

フォトリソテクスチャ磁気ディスクにおける 摩擦力増加に関する一考察*

稲田明弘^{*1}, 石原弘久^{*2}, 榎田正美^{*3}

Investigation on Increase of Friction Force in Magnetic Disks with Photo Lithography Texture

Akihiro INADA, Hirohisa ISHIHARA and Masami MASUDA

Friction force between magnetic disks and magnetic heads occasionally increases to cause a hard disk drive (HDD) to lock. In this paper, we discuss the friction mechanism at the interface between magnetic heads and magnetic disks, which are covered by the texture surface produced on a photo lithography process. The texture surface is homogeneously dispersed with micro lands, 3 μm in diameter and 35 nm high, with a uniform pitch. Atomic force microscope (AFM) and Auger electron spectroscopy (AES) analyses make it clear that friction force increases abruptly at a land height below approximately 24 nm, and also the land height decreases not with growing wear of the top film in micro lands but with plastic subsidence of micro lands by fatigue during contact start stop (CSS) tests and continuous sliding tests. As a result, in order to reduce the subsidence of micro lands and improve the sliding durability of the disks, the second layer below carbon protection film is hardened to the same as that on the top film.

Key Words: Hard Disk Drive, Tribology, Friction, Photo Lithography, CSS Test, Magnetic Disk, Magnetic Head, Texture Surface

1. 緒 言

磁気ディスク装置 (HDD) の高密度記録化の要求に対し、磁気ディスクにおけるレーザゾーンテクスチャ、保護膜材料、表面改質、潤滑剤設計などの研究が盛んである。しかし一方で、磁気ディスク・磁気ヘッド間の予期せぬしゅう動異常に見舞われることも多く HDD の信頼性低下を来している。

このため、レーザゾーンテクスチャをもった磁気ディスクにおいては、テクスチャの形成技術⁽¹⁾⁽²⁾ やテクスチャ形状とトライボロジー性能に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾、とりわけ磁気ディスク・磁気ヘッド間のインタフェースにおける優れた耐吸着・摩擦特性、および信頼性を得ている報告が多い。しかし、この磁気ディスクでは、レーザの熱エネルギーによる外形を拘束しない突起形成法のため、しゅう動特性に直接関与する微細凹凸の接触頂部の形状が、必ずしも高精度に形成されている

とはいえない。

これに対し、田中ら⁽⁵⁾ はフォトリソグラフィプロセスを用いて、ピットおよび高さの均一な微細凹凸が一樣に分布したテクスチャ形状をもつ磁気ディスク (以下: フォトリソディスクと略す) を試作し、CSS 試験における接触頂部の摩擦量の推移を報告している。また著者らも、多結晶 Mn-Zn フェライトおよび Al₂O₃-TiC の磁気ヘッドスライダ材料に対し、優れた CSS 性能を有するフォトリソディスクを提案⁽⁶⁾ するとともに、カーボン保護膜の接触頂部の表面粗さが増加する、いわゆるモルフォロジレベルの摩擦現象としゅう動抵抗の増加現象とに相関があることを明らかにしている⁽⁷⁾。しかしいずれの研究においても、磁気ディスク・磁気ヘッド間のしゅう動抵抗増大のメカニズムや、磁気ディスク表面のマイクロ摩擦を解明するまでには至っていない。

本報では、上記と同様の製法によるフォトリソディスクを用いて、しゅう動試験を行い、しゅう動抵抗増大の原因を究明するとともに、その対応策を明らかにする。

2. 実験方法および実験条件

2.1 フォトリソディスクと磁気ヘッド 実験に

* 原稿受付 1998年5月8日。

^{*1} 正員, アルプス電気(株)ペリフェラル事業部 (☎970-1143 いわき市好間町小谷作字作畑39-1)。

^{*2} アルプス電気(株)磁気応用事業部 (☎940-0006 長岡市東高見1-3-5)。

^{*3} 正員, 新潟大学大学院自然科学研究科 (☎950-2102 新潟市五十嵐二の町8050)。

E-mail: inada@seagreen.ocn.ne.jp

用いた磁気ディスクは、フォトリソグラフィプロセスにより、NiP 基板表面に無数の微小なランドを形成し、その上にスパッタ装置により、Cr 下地膜、Co-Cr-Ta 磁性膜、およびカーボン保護膜を積層したフォトリソディスクである。その断面構成を図1に示す。表層には、直径 $3\mu\text{m}$ × 高さ 35nm のランドを、表1に示す4種のピッチで一様分布させている。

