

磁気ディスクにおけるマイクロトライボロジー

柳 沢 雅 広

NEC 機能エレクトロニクス研究所 ☎ 216-8555 神奈川県川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1998 年 3 月 12 日受理)

Micro-tribology of Magnetic Recording Disks

Masahiro YANAGISAWA

NEC Corporation, Functional Devices Research Laboratories
1-1 Miyazaki, 4-chome, Miyamae, Kawasaki, Kanagawa 216-8555

(Received March 12, 1998)

Recording density of magnetic disks has markedly increased as much as 60% a year by decreasing spacing between a magnetic disk and a magnetic head. Micro-tribology is the most significant science and technology to improve mechanical reliability of ultrahigh recording disks. This report will introduce a tribological approach to analyze the phenomena at the interface between the head and the disk.

1. は じ め に

情報機器・デバイスの中で表面科学に関わりのあるものに、リレー、液晶ディスプレイ、電子写真、インクジェットプリンターおよび磁気ディスクなどがあげられる。なかでもリレーと磁気ディスクなどのデバイスにおいては表面科学の知見が必須であり、これなしには機能しないかあるいは信頼性に重大な支障をきたす。これは原子レベルの摩擦・摩耗・潤滑を扱うマイクロトライボロジーの世界が、表面科学と密接に関係しているからである。今回は磁気ディスクを中心に、その記録密度と機械的信頼性の向上についてマイクロトライボロジーおよび表面科学の観点から紹介する。

2. 磁気ディスク装置と高記録密度化の課題

Fig. 1 に磁気ディスク装置の内部の構造を示す。装置は主としてデジタル情報を磁気的に記録蓄積する磁気ディスクと情報を記録再生する磁気ヘッドと磁気ヘッドをディスクの半径方向に往復させるアクチュエータから構成されている。磁気ディスクは薄型のスピンドルモータにより 3,600~10,000 rpm で回転する。

磁気ディスクの記録密度は年 60% の割合で急増しており、21 世紀に入るとすぐに記録密度が 1 平方インチ

当たり 20 ギガビットの磁気ディスクが実用化されると予想される。これは据え置き型パーソナルコンピュータに内蔵されている 3.5 インチ磁気ディスク 1 枚当たり、約 20 ギガバイト (1 バイトは 8 ビットに相当) の記録容量に相当し、現在の 7 倍弱である。記録密度増加の技術的な要因の 1 つは、磁気ヘッドと磁気ディスクの隙間を微小にする技術の発達である。隙間が小さいほど磁気ヘッドからの磁場の広がり小さく磁気ディスク媒体をより微小に磁化して記録することができ、また大きな再生信号が得られる。現在隙間量は 40 nm 程度であるがさらに微小化が検討されている。隙間量が 20 nm レベルになると空気の圧力で浮上していた磁気ヘッドのスライダも間欠的に接触するようになる。すき間量が 10 nm 以下では空気浮上を行わず常に接触するコンタクトヘッドが研究されている^{1,2)}。このように接触を伴う高記録密度磁気ディスク装置の実用化において、マイクロトライボロジーがますます重要な課題となっている。

3. 磁気ディスクにおける表面化学

Fig. 2 に代表的な磁気ディスクの構造を示す。アルミニウム合金やガラス基板の上に磁性薄膜が被覆され、その上に磁性膜の摩耗を防止するためにカーボン保護膜および潤滑膜が被覆されている。カーボン保護膜 (10 nm

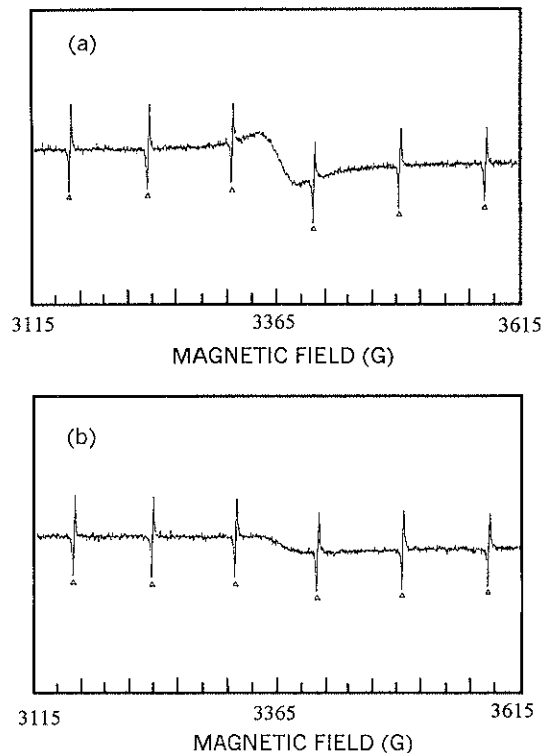


Fig. 5 ESR spectra. (a) amorphous carbon, (b) amorphous carbon with PEPE diol lubricant.

