

HDI (ヘッドディスク界面) 技術の進展

宮里 真樹 (みやざと まさき)

永田 徳久 (ながた なるひさ)

熊崎 博文 (くまざき ひろふみ)

1 まえがき

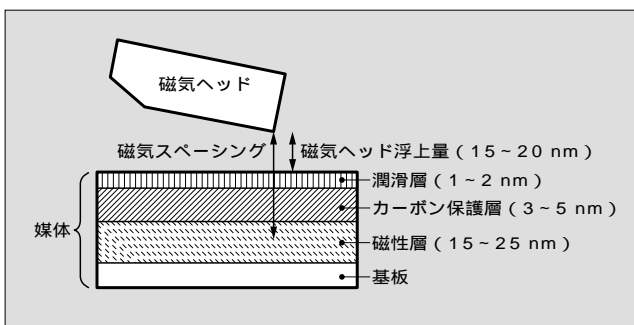
近年、ハードディスク装置 (HDD) の面記録密度は、年率 100% 以上の勢いで上昇し続けている。これに応じて、磁気スペーシング (磁気ヘッド-磁気ディスク媒体磁性層間距離) は減少する傾向があり、近年ではさらなる低減が必要となっている (図 1)。磁気スペーシングの低減を実現するためには、磁気ヘッドの浮上量を低下させるとともに、媒体磁性層の表面を覆っているカーボン保護膜および潤滑剤の膜厚を低減することが不可欠となる。また、磁気ヘッドの浮上量が低下したときに、磁気ヘッドと媒体が接触しないように、媒体の表面粗さや表面うねりを小さくする基板加工技術も重要になってくる。

本稿では、2章および3章にて磁気スペーシングの低減に対して必要となるカーボン保護膜の薄膜化を中心に、4章にて今後の HDI (Head-Disk Interface) 技術の動向について報告する。

2 CVD 保護膜

これまでのカーボン保護膜は、グラファイトターゲットを用いたスパッタリング法によって形成されていた。しかし、膜厚が 10 nm 以下になると、耐久性や耐食性など、保護膜としての機能を十分に果たせなくなっていた。これに対して、CVD (Chemical Vapor Deposition) 法による成

図 1 磁気ヘッドと媒体の断面構造



膜は、原料ガスをプラズマ中で励起・分解し、化学的に反応・結合を行うため、より緻密 (ちみつ) で被覆性に優れた膜が形成されると期待できる。

現在、磁気ディスク用保護膜形成手法として確立したホローカソード (HC: Hollow Cathode) 型 CVD 法に関して、その成膜法とカーボン膜質を以下に報告する。

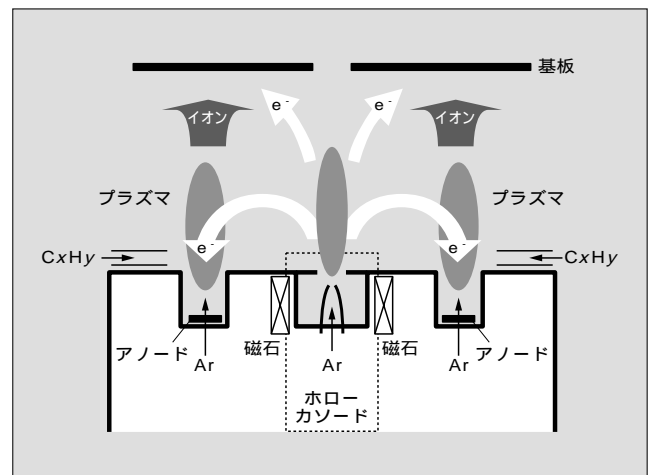
2.1 HC 方式 CVD 成膜法

HC 方式によるイオン源は、環状のアノード領域、円筒状の HC 電子源、プラズマの増強と閉じ込めを行うための磁気回路から構成されている。概念図を図 2 に示す。

まず、HC の放電によって電子を供給し、発生した電子が正に印加したアノードに引き付けられ、アノード電極へ向かう。そのときに、加速された電子が導入されたガスと衝突し、プラズマを発生させる。磁場は一時的に電子をトラップすることで、イオン化を促進し、プラズマ密度を増加させる。

