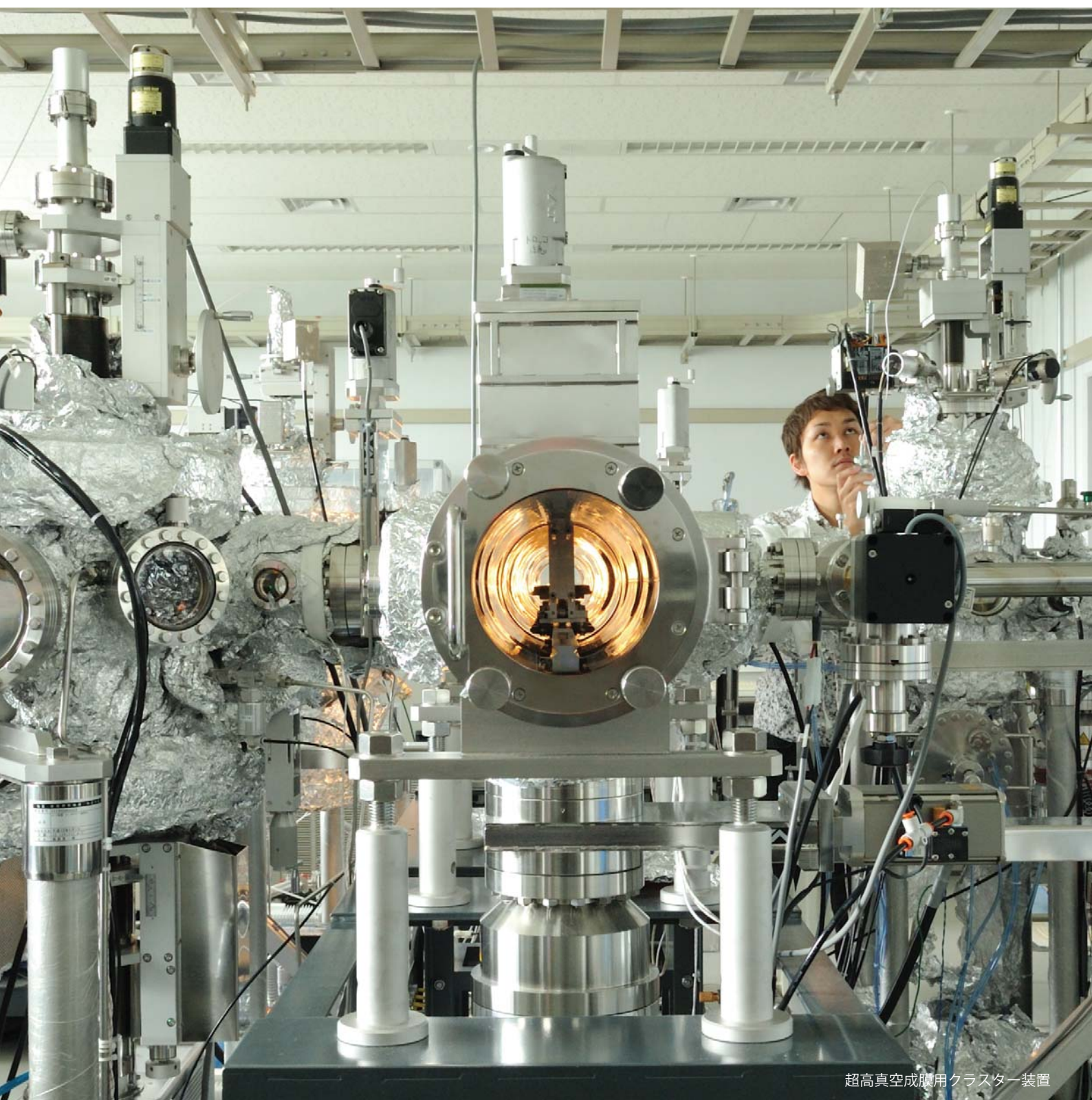


# NIMS

2010年 10月号

# NOW

**環境負荷を低減する  
高性能磁性材料開発**



# 環境負荷を低減する 高性能磁性材料開発

EVのモーターなどの各部品からPCのハードディスク磁気記録ディスクまでわたしたちの身の回りには、想像以上に磁石が使用されています。それらの多くは重希土類元素が添加された高性能磁石です。NIMSの磁性材料研究は、磁石の性能効率を向上させることにより、磁石の使用量そのものを削減し、同時に使用にかかる電力を削減することを目指しています。高性能・高効率化は環境コスト低減に直結するからです。NIMSの磁性材料研究の最新動向をお送りします。



## 省エネに貢献する磁石のナノ構造構築

NIMS フェロー・磁性材料センター長 宝野和博

### 高性能磁石の必要性

磁石は外部からのエネルギーなしに磁場を発生できるので、発電機やモーターなど電力⇄動力の変換に使われています。

磁石を使わない誘導モーターや誘導発電機は大きくなってしまい、電気自動車や風力発電など、小型・軽量・高効率が必要とされる用途には適していません。これらの電力・動力変換機器に高性能なネオジム磁石を使うことにより、機器の小型化・高効率化が可能となり、大きな省エネ効果が期待されます。

### ハードディスクに不可欠な磁石

今や、年間のハードディスクドライブの出荷台数は約6億台で、これはテレビやパーソナルコンピュータを遙かに上回っています。

高品位テレビ(HDTV)の録画やコンピュータのデータ保存に大量に使われているハードディスクドライブ(HDD)のディスク表面には直径6nm程度の磁石粒子が高密度で配向分散しています。このナノ磁石のS/N方向を変えることによって、ビットを記録しています。ハードディスクドライブではこのようなディスクを高速で回転させ、磁界を感知するヘッドで磁気情報を読み取るわけですが、このディスクを回転させる超小型のスピンドルモーターとヘッドを動かすボイスコイルモーターにもネオジム磁石が使われています。つまり、ネオジム磁石なしでは、ハードディスクドライブの高密度化・小型化は全く不可能だったともいえます。

### データストレージに使われるナノ磁石

ハードディスクドライブのディスクで磁気情報を記録するナノ粒子には、現在Co-Pt-Cr(コバルト・白金・クロム)合金が使われていますが、現状(~550Gbit/in<sup>2</sup>)の倍以上の磁気記録をおこなうためには、Co基合金よりも一桁以上高い結晶磁気異方性を持つFePt合金を使ってハードディスクドライブの磁気記録媒体を作る必要があります。

### ハードディスクのヘッドに応用されるスピントロニクス

ハードディスクドライブのヘッドとして使われてきた巨大磁気抵抗(GMR)素子は磁性体層と非磁性体層をナノスケールで積層した素子で、磁性体の相対的な磁化方向によって電気抵抗が変化します。この現象の発見により磁性体のスピンの方向で電流を制御するスピントロニクスと呼ばれる分野が形成され、GMR

