

IT時代のストレージデバイスの中核的存在である磁気記録を応用したハードディスクドライブの現状と、今後の高密度化を支える代表的な技術(垂直記録, トンネル磁気抵抗型ヘッド, パターン型媒体, プロブストレージなど)について紹介する。さらにその中で活用されている, スピネレクトロニクスの基礎研究の成果について解説する。

Keywords : hard disk drive, magnetic recording, perpendicular magnetic recording, patterned medium, tunnel magneto-resistance, spin transfer torque, probe storage

1. ま え が き

磁気記録を応用したハードディスクドライブ(以下HDDと略称する)は, 大容量, 不揮発, 低価格という特徴を備え, 情報化時代のストレージデバイスとして中核的な地位を占めている。最近では, PCに加えて, ビデオレコーダーなどのAV機器やカーナビゲーションなどにも応用が広がり, その市場はさらに広がろうとしている。HDDの発展を支えてきたのは, このような市場の要求に加えて, 最近では年率100%に迫る勢いで伸びている面記録密度増加を可能にしたさまざまな技術開発である。

図1にHDDの記録密度増加のトレンドを示す。90年代

はじめに磁気抵抗効果型(Magneto-resistive: MR)ヘッドが製品化され, 記録密度上昇は年率60%になり, さらに90年代後半に巨大磁気抵抗効果(Giant Magneto-resistive: GMR)型ヘッドが製品化され, 記録密度上昇が年率100%近くになったことがわかる。特にGMRは, その発見から実用化までわずか10年しかたっておらず, この業界が, いかにも最新の技術を取り入れようとしてきたかをご理解いただけたらと思う。以下本稿では, 次世代以降のHDDを実現するために開発が進められているいくつかの代表的な技術について紹介していきたいと思う。浅学菲才のため, 行き届かないところが多々あるものと存じるが, その点は何とぞご容赦いただきたい。

2. ハードディスク装置の概要

HDDの将来技術について述べる前に, 現状のHDDについて簡単にまとめておく。図2は, 現状のHDDの構造とその高性能化を支える要素技術をまとめたものである。HDDは, 情報が記録される記録媒体が形成された円板と, 記録媒体に情報を書き込む磁気ヘッド, 書き込み情報を生成したり読み出された情報を信号処理する回路, およびヘッドを所定のトラックに位置決めしたり, 周速10m/s以上で高速回転する円板上をわずか10nmの高さで安定に浮上走行させるための精密機構系から構成されている。半導体のメモリーと異なり多くの可動部をもつことが特徴である。