実験に供した磁気ヘッドは、長さ 2.5mm × 幅 0.38mm のスライダレール2本を両側にもつ3レール形状の多結晶 Mn-Zn フェライト製で、磁気ディスクへの押しつけばね荷重は 64mN であり、磁気ディスク静止時にランドにかかる平均面圧も表1に示した。なお磁気ディスク定常回転時の浮上高さは 100nm である。

2.2 しゅう動試験 一定速度で連続しゅう動させる連続しゅう動試験では、磁気ヘッド・ジンバルアセンブリを固定するバネ固定台にひずみゲージを貼り、磁気ヘッドに作用するしゅう動方向の摩擦力を測定している。

一方、断続的にしゅう動させる CSS 試験には、市販の HDD を使用し、スピンドルモータの駆動電流から磁気ディスクの起動トルクを計測している。磁気ヘッドの摩擦力は慣性法により求めた。評価位置はディスク半径 20mm 、定常回転時の最大周速は 6.7m/s 、ディスク回転起動時から磁気ヘッド浮上開始までの時間

は 0.65s 、この間に1個のランド上を通過する磁気ヘッドスライダのしゅう動距離は 6.5mm である。

2.3 ランド高さの測定 しゅう動試験前後のランド高さを AFM (Digital Instrument 製, Nanoscope II) を用いて測定している。またランド部の多層薄膜の膜厚を、AES 分光分析装置 (日本真空技術製, SAM-3500) を用いて、 $\phi 0.5\mu\text{m}$ のビームにより、表2に示す条件で測定している。なおこの装置によるフォトリソディスクのカーボン保護膜の隣接3箇所のスパッタ時間は、平均値に対し $+4.2\%$ (1.5nm)、 -3.7% (1.3nm) の精度であった。

2.4 多層薄膜の硬さ測定 薄膜硬度計 (NEC 製, MHA 400) を用い、対稜角 80° の三角すい形状圧子をディスク表面の多層薄膜に押し込み、押し込み荷重をそのとき侵入した圧子投影面積で除して、微小硬さとしている。この装置の押し込み荷重の検出分解能は $0.98 \times 10^{-3}\text{mN}$ 、圧子押し込み方向の変位のそれは 4nm であり、押し込み速度は 5.4nm/s である。本実験条件では微小硬さ 40GPa は約 HV 1000 相当である。

3. 実験結果と考察

3.1 連続しゅう動試験 CSS 試験では1サイクル 21 秒間中のしゅう動時間は 6.2% にすぎず、しゅう動特性評価に長時間が必要になる。このためここでは、磁気ヘッドが浮上するまでの間で摩擦力が安定し、磁気ヘッドの浮上姿勢のこう配が小さい周速 0.2m/s で連続しゅう動させる試験を行っている。図2に両者の連続しゅう動パターンとしゅう動距離を対比して示す。

図3に、ランド比 (すなわちランド面積の全体に占める割合) $0.01\sim 1.0\%$ のフォトリソディスクに対する連続しゅう動試験結果を示す。特に、潤滑剤 PFPE (Perfluoropolyether) を 1.5nm 塗布したランド比 0.5% 、 1.0% のフォトリソディスクを用いた連続しゅう動試験では、しゅう動距離 230m (17.5h) に至っても摩擦力の変化は認められなかったため、潤滑剤を

Table 1 Land shape parameters on photolithography disk

	Disk 1	Disk 2	Disk 3	Disk 4
Land ratio (%)	0.01	0.1	0.5	1.0
Land interval (μm)	226	84	38	27
Land density per ABS (pcs)	27	270	1350	2700
Land height (nm)	35	35	35	35
Land diameter (μm)	$\phi 3$	$\phi 3$	$\phi 3$	$\phi 3$
Normal pressure on a land (MPa)	335	33.5	6.70	3.35

