

高記録密度化が進む ハードディスク

コンピュータの外部記録装置として進化してきたハードディスクは、大容量記録、高速作動などの特徴を持ち、最近の情報家電や携帯機器の記録装置として重要な役割を果たしている。とくに最近のハードディスクの記録密度向上は目覚ましい。小さなハードディスクの中には、記録・再生の原理、構造、製造技術、材料など最新の技術が結集されている。

安定した高密度記録が可能な垂直磁気記録方式HDDの製品化をきっかけに、さらなる高記録密度化への期待が高まっている。写真は、垂直磁気記録方式HDDの製品例(右)垂直磁気記録イメージ(左下)。(写真提供: (株)日立グローバルストレージテクノロジーズ)



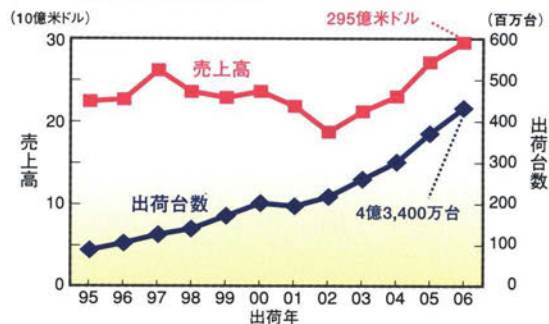
大容量化、小型化の歴史を歩んできた ハードディスク

1956年、世界初のハードディスク「RAMAC」がアメリカで誕生した。これは、大規模な計算機システムの記録に用いられたもので、ハードディスクの直径は24インチもあった。1970年代になるとミニコンピュータが普及し、ハードディスクは現在のようなディスク固定型のハードディスクドライブ(以下、HDD)となり、ヘッドとディスクが完全に密閉される形となった。ディスクのサイズも1963年に14インチが登場し、さらに1970年代後半から8インチ、5.25インチと小型化が進んだ。1980年代以降、情報化社会が本格的に進展し、パソコンの導入やネットワーク技術の進歩、ソフトウェアの高度化などにより、HDDの大容量化、小型化に対する要望は飛躍的に高まり、3.5インチ、2.5インチサイズが増加した。

そして2000年以降、ハードディスクは、コンピュータの外部記憶装置だけでなく、情報家電や携帯機器に幅広く適用されるようになった。とくに動画や音声などのマルチメディアデータを格納して以来、デジタルオーディオプレーヤ、DVDビデオレコーダ、デジタルビデオカメラ、ゲーム機、携帯電話などへの普及は目覚ましい。

磁気記録装置であるHDDは、半導体、光あるいは光磁気記

■HDDの売上高と出荷台数



(注) 売上高は工場出荷ベース

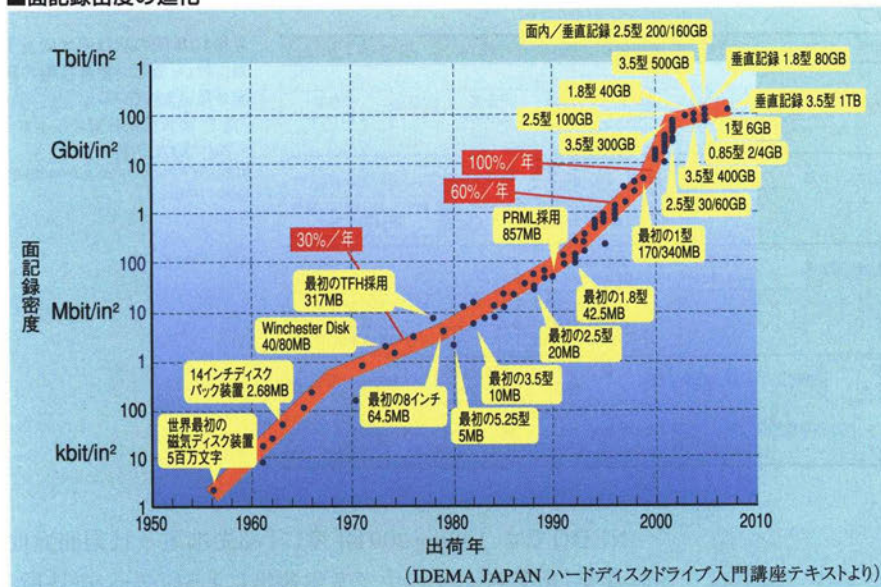
(IDEMA JAPAN ハードディスクドライブ入門講座テキストより)

