

# 垂直磁気記録媒体の HDI 関連技術

## Head Disk Interface Technology for Perpendicular Magnetic Recording Media

二村 和男 NIMURA Kazuo

永田 徳久 NAGATA Naruhisa

渡邊 武 WATANABE Takeshi

垂直磁気記録媒体の記録密度の向上には、書込み素子と磁気記録層との間の距離、すなわち磁気スペーシングの低減が必要である。このため、保護層の成膜プロセスを制御して保護層を薄膜化するとともに、耐食性と耐久性の向上を図っている。潤滑層においては、潤滑材料の分子構造や分子量の検討による薄膜化や、添加剤の検討によるヘッド浮上性と耐摩耗性の向上に努めている。また、低浮上の磁気ヘッドと磁気ディスク間（HDI：Head Disk Interface）で起こる現象を捉える評価技術を開発し、垂直磁気記録媒体の記録密度の向上と高信頼性の確保を図っている。

To increase the recording density of perpendicular magnetic recording media, it is necessary to reduce the distance between a write element and a magnetic recording layer, or a magnetic spacing. For that purpose, we are conducting research to control the process for deposition of the protective layer and reduce the thickness of the protective layer, while also improving corrosion resistance and durability. We are also making efforts to reduce the thickness of the lubricant film through investigation into the molecular structure and molecular weight of the lubricant substance, and to improve both head fly-ability and wear resistance through investigation into the additives used. Additionally, we are developing evaluation technology to look into the phenomena that occur in a low-flying head disk interface (HDI), and we are making efforts to increase the recording density and ensure a high level of reliability for perpendicular magnetic recording media.

### 1 まえがき

ハードディスクドライブ（HDD）に搭載される磁気記録媒体（ディスク）の記録密度を向上するためには、記録信号を微小化させる必要がある。このためのキーワードの一つに“磁気スペーシングの低減”がある。これを達成するには磁気ヘッドとディスクのインタフェース（HDI：Head Disk Interface）のデザインと制御が重要である。本稿では、ディスクの高密度化に向けた HDI 関連技術について述べる。

### 2 磁気スペーシングの低減

磁気スペーシングは書込み素子と磁気記録層との間の距離のことをいい、これを狭めることで、書込み素子がいっそう磁気記録層に近づいて書込み磁束が絞込まれ、信号

を微小領域に記録することができる。磁気スペーシングは、図 1 に示すように次の五つで構成される。

- 書込み素子からスライダ表面（Air Bearing Surface）までの距離（スライダ保護膜厚を含む）
- ヘッド浮上高さ
- 表面粗さ
- 潤滑層の厚さ
- 保護層の厚さ

上述の(b)～(e)を低減することで磁気スペーシングの低減に貢献できる。

現在用いられている空気浮上式スライダの浮上量は 5～10 nm で、その下を流れる空気膜が必要なため、浮上量の低減には限度がある。そこで、磁気ヘッドの書込み素子（ヘッド素子）の上部に設けたヒータに通電し、素子近傍のスライダ材料を熱膨張により突出（protrusion）させることで、書込み素子をいっそうディスク表面に接近さ

