アルミ長手磁気記録媒体技術

二村　和男（にむら　かずお）　　坂口　庄司（さかぐち　しょうじ）　　柏倉　良晴（かしわくら　よしはる）

1　まえがき

アルミ長手磁気記録媒体は，アルミ合金基板を用い，長手磁気記録方式の磁気記録装置に搭載される磁気記録媒体である。主な用途はパソコンやサーバであったが，昨今ではDVD（Digital Versatile Disk）レコーダやゲーム機など一部家電にも搭載されている。その記録密度は，ローエンドの製品でも60 Gbits/in^{2}を超え，100 Gbits/in^{2}を超えるものも登場している。

アルミ長手磁気記録媒体の記録密度を高めるために，富士電機では基板表面加工技術，磁性技術，HDI（Head Disk Interface）技術を中核とした要素技術開発を行っている。本稿では，アルミ長手磁気記録媒体の最近の技術動向を紹介する。

2　基板表面加工技術

2.1　テクスチャ加工の目的

磁気記録媒体は，非磁性の基板上に複数の金属薄膜，非金属薄膜を形成することによって作られる。基板表面の性質は，磁気記録媒体の特性に大きな影響を与える。

長手磁気記録媒体用アルミ基板は，アルミ母材にNi-Pめっきが施された後に鏡面加工を行ったものである。その表面にはさらにテクスチャと呼ばれるサブナノメートルオーダーの凹凸が円周方向に形成されている。テクスチャ加工の目的は，大きく分けると次の二つである。

① 磁気記録媒体と磁気ヘッドとの浮上安定性の確保

② 基板円周方向への磁化の配向

前者については，磁気ヘッドの浮上安定性を確保すると同時に実効的な接触面積を低減し，磁気ヘッドとの吸着を防止させている。

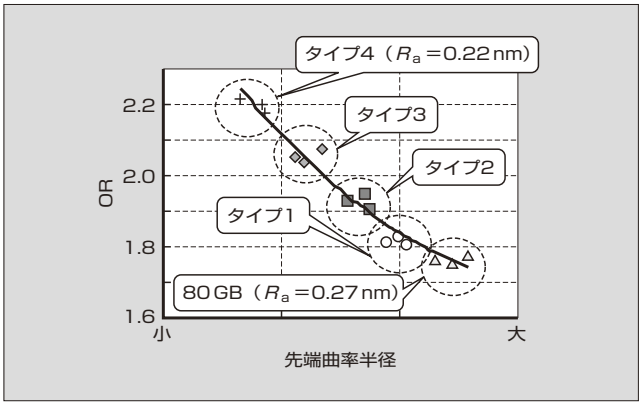
後者については，電磁変換特性に大きく関係している。長手磁気記録方式の媒体では，磁化の方位が基板円周方向に配向していることが好ましい。テクスチャの凹凸は，薄膜結晶中にテクスチャに沿った膜応力を発生させ，磁化の基板円周方向への配向を容易にする。この配向の度合い〔磁気配向比（OR：Orientation Ratio）〕は，テクスチャの形状にも左右される。

2.2　テクスチャと各特性との関係

表面粗さR_a（中心線平均粗さ）とORは密接な関係がある[1]。ORを高くするためには，R_aが大きい方が好ましい。一方，磁気ヘッド浮上高さを低減するためには，R_aを低下させる必要がある。富士電機では新たにテクスチャ凹凸の先端曲率半径（Rc p-v：Radial curvature）に着目し，これを数値化する独自ソフトウェアを用いて解析を行った。その結果，①単にR_aを下げると先端曲率半径が増加すること，②先端曲率半径が増加するとORが低下すること，③テクスチャ加工工程の改善によりR_aを下げながら先端曲率半径を低減させることが可能なこと，を確認した。

図1に，先端曲率半径とORの関係を示す。先端曲率半径を低減させることでORが向上することが分かる。また最新のテクスチャ工程を用いたタイプ4は，80ギガバイト（GB）/枚テクスチャより低いR_aでありながら，より小さい先端曲率半径を示している。次にORと電磁変換特性の一つであるSNR（Signal-to-Noise Ratio：出力信号とノイズの比）の関係を**図2**に示す。ORの向上に伴い，SNRも向上している。この結果から，テクスチャ制御は電磁変換特性改善のためにも重要なプロセスであることが分かる。