次に, それぞれの要素技術に現在どのような開発課題があるかをまとめてみたい。

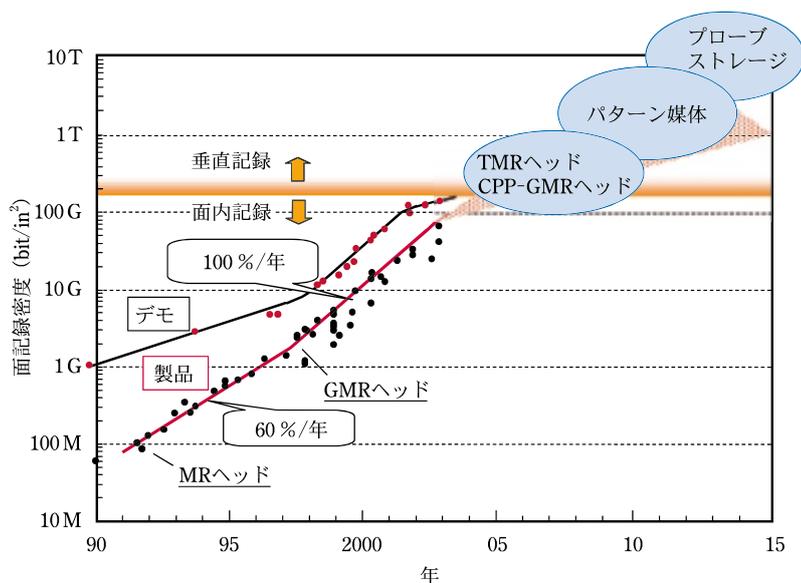


図1 ハードディスク装置の高密度化トレンド。

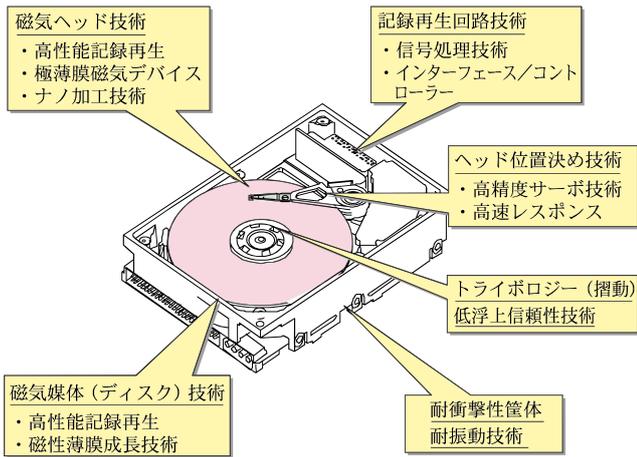


図2 ハードディスクの構造と高密度化を支える技術。

(1) 記録媒体と記録ヘッド：現在の磁気記録媒体は、図3のようにナノサイズの強磁性金属結晶粒子の集合体で構成されている。現在主流である CoCrPt 系の記録媒体の場合、それぞれの磁性結晶粒は、結晶粒間に偏析した Cr でお互いの磁氣的結合（交換結合）が遮断されている。高記録密度化を実現するには、よりいっそう小さな結晶粒を形成することが求められる。その一方で HDD は不揮発メモリであるから、記録媒体の磁化の方向が熱的に安定であることが必須である。磁化の方向が熱的に安定であるためには、二つの磁化方向の安定点の間のエネルギー障壁 $E_b = Ku \cdot V$ (Ku ：強磁性体の一軸異方性エネルギー、 V は磁性粒子の体積) が、 $k_B T$ (k_B ：ボルツマン定数、 T は絶対温度) より十分大きい必要がある。したがって、高密度化のため1個1個の結晶粒子を小さくすると、より大きな一軸異方性エネルギー Ku を有する材料が必要となる。しかし Ku の大きな材料を記録媒体に用いると、 Ku の大きさにほぼ比例した大きな記録磁界を、記録ヘッドで発生させる必要がある。しかし、良質な記録ヘッド磁極用の材料として用いることのできる、Co, Ni, Fe の合金の最大の飽和磁束密度は $2.4 T$ であり、これ以上の大きさの磁界を発生させることは原理的に困難である。そこで新しい記録方式や記録媒体の開発が必要となる。

(2) 再生ヘッド：再生ヘッドは、磁気記録媒体から漏えいしてきた磁束を効率よく検出するデバイスである。再生ヘッドの出力はトラック幅に比例するため、高密度化に伴ってトラック幅が減少すると、出力が減少する。したがって高密度化のためには、あくなき高感度化を続けていかなければならない。しかし、GMR ヘッドにも高出力化の限界が見えはじめており、新しい超高感度再生ヘッド開発が急務となっている。

(3) 浮上およびヘッド・ディスクインターフェース：すでに述べたように、HDD のスライダはディスクからわずか 10 nm

の高さを、周速 10 m/s もの速さで安定に浮上して走行している。磁気記録は、いわゆる近接場記録であるから、今後記録・再生の分解能を向上するには、浮上距離をさらに低下する必要がある。しかし、現在ヘッドとディスクの間には、スライダがディスクと接触してもディスクが壊れないように、各種の保護膜や潤滑剤が形成されており、これ以上浮上距離を下げるには、何らかのブレイクスルー技術が必要と考えられている。

以上のように総合技術である HDD においては、記録密度を向上させるためには、材料、記録方式、機構系などのあらゆる要素技術の高度化が必要となる。本稿は、「スピネレクトロニクスの基礎講座」であるため、特にスピネレクトロニクスと関連深い、記録方式・媒体、再生ヘッドに関連する技術に絞って、最先端のアクティビティを紹介する。

