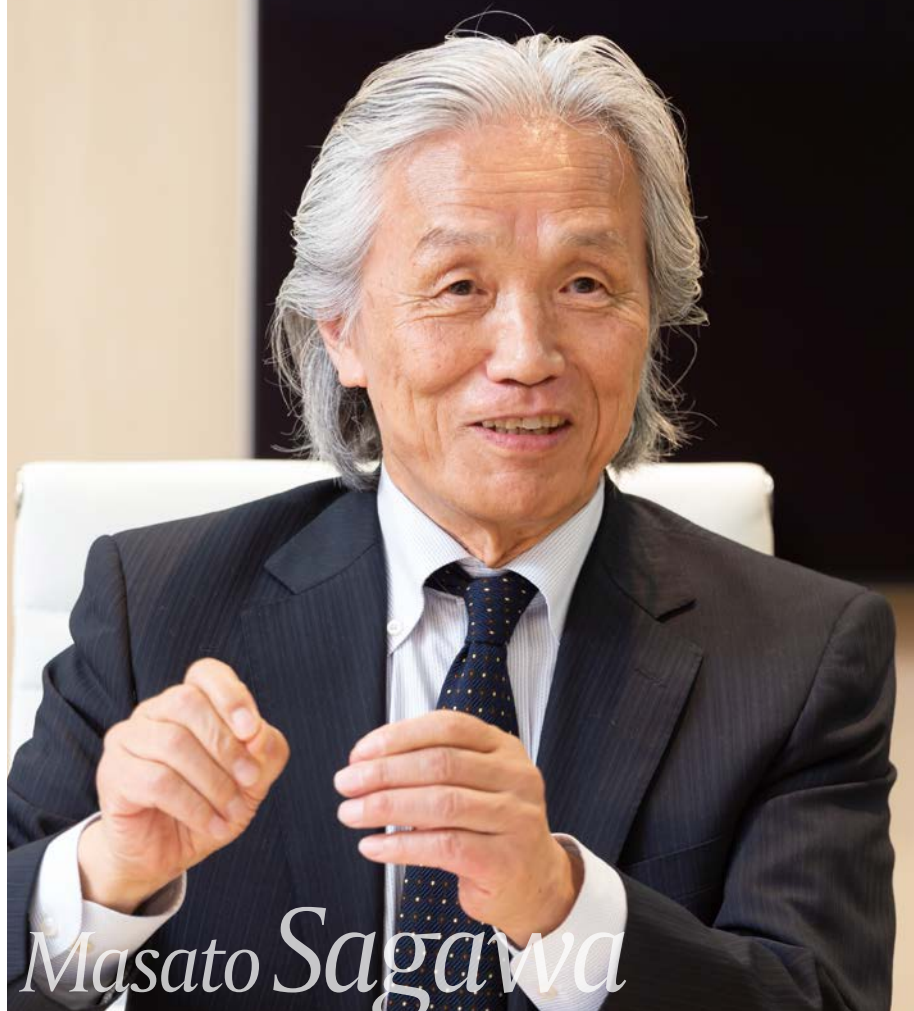
NIMS Awardを受賞して

宝野 「使われてこそ材料」を標榜しているNIMSは、社会で使われる材料の開発、あるいはそのきっかけとなった基礎研究に貢献された研究者を顕彰するためにNIMS Awardを授与しています。2018年は、佐川真人さんと宮崎照宣さんに決まりました。このたびは受賞おめでとうございます。

佐川さんは、1982年にまったく新しい磁石「ネオジム磁石」を発明され、それが今でも世界最強の磁石として多くの電化製品やハイブリッド自動車などに使われています。

佐川 私がつくったのはネオジム、鉄、ボロンから成る磁石ですが、実は40年前に、NIMSの前身である金属材料技術研究所で開かれたシンポジウムで着想を得ました。当時、東北大学金研の助手だった浜

野正昭さんが「希土類と鉄の化合物が磁石にならないのは、鉄原子間の距離が短すぎて磁気が不安定だからだ」と話すのを聞いてピンと来たのです。それならば、ボロンやカーボンなど原子半径の小さい原子を加えて、鉄の原子間距離を広げてやれば良いと。それから今に至ると思うと、NIMS Awardまで軌道が敷かれていたように感じられ感慨深いです。



それまでに得た材料の知識から磁石ができた。 モノづくりを経験することの大切さを深く実感した—— 佐川真人

宝野 宮崎さんは、室温で高出力なトンネル磁気抵抗（TMR）素子を開発されました。これがハードディスクドライブ（HDD）や不揮発性磁気抵抗メモリ（MRAM）などに応用されたことで、スピントロニクスが社会に役立つことを示されましたね。

宮崎 “わずかなお金が欲しい”という理由で始めたTMR素子の研究でしたが、その成果がスピントロニクスを一大分野へと成長させることになりました。私が貢献したのは、この分野が興った初めのころだけです。今回の受賞をうれしく思っています。

米国に先行すること、 わずか13日！ 世界最強 「ネオジム磁石」開発の裏側

宝野 私が拠点長を務めるNIMSの磁

性・スピントロニクス材料研究拠点では、まさに、佐川さんと宮崎さんのご業績から発展してきた研究課題に取り組んでいます。当時、この分野はどのような雰囲気だったのでしょうか。

佐川 1978年当時、私は富士通に在籍していました。磁石開発は公式の研究テーマではなかったので、あまり時間を割けませんでした。それでも浜野さんの言葉をヒントに研究を続け、1年ほどでネオジム、鉄、ボロンの組み合わせに磁石としての素質があると分かり、それから3年かけて、磁石にするための微細構造を検討しました。この研究成果をもって住友特殊金属に移り、3カ月ほどたった1982年7月に最強のネオジム-鉄-ボロン磁石を完成させました。翌年、アメリカで開かれた磁気の国際会議ではすごい反響でした。

宮崎 マグネティズム&マグネティック・マ

テリアルズ（3M）で発表されたのですよね。私も参加していましたが、あまりの人で会場には入れませんでした。

佐川 当時は知らなかったのですが、アメリカには私のような研究をしているグループが4つもあって、しのぎを削っていたのです。特にゼネラルモーターズの研究所にいたジョン・クロートは、私にかなり近い研究をしていて、特許を出したのは、私が13日早かっただけのようです。

宝野 勝因は何だったのでしょうか。

佐川 それはやはり、モノづくりの経験ではないでしょうか。磁石にはいろいろなつくり方がありますが、私はそれまでに得た材料の知識から「焼結磁石」を完成させることができました。クロート氏がつくった磁石は組成は同じだったものの液体急冷法でつくられたもので、私が焼結法でつくった磁石の方が、うんと高い磁力を持っていました。モノづくりを経験することの大切さを深く実感しましたね。

HDD 実現に不可欠な 巨大 TMR 効果は こうして観測された

宝野 宮崎さんがアモルファス酸化アルミニウム（ Al_2O_3 ）を絶縁層の材料に使うことで得られたTMR効果18%という値は、当時零点数%出すのがやっと、という中にあって、世界中に大きな驚きを与えました。高出力TMR素子の研究開発はどのように進めてこられたのでしょうか。

宮崎 ネオジム磁石の場合は、鉄という安い材料をベースに強い永久磁石をつくりたいという大きなニーズがあって、それを実現したのが佐川さんだったわけです。一方、TMR効果は、私が研究を始めた1989年ごろは文献を3～4編も読めば研究が把握できてしまうほどで、まだ興味を持っている人があまりいませんでした。資金がなくて何の研究をしようかと考えていたところに、TMR効果という現象があって、極低温では起こるけれど、室温ではうまくいっていないことを知ったのです。

今では、ナノメートルオーダーの磁性薄膜を数十層積み重ねることで、この現象を利用したデバイスがつくられています。これは大変な技術ですが、TMR効果が室温でも発現するかを検討するだけなら3層も重