プラズマ中の正イオンは、正に印加されたアノードからの反発力によって基板方向へ加速される。さらに、正イオンは途中で電子によって中和され、基板に到達し膜を形成する。

図 2 HC 方式イオンソースの概念図



宮里 真樹

磁気記録媒体のカーボン保護膜の開発に従事。現在、富士電機ストレージデバイス(株)第一開発部グループリーダー。



永田 徳久

材料・デバイスの研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所材料技術研究所。応用物理学会会員、日本セラミックス協会会員。



熊崎 博文

磁気記録媒体のトライボロジー開発設計技術に従事。現在、富士電機ストレージデバイス(株)第一開発部。

HC 放電の特徴として、

- (1) 電子の供給源として、フィラメントを用いていないため、フィラメントの劣化・破損によるメンテナンスが不要であること
 - (2) 高いイオンビーム電流を流せるため、高い成膜速度が可能であること
 - (3) 低圧成膜が可能であり、高密度（高硬度）を有する膜が作製できること
 - (4) 基板バイアスを必要としないため、絶縁基板への成膜が可能であること
- などが挙げられる。

2.2 HC 方式 CVD 膜の特性

カーボン保護膜の耐久性評価法として、HDD の起動・停止時に磁気ヘッドと媒体が必然的に接触する CSS (Contact Start Stop) 方式や今後広く実用化されるといわれているランプロード方式がある。CVD カーボンの耐久性を CSS 方式にて行ったところ、スパッタ膜では実現できなかったカーボン膜厚 3 ~ 5 nm での耐久性 (10万回) をクリアすることができた。

耐食性評価法の一つとして、希硝酸 (HNO₃) 液中に媒体を浸漬し、その溶液を ICP (Inductively Coupled Plasma) 法によって測定し、Co 析出量を測定する方法がある。

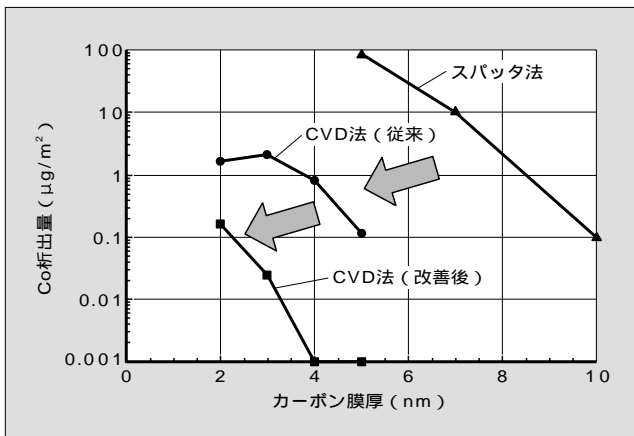
その結果を図 3 に示す。スパッタカーボン保護膜の場合、膜厚 10 nm において Co 析出量が 0.1 μg/m² であったのに対し、CVD カーボン保護膜では、膜厚 5 nm において同等の耐食性を示している。さらに、膜厚分布や成膜プロセスを改善し、カーボン膜の密度や表面のカパリングを向上させることによって、膜厚 2 ~ 3 nm においても同等の耐食性を持った保護膜を成膜することができた。

2.3 長期生産安定性の実現

CVD 成膜法を量産装置へ適用する際の問題点として、

- (1) 連続稼動時における装置の安定性
- (2) 連続稼動によるパーティクルの発生
- (3) 高タクト成膜による制御性の難しさ
- (4) 両面同時成膜の難しさ

図 3 Co 析出量のカーボン膜厚依存性



などが挙げられている。この問題を解決するために、成膜プロセスの最適化、イオンソースの絶縁強化などを行うことによって、生産性を損なうことなく、品質の長期安定性を確保することができた。

③ 次世代カーボン保護膜

今後、1 ~ 2年のうちには面記録密度は 100 G ビット/in² を超えると予想され、このとき保護膜厚は 2 nm 以下が要求される。これに対応するためには薄膜でも耐久性・耐食性に優れた次世代の保護膜技術が必要となる。