録装置に比べ大容量、高速性、高信頼性などにすぐれ、いまや代表的な外部記憶装置として使用されている。

HDDの世界市場は2006年に売上高295億米ドル、出荷台数約4億3千万台、と見られている。とくに出荷台数は最近数年で2倍近くに増加していることが特徴的である。

HDDのサイズには3.5インチ、2.5インチ、1.8インチ、1インチ及び0.85インチがある。このうち最も出荷台数が多いのは3.5インチであり、従来はサーバーやデスクトップパソコンなどに主に使用されてきたが、最近ではDVDビデオレコーダなどの用途が増えている。また2.5インチ以下のHDDは、ノートパソコンやデジタルオーディオ

■面記録密度の進化



1956年に誕生した世界初のハードディスク「RAMAC」は、24インチディスク50枚で構成されていたが、それでも記録容量は5MBしかなく、記録密度は2Kbit/in²だった。(Reprint Courtesy of International Business Machines Corporation, copyright © 1956 International Business Machines Corporation.)

プレーヤ、小型情報機器などに本格的に使用され始めている。

誕生から50年たったが、HDDの歴史は、大容量化と小型化による高記録密度化の歴史だったといっても過言ではない。50年前のRAMACは、24インチディスク50枚で、記録容量は5メガバイト(メガは百万、以下MB)だったという。現在の2.5インチディスクは、1枚で80ギガバイト(ギガは十億、以下GB)の記録容量を持つ。面記録密度(以下、記録密度)は50年間で約7,000万倍に向上したことになる。

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のストレージ技術分野のロードマップ(最新版2007年4月発表)によれば、2008から2009年の記録密度は1平方インチ当たり300ギガビット(以下Gbit/in²)だが、2010年には600Gbit/in²、2012年には1.2テラビット(テラは1兆、以下Tbit/in²)に達すると予想されている。HDDを取り巻く社会状況を考えれば、今後ネットワークからのオンデマンド配信*はさらに普及するだろうし、2010年ごろには地上波デジタル放送の普及が見込まれており、1年に30~50%のペースで、記録密度向上が進むことになる。

そして、このようなHDDの高記録密度化の実現には、HDDを構成する記録再生方式、記録媒体、記録・再生ヘッド、信号処理技術、サーボ技術などの各技術がそれぞれに関わりあい、貢献している。

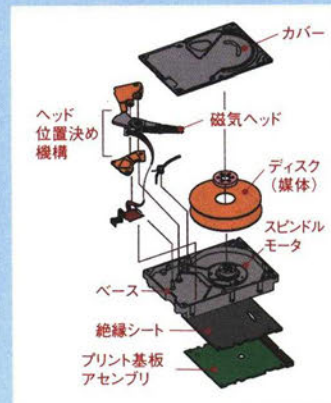
面内磁気記録方式から垂直磁気記録方式へ

現在使われているHDDの記録方式には、面内磁気記録方式と垂直磁気記録方式がある。面内磁気記録方式では記録信号が膜面に並んだ磁石として記録されるが、垂直磁気記録方式では、磁石が膜面に垂直な方向に記録される。

面内磁気記録方式では、ディスクの膜面に磁石が平行に配

HDDの内部構造

HDDは、表面に磁性体を成膜したガラスやアルミニウムの硬いディスクを、一定の間隔で数枚を重ね合わせた構造となっている。データの記録、再生は、磁気ディスクをモータで高速に回転させ、磁気ヘッドをスイングさせて、ディスク上の所定の位置へ高速に移動して行なう。ハードディスク内部は、ナノメートル大のホコリでも障害となるほど精密な構造をしている。ディスクとヘッドの距離は10~20nm程度と非常に接近している。



(IDEMA JAPAN ハードディスクドライブ入門講座テキストより)