ねればよいので、高性能な装置も大きな資金も必要ありませんでした。「将来必要な技術になるだろう」などと考えて始めた研究ではないのです。

佐川 私は富士通にいた時に、「磁気抵抗効果（物質の電気抵抗率が外部磁場により変化する現象）の変化量をもう少し上げられないか」と磁気記録を研究している人々から相談されましたから、当時でも一部の企業の人は興味を持っていたようですよ。

宝野 企業だと、そういう発想も出るのでしょうか。ただ、宮崎さんの室温で高い出力が得られるTMR素子がなければ、スピントロニクス分野で最大の応用とも言えるHDDは実現しませんでした。

宮崎 私がこの成果を発表した1995年は、スピントロニクスという言葉が使われ始めたばかりのころでした。スピントロニクスは、物質中の電子の電荷とスピンを工学的に利用しようとするもので、磁性材料とナノテクノロジーを組み合わせた分野です。これから応用を考えるにしても、磁性に対する深い知識と経験が必要だということを、忘れないでほしいものです。

最強磁石の改良と 新磁性材料の探索

宝野 現代のIoT社会では、蓄積された大量のデータを保存するためにHDDが多く使われています。HDDの単位面積あたりの記憶容量を上げ、小型化を可能にしたのが、磁気抵抗効果です。磁気抵抗効果にはいろいろな種類がありますが、宮崎さんが発見した室温でのTMR効果が最も貢献したと言えるでしょう。

加えて、HDDのアクチュエーターやディスクを回転させるスピンドルモーターには、ネオジム磁石が使われています。このような視点から、現在のIoT社会は、佐川さんと、宮崎さんの研究成果なしには生まれなかったと言えますね。

佐川 さらに、これから電気自動車やロボットが活躍する時代になれば、ネオジム磁石はますます必要になります。磁石を安心して使いつづけるためには、磁石を安定させるために加えているジスプロシウムの資源問題を解決しなくてはなりません。

宝野 それで、2012年に始まった文部

科学省の「元素戦略プロジェクト(p7)」の目的です。私は昔から磁石研究に興味はあったのですが、やり尽くされた分野だという雰囲気がありました。ところが2010年の尖閣諸島問題をきっかけに、中国からレアアースが輸入できなくなり、ジスプロシウムのような重希土類元素を使わなくても高い特性を持つ磁石をつくらうという動きが出てきたのです。

現在われわれが行っている研究と、佐川さん、宮崎さんが盛んに研究されていたころとの大きな違いは、解析技術が格段に向上していることです。3次元アトムプローブや電子顕微鏡を駆使して、材料を原子レベルからミクロスケールまで詳細に解析できるようになり、保磁力のメカニズムも明らかになってきました。また、シミュレーションによって磁化反転を予測することもできます。

佐川 ネオジム磁石の性能には、材料の

微細構造が関わっていることは明らかなので、NIMSの誇る原子レベルの解析技術には期待しています。ただ、ネオジム磁石にも性能の限界がありますから、よりよい磁性材料の探索も必要です。

宝野 はい。実験室レベルでは、そういった研究もやっています。ものになるかはわかりませんが、薄膜をつくって磁石材料として見込みがあるかを検討していて、物質そのものの特性としてはネオジム磁石の主要構成物質であるNd₂Fe₁₄B化合物を超えるものも見いだされています。

磁石開発については、高度な解析装置を活用して、磁石特性を説明できる理論研究を発展させるなど、基礎的な研究開発を進めることと、Nd₂Fe₁₄B以外の新しい材料の探索を続けていくことが、NIMSの役割だと思っています。

スピントロニクスには磁性に対する深い知識と
経験が必要だということを忘れないでほしい——

宮崎照宣



視野を広げ、 新しい応用を見いだす

宮崎 解析と理論は、スピントロニクス分野でも欠かせないものになっています。かつて私は「理論？何を言っているんだ」と思っていました。しかし、最初に用いられた Al_2O_3 絶縁層に代わって、今やすべての TMR 素子の絶縁層に使われている材料は酸化マグネシウム (MgO) ですが、これはウイリアム・バトラー・マ-tonn によって理論的に予測されました。これからのモノづくりは理論と一緒にやっていくことが大切だということです。

宝野 スピントロニクスは理論計算と非常に相性がいいところもありますから、NIMS が貢献できることは大きいと思っています。

宮崎 それからスピントロニクスの応用として、ひとつには、いろいろな種類の MRAM をレベルアップしていきがありますが、それとは別に、スピントロニクスを活かせる新たな研究分野を開拓するために泥臭いこともしくはなくてはならないと思っています。たとえば、磁気抵抗素子を脳磁センサや心磁センサに使う研究をしている人がいますが、若い人たちには広い視野を持っていろいろなことに取り組んでもらいたいと思います。

宝野 今や、スピントロニクスは多くの優秀な人材が参加し、新たな物理現象がずっと見つかってブームともいえるような状況ですが、ブームが去って「あれは何だったんだろう」ということにならないためにも、産業的にインパクトのある応用分野

を見つけることが急務になっています。

今日、お二人と話して、NIMS の役割について思いを新たにしました。そして、佐川さん、宮崎さんの研究が素晴らしいのは、

やはり社会に役立っていることです。その功績の大きさから、今後、ノーベル賞もあり得るのではないかと期待しています。

(文・池田亜希子/サイテック・コミュニケーションズ)

解析装置を活用して、磁石特性を説明する理論研究や 新しい材料の探索を続けるのがNIMSの役割——

宝野和博



Kazuhiro Hono

INFORMATION

NIMS Award 授賞式と記念講演を行います

10月15日(月)、16日(火)、19日(金)の3日間、NIMSは学術的な知見と技術成果を発表するイベント『NIMS WEEK』を開催します。初日の「学術シンポジウム」では、NIMS Award 2018受賞者の佐川真人氏、宮崎照宣氏の授賞式と、記念講演を行います。

NIMS WEEK 学術シンポジウム

〈日時〉2018年10月15日(月) 10時～
〈場所〉東京国際フォーラム ホールB5

入場無料

<http://www.nims.go.jp/nimsweek/>



希少元素を使わない 永久磁石開発を目指して



広沢 哲

物質・材料研究機構 (NIMS)
元素戦略磁性材料研究拠点 代表研究者

2012年、文部科学省主導でスタートした「元素戦略プロジェクト」。開始から5年、ネオジム磁石に代わる高性能な永久磁石開発を担う ESICMM の現状と課題を、拠点代表研究者を務める広沢哲に聞いた。

ポスト・ネオジム磁石を探せ!

世界中で幅広い用途に使われているネオジム ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 磁石。近年、ハイブリッド自動車や電気自動車の普及で需要が急速に拡大し、風力発電用途でも需要の拡大が予測されています。ネオジム磁石には、高温でも磁力を維持するために、ジスプロシウムが含まれます。しかし、ジスプロシウムは地球上の存在比がネオジムの10%程度であり、しかも90%以上が中国で産出されている貴重な元素です。高まりつつある需要に対応するためには、こうした希少元素を使わずに高い磁力を発揮する磁石開発が急務となっています。

ESICMMは、理論や計算科学を担う「電子論グループ」、計測解析を担う「解析評価グループ」、材料創製を担う「材料創製グループ」の3グループ、全15機関の強固な連携のもと研究開発を推進してきました。

前半期を終えて私たちは、サマリウム-鉄-コバルト (Sm-Fe-Co) 磁石の新たな可能性を示しました^[1]。理論による予測や微細構造解析をもとに最適な結晶構造を導きつくりだした高純度な磁石の薄膜は、室温以上の実用温度では、どの永久磁石よりも高い磁化を示します。温度に対する磁気特性というのは、永久磁石の性能を評価する上で重要な指標です。たとえば自動車のモーターに組みこまれる磁石は、200℃という高温の中で性能を維持しなければなりません。そこで実際に、200℃での磁化や磁気異方性を従来のネオジム磁石と比較したところ、 Sm-Fe-Co 磁石の方がいずれも高い数値を示すことが明らかになりました。現在は、磁石の複相組織