は発見後僅か10年でハードディスクの再生磁気ヘッドとして市場投入されました。

現在のハードディスクドライブのヘッドには小さな磁場変化で大きな電気抵抗変化の起こるトンネル磁気抵抗素子(TMR)が使われていますが、HDDの記録密度が2Tbit/in<sup>2</sup>を超えるあたりで、絶縁体を使うTMR素子では、高電気抵抗のために高速応答性に対応できなくなると予想されています。そのため、電気抵抗の低いGMRで高い磁気抵抗出力を得る研究や、全く新しいタイプの磁気センサーの開発が進められています。

### 磁石を応用したメモリ、MRAMの可能性

このようなハードディスクドライブはビット単価が安く、大容量のデータストレージに適しています。一方、より高速記録再生に必要なコンピュータのワークメモリでは、コンデンサに電荷を蓄えて情報を保存するDRAMが広く使われています。

DRAMでは電源を切ると電荷が放電によってデータが失われてしまう(揮発性)ため、現在のコンピュータでは起動時にハードディスクドライブからもう一度データを読み込む必要があります。

MRAMという新しいメモリでは情報の保存にTMR素子を使用します。それにより電源を切ってもデータは磁石により保持される(不揮発)こととなります。MRAMは素早い起動が可能なインスタントオンコンピュータのワークメモリとして期待されていますが、それだけではありません。将来安価で大容量のMRAMが開発されれば、ハードディスクのようなデータストレージにも置き換わる可能性があるのです。MRAMはディスクを高速回転させる必要がないため、実現すると、IT分野における膨大な省電力効果が期待できます。

このように磁性材料センターではさまざまな磁性材料からナノ構造を構築することにより、磁石特性・軟磁気特性・磁気記録特性・電子のスピンに依存する伝導特性を最大限に引き出し、省エネルギーに貢献する材料イノベーションを目指しています。

ほうの かずひろ ペンシルベニア州立大学院博士課程修了。1988年カーネギーメロン大ポスドク、1990年東北大金研助手、1995年金属材料技術研究所主任研究員などを経て2004年から現職。筑波大学大学院数理物質科学研究科教授(連係)を兼任。

DRAM : Dynamic Random Access Memory

MRAM : Magnetoresistive Random Access Memory

# より高密度なハードディスクを実現させる 「L1<sub>0</sub>-FePt」を用いた熱アシスト磁気記録媒体の開発

磁性材料センター  
磁性材料グループ  
高橋有紀子

磁性材料センター  
磁性材料グループ  
Zhang Li

## ハードディスクの高密度・高容量化へ

デジタルカメラやデジタルテレビの普及により、膨大なデータが一般家庭やデータセンターで保存されるようになり、データストレージの高容量化への要求が際限なく高まっています。種々のストレージデバイスの中でも、ハードディスクドライブ(HDD)は高信頼性・安価・大容量という利点を持つために広く使われており、ハードディスクドライブの磁気記録密度をさらに高めていく技術が要求されています。

現在市販されているハードディスクドライブのプラッタ(記録ディスク)記録密度は約540 Gb/in<sup>2</sup>です。平均ビットサイズ(記録密度)は35nm<sup>2</sup>になっており、このビットは約15個のCoPtCr(コバルト・白金・クロム)合金の磁石粒子で構成されています。

記録密度をさらに高めるためには、ビットを構成するディスクの磁石粒子を約4nmまで微細化する必要があります。ところが現在のプラッタで使われているCoPtCr合金の微粒子だと約6nm程度で磁石が熱エネルギーによって揺らぎはじめます。そのため、現在の垂直磁気記録方式では2Tb/in<sup>2</sup>程度が限界と考えられているのです。

## 熱アシスト磁気記録方式

このようなナノサイズでも安定した磁石となる新しい材料として、結晶磁気異方性エネルギーがCo合金より一桁高いL1<sub>0</sub>という規則構造を持つFePt(鉄・白金)合金が注目されています。

ところがこの合金には問題があります。L1<sub>0</sub>-FePtをナノ粒子化すると、ディスクの磁化を反転させるのに必要な磁場が30kOe以上に大きくなるため、現行の垂直磁気記録方式では書き込むことが出来なくなるのです。(現在のCoPtCr合金では10kOe程度)

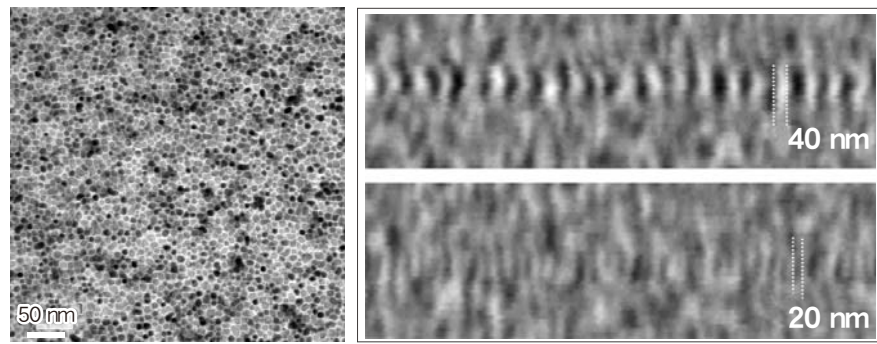


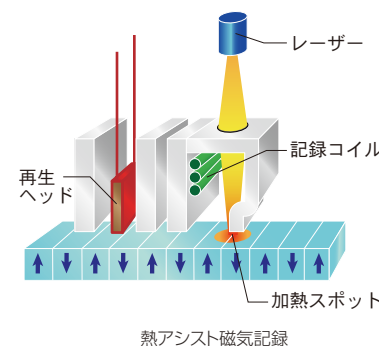
図 FePtAg-Cグラニューラ薄膜のTEM像(左)と、熱アシスト方式静的テストによるビットのパターン(HGST San Jose Research Center) (右)

そこで磁気ヘッドに組み込んだレーザーで、プラッタ上のFePt粒子を強磁性が失われる温度であるキュリー温度の近くまで加熱し、低い磁場で磁化・記録する「熱アシスト磁気記録方式」が、4Tb/in<sup>2</sup>級のハードディスクドライブを実現する技術として注目されています。

熱アシスト磁気記録媒体としてL1<sub>0</sub>-FePtを使うためには、4nm程度のL1<sub>0</sub>-FePtナノ粒子を10%以下のサイズ分散で実現する必要があります。さらにすべてのL1<sub>0</sub>-FePt粒子を(001)配向し垂直磁化膜とする必要があります。

私たちはこのような媒体構造を実現するためにFe, Pt, Ag(銀)と炭素を同時スパッターすることにより、左図に示すような平均粒子径が6.7nmで分散が1.8nmの均一なL1<sub>0</sub>構造を持つFePtAg-Cのナノコンポジット垂直磁化膜の創製に成功しました。

この膜を使った静的な熱アシスト磁気記録試験を(株)日立グローバルテクノロジーで行った結果、右図にみられるように、20nmのビットが明瞭に観察できることが確認されました。さらに詳細な解析により、この垂直磁化膜を用いたハードディスクのディスク面では450Gb/in<sup>2</sup>の面密度が達成されることが確



認され、FePtを用いた熱アシスト磁気記録としては現在(2010年10月)のところ最高の値となっています。

今後、平均粒子径をさらに4nmまで微細化し、サイズ分散をさらに抑え、レーザー加熱の熱流をも考慮した媒体構造に改良することにより、さらなる高密度化が可能になると期待されます。