HDDの記録媒体

HDDの記録、再生は、ディスク上の磁性膜を小さな磁石の集まりとみなし、この磁石のN極とS極の並び方でデジタル記録信号の0と1を表現する。

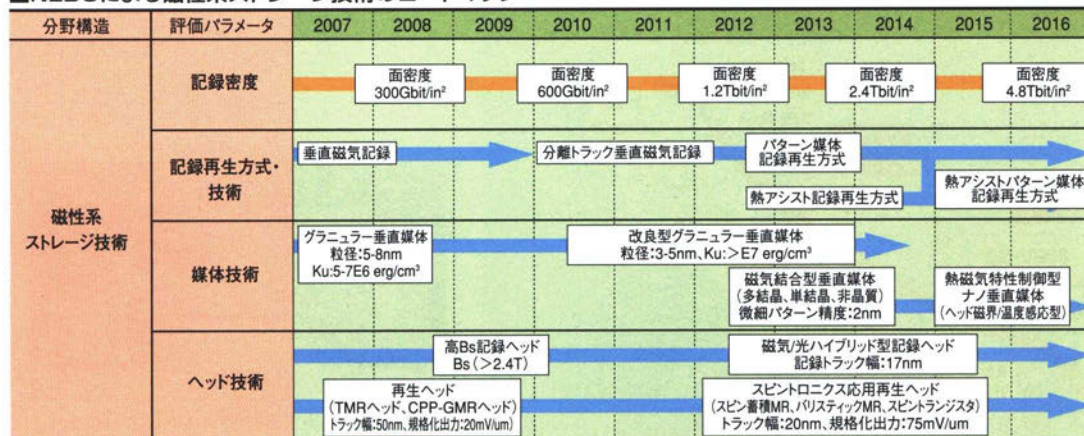
記録密度は、ディスクの単位面積あたりの記録ビット数で表される。ディスク上のデータは同心円状に形成されたトラックに記録されるので、面記録密度は、トラック方向の線記録密度とトラック密度(トラック本数)の積で計算され、bit/in²で表されることが多い。



*磁気記録においては、長さの単位としてインチ(in)を用いるのが一般的である。

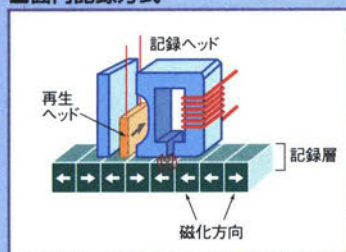
*オンデマンド配信:動画や音声などのコンテンツをあらかじめサーバーに保存しておき、視聴者が欲しいときに提供する仕組み。

■NEDOによる磁性系ストレージ技術のロードマップ



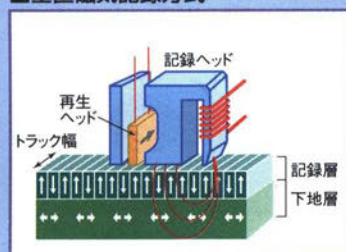
今後10年間の記録密度向上予測に伴い、新しい要素技術の開発が見込まれている。
(電子・情報技術分野の技術ロードマップ2007より抜粋。
<http://www.nedo.go.jp/roadmap/index.html>)

■面内記録方式



データを記録するには、電流を記録ヘッドのコイルに流し、電磁誘導によって生じる磁気信号によって、ハードディスク上の磁石の向きを書き換える。再生では、記録媒体から生じる微小な磁界を、再生ヘッドによって検出し、電気信号に変換して情報の読み出しを行なう。

■垂直磁気記録方式



垂直磁気記録方式では、単磁極記録ヘッドと、軟磁性裏打ち層と呼ばれる媒体の一部を構成する磁性体との、強い磁気的な結合を利用して記録が行なわれる。データは、膜面に対して垂直方向に磁化しやすい特性を有する記録層に記録される。

置されており、磁石のビット間に磁化の突合せが生じる。高密度化するためには、ビット間の反磁界の影響があるため膜厚を薄くする必要があるが、それに伴いヘッドへの信号が弱くなるため、記録密度は100Gbit/in²程度が限界となっている。

また高記録密度化に伴い記録媒体を微細化することにより、熱エネルギーに対する磁性粒子の磁気エネルギーの余裕が小さくなり、周囲の熱によって磁気情報の保持が不安定となる「熱揺らぎ」の問題を解決する必要がある。