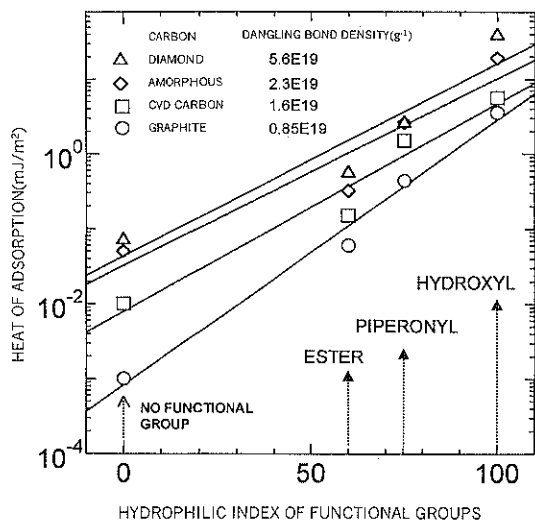


Fig. 6 Heat of adsorption between carbon surfaces and PEPEs with functional groups.

リングボンドは一般的に不安定で大気中では安定に存在しないといわれているが、Si に比べ共鳴構造をとり易いカーボンのダングリングボンドは比較的安定であるこ

とも報告されている。Fig. 6 に種々のカーボン材料に対する潤滑剤の吸着熱を、潤滑剤の官能基の親水性の強さ (Hydrophilic index) に対して整理した結果を示す。ダングリングボンドの存在量はグラファイト粉末、CVD/非晶質カーボン、ダイヤモンド粉末の順に多くなるが、潤滑剤の吸着熱はダングリングボンド存在量の増加と共に大きくなることがわかる。また PFPE に官能基を付加した場合、官能基の親水性の強さが大きいほど吸着熱が大きくなることもわかる。

3.3 潤滑膜

潤滑膜は磁気ディスクの耐摩耗性を向上させるのにきわめて重要な役割を有している。潤滑膜は摺動⁴⁾や遠心力⁵⁾により膜厚が減少するが、保護膜と化学結合する結合層を形成させることによりゼロにはならない⁶⁾。むしろ摺動による分解⁷⁾や重合による劣化物の生成などがトライボロジー特性 (浮上特性) を阻害することが問題となる。

きわめて平滑な磁気ヘッド面と磁気ディスク面が接触する場合、その界面に水や液体潤滑剤が存在するとその表面エネルギーにより、スティクションと呼ばれる大きな吸引力が働く。その力は次式で表されるように潤滑剤の表面エネルギー γ と、ヘッド-ディスク界面に潤滑剤が存在する面積 A に比例する⁸⁾。

$$F = 2A\gamma\cos\theta/h$$

ここで θ は接触角、 h は界面のすき間である。スティクションを防止するには接触面積を減らすのが最も効果的である。その方法には磁気ディスク表面をあらす方法 (テクスチャリング手法) とヘッドスライダーの浮揚面または接触パッド面を小さくする法がある。

潤滑膜は保護膜表面に吸着してヘッドの摺動によって取れにくいことと同時に流動性による自己修復性を有することという相反する要求を満たす必要がある。このため分子内に官能基を有する潤滑油が用いられている。潤滑膜は保護膜表面に官能基によって吸着した固定層と、その上の流動層の二層構造を成すことにより良好な潤滑特性が得られるものと考えられている。Fig. 7 に核磁気共鳴 (NMR) 法を用いて測定した水酸基変性 PFPE 分子の各セグメントの運動状態 (バルクに対する薄膜状態での粘度換算比) を膜厚の関数として示す。セグメントの運動性は、NMR スペクトルの緩和時間から (1) 式により求めることができる⁹⁾。

