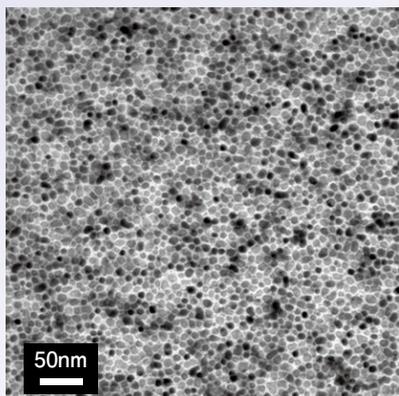
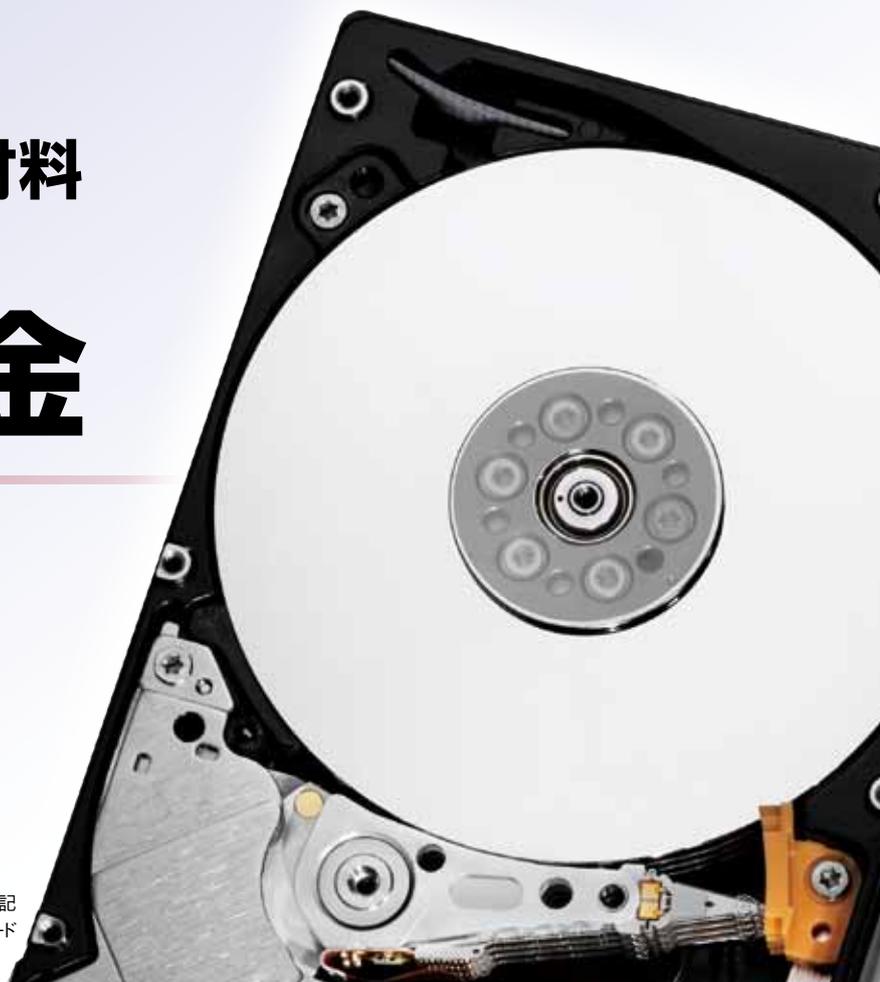


次世代記録メディア材料 として注目される 鉄白金合金



FePtAg-C垂直磁化膜の電子顕微鏡像

高信頼性と大容量記録を可能にしたハードディスクドライブ



デジタル機器で利用される各種の記録媒体の中で、ハードディスクドライブ(HDD)は、高信頼性、安価、大容量の点から広く普及している。現在さらにHDDの磁気記録密度を高める技術の1つとして熱アシスト記録方式が有望視されており、その媒体材料として鉄白金 (FePt) 合金が注目を集めている。

