微小面積3パッドスライダの試作*

土山 龍 司^{*1}, 川久保 洋一^{*2}, 石井 美恵子^{*1}
徳山 幹 夫^{*1}, 時 末 裕 充^{*1}

Development of a Three-Pad-Slider

Ryuji TSUCHIYAMA, Youichi KAWAKUBO, Mieko ISHII,
Mikio TOKUYAMA and Hiromitsu TOKISUE^{*1} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0013 Japan

We studied a magnetic recording head of a three-pad-slider which had flat-inclined air-bearing surfaces. We expected a small friction force and a small velocity dependence on the flying height from the configuration. We confirmed these expectations by manufacturing heads with MR elements. We also performed continuous 1000-hour seek tests and read/write tests and found that the variation of signal amplitude was less than ± 20 percent. After the tests, there was no measurable wear for three heads at the front contact pads and the rear contact pads among the total four tested heads. There was no measurable wear on the disk surface as well. These results demonstrate the sufficient durability of the head-disk interface.

Key Words: Near Contact Magnetic Recording Head, Friction Force, Head Wear

近年、磁気ディスク装置において、高記録密度化に対応した数々の革新的技術の導入が加速されている。例えば、これまで面記録密度の年率を伸ばしていた磁気抵抗効果型ヘッド(MRヘッド)に代り、再生出力がMRヘッドの約3～5倍と大きい巨大磁気抵抗効果型ヘッド(GMRヘッド)が現在実用化され始めている。

ヘッド・ディスクインターフェイス(HDI)に対する高信頼性、低浮上量化の要求も増々厳しいものとなっている。年々、面記録密度が増加するにつれて要求される浮上量は低下する傾向にあり、最新の磁気ディスク装置の面記録密度は 6 Gb/in^2 を超え、浮上量は 30 nm 以下に狭小化されている。

浮上量は、スライダ単体加工及び組立公差、振動及び環境変化等の要因により変動する。その下限の浮上量を h_{fmin} とすると、 h_{fmin} が、スライダと媒体とが接触を開始する浮上量 h_{to} より小さくなった場合、スライダは媒体面と間欠接触あるいは連続接触走行する可能性がある。

現行では、 h_{fmin} が接触開始浮上量 h_{to} より大きくなるように、面粗さを低減した媒体開発、浮上バラツキ及び浮上量変動を抑えるスライダ開発が行われている。しかし、低浮上量化の要求に対して、次第に浮上マージン($h_{fmin} - h_{to}$)を正に確保することが困難となり、負浮上マージン領域に入りつつある。このため、スライダ設計は面粗さを低減した媒体との間欠接触あるいは連続接触を考慮した信頼性設計が必要となりつつある。

一方スライダの浮上特性には、再生出力が媒体からの磁界の強さだけに關係するMRヘッドを採用するため、ディスク最内周から最外周までの浮上量の軌跡である浮上プロファイルの平坦化が要求される。

本論文の目的は、負浮上マージン領域でスライダ流出端が面粗さが小さい媒体表面と接触した場合においても、安定浮上走行、低摩擦力、低摩擦性能に優れた浮上プロファイル平坦化を実現するスライダを開発することである。

これまで(1)パッド浮上面に微小なステップあるいは角度を設け、媒体面と微小面積で接触させることにより低摩擦力を実現しようとするスライダ^{(1),(2),(3)}と、(2)流入パッドが空気膜で浮上し、誘導型磁気ヘッドを搭載した流出パッドが媒体面と連続接触するトライパッドスライダ⁽⁴⁾が提案されている。

(1)の微小な角度を設ける方式の場合、傾斜したパッド浮上面によって周速変化に対する浮上量変化を小さくできるが、MR素子露出部と媒体の磁性膜面との距離である磁氣的スペーシング h_m が増加し、磁気特性が悪化する。一方(2)のトライパッドスライダの場合、接触面積が(1)に比べて大きく、低摩擦力を実現するためには、比較的大きな面粗さを媒体面に設ける必要がある。

本論文では、前記(1)の各パッド面の面積を微小化し、かつ傾斜させたスライダを微小面積3パッドスライダ(Contact Wedge Slider、以後CWSという)^{(5),(6),(7)}と称し、浮上プロファイル浮上量差 5 nm 以内の目標仕様を満足するCWSの浮上面設計を行った。さらに、パッド面の傾斜角度を変化させた3種類のCWS、 h_m 増加を防止した流出端形状のCWSを試作した。