たかはし ゆきこ 博士(工学)。2001年、東北大学大学院修了。日本学術振興機構 科学技術特別研究員などをへて物質・材料研究機構 磁性材料センター・磁性材料グループ。2010年より同グループ主幹研究員。

ざんりー アメリカCarnegie Mellon University修了後、2005年、中国・電子科技大学、北海道大学を経て2008年より物質・材料研究機構ポスドク。

キュリー温度: 鉄は770°C、ニッケルは354°C  
垂直磁化膜: 垂直磁気記録方式に使われるように開発された磁化膜。垂直磁気記録方式とは、磁性体に対して垂直に磁化(記録)する方式。他に水平に記録する水平磁気記録方式がある。

# ホイスラー合金を用いたCPP-GMR素子の開発

磁性材料センター  
磁性材料グループ  
古林孝夫

筑波大学  
大学院  
中谷友也

## 応用が期待されるスピントロニクス

物質中の電子は電荷を持ち、電気伝導を担っています。それと同時に、それぞれが小さな磁石のように振る舞っており、「磁性」ももっているのです。また電子は一つずつ、それぞれの磁性の向きが上向きか下向きかを定める「スピン」と呼ばれる性質を持っています。これら電子の持つ、電気伝導、磁性の両方の特性を組み合わせる技術が「スピントロニクス」です。

ハーフメタルとは、一方向の、例えば上向きスピンの電子のみが金属状態となり電気伝導を担っていて、もう一方の、例えば下向きのスピンの電子は全く電気伝導に関与しないような材料をいいます。ハーフメタルは磁化の向きが完全に揃った伝導電子の発生源として、スピントロニクスのさまざまな応用分野で大きな効果を出す材料であると期待されています。

巨大磁気抵抗効果(GMR)は、数ナノメートル以下の厚さの金属薄膜を強磁性体の薄膜で挟んだ時に、2つの磁性体の磁化の方向が互いに平行か反平行かによって金属薄膜の電気抵抗が大きく変化する現象です。

## より高い記録密度へ、CPP-GMRへの期待

ハードディスクを構成する要素の一つに記録パターンの生じる磁界を電気信号に変換するデバイスである読み取りヘッドがありますが、GMRは読み取りヘッドに応用され、記録の高密度化に大きく貢献してきました。

現在の読み取りヘッドでは絶縁体薄膜を強磁性薄膜で挟んだトンネル磁気抵抗(TMR)が使われていますが、さらに高い記録密度を実現させるためには、より大きな抵抗変化を示す素子やマイクロ波を発振する素子が求められています。

そこで私達は、GMRの中でも膜面に垂直

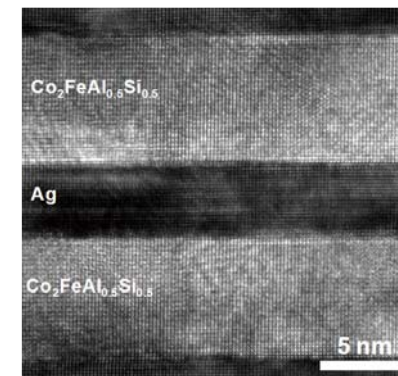


図1 CPP-GMR素子の断面透過電子顕微鏡像

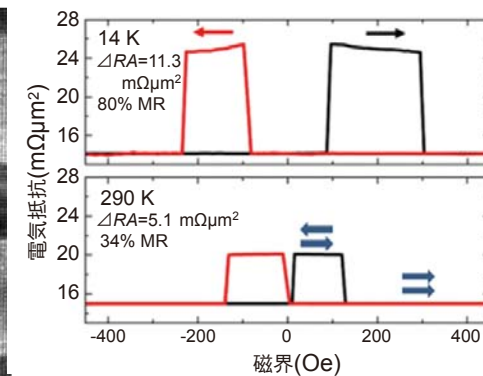


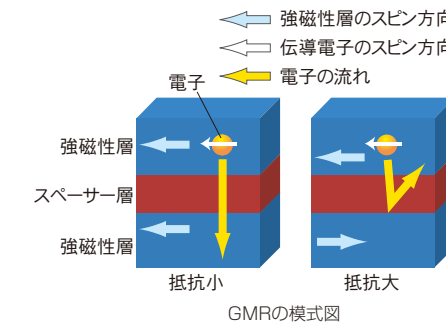
図2 各温度での電気抵抗の磁界依存性

に電流を流すタイプのCPP-GMR素子に着目し、強磁性体層として従来のCoFe合金などに替えてハーフメタル性の期待されるホイスラー合金を用いる研究を行っています。ホイスラー合金はL2<sub>1</sub>構造と呼ばれる規則的な原子配置を持ったX<sub>2</sub>YZ組成で表され、いくつかの金属の組み合わせについては理論的、実験的にハーフメタルであると考えられています。

私達はCo<sub>2</sub>Fe(Al<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>)などのホイスラー合金を強磁性層に、Agをスペーサー層に用いて素子を作成してきました。素子は図1に示す様に原子レベルで平坦な層状構造をしています。現在までに室温で34%、低温で80%の磁気抵抗変化率を得ています(図2)。これらの値はCPP-GMRで得られている値としては最大です。

また、2.5nmという非常に薄い強磁性層でも大きな磁気抵抗効果が得られたことは、高記録密度のための微細な素子の実現のために有利な点です。

しかしながら現時点では合金中の原子が十分規則的に配列していないために、現在の値でも室温ではまだ十分な性能が出てい



ないと考えています。今後、より高性能な新たな材料を開発すること、薄膜の作成条件を工夫することにより、さらに大きな磁気抵抗変化率を実現し、高密度磁気記録用ヘッドとしての可能性を検討しています。

ふるばやし たかお 理学博士。東京大学大学院修了。1984年4月科学技術庁金属材料技術研究所入所。2006年4月より物質・材料研究機構 磁性材料センター・磁性材料グループ主席研究員。

なかたに ともや 大阪府立大学工学部卒。2006年4月より筑波大学大学院在学。

# NIMSの材料開発が貢献する 磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)

磁性材料センター  
スピントロニクスグループ  
介川裕章

磁性材料センター  
スピントロニクスグループ  
葛西伸哉

磁性材料センター  
スピントロニクスグループ  
グループリーダー  
三谷誠司

## MRAMに求められるTMRとは

ハードディスクドライブ(HDD)が大容量ストレージとして活躍する一方で、駆動部を持たない固体素子の不揮発メモリも不可欠なものになっています。将来的な用途としてはストレージ用HDDの一部を置換えることや、論理回路との混載素子を開発しシステム全体の高速化・低消費電力化を実現することも主な狙いです。

現在の代表的な不揮発固体メモリは半導体によるフラッシュメモリですが、動作速度や書換え回数に弱みがあり、これらを克服する新規固体不揮発メモリとして、MRAMが注目を集めています。