ナノテクがHDD記録密度の限界を打ち破る

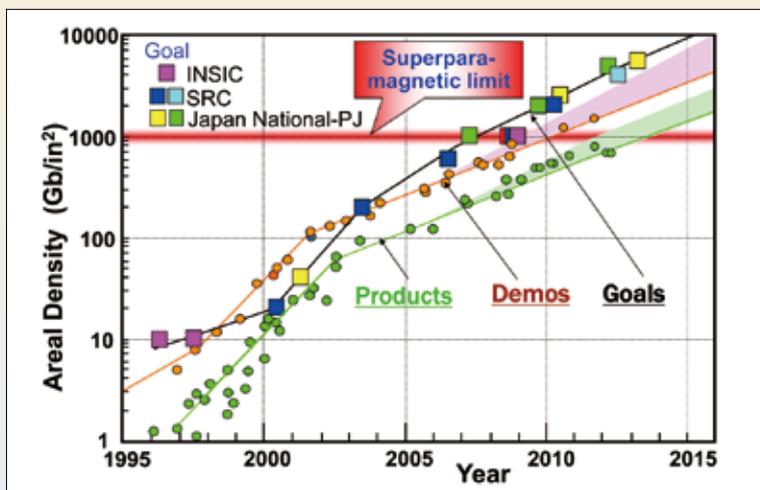
情報がある時間蓄えておくことをストレージ(記憶)という。文字がなかった大昔は情報を絵で残したり、語り部によって語り継いでいた。それが今やHDDなどによるストレージ技術の進化によって、文字だけでなく音声や画像、映像など膨大な情報を蓄え、必要な時に何回も再生したり、消去したり、新たに記録することが可能になった。日常生活においてHDDを目にする機会は少ないが、パソコン、ハードディスクレコーダー、銀行や郵便局のATM、カーナビ、鉄道の自動改札など、さまざまな機器の内部で情報を安全に蓄積し、いつでもどこでも瞬時に記録を引き出している。まさにHDDは現代社会の基盤を支えるストレージ技術なのだ。

HDDは1956年に米国で発明されて以来、ディスクの大容量化(高密度化)と小型化への挑戦という絶え間ない技術革新の歴史を歩んできた。世界初のHDDは、24inch(約60cm)ディスク50枚内蔵で、単位面積当たりに記録できるデータの容量はわずか約2kbit/in²であった。HDDの基本的な原理は、

磁気ヘッドで書き込み、読み出しヘッドで磁気を読み込むことは変わらないが、発明当時の大きさは大型冷蔵庫2個分ほどで、とても持ち運べるものではなかった。しかし現在では、ポケットに入るほど小型・軽量化が進み、記録容量も爆発的に増加した。これを可能にしたのは2000年代半ばの「垂直磁気記録」の実用化である。

垂直磁気記録は、1977年に東北大学の岩崎俊一教授らが世界で初めて発明、提唱した日本の独創的な技術だ。それまで磁気ディスクには、記録層の磁性体の向きを面内方向に変える「面内(長手)記録」という方法が使われており、記録密度は100Gbit/in²が限界であった。HDDの記録密度を引き上げるためには、磁気ディスクの記録層を構成する磁性体の大きさを小さくすればいいことはわかっていた。ところが当時の磁性体の粒径は十数nmで、さらに記録密度を上げるためには、粒径を10nm以下にする必要があった。しかし磁性体粒子を小さくすると個々の磁性体の磁化は熱的に不安定になる。これを防ぐには磁化が反転する磁界強度(反転磁界強度)が大きい磁性体粒子が必要だが、反転磁界強度が大きすぎると一度記録した情報の上に再び情報を書き込むことが難しくなる。

■ HDDの記録密度向上の推移



従来の材料を使った垂直磁気記録方式では、1Tbit/in²の壁を越えられないというのが、研究者の間で共通認識になっている。しかしデータの記録方式の工夫や記録媒体の構造や材料の変更で、1Tbit/in²の壁を突破しようとしている。

©Hitachi, Ltd., and NEDO

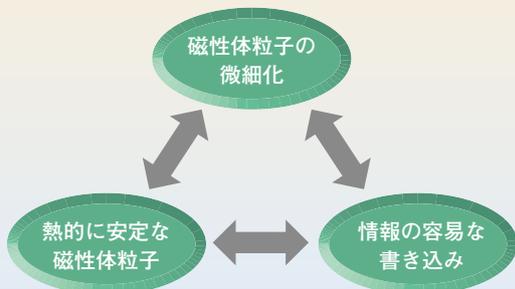
低減に大きく貢献することから、現行の垂直磁気記録方式にさまざまな改良が行われている。しかし既存技術である垂直磁気記録方式では1Tbit/in²程度の記録密度が限界と考えられており、新たな壁が目前に迫っている。

