HDD のトライボロジー

加 藤 順 也

昭和電工エイチ・ディー株式会社 HD 研究開発センター
☎ 290-0067 千葉県市原市八幡海岸通 5-1

(2005 年 3 月 15 日受理)

Tribology of HDD

Junya KATO

Showa Denko HD KK, R & D Center
5-1 Yawatakaigan-dori, Ichihara, Chiba 260-0067

(Received March 15, 2005)

Tribology of the disk-head interface in hard-disk drives (HDDs) was reviewed in this article. The HDD has become a very popular device in our life, and been used for some consumer electronics. Tribology is an essential technology for the progress of HDDs. As the flying height of magnetic head has been reduced with increasing areal recording density, disk-head interference in case of contact is one of the greatest concerns for the reliability of HDDs. It is a very important subject of tribology for HDDs to develop the way to keep the head flying stable for avoiding the occasion of disk-head interference, or the way to allow contact without any troubles for recording operation. In future, development of a continuous contact recording system is expected to achieve ultimate magnetic spacing for endless demands to increase recording density.

1. は じ め に

近年の情報・通信技術の発展は目覚しく、大容量の情報を気軽に扱うことが当たり前になってきている。その発展の一翼を担っているのが HDD (ハードディスクドライブ) である。以前はパソコンやサーバーなどの情報記録装置としてのみであった用途も、わずかここ数年の間にビデオレコーダー、携帯型音楽プレーヤー、カーナビなどのいわゆる民生機器にまで広がり、コンピューターとは無縁であった人にまでその存在が認知されるに至っている。大量の情報を瞬時に記録・再生できる

HDD の利便性が、機能の向上と価格低下を伴ってこれらの用途にちょうど合致した結果であり、今後とも広がりを見せることが予想される。

このような HDD の発展を支えている技術の 1 つが、記録媒体である磁気ディスク (ハードディスク) と記録素子である磁気ヘッドとの界面におけるトライボロジーである。トライボロジーとは本来「摩擦・摩耗に関する学問・技術」を指すが、ここではもう少し広義にディスク/ヘッド界面の物理的現象に関わる技術全般をカバーする意味でこの言葉を用いる。

さて、今回の寄稿では近年の HDD におけるトライボロジー技術の概観と今後の展望について、特にディスクデザインの視点から紹介する。

2. HDD の仕組み

既にご存知の方も多いと思うが、最初に HDD およびディスクの構成について説明する。

2.1 ヘッド浮上機構

HDD では動作中、ヘッドがディスク上を浮上している。ヘッドの浮上は、ディスクの回転に伴い表面に発生する空気流がヘッドとディスクの間に潜り込み、その空気流の圧力によりヘッドが押し上げられることで行われる。飛行機の浮上に例えられることがあるが、飛行機のように翼に発生する揚力で浮上する様式とは異なっている。

このヘッド浮上機構は同じ磁気記録装置であるフロッピーディスクドライブとは大きく異なる点でもあり、HDD を特徴付ける仕組みといえる。HDD の利点の 1 つは磁気記録情報の読み書きが速いことであり、これは主にディスクの高速回転に基づくものである。一般的に摩擦による摩耗率は摺動速度と摺動圧力に比例する関係があり、回転速度が大きい HDD のディスク/ヘッド界面は摩擦・摩耗にとって厳しい環境となっている。この高速回転機構を成立させるためヘッドが浮上することでディスクとの直接接触摺動を回避し、摩擦・摩耗のトラブルを抑える工夫が取られている。

ところでディスクが回転していない時、ヘッドは浮上することができずディスク上にいる限りは必ず接地することになる。つまりディスクの回転起動・停止に際しては必ず両者の直接接触が生じる。このような接地方式 (Fig. 1) を CSS (Contact Start-Stop) と呼ぶ。繰り返し行われる CSS に伴う摺動への耐久性が HDD の重要な性能の 1 つとなる訳で、少なくとも保障期間内 (事実上は役目を終えるまで半永久的) にディスク/ヘッド間の障

Fig. 1. Contact Start-Stop (CSS) mechanism.

Fig. 2. Schematic layer structure of Hard-disk.

害を起こさないことが求められる。

一方、最近ではディスク径が 65 mm 以下の小型 HDD を中心に、停止時にはヘッドがディスク面外に退避するロード/アンロード (L/UL) 方式を採用するドライブも多くなっている。ちょうど昔のレコード盤のように再生時以外は針が盤外に置かれる様式である。この L/UL 方式では基本的にディスクとヘッドの接触摺動は起こらないため CSS のようなトライボロジー上の不安要素を回避できる利点があるとされる。