*1. Land ratio=land area/whole area
*2. ABS=area of air bearing surface

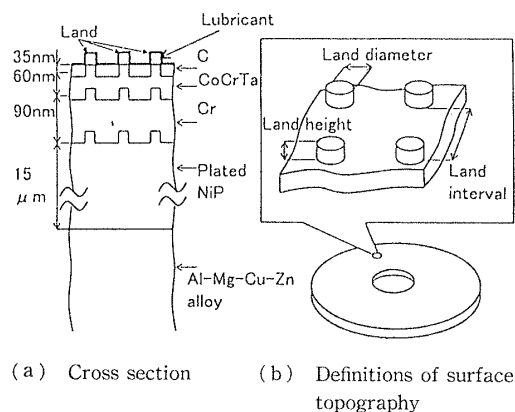


Fig. 1 Schema of photolithography disk

Table 2 Measuring conditions in AES analysis

	Exp.1	Exp.2
EB acceleration voltage (kV)	8	5
EB current (nA)	2	20
EB diameter (nm)	500	200
Tilt angle of specimen (deg)	45	45
Ar beam acceleration voltage (kV)	2	2
Ar beam current (μA)	-	1
Laster size (mm)	2×2	2×3
Ion incident angle (deg)	45	45
Sputtering rate (nm/min) (as SiO ₂ conversion)	4.0	6.5

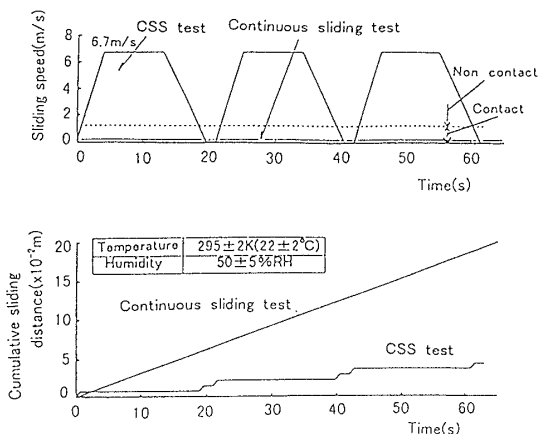


Fig. 2 Comparison of cumulative sliding distance between continuous sliding test and CSS test

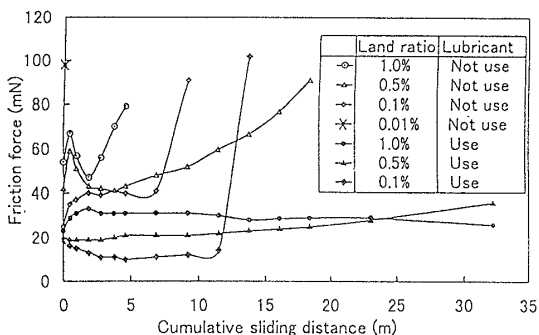


Fig. 3 Influence of cumulative sliding distance upon friction force

塗布しない無潤滑のフォトリソディスクの連続しゅう動試験結果も対比して示す。この図から

①ランド比0.1%のフォトリソディスクを用いた連続しゅう動試験では、極めて短いしゅう動時間（CSS試験結果の約1/6）で、CSS試験時と類似の摩擦力上昇傾向をたどること⁽⁸⁾、

②無潤滑のランド比0.5%、1.0%のフォトリソディスクでは、いずれも初期の摩擦力が大きいだけでなく、さらにしゅう動距離0.23 mまで上昇した後、摩擦力が減少に転じ、その後再び急上昇する傾向をたどることがわかる。

②の摩擦力が初期の短時間間に上昇→下降傾向をたどる原因としては、無潤滑のため、ランド頂部のカーボン保護膜が摩耗し、その摩耗粉による固体潤滑作用が考えられる。

なおヘルツの接触理論によれば、完全弾性接触の場合、真実接触面積 A_r は垂直荷重の $2/3$ 乗に比例する。したがって、真実接触部における材料のせん断応力 τ を均一と仮定すると、摩擦力の総和はランド比の $1/3$ 乗に比例することが導かれる。ランド比0.1%のフォ

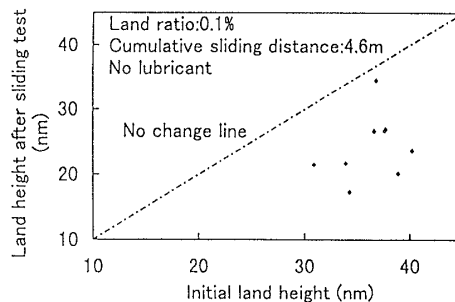


Fig. 4 Relation between initial land height and land height after continuous sliding test

