

HDDの高記録密度化と信頼性を支えるHDI技術

HDI Technology for Increasing Storage Density and Reliability of HDDs

あらまし

ハードディスクドライブ（HDD）の高記録密度化と信頼性を両立させるためには、ヘッドとディスク媒体の磁性層間の物理的隙間を減少させ、ナノの世界で現実^{すき}に起こっていることを正確に把握する技術や、ナノレベルでヘッド浮上量を制御できる技術が求められている。富士通はHDDの高記録密度、信頼性を向上させるため、これらの技術をHDI（Head Disk Interface）として開発している。

本稿では、HDI技術のうち、CAICISS（Co-Axial Impact Collision Ion Scattering Spectroscopy）による潤滑剤の被覆性評価技術、Drop法による磁気記録媒体保護膜の被覆性評価技術、およびヘッドのスライダ浮上面の化学処理技術を紹介する。

Abstract

Various technologies are being developed to simultaneously achieve high-density storage and high-reliability in hard disk drives (HDDs). Some examples are technologies for reducing the spacing between the head and disk magnetic layer while providing an accurate grasp of the conditions at the nano level and technologies for controlling the head flying height at the nano level. In this paper, we describe the following head-disk interface technologies that Fujitsu has developed: a co-axial impact collision ion scattering spectroscopy technique for evaluating the insulation properties of lubricants, a technique for evaluating the insulation properties of the overcoats used on magnetic storage devices based on the drop method, and a chemical modification technology for the flying surface of head sliders.



渡部慶二
(わたなべ けいじ)

先行技術開発部 所属
現在、ヘッドディスクインタフェース（HDI）/トライボロジーの開発に従事。



千葉 洋
(ちば ひろし)

基盤技術研究所新材料研究部 所属
現在、ハードディスク用潤滑技術の開発に従事。



中村哲一
(なかむら のりかず)

基盤技術研究所新材料研究部 所属
現在、ハードディスク用保護膜技術関連の研究に従事。



水谷晶代
(みずたに あきよ)

基盤技術研究所分析技術研究部 所属
現在、微細構造評価技術関連の研究に従事。

ま え が き

ハードディスクドライブ（以下、HDD）の記録密度を向上させるためには、ヘッドとディスク媒体（以下、媒体）の磁性層間の物理的隙間を減少させることが必須となる。ヘッドと媒体間の物理的な隙間には、媒体とヘッドの磁性層表面を保護するDLC（Diamond Like Carbon）保護膜、媒体保護膜上の潤滑膜、およびヘッドの浮上隙間などがあり、これらの合計（現行で約20 nm）がHDDの記録密度に影響する（図-1）。このため、HDDの世代ごとに隙間の各成分の低減が図られている。現在では、潤滑剤膜厚は1 nm、媒体保護膜厚は4 nm、浮上量は10 nm程度の領域に突入してきている。ヘッドが浮上する様子は、ジャンボジェット機が地上数mmの高さで飛行していることに例えられるが、現実の世界では、環状シロキサンなど空気中に存在する不純物分子が数個分の高さでヘッドに吸着すると、ヘッドと媒体の接触を起し、ヘッドの安定浮上を阻害してしまう。また媒体保護膜上に形成されている潤滑膜は、フッ素系の高分子1~2層分ほどの高さで形成されており、媒体上で数分子が凝集現象を起こすと、やはりヘッドの浮上安定性に大きく影響するほどになってきている。また、保護膜は薄くなると膜の被覆限界から欠陥が発生し、下地磁性膜の腐食を引き起こす。

HDD技術において、上記ヘッド-媒体間の現象にまつわる領域は、HDI（Head Disk Interface）技術と呼ばれている。富士通はHDDの記録密度の向上、信頼性向上のため、これらの現象をナノレベルで把握できる評価手法や安定浮上の技術を開発してきた。

本稿では、最近のHDI技術のうち、CAICISS（Co-

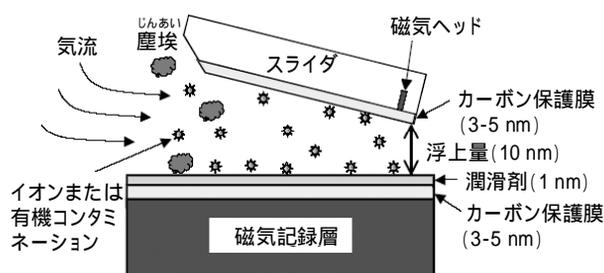


図-1 HDDのヘッド-媒体間の構成と隙間
Fig.1-HDD head and disk medium configuration.