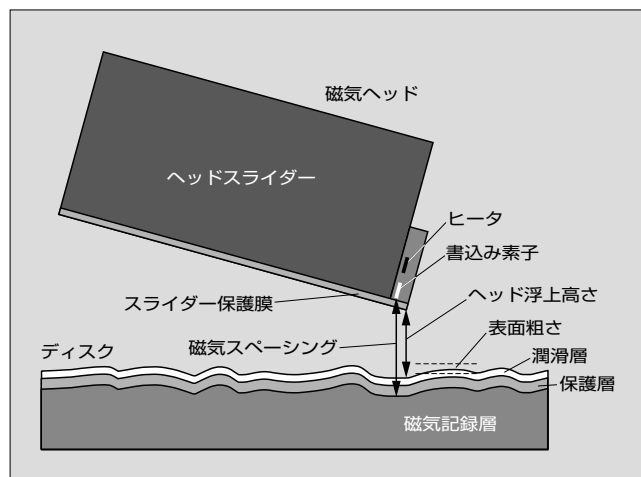


図 1 磁気ヘッドとディスク断面模式図

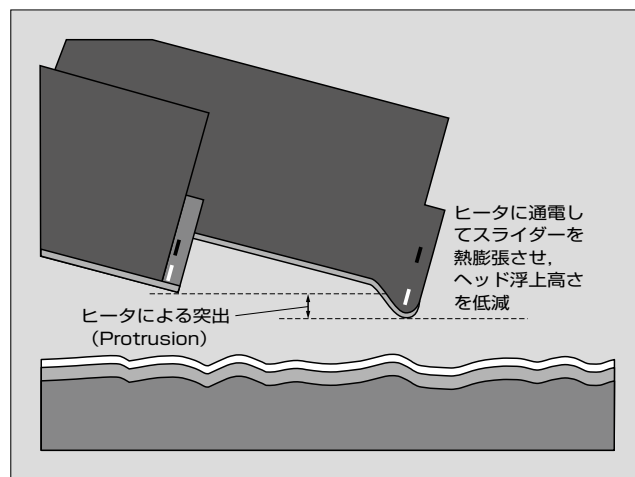


図 2 ヒータを用いたヘッド浮上高さの低減

せる技術が近年用いられるようになった。これにより、スライダ表面とディスク表面の間隙は1~2nmで制御されている(図2)。このとき膨張したスライダ表面がディスク表面に接触(タッチダウン)するまでに要するヒータ電力をタッチダウンパワー(TDパワー)といい、スライダ表面とディスク表面の間隙を表すパラメータとして用いられる。このTDパワーが大きいほど、書き込み素子をディスク表面に近づけることができることになる。ディスク表面には、突起がない平滑な面であることと、スライダ表面との相互作用を減らすために表面エネルギーが小さいことが求められる。

### 3 保護層技術

#### 3.1 保護層の目的と課題

保護層は硬質で表面平滑性に優れたDLC(Diamond Like Carbon)膜から成り、磁気記録層の上にプラズマCVD(Chemical Vapor Deposition)法により形成している。

保護層の主な目的は、磁気記録層などを腐食から防ぐこと(耐食性)と、磁気ヘッドの接触による摩耗から防ぐこと(耐久性)である。さらには、磁気ヘッドを安定的に浮上させること(ヘッド浮上性)も求められている。

このように、保護層の役割は重要であるにもかかわらず、保護層自体は磁気スペーシングの一部となっているため、記録密度を向上させるためには、保護層をできるだけ薄膜化する必要がある。ただし、そのまま薄膜化しただけでは、前述の耐食性、耐久性、ヘッド浮上性といったHDI信頼性を保てなくなってしまうため、薄膜化してもこれらのHDI信頼性を保つことのできる保護層を開発することが課題である。

#### 3.2 保護層の開発状況

富士電機は、保護層の構造として、高密度層と安定化層の2層構造を採用している。磁気記録層のすぐ上に高密度層を、その上に安定化層を形成している。高密度層は、主に耐食性、耐久性を担い、安定化層は、主にヘッド浮上性を担っている。富士電機では、2010年度に新規プロセス

を開発し、安定化層の薄膜化に成功した<sup>(1)</sup>。このプロセスは、ヘッド浮上性などの安定化層の機能を維持しつつ、その膜厚をほぼゼロにするものである。さらに、2010年度以降は高密度層の薄膜化を進めてきた。高密度層を下層(磁気記録層側)と上層(安定化層側)とに分けて詳細に検討したところ、下層は磁気記録層の被覆性に、上層は潤滑層との密着性に大きく影響していることが分かった。また、磁気記録層の被覆性は耐食性に強く影響しており、潤滑層との密着性は耐久性だけではなく、ヒータを用いてスライダを突出させた際のヘッド浮上性にも影響していることが分かった。

まず、磁気記録層の被覆性に着目し、高密度層下層の成膜条件を種々検討したところ、被覆性を改善できる条件を見いだした。耐食性の評価結果を図3に示す。希硝酸をディスクの表面に滴下し、磁気記録層などから溶出するCoの量をICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)で評価したもので、Co溶出量が少ない方が良好である。新規条件は、安定化層を薄膜化しただけの従来条件に比べ、耐食性が向上している。