トリソディスクにおけるしゅう動試験開始時点の最大摩擦力を基準として上記の関係式より求めたランド比0.01%、0.5%、1.0%における摩擦力と実験値の比は0.12、1.01、0.99となりランド比0.01%以外はよい一致を示しており、よって試験開始時点では完全弾性接触にあるといえる。これに対し、0.01%フォトリソディスクでは、ランド比が小さすぎるため、塑性変形領域の接触状態にあるといえる。

3・2 連続しゅう動試験におけるランド高さの変化

3・1節において、ランド比0.1%フォトリソディスクに対して、無潤滑の連続しゅう動試験における摩擦力の変化は、CSS試験における摩擦力変化と類似の傾向をたどることがわかったので、以下ではこの無潤滑のフォトリソディスクを用いて、摩擦力上昇のメカニズムについて実験検討を行っている。

図4に、しゅう動距離4.6 mのしゅう動試験後のランド高さをAFMを用いて測定し、しゅう動前のランド高さに対比して示す。この図から、未しゅう動部のランド高さが平均36.5 nm（最大41.2 nm、最小30.9 nm）であるのに対し、しゅう動部のランド高さは平均24.3 nm（最大34.4 nm、最小17.3 nm）であり、連続しゅう動試験によりランド高さが平均12.2 nm減少している。

このランド高さ低減の原因を明らかにするために、上述のランド比0.1%のフォトリソディスクのしゅう動部および未しゅう動部のランド頂部を、AES分光分析装置を用いて Ar^+ スパッタリングし、このときの多層膜の各層をエッチング除去するに要した時間から各膜厚を算出した。ここでカーボンのAES遷移確率が50%に低減したポイントを、カーボン保護膜のスパッタリング時間と定義した。図5には、しゅう動距離4.6 mの連続しゅう動試験前後のそれぞれ3箇所（ただし、Cr下地膜は2箇所）におけるカーボン保護膜、磁性膜およびCr下地膜のスパッタリング時間と、各膜厚の変化率を示す。

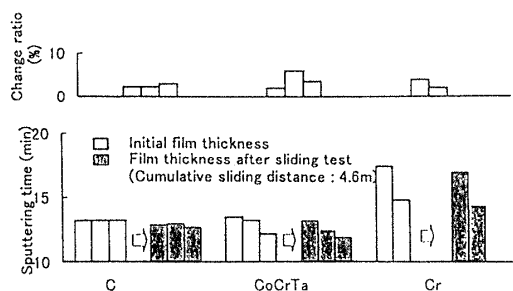


Fig. 5 The change of thin film thickness in continuous sliding test

この図において、連続しゅう動試験による膜厚変化の平均値は、カーボン保護膜：-2.6%、磁性膜：-3.5%、Cr 下地膜：-3.3%である。このことから、しゅう動による摩擦が最大であろうと予測された最表層のカーボン保護膜においても、他の2層の膜厚変化と大差が認められず、カーボン保護膜の摩擦は無視できるレベルにある。

ちなみに、カーボン保護膜における膜厚変化率2.6%は、0.78 nmの膜厚ばらつきに相当する。なお半径20 mmにおける円周方向16箇所に対しそれぞれ3回計測したところ、カーボン保護膜の膜厚ばらつきは、1.4% (0.4 nm) と小さく無視しうる値であった。

以上のことから、無潤滑のランド比0.1%のフォトリソディスクにおいて、連続しゅう動試験の開始時点では完全弾性接触状態であるが、試験の初期段階でランド頂部のカーボン保護膜の表面粗さレベルの摩擦による接触面積の増大が摩擦力を初期の約2倍まで増加させた。この増大した摩擦力による繰返し応力がマイクロな疲労現象を生じさせ、その結果、多層薄膜の降伏応力よりも下まわる応力レベルでランド周辺底部が塑性変形したと考えられる⁹⁾。「ランド部の塑性変形については付録を参照せよ」

3・3 CSS 試験における摩擦力上昇メカニズム

HDD が起動し、磁気ディスクの回転数が増加していくとき、しゅう動速度が0.2 m/sから0.6 m/sの領域においては、摩擦力は約5 mNを示す。0.6 m/sを超えると磁気ヘッドが浮上しはじめ、摩擦力は急激に減少していく。磁気ヘッドバネに取付けたAEセンサの衝突信号によれば、この摩擦力の減少とともに衝突信号も減少してゆき、さらにしゅう動速度が増すと、衝突信号が消滅して完全に浮上すること、また磁気ディスクの回転数は一定加速度で制御しており、磁気ヘッドが完全浮上し始めるしゅう動速度は、1.1 m/sと確認された。