初期のMRAMはGMRを用いていましたが、現在では出力の大きな強磁性トンネル接合のTMRが用いられています。16MbitのMRAMが既に市場に出っていますが、大きな市場を獲得するためにはギガビット級の製品の開発が必要であり、高集積化のための技術開発がすすめられています。

高集積化に伴い記録磁性層が微小化したときに生じる問題の1番目は、磁場書込みが困難になることであり、これに対処するためには「スピン注入磁化反転」による記録書込の実用化が必須となります。

2番目の問題は、記録層の磁化の熱安定性です。微小磁性体の磁化は熱によって揺らぐため、その揺らぎによって磁化方向(記録)が変化しないように比較的大きな磁気異方性を付与する必要があります。

これらの問題への対応策は、強磁性トンネル接合におけるスピン注入磁化反転の高効率化と、磁気異方性の付与がスピン注入磁化反転に及ぼす影響の少ない垂直磁化方式の採用であると考えられています。

共に「材料」に期待される部分が大きく、前者に関しては高スピン分極材料と高品位トン

ネルバリア材料の開発、並びにそれらの界面構造制御が重要です。後者に関しては、光磁気記録や垂直磁気記録の媒体材料として長年研究されてきた薄膜材料の垂直磁気異方性を、MRAM応用という新しい視点・要件のもとで研究することになります。

## 新しいトンネルバリア材料開発に成功

NIMSでは高スピン分極材料として知られるコバルト(Co)基ホイスラー合金の開発に関して、Co<sub>2</sub>FeAl合金の巨大トンネル磁気抵抗効果(室温330%、低温700%)など、多くの成果を挙げてきました。ホイスラー合金は高スピン分極に加えて、磁化のダンピング定数が小さいという性質も持ち、スピン注入磁化反転の高効率化に有効です。

図1は、世界ではじめてホイスラー合金によるスピン注入磁化反転を実証した実験結果です。GMR素子による実験のため、トンネル接合での結果との比較や、そのままの実用化はできませんが、従来合金の磁化反転電流密度より小さいことが実証され、その値として9.3x10<sup>6</sup>A/cm<sup>2</sup>という値を得ました。

トンネルバリアの材料に関しては、最近NIMSで新しい材料系の創製に成功しました。現状でのバリアの標準的材料は結晶性の酸化マグネシウム(MgO)ですが、大きなTMRの発現メカニズムが完全に分かっているわけではなく、それと関連して特性が成長条件(装置)に依存しやすいという問題も残っています。そのため、酸化マグネシウムバリアの理解と代替の可能性の検討の両面から、酸化マグネシウム以外の結晶性バリア材料において探索が行われていましたが、酸化マグネシウムとは結晶構造が異なるMgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(スピネル)において室温200%を超えるTMRを

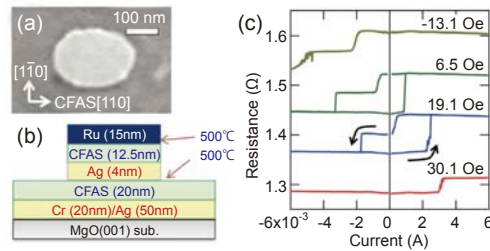


図1 Co<sub>2</sub>FeAl<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>(CFAS)合金を用いた膜面垂直電流GMR素子とスピン注入磁化反転

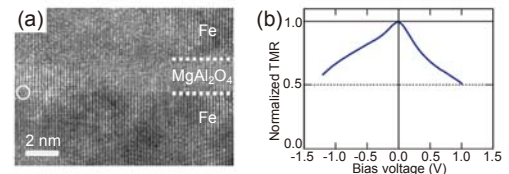


図2 Fe/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Feトンネル接合の(a)断面TEM像と(b)TMRのバイアス電圧依存性

実現しました。

スピネルは鉄や鉄合金との格子不整合が小さく、界面での欠陥(ミスフィット転位)の少ない強磁性トンネル接合の作製に力を発揮すると期待されています。鉄を上下電極に用いたトンネル接合において、図2(a)に示すようにミスフィット転位のほとんど見られない界面が形成されています。図2(b)は、この接合のTMRのバイアス電圧依存性を表しており、標準的な材料系であるCoFeB電極/MgOバリアの組合せより良い特性が得られています。

強磁性トンネル接合はMRAMの基盤素子であり、その特性の改善と新機能の付加を目指して、材料系の拡張や2重接合に関する研究開発も行っています。

すげがわ ひろあき 博士(工学)2007年東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻博士課程修了、同年から現職。2007-2008年物質・材料研究機構ICYS研究員。

かさい しんや 博士(理学)2004年慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻博士課程修了、同年京都大学化学研究所ナノスピントロニクス領域助教を経て2009年から現職。

みたに せいじ 博士(工学)1993年東北大学助手、2001年同助教授、2008年物質・材料研究機構主席研究員を経て2009年から現職。筑波大学大学院数理工学物質科学研究科教授(連係大学院)兼任。

スピン注入磁化反転: スピン偏極した電流を磁性体に流したとき、伝導電子から磁化へのスピン角運動量の移行によって磁化方向が変化する現象。1990年代半ばに理論予測され、2001年に実証された比較的新しい物理現象であり、GMRと同様に発見から応用展開までの期間が短いことが注目される。スピン注入方式を用いたMRAMは、スピンRAMとも呼ばれている。

# 論理演算をスピンだけで行う 新しい磁気論理演算素子

磁性材料センター  
スピントロニクスグループ  
葛西伸哉

磁性材料センター  
スピントロニクスグループ  
林将光

磁性材料センター  
スピントロニクスグループ  
グループリーダー  
三谷誠司

## スピンをつかった論理演算素子

論理演算素子には、情報通信技術(ICT)の進歩のための一層の高性能化に加えて、省エネルギーにも寄与することが求められています。低消費電力化の試みの中で、近未来の実用化を目指したものは、論理回路(ロジック・サーキット)と不揮発メモリを混載したデバイスですが、論理回路そのものに不揮発メモリ機能を持たせるといふ一歩先の先端素子の研究開発も精力的に行われています。

スピンMOS-FETと呼ばれるソースおよびドレイン電極に強磁性体を用いた素子があるような先端素子の一例です。さらに野心的な試みは、論理演算を磁気機能(スピン)だけで行うとする新規磁気論理演算素子です。

スピンを用いた論理演算では、スピンの電荷とは異なる物理量であることを積極的に利用できる可能性があります。スピンはベクトル量であり、スピンの操作法として磁場以外に電流やスピン軌道相互作用などを用いる種々の方法が提案されており、さまざまな論理演算素子のアーキテクチャの開発が期待されます。

NIMSでは、磁気論理素子の基盤となる、スピンや磁気モーメントの動的な性質(磁化ダイナミクス)の研究を行っています。強磁性体の中の磁化のさざ波のようなものであるスピン波や、磁性体の中の磁化状態の境界面である磁壁などが、外部磁場や電流によってどのような運動をするかを調べ、それらの制御技術の開拓を行っています。