3.1 ta-C 膜

2 nm という非常に薄い保護膜厚においても、耐久性・耐食性に優れているためには、プラズマ CVD 法で形成される a-C : H よりもさらに緻密で硬い膜であることが必要と考えられる。これに対応する保護膜材料として ta-C (tetrahedral amorphous Carbon) が注目されている。

図 4 にカーボン膜の相図を示す⁽¹⁾。各頂点はそれぞれダイヤモンド、グラファイト、水素に対応している。この図に示されているように、ta-C は水素を含まず sp³ 結合炭素に富んだ膜である。このためダイヤモンドに似て非常に緻密で硬い。また、アモルファスであることから表面平滑性に優れている。

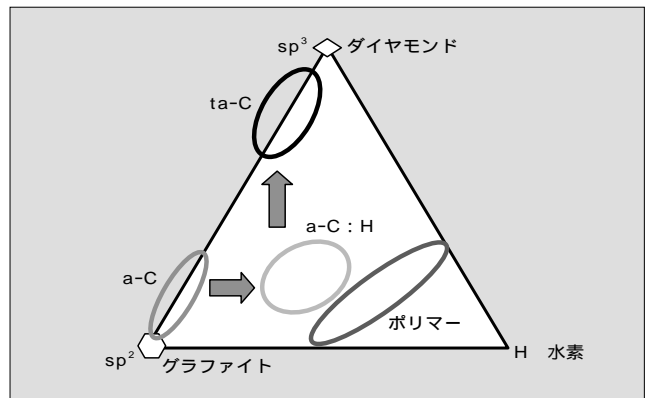
ta-C 膜の媒体保護膜への適用を目指し、開発を行っている⁽²⁾。

3.2 FCA 法

ta-C 膜の形成には FCA (Filtered Cathodic Arc) 法を用いている。この方法はアーク放電を用いた真空蒸着法の一つである。

図 5 に FCA 装置の概念図を示す。アーク源のカソードターゲットにはグラファイトを用いている。ここでアーク放電によってカーボンアークプラズマが形成される。形成されたカーボンアークプラズマは、90° に湾曲した磁気フィルタの磁場により誘導され、成膜基板まで到達する。アーク放電において、カソードターゲットからカーボンイオンのほかに中性原子やカーボン微粒子も同時に発生する。

図 4 カーボン膜の相図



しかし、これらは磁場により誘導されない。このためカーボンイオンおよび電子のみが磁気フィルタによって取り出される。このカーボンイオンのみによって形成された膜は、サブランテーション効果⁽³⁾によって、sp³結合炭素に富んだ ta-C 膜になると考えられている。

この FCA 装置を用いて形成した ta-C 膜の膜質特性について調べるため、以下のような測定・評価を行った。

3.3 ta-C 膜の形成と膜質評価

ta-C 膜の硬さの基板バイアス電圧依存性、および硬さと sp³ 結合炭素比の関係について評価した。

カソードターゲットには純度 99.999% のグラファイトを用い、アーク電流は 120 A とした。磁気フィルタの磁場は約 0.01 T とした。また、基板バイアス電圧は -600 V から +200V の範囲とした。

硬さはナノインデンテーション法により測定した。また sp³ 結合炭素比は、XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) 測定の C_{1s} ピークを sp³ 結合炭素成分と sp² 結合炭素成分とにピーク分離することにより求めた。

図 6 に硬さの基板バイアス電圧依存性を示す。基板に正バイアスを印加した場合には膜が形成されなかったため、負バイアスの領域のみを示している。約 70 V の負基板バ