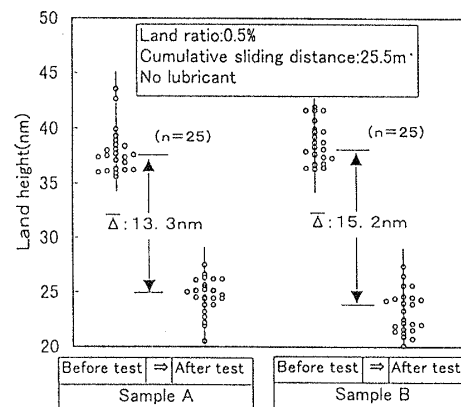


Fig. 6 Land height change through CSS test

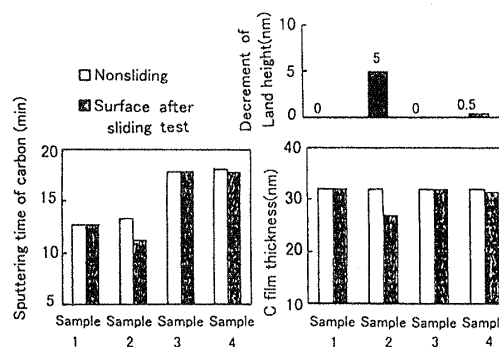


Fig. 7 Wear on lands measured with AES

なお3・2節で、ランド比0.1%のフォトリソディスクでは、ランド部が塑性変形し、しゅう動異常を来すことが明らかになったので、より接触面圧の小さなランド比0.5%の無潤滑のフォトリソディスクを用いて、CSS試験を行った。それによれば、CSS試験を続行すると、しゅう動距離25.5 m近傍から摩擦力が急増し始めていた。この25.5 mしゅう動後のランド高さをAFMを用いて測定し、CSS試験前のランド高さに対比させた25個のデータを図6に示す。この図より、CSS試験により2個の試料におけるランド高さが、それぞれ13.3 nm, 15.2 nm減少していることがわかる。

次に、AES分光分析装置を用いて、このディスクのカーボン保護膜の膜厚を測定した結果を、図7に示す。このときのカーボン保護膜のスputterレート1.8 nm/minから換算すると、カーボン保護膜は同一条件での4回のCSS試験において、それぞれ0, 5, 0, 0.5 nm摩擦していた。このうち最大の5 nmの摩擦量であっても、しゅう動距離25.5 mのCSS試験後のランド高さ減少量13~15 nmの35%程度にすぎず、カーボン保護膜の摩擦がこのランド高さ低減の主原因とはいえない。すなわちランド比0.5%の無潤滑フォトリソディスクのCSS試験におけるランド高さの低減は、

繰返し荷重による疲労等に起因したランドの陥没による塑性変形が主要因といえる。

なおランド高さが、連続しゅう動試験では 24.3 nm, CSS 試験では 23.7 nm といった値に減少したときに摩擦力が急増する原因として、ファンデルワールス力や、しゅう動表面への吸着水等によるメニスカス力/ビスカス力などがあげられる。このうちファンデルワールス力は無視できるレベルと試算される。一方、相対湿度 50% のもとで行った上記の両試験では、大坪の研究⁽¹⁰⁾ から、臨界ランド高さの 1/2 程度の間隔においても吸着水膜が形成されることが予測され、これによるメニスカス力の影響は無視しえない。ここで臨界ランド高さ 24 nm は、このうちランド底部における 3~5 nm 程度のうねりや、ランドの陥没による周辺のランド底部の盛り上がり量を勘案すると、実質的には 20 nm 以下 (例えば 15 nm 程度) を意味しており、メニスカス力に起因して摩擦力が急増し、しゅう動異常を来しているといえる。

なおランド比が 0.1% と 0.5% のフォトリソディスクにおいて、しゅう動異常を来すランド高さに大差がないところから、押しつけばね荷重によるランドの弾性変形の影響は無視できるといえる。