を制御することで、物質が本来持つと理論予測されている究極的な性能まで高めていくことを目標にしています。この Sm-Fe-Co 永久磁石をなんとか実用の材料にしたい。それが私たちの願いです。

理論計算と解析が拓く 材料探索の新時代

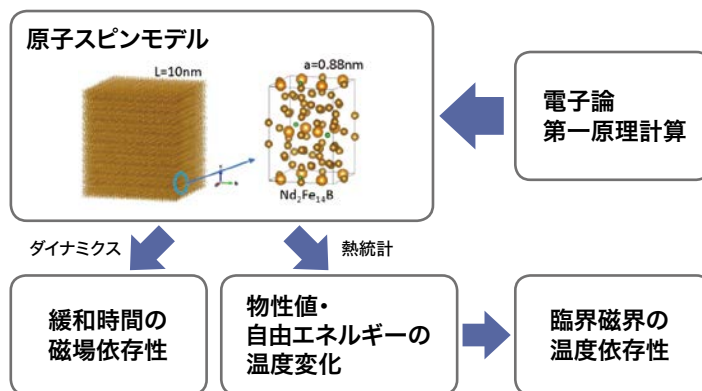
達成に向けて、理論計算の力は今やなくてはならないものです。私たちは基礎学理として、材料創製プロセスの指針となる「熱力学のデータベース」と、材料組織制御の指針となる「原子モデルの保磁力理論」の構築にも注力しています。

熱力学データベースは、各元素が持つ拡散係数や表面エネルギーなどから、どのような組織になるかを計算するのに有用です。理論計算値に実験値を加えて物性データなどが整備されてきました。将来的には機械学習を使い、目的物質から物性値を逆推定できるようにしたいと考えています。

一方、「原子モデルの保磁力理論」では従来の保磁力理論を大きく発展させ、原子モデル、つまり磁石内部の各原子の磁性が熱によってどう変化するかを取りこむことで、磁石全体の保磁力の温度変化を予測する理論を構築しています^[2] (図)。

高い性能を発揮する磁石は単一物質ではなく、複数の異なる性質を持つ物質が複雑に分布した複合材料です。そのため、高性能化にはたくさんの「なぜ?」を解決する必要があり、解析評価グループや電子論グループはその答えをチームワークで探求しています。そしてそこから得られた新たなモデルや理論は磁石製造プロセスの設計に重要な指針を与え、実用化を目指す材料創製グループによる磁石材料の試作を支えているのです。拠点型研究だからこそ可能なこうした3グループの密な連携により、磁石材料の新たな扉を開くことを目指して、これからも研究に取り組んでいきます。

例) 10 nm立方の中にある約8万3000個のスピンの運動量の計算



原子モデル保磁力理論の構築

ネオジム ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 磁石の例。各格子点に磁気モーメントを置いた原子スピンモデルをつくり、スピン間の相互作用を第一原理計算で求めて議論する。それによって、ダイナミクスを計算したり、熱統計量として、磁化や異方性などを計算したりしていく。あるいは、磁化反転のエネルギーバリアを計算して保磁力を議論することができる。

〈第一章〉

磁性材料

記録装置の代表格、ハードディスクドライブ(HDD)。社会に登場して以降、改良を重ねるごとに容量は増大し、今や10 TB以上に達している。一方、世界のデジタル情報量は増加の一途をたどり、さらに大容量な記録装置を求める声は高まるばかりだ。そうした中、HDDにも大容量化の要請に応える余地はまだ十分にある。カギを握るのが、記録媒体と読み書きヘッドに使われる磁石(磁性材料)だ。大容量化に向け、情報を記録する磁性体粒子の一層の微細化や、微細化した粒子が持つ情報を正確に制御するヘッド、両者の足並みをそろえた技術革新が急務である。HDDの性能向上、さらには革新的な磁気デバイスを実現し得る磁性材料を求めて、NIMSは日々探索を続けている。

磁性・スピントロニクス材料研究拠点特集

いかにたくさんの情報を書きこみ、読みとるか。 その限界を超える

次世代の読み書きヘッド材料の有力候補、ホイスラー合金系ハーフメタル

現在のリードヘッドの限界

HDDの情報記録媒体には、微小な磁石である磁性体粒子が並んでいる。複数の磁性体粒子で記録情報の最小単位であるビット(bit)を構成し、ビットごとに磁石の磁化の向きの上・下をデジタル信号の0・1に対応させて情報を記録する。書きこみヘッドには電磁石が使われ、電磁石に電流を流し発生する磁界によって磁石の磁化の向きを反転させる。情報を読みとるリードヘッドには、絶縁体を強磁性体で挟んだトンネル磁気抵抗(TMR)素子(p12左上図)が使われ、磁石に近づけると漏れてくる磁界により強磁性体の磁化の向きが変わる。向きの変化によりトンネル電流の大きさが変化する「トンネル磁気抵抗効果」を利用して、情報を読みとる。

1平方インチ当たりのビット数(bit/in²)で表されるHDDの記録密度は、2000年ごろには10 Gbit/in²だったが、

現在は2桁上がって1 Tbit/in²に到達。さらなる高密度化が進められている。しかし桜庭は、「2 Tbit/in²を超えると、現在のリードヘッドは使えなくなります」と指摘する。

記録密度を高めるには、ビットサイズを小さくする必要がある。それに伴いリードヘッドを小さくすると、絶縁体によるトンネル効果を使っているため電気抵抗が高いTMR素子は高速応答できなくなるのだ。そこで次世代のリードヘッドとして注目されているのが「面直通電型巨大磁気抵抗(CPP-GMR)素子」だ。

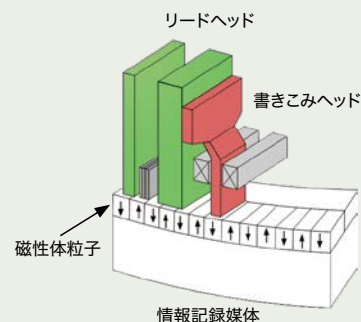
次世代リードヘッドの 弱点を解決する

CPP-GMR素子は、強磁性体で非磁性金属を挟んだ構造をしている。TMR素子とは異なりすべてが金属層で構成されるため電気抵抗が低く、数十nmまで小型化しても高速応答が可能だ。しかし、

「CPP-GMR素子をリードヘッドに使うには問題があります」と桜庭は言う。『磁気抵抗比』と呼ばれる磁界による電気抵抗の変化率が小さく、感度が低いのです」

ビットを微細化すると磁石から漏れてくる磁界も小さくなるので、リードヘッドにはより高い感度が求められる。だが、鉄(Fe)やコバルト(Co)などの一般的な強磁性体を用いたCPP-GMR素子の磁

HDDの基本構造



情報を記録するディスク状の媒体と読み書きするヘッドから成る。媒体上に並ぶ磁性体粒子の磁化の向きを0・1に対応させ、情報を記録する。

気抵抗比は室温で数%しかなく、感度が足りない。「その問題を解決できるのがハーフメタルです」

電子は、電荷のほかにスピンという性質を持ち、スピンの状態には上向きと下向きがある。磁性体では上向きスピンの電子と下向きスピンの電子にスピン分極した電流が流れるが、一般的な強磁性体では分極の割合（スピン分極率）は50%程度だ。それに対して、スピン分極率100%の物質をハーフメタルと呼ぶ（図1）。「CPP-GMR 素子の強磁性体のスピン分極率が高いほど磁気抵抗比が高くなるため、ハーフメタルを用いれば感度の高いリードヘッドを実現できるはずです」