次に、潤滑層との密着性に着目し、高密度層上層の成膜条件を種々検討したところ、密着性を改善できる条件を見いだした。耐久性の評価結果を図4に示す。これは、減圧雰囲気下で磁気ヘッドをディスクの表面で摺動(しゅうどう)させ、保護層が破たんするまでの摺動パス回数をAE(Acoustic Emission)の変化から評価したもので、摺動パ

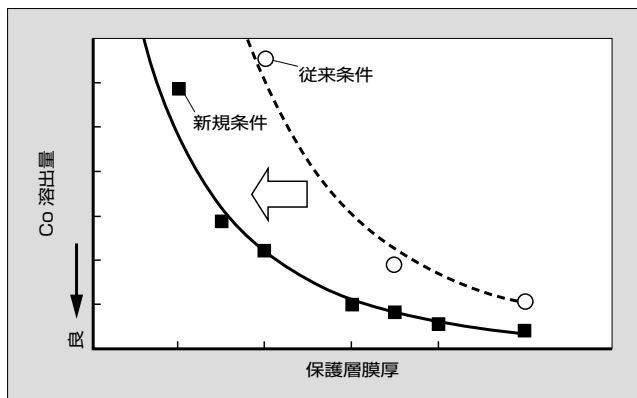


図3 耐食性の改善結果

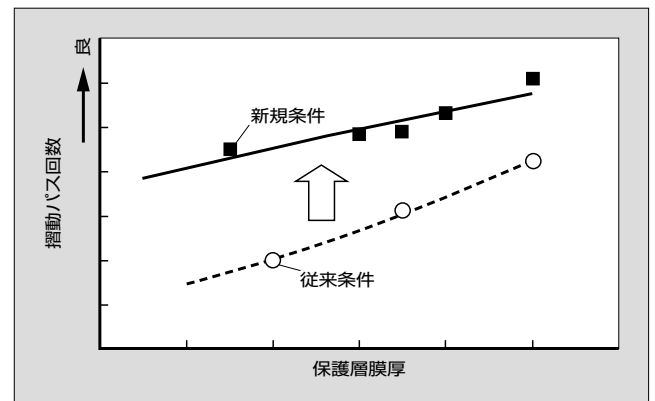


図4 耐久性の改善結果

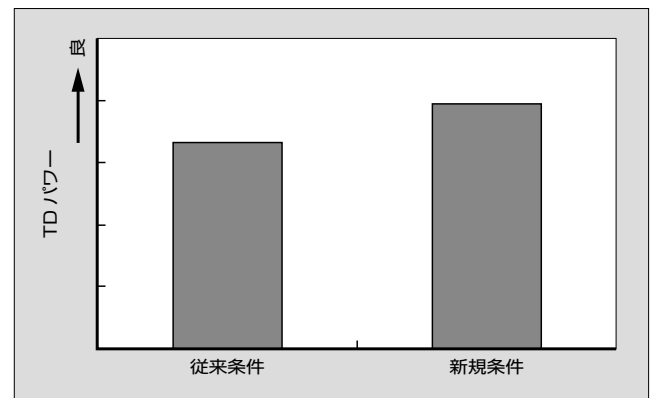


図5 ヘッド浮上性の改善結果

ス回数が多い方が良好である。新規条件は、安定化層を薄膜化しただけの従来条件に比べ、耐久性が向上している。

さらに、ヘッド浮上性の評価結果を図 5 に示す。これは、磁気ヘッドをディスクの上に浮上させた状態からヒータパワーを徐々に増加させていき、ヘッド素子部が磁気記録媒体の表面に接触するポイントを TD パワーとして評価したもので、TD パワーが大きい方が、ヘッド浮上性は良好であると判断する。新規条件は、安定化層を薄膜化しただけの従来条件に比べ、ヘッド浮上性が向上している。

上述の結果により、高密度層の薄膜化と実効的なヘッド浮上量の低減を両立させることが可能となった。このようにして、HDI 信頼性を損ねることなく磁気スペーシングを低減させることに成功した。