$$\frac{1}{T_1} = C \left[\frac{\tau_c}{1 + \omega^2\tau_c^2} + \frac{4\tau_c}{1 + 4\omega^2\tau_c^2} \right] \quad (1)$$

$$T_c = 4\pi\eta a^3 / 3kT$$

Where

τ_c : Correlation time, C : Constant, ω : Resonant angular

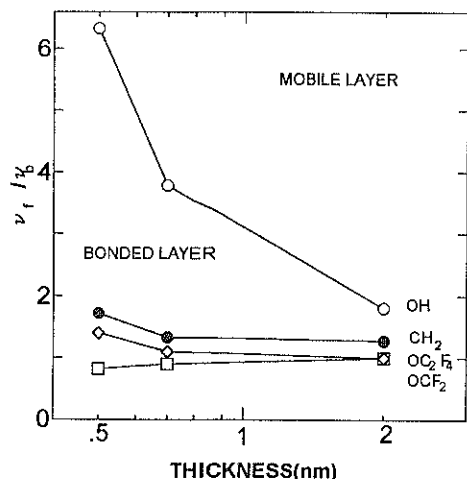


Fig. 7 Viscosity ratio of film to bulk for PEPE diol molecules as a function of lubricant thickness.

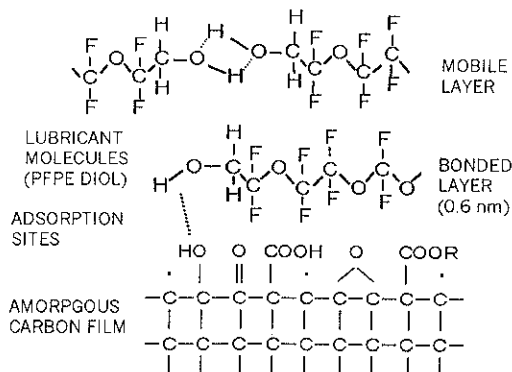


Fig. 8 Molecular model of lubricant film on carbon film.

velocity, a : Molecular radius, k : Constant, η : Viscosity,

T : Absolute temperature, T_1 : Spin-lattice relaxation time

核種に水素またはフッ素を選べば、官能基と主鎖の運動性の区別も可能である。図から、1 nm 以下の層では水酸基の粘度比はバルクの数倍になることがわかる。一方、主鎖の運動性はバルクとほとんど変わらない。このことから、水酸基変性 PFPE 分子は水酸基を吸着サイトとしてカーボン保護膜表面に吸着し、主鎖の部分は下地からの束縛が少ないことがわかる。一方、2 nm 以上の層ではバルクと同等の分子運動性を示す。すなわち潤滑膜は、カーボン保護膜表面と化学的な相互作用をなす固着層とその上の流動層からなる 2 層膜を形成していることがわかる。Fig. 8 に、以上の知見から得られたカーボン保護膜上の潤滑膜の構造モデルを示す。水酸基変性 PFPE 潤滑剤分子は、水酸基の部分でカーボン表面のダングリングボンドや官能基群に吸着し固着層を形成す

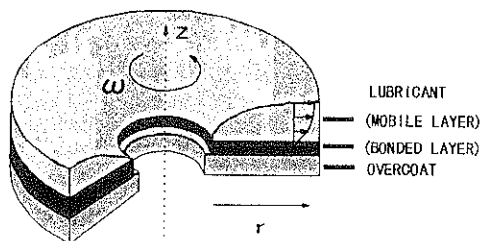


Fig. 9 Lubricant flow model on rotating magnetic disk.

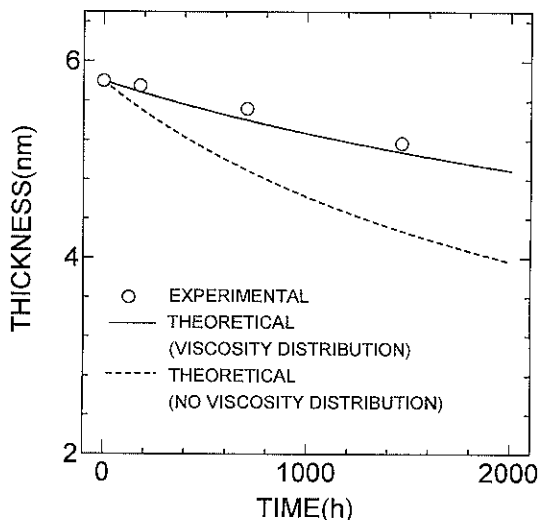


Fig. 10 Thinning behavior of lubricant film on rotating magnetic disk (thin film).