ハーフメタルの中でも磁石の性質を失う温度が室温よりはるかに高いため室温でもスピン分極率100%を実現できると期待されているのが、ホイスラー合金系のハーフメタル材料だ。磁性材料グループでは、元素の組み合わせとその割合、熱処理の温度など詳細に検討し、ホイスラー合金となり、かつハーフメタルの性質を示す物質（ $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ ）にたどりついた。そして、この物質で非磁性体のニッケル-アルミ（Ni-Al）合金を挟んだ CPP-GMR 素子を開発。「磁気抵抗比は低温で280%、室温で82%を達成しました。これは CPP-GMR 素子の世界最高記録です」

「拠点の中に解析グループと理論グループがあってこそその成果」と桜庭は言う。材料の原子1個1個の分布を見ることで初めて、狙い通りの結晶構造になっているかを確認できる（図2）。さらに理論研究によって、組成や結晶構造と磁気抵抗比の関係を検証することで、磁気抵抗比を大きくするための指針が得られるのだ。「低温で280%もある磁気抵抗比が、室温ではなぜ82%になってしまうのか。今、その謎の解明に取り組んでいます。理由が分かれば、室温での磁気抵抗比を向上させる方法が見つかるはずです」

マイクロ波の力を借りて 情報を書きこむ

2 Tbit/in² 以上の記録密度の実現に

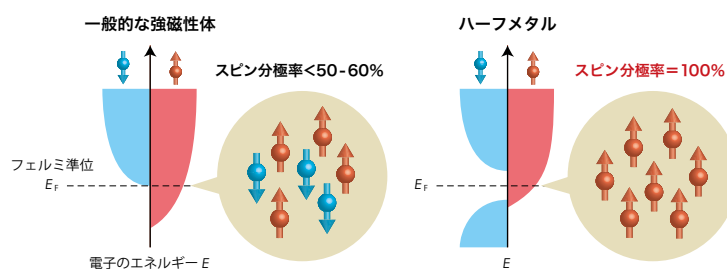


図1 一般的な強磁性体とハーフメタルの電子状態密度の模式図

ハーフメタルは、伝導を司るフェルミ準位*上で片方のスピン電子が存在しないため、100%にスピン分極した電流が期待される。

*フェルミ準位…固体中で電子が占有する最もエネルギーの高い準位で、フェルミ準位近傍の電子が伝導を担う

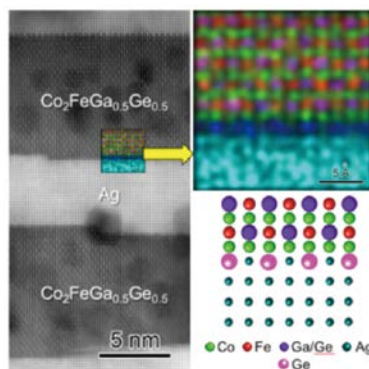


図2 ホイスラー合金系ハーフメタルを用いた CPP-GMR 素子
強磁性層にホイスラー合金系ハーフメタルである $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 、非磁性層に Ag を用いた例。左は走査型透過電子顕微鏡像。右上はエネルギー分散型 X 線分光器マッピング像で、原子レベルの分解能で界面の状態が分かる。非磁性金属に Ag を用いると、界面で一方の向きのスピンの電子だけが散乱され、スピン分極率が上がることが分かった。桜庭らは、このスピン依存散乱がより大きくなる非磁性金属を探索し、Ni-Al にたどりついた。最適な厚さは原子1.5層分であることも突き止めた。

は、書きこみの技術革新も必要だ。ビットの微細化に伴って記録媒体の磁石には熱によって磁化の向きがゆらぎにくい材料を用いる必要が出てくるが、そうなる書きこみヘッドからの磁界だけでは磁石の磁化を反転できなくなってしまうというジレンマが生じる。その対策として、レーザーによる局所的な加熱やマイクロ波照射によって小さな磁界でも磁化反転を可能にする、アシスト磁化反転の技術開発が進められている。

「ホイスラー合金系ハーフメタルはマイクロ波アシスト磁化反転のためのマイクロ波発振素子にも有用です」と桜庭。CPP-GMR 素子に電流を流すと、一方の強磁性体でスピン分極した電流がもう一方の強磁性体の磁化にトルク（力）を与えることにより、強磁性体中の磁化がコマのように歳差運動を起こしマイクロ波を発生する。強磁性体のスピン分極率が高い方が低電流でマイクロ波を発振できるため、ホイスラー合金系ハーフメタルを用いた CPP-GMR 素子が有望だ。

実験室レベルでは、ホイスラー合金系ハーフメタルを使うことで、マイクロ波の励起に必要な電流が一般的な磁性体を用いた場合の半分程度まで低減することを確認している。「HDD では、書きこみ

ヘッドの磁極と磁極の間の 20 nm ほどの隙間にマイクロ波発振素子を入れる必要があります。より薄く、かつマイクロ波を安定に長時間発振できる素子の作製が今後の課題です」

「ホイスラー合金は魅力的な材料」と桜庭は言う。「磁性材料だけでなく、熱電材料、磁気冷凍材料などさまざまな機能材料の候補として注目されているのです。機能性の宝庫であるホイスラー合金について、実験、解析、理論が密接に連携している私たちならではの研究をしていきたいですね」

（文・鈴木志乃／フォトンクリエイト）



桜庭裕弥

磁性・スピントロニクス材料研究拠点
磁性材料グループ グループリーダー

より多くの情報を1つの記録媒体に

情報を記録する磁性体粒子を微細化し高密度化に挑む

ナノの磁性体粒子をさらに細かく！

「記録媒体の記録密度を上げるには、1ビット (bit) 当たりの面積を小さくする必要があります」と高橋は言う。ハードディスクドライブ (HDD) の記録媒体表面には磁性体粒子が並び、粒子と粒子の間は非磁性体が埋めている。磁性体粒子は微小な磁石であり、書きこみヘッドが発生する磁界によって磁化の向きが反転し、情報を書きこむことができる。現在、およそ 8.5 ナノメートル (nm) の磁性体粒子 10 個ほどで、情報の最小単位である 1 ビット分を記録している。「粒子のサイズを変えずに 1 ビット当たりの面積を小さくすると、ノイズが増大してしまいます。そのため、磁性体粒子のさらなる微細化が必要なのです」

2022 年までに世界が目標として掲げている記録密度は 4 Tbit/in²。現在、主に使われている磁性体粒子はコバルト-クロム - 白金 (CoCrPt) 合金で、粒径は 10 nm ほど。目標を達成するには 4 nm にする必要がある。しかし高橋は、「CoCrPt を 4 nm にすると、室温の熱によって磁化の向きがゆらいで情報が消え

てしまい、記録媒体には使えません」と指摘する。

「次世代の磁性体粒子として注目されているのが、磁気異方性という性質が大きい材料、特に鉄 - 白金 (FePt) 化合物です」。磁気異方性が大きいほど熱による磁化ゆらぎが起きにくいので、粒径を小さくできる。

しかし、FePt を用いた記録媒体の開発は難航した。記録媒体では、規則構造を持ち粒径がそろった磁性体粒子を、均一に分散することが求められる。FePt の場合、その両立が難しかったのだ。世界中の研究者が苦戦する中、高橋らは、FePt と強く分離する炭素 (C) を粒子の間を埋める非磁性体に使い、成膜の条件を最適化することなどで問題を解決し、粒径 6 nm の記録媒体を実現。2011 年のことだ。「私たちの成功がきっかけとなって HDD メーカーによる FePt-C を用いた記録媒体の開発が加速し、まもなく市販されると聞いています」

現在、粒径は 5.2 nm に到達している (図 1)。粒径のさらなる微細化と合わせて、今後は粒子の形の制御も必要になる。理想は、粒径の 1.5 倍以上の高さがある円柱状だ。体積が大きくなるので、粒径が小さくても読みとりに必要な大きさの漏れ磁界が出る。ほかにも磁性体粒子の結晶構造の向きをそろえるなど課題は多い。「現在の組成ではクリアできないかもしれない」と高橋は言う。解析グループの力を借りながら、FePt-C に加える元素を探索しているところだ。