図 5 FCA 装置の概念図

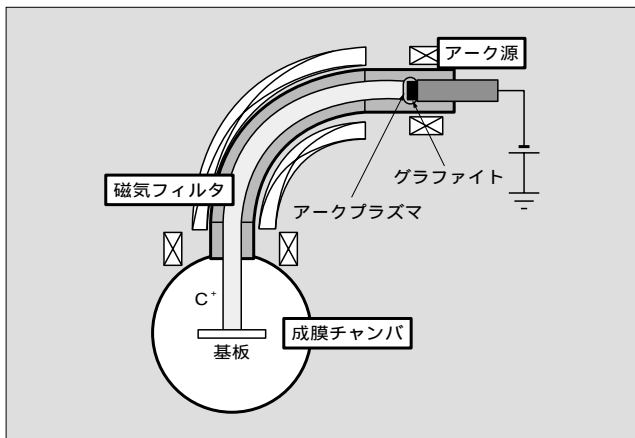
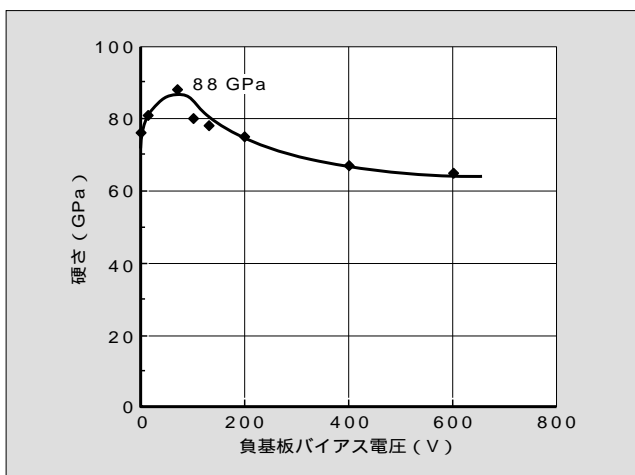


図 6 ta-C 膜の硬さの基板バイアス電圧依存性



イアス電圧の印加により硬さは極大となり、約 90 GPa と非常に大きな値が得られた。また、バイアスなしの場合でも約 80 GPa と比較的大きい値を示した。これは絶縁性の基板においても、良質の保護膜を形成できる可能性を示している。正バイアスで膜が形成されないことから、中性原子は基板まで到達していないことも分かった。

図 7 には硬さと sp³ 結合炭素比の関係を示す。ここで比較のため、従来の DC マグネトロンスパッタ法により形成した a-C (amorphous Carbon) 膜の結果も合わせてプロットしている。基板バイアス電圧の最適化により、硬さと sp³ 結合炭素比がいずれもスパッタ a-C 膜の約 3 倍の大きさとなる ta-C 膜を得ることができた。また、カーボン膜の硬さは sp³ 結合炭素比とともに増加することが分かった。このことから、負基板バイアス電圧が約 70 V で最も四面体構造が増え、三次元的な剛性が強くなっているものと考えられる。

FCA 法により形成した ta-C 膜は、非常に高い sp³ 結合炭素比を有し、そのため非常に硬い膜になっていることが確かめられた。

以上のことから、ta-C 膜は次世代の媒体保護膜として有望であると考えられる。今後は保護膜特性の評価を行い、実媒体への適用を進めていく予定である。

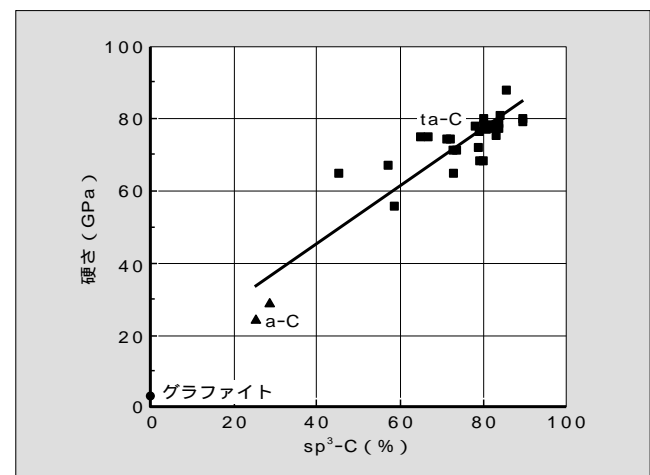
4 低浮上 HDI に対する信頼性設計

記録密度向上のため磁気ヘッド浮上量は年々低下し続け、現在ではおよそ 10 ~ 15 nm である。それに伴い、媒体最表面に位置する潤滑層が全体特性に与える影響は従来以上に大きなものになってきている。ここでは主にヘッドしゅう動時の潤滑剤挙動および潤滑剤がヘッド浮上に与える影響について述べる。