図1　先端曲率半径とORの関係



二村　和男

磁気記録媒体のトライボロジー技術開発に従事。現在，富士電機デバイステクノロジー株式会社情報デバイス事業本部ディスク媒体事業部開発部課長補佐。

坂口　庄司

磁気記録媒体の基板表面加工技術開発に従事。現在，富士電機デバイステクノロジー株式会社情報デバイス事業本部ディスク媒体事業部開発部課長補佐。

柏倉　良晴

磁気記録媒体の次世代磁気記録層成膜技術開発に従事。現在，富士電機デバイステクノロジー株式会社情報デバイス事業本部ディスク媒体事業部開発部課長補佐。

現在量産している最新製品である120 GB/枚（90 Gbits/in^2）媒体は，先端曲率半径が260 nm前後に制御されたテクスチャであり，OR = 2.0以上を確保している。また，160 GB/枚に向けて開発中のタイプ4では，先端曲率半径250 nm以下を可能とし，OR = 2.2に到達した。80 GB/枚（60 Gbits/in^2）のOR = 1.8に対して大幅な改善であり，テクスチャ加工条件のみでSNRが約0.6 dB向上している。**図3**に，世代ごとのテクスチャ原子間力顕微鏡（AFM）像を示す。80 GB/枚製品と比較し，120 GB/枚（タイプ3），および160 GB/枚（タイプ4）のテクスチャ先端はより鋭角な形状となっており，それがORの向上に寄与していることが分かる。

2.3　他工程との連携

テクスチャ加工後の洗浄工程も，ORに影響を与える。テクスチャ条件に応じた洗浄工程設計を行い，テクスチャ表面性状を維持しつつ，残渣（ざんさ），パーティクルを確実に除去することも量産化に向けた重要な課題である。

均一で異常部の少ない表面状態を維持するためには，テクスチャ加工設備の管理を含めクリーンルーム維持管理も重要であり，生産技術も重要な開発要素である。

図2　ORとSNRの関係

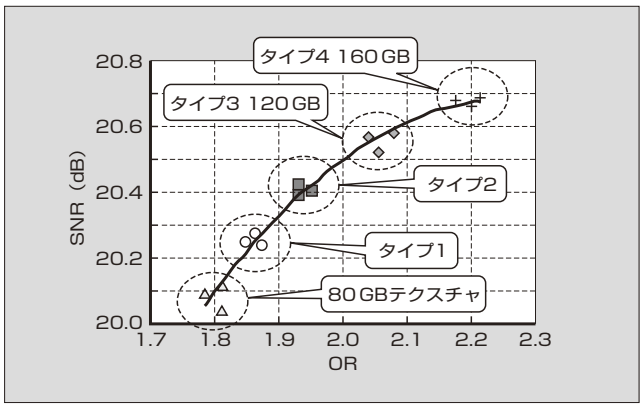
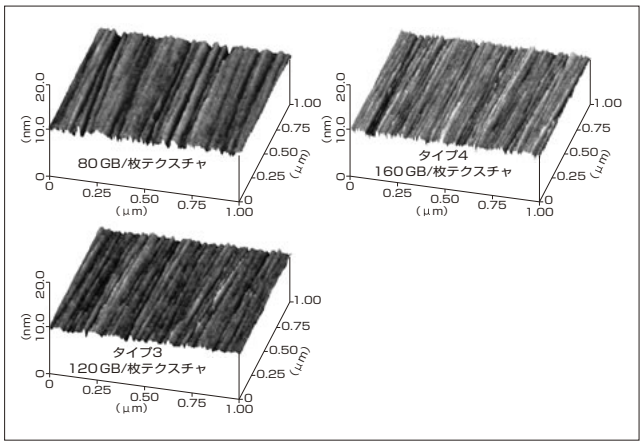