#### 4 潤滑層技術

##### 4.1 潤滑層とその課題

保護層の表面に設けられた液体潤滑層は、磁気ヘッドとディスクの接触に備えて保護層表面の摩擦を抑えるとともに、湿度や腐食性ガスなどに対する耐久性を高めている。この液体潤滑層には、従来、直鎖のパーフロロポリエーテル (PFPE) 系の材料が用いられている。これは、その耐熱性、低摩擦特性、さらに化学的安定性をバランス良く兼ね備えた材料であることによる。また、分子の末端には、潤滑材料と保護層のカーボン表面との密着性を高める官能基を付与している。

上述のように、磁気ヘッドとディスクの磁気スペーシングの低減のため、保護層の薄膜化が進められており、そのため潤滑層による摩擦耐久性の維持・向上が重要である。一方で潤滑層自身の厚さも、磁気スペーシングの要素として無視できなくなっている。これらのことから、潤滑層の開発の課題としては、浮上性の改善および薄膜潤滑層での耐久性の向上を重点に開発を行っている。

##### 4.2 潤滑層による浮上性の改善

磁気ヘッドに埋め込まれたヒータによる熱膨張を使い、ヘッド素子部をディスク表面に極力接近させるには、潤滑層を薄くする必要がある。図 6 に、潤滑層の厚さと磁気

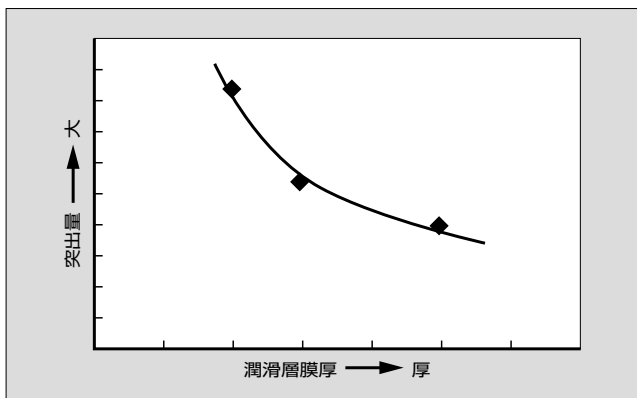


図 6 潤滑層の厚さとスライダの突出量

ヘッドがディスクにタッチダウンするまでのヒータによる磁気ヘッドの突出量の関係を示す。潤滑層が薄くなるとヘッド素子部がディスク表面に接触するのに要する TD パワーは大きくなり、スライダの突出量が増加し、ヘッド素子部をディスク表面により近づけることができる。

さらに、潤滑材料分子のディスク表面での配向形態も、磁気ヘッドの低浮上化に効果があると考えられる。これには潤滑材料の分子構造、分子量分布、さらに保護層と潤滑層の結合性が影響すると推察される。図 7 に異なる分子構造を持つ 2 種類の潤滑層について、磁気ヘッドがディスクにタッチダウンするまでの突出量の比較を示す。二つの潤滑材料の分子量はほぼ同じであり、保護層へ強く付着した潤滑材料の膜厚を 0.9 nm にそろえている。どちらも PFPE 材料であるが、潤滑材料 A は  $-(C_2F_4O)_n-(CF_2O)_m$  を、潤滑材料 B は  $-(C_3F_6O)_n-$  の繰返し構造を持つ。潤滑材料 B のほうが突出量が多く、より磁気ヘッドをディスク表面へ近づけることができる。これは、潤滑材料 A の分子が二つの構造単位から成るために、B に比べていわゆるランダムコイル状にディスク表面に配向しやすく、分子レベルの凹凸をより形成しているものと考えられる。

ディスク表面上の潤滑材料の配向形態は、潤滑材料の分子量によっても変わると考えられる。長い分子、短い分子、さらにそれらが混合された状態とでは、ディスク表面上の分子の並び方が違うと予想されるからである。この分子量分布の違いが浮上性に与える効果については、5 章で述べる。

##### 4.3 薄膜潤滑層での耐久性の向上

潤滑層に使われている PFPE 自身は低摩擦材料であるが、1 nm 程度の薄膜になるとその摺動耐久性は厚膜の場合に比べて低下してくる。そこで富士電機では、さらに別の潤滑材料を添加して摺動耐久性を補うことを検討してきた。現在、この添加剤として、耐摩耗性、耐熱性を兼ね備えた材料であるシクロホスファゼン構造を持ち、さらに主成分の潤滑材料との親和性を持たせるために PFPE 構造を付与したものを選定している。図 8 に、添加剤の有無の効果を示す。ヒータで熱膨張させてディスク表面に接触させた状態でシーク動作を繰り返したときのヘッド摩耗量は、