Axial Impact Collision Ion Scattering Spectroscopy) を用いた潤滑剤の被覆性評価技術、ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) を用いた保護膜欠陥の定量評価技術、およびスライダ浮上面の化学処理による安定浮上化技術について紹介する。

CAICISSによる潤滑剤の被覆性評価技術

本章では、CAICISSを用いて潤滑剤の被覆性を評価する技術について紹介する。

潤滑剤分子の理想的な付着形態は、基板吸着を意図して付与される有極性末端基が基板側へ配向するとともに、潤滑剤一層が均一に濡れ広がった状態であるとされる。一方、潤滑剤分子同士の凝集や配向不良による被覆不均一性が生じると、前述のようにヘッド浮上の不安定化などHDDの信頼性を大きく損なう障害を誘起しやすい。したがって、潤滑剤の被覆制御は、耐蝕性の向上や良好なHDI特性を達成する上でも極めて重要となる。しかし、現在の潤滑剤膜厚は1 nm程度と極めて薄いため、従来の分析技術による被覆性評価は困難であった。そこで著者らは潤滑剤被覆性の直接評価を目指し、非破壊かつ表面感度が高いCAICISSによる潤滑剤の被覆性評価技術開発に取り組んだ。

CAICISSとはHeイオンビームを数keV程度の低エネルギーで試料に照射し、ほぼ180°に後方散乱されたHeイオンのエネルギー変化から表面の元素分析を行う手法であり、ほかの分光手法に比べて表面感度が高いという利点がある。ただし、keVオーダのイオンは試料衝突時の中性化確率が著しく高いため、通常エネルギー検出器では十分な検出感度が得難い。そこで本装置では飛行時間（TOF：Time Of Flight）型のエネルギー検出器を用いることでこの問題を解消している。

CAICISSでは、下地構成元素（DLC）と表面構成元素（潤滑剤）の強度比から潤滑剤の被覆性を評価できるが、両者に同一元素が含まれる場合はその元素がどちらの帰属であるかを判別することが不可能である。潤滑剤とDLCの組合せはこのケースに該当するため、潤滑剤被覆性評価への応用に当たっては潤滑剤主鎖部の組成 $\{-(C_2F_4O)_m(CF_2O)_n-\}$ に着目した。

つまり、磁気記録媒体に塗布される各潤滑剤種は

極性末端基に差異があるものの、パーフルオロポリエーテル (PFPE) から成る主鎖の組成比は一定であり、含有されるフッ素と炭素の原子数比率 (F/C 比) は任意の分子量において常に2となる。一方、DLCは通常、炭素および水素から構成されているが、原理的制約からHeイオンをプローブとしたCAICISSの検出可能元素はHeの質量数以上であり、該当元素は炭素のみとなる。この事実により、CAICISS測定から得られる炭素強度は潤滑剤およびDLCの双方に由来するものの、式(1)に示した F/C 比において、ノミナル値となる2からの減少はDLCの寄与であることは明らかのため、ZBL近似⁽⁴⁾を用いた計算で求めた F/C 比を比較することで潤滑剤の被覆性評価が可能となる。

$$\frac{F_{Lub}}{C_{Lub+DLC}} \approx 2 \quad \dots (1)$$

著者らで評価を行った各潤滑剤 (Solvey Solaxis社製Fomblinシリーズ) はDLCまで成膜した磁気媒体に浸漬法で塗布し、潤滑剤濃度や引上げ速度により膜厚制御を行った。またCAICISS測定は島津製作所製TALIS-9700を用い、入射イオンとしてHe、加速電圧2 keV、積算時間120 sの各条件で測定を行った。