図3　世代ごとのテクスチャ表面形状比較



3　磁性技術

3.1　磁気記録媒体の基本層構成

図4にアルミ長手磁気記録媒体の層構成の一例を示す。アルミ基板上に，複数の金属薄膜が設けられ，その上にカーボン保護膜と液体状の潤滑膜が形成されている。

金属薄膜はそれぞれに役割を持っている。Cr，Cr合金の積層構造から成る下地層は，その上に形成される磁気記録層の結晶方位を基板面内円周方向に配向させるために設けられる。この働きにより，長手磁気記録が可能になる。安定化層は，Co合金薄膜から成る。下地層と磁気記録層の結晶的な連続性を高めるとともに，この上に形成されるスペーシング層を介して磁気記録層との間に反強磁性結合状態を形成する。反強磁性結合を利用した磁気記録媒体を，一般にAFC（Anti-Ferromagnetic Coupling）媒体と呼んでいる。AFC媒体は，後述する“熱揺らぎ”を改善することができる。富士電機では60 Gbits/in^{2}を超える記録密度のアルミ長手磁気記録媒体に，AFC媒体を採用している。磁気記録層は，実際に磁気信号が書き込まれる薄膜である。一般にCrやPtなどの元素が添加されたCo合金である。

各金属薄膜はナノオーダーの薄さである。例えば，最も薄いスペーシング層の膜厚は約0.8 nmと，原子数個分の厚さしかない。そのため，原子レベルの結晶欠陥が媒体特性を劣化させる。富士電機ではスパッタ法によりこれらの

図4　AFC媒体の層構成例

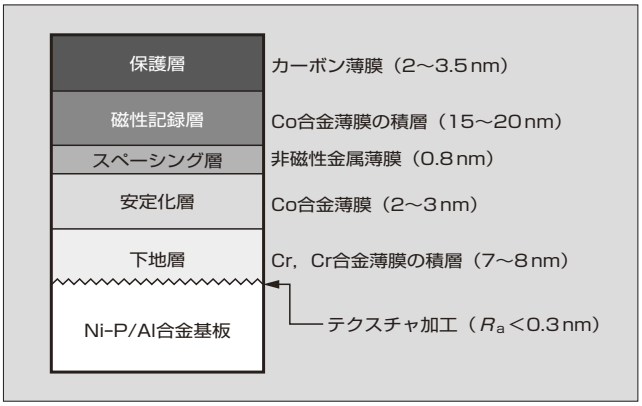
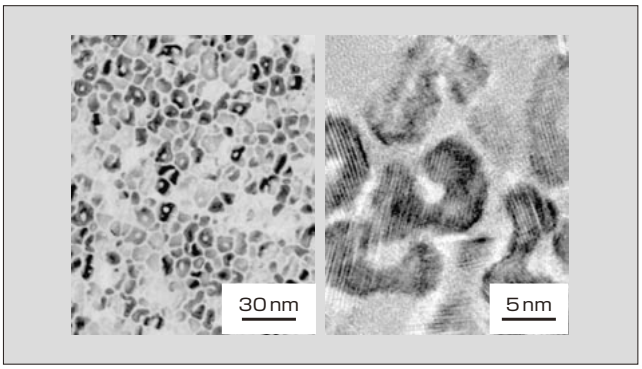


図5　磁気記録層の平面TEM像



金属薄膜を形成している。スパッタ装置内壁の表面処理を工夫することで，壁面からの発ガスや微小なコンタミネーションの発生を低減し，結晶欠陥を抑えている。

3.2　磁気記録媒体の微細構造

図5に磁気記録層の平面透過電子顕微鏡（TEM）像を示す。磁気記録層は，複数のCo合金粒子の集合体である。その粒径は記録密度の増加に伴い微細化されている。富士電機で生産する60 Gbits/in^{2}対応磁気記録媒体の平均粒径は約7 nmである。これに対して90～120 Gbits/in^{2}対応の磁気記録媒体の場合，平均粒径は6.5 nm前後に微細化されている。90 Gbits/in^{2}の場合，一つの記録ビットの長さはおよそ32 nmであり，Co結晶粒およそ5個分に相当する。一方でCo結晶粒径が小さくなると，一度記録した磁気信号が熱の影響で減衰する“熱揺らぎ”の問題が顕著となる。最近の高記録密度磁気記録媒体では，媒体ノイズを低減して記録密度を高めるとともに，いかにして熱安定性を確保するのかが重要なポイントになる。