3. 次世代のブレイクスルー技術

3.1 垂直磁気記録

垂直磁気記録は1970年に東北大学の岩崎教授らによって提案された技術²⁾であり、その後30年あまりさまざまな改良が加えられつつ、研究が続けられてきた。図3(b)に現在実用化が検討されている垂直磁気記録の模式図を示す。図3(a)の面内磁気記録と比較すると、①記録媒体が軟磁性体の裏打ち層を有する、②記録ヘッドがリング型でなく単磁極型であることが特徴である。記録ヘッドのコイルで励磁された磁束は、単磁極ヘッドから記録媒体を通り、軟磁性裏打ち層を通して副磁極に戻る。軟磁性裏打ち層があたかも記録ヘッドの一部になっていることが特徴である。このため、垂直磁気記録ヘッドは面内記録に用いられるリング型ヘッドより大きな磁界を発生させることが可能となる。また、垂直記録媒体に“1”、“0”の情報を交互に書き込むと、ちょうどそれぞれの記録磁化終端に発生する磁荷同士が閉じた磁束を作り安定化するので、高記録密度になっても熱的に安定であるという特徴を有する。現在、各社で垂直磁気記録の実用化の研究が進められており、学会レベルでは、すでに 100 Gbit/in^2 以上の記録密度が複数の研究機関で実証されている。図4は昨年発表した弊社のデモの例³⁾である。図4(a)が磁気ヘッドのSEM像、図

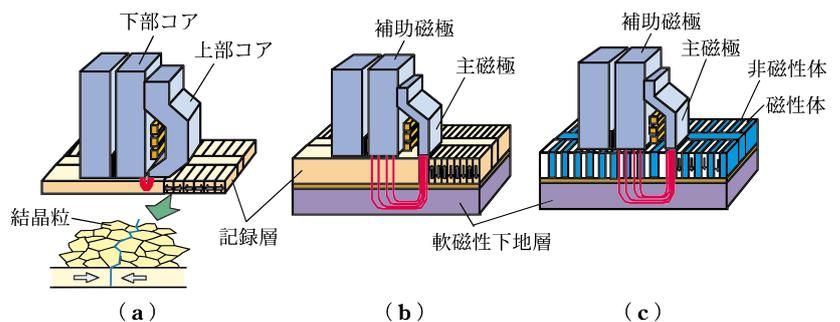


図3 磁気記録方式。(a)面内記録、(b)垂直記録、(c)パターン型媒体。

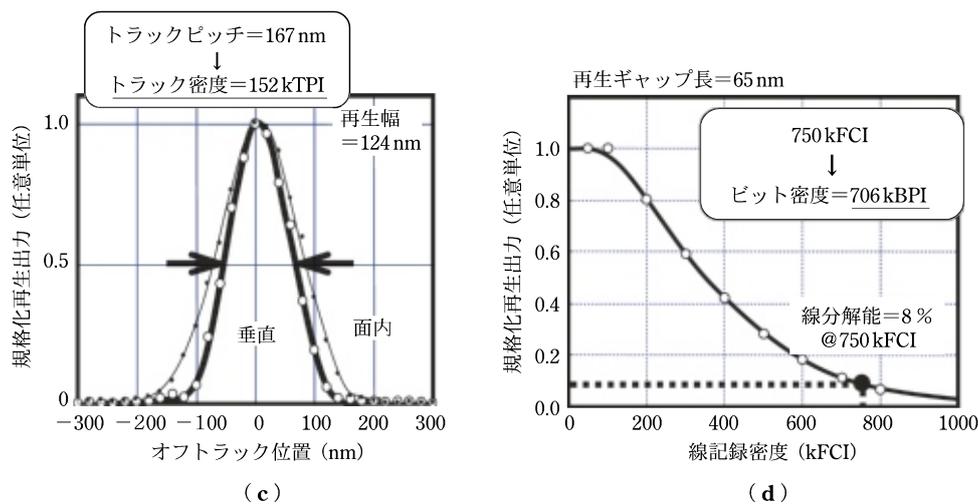
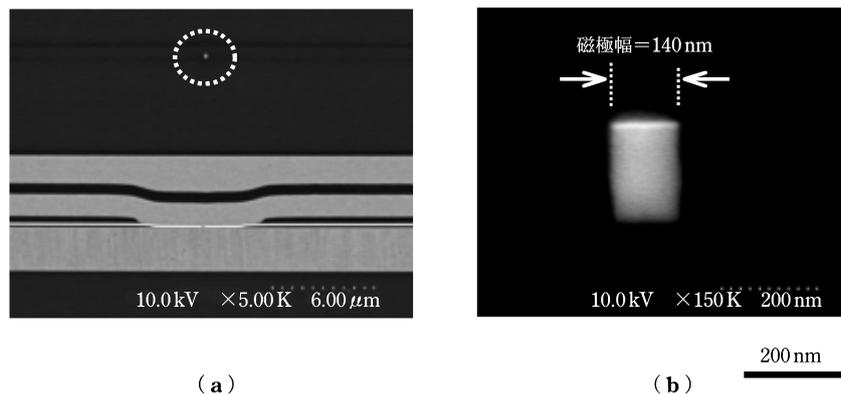