3・4 多層薄膜の微小硬さとランド高さの変化

ランドが陥没等の塑性変形を生じた原因として、

- ① カーボン保護膜の下地層が軟弱なこと、
- ② 摩擦力 (繰返しせん断応力) による塑性ひずみの発生

による塑性変形が挙げられる。ここでは薄膜硬度計を用いて、磁気ディスクの多層薄膜の表面に圧子を押し込み、押し込み荷重と変形量の関係を測定した。その結果を図 8 に示す。なお、多層薄膜の微小硬さの評価においては、圧子先端部が評価対象の薄膜をある程度押し込んだ状態で硬さ特性が現れる。カーボン保護膜

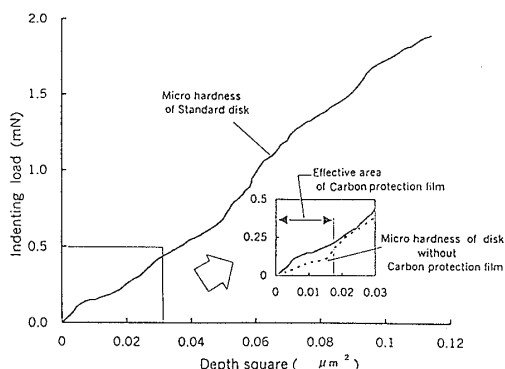


Fig. 8 Correlation between indenting load and depth square

の有無による押し込み荷重-変形曲線の差異から得られたカーボン保護膜と下地層の境界領域も図 8 に示した。

この図より、

- ① カーボン保護膜・下地層間の境界領域において、傾斜が不連続になること、
- ② このため、カーボン保護膜の下地層の微小硬さを高めるなどの膜質改善により、しゅう動試験におけるランド高さ低減を抑制できる可能性があること、等がわかる。

そこで、カーボン保護膜の下地層の微小硬さとしゅう動性能との相関を把握するため、磁気ディスク基板上に、膜の構成は同じで成膜条件の異なる試料を作成した。表 3 に 4 種のカーボン保護膜の成膜条件を示した。これらの評価試料の特徴は以下のとおりである。

(a) 試料 A: インライン式の連続スパッタ装置を用い、ほぼ標準的な成膜条件 (磁性膜の成膜条件: パワー: 2.0 kW, Ar 流量: 6 SCCM, ターゲット電圧: 500 V, 基板温度: 453 K) で多層薄膜を連続成膜。カーボン膜厚: 38 nm

(b) 試料 B: 耐摩耗性に優れた硬いカーボン保護膜を得る目的で、バッチ式スパッタ装置を用いて基板に DC バイアスを印加しながらカーボンを成膜。カーボン膜厚: 44 nm

(c) 試料 C: バッチ式スパッタ装置を用いて、水素アシストガスを添加。基板に DC バイアスを印加しながら多層薄膜を成膜。カーボン膜厚: 35 nm

(d) 試料 D: インライン式の連続スパッタ装置を用いて、下地膜、磁性膜を連続成膜後、大気中に取り出し、バッチ式スパッタ装置にて水素アシストガスを添加しながらカーボン成膜。カーボン膜厚: 47 nm

シリコン基板上に上記 4 種の成膜条件で成膜したカーボン膜の微小硬さを図 9 に、また各磁気ディスクの多層薄膜の微小硬さとカーボン保護膜と下地層との境界領域、連続しゅう動試験、およびそのときのランド高さ減少量をそれぞれ図 10~12 に示した。図 10 において、4 個のデータの原点は等間隔でシフトして図示してある。これらの図より

- (1) カーボン保護膜と下地層との境界領域での微

Table 3 Sputtering conditions of carbon protection film

Disk sample	A	B	C	D
Ar assist gas (SCCM)	6	33	17	17
H ₂ assist gas (SCCM)	0	0	5	2
Concentration of H ₂ gas (%)	0	0	23	10
Pressure (Pa)	0	2.4	1.5	1.3
DC bias (V)	0	-75	-75	0
Film thickness (nm)	38	44	35	47