図は、スピン波に関する制御技術を具体的に列挙した図であり、増幅を含む種々の操作や電流への変換を模式的にまとめています。

NIMSではここに示された要素技術の一つずつ検証するとともに、最適材料の検討をすすめており、スピン波の伝播について新しい知見を得つつあります。

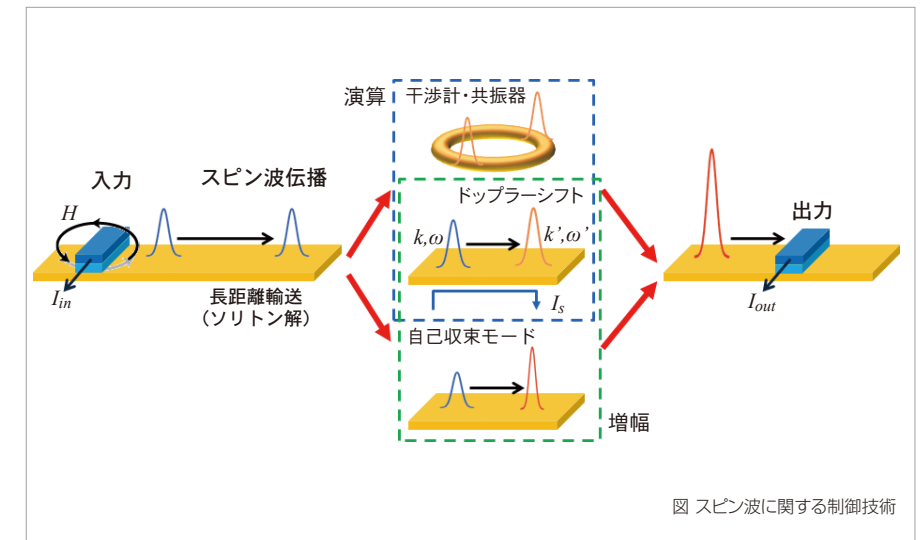


図 スピン波に関する制御技術

## スピンの向きが変わる場所

### “磁壁”の運動を探る

また、磁壁の運動についてもさまざまな研究を行っており、電流によって磁壁を動かす(磁壁の電流駆動)ための最適材料の探索を行っています。しかし、磁壁の電流駆動のメカニズムが十分に解明されておらず、材料開発の指針を得にくいという状況にあります。

そのため、メカニズムに関する基礎研究も行っており、一例としては、最近、ナノワイヤにおける磁壁移動の新しい検出方法を確立しました。

この検出方法の特長はナノ領域の漏れ磁場を検出することにより、通常の電氣的測定と異なり、測定が磁壁の運動に影響を及ぼさないこと、今後重要となる高速の磁壁移動において感度が優れることなどです。

これら磁化ダイナミクスに関する研究開発は、このように磁気論理素子に関しては萌芽段階にあります。

しかし、磁気ヘッドのノイズの低減や磁気メモリの書込み動作においてもこの磁化ダイナミクスは極めて重要です。そのため、磁化ダイ

ナミクスの研究は現在世界中で活発に行われています。

## 今後の展開

磁気論理素子に関する今後の研究として、素子内でのエネルギー変換や、光と磁化の相互作用の研究も計画しています。それは、論理素子に多様な入出力を持たせること、論理素子間の情報の転送のために、磁化状態や磁化の運動を電流や光との間で相互変換することがこれからさらに重要になってくると考えられるためです。

電流を担う電子がスピン偏極することや、円偏光がスピンを持つことから、磁気と電流、磁気と光の相性が良いことが考えられます。

はやし まさみつ Ph. D. 2007年スタンフォード大学大学院材料科学科博士課程修了、同年米国IBMアルマデン研究センター・リサーチフェローを経て2008年から現職。

磁壁: スピンが同じ方向を向いた領域のことを「磁区」といい、その領域の境界のことを磁壁という。

## 高保磁力磁石開発に向けて

磁性材料センター  
ナノ組織解析グループ  
グループリーダー

大久保 忠勝

磁性材料センター  
磁性材料グループ

Hossein Sepehri Amin

### 重希土類元素の減少へ、 解析からのアプローチ

優れた磁石特性を有するネオジム合金 (Nd-Fe-B) が発見されてから約20年間、多くの研究者によって特性向上の取り組みがなされ、現在、ネオジム磁石は、ハイブリッド車、電気自動車の高出力モーターや、多くの電気・電子部品で使用されている非常に重要な実用材料になっています。しかし、高保磁力を得るために用いられているジスプロシウム (Dy) などの重希土類元素の資源的制約によって、重希土類元素無し、あるいは低減した上で、耐熱性の指標となる保磁力の向上を達成することが強く求められています。

私たちは、集束イオンビーム-走査型電子顕微鏡 (FIB-SEM)、透過型電子顕微鏡 (TEM)、独自に開発したレーザー3次元アトムプローブ (La3DAP) という相補的な解析手法を駆使して、さまざまなプロセスで製造されたネオジム磁石のマイクロからナノのマルチスケールで組織を解析してきました。これまで十分に理解されていなかったプロセスの違いによる保磁力発現機構を明らかにし、磁石メーカーと共同で、添加元素の検討、プロセスの最適化に必要なフィードバックが行われ、250nm程度のNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bの結晶から構成される磁石粉の保磁力をジスプロシウムを全く使わずに約20kOeまで高めることにも成功しました。

一般的な焼結磁石では、微量なCu元素の添加や、焼結後に行う熱処理によって、保磁力が2割以上増大することが知られていましたが、マルチスケール組織解析によって、主相であるNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B相を囲んでいる粒界相の存在、構造、組成を定量的に示し(図1)、このネオジム (Nd)、銅 (Cu) を含む厚さ数nmの粒界相によって、主相の磁氣的結合が弱められ、

保磁力が増加したことを明らかにしました<sup>1,2)</sup>。さらに、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B相の結晶粒径を小さくすることでも保磁力が増加することは知られていましたが、粒径が約3μm以下になると保磁力が逆に減少するという問題がありました。これに対しては、組織解析の結果、粒界3重点に存在するネオジムリッチ相が、酸化物相に変化して、粒界へのネオジムの供給が不十分になることが原因であることを示しました<sup>3)</sup>。この結果を踏まえ、共同研究先の磁石メーカーでは酸素低減の対策を行い、現在、さらに微細粒で高保磁力が達成されています。

### 重希土類元素フリーのネオジム系磁石を達成

一方、水素吸脱に伴う不均化・再結合 (HD・DR) プロセスによって作製されるネオジム系磁石は、磁化容易軸が配向し、サブミクロンの結晶粒を有することから、大きな保磁力とエネルギー積を実現できる可能性があります。しかし、これまで、粒径から期待される高保磁力は得られていませんでした。この試料の粒界近傍のLa3DAP解析から、非磁性元素の粒界への偏析が焼結磁石ほど顕著でないことがわかりました<sup>4,5)</sup>。

このことから、私たちは結晶粒界のNdの濃度を高めればジスプロシウムを使わなくても保磁力を高められると考え、HDDRプロセスで作製された磁粉とNd-Cu合金粒を混合し熱処理 (拡散処理) を行うことにより、粒界相のネオジム濃度を高め (図2)、粉体という制約はあるものの、重希土類元素を含まない異方性ネオジム系磁石としては最大の保磁力 (約20kOe) を得ることに成功しました<sup>6)</sup>。