2.2 ハードディスクの構成

Fig. 2 にハードディスクの模式的な断面を示す。土台となる基板（通常 NiP めっきされたアルミニウム合金、あるいはガラスのいずれかが用いられる）の上に数段の薄膜層が積み重ねられている。磁気パターンを記録する磁性層 (Co 合金層) の上には、摺動によるダメージや酸化・腐食などの劣化から守るための保護膜層が設けられている。保護膜層はカーボンにより形成されることがほとんどであり、しばしばカーボンオーバーコートと称される。さらに保護膜層の上、ディスクの最表面にはヘッドとの摺動時の摩擦力を低減するため潤滑剤の被膜が形成されている。潤滑剤としては潤滑特性・化学的安定性・不揮発性などの特徴からパーフルオロポリエーテル系の油状材料が選ばれているが、中でも分子鎖の末端を水酸基などの構造に変性したタイプが使われることがほとんどである。これは保護膜を形成するカーボンとの適度な相互作用（結合力）を得る上で重要な要素となっている。現在実際に使われているハードディスクの保護膜の厚さは 3~4 nm、潤滑膜層の厚さは概ね 2 nm 弱の値

Fig. 3. Optical microscope image of Laser Bump.

域に制御されている。

2.3 表面形状・表面粗さ

トライボロジーに関わるもう 1 つの重要な要素としては、ディスクおよびヘッドの表面形状・表面粗さがある。

CSS 方式のディスクでは、通常ヘッドが着地する内周側の半径位置にクレーター状の凹凸を形成し多数配置している。Fig. 3 にその一部を拡大した光学顕微鏡写真を示す。凹凸は He-Ne レーザー光照射による基板表面の熔融を利用して形成されるのが一般的であることから、レーザーバンプと呼ばれることが多い。レーザーバンプの形成には基板種が関係し、アルミニウム基板の場合は形状（高さ・径）制御および短時間での形成が比較的容易であるが、ガラス基板ではなかなか困難である。このような事情から CSS 方式を採用するドライブではほぼ全

てアルミ基板のディスクが用いられている。一方L/UL方式はガラス基板ディスクが用いられることが多い。

レーザーバンプのように凹凸を形成し接触面積を減らすことで、ディスクとヘッドの間に生じる吸着力が低減し起動時の静摩擦力を低くする効果が表れる。また最近ではヘッド表面にも凸部を数個配置し同様に接触面積を低減する工夫がなされている。

摩擦現象を説明する古典的なアモンソン・クーロンの法則によれば「摩擦係数は見かけの接触面積には依存しない」とあるが、HDDのトライボロジーは必ずしもこれに従ってはいない。摩擦現象がそもそも2表面間に存在する接触抵抗の集積と考えれば、接触面積が小さいほど抵抗を下げられる(=摩擦力を下げられる)と理解できる。このような事象は世の中に多くあり特別なことではない。

レーザーバンプ形成以外にもディスク全体の表面形状

Fig. 4. AFM image of textured disk surface: $30 \times 30 \mu\text{m}$ scan range.

および粗さ制御は、ヘッドの浮上安定維持・ディスクとの接触回避にとって重要である。表面粗さが大きければそれだけヘッドとディスクが接触する可能性が高くなっていく訳で、現在のレベルでは原子間力顕微鏡 (AFM) で測定される平均粗さ (Ra) が $0.3 \sim 0.5 \text{ nm}$ 前後に制御されている。今後はさらに低減し $0.1 \sim 0.2 \text{ nm}$ にまで到達する見込みである。表面粗さの制御はアルミ基板およびガラス基板とも基板段階での表面研磨加工と、それに次ぐアルミナ砥粒やダイヤモンド砥粒による研磨で円周方向にテクスチャと呼ばれる微細な溝 (Fig. 4) を形成する加工段階とによって行われる。テクスチャの形成は磁気特性と密接に関係するもので、現行の記録方式では記録密度の維持・向上にとって不可欠な加工であるが、それと同時に均質な表面形状を得るためにも重要な工程であり非常に繊細な加工技術が要求されている。

3. 記録密度向上とトライボロジー

3.1 記録密度とヘッド浮上高さ

前述の通りヘッドが浮上することによりトライボロジーの負担を低減する工夫がなされているが、磁気記録の観点からすれば本来ディスクとヘッドの距離は近い程都合が良いことは自明である。ヘッドの記録素子で発生する磁界は遠くに離れるほど広がってしまうからである (Fig. 5 (a))。記録容量向上のため記録ビットを小さくしようとすればそれだけ小さな磁界を用いる必要があり、ディスクとヘッドは近くならざるを得ない。Fig. 5 (b)に記録密度の推移とヘッド浮上高さの関係を示す¹⁾。このまま進めば遠くない将来には、ディスクが保証する最低浮上高さ (Fig. 5 (b)の網目領域) に到達し接触の可能性が極めて高くなる。わずかな数 nm の狭スペースで如何に浮上を保つか、またたとえ接触が起こったとして

Fig. 5. (a) Scheme of magnetic spacing reduction between magnetic element and media. (b) Trend of flying height reduction with increase of areal recording density.