HDDのディスク表面には、ナノサイズの磁性体粒子が高密度かつ高配向で分散されている。このナノ磁性体のS/N方向を変えることによって、HDDは情報を記録している。高密度化が進展しても、磁気情報を記録する基本的な仕組みは変わっていない。媒体材料について見ると、長年CoPtCr(コバルト・白金・クロム)合金が使われてきた。かつて面内記録では、粒径十数nmの磁性体粒子35~50個が1つのデータビットを形成していたものの、現行の垂直磁気記録では、粒径7~8nmの磁性体粒子約15

個で構成されている。さらに記録密度1Tbit/in²の壁を突破するためには、さらに磁性体粒子を約4nmまで微細化することが必要とされた。

ところが現行のCoPtCr合金の微粒子は約6nm程度で磁化状態(磁化方向)が熱エネルギーによって揺らぎ始め、室温で磁気情報が失われてしまうことがわかった。このため結晶磁気異方性^{*1}の高い強磁性材料が求められた。そこで約4nmのナノサイズでも安定した磁性体となる新しい材料として、結晶磁気異方性エネルギーがCoPtCr合金より一桁高いL1₀という規則構造を持つ「FePt(鉄白金)合金」が注目されている。

■ HDD大容量化の「トリレンマ」



この特性を同時に実現しなければHDDの大容量化は難しい。こうした技術的な難題は「トリレンマの壁」と呼ばれている。

難題克服には約30年の歳月を要したものの、さまざまな要素技術の開発によって、磁極を深さ(垂直)方向に変える垂直磁気記録の実用化を果たし、100Gbit/in²という記録密度の限界を突破することに成功した。2005年のことである。それ以降、HDDには垂直磁気記録方式が使われるようになり、記録密度は飛躍的に高まった。

「微細化」と「安定した磁化状態」を両立する磁性体粒子

現在市販されているHDDの最高の記録密度は744Gbit/in²程度だ。記録密度を高めるとHDDの小型化や消費電力の

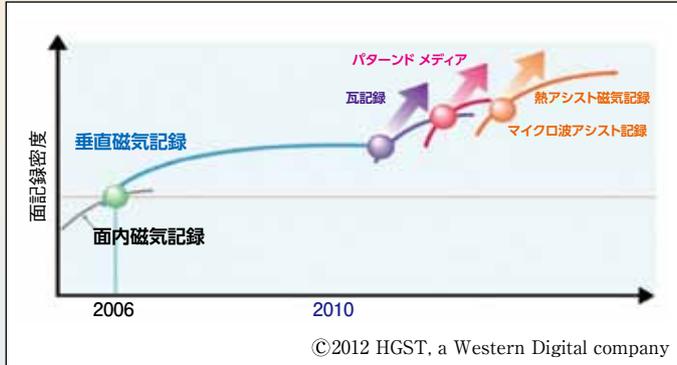
熱アシスト方式に適合する鉄白金合金

規則構造を持つ合金とは、2種類以上の元素を混ぜたもので、結晶格子中ある特定の位置に特定の元素が配置される合金を言う。FeとPtの原子比が1対1のFePt合金は、1,300℃以上でA1構造、1,300℃以下でFeとPtが交互に積層するL1₀構造という規則合金となる。このL1₀-FePtは高い結晶磁気異方性を持つため、ナノサイズでも磁化が安定し、超高密度磁気記録媒体材料として有望視されている。

しかしながらL1₀-FePtでは磁化を反転させるのに必要な

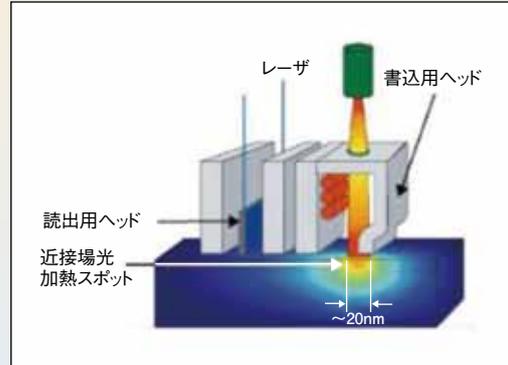
*1 結晶磁気異方性：結晶の方位によって弱い磁場で磁化されたり、強い磁場を加えないと磁化されないという物性。

■HDD技術の未来像



©2012 HGST, a Western Digital company

HDD技術の基本となる面記録密度は、新たな技術を導入して今後も向上し続ける。



熱アシスト記録方式の原理。磁気ヘッドにレーザーを組み込み、レーザーで高保磁力磁性粒子の温度を、強磁性が失われる温度であるキュリー温度(鉄は770℃、ニッケルは354℃)の近くまで上昇させ、保磁力が低くなったところで磁場により書き込みを行う方式。