潤滑剤AM3001を塗布した媒体の潤滑剤膜厚に対するスペクトル変化を図-2に示す。同図の縦軸はHeイオンの散乱強度を、また横軸はHeイオンの飛

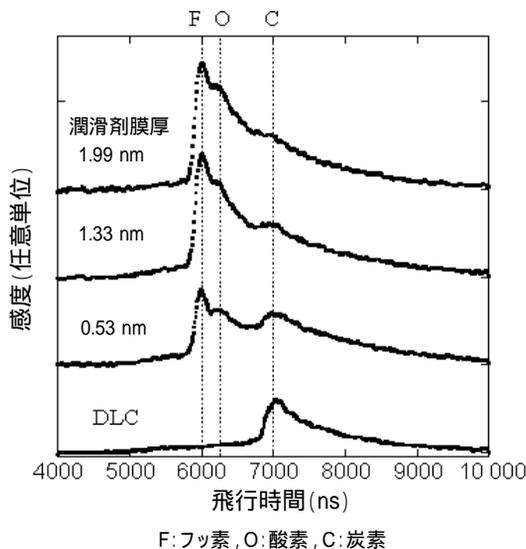


図-2 AM3001潤滑剤のCAICISSスペクトル
Fig.2-CAICISS spectra of AM3001 lubricant.

行時間を表しており、質量数が高い元素と衝突するほどHeイオンの飛行時間は短くなるため、図中で観察されている各ピークは短TOF側からそれぞれ、フッ素、酸素および炭素に帰属できる。膜厚の増加に伴いフッ素強度は増加し、一方で炭素強度が減少するが、この挙動はDLC表面が潤滑剤で覆われていく過程をダイレクトに反映している。

このようにして求めた潤滑剤AM3001のフッ素強度およびバックグラウンド除去から得られた炭素強度から求めた F/C 比の膜厚依存性を、潤滑剤Z-TETRAOLのそれと併せて図-3に示す。AM3001に着目すると、膜厚の増加とともに F/C 比は増加し、1.5 nmでは2に達することから、この近傍がAM3001で表面を完全被覆できる下限膜厚であると考えられる。一方、TETRAOLの傾向は、潤滑剤膜厚の増加に伴い単調に被覆性が向上する点で一致しているが、TETRAOLは薄膜時において同等膜厚における被覆性が高い。この理由としては、両者の極性末端基の特性が反映されていると考えられ、TETRAOLでは末端基の吸着力が強いため配向性が高く、結果として被覆性が向上したものと推察される。

以上、本評価法を用いることで従来技術では困難であった分子一層レベルの膜から成る潤滑剤の被覆性評価が可能となった。潤滑剤の被覆性は、浮上障害などの原因究明や今後の低浮上化に対応する適切な潤滑剤選択を行う上でのキーファクタとなるため、

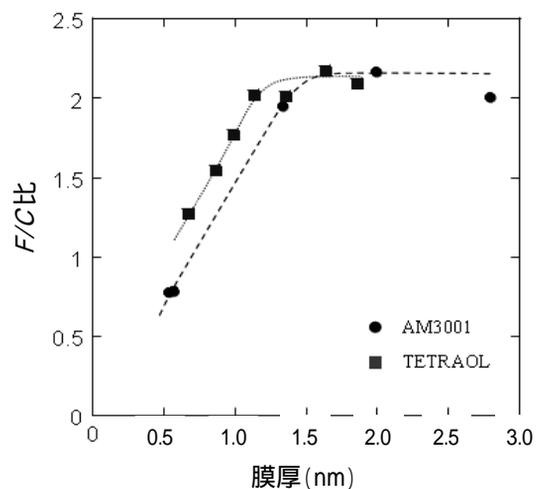


図-3 各潤滑剤の F/C 比の膜厚依存性

Fig.3- F/C ratio versus film thickness for AM3001 and TETRAOL.

本手法を活用することでプロセス開発の効率化が期待される。

Drop法ICP-MSによる保護膜の被覆性評価技術

媒体のDLC保護膜の薄膜化により、膜の不均一性やナノレベルの孔が発生すると、磁性膜の腐食が発生し、保護膜としての機能を喪失する。このため、DLCのナノレベル薄膜化の実現には、正確な膜質の評価技術が重要となる。本章ではDLC膜上に酸性溶液を滴下し、部分抽出したコバルト（保護膜直下の媒体成分）成分を微量分析して数nm厚の保護膜の欠陥を定量評価する技術を紹介する。媒体磁性膜が腐食する際には、DLC膜の被覆性不良箇所に水分が存在することで、下層の磁性層内のコバルト原子が電池化学反応により溶出してくる⁹⁾ このメカニズムを利用して、保護膜被覆性の定量的な評価を行うのがコバルト溶出法である。