4.1 しゅう動時の潤滑剤挙動

現在のデスクトップ用およびサーバ用 HDD では CSS 方式が依然主流であり、そこで用いられるヘッドの多くは摩擦低減を目的としたパッドと呼ばれる突起が付いたタイ

図 7 カーボン膜の硬さと sp³ 結合炭素比の関係



ブである。媒体耐久性確保に加えてパッドの摩耗をも抑える必要性から、媒体に対する要求はますます厳しいものになってきている。潤滑層としては主に、

- (1) ヘッドの接触・しゅう動による潤滑剤の減量・損失を抑えること(自己保持機能)
- (2) 減量した部分に流動してその部分の被覆を高め、摩耗を防ぐこと(修復機能)

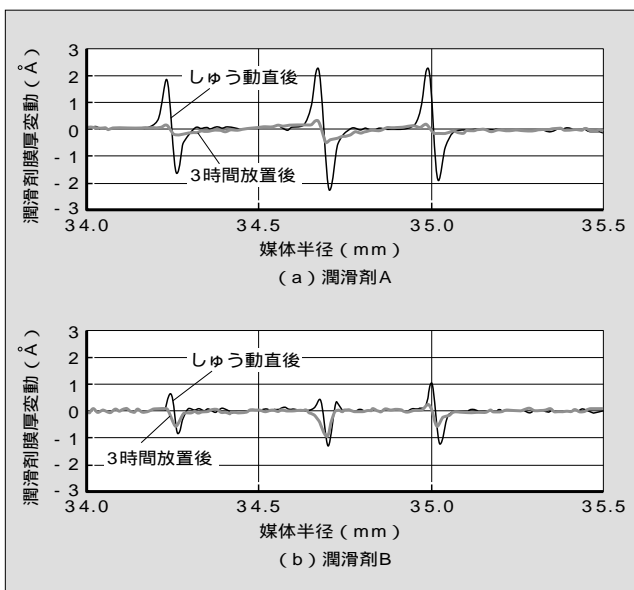
という二つの機能が求められる。自己保持機能はディスク回転時の遠心力・空気せん断力による潤滑剤散逸(スピノフ)を防ぐうえでも重要である。

図8はパッド付きタイプのヘッドで10分間しゅう動させた直後、およびそれから3時間放置した後の潤滑剤膜厚変動(半径方向断面)をOSA(Optical Surface Analyzer)によって測定したものである。パッド部分の潤滑剤がしゅう動時の接触圧力によって減量し、横方向に移動している様子が分かる。潤滑剤Aは自己保持機能に優れており、膜厚変動量は小さいが流動性に劣る。一方、潤滑剤Bでは変動量大きいものの修復は速やかである。このように自己保持機能と修復機能はトレードオフの関係にあると考えられ、両者のバランスをいかに取るかが耐摩耗性、耐久性確保の鍵になっている。富士電機では分子量分布の最適化などを行うとともにHDI方式(CSS/ランプロード)やHDDの種類(デスクトップ機種、高回転サーバ機種など)によって最適な潤滑層設計を実施することで信頼性を確保している。

4.2 浮上特性に対する潤滑剤の影響

ヘッド浮上量が比較的高い世代においては、ヘッド浮上特性(浮き上がり周速や浮上安定性)を決定づけていたのは主に表面粗さ、うねり、レーザバンプ高さなどのトポグラフィ因子であった。その重要性に変わりはないものの、

図8 しゅう動による潤滑層膜厚変動と修復効果



低浮上領域ではさらに加えて潤滑剤材料や膜厚が浮上特性に大きく影響するようになってきている。図9はレーザバンプ上を浮上しているときのヘッド振動をAE(Acoustic Emission)により測定したものである。両潤滑剤とも膜厚増加とともにAE出力が大きくなり、浮上特性が悪化する。レーザバンプ上ではデータゾーンに比べて磁気ヘッド-媒体表面間のスペーシングが狭いため、差異が顕著に現れる。潤滑剤材料による違いも大きく、良好な浮上特性を得るには材料選択や膜厚設計が重要であることを示している。