る。固着層の上には水酸基同士あるいは主鎖同士の弱い会合により流動層が形成されている。

3.4 潤滑膜-空気界面

磁気ディスクの回転による遠心力は潤滑剤分子をディスク外方へ流動させるが、同時に発生する空気流のせん断力 τ により流動が加速される。この時の潤滑剤の流動挙動は、3.3 項で示した潤滑剤分子の吸着構造が大きく影響する。Fig. 9 にそのモデル図を示す。潤滑膜の流動は (2) 式で表される運動方程式を (3) の境界条件で解くことにより、膜厚の時間変化として解析される。ここで粘度 $\eta(Z)$ は Fig. 7 で実験的に求められた膜厚の関数として表す。

運動方程式

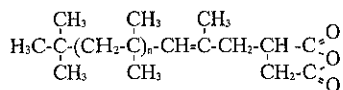
$$-\eta(Z) \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} = \rho \omega^2 r \quad (2)$$

境界条件

$$\frac{\partial V(r, H, t)}{\partial Z} = \tau \text{ および } V(r, 0, t) = 0 \quad (3)$$

Fig. 10 に膜厚減少の実験値と計算結果を示す。Fig. 7

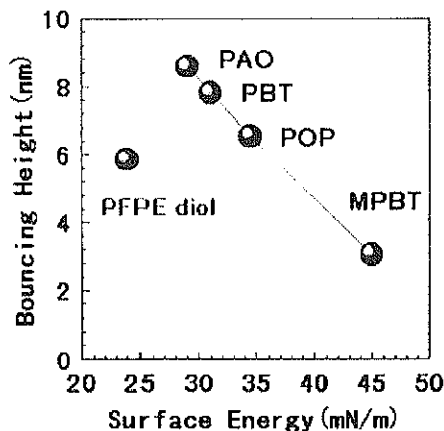
Maleic Unhydride Modified Polybutene (MPBT)



Perfluoro polyether Diol (PFPE)



Fig. 11 Molecular structure of MPBT and hydroxyl-modified PEPE.

Fig. 12 Bouncing height of contact slider as a function of surface energy. PAO: Poly- α -olefin, PBT: Polybutene, POP: Polyoxypolypropylene, MPBT: Maleic unhydride modified polybutene, PEPE diol: dihydroxyl modified perfluoropolyether.

中の OH の粘度比に相当する粘度分布を考慮した場合の計算値は、実験値とよく合うことがわかる¹⁰⁾。

4. 潤滑剤による低隙間および耐摩耗性の効果

ヘッドと磁気ディスクの隙間を小さくすることがコンタクト方式の大きな課題であるが、そのための手法の1つに潤滑剤の分子間引力の利用があげられる。Fig. 11に示すような炭化水素系潤滑剤 (MPBT ほか) とフッ素系潤滑剤 (水酸基変性 PFPE) を用いてコンタクトヘッドの跳躍を調べた結果、Fig. 12に示すように潤滑剤の表面エネルギーと跳躍量に明らかな相関が見られた。表面エネルギーの大きな潤滑剤ほど分子間引力が大きくヘッドの跳躍を抑える効果があることがわかる¹¹⁾。表面エネルギーの観点からは従来のフッ素系の潤滑剤よりも炭化水素系の潤滑剤の方が有利である。なお、図中 PFPE が炭化水素系潤滑剤の傾向からはずれるのは、粘度が異なるためである。

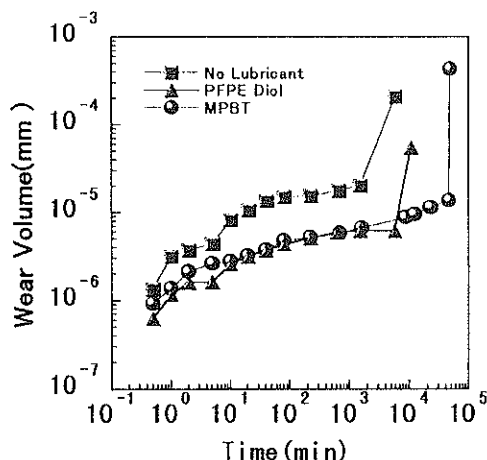


Fig. 13 Wear volume of sliders as a function of sliding time (effect of lubricants).