* 原稿受付 1998年11月20日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (☎ 300-0013 土浦市神立町502)。^{*2} 正員、信州大学工学部 (☎ 380-0922 長野市若里500)。
E-mail: tuciyama@merl.hitachi.co.jp

CWSの性能評価として、周速を変化させた浮上量測定、CSS(ヘッド・ディスクを接触させながら起動停止)時の摩擦力測定、媒体面との接触が生じる条件での連続シーク時の摩擦試験及び磁気ディスク装置を用いた記録再生試験を行ったのでそれらの結果を報告する。

2. CWSの構成

図1にCWSの構成を示す。スライダサイズは、軽量化による接触力低減が期待できる小型スライダの標準サイズとしてピコスライダ(長さ L_x : 1.25 mm、幅 L_y : 1 mm、厚さ t : 0.3 mm)とした。浮上面は、流入側に2パッド(流入パッドと称する)、流出側に1パッド(流出パッド)の3パッドとし、流入パッドには一定膜厚さの傾斜用薄膜(SiO_2 膜、以後傾斜膜)、流出パッドの流出端には再生用MR素子及び記録用薄膜素子を設けた。パッド面積は、従来のナノスライダ(長さ L_x : 2.05 mm、幅 L_y : 1.6 mm、厚さ t : 0.4 mm)に比べて1/5の微小化を図った。

サスペンションは、ピコスライダ用サスペンションを使用し、押付荷重を0.5、1.5 gf、荷重作用点(X_p, Y_p)は、スライダの質量中心位置とした。

Fig.1 Construction of a three-pad-slider

3. CWSの浮上面設計

本論文では、浮上プロファイル浮上量差の目標仕様を5 nm以内に設定し、CWSの浮上面設計仕様を任意形状スライダの浮上解析ツールを用いて検討した。設計パラメータは、パッド面の傾斜角度、パッド面の長さ L と幅 W との比 L/W である。

3・1 パッド面の傾斜角度

図2に、浮上面形状の計算モデルを示す。傾斜角度 θ_{st} の検討は、形状がシンプルな1パッドスライダで行った。パッド面の幅 W を0.3 mm一定として、空気流入方向のパッド面の長さ L を0.1、0.4 mmと変化した2種類の形状とした。流出端浮上量 h_2 は、図3に示すように、周速10 m/sの時20 nmになるように設定した。

Fig.2 Slider dimensions

Fig.3 Flying condition

図4に、周速を2、5、10 m/sと変化した場合の、傾斜角度 θ_{st} に対する浮上力 Q の計算結果を示す。図4より、 θ_{st} を大きくすると、浮上力は大きくなり、最大値をもつ。 θ_{st} を小さくすると、周速変化に対する浮上力変化したがって浮上量変化が小さくなる事が分かる。この理由として、周速が大きくなるにつれて、圧縮性のために、空気膜の圧力が高くなり、いずれ浮上力が飽和する。 θ_{st} が小さい場合、その飽和する周速が小さく、今考える周速範囲全域で浮上力が概略一定になるためと考えられる。浮上力の周速依存性を微小とみなせる θ_{st} を0.7 mrad以下と設定した。ただし、 θ_{st} が小さくなると、接触面積が増加し、摩擦力は大きくなる可能性がある。

本論文では、前記浮上プロファイル平坦化の目標仕様と低摩擦力の目標仕様としてCSS時の摩擦力10 gf以下を同時に満足する θ_{st} を得るため、 θ_{st} を1、0.7、0.5 mradと変化したCWSを試作した。また、図4より、同一の θ_{st} に対して、パッド面の長さ L と幅 W との比 L/W が小さい方が周速変化に対する浮上量変化が小さいことが分かった。

Fig.4 Air pressure of one pad as a function of velocity and pad angle

3・2 パッド面の縦横比

図5に、傾斜角度を1 mrad一定として、パッド面の長さ L と幅 W との比 L/W を0.33、0.67、1.33、2.67、押付荷重0.5、1.5 gfと変化した4種類の計算モデルを示す。

図5に示す4種類のスライダにおいて、図4の h_2 浮上量を入力データとして、周速変化に対する h_2 浮上量の計算結果を図6に示す。図7に、周速5、20 m/s、パッド面の長さ L と幅 W との比 L/W が1.33、0.33における流入パッドの圧力分布を示す。図6より、前述の1パッドスライダの場合と同様に、同じ1 mrad以下の傾斜角度では、 L/W が小さい方が周速変化に対する浮上量変化が小さいことが分かった。さらに図7より、 L/W が小さく、周速が20 m/sの方が、パッド浮上面全面で一定な圧力分布になっていることが分かった。以上の理由として、パッド面の幅が広い方がパッド浮上面に流れ込む空気流が側面から漏れにくく、浮上力が飽和し易くなるためと考えられる。パッド面の長さ L と幅 W との比 L/W を0.67以下に設定した。