さらなる保磁力の向上には、このように組織と特性の関連を明らかにし、組織制御を行うことが非常に重要であり、私たちは高度な

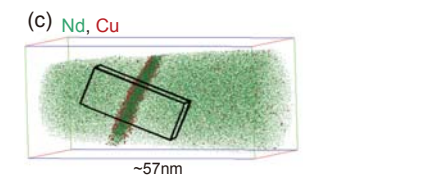
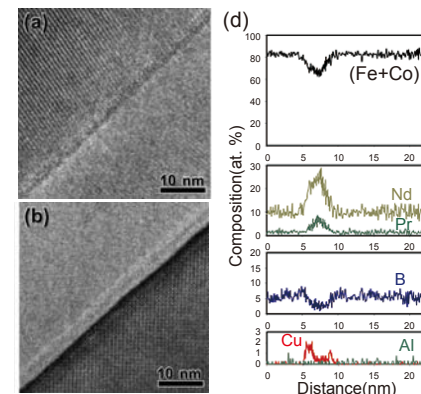


図1 (a)熱処理前(9kOe)、(b)600°C1時間熱処理後(11.8kOe)試料のTEM像と、(c)熱処理後試料粒界近傍のNd、Cu原子マップ及び(d)組成プロファイル

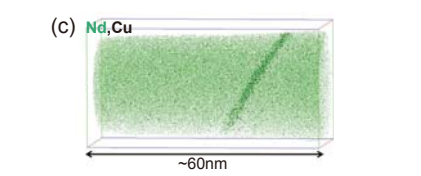
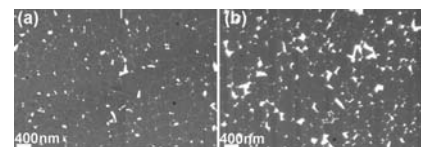


図2 (a)拡散処理前(16kOe)、(b)拡散処理後(19.6kOe)試料のSEM反射電子像と、(c)拡散処理後試料粒界近傍のNd、Cu原子マップ

マルチスケール組織解析技術によって、これに貢献していきたいと考えています。

おおくぼ ただかつ 博士(工学)。1989年日本電気、1992年長岡技術科学大学助手、1994年大阪大学助手、2002年物質・材料研究機構主任研究員を経て2006年から現職。東京理科大学大学院基礎工学研究科客員教授併任。

ほせいん せべり あみん 筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻在籍(D3)。NIMSジュニア研究員。

参考文献:  
1) W. F. Li, T. Ohkubo, T. Akiya, H. Kato, K. Hono, J. Mater. Res. 24 413 (2009).  
2) W. F. Li, T. Ohkubo, K. Hono, Acta Mater. 57 1337 (2009).  
3) W. F. Li, T. Ohkubo, K. Hono, M. Sagawa, J. Mag. Mag. Mater. 321 1100 (2009).  
4) W. F. Li, T. Ohkubo, K. Hono, T. Nishiuchi, S. Hirotsawa, J. Appl. Phys. 105 07A706 (2009).  
5) H. Sepehri-Amin, W. F. Li, T. Ohkubo, T. Nishiuchi, S. Hirotsawa, K. Hono, Acta Mater. 58 1309 (2010).  
6) H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, T. Nishiuchi, S. Hirotsawa, K. Hono, Scripta Mater. 63 1124 (2010).

## 欠陥がセンサ材料開発にいきる

センサ材料センター センター長  
羽田肇

災害や危険物を検知(センシング)することのできる物質の機能を解明し、新規センサ材料の開発を目指した研究を推進しているセンサ材料センター。羽田肇センター長に、センサ材料研究の魅力、理想の研究者像などをうかがいました。

—センサにずっと興味をお持ちになられているのですか。

そうですね。センサの専門家というよりも、私自身は固体の中の欠陥構造に興味があるんです。ただ、センサの材料は、特に化学センサですが、表面の欠陥構造とバルクの欠陥とが密接な関連があるので、きわめてアトラクティブな対象であり、応用的にはいい分野であるということで選んだのです。

—欠陥を扱うことになった理由は?

私が欠陥人間であるから……という冗談はともかく、古くから用いられているセラミックスの種類は、実はそんなに多くないんです。実用的には、ファインセラミックスといわれるようになってから、アルミナ(サファイヤ)、ペロブスカイト、酸化亜鉛といったところでしょうか。ところが応用範囲はとても広い。そのわけはどこにあるかといえますと、物質本来の性質以外に微細構造や欠陥構造に依存することが多いんです。したがって、こうした物質・材料を探索するには、単に結晶構造だけでなく微細構造や欠陥構造を研究することがターゲットになります。

その辺に惹かれてもう35年やっている。私の場合、欠陥の範囲もせまいんです。酸化物材料でそのなかの陰イオンの拡散をやっています。つまり、気がついたら、35年間酸素の拡散ばかりやってきたことになりました。

—これまでの研究で印象深いことは……。

非平衡性の欠陥を測定したことです。この欠陥はいわば拡散測定の立場からは異端なんです、実際の材料ではよくあらわ

れる。非平衡の欠陥は測っている途中に変化するので測定しにくいんです。自分でものをつくれなくて測れない。いろいろなものを自分でつくって測定しましたが、透明なセラミックスをつくったときは印象的でした。気孔の大きさをPPM程度にすることができて、レーザー発信できるようにしました。レーザーのホスト材料はふつうきれいな単結晶を使うのですが、単結晶は割れやすい。そこで多結晶体をつかったわけですが、大きなものをつくるのに適しており、大出力レーザーへの展開が期待されています。

—さて、研究のオフには何をやってこられましたか。



35年の研究生生活のなかで、若い頃の15年くらいはずっとサッカーをやってきましたね。野球、サッカー、テニスのなかからどれかを選ぶということになって、サッカーを選んだわけです。10年ほどは一番若いメンバーだったので、フォワードもやらせてもらいましたが、キャプテンをやるようになって、人のいやがる場所、スウィーパーなどをやるように

なりました。このごろと違って、とにかく人集めが大変で、リーグに出るために11人を集めるのに苦労しました。でも、あとの飲み会が楽しくて、ずっとつづけてきたんですよ。

—いまの若い人をみていてお感じになることはありますか。

私たちの年代のように酒をみんなで飲まなくなりましたね。それにコミュニケーションをあまりとらない。いつもわいわい騒いでいるのが好きなわれわれにはちょっと物足りないですね。それと、いわれたことはまじめにやるが、いわれないことはやらないですね。

研究者というのは、ほとんど遊んでいてもよいから、一つだけ人類全体に貢献するような大仕事をやる、というのも、ひとつの生きざまだと思えます。まわりの評価などに関係なく、長期的なスパンを貫く。

—それは特にNIMSのような国の研究所にあてはまりそうですね。

たしかに……。国の研究所は一つの目標をたてると、みんながそれに沿って動く傾向にあります。それはとても大事なことなのですが、そのために根なし草になってしまって、長いあいだの積み重ねをむだにすることがあります。技術の進歩には、過去の蓄積が必要で、新しいプロジェクトをはじめたときにゼロからの出発では困るのです。そのバランスをうまくとっていきたいものです。