最後に、潤滑剤塗布による耐摩耗性向上効果を調べた結果について述べる。直径 0.3 mm のガラス球をステンレスの短冊ビームにとりつけてスライダとし、そのスライドに伴う摩耗量の時間変化を Fig. 13 に示す。潤滑剤付与により摩耗の値は減少するが、スライド時間約 10⁴ 分以下においては水酸基変性 PFPE と MPBT (無水マレイン酸変性ポリブテン) の間に大きな違いはない。しかし急激な摩耗が始まる潤滑寿命時間は PFPE よりも MPBT の方が 1 桁長い。これは潤滑剤の分解特性の違いによるものと考えられる。PFPE はフッ素の大きな電気陰性度のため、分子中のエーテル基の電子密度が低く分解されやすい。それに対して炭化水素系はそのようなことが少ないため潤滑特性の劣化がはじまりにくかったと考えられる。

5. ま と め

磁気ディスクの機械的信頼性の設計には表面化学的考察が不可欠である。また磁気ディスクの高記録密度化と機械的耐久性の実現のためには、機能材料としての潤滑剤の利用が重要な要素となる。また本報告で説明した保護膜-潤滑剤界面、潤滑膜構造、潤滑剤-空気界面の現象の理解は、磁気ディスクの機械的信頼性の向上に重要な知見を与える。また分子間引力の利用による隙間量の低減および耐摩耗性の向上は、高記録密度化に期待されるコンタクト記録方式における潤滑剤の新しい利用方法と設計手法の可能性を示すものである。なお、紙面の都合でこの分野の研究の多くを紹介できなかったが、マイクロトライボロジーに関係する参考書を参照されたい¹²⁾。

文 献

- 1) H. Hamilton: J. Mag. Soc. Jpn. **15** (Suppl. S 2), 483 (1991).
- 2) 柳沢雅広: 日経エレクトロニクス, 1997. 3. 10 (684), 141 (1997).
- 3) M. Yanagisawa: "Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems vol. IX" (STLE Special Publication SP-36, Park Ridge, Illinois, 1994) p.25.
- 4) M. Yanagisawa: Jpn. J. Appl. Phys. **27**, L 1609 (1988).
- 5) M. Yanagisawa: J. Appl. Phys. **61**, 1034 (1987).
- 6) M. Yanagisawa: "Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems, vol. II" (ASLE Special Publication SP-19, Park Ridge, Illinois, 1985) p.16.
- 7) 小野寺浩, 鈴木高弘, 今井 潤, 森 誠之: 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集 (東京, 1996) p.62.
- 8) E. Rabinowicz: "Friction and Wear of Materials" (John Wiley & Sons, London, 1965).
- 9) M. Yanagisawa: Tribology Transactions **37**, 629 (1994).
- 10) M. Yanagisawa: to be published in STLE Transaction.
- 11) 柳沢雅広, 佐藤明伸, 安食賢: 日本応用磁気学会誌, 第5回垂直記録シンポジウム論文集, **21**, supplement No. S 1 (1997) p.140.
- 12) 金子礼三: "ゼロ摩耗への挑戦" (オーム社, 1995).

Bookstand

リン—謎の元素は機能の宝庫—

井上勝也 監修 金澤孝文 著

発行 研成社 (1997年7月) A5判 142ページ 1,470円 (本体価格1,400円) (一般向け)

本書は、リンの応用化学と材料化学の現状を概説した解説書である。「のぎへんのほん・元素をめぐる」シリーズの5冊目として出版されたことからわかるように、特に科学を専門としない読者を対象にかかれた縦書きの本である。内容は、リンの環境科学・リンの資源問題から、各種のリン酸塩・ヒドロキシアパタイト・リン酸塩ガラス・有機リン化合物・生体内のリン化合物まで多岐にわたっている。この本を読んで第一に感じることは、リン化合物の応用範囲の広さである。たとえば、本会会員の中で、自分はまったくリンと関係ないという方はむしろ少ないのではないだろうか。

これら多くの具体例を通して、リン化合物の特徴は無機化合物と有機化合物の両方に通じる中間的な性格にあり、新しい材料開発においてリン化合物の多機能性が重要になることが示されている。

(大西 洋)