垂直磁気記録方式では、磁石が膜面に対して垂直に配向しており、隣り合うビット間の磁化の突合せがない。このため、隣り合うビットから発生する減磁界が互いの磁化を強め合う方向に働いて高密度磁化状態が安定し、熱揺らぎの問題を大幅に解決でき、面内磁気記録方式よりも高記録密度化が実現できる方法として期待されてきた。この方式は、今から30年ほど前に東北大学の岩崎らによって初めて提案された。

NEDOでは、1995～2001年度に「超先端電子技術開発促進事業」を実施し、その中で産学連携による磁気ヘッド技術、垂直磁気記録技術などの研究を行なった。1995年度当時、製品の記録密度は1Gbit/in²レベルだったが、その後2001年度終了時には、記録密度40Gbit/in²以上にまで向上させることができた。

この後、HDDメーカー各社が垂直磁気記録方式HDDの実用化研究を行い、2005年には世界初の垂直磁気記録方式HDD(1.8インチ)が製品化された。その後を追うように世界のHDDメーカーが垂直磁気記録方式の製品を発売している。2007年初頭には、1テラバイト(以下TB)の記録容量を持つ3.5インチHDDが発表された。ちなみに1TBの記録容量とは、ハイビジョン映像約128時間録画分に相当するといわれている。

高記録密度化を可能にする要素技術

今後のHDDの技術は、垂直磁気記録方式がベースとなり、新しい記録再生方式や媒体技術、ヘッド技術との組合せによって、高記録密度化が進んでいくと考えられる。このうち、高記録密度化に大きく寄与する記録媒体とヘッドに使用される材料について紹介する。大きな流れとして、記録媒体、ヘッドとも、1980年代までは酸化物磁性材料が多く、それ以降は金属磁性材料に変化している。

【記録媒体技術】

記録媒体は、数nm程度の強磁性材料の粒子が非磁性材料中に分散した構造となっている。垂直磁気記録方式の記録媒体では、面内磁気記録方式でも使われていたコバルトクロム系合金が多く使われている。これに、磁気異方性を高めるための白金、磁性粒子間の磁気結合を弱めるためのボロンなどが添加される。

記録密度向上のため微細化すると熱揺らぎが起きやすくなるので、高い磁気異方性エネルギーを持つ磁性膜材料が必要と

最近の高記録容量HDDの例

垂直磁気記録方式のHDDは原理的に高密度記録に適するが、実用化の上では数々の解決すべき課題があった。2006年に2.5インチHDDで垂直磁気記録方式として業界に先駆けて量産化された製品 (Travelstar 5K160) では、記録媒体や磁気ヘッドの材料・構造の開発や、製造プロセス、信頼性向上など、あらゆる面からの検討が行なわれた。

垂直記録膜 (酸化物中にコバルト合金ナノ粒子を分散させた膜) を軟磁性下地膜の上に成膜することで、記録ヘッドから垂直方向に磁界を誘導して、記録膜を垂直方向に磁化するが、垂直磁気記録方式は外部磁界に対して弱いことが問題だった。そこで、マイクロマグネティクスを用いた磁気記録シミュレーションの活用により、複雑な磁気ヘッド構造のどの箇所で磁界が集中しているかを解析し、それに基づき磁気ヘッドの形状、構造の改良を行い、従来の面内磁気記録方式HDDと同レベルの外部磁界への耐性を高めることに成功した。

このHDDは2.5インチディスク2枚を内蔵し、記録容量160GB、記録密度131.5Gbit/in²を達成している。

記録媒体や磁気ヘッドに使用された材料



(資料提供: (株)日立グローバルストレージテクノロジーズ)

なり、新しい鉄系合金の利用が期待されている。実用化のためには、磁気特性を確保し、結晶粒微細化が可能な合金組成、プロセス開発、耐食性の向上などを実現する必要がある。

[ヘッド]

再生ヘッドでは、1994年ごろMR (磁気抵抗効果。磁界の変化で電気抵抗が変わる効果のこと) 膜を用いたMRヘッドが登場し、信号処理技術の進歩ともあいまって、それまでの記録密度伸び率の年率30%程度が、一気に年率60%程度まで高まる契機となった。