はねだ はじめ 博士(工学)。横浜国立大学工学部応用化学科卒業。卒業後、無機材料研究所研究員に採用され、同所、総合研究官、NIMS電子セラミックスグループ・ディレクターを経、2006年よりセンサ材料センター長。

バルク: 材料や試料で、ある程度かさのある、物質のかたまりを指す。

## 新しいセル構造金属材料 ポリマーやセラミックスを内包させて

ハイブリッド材料センター  
複合材料グループ  
岸本哲

スポンジのように空孔が空いているセル構造材料。セル内に別の材料を内包させる技術を開発し、空孔率があがっても圧縮強度を高いまま保持できるようになった。

セル構造材料とはスポンジのように微細な空間を高い空孔率で有する材料です。セル構造金属材料は、金属を発泡させたり、多数の中空の金属球を固めたり、金属粉をスポンジ状に焼き固めたり、もともと隙間のあるポリマーのスポンジに金属をメッキするなどして作製します。

この特徴的形狀から、体積の割に軽量であり、加えて衝撃を吸収することができるため、例えば自動車のボンネットとエンジンとの間のスペーサーに用いて、事故時の人間(特に頭蓋骨)への衝撃を和らげる材料に使われています。また、中空のパイプなどにこのセル構造金属材料を充填させて、曲げる力に対する強度を高くすることができます。

私たちはこのセル構造を有する金属材料のセル(隙間)内にセル壁の金属とは異なる材料(ポリマー、金属またはセラミックス)を内包させる技術を開発しました。

ポリマーを内包させる場合は、セルが互につながっているオープンセル構造金属材料にポリマーを含浸させて作製します(図1(a))。

また、セラミックスを内包させる場合はセラミックスの多孔質粒子に金属をコーティングして焼結し、金属同士を接合します(図1(b))。

作製したポリマーとセラミックスを内包するセル構造金属材料の走査型電子顕微鏡写真が図2です。図2(a)がポリマーを内包するステンレスセル構造金属材料、図2(b)がセラミックスを内包するステンレスセル構造金属材料です。

何も内包させていないセル構造金属材料の場合は上述したようにとても軽いのですが、隙間の割合(空孔率)を大きくしていくと、強度が極端に低くなります。例えば、密度が1/10にな

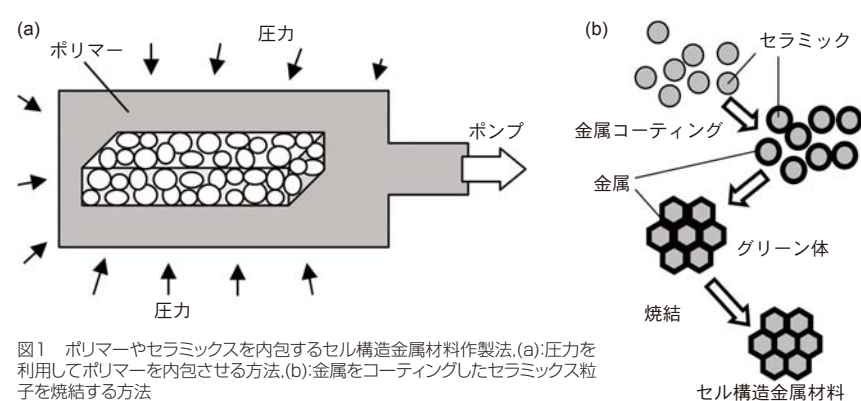


図1 ポリマーやセラミックスを内包するセル構造金属材料作製法。(a):圧力を利用してポリマーを内包させる方法。(b):金属をコーティングしたセラミックス粒子を焼結する方法

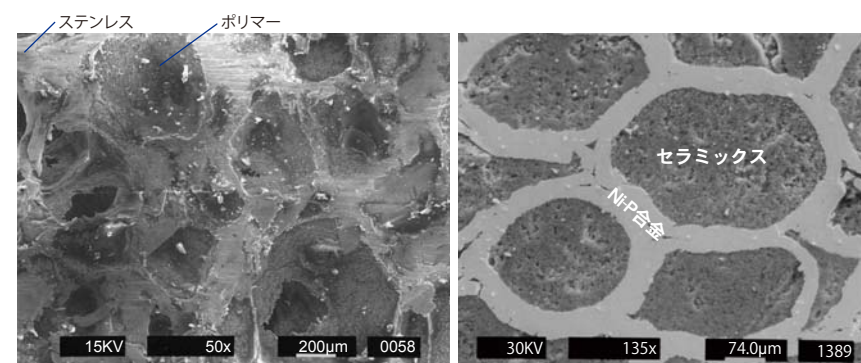


図2 セル構造金属材料の走査型電子顕微鏡写真。(a):ポリマー(ポリウレタン)を内包するセル構造金属(ステンレス)材料。(b):セラミックス(シリコンカーバイド)を内包するセル構造金属(Ni-P合金)材料

ると、圧縮強度は1/100に低下します。

この欠点を解消するため、材料にポリマーを内包させると、圧縮強度は劇的に向上することができます。特に密度の低い(隙間の割合の多い)材料では、10倍以上圧縮強度を向上させ、内包させたポリマーの重さを考えても、比強度\*1で2倍以上向上させることができます。また、能力も向上させることができます。

セラミックスを内包させたセル構造金属材料の場合は、特に機能性セラミックス\*2を内包させるとセラミックスの機能と金属の強度を有す

る材料を作製することができます。



きしもと さとし 博士(工学)1984年科学技術庁金属材料技術研究所 入所。1993年同主任研究官、2001年物質・材料研究機構材料研究所 主任研究員を経て 2009年から現職。

## お酒や大気が誘起する鉄系超伝導

超伝導材料センター  
ナノフロンティア材料グループ  
グループリーダー  
高野義彦

超伝導材料センター  
ナノフロンティア材料グループ  
出口啓太

超伝導の新材料を探索している研究中、少し不思議な現象が起きた。はじめは超伝導を示さなかった試料を大気にさらしておく(曝露)と、超伝導が発現したのだ。原因を探るうち、さらに不思議な現象が起きた。試料をお酒に浸すと超伝導が発現したのだ。これは、今まで不可解だった超伝導発現のヒントになるかもしれない。

2008年の鉄系超伝導体LaFeAsO系の発見を契機に、新超伝導体の探索が活発におこなわれています。我々も新超伝導体を開発するため、鉄系超伝導体と類似した結晶構造を持つFeTeに注目しました。

この物質は反強磁性体であるため超伝導を示しません。超伝導発現を阻害していると思われる反強磁性を消すために、イオン半径の小さな硫黄Sをドーピングして格子を縮めることを試みました。

固相反応法を用いてSを20%ドーピングした試料FeTe<sub>0.8</sub>SO<sub>0.2</sub>を作製したところ、ねらい通り反強磁性は消えましたが、残念ながら超伝導は現れませんでした。