3.3　熱安定性の改善

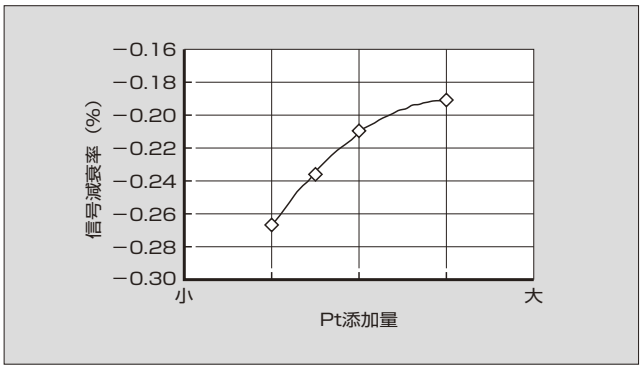
熱安定性を高める方法は幾つかある。基本的には，「熱安定性はK_uV/kTに比例する」という考えに基づいている[(2)]。K_uは磁気異方性，Vは磁性粒子の体積，kはボルツマン定数，Tは温度である。すなわち，熱安定性を高めるためにはK_uを高めることと，磁性粒子の体積Vを増やすことが必要になる。

K_uを高める方法として，磁気記録層中のPt添加量を増やす方法が挙げられる。**図6**に，磁性層中のPt添加量を変更したときの信号減衰率を示す。信号減衰率は，熱安定性の評価指標の一つである。**図6**から，磁性層中のPt添加量を増やすことで信号減衰率が減少し，熱安定性が改善されることが分かる。一方で，単純にPt添加量が増えると磁気記録層の磁化が小さくなり，媒体ノイズの増加など他の特性に悪影響を及ぼす。そのため，Pt添加量を増やす場合には，その他の元素の添加量を最適化する，磁気記録層を熱安定性を高める層と低ノイズの層に機能分離する，などの手法が用いられる。

磁性粒子の体積Vを増して熱安定性を改善するためには，粒径は粗大化できないので磁性層の膜厚を増やすことになる。AFC媒体は，この考え方を応用している。磁性薄膜である安定化層の膜厚を増やすことで磁性層全体の膜厚を厚くして，熱安定性を高めている。単純に安定化層の上に磁気記録層を形成すると，媒体出力とともに媒体ノイズも増えてしまう。しかし，安定化層と磁気記録層の間にスペーシング層が存在するAFC媒体では，反強磁性結合により安定化層と磁気記録層の磁化が互いに反対方向を向くため出力の増加が起こらず，媒体ノイズも抑制される。さらに，磁気記録層自体の膜厚も，ノイズの増加と熱安定性のバランスから最適設計されている。

以上の各種磁性技術を最適化することにより，80 Gbits/in^{2}媒体の結晶粒径：7.1 nm/Signal Decay：－0.29％から6.3 nm/－0.21％へと粒径微細化と熱安定性改善を両立した。SNRも前述のテクスチャ改善と合わせて約1 dBの改善を達成した。現在，120 Gbits/in^{2}対応磁気記録媒体への量産適用準備を行っている。

図6　Pt添加量による信号減衰率の変化



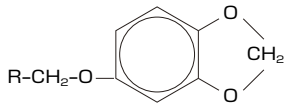
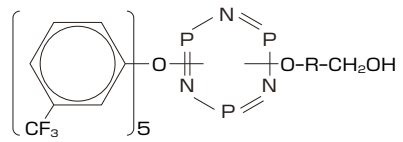
4　HDI

高記録密度化のため，近年のハードディスク装置（HDD）のヘッドは磁気記録媒体上10 nm程度の狭間げきで浮上している。そのため，これまで評価してきたヘッド－媒体間の潤滑性や耐摩耗性以外にも重要な特性値が顕在化してきた。ここでは別の側面からみた潤滑膜の特性を紹介する。

4.1　コンタミネーションとHDI

アルミ長手磁気記録媒体を搭載したHDDも用途が広がっており，温度，湿度，気圧，塵埃（じんあい）量などが異なるさまざまな環境で使われるようになった。最近のHDDは，フィルタ付きの小さな通気孔が設けられた準密閉構造であり，HDD内への外気の影響は皆無ではない。また，HDD内部の温度上昇に伴う部品からのガス放出もある。HDD内で大きな面積を占め，かつ吸着能力の高いカーボン保護膜で被覆されている媒体表面は，これらコンタミネーションの影響を受けやすい[(1)]。媒体表面に吸着したコンタミネーションは，ヘッドに移着して浮上を不安定に