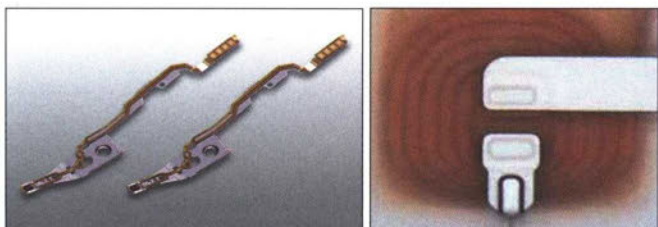
さらにGMR (巨大磁気抵抗効果。ディスク表面からの磁界でヘッド内の磁化自由層の磁界の向きが変化する効果のこと) ヘッドの登場により、2000年前後には記録密度は年率約100%の伸びを示した。GMRヘッドは、厚さ数nmの非磁性金属 (銅) を2枚の強磁性金属で挟んだ磁性金属の多層膜に電流を薄膜の面内方向に流すと、2つの強磁性電極の磁化の向きが平行な時と反平行な時で、電気抵抗が変化する現象を利用したものである。この

現象を利用し、外部磁界の方向を電気抵抗の変化として検出することができる。

今後主流となることが予想されるのは、GMRヘッドより高感度のTMR (トンネル磁気抵抗効果。電子が自分の運動エネルギーよりも高いエネルギー壁を一定の確率で突き抜けるという、量子力学のトンネル効果による電流が磁力によって変化する効果のこと) ヘッドである。TMRヘッドは、厚さ1nmの絶縁体 (酸化アルミニウム、酸化マグネシウムなど) を2枚の強磁性金属で挟んだ多層膜であり、GMRヘッドに比べ、再生出力が大きい、再生分解能が高い、などの特徴を持つ。また、GMR膜に対して垂直に電流を流すCPP型GMRヘッドの開発も進められており、最大600Gbit/in²の記録密度が達成できる可能性があると考えられている。

垂直磁気記録方式の記録ヘッドは、従来のリング型に代わり単磁極型のヘッドが用いられる。材料としては、鉄-コバルト合金、鉄-コバルト-ニッケル合金など、磁束密度の高い軟磁性材料が多く使用されている。

高記録密度化に伴い記録媒体の磁性体が微細化されると、熱揺らぎ現象によって熱的に不安定になる。これを安定させるために磁気エネルギーの高い媒体材料を使用すると、一方で記録ヘッドの飽和磁束密度を高めなければならない。すでに2002年には、現存する材料のうち最高の飽和磁束密度2.4テスラを持つ鉄-コバルト合金が実用化されている。今後、原子の格子間隔を多層化技術などにより調整することにより、さらに高い飽和磁束密度の実現が期待されている。

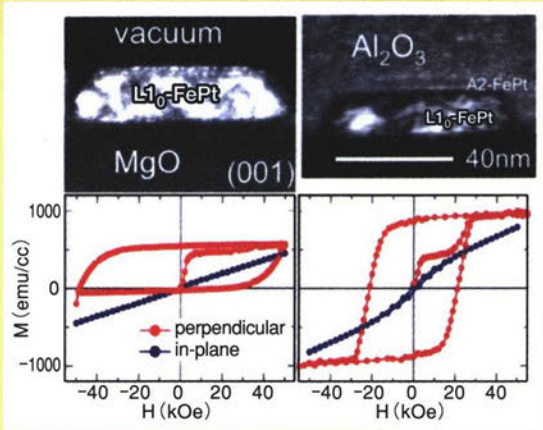


垂直磁気記録方式で用いられる記録・再生ヘッドの例 (左) 記録用単磁極ヘッド (右)。狭いトラック幅でも高い書き込み能力を発揮する。(資料提供: TDK (株))

新しい記録媒体として注目される鉄-白金合金

新しい記録方式として期待される熱アシスト方式は、強磁性微粒子をレーザーで昇温させて低い記録磁界で記録する技術であるが、その実用化は、現在のところ2012年ごろ以降と考えられている。この方式で、記録媒体として期待されているのが、鉄-白金合金である。