しかし一週間後、同じ試料を測定したところ、驚いたことに超伝導が発現していました。即ち、試料を大気に曝露したことにより超伝導が発現したのです。

図1に、大気曝露期間を変化させて測定した電気抵抗率の温度変化を示します。曝露直後ではゼロ抵抗が現れていませんが、1日後にはゼロ抵抗が出現し、曝露期間が長くなるに従い超伝導転移温度も上昇します。

この不思議な現象を解明すべく、試料を様々な環境に置いて、超伝導発現の有無を調べました。その結果、水分と酸素が共存すると超伝導が発現することが分かりました。

我々は、水が触媒のような働きをして試料に酸素を送り届けているものと考え、さらに超伝導発現に有効な触媒を求め様々な液体を試験しました。例えば、水酸基OH<sup>-</sup>を持つ液体は有効ではないかと考えエタノールなどを用いたところ、期待に反して超伝導発現量は水と同程度でした。

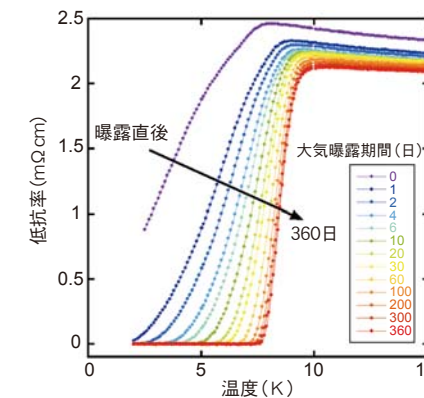


図1 大気曝露期間の違いによる超伝導転移温度の変化。

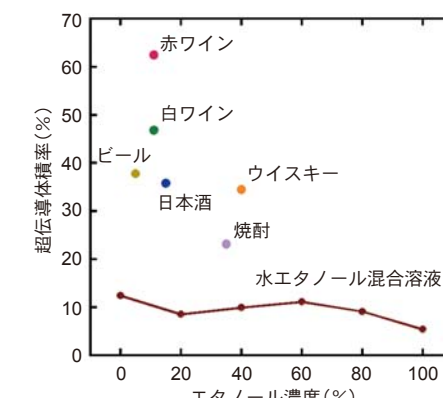


図2 70°C24時間さまざまなお酒に浸した試料の超伝導体積率。

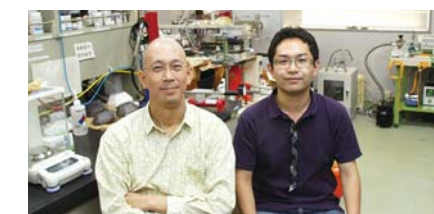
そこで、お酒と同様の実験を行ってみました。なぜならば、お酒も水エタノール溶液であり、酸素と反応する成分を含んでいるからです。

実験に用いたお酒は、赤ワイン、白ワイン、ビール、日本酒、ウイスキー、焼酎です。それぞれのお酒と比較のために、純水、水エタノール混合溶液、無水エタノールに試料を浸し、70°Cで24時間保持しました。

図2に、磁化測定より見積もった超伝導体積率(超伝導が発現した体積割合)を示します。水エタノール混合溶液ではアルコール濃度に依存せず超伝導体積率が10%程度と少ないのに対し、赤ワインに浸した試料はそれに比べなんと6-7倍も大きいことが分かりました。最も小さかった焼酎でも2-3倍もありました。

エタノール濃度が同程度の赤ワイン、白ワイン、日本酒において超伝導体積率に大きな違いが現れていることから、お酒に含まれる水エタノール以外の成分が、超伝導発現に寄与し

たことが分かります。現在、お酒の成分を分析し、超伝導発現の鍵となる物質の解明に取り組んでいます。



たかの よしひこ(左) 博士(理学)1995年横浜市立大学総合理学研究科博士課程修了。同年より、東京大学物性研究所・学振特別研究員などを経て、1999年に物質・材料研究機構入所。2006年よりナノフロンティア材料グループリーダー 現在に至る。筑波大学 物質材料工学専攻 連係大学院教員を併任。専門は超伝導と磁性的物理、固有接合、高圧物性、ダイヤモンド超伝導、新超伝導探索。

でぐち けいた(右) 2009年、筑波大学数理物質科学研究科入学。現在、博士前期課程2年。物質・材料研究機構 NIMSジュニア研究員。

\*1 比強度: 強度を密度で除した値。同じ重さならばこの値の大きいほうが強い。  
\*2 機能性セラミックス: 触媒機能を有する酸化チタンのように機能的な性質を有するセラミックス。

## ICNSEE ナノ材料科学環境拠点(ICNSEE) オープンラボ事業、研究計画公募を実施

NIMSに短期間滞在し、NIMSの実験設備を使い研究をする、オープンラボ事業をNIMSのナノ材料科学環境拠点(ICNSEE)が公募した。「ナノ材料科学環境拠点」は文部科学省の「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発プログラム」において、NIMSを中核機関として採択されたもので、平成21年10月から活動している。理論計算と先端的解析手法を中心に据えて、環境エネルギー

問題の解決に資する新材料創出のための基礎基盤研究を行っており、特に太陽電池、光触媒、二次電池、燃料電池をターゲットにしている。

今回のオープンラボ事業も、プログラムで重視している異分野融合と産学独の連携・人材結集を目指し行うもの。8月の第一次募集分については、申請のあった6件のうち4件が採択され、すでにオープンラボ客員研究員

としての研究が開始されている。二次募集は2010年10月25日(月)まで。詳細は、

[http://www.nims.go.jp/siteinfo/info/ICNSEE\\_open-lab.html](http://www.nims.go.jp/siteinfo/info/ICNSEE_open-lab.html)



## ICNSEE NIMSの研究者総覧サービス「SAMURAI」運用開始

NIMSでは所属研究員のプロフィール、研究内容、論文などがわかる研究者総覧データベースサービス「SAMURAI」の運用を2010年10月18日より開始する。

NIMS所属の定年制研究職のほか、任期制研究職およびエンジニア職も対象に情報が検索・閲覧できるようになる。閲覧できる内容は研究内容の紹介に加え、論文や書籍などの出版物情報、特許情報など。論文・特許については本文参照リンクのほか、研究者データベースReaD(JST)、科研費データベースKAKEN(国立情報学研究所)、ResearcherID(トムソンロイター社)等への案内リンク、出力機能がついており、国内でも先進的な研究者情報サービスとなっている。SAMURAIにより、NIMSのアウトリーチや論文参照の一助となるのはもちろん、研究者同士の交流も期待される。



SAMURAI画面イメージ ※画面は開発中のものです。

## 第10回NIMSフォーラム開催

10月20日(水)、東京・国際フォーラムでNIMSフォーラムがおこなわれる。第10回となる今回は、オールセッションにて各センターの研究動向が発表され、ポスターセッション、ミニ講演などがおこなわれる。一例として、ポスターセッションではレアアース関連の「ジスプロシウムフリーの永久磁石開発」、話題の

「グラフェンで作る量子効果デバイス」などが、ミニ講演では「希少元素に依らない高性能マグネシウム合金」や「血栓症を克服する薬剤溶出性ステントの開発」などが紹介される。詳しくは下記ウェブサイトまで。

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