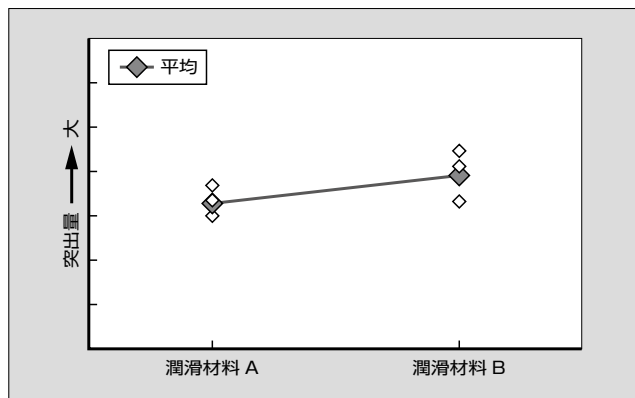


図 7 潤滑材料と磁気ヘッドの突出量

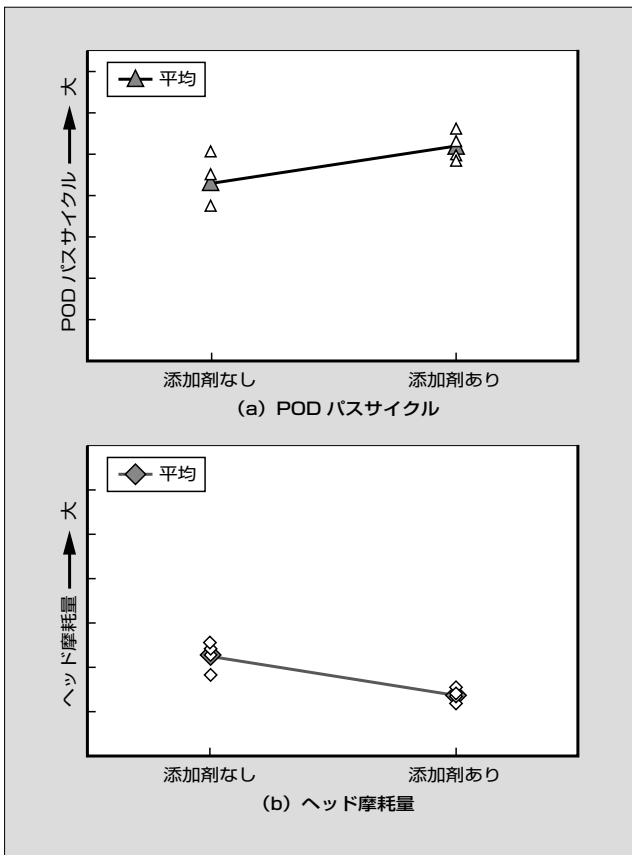


図8 添加剤と摩耗特性の関係

添加剤を加えることで低減した。また、ディスクの耐摩耗性を表す Pin-On-Disk 摩耗試験 (POD) の摺動パスサイクルは添加剤を加えると増加し、耐久性の向上がみられた。

上述のように、磁気スペーシングは、潤滑材料の分子構造とサイズが影響する領域になっている。今後も潤滑層の材料検討を継続し、薄膜で、かつ耐久性に優れた材料の開発を推進していく。

### 5 HDI (Head Disk Interface) 評価・浮上性評価技術

記録密度の向上に伴い、ヘッド浮上量は低減を続けており、スライダ表面とディスク表面の間隙は 1 ~ 2 nm まで低減している。

一方で、ヘッド浮上高さが低減したことで、磁気ヘッド-ディスク間に強い相互作用が働くことは避けられない。ここでいう相互作用とは、磁気ヘッド-スライダ間の直接接触によるものと、非接触の場合の両面間に働く分子間力によるものがある。そのため磁気ヘッド-ディスク間の相互作用に対して、長期間安定したヘッド浮上状態を維持する設計が必要である。これを実現するために、信頼性評価として、極低浮上量に対応した評価方法の開発が求められている。本章では、富士電機がヘッド浮上量の低減に伴い採用した浮上性評価技術について述べる。