従来、コバルト溶出法における評価方法としては、国際ディスクドライブ協会が提唱しているディスク浸漬法（Dip法）があるが、独自の検討を行った結果、いくつかの問題点が存在することが分かった。具体的には、本手法は溶液中に媒体全体を浸漬してしまうため、とくに媒体側面からの溶出が懸念される。実際に、図-4に示すように側面に施すカバー材（テープや樹脂）により、溶出量が違っており、カバーの質が測定再現性に大きく影響することが分

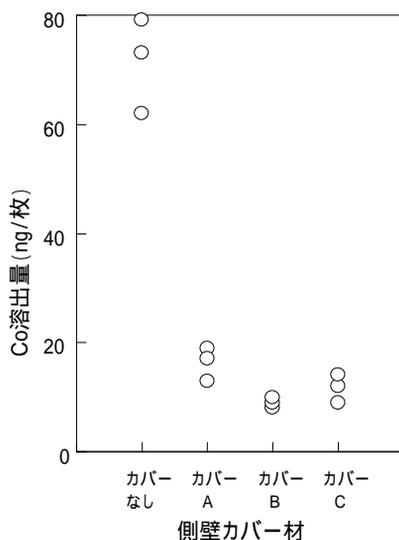


図-4 側壁カバー材による溶出量のばらつき
Fig.4-Variations in amount of dissolution depending on material used for sidewall covers.

かった。また、媒体一面を一度に浸漬してしまうため、保護膜の面内分布の情報が得られないなどの問題がある。

そこで今回、著者らはDrop法という新たな方法を開発した。DLC膜の表面に、一定量の水滴を落とすと表面張力により一定面積の液滴ができる。これは、DLC膜が非常に薄い膜でありながら高耐久性を保持するために非常に緻密な膜構造となっているため、安定した表面張力が得られることによる。媒体面内の数箇所に、マイクロピペットで一定量の液滴を作成し、一定時間放置した後、この液をピペットやスポイドなどで回収し、スピッチ管などに入れ、ICP-MSで測定する。この方法では、側面からの溶出を考えず、さらに面内数箇所について被覆性の評価が行える。しかし、抽出液量が少なくなったことで、液中に溶出してくるコバルトの絶対量が少なくなるため、抽出効率を向上させることが必要であった。そこで、抽出液としてDip法で用いられている硝酸や、さらに腐食性の強いフッ酸で溶出した際の溶出挙動などを検討した結果、3%硝酸を1ml使用して抽出液とすることが最適な条件であることが分かった。また、Dip法では30分の浸漬時間が標準であったが、Drop法においては、抽出時間に対するコバルト溶出量の変化から、抽出時間60分が最適であることを見出した。

図-5は、DLC膜厚に対する、60分溶出時におけるコバルト量を溶出速度として表したものである。膜厚が薄くなるとDLC膜の被覆性は低下するため、コバルト溶出量は増加する。この結果より、DLCの膜厚が5nmまでにおけるコバルトの溶出量はほぼ直線的な相関関係にあることが分かった。つぎに、

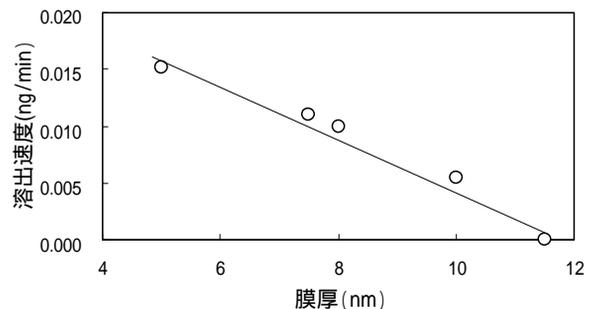


図-5 DLC膜厚とコバルト溶出速度
Fig.5-Cobalt dissolution rate versus DLC film thickness.