表1　潤滑剤の種類と構造

潤滑剤	分子構造
主鎖構造　R	$-CF_2O(CF_2CF_2O)_p(CF_2O)_qCF_2-$
Z Dol ＊1	$R-CH_2OH$
Z Tetraol ＊1	$R-CH_2OCH_2CH(OH)CH_2OH$
AM ＊1	
A20H ＊2	

＊1：SolvaySolexis製，＊2：MORESCO製

させたり，媒体やヘッドを腐食させたりする。そこで，水分，硫酸ガス，アンモニア，シロキサン，ハイドロカーボン，DOP（Dioctyl Phthalate）などの付着量を指標にして，媒体の表面設計を行っている。また，カーボン保護膜の表面を覆っている潤滑膜も，コンタミネーションの付着低減に効果がある。潤滑膜には，**表1**に示すような直鎖構造のPFPE（Perfluoro Polyether）の末端に官能基を持つ材料が一般に用いられている。この末端基には，水酸基，ピペロニル基，環状トリフォスファゼンなどがある。末端基の異なる潤滑剤が塗布された媒体をSO_2ガスに暴露して，その付着量をTOF-SIMS（Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry）のSO_3^-フラグメント強度で比較した結果を**図7**に示す。環状構造の末端基を持つ潤滑剤を塗布した媒体の方が，水酸基のものよりも吸着量が少ない傾向が見られた。また，潤滑剤の精製条件によっても，付着するコンタミネーションの量に差異がある。**図8**に，精製条件の異なる潤滑剤が塗布された媒体を，シリコーンゴムとDOPにそれぞれさらしたときのシロキサンとDOPの付着量をTOF-SIMSで比較した結果を示す。潤滑剤（A）の方が，また潤滑層が厚いものの方が付着量が少ない。このように，潤滑剤にはヘッドとの摩擦に耐えて保護膜の摩耗を抑える働きのほかに，コンタミネーションの吸着を抑制する効果がある。

図7　媒体表面へのSO_2ガス付着量

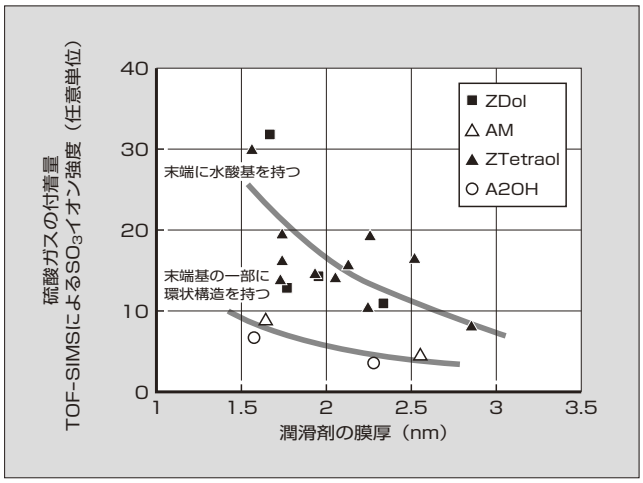
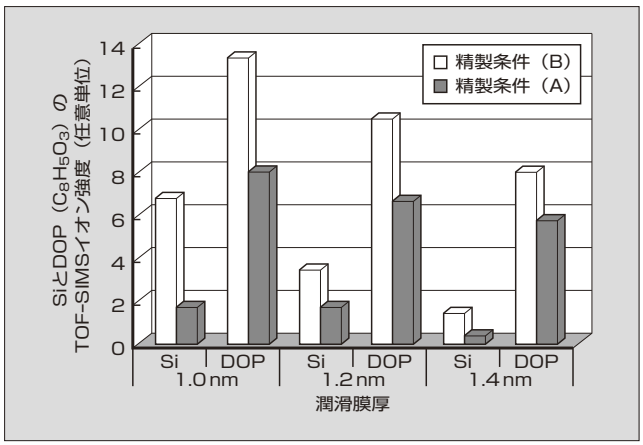