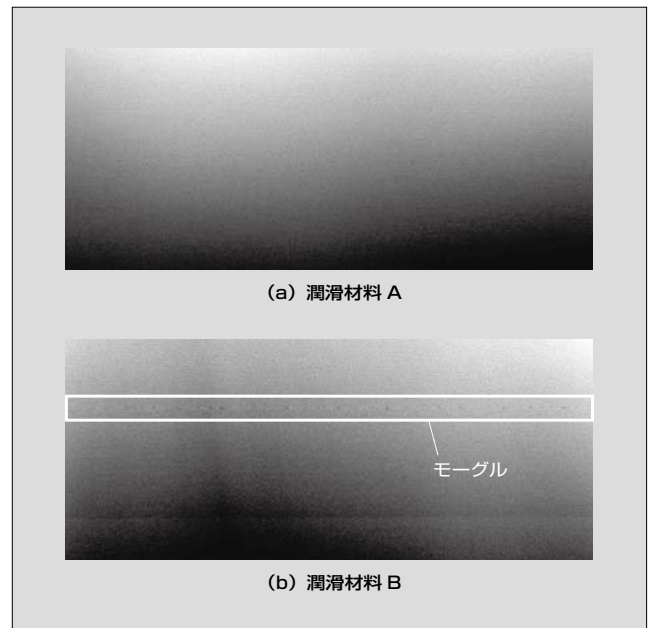


図9 モーグル評価結果

#### 5.1 潤滑層のモーグル評価

ヒータを用いた浮上高さ制御技術の採用によるヘッド浮上量の低減に伴い、磁気ヘッド-ディスク間の相互作用は、無視できないレベルとなってきている。ディスク上のある半径位置にて磁気ヘッドを一定時間浮上させた後、ディスク表面を OSA (Optical Surface Analyzer) と呼ばれる光学式測定器にて測定すると、ディスク表面に生じた潤滑層の厚さの分布を可視化できる。磁気ヘッド-ディスク間の相互作用が強いと、ディスク表面の潤滑層に“モーグル”と呼ばれる痕跡を残す。本技術は、このモーグルの発生有無に着目することにより、ディスク表面の安定性を評価する手法である。

図9に、潤滑材料を変更した場合のモーグル評価結果を示す。潤滑材料Aにおいては、磁気ヘッドの浮上による痕跡は確認できないが、潤滑材料Bにおいては痕跡が確認できる。この場合、潤滑材料BはAに比べて、磁気ヘッドによる相互作用の影響を受けやすく磁気ヘッドの浮上が不安定になりやすいと判断できる。

#### 5.2 クリアランススタビリティ評価

磁気ヘッド-ディスク間の相互作用の強さを表す指標として、磁気ヘッド表面への潤滑層の付着現象が挙げられる<sup>(4)</sup>。クリアランススタビリティ評価は、潤滑層の磁気ヘッドへの付着現象が引き起こす TD パワーの変化に着目したものである。

まず、初期の磁気ヘッドの浮上状態を確認するために TD パワー測定を実施する。次いで、ヘッドシーク動作で潤滑材料を付着させ、その後、再び TD パワー測定を実施する。評価は、最初と最後の TD パワーの差異  $\Delta TDP$  に基づいて行い、この  $\Delta TDP$  が小さいほどヘッド浮上安

定性が良いと判断する。図 10 に、潤滑材料を変更した場合のクリアランススタビリティ評価結果の例を示す。ここで、潤滑材料 C と D を構成する材料の平均分子量は同じであるが、分子量の分散は C のほうが大きい。図から、分子量分布が狭い方が、ヘッド浮上が安定しやすいことが分かる。