記録密度が1Tbit/in²に達すると、記録媒体のビットサイズは10nm以下に小さくなり、熱揺らぎの問題が起こるが、安定して強磁性としてふるまうためには、高い結晶磁気異方性を持っている粒子を使用する必要がある。注目されている鉄-白金合金は、L1₀型 (FeとPtが層状に並んだ構造) の構造をしており、高い結晶磁気異方性を示す。ただし鉄-白金合金の粒子では、保磁力が従来の鉄-コバルト合金で発生できる磁場以上に強まり、書き込みができなくなる。そこで、熱アシスト方式では、レーザーで温度を上げて鉄-白金合金粒子の保磁力を低くし、低くなった瞬間に書き込みをする。現在、各方面で最適な鉄-白金合金粒子の研究開発が行なわれており、とくに粒子サイズをナノメートルオーダーにそろえ、分散性の高い粒子を合成できるような合成技術の検討が行なわれている。



(独) 物質・材料研究機構では、酸化マグネシウム単結晶基板にエピタキシャル成長させた鉄-白金合金ナノ粒子をアルミナでコーティングすることにより、界面を不規則化し、保磁力が減少することを実証した。このような保磁力の制御により、磁気記録への応用の可能性が検討された。
(資料提供: (独) 物質・材料研究機構)

記録密度1Tbit/in²超を支える
記録媒体方式

現在の垂直磁気記録方式をさらに進めた記録再生方式の一つとして、分離トラック方式の研究が進んでいる。垂直磁化記録方式で、記録媒体の磁性体を小さくしていくと、隣接する磁性体の磁気の影響を受けノイズが発生する。記録密度の増大に伴い、トラック幅は約50nm以下程度にまで狭くなることが予想されるため、隣接するトラックとトラックとの間の、記録に不要な部分の磁性材料を除去して非磁性材料を充填し、ノイズ発生を防止するのが分離トラック方式である。

現在記録媒体に多く使用されているコバルト-クロム-白金合金では、記録密度が600Gbit/in²を超えると、熱揺らぎによりそれ以上の高記録密度化には対応できない。それ以上の高記録密度への対応が有望視される記録・再生方式として、パターン媒体記録再生方式と熱アシスト記録方式がある。

現在の垂直磁気記録方式およびそれ以前の記録媒体は磁性粒子膜の構造となっており、ある数以上の粒子がまとまって1ビットを記録する。現在までの方式では、少なくとも1ビットに10個以上の結晶粒が必要だが、パターン媒体では1ビット1粒子として記録を行なう。また粒子が同サイズで規則的に配列しているため、再生信号に必要な信号雑音比が確保できる。ビット形状の成型は、従来よりいっそう微細な加工が求められることになり、2012～2014年ごろには、記録密度1.2～2.4Tbit/in²、パターン寸法15～20nm、加工精度1～2nmの実現が必要となると予想されている。これは半導体分野の加工精度を超えることになる。

熱アシスト方式は、半導体レーザーを使用してデータを書き込む際に記録媒体の必要な部分に熱をかけることにより、媒体の磁気特性をヘッドの記録能力に対して最適化する技術である。熱アシスト方式により、ヘッドの書き込み能力限界が飛躍的に高まることが期待されるが、実用化に向けては媒体材料などまだ多くの課題が残されている。

これまで、高い記録密度を実現するために、さまざまな要素技術が研究され、製品化されてきた。HDDの要素技術の進歩は、技術の原理そのものの有意性に負うところが大きい。垂直磁気記録方式に見られるように、これまで新しい技術の原理が発表されても、その後製品となるまでには長い年月が必要だった。現在のHDDは、ナノオーダーの微細な技術の集合体であり、1つの要素技術を製品に反映するのに超えなければならない技術的な課題が非常に大きく、その数も多い。とくに大容量化に伴う高集積化により、記録媒体の大きさはますます小さくなる。いかに正確に記録し、再生するか、という課題の難易度は高まるばかりである。

すでに、HDDの加工精度はナノオーダーのレベルを超えようとしている。一つの目標を達成すると、また新たな目標が現れる。技術の限界に向けた挑戦は、まだまだ続いていくことだろう。

●取材協力 (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、IDEMA JAPAN、
(株) 日立グローバルストレージテクノロジーズ、TDK (株)、
(独) 物質・材料研究機構
●文 杉山香里