磁場が30kOe以上となり、CoPtCr合金の10kOe程度に比べ大きくなる。このため、保磁力*2が記録ヘッドで発生できる磁場よりも高くなり、現行の垂直磁気記録方式では書き込みができなくなる。

そのため研究開発されたのが「熱アシスト方式」だ。熱アシスト方式とは、磁気ヘッドに組み込んだレーザーで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、保磁力が低くなったところで磁場により書き込みを行うというものである。1Tbit/in²をはるかに超える5Tbit/in²級のHDDを実現する新技術として期待を集めている。

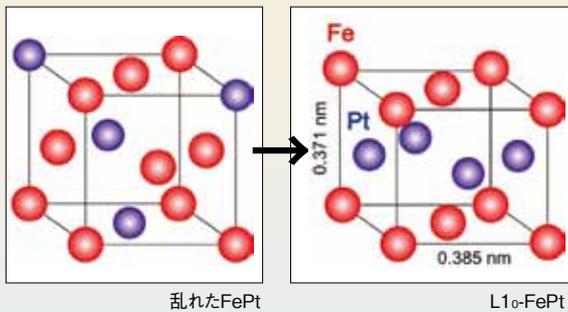
熱アシスト方式に用いる媒体材料には、第1に再生信号品質を高めるため数nmの均一なサイズの磁性体粒子が稠密に

分散した微細構造を持つこと、第2に記録情報を長期間保持するためナノサイズの粒子でも室温において磁化が熱で反転しない結晶磁気異方性の高い磁性材料を用いること、第3にナノサイズの粒子の磁化容易軸を膜面垂直に配列させることが求められる。

したがって、媒体材料としてL1₀-FePtを使うためには、4nm程度のL1₀-FePtナノ粒子を10%以下の粒子直径(粒径)ばらつきで実現すると共に、すべてのL1₀-FePt粒子を配向し垂直磁化膜とする必要がある。

*2 保磁力：磁場をかけて一方向に磁化した磁性材料に、反対方向の磁場をかけて磁化が反転し、磁化がゼロになるときの磁場の値。

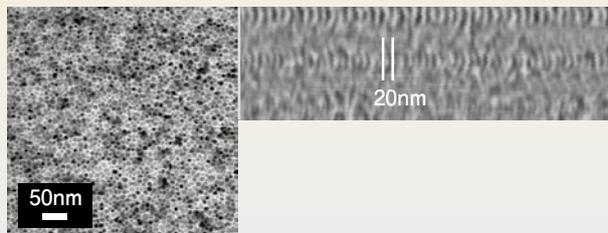
■A1構造を持つFePtのL1₀構造への規則変態



FeとPtの原子比が1対1のFePt合金は、1,300℃以上でA1構造(左図)、1,300℃以下でFeとPtが交互に積層するL1₀構造(右図)という規則合金となる。磁気メディアの一般的な製造方法であるスパッタ法で薄膜を作製すると、FePt合金は不規則構造のA1構造となり、これを加熱してL1₀構造に規則化させる。L1₀-FePtは高い結晶磁気異方性を持つことから、ナノサイズの粒子でも磁化が安定する。

(資料提供：(独)物質・材料研究機構)

■FePtAg-C垂直磁化膜の電子顕微鏡像と熱アシストヘッドを用いた記録による記録ビットのパターン



FePt粒子の平均粒径は6.1nmで粒子直径(粒径)ばらつきが1.8nm。保磁力は37kOeで、従来の磁気記録媒体に比べて格段に高い(画像左)。ディスクが回っていない静的な状態での熱アシストヘッドによる記録パターン(画像右)では、20nmのビットがビット幅85nmで観察されている。これを記録密度に換算すると450Gbit/in²となり、熱アシスト記録としてはこれまでの報告の中で最高の値である。

(資料提供：(独)物質・材料研究機構、HGST San Jose Research Center)

鉄白金ナノ粒子媒体構造の実現

このような媒体構造を実現するため、(独)物質・材料研究機構磁性材料ユニットでは、Si基板上にMgO(酸化マグネシウム)層を成膜し、その上にFe、Pt、Ag(銀)、C(炭素)の4つのターゲットを用いて同時にスパッタする研究に取り組んだ。その結果、平均粒子径6.1nm、粒子直径(粒径)ばらつき1.8nmの均一なL1₀構造を持つFePtAg-C垂直磁化膜の創製に成功した。L1₀構造を持つFePtを用いた垂直磁化膜としては、従来のどの粒子分散膜よりも粒子分散性と結晶配向性に優れていた。