図4 垂直記録のデモンストレーション例。(a)磁気ヘッドのヘッド摺動面から見たSEM像、(b)単磁極ヘッドの拡大SEM像、(c)マイクロトラックプロファイル、(d)ロールオフ曲線。

4(b)は単磁極型記録ヘッドの拡大像、図4(c)は記録トラックの幅を表すマイクロトラックプロファイル、図4(d)は線記録密度と再生信号の関係を表すロールオフ曲線である。これらのデータより、100 Gbit/in²以上の記録密度が達成可能であることがわかる。現在は、さらに低ノイズの媒体開発や安定性、信頼性の確認を行いつつ、実用化を目指して開発を進めている状況である。

3.2 パターン媒体

面記録密度が1 Tbit/in²近くなると、前節で述べたように記録媒体の熱安定性を確保するために、きわめて高い磁気異方性を有する材料を用いることが必須となり、磁極材料の飽和磁束密度が2.4 T以上にできないという物理的な限界から、垂直磁気記録方式をもってしても面記録密度の向上が困難になる。そこで、従来の媒体とまったく異なるパターン型媒体(図3(c))という新しいコンセプトが提案されている。パターン媒体では、従来の媒体の高密度化とは異なり、①記録分解能は、エッチングなどの手法で形成されたそれぞれのパターンの大きさに決定され、②そのため各パターン内の磁性体は互いに強固に結びついて一体となって磁化反転する。③熱安定性に効く磁性体の体積 V は従来の個々の磁性結晶粒子の体積から、各パターン全体

の体積となる、ことが特徴である。面記録密度1 Tbit/in²の場合、一つのビットの占める面積は25 nm角以下である必要があるが、実はこの体積は現状の記録媒体における磁性結晶粒子の平均粒径10 nmよりはるかに大きい。したがってパターン媒体を用いれば、それほど大きな磁気異方性を有する材料を用いる必要がなく、記録磁界の問題が緩和される。実際に200 Gbit/in²に相当するパターンが作製され、評価された結果⁴⁾も報告されている。パターン型媒体開発の最大の課題は、安価な作製方法の開発である。その方法として、電子線描画などで作製されたパターンマスターを、エッチング用のマスクとなる樹脂に押しつけ、凹凸を転写するインプリント法や、自己組織化するジブロックポリマーをエッチングマスクとして用いる方式も提案されている⁵⁾。

3.3 高感度再生ヘッド

図5に現在実用化されているCIP(Current in Plane)型GMRヘッドと、次世代の高感度ヘッドとして期待されているCPP(Current Perpendicular to Plane)型ヘッドを比較して示す。よく知られているように、GMRヘッドは二つの磁性体膜(通常はCoFeが用いられる)で非磁性の金属膜(Cu)をサンドイッチする構造となっており、二つの