DLCの成膜条件について評価した結果を図-6に示す。一般にスパッタ成膜法では、CVD (Chemical Vapor Deposition) 成膜法と比較してDLC膜の緻密性が低く、被覆性が悪いことが知られているが、Drop法におけるコバルトの溶出結果から、これが定量的に示された。

Drop法の開発により、従来のDip法によるコバルト溶出分析法に比べ測定回数ごとのばらつきを低減でき、各種DLCの製膜条件とコバルト析出挙動との定量性対応が初めてとれ、媒体面内の膜質分布測定も実現できた。本技術は、媒体の量産品質評価、および今後の3 nm以下のDLC保護膜開発に向けた評価の重要なツールとして、さらなる活用が期待される。

ヘッド浮上面の化学処理技術

ヘッドの浮上量が10 nm以下になると、中性の分子間に働く引力であるファンデルワールス力がヘッドの浮上性に影響を及ぼすことが知られている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾そこで、著者らは10 nm以下での良好な浮上特性を確立する方法の一つとして、ヘッド浮上面を低表面エネルギー化し、ヘッドと媒体間のファンデルワールス力を減少させることを検討した。表面処理として、媒体潤滑剤であるパーフルオロポリエーテルの表面エネルギーが非常に小さく、実用上の点からこれを用いた化学修飾が有利であると考えた。しかし、潤滑剤はヘッド表面上で流動することから、表面の安定化には寄与しない。安定な表面を維持するためには、パーフルオロポリエーテル潤滑剤が基板に強く結合している必要がある。潤滑剤分子を基板に結合させるために、紫外線処理を検討した^{(6),(7)} この

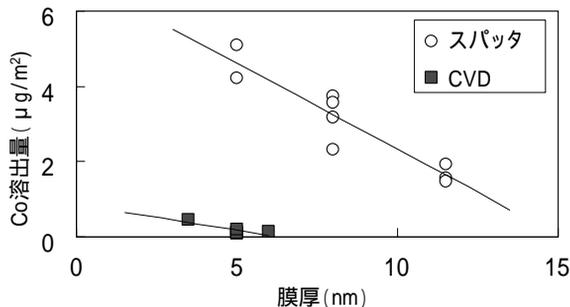


図-6 DLC膜厚とコバルト溶出量
Fig.6-Cobalt dissolution amount versus DLC film thickness.

方法は、潤滑剤分子末端の官能基に左右されず、DLC保護膜に直接潤滑剤を固着できるので優れていると言える⁽⁸⁾

実験に用いたヘッドは、パッドがついた浮上高さ12.5 nmのピコスライダを用いた⁽⁹⁾ヘッド上に固着させた潤滑剤の被覆状態をTOF-SIMSにより定性的に評価した。表面自由エネルギーは接触角法より求めた。浮上特性の評価としてチャンバ内を減圧し、その後大気圧に戻すというサイクルにおいてタッチダウンとテイクオフの気圧を求め、それを高度に変換して比較した。これは、HDDの信頼性について高度保証の観点で論じられるため、タッチダウンとテイクオフの高度が高いほど、信頼性が高いと言える。ヘッドと媒体間に働くファンデルワールス力は式(2)を用いて計算した⁽¹⁰⁾

$$P_{vdW} = -\frac{1}{6} \left\{ \frac{A_{TF1}}{D^3} + \frac{A_{TF2}}{(D+T)^3} + \frac{A_{TF3}}{(D+T)^3} + \frac{A_{TF4}}{(D+T+T)^3} \right\} \dots (2)$$

ここで、 D 、 T 、 T はそれぞれヘッド-媒体間距離、媒体上の潤滑膜厚、ヘッド表面に固着している潤滑膜厚を、また $A_{TF1} \sim A_{TF4}$ は多層膜構造におけるHamaker定数を表す。

はじめに、ヘッド上に固着させた潤滑剤の被覆状態を評価するために飛行時間型二次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) による Al^+ と $C_2F_5^+$ のイオンイメージマッピングを行った。図-7はヘッド浮上面に対して紫外線処理により潤滑剤を固着させたものについて、マッピング結果を示している。イメージが明るいほどイオンカウントが多いことを意味する。

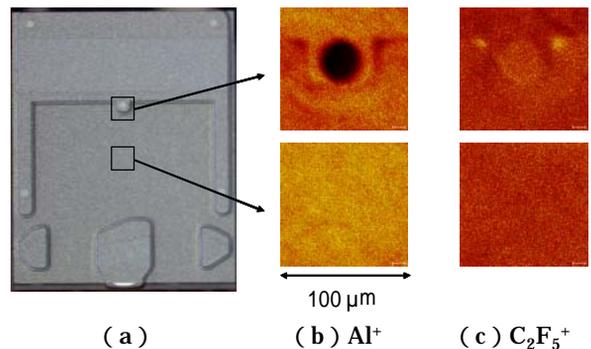


図-7 TOF-SIMSによるABS面のイオンイメージ
Fig.7-TOF-SIMS ion image mapping of head flying surface.