新方式の書きこみヘッドも開発

「記録媒体開発と同時に、書きこみ技術の開発もセットで進める必要があります」と高橋。FePt の磁化反転には 4 テスラ (T) の磁界が必要だが、現在の書きこみヘッドでは 1.5 T しか発生できないから

だ。磁界の不足を補うさまざまな方式が提案される中、高橋は「円偏光誘起磁化反転」に注目している。「円偏光」と呼ばれる特殊な光を照射すると磁界が発生し、磁性体粒子の磁化を反転できる。円偏光には右回りと左回りがあり、その切りかえによって磁化の向きを制御可能だ (図 2)。2016 年に世界で初めて、円偏光によって FePt-C を用いた記録媒体の磁化反転に成功した。

「次は、磁化が反転の様子を見たい」と高橋。見ることで、円偏光の照射量を最適化して磁化反転の効率を上げられる可能性もある。「磁化の反転を見た人はいません。とても難しいのです。でも、4 Tbit/in² の実現に向け、それをやらなければいけない段階に来ています。解析グループと連携し、ぜひ実現したい」と高橋は力強く語る。

(文・鈴木志乃/フォトンクリエイト)

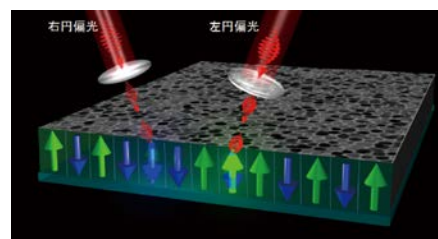
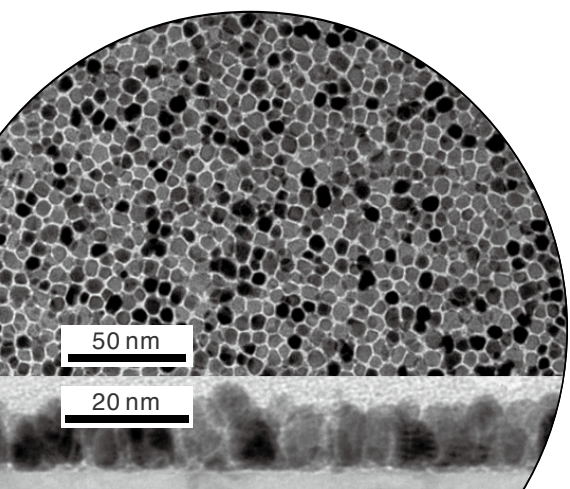


図2 円偏光誘起磁化反転のイメージ

図1

FePt-Cを用いた磁気記録媒体の電子顕微鏡写真上は、表面の様子で、黒や灰色の部分がFePtの粒子、その周りの白い部分がC。FePtの粒径は5.2 nm。下が横から見た様子で、粒子が円柱形をしていることが分かる。アスペクト比(粒子高さ/粒子径)は2。



高橋有紀子

磁性・スピントロニクス材料研究拠点
磁気記録材料グループ グループリーダー

〈第二章〉

スピントロニクス

20世紀に飛躍的な発展を遂げてきた電子の電荷を利用した「エレクトロニクス」。次いで、電子のスピンという性質が明らかになり、今、電荷に加えてスピンを工学的に利用しようという「スピントロニクス」が脚光を浴びている。スピンの向きを操ることで、デジタル情報を制御するだけでなく、熱や電気の流れをも制御することができるのだ。こうした力を活用し新原理のデバイスを実現するため、NIMSはまず基礎学理の構築に力を注ぐ。そして確固とした基礎のもと、電源を切っても情報が消えない次世代記録装置「不揮発性磁気抵抗メモリ(MRAM)」の一層の高性能化や、新たな応用先を開拓することもまた、NIMSの重要な使命である。期待高まるスピントロニクス、その現在地に迫る。

磁性・スピントロニクス材料研究拠点特集

MRAM大容量化と 安定的な動作を目指して

絶縁層「スピネルバリア」で高密度かつ安定性の高い情報記録に挑む

「巨大磁気抵抗効果」の発見が スピントロニクスの始まり

「従来、電子の電荷とスピンは個別に扱われてきましたが、『巨大磁気抵抗(GMR)効果』の発見により、スピンと電荷を制御する技術が一気に実用化に進みました」。こう語るのは、現在、革新的なスピントロニクス素子の開発に取り組んでいる介川裕章だ。

最初に、スピントロニクス素子の歴史を簡単に振り返っておこう。GMR効果が発見されたのは1988年のこと。GMR効果とは、強磁性体の薄膜で金属の薄膜を挟んだ構造において、強磁性体のスピンの向き(磁化)が、同じもの(平行)と逆向きのもの(反平行)とでは、電気抵抗が大きく異なるという現象だ。そこで、微弱な磁場を検知するハードディスクドライブ(HDD)用リードヘッドに加え、平行と反平行の状態をそれぞれ0・1のビットとして素子に格納することでメモリに利用

しようという発想も生まれた。

GMR効果を利用したリードヘッドは1997年に実用化されHDDの記録容量の飛躍的向上を支えてきたが、それを置きかえてHDDをさらに躍進させたのが、次いで開発されたトンネル磁気抵抗(TMR)素子だ。1995年に東北大学の宮崎照宣教授(現・同大 名誉教授、p3)の研究チームらが、GMR素子の金属層を絶縁層に置きかえた構造において、室温で「トンネル磁気抵抗(TMR)効果」を観測。GMR素子よりも大きい抵抗変化を示し、一気に実用化へと向かっていった。

現在TMR素子は、次世代メモリ「不揮発性磁気抵抗メモリ(MRAM)」の情報記録素子として大きな期待を担っている。電源を切っても素子に書きこまれた情報が消えない上、低消費電力で長時間使用しても劣化することがないからだ。

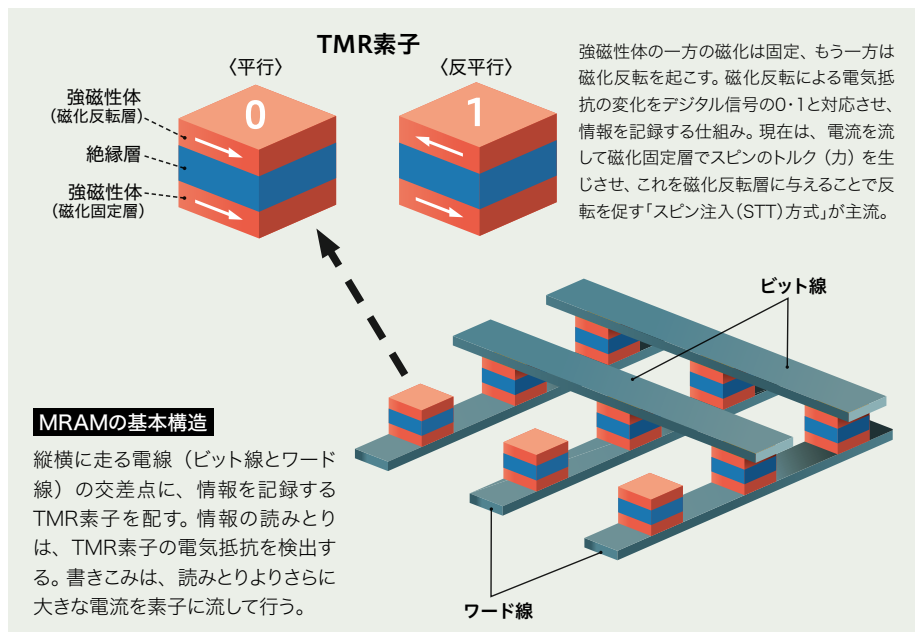
「TMR素子を搭載したMRAMはすでに実用化されており、過酷な環境においても高い信頼性があることから人工衛星や航

空機などで利用されています。しかし、一般のPCや携帯電話にはまだ搭載されていません。TMR素子を高密度化すると消費電力が増大してしまい、容量を大きくすることが難しいといった課題があるためです。これを打破するため、新たな材料の探索が続けられています」と介川は語る。