図8　媒体表面へのシロキサンとDOPの付着量



4.2　潤滑膜の耐環境安定性と浮上特性

HDDの厳しい使用環境を想定して，従来よりも過酷な温度・湿度環境下でも安定したヘッド浮上特性を保証する表面品質が求められている。それを実現するための鍵となる考え方の一つは，温度・湿度変化の影響を受け難く，安定性の高い潤滑膜とすることである[(4)(5)]。安定性が低い場合，特に高湿度環境下では潤滑剤膜厚の均一性維持が困難になり，局所的な膜厚の不均一が発生しやすくなる。したがって，ストレス環境下において発生した膜厚の不均一箇所数を定量化することにより，潤滑膜の安定性を相対比較できる。富士電機では実際のドライブ使用環境よりもさらに厳しく差異を見極めるために，媒体をあらかじめ結露させた後に各環境での放置試験を実施している。**図9**に，媒体を結露後に高温（70℃）環境で放置し，その表面に観察された潤滑剤の不均一発生箇所数を示す。個数測定にはOSA（Optical Surface Analyzer）を用いた。精製条件（A）の方が高湿での不均一発生が抑制されており，精製条件により潤滑剤の安定性が高められることが分かる。また，同じサンプルの高温高湿度（75℃，80％RH）環境下におけるヘッド浮上特性試験結果を**図10**に示す。これは試験中にヘッド・媒体接触，もしくは浮上不安定が発生した箇所をAE（Acoustic Emission）で検出してマップ可視化したものである。耐環境安定性に優れる精製条件（A）の方が優れた浮上特性を示した。このように安定性の高い

図9　潤滑剤膜厚不均一発生個数

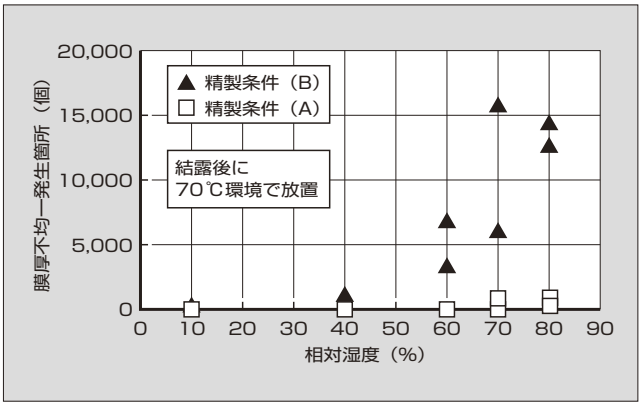
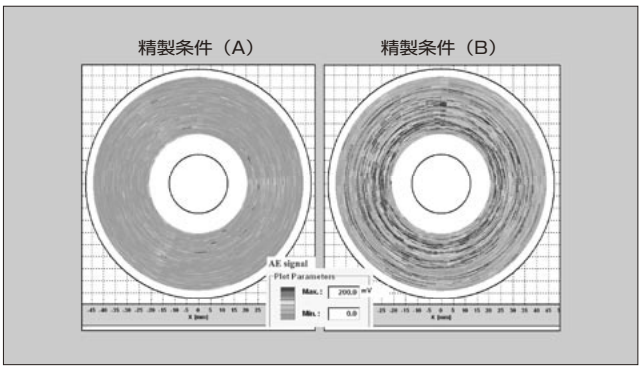


図10　75℃/80％RH環境下での浮上特性



潤滑膜とすることにより，耐環境浮上品質を向上させることができる。

以上述べたように低浮上量のHDIにおいては，潤滑膜は摩擦低減や耐摩耗性確保に加えて「ヘッドと媒体の接触を発生させない」ための特性が重要である。潤滑膜の新たな機能として必要不可欠な開発課題となっている。

5　あとがき

アルミ長手磁気記録媒体の生産量は磁気記録媒体全体の大半を占め，技術的な完成度の高さや記録容量の大きさから，その需要は今後も堅調な推移が予想されている。長手磁気記録の限界を一歩でも延伸できるよう，今後もアルミ長手磁気記録媒体の技術開発を継続していく所存である。

参考文献

(1)　坂口庄司ほか．長手アルミ基板媒体．富士時報．vol.77, no.4, 2004, p.252–259.

(2)　Sharrock, M.P. et al. Kinetic effects in coercivity measurements. IEEE Trans. Mag. vol.17, 1981, p.3020–3022.

(3)　三浦義正．ハードディスクにおけるトライボロジー技術の進展．トライボロジスト．vol.47, no.3, 2002, p.139–144.

(4)　熊崎博文．磁気記録媒体上の潤滑層流動特性評価方法．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・2004–5, p.159–160.

(5)　中澤眞一，川久保洋一．磁気ディスク上の潤滑剤の移動/修復特性及びヘッドの磨耗特性に対する影響．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・2005–11, p.421–422.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。