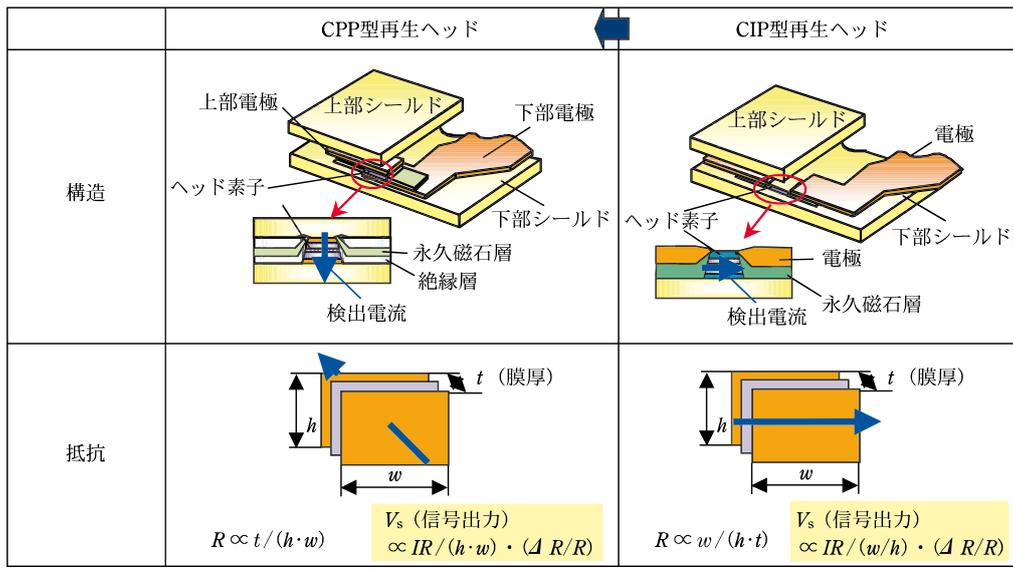


図5 CPP型再生ヘッドとCIP型再生ヘッドの比較。

CoFe膜の磁化が平行の場合と反平行の場合で抵抗が異なることを利用して信号を検出する。CIP-GMRヘッドでは、信号検出に用いる電流をGMR膜面に平行に流す。この場合、再生出力はトラック幅に比例するので、高密度化に伴ってトラック幅が減少すると再生出力が減少していく。一方、CPP型のヘッドでは、信号検出に用いる電流を膜面に垂直に流す。この場合再生出力はトラック幅に反比例するので、CPP型はCIP型に比べ高密度化に有利である。CPP型には、トンネル磁気抵抗効果(Tunnel Magneto-Resistance: TMR)ヘッドと、CPP-GMRヘッドの二つがある。その特徴を図6にまとめる。TMRヘッドは、GMRヘッドで用いるCu中間層の代わりにきわめて薄い絶縁体(通常はAl₂O₃)を用い、絶縁体をトンネルする電子による磁気抵抗効果を応用したヘッドである。GMRがきわめて

複雑な式で記述されるのとは対照的に、TMRは絶縁体を挟んだ二つの強磁性体の分極率P(磁性体のFermiレベル上のアップスピン数N_uとダウンスピン数N_dを用いて、 $P = (N_u - N_d) / (N_u + N_d)$ で定義される)のみで決まるとされている(Julliereの式: 図6参照⁶⁾。CoFeの分極率は0.5程度といわれており、Julliereの式からTMRとして50%以上の値が得られることが示唆され、実際50%以上のTMRが室温で実現されている。しかし、TMRヘッドは絶縁体の障壁を用いるため一般に抵抗が高い。磁気再生ヘッドの抵抗が高くなると再生帯域が著しく狭くなるため、TMRヘッドを用いる場合には極力抵抗を下げる必要があり、そのためにAl₂O₃の障壁層を1nm以下の厚さまで薄くする試みがなされている。一方、CPP-GMRヘッドの場合は、その抵抗が小さすぎ、そのため出力が小さいと

方式	TMR	CPP-GMR	
原理	<ul style="list-style-type: none"> 強磁性層1/絶縁層/強磁性層2の3層構造 $TMR = 2 \cdot P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2)$ P₁, P₂: 強磁性層1, 2のspin分極率 (Julliereの式) 	<ul style="list-style-type: none"> GMR膜の膜面に垂直に電流を流す spinに依存した強磁性層内および界面での散乱がMR比に寄与 	
構造			
特徴	長所	MR比大 (≧40% @RT)	素子サイズ減少とともに出力が増加
	短所	抵抗大 MR比がバイアス電圧増加とともに減少	抵抗がきわめて小→出力が小
重点開発課題	極薄障壁層開発による低抵抗化	CCP (Current Confined Pass) 構造導入による抵抗増大	