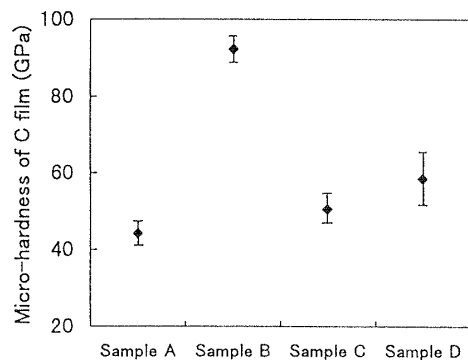


Fig. 9 Micro-hardness on C film layer

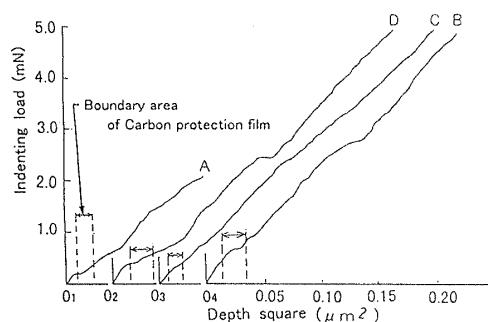


Fig. 10 Correlation between indenting load and depth square

小硬さの順位は、試料 B=C>A>D となっており、この順位と連続しゅう動試験およびランド高さ減少量の三者間には相関の強いことが確認できる。

(2) 試料 B と C および試料 C と D の両者の比較によれば、しゅう動試験結果はカーボン保護膜の微小硬さとの相関は強くなく、むしろカーボン保護膜と下地層の境界領域における微小硬さの影響を強く受けていることがわかる。

(3) 試料 D のしゅう動試験結果は著しく悪いが、これはカーボン保護膜の成膜前に大気に解放されたため下地層の表面が酸化し、カーボン保護膜と下地層との密着性が劣化したためである。

以上述べたように、連続しゅう動試験あるいは CSS 試験におけるしゅう動時の摩擦力増大を抑えるには、ランド高さの低減を抑制する必要がある、そのためには、多層薄膜の微小硬さ、とくにカーボン保護膜と下地の磁性層との密着性およびその境界領域の微小硬さを高くすることが効果的であることが明らかである。

4. 結 言

HDD における摩擦力増大のメカニズムを解明し、磁気ディスクの耐久性向上に供する目的で、規準化したテックチャをもつフォトリソディスクを用いて、

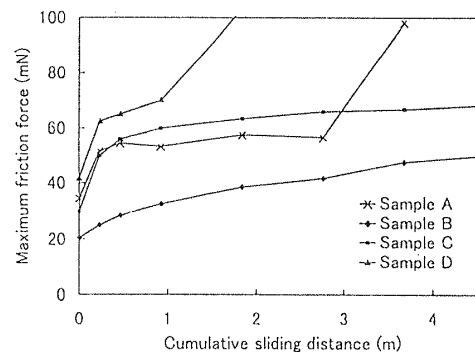


Fig. 11 Influence of carbon film upon friction force

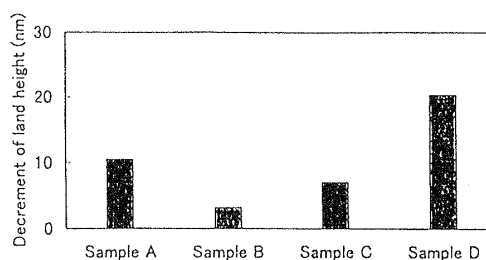


Fig. 12 Decrement of land height after continuous sliding test

CSS 試験および連続しゅう動試験を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 連続しゅう動試験を継続すると、ランド高さが低減し、摩擦力が上昇する。ランド比 0.1% フォトリソディスクの表層形状の AFM および AES 分光分析によれば、その原因は、カーボン保護膜の摩耗ではなく、ランド部の陥没変形にある。

(2) 無潤滑のランド比 0.5% フォトリソディスクに対する CSS 試験において、(1) と同様の評価を行ったところ、初期に 38 nm であったランド高さが、摩擦力が急増に転じた直後には、約 24 nm にまで陥没変形により減少している。

(3) ディスク表層部の微小硬さの評価によれば、耐しゅう動特性は、カーボン保護膜に比べ下地層の微小硬さが低いときに低下しており、下地層を硬化することにより改善できる。

付録 しゅう動試験におけるランド部の塑性変形に対する考察

先に、連続しゅう動試験の初期段階における、ランド頂部のカーボン保護膜の摩耗によって、表面粗さが 2 nmRa から 0.2 nmRa に減少するに伴い摩擦力も上昇する、表面粗さレベルの摩耗と摩擦力との相関について示した⁽⁷⁾。