図10には、潤滑剤材料および膜厚は同一であるが、保護膜質や潤滑剤塗布後の表面処理方法が異なる3種類の媒体のデータゾーン浮上特性(経時安定性)を示す。保護膜表面の改質や、塗布後の後工程によっても特性をかなり改善することが可能であり、それらの技術は現在量産中の機種に適用されている。保護膜表面エネルギーによって潤滑剤分子の付着形態や配向に違いがあること、適切な後処理による潤滑層表面の平滑性向上などが特性の違いに効いているものと考えられる。

4.3 次世代HDI方式への対応

磁気ヘッド浮上量がさらに低下し、10nmを切るような

図9 浮上安定性の潤滑剤依存性

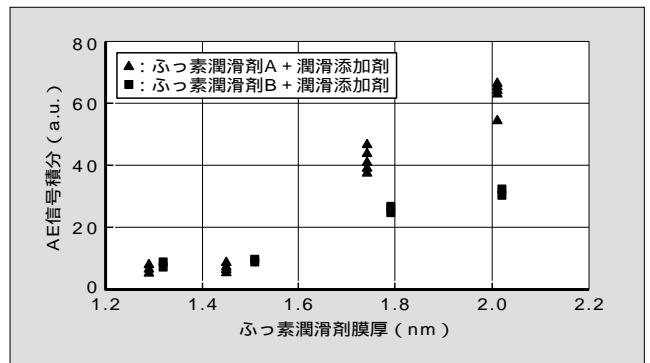
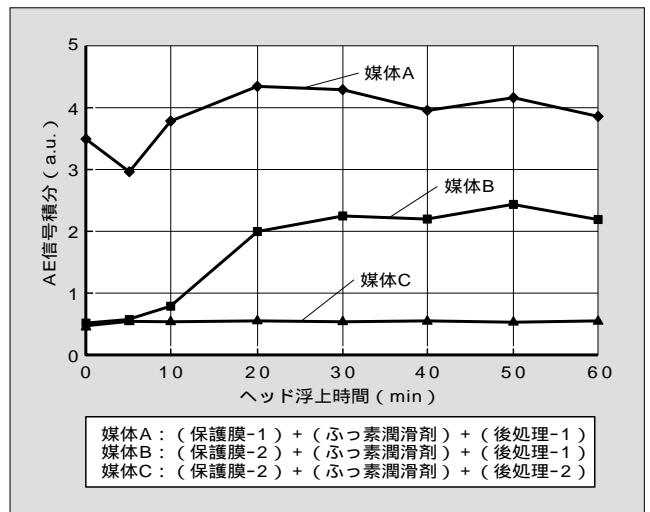


図10 保護膜質および後処理による浮上特性改善



領域ではデータゾーンにおいても間欠的接触が不可避となり、いわゆる擬似コンタクトと呼ばれる状態になる。そこではこれまで述べてきたスペーシング安定性と摩耗耐久性の両立がさらに困難になるものと予想される。富士電機では、

- (1) レーザドップラー振動計などを用いた詳細な HDI 解析技術
- (2) シミュレーションを併用した設計技術の高度化などを現在推進中である。

㊦ あとがき

HDI 技術の一例として、カーボン保護膜の成膜技術と次世代の HDI 技術を紹介した。HDI 技術は多くの技術分野がかかわる総合技術である。今後の HDD の信頼性確保

のために、その重要性を認識し、新しい技術開発に取り組む所存である。

参考文献

- (1) Ferrari, A. C. et al. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. Phys. Rev. B 61, 2000, p.14095.
- (2) 永田徳久ほか. FCA 法により合成した ta-C 膜の特性. 応用物理学関係連合講演会. 春季, 2001, 30p-YH-5.
- (3) Lifshitz, Y. et al. Subplantation Model for Film Growth from Hyperthermal Species: Application to Diamond. Phys. Rev. Lett. vol.62, 1989, p.1290.
- (4) 金暢大ほか. 窒素プラズマ処理保護膜上の高ボンド率潤滑剤の付着形態と配向. トライボロジー会議予稿集. 2001-11, p.189.