図6 TMRとCPP-GMRの比較。

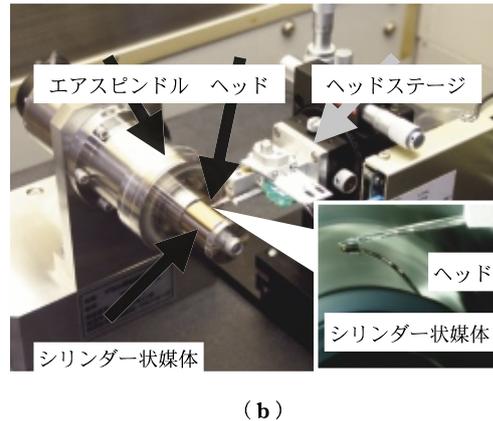
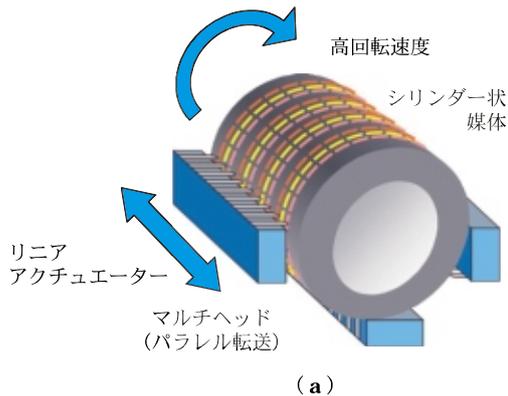


図7 シリンダーストレージ。(a)概念図、(b)実験装置。

いう課題がある。これを克服するため、CPP-GMR ヘッドの Cu 中間層に電流狭さくを行う層を設け、抵抗および GMR 比を増大させる方法が検討されている⁷⁾。しかしこの方法は、抵抗も大きくなるため、将来の高密度化に伴って素子面積がさらに小さくなった場合には使えない。そこで、例えばハーフメタル強磁性体と呼ばれる Fermi 面上にアップまたはダウンスピンのどちらか一方の準位がない(すなわち分極率が1)の材料を用いたり、あるいは電子を多重散乱させて何度も GMR 膜を通過させて GMR を大きくするなど、原理的に CPP-GMR の GMR 比を上げようとする努力も始められている。この分野は、強磁性体多層膜中のトランスポートの理解、さらには多層膜の界面の電子状態の解明など、スピニエレクトロニクスの最もホットでかつ応用上のインパクトの大きい分野であり、今後の研究の進展に期待したい。

4. 将来のストレージ技術とスピニエレクトロニクス

4.1 シリンダーストレージ

これまで、HDD の性能向上の指標として面記録密度に焦点を当てて述べてきたが、面記録密度のほかに、データ転送速度やデータへのアクセス時間も重要な性能指標である。特に高速のデータハンドリングが要求されるサーバー用途の HDD では、きわめて重要な指標である。従来の HDD の高転送速度化やアクセス時間短縮は、もっぱら円板の回転速度を上げることによって行われてきた。最近では 1 分当たり 15,000 回転という高速回転を実現している。しかし、円板の高速回転化による性能向上も、スピンドルモーターの振動などの制約から限界を迎えつつあり、この分野でもまったく新しい方式の導入が検討され始めている。

東北大学の中村教授により提案されたシリンダー型のストレージ(図7)は、従来の円板に代わりシリンダー上の媒体に複数本の記録再生ヘッドでアクセスを行うという、まったく新しいコンセプトのストレージである⁸⁾。その特徴は、

- (1) 複数本のヘッドで情報のパラレルな記録再生を行うことができるため、大幅な高転送速度化が実現できる。
 - (2) 1 本当たりのヘッドが情報のアクセスのため移動する距離が短くなるため、アクセス速度が向上する。
- などである。シリンダーストレージを実現するには、ドラム上への媒体成膜、低速回転でも良好に浮上するスライダの開発など多くの課題があり、現在東北大学を中心に進められている文部科学省の国家プロジェクトにおいて原理的な検討が進められている。

4.2 プローブストレージ

現状の磁気記録では、磁気ヘッドを記録媒体が成膜された円板上を浮上させて記録再生を行っており、ヘッドと媒体の間に必ずギャップが存在する。このような記録方式の場合、記録ヘッドで発生する磁界はギャップのオーダーで必ず周囲に広がるため、分解能向上には限界がある。そこで発想を転換し、記録ヘッドとして原子間力顕微鏡(AFM)に用いられるプローブを用い、AFM プローブと媒体とを接触させて記録再生を行うプローブストレージが各所で研究されている。その中で最も完成度が高いのが、図8に示すマルチプローブヘッドとプラスチック基板を用いたプローブストレージである⁹⁾。この方式では、プローブ上に形成されたヒーターを通電加熱し、その熱でプラスチックを変形させて微小な凹部を形成して記録ビットとする。情報の再生は、プローブが記録ビット上を走行しプローブが変形したときに、ひずみで抵抗が変化する現象を利用して行う。媒体は電磁石を用いた可動機構の上に載せられており、媒体全体が移動することにより、所定の記録ビットへのアクセスを行う。この方式でも、マルチプローブを用いた並列転送や、1 本当たりのプローブの走行距離の減少に伴うアクセス時間の短縮が可能であり、AFM プローブを用いることによる分解能向上とあわせ、将来の超 Tbit/in² 級のストレージ方式として注目されている。