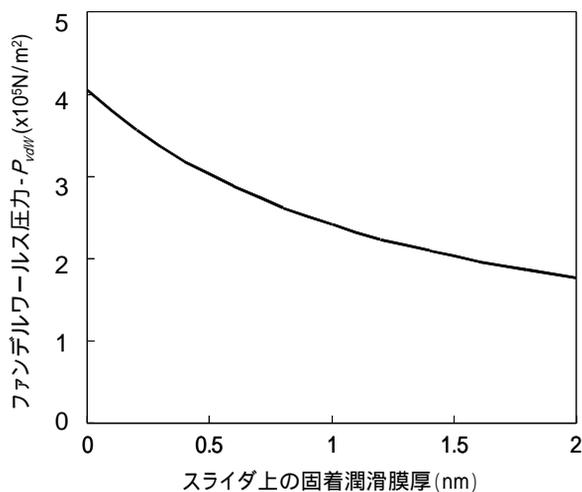


図-8 スライダ上の固着潤滑剤の膜厚とファンデルワールス圧力
Fig.8-Van der Waals pressure versus thickness of lubricant adhered to head.

また、検出される Al^+ と $C_2F_5^+$ のイオンは表面にそれぞれアルミニウム、潤滑剤が存在していることを意味する。したがって、イメージの明るい部分にこれらの存在量が多いことが分かる。図-7 (b) は Al^+ のイオンイメージマッピングを示しており、上段はヘッドのパッド部の領域であり、下段はミリング部分でアルミナチタンカーバイト (AlTiC) の材料から成る領域である。上段で黒くなっている部分は Al^+ が検出されていないことを示しており、DLCから成るパッド部が存在している箇所に対応している。このように、TOF-SIMSの分析により表面に存在する化学種の分布に関する情報が得られる。潤滑剤由来の $C_2F_5^+$ のイオン強度はパッドとミリング部分で同程度であり、ヘッド浮上面全体に潤滑膜が均一に固着していることが分かる { 図-7 (c) }。表面自由エネルギーに関しては、ヘッド浮上面のDLC上の表面自由エネルギーが未処理のときは 40.3 mN/m であったが、潤滑膜が 1 nm の条件では 28.3 mN/m へ低下することが分かった。

ヘッド浮上面上に固着した潤滑膜がヘッド浮上面と媒体表面間の相互作用 (ファンデルワールス力) を減少することを計算により確認した。表面間の相互作用は前述の式 (2) を用いて、単位面積あたりのファンデルワールス力であるファンデルワールス圧力 (P_{vdw}) として求めた。図-8には浮上面とディスク表面が平行であると仮定したときのファンデルワールス圧力の変化をヘッド浮上面の固着潤滑膜の

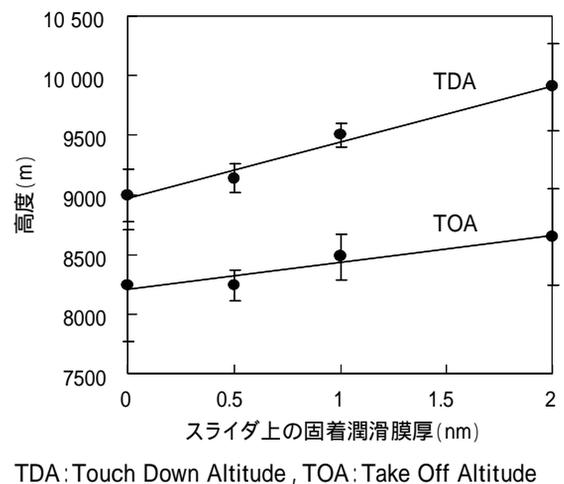


図-9 TDAとTOAの変化
Fig.9-Touchdown and takeoff characteristics obtained from reduced pressure flying tests.