性能向上のカギを握る 「トンネルバリア」層

TMR素子は、強磁性体の間に、絶縁体(非磁性体)を挟んだ3層構造だ(p12左上図)。絶縁体の厚さは、わずか1～2 nm。この極薄の層をある確率で電子が通り抜ける現象が生じる。強磁性体の磁化によって電子の通り抜ける度合いが変わり、電気抵抗差が生じる。これが、TMR効果と呼ばれる現象だ。

TMR効果による電気抵抗の変化率は、強磁性体の磁化が平行と反平行の場合で異なり、これを「磁気抵抗比」と呼ぶ。



磁気抵抗比が大きくなれば、0と1の区別がしやすくなり、MRAMの動作が高速になる。また、消費電力も少なくて済み、大容量化にもつながる。

「磁気抵抗比はMRAMの性能を大きく左右します。磁気抵抗比向上のカギを握るのが、絶縁体の薄膜で、この絶縁層は『トンネルバリア層』とも呼ばれています。過去のTMR素子の進展は、絶縁層の材料を置きかえることによってもたらされてきました」

実は、TMR効果が最初に報告されたのは、GMR効果よりも早い1975年のこと。しかし、室温での磁気抵抗比は1%以下と極めて低かったため、実用の観点では注目度は低かった。ところが、その20年後に宮崎教授らが酸化アルミニウム(Al_2O_3)を絶縁層に使い、室温で18%という高い磁気抵抗比を示したことで一気に注目を浴びた。2004年には、産業技術総合研究所の湯浅新治氏らにより室温で200～500%もの磁気抵抗比を示す酸化マグネシウム(MgO)絶縁層が発見され、現在はほとんどのTMR素子に MgO が使われている。

しかし、 MgO には課題があるという。「大気中の水分と反応して溶ける潮解性という性質があり、材料としての安定性は高くありません。そして、 MgO と格子定数（結晶格子の長さ）が異なる材料を強磁性体に使うと、界面で多数の欠陥が発生し磁気抵抗比が大幅に低下してしまうた

め、強磁性体の選択の幅が非常に制限されてしまいます」と介川。

絶縁層の有力候補は、自然界の鉱物「スピネル」

そのような中、介川が MgO に代わる材料として新たに発見したのが、「スピネル型」と呼ばれる結晶構造をした酸化アルミニウムマグネシウム(MgAl_2O_4)だ。

MgAl_2O_4 は自然界に存在する鉱物で宝石としても知られ、非常に安定性が高い。また、強磁性材料として有望なホイスラー合金と、格子定数をほぼ完全に整合させることができるため、TMR素子の性能を限界まで引き出せる可能性が大きいのだ。

2009年には、 MgAl_2O_4 の単結晶を絶縁層に使った無欠陥のTMR素子の開発に成功（図1）。2014年には実際に、室温で300%以上という高い磁気抵抗比を示すことが確認された。

「磁気抵抗比の値だけ見ると、 MgAl_2O_4 が MgO を凌ぐにはさらなる改良が必要です。とはいえ、大容量MRAMの実現には磁気抵抗比だけではなく、電気抵抗の低減や結晶の安定性、強磁性材料との相性といったいくつかの条件をクリアする必要があります。スピネル型材料はそうした特性をバランスよく発揮できる可能性を秘めています。今後、 MgAl_2O_4 に限らずさまざまなスピネル型材料を作製する中で、よ

り実用に適した材料が見つかるかもしれません」

実際に企業と共同で、 MgAl_2O_4 のAl（アルミニウム）をGa（ガリウム）に置きかえた MgGa_2O_4 を絶縁層に使ったTMR素子の開発も進め、介川は、 MgO や MgAl_2O_4 に比べて電気抵抗を約50分の1に低減し、MRAM用情報記録素子として好ましい性能を示すことに成功しているという。

「材料はデバイスとして性能を発揮して初めて、その価値が認められます。今後も材料の研究開発に留まらず、デバイスとしての性能向上に努めていくことで、革新的なスピントロニクスデバイスの実現に貢献したいと願っています」

（文・山田久美）

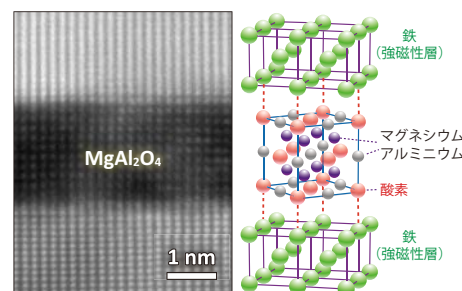


図1 鉄/スピネル/鉄の積層断面の電子顕微鏡像
介川がTMR素子の作製に採用したのは、幅広い産業応用に使われているスパッタ法だ。 MgO の単結晶基板上に絶縁層の原料を成膜させていった。プラズマ酸化法と呼ばれる方法を使って酸化を巧妙に制御した。「できた絶縁層を電子顕微鏡で観察したところ、予想に反して、アモルファスではなくきれいな単結晶で、上下の強磁性層との間に欠陥がほとんどないことに驚きました。理由は、基板がガラスではなく、 MgO の単結晶を用いたことで MgAl_2O_4 が結晶化できたから。極めて高品位な素子が作れることを示すことができました」（介川）



介川裕章

磁性・スピントロニクス材料研究拠点
スピントロニクスグループ 主幹研究員

電子のスピンをそろえ情報の読み書きをスムーズに 重金属の「スピンホール効果」を利用した大容量で省エネなMRAM実現へ

金属の性質を利用して 低電流密度で書きこみを実現する

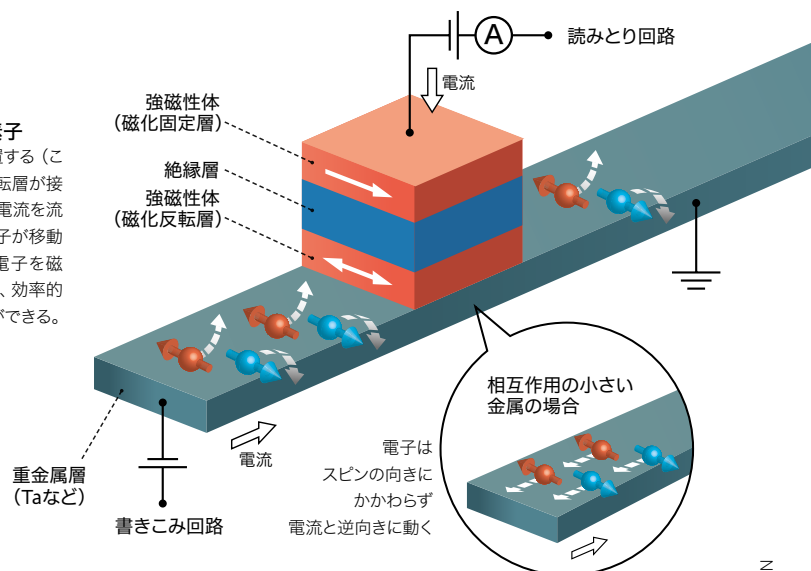
MRAM (p12に全体図) のメモリ素子への情報の書きこみは、これまでいくつかの方式が検討されてきた。その中で、現在すでに実用化され、開発の主流であるのが「スピン注入書きこみ方式」だ。「スピントルク」という現象を利用している。スピントルクとは、強磁性体の薄膜に電流を流す時、強磁性体の電子のスピン向き（磁化）に力がかかる現象である。他の方式によるものと区別して、スピン注入磁化反転型磁気メモリ (STT-MRAM) と呼ぶ。

STT-MRAM では、まず TMR 素子を構成する強磁性体（磁化固定層）に電流を流して向きのそろった電子スピンを生じさせ、それをもう一方の強磁性体（磁化反転層）に移行することでスピントルクを生じさせる。一定以上の電流を流せば、スピントルクによって磁化が反転（磁化反転）する。それに伴う電気抵抗の変化をデジタル信号の 0・1 の情報として記録する、というわけだ。