Fig.6 Dependence of flying height on velocity

Fig.7 Pressure profile of front pad

4. CWSの試作

4・1 試作スライダ

これまで検討した浮上面の設計仕様に従い、4種類のスライダ(以後CWS 1～4と称する)を設計し、試作した。図8、9にそれぞれ試作したCWSの浮上面形状、流出パッド流出端形状を示す。流出パッドが傾斜すると、MR素子部と媒体の磁性膜面との距離である磁気的スペーシング h_m が増加する。図9に示すように、傾斜角度が1、0.7、0.5 mradのパッド傾斜による h_m 増加はそれぞれ40、28、20 nmとなる。 h_m 増加を防止するCWSとして、パッド流出端部をMR素子部まで角度45 degにテーパ加工する構造のCWS 3を試作した。CWS 3のパッド傾斜による h_m 増加は7 nmと最も小さくなる。

Fig.8 Configuration of air bearing surface

Fig.9 Configuration of Trailing edge

図10に、周速を変化させた場合の流出端浮上量 h_2 の計算結果を示す。図より、CWS 1～CWS 4における周速7 m/sと13 m/sとの浮上量差はそれぞれ4.0、2.9、2.7、2.9 nmとなる。傾斜角度0.7 mrad以下のCWS 2～CWS 4は、周速7 m/sと13 m/sとの浮上量差3 nm以下を達成している。

Fig.10 Dependence of flying height on velocity

図11に示すように、CWS2～CWS4における浮上プロファイルの浮上量差はそれぞれ4.4、4.5、3.7 nmとなり、目標仕様である浮上量差5 nm以内を達成している。

Fig. 11 Profile of Flying height

4・2 試作CWSの浮上面

図12に、機械加工したCWS4の浮上面の光学顕微鏡写真を示す。図より、SiO₂膜(傾斜膜、厚さ0.5 μm)が成膜してある部分が見える。最後に、スライダ表面にヘッド保護膜を成膜した。

Fig. 12 Air bearing surface of a three-pad-slider

5. CWSの性能評価

5・1 浮上量測定

CWSの周速依存性能を評価するため、浮上量を測定した。流出パッド流出端端面には、再生用MR素子及び記録用薄膜素子を保護するために、アルミナ層が50 μm程度成膜してある。そのアルミナ面上では浮上量測定が不可能なため、図13に示すように、浮上量測定は流出端から70 μm離して7点行った。

浮上テストはPhase Metrics社製 DFHT(3波長の光強度から浮上量を導出)を使用した。図14にCWS4における周速が変化した場合の浮上量を示す。図より、周速が8～20 m/sと変化した場合の各測定位置での浮上量変化は4 nm以内となり、パッド傾斜浮上面の周速変化に対する浮上量変化が微小であることが分かる。流出端浮上量h₂は、7点の測定値から近似して求めると25 ± 2 nmであった。

Fig. 14 Dependence of flying height on velocity

5・2 摩擦測定

CWSの傾斜接触による低摩擦性能を評価するため、潤滑膜厚を変えたテクスチャ媒体面上での1時間放置後の摩擦力を測定した。図15に測定結果を示す。図より、従来の接触面積大のナノスライダ、傾斜膜がなく、傾斜接触していないCWS1、1 mradで傾斜接触したCWS1の順に摩擦力が小さくなる事が分かる。これより、傾斜接触による接触面積の微小化が低摩擦に効果があることを確認できた。

Fig. 15 Effect of area on friction

5・3 連続シーク試験

CWS2～CWS4の低摩擦性能を評価するため、媒体面との接触が生じる条件で、シーク動作を16時間連続して行った後の摩擦状態を調べた。連続シーク試験用に改造した2.5インチ磁気ディスク装置に1ヘッド取り付け付けた。媒体は、ヘッド保護膜の摩擦を加速するために、接触開始浮上量h₀が流出端浮上量h₂より十分大きな28 nmのテクスチャ媒体を使用した。図11より、CWS4の浮上マージン(h₂ - h₀)を計算した結果、最内周で-6 nm、最外周で-2 nmとなり、ディスク全面で接触する条件となる。