膜厚に対して示した。このとき、浮上隙間 (D) は 3 nm で一定とした。同図より、ヘッド浮上面の固着潤滑膜の増加に伴いファンデルワールス力が減少することが示されており、ヘッド浮上面に固着潤滑膜を設けることにより、ヘッド浮上特性の向上が期待される。

ヘッド浮上面の固着潤滑膜の膜厚を変化させたときのタッチダウン高度 (TDA) とテイクオフ高度 (TOA) を図-9に示す。図中、膜厚 0 nm は未処理 (通常のヘッド) を意味する。前述のようにタッチダウンとテイクオフの高度が高いほど、信頼性が高いと言えるが、浮上高さの観点ではタッチダウンとテイクオフの高度が高いほど、タッチダウン、テイクオフする浮上高さが低くなっている、つまり低浮上で安定していることを意味する。TDAとTOAはともに固着潤滑膜の膜厚が増加するにつれて上昇しており、浮上面に固着した潤滑膜を設け、低表面エネルギー化することが、浮上特性向上に有効であることが分かった。これは図-8でヘッド浮上面の潤滑膜厚とファンデルワールス圧力の関係から分かっており、ヘッド浮上面とディスク間に働くファンデルワールス力の減少によると考えられる。⁽¹¹⁾

む す び

本稿では、HDDの記録密度と信頼性向上を目指し媒体の磁性層とヘッドのスライダ間物理的隙間を安定して減少させる技術として、ナノテクノロジー領

域に入ったHDI技術に対応する三つの技術を紹介した。本技術により、潤滑剤分子を凝集させることなく成膜し、またナノレベルの欠陥を発生させることなく保護膜を薄膜化し、さらに不純物のヘッド移着やファンデルワールス力の影響を抑えて低浮上化の実現が可能となる。本稿で紹介した技術例のように、ナノの世界で現実に行われていることを把握することは重要である。さらに今後は、ヘッドと媒体の磁性層間の物理的隙間を一層減少させるため、ニアコンタクトやコンタクト領域に向けたHDI技術開発が必要となる。このため、HDDの高記録密度化と信頼性を両立するためには、ナノの世界でのHDI技術開発が一層重要度を増すものと考えられる。

参考文献

- (1) R. S. WILLIAMS : Low Energy Ion-Surface Interactions . J. W. Rabalais ed. , Wiley , West Sussex , 1994 , p.15 .
- (2) V. Novotny et al. : Correlation between environmental and electrochemical corrosion of thin film magnetic recording media . *J. Electrochem. Soc.* , Vol.135 , No.12 , p.2931-2938 (1988) .
- (3) L Wu et al. : Effect of the intermolecular forces on the flying attitude of sub-5 nm flying height air bearing sliders in hard disk drives . *Trans. ASME* , Vol.124 , p.562-567 (2002) .
- (4) B. H. Thornton et al. : Head-disk interface dynamic instability due to intermolecular forces . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.39 , p.2420-2422 (2003) .
- (5) J Li et al. : Effects of intermolecular forces on deep sub-10 nm spaced sliders . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.38 , p.2141-2143 (2002) .
- (6) H. Chiba et al. : Effects of vacuum ultraviolet irradiation to lubricant layer on hard-disk media . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.38 , p.2108-2110 (2002) .
- (7) H. Chiba et al. : Improvements of lubricant performance in hard-disk media by vacuum ultraviolet irradiation . *Tribol. Int.* , Vol.36 , p.367-369 (2003) .
- (8) G. H. Vuren et al. : Mechanism of ultraviolet and electron bonding of perfluoropolyethers . *Langmuir* , Vol.8 , p.1165-1169 (1992) .
- (9) T. Yamamoto et al. : Advanced Stiction-Free Slider and DLC Overcoat . *FUJITSU Sci. Tech. J.* , Vol.37 , No.2 , p.201-211 (2001) .
- (10) H. Matsuoka et al. : Generalized approximation of van der Waals force between multilayers (application to analysis of static characterization of a magnetic head slider) . *Trans. Jpn Soc. Mechanical engineers* , 69C , p.2810-2817 (2003) .
- (11) H. Chiba et al. : Chemically Modified Air-Bearing Surface for the Near-Contact Regime . *IEEE Trans. Magn.* , Vol.41 , p.3049-3051 (2005) .