も如何に障害に至らない程度に抑えるかは記録密度向上にとって重要な技術課題である。

浮上高さを低減することが必要である一方、10 nm を切るような狭小なスペースで安定な浮上を維持することは段々と難しくなりつつある。HDD に加わる振動など何らかの外的要因によりディスクとヘッドがある瞬間に接触してしまう可能性が高くなってきているからである。またヘッドの浮上が入る空気の圧力によるものと冒頭でも述べたが、例えば高所のように大気圧が低くなると浮上高さは下がってしまう。多くの場合 HDD では高度 3,000 m での動作保証もしており、つまり約 700 hPa の大気圧下でもディスクとヘッドが接触しない必要がある。

このように間違いなく困難な状況へと向かっているが、それでもなお浮上の安定維持・障害回避を達成するための技術開発は鋭意進められている。例えばディスクとヘッドの接触面積が小さくなるようなディスク表面形状の制御であるが、こうすることで接触した場合の抵抗が小さくなるため浮上の安定が保たれやすくなる。同様の考えで、ディスク面ではなくヘッド側の表面粗さを大きくする手法も一部の HDD では取られている。ディスク表面粗さが低減する傾向の中にあっては、ヘッド側での改善策は必須であろう。

もちろん表面粗さ・形状の制御だけでなく、潤滑剤の種類・膜厚の適正化による改善も考慮されるべきであり、これらについても鋭意取り組まれている²⁾。

ディスクとヘッドを接触させないための設計も必要だが、現実的にはディスクとヘッドの接触を許容する（＝万が一接触してもディスク・ヘッドへのダメージをもたらさない）設計を盛り込むことが有効であろう。

3.2 保護膜・潤滑剤膜厚さの低減

磁性層の上に存在するカーボン保護膜および潤滑剤の厚さも磁気スペーシングの要素であり低減が要求される部分である。

カーボン保護膜は薄膜でもその機能が発揮されるよう、高強度・高密度を得るための成膜方法の工夫が取り入れられてきている。以前は磁性膜と同様のスパッタ法によって形成されていたが、最近では CVD（Chemical Vapor Deposition）法や IBD（Ion-Beam Deposition）法が導入され、より薄膜でも所望の保護膜特性が得られるようになってきた。実際にこれらの成膜法導入も相まって、保護膜厚さは記録密度の向上とともに低減してきた。今後も一層の成膜方法の進展が期待される点である。しかしながら、いくら薄膜化するといってもわずかな数原子の厚さでは保護膜として機能しないであろうことは容易に想像され、必ず限界が訪れることは明白である。

潤滑剤膜についても磁気スペーシング低減のため薄膜化が要求されるところであるが、過度に膜厚が小さくなるとカーボン保護膜を均一に被覆できなくなってくるためこの部分に頼ったスペーシング低減はあまり得策ではない。却って信頼性を損なうことが危惧される。

保護膜および潤滑剤膜とも本来の機能を果たしてこそ意味があり、たとえ記録密度向上のためとはいえ信頼性を犠牲にしてまでその膜厚を低減するものではない。

4. 今後の展望

HDD に対する記録密度向上の要求は今後とも続くと思込まれている。特に、ディスク径が 27.4 mm（いわゆる 1 インチ）や 21.6 mm（同 0.85 インチ）のような超小径と呼ばれる領域で記録密度向上の意義は大きい。これらの超小径 HDD は今後携帯電話にも搭載される構想が各社より示されるなど近い将来のデジタル社会を支える重要な中核機器に位置付けられている。現在は 27.4 mm 径サイズで 4～6 GB の記録容量であるが、すでに容量増に対する要望の声は強くそれに応えるべく開発が進められようとしている。磁気記録方式も面内記録から垂直記録へと転換する大きな変化が訪れつつあり、まだまだ HDD の技術的終点は遠い先と考えられる³⁾。

トライボロジーに関していえば、浮上高さゼロの「接触記録」を実現することがゴールである。すでに接触記録に対する実験的検討が一部報告されている⁴⁾。耐摩耗性の問題や位置決め精度など接触記録には必然的についてまわる困難な課題は多いと思われるが、将来いつの日か実現されることを期待したい。

一方で、1 台あたりの記録容量が極めて大きいサーバー用などの HDD では、万が一故障した際の情報消失被害が甚大となってくる。最近では複数台でバックアップしあう仕組みが取られ安全性の確保がなされているが、記録容量が大きい程信頼性はより厳しく問われてくる。

トライボロジーは HDD の信頼性確保において極めて重要な項目であり、このことは未来においても変わらないであろう。今後とも情報化社会を支える技術として重責を担い続ける。

文 献

- 1) 松本真明：SRC News Letter **22**, 5 (2000).
- 2) 多川則夫：トライボロジスト **49**, 651 (2004).
- 3) 河合基伸：日経エレクトロニクス 2005. 1. 17, 20 (2005).
- 4) 伊藤 淳, 佐々木康貴, 東 圭子, 高見博道：トライボロジー会議 2001 春 東京, A 9 (2001).