しかし、強磁性体を磁化反転させるには大きな電流密度を必要とする。MRAM の大容量化への要請が高まる今日、強磁性体の磁化の向きをできるだけ低い電流密度で制御する技術の開発が求められている。このような中、「スピンホール効果」と呼ばれる現象を利用することで、電流密度の低減に挑んでいるのが林将光だ。

スピンホール効果とは、通常、金属に電流を流すとすべての電子はスピンの向きに関係なく電流と逆向きに動くのに対して、スピン軌道相互作用* の大きなタンタル (Ta) や白金 (Pt) などの重金属に電流を流すと、スピンの向きに依

図 スピンホール効果による磁化反転を利用したTMR素子
TMR素子を重金属層の上に配置する（この構造では、重金属層に磁化反転層が接するよう積層する）。重金属層に電流を流すと、スピンの向きに依存して電子が移動する。スピンの向きがそろった電子を磁化反転層に注入することによって、効率的に素子の磁化反転を起こすことができる。



存して電子の動く向きが決まる現象のこと。つまり、スピンの向きが 100%そろった電子の流れ（スピン流）をつくりだすことができるのだ（図）。STT-MRAM においては、強磁性体に流す電流のスピンの向きがそろっていればいるほど、スピントルクを効率よく発生させることが可能となる。

そこで現在、林が研究を行っているのは、TMR 素子の下に重金属層を配した構造だ。重金属層で発生したスピン流を強磁性体（磁化反転層）に注入し、磁化反転を促す。磁化反転の向きは、重金属層に電流を右から流すか左から流すかによって制御できる。

さらに、「この仕組みには電流密度の低減以外にも、もうひとつメリットがあります」と林は言う。通常の STT-MRAM では、読みとりと書きこみの電流を同一の回路に流すため、読み書きを繰り返すうちに、誤って TMR 素子が磁化反転を起こして情報が書きかわってしまうことがある。それに対し、重金属層を使った構造では、読みとり電流は TMR 素子へ、書きこみ電流は重金属層へと流し、回路を分離させることによってエラーを減らすことができるのだ。

「現在は基礎研究の段階で、電流密度をどれくらい低減できるか、まだ明示できていません。そのため、今後も TMR 素子の改良を進めていく中で、詳しい性能を明らかにしていきたいと思っています。電流密度を桁違いに低減させるには、新材料も検討する必要がある、トポロジカル絶縁体なども含めて検討中です」と語る林。大容量の MRAM の早期実現に向け期待は高まる。

（文・山田久美）

*スピン軌道相互作用…電子の持つスピンと運動量との間の相互作用のこと



林 将光

磁性・スピントロニクス材料研究拠点
スピントロニクスグループ グループリーダー

スピンを利用して熱や電気を操る 磁気と電流が引き起こす磁性体の温度変化を捉えた！

世界初の観測に成功した 「異方性磁気ペルチェ効果」とは

物質中で起こる電気の流れ（電流）、熱の流れ（熱流）、磁気の流れ（スピン流）は相互に作用し、互いに変換可能であることが知られている。これらをうまく制御すれば、エネルギーの利用効率を高めることができる。中でも、スピン流に関する多くの世界初の観測で基礎研究をけん引しているのが、内田健一だ。

電流、熱流、スピン流の中で、電流と熱流との相互作用については、1800年代に観測されている。熱流から電流への変換を「ゼーバック効果」、電流から熱流への変換を「ペルチェ効果」という。しかし、スピン流と電流・熱流との相互作用に関しては観測が難しく、なかなか実証されなかった。そうした中、2008年に世界で初めて、磁性を持つ金属において、熱流からスピン流が発生する「スピンゼーバック効果」の観測に成功したのが、当時、慶應義塾大学に在籍していた齊藤英治専任講師（現・東京大学教授）と大

学4年生の内田健一（現・NIMS グループリーダー）だ。さらに内田らは、導電性のない絶縁体においてもスピンゼーバック効果が発生することを発見するなど、この分野において世界をけん引してきた。

そして2018年5月、内田は新たな成果を発表した。ニッケル（Ni）などの強磁性体中で電流を曲げるだけで、特定の場所のみが温まったり冷えたりする現象「異方性磁気ペルチェ効果」の世界初の観測だ。

ペルチェ効果とは、金属や半導体に電流を流すとその方向に沿って熱流が生じる現象のことで、電流の向きに応じて発熱と吸熱を制御できるのが特徴だ。これまでは異なる2種類の物質を接合した界面でのみ、発熱や吸熱が確認されていた。一方、強磁性体では、スピンの効果により磁化*が電流に対して平行な場合と直交している場合とでは、電流から熱流への変換効率が異なることが予想されていた（図1）。「これは、強磁性体中に磁化の向きが異なる領域を作りさえすれば、単一の材料でも発熱・吸熱を発生させられることを意味します。そこで、コの字に加工したNiを一樣に磁化させた上で、電流を流した際に発生する温度分布を、われわれがスピントロニクス研究用に発展させたロックインサーモグラフィ法*を使って計測してみることにしました」と内田（表紙に装置写真）。

Niをコの字に加工したのは、コの字の角の領域で、磁化と電流の相対的な角度が変化するからだ。計測の結果、予想通り、角の付近で温度が変化していることが確認された（図2）。また、Niが磁化していないときには温度変化は生じなかった。これは、温度変化が異方性磁気ペルチェ効果によるものであることを示

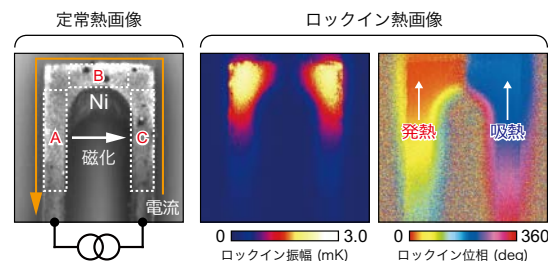
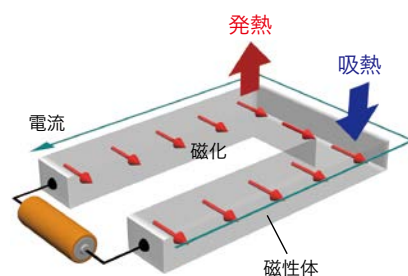


図2 異方性磁気ペルチェ効果の観測

している。

「たとえば、デバイスの中で冷やしたいところと温めたいところが近接している場合があります。そんな時にこの現象を利用すれば、単一の強磁性体を加工して電流を流すだけで良いわけです。スピントロニクスは基礎学理の構築とともに、応用先の開拓も大きな課題です。やるべきことは、まだまだたくさんあります」。内田は前を見据える。

（文・山田久美）

*磁化…磁性体に磁場をかけると磁石になる現象。磁性体の磁気の強さ・方向程度を表す物理量も磁化と呼ぶ（単位体積当たりの磁気モーメント）。

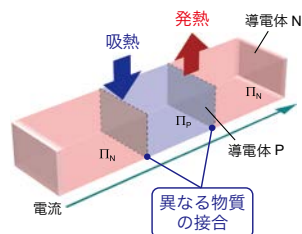
*ロックインサーモグラフィ法…試料に周期的に変化する入力信号（今回は電流）を印加しながら、赤外線カメラを用いて表面の温度分布を測定する手法。入力信号と同じ周波数で時間変化する温度変化だけを選択的に抽出して、高感度にイメージングできる。