### 5.3 ヘッドバニッシュ評価

磁気スペーシングの低減により、磁気ヘッドがディスクへ間欠的に接触する現象が発生しやすくなっている。このため、両者に接触が発生したとしても、磁気ヘッドに摩耗ダメージを生じさせないディスク表面のデザインであることが求められている。ヘッドバニッシュ評価は、磁気ヘッドに埋め込まれたヒータに通常より高いパワーを与え熱膨張させて、連続的に磁気ヘッドがディスクと接触する状況を作り出し、長時間摺動させた後、磁気ヘッドに生じた摩耗ダメージを評価する手法である。TD パワーの変化  $\Delta DFH_{Power}$  を磁気ヘッドの摩耗量の評価指標としている。これは、磁気ヘッド-ディスク間の接触によってヘッド素子部の摩耗が進んだ場合、再度、接触状態を得るには、当初のヒータパワーよりもさらに高いパワーが必要になるという特性を利用したものである。

図 11 に、潤滑層膜厚とヘッドバニッシュによる摩耗量

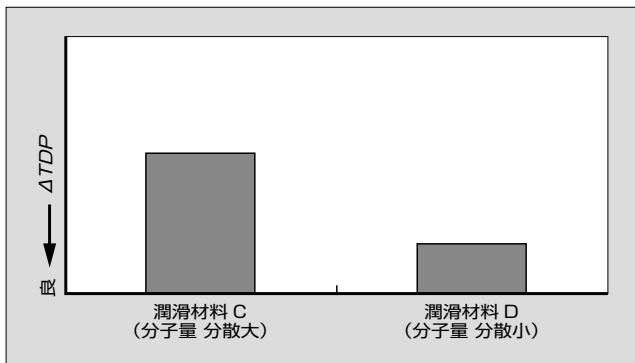


図 10 クリアランススタビリティ評価結果

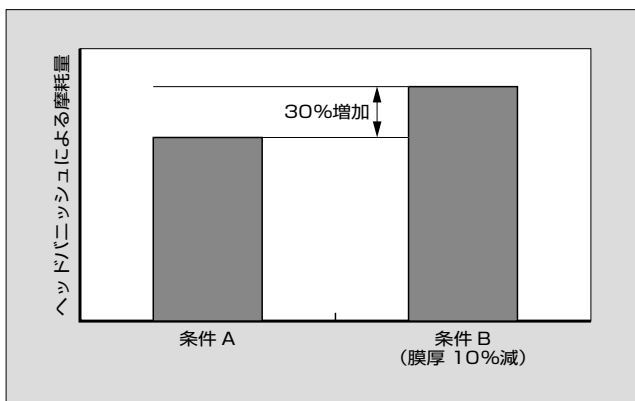


図 11 潤滑層膜厚とヘッドバニッシュによる摩耗量

を示す。条件 A と比較して膜厚を 10% 低減させた条件 B では、ヘッド摩耗量が 30% 程度増加しており、潤滑層膜厚のデザインは、ヘッド摩耗量の抑制において重要であることを示している。

## 6 あとがき

磁気ヘッドとディスクのインタフェース (HDI) の制御は、ハードディスクドライブ (HDD) の記録容量の増加と信頼性の確保に欠かせないものになっている。今後も磁気スペーシングの低減に向けて、信頼性の高い保護層と潤滑層の検討と、オングストローム領域での HDI 現象を把握して理解する評価技術の確立を強力に推進していく所存である。

### 参考文献

- (1) 小林良治ほか. 垂直磁気記録媒体の HDI 関連技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.4, p.265-270.
- (2) S. Meeks. Et al. "Optical Surface Analysis of the Head-Disk-Interface of Thin Film Disks," ASME J. of Tribology. 1995, vol.117, p.112-118.
- (3) Watanabe, T. D.Bogy. "A study of the lubricant displacement under a flying head slider caused by slider-disk interaction," IEEE Trans. Magn. 2003, vol.39, no.5, p.2477-2479.
- (4) R.Rohit and D.Bogy, "Effect of slider lubricant pickup on stability at the head-disk interface", IEEE Trans. Magn. 2005, vol.41, no.10, p.3028-3030.



#### 二村 和男

磁気記録媒体の HDI 開発に従事。現在、マレーシア富士電機社媒体統括部開発部。IEEE 会員。



#### 永田 徳久

磁気記録媒体の HDI 開発に従事。現在、マレーシア富士電機社媒体統括部開発部。応用物理学会会員。



#### 渡邊 武

磁気記録媒体の HDI 開発に従事。現在、マレーシア富士電機社媒体統括部開発部。



\*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。