5. お 結 び

以上、HDD の将来技術を、特に HDD の性能向上をドラ

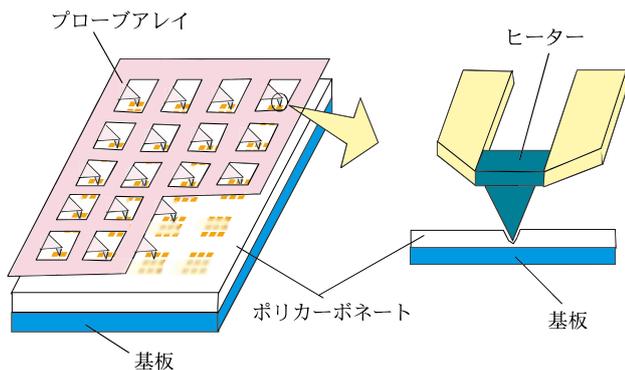


図8 プローブストレージの原理.

イブしてきた面記録技術密度向上の観点を中心に紹介してきた。現状、垂直記録の後の高密度化技術の本命技術はまだよくみえていない状況であるが、紹介したさまざまな技術開発は、ナノ構造、ナノ磁性の解明やスピントロニクスといった基礎研究のベースのうえに、初めて実現可能であると考えている。応用物理学会に参加される多くの研究者が、HDD というハイテク製品のあくなき性能向上を支えるこれらの研究に携わっていただけることをお願いして、拙稿のまとめとさせていただきます。

謝辞

シリンダーストレージに関する図面をご提供いただいた東北大学電気通信研究所の中村慶久教授、村岡裕明教授、山田洋助手に感謝いたします。本研究の一部は、文部科学省平成15年度科学技術試験研究、RR2002（超小型・大容量ハードディスクの開発）の支援を受けて行われたものである。

文献

- 1) M. Babich, J. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau and F. Petrof : Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
- 2) S. Iwasaki : IEEE Trans. Magn. MAG-**20**, 657 (1984).
- 3) T. Okada, Y. Kawato, C. Haginoya, I. Nunokawa, K. Etoh and M. Fuyama : INTERMAG 2002, Amsterdam, FB06.
- 4) M. Albrecht, C. T. Rettner, A. Moser, M. E. Best and B. D. Terris : Appl. Phys. Lett. **81**, 2875 (2002).
- 5) H. Hieda, N. Gemma and K. Naito : Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L1071 (2001).
- 6) M. Julliere : Phys. Lett. A **54**, 225 (1975).
- 7) H. Oshima, K. Nagasaka, Y. Seyama, Y. Shimizu and A. Tanaka : Phys. Rev. B **66**, 140404(R) (2002).
- 8) 山田 洋, 島津武仁, 渡辺 功, 村岡裕明, 中村慶久 : 日本応用磁気学会誌 **27**, 265 (2003).
- 9) P. Vettiger, G. Cross, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, B. Gotsmann, W. Haberle, M. A. Lantz, H. E. Rothuizen, R. Stutz and G. K. Binning : IEEE Trans. Nanotechnology **1**, 39 (2002).

(2003年11月17日 受理)



いとう けんち
伊藤 顕知

1985年東京大学工学部物理工学科卒業、(株)日立製作所入社。1999年に東京大学から工学博士の学位を得る。入社後、導波路型光デバイス、非線形光学素子、近接場光記録、磁気ヘッドなどの研究開発に従事。現在、東北大学を拠点として推進中の、文部科学省国家プロジェクトに参加して Tbps 級の超高密度磁気記録、特に高感度磁気再生ヘッドやスピントロニクス応用デバイスの研究に従事。現在(株)日立製作所研究開発本部ストレージテクノロジー研究センター主任研究員。