内田健一

磁性・スピントロニクス材料研究拠点
スピンエネルギーグループ グループリーダー

(a) 従来のペルチェ効果



(b) 異方性磁気ペルチェ効果

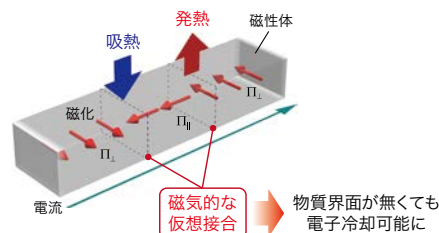


図1 従来のペルチェ効果(a)と異方性磁気ペルチェ効果(b)の概念図

磁性・スピントロニクス材料開発の羅針盤

— とるべき針路を指し示す〈解析技術〉と〈理論計算〉 —

解析 する

磁性材料の特性は、微細構造と深く結びついている。微細構造に起因する現象を解きあかす解析技術の向上は、磁性材料の研究開発を強く後押ししてきた。走査型電子顕微鏡、収差補正走査透過型電子顕微鏡、3次元アトムプローブは、ミクロからナノ、原子スケールでのマルチスケール組織解析が可能だ。

磁性材料解析グループのセペリ-アミンらは、これら装置を駆使し、既存の磁性材料の改良と新材料の研究開発を行っている。そのひとつに、セペリ-アミンが専門とする永久磁石がある。ジスプロシウム (Dy) やテルビウム (Tb) といった希少元素に依存しない、高性能永久磁石の開発である。

「既存の Nd-Fe-B 系永久磁石は、希少元素を付加することで室温での保磁力を高めています。しかし、Nd₂Fe₁₄B 相の異方性磁界は本来、希少元素なしでも高い保磁力が得られるだけの十分な強さを持つと理論的には言われています。そこで私たちは、保磁力が低

下してしまう原因が微細構造のどこにあるのかを突きとめ、改良していくことでその原因を無くしたいと考えています。2014年には、粒界に集まる Fe の存在が保磁力低下につながることを明らかにし、Dy フリー磁石のサンプル作製に成功しました (p2 に原子マップ)。現在は、一層の高保磁力化と保磁力の熱安定性改善を目指して、『有限要素マイクロマグネティクス計算法』という計算手法を併用しながら、材料の微細構造を設計しているところです」

ほかにも、最新の解析技術と計算による材料設計をさまざまな磁性材料に応用している。たとえば、記録密度の高い次世代ハードディスクドライブ (HDD) 実現に向けた材料だ。同拠点内のグループはもちろん、企業の研究者らとも共同研究を行っている。

「応用例として、私たちは現在、磁性材料グループ (p8) と共同でマイクロ波アシスト磁気記録向けのスピントルク発振素子の実現に取り組んでいます。さらに磁気記録材料グループ (p10) と共同で、FePt ナノ粒子

媒体の微細構造とその磁気的特性の関係を調べるとともに、熱アシスト磁気記録の性能向上にも取り組んでいます」。いずれも次世代磁気記録として、大容量 HDD の開発につながると期待されている。

「未来に向けて、開発すべき新材料があります。既存の Nd-Fe-B 系永久磁石より高性能な永久磁石の発見は、この分野に携わる者にとっての夢でもあります。決して簡単ではありませんが、最新の研究設備と専門家が集まるこの NIMS でぜひ実現したいと願っています」

(文・R. キャメロン)



ホセイン・セペリ-アミン

磁性・スピントロニクス材料研究拠点
磁性材料解析グループ 主任研究員

予測 する

「新たな磁性・スピントロニクス材料を見いだすための“指針”を提示すること」。自身の役割について、三浦はこう語る。使うのは第一原理計算だ。「第一原理計算は、物質の物性解析に用いられる計算手法です。物質中の電子に働く相互作用を量子力学に基づいて正確に記述することで、実験とは独立に物質の性質を近似の範囲内で正確に予測することができます。特に磁性・スピントロニクス材料の“磁性”や“スピン”の性質は、量子力学でしか記述することができな

いため、第一原理計算による物性予測が重要です」と三浦。現在は、実際に材料を使用する温度領域 (室温付近) で、磁気抵抗効果や磁気異方性などの磁気物性が大きく変化しないようにするためにどのような工夫が必要かを、電子論的に明らかにする研究に取り組んでいる。特に最近では、絶縁体と磁性体薄膜の接合面での“スピンの堅さ”を補強することにより、磁気抵抗効果の温度による変化を小さくできる可能性があることを明らかにした。「実用化できる磁性・スピントロニクス材料の理論設計を目指して、有限温

度における磁性理論の手法を援用しながら、実験研究者と協力しながら研究を進めたいと考えています」



三浦良雄

磁性・スピントロニクス研究拠点
独立研究者

きみが思っているより 科学はもっとおもしろい



サメと淑女

文・えとりあきお
イラスト・岡田 文 (vision track)

もう50年以上も前の話になりますが、私は初めての海外旅行でアメリカをたずね、宇宙開発の現場やニューヨーク世界博など、さまざまな科学施設取材してテレビ番組を制作しました。

そのなかで最も印象に残っているのが、フロリダの小さな海洋研究所です。

タンパの空港に降りたカメラマンと私を迎えてくれたのは、すてきな女性研究者のユージニ・クラークさん。キャデラックのオープンカーを、ジーンズにサンダルというラフな格好で運転する姿は、当時のアメリカの繁栄を象徴しているようで、私たちをビックリさせました。

クラーク博士はケープ・ヘイズ海洋研究所の所長で、サメの生殖機構を中心に、魚の研究にいそしんでいました。博士は日本人の血が4分の1まじっていたこともあって大の日本

びいき、若い私たちを大歓迎してくれました。

毎日、ハエナワのような仕かけでサメを捕獲してきては、それらを測定・解剖して研究します。小さなサメは飼育して観察します。彼女はそのうちに飼育しているサメを訓練することを思いつき、いくつかの記号を覚えさせることに成功しました。

この訓練したサメは、後で思わぬ機会をもたらします。日本の皇太子(当時、現・天皇陛下)が昭和天皇と並んで魚類学者として優れていることはよく知られていますが、皇太子が博士を日本に招くことになったのです。そこで博士は、記念に訓練したサメをお見せすることを思いつき、日本まで飛行機に乗せて運びました。無事に日本に着いたサメが皇太子ご夫妻を大いに喜ばせたことは言うまでもありません。

クラーク博士は、サメの生殖器がオス、メスともに二つずつあることも見つけていますし、ある種のサメがじっと眠りにつくことがあることも発見しています。彼女のフロリダの生活は“The Lady and the Sharks”という一冊の本になりました。

アメリカと日本で何度も彼女と会う機会があった私は、この本を日本にも紹介したいと思い、翻訳を思いました。それは『海と太陽とサメ』という題で、1972年に刊行されました。

クラーク博士との縁でサメに興味を持った私は、最近とある本に目をとめました。5月に出版されたばかりの『ほぼ命がけサメ図鑑』(講談社刊)です。“シャークジャーナリスト”の沼口麻子さんが著したこの本には、クラーク博士の数々の発見はもちろん、現在のサメに関する知識や情報がほぼ完全に掲載されています。

その中身をここで紹介するわけにはいきませんが、クラーク博士の時代ともっとも違っている点は、地球環境問題が悪化して、サメの仲間の多くが「絶滅危惧種」に指定されるようになったことでしょう。

サメは、509種類が確認されているうち、74種類が「絶滅危惧種」に相当しています*。比較的多くの人にその名が知られているホホジロザメ、ジンベエザメ、シュモクザメもその中に含まれます。沼口さんはサメをこよなく愛し、すべての人びとに“シャークビリティ”(彼女の造語でサメに対する知識や熱い気持ちのこと)をアップさせてほしいという強い願いを本の中で語っています。

生物多様性の保存は、地球にとっても私たち人類にとっても極めて重大な問題です。いま哺乳動物の世界でも、は虫類や両生類、そして魚類の世界でも深刻な状況になっています。ですから、サメに限らずすべての生きものに対して、沼口さんが抱くシャークビリティのような、深い関心と熱い気持ちを持ってほしいものです。クラーク博士もきっとそれを願っていることでしょう。

*IUCN 2013レポートより



えとりあきお：1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。