この膜を使って熱アシスト磁気記録試験を検証したところ、20nmのビットが明瞭に観察できることが確認された。さらに詳細な解析により、この垂直磁化膜を用いたHDDのディスク面では450Gbit/in²の面密度が達成されることが確認された。これは、FePtを用いた熱アシスト磁気記録としてはこれまでで最高の値となった。

この膜は、MgO薄膜上にスパッタ法で成膜することによって自発的に結晶格子が配向するため、容易に垂直磁化膜が成膜できるという特徴を持つ。そのためSi(ケイ素)基板以外の安価なガラス基板上でも作製可能である。このような実用性の高さからも、次世代の超高密度磁気記録方式として提案されている熱アシスト方式に適合する、有望な媒体として期待されている。また工業的な生産のためには、今回行われた同時スパッタ方式によるものではなく、合金ターゲットを用いた製造が必要だと考えられているが、すでに合金ターゲットを用いても同等のナノ粒子分散垂直磁化膜が作製できることが確認されており、現行の製造設備を用いて工業的に実用化できる可能性が高いことが明らかになった。^{*3}

グリーンイノベーションへの貢献を目指して

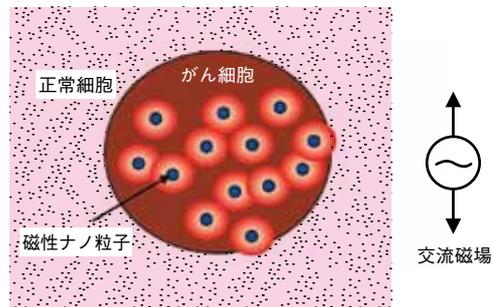
現行方式に置き換わる磁気記録方式としては微細加工によるパターンメディア方式など、いくつかの技術が平行して検討されている。しかし、(独)物質・材料研究機構磁性材料ユニットの研究成果によって、FePt系規則合金を用いて現行磁気記録方式を超える記録密度を達成可能な熱アシスト磁気記録媒体が、少なくとも実験室レベルでは製造可能であることが実証された。その結果、熱アシスト方式の実用性への期待が一層高まった。

^{*3} 本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託による「超高密度ナノビット磁気記録の研究(グリーンITプロジェクト)」の一環として実施された。

医療分野でも鉄白金ナノ粒子

FePtナノ粒子は医療の分野でも応用が期待されており、「ナノ磁気医療」と呼ばれる技術への展開が進んでいる。そのターゲットの1つが、がんの診断・治療だ。がん細胞は42.5℃以上の温度で死滅することから、磁気温熱療法という治療法がある。これは、FePtナノ粒子を体内に注射し、ドラッグデリバリーシステム(体内の薬物分布をコントロールする薬物伝達)で患部に運び、体外から局所的に磁場をかけて発熱させるというものだ。従来はFe₃O₄(酸化鉄)微粒子を用いた研究が進められてきたが、FePtナノ粒子の方が原理的により高温まで腫瘍を加熱できることがわかった。このほか、磁気免疫診断やMRI造影剤、磁気細胞分離システムについても、FePtナノ粒子を適用することで飛躍的に性能を上げられるものと期待が集まっている。

■磁気温熱療法



がん細胞を選択的に加熱して、がんを死滅させる治療法であり、FePtナノ粒子により腫瘍を加熱する。

(資料提供：北陸先端科学技術大学院大学 前之園信也教授)

今後、1Tbit/in²を超える磁気記録密度を達成するためには、FePt粒子の微細化と粒子直径(粒径)ばらつきの減少など、さらなる媒体構造の改善を継続すると同時に、熱アシスト方式に必要な熱流を考慮した下地構造も検討する必要がある。しかし、今回紹介した研究成果は、媒体実用化への大きな第一歩を踏み出したものといえる。熱アシスト方式により1Tbit/in²の超高密度磁気記録が達成されれば、HDDのさらなる小型化、省エネルギー化が進展することになり、グリーンイノベーションへ大きく貢献することが期待される。こうしたナノテクを駆使した技術革新によって、HDDの記録密度は今後も向上し続けていくことだろう。

- 取材協力 (独)物質・材料研究機構 磁性材料ユニット 高橋有紀子氏、(株)HGSTジャパン
- 文 杉山 香里