この初期段階での摩耗では、ランド高さは表面粗さ

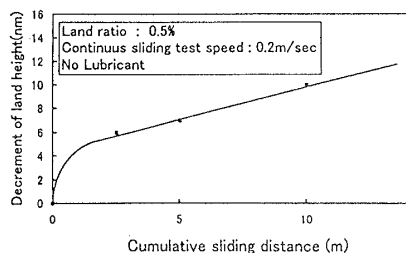


Fig. 13 Decrement of land height after continuous sliding test

レベルの低下を来している。

ここでは、この初期摩耗に続いてしゅう動試験を続行するとき、ランド高さが上記の面粗さレベルの摩耗に比して大きく低下し、その主要原因が、軟弱なランド下地層の陥没にあることを示した。この下地層の陥没が、どのような理由によりひき起こされるかについて考察する。

(1) 高いランドの選択的な塑性変形

まず最初に、微視的にはランド高さが不均一で、突出した高さのランド部に集中荷重が加わり、そのランド部が降伏し陥没することが考えられる。もちろんしゅう動試験の初期段階で、このような現象が生じていることは否定できない。しかしそうであれば、突出したランド高さのみが選択的に低下することになるが、図6から明らかのように、すべてのランド部が平均的に低下しており、この仮説は受け入れられない。

(2) ランド底部の応力集中による降伏

フォトリソグラフィプロセスで製作された個々のランドは、図1ではわかりやすいように誇張して描かれているが、本実験に用いたフォトリソディスクは、実際には上部直径 $\phi 3\,000$ nm、底部直径 $\phi 3\,600$ nm、高さ 35 nm で、周囲の傾斜が極めてなだらかな頂角 167° の円すい台形状をしている。このため、ランド底部の応力集中によって降伏・陥没するとの説は当たらない。

(3) 繰返し荷重による疲労説

ランド比 0.5% の場合、ランドが等分に負荷を分担するとして、ランド 1 個にかかる垂直荷重は $47\ \mu\text{N}$ であり、図8における下地層の影響の出始める荷重に比べて、格段に $1/7$ 以下と小さい。このため陥没の原因となる下地層が、しゅう動試験当初から塑性変形するとは言えない。また垂直荷重は、磁気ヘッドのバネ荷重のみであり、しゅう動試験中は一定である。

ちなみに、図13は、ランド比 0.5% フォトリソディスクのランド高さ減少量の推移を示す。しゅう動距離 10 m は 4 000 サイクルに相当する。上記のような下地層の降伏応力を大きく下まわる小さな荷重が繰返しかかることにより、下地層が次第に降伏し陥没していくといえる。

以上のような理由から、本報では、磁気ヘッドからのバネ荷重の繰返し荷重による疲労説をとっている。

文 献

- (1) Tam, A. C., ほか 3 名, Laser Texturing of Glass Disk Substrates, *Trans. IEEE*, **33-5** (1997), 3181-3183.
- (2) Liu, J. J., Optimization of Laser Texture for the Head-Disk Interface, *Trans. IEEE*, **33-5** (1997), 3202-3204.
- (3) Xuau, J., ほか 4 名, A Study on Nano-Wear at Laser-Textured Bump Tips and the Failure Mechanism at the Head-Bump-Interface, *Trans. IEEE*, **33-5** (1997), 3187-3189.
- (4) Chen, C. C., ほか 3 名, Tribological Performance on Laser Zone Textured Disks, *Trans. IEEE*, **33-5** (1997), 3193-3195.
- (5) Tanaka, H. and Gomi, K., Micro-Tribology of Carbon-Coated Thin Film Media with Well-Defined Surface Texture, *Trans. IEEE*, **29-1** (1993), 270-275.
- (6) Ishihara, H., ほか 6 名, Contact Start/Stop Characteristics on Photo Lithographic Magnetic Recording Media, *Wear*, **172** (1994), 65-72.
- (7) 山上浩・稲田明弘, ほか 3 名, AFM によるフォトリソ磁気ディスク表面観察, トライボロジー会議盛岡予稿集, (1992-秋), 75-78.
- (8) 石原弘久・清水善明, ほか 4 名, フォトリソ磁気ディスクの摺動特性, トライボロジー会議盛岡予稿集, (1992-秋), 71-74.
- (9) 谷口紀男, ナノテクノロジーの基礎と応用, (1988), 67, 工業調査会.
- (10) 大坪康郎, 特許公報, 第 2533091 号, 磁気ディスク, (1996).