表1に試験結果を示す。表より傾斜角度0.5 mradのCWS4及び媒体面の摩擦は、0.7 mradのCWS2に比べて少なかった。

流出パッド流出端をテーパ加工したCWS3の摩擦量は、加工しないCWS2に比べて多かった。その一因として、テーパ加工によって流出パッド流出端部に丸みが付き、接触面積が増えたためと考えられる。

Table.1 Results of Seek test

CWS.No	pad angle (mrad)	friction force		Wear		
		first stage	after test	front pad	rear pad	disk
CWS2	0.7	< 1 (gf)	< 1 (gf)	not measurable	middle	not measurable
CWS3					large	small
CWS4	0.5				small	not measurable

5・4 CSS試験

上記試験で最も低摩擦性能に優れていたCWS4のCSS時の摩擦力を測定した。媒体は、接触開始浮上量 h_{to} が18nmの面粗さが小さい媒体を用いた。図16に、約3万回までの摩擦力変化の最大値と最小値を示す。図より、CSS回数が増加するにつれて摩擦力は大きくなるが、4gf以下と小さく、低摩擦力の目標仕様であるCSS時の摩擦力10gf以下を満足した。従来のナノスライダについて同様な試験を行った場合、摩擦力は20gf以上となるため、4gf以下という値は相当小さいと考えられる。

Fig. 16 Variation of friction force

5・5 記録再生試験

5・5・1 試験方法

上記試験で最も低摩擦力、低摩擦性能に優れていたCWS4の接触時における浮上安定性を再生波形の変化から調べるため、シーク動作時の記録再生試験を行った。

2.5インチ磁気ディスク装置2台に、CWS4を2ヘッドづつ4ヘッド(以後No1~4という)取り付けした。4ヘッドの内3ヘッド(No1~3)が記録再生可能である。媒体は、流出パッド流出端と接触させるために、接触開始浮上量 h_{to} が流出端浮上量 h_2 より僅かに大きな23nmのテクスチャ媒体を使用した。

ランダムシーク1000時間後の流入、流出パッド及び媒体面を光学顕微鏡で観察し、摩擦状態を調べた。

5・5・2 流出端近傍の最小浮上量測定

浮上マージン($h_{2min} - h_{to}$)を実測するため、流出パッドの流出端近傍で最小となる浮上量 h_{2min} を正確に求めた。図17に、図13に示す測定位置と同じ流出パッド面7点の浮上量を浮上テストを用いてガラスディスク上で測定した結果と光学式面粗さ計(WYKO)を用いて測定した流出パッド形状を合わせて求めた最小浮上量 h_{2min} を示す。図より、No2ヘッドの中周条件における h_{2min} は21nmであることが分かる。

Fig. 17 Flying height of trailing edge

図18に、同様な方法で、No1~3ヘッドの最内周、中周、最外周の h_{2min} を求めた結果を示す。図より、No1、2ヘッドの浮上マージンは負となり、No1、2ヘッドがシーク動作時に媒体面と接触していることを確認した。さらに、No1~3ヘッドの浮上プロファイル浮上量差が6.4、4.4、2.5nmとなり、6nm以内の浮上プロファイル平坦化を確認した。

Fig. 18 Profile of Flying height

5・5・3 試験結果

図19に再生可能なヘッド(No1~3)を用いて、最内周、中周、最外周それぞれの1000時間までの再生出力変化を求めた結果を示す。媒体面と接触した状態でランダムシーク1000時間終了までの再生出力は、一方的に増加あるいは減少せず、その変化は±20%以内であることが分かった。

Fig. 19 Variation of signal amplitude

試験終了後の流入、流出パッド及び媒体面の摩耗状態を調べた結果を表3に示す。No 1、2、4ヘッドの場合、パッド及び媒体面とも変化が少なく、低摩耗性能は比較的良好であった。

以上、媒体面と接触した状態でランダムシーク1000時間終了までの再生出力は一方的に増加あるいは減少せず、かつヘッド摩耗も軽微であった。これより、CWS4の接触時における浮上安定性が良好であること確認した。この理由として、傾斜接触による低摩擦力、パッド傾斜浮上面による浮上プロファイル平坦化及びディスク内外周の接触力均一化が考えられる。No 3ヘッドでは、正浮上マージンが大きいにもかかわらず、ヘッド保護膜摩耗が多く、媒体面も濃淡変化があった。その一因として、スライダ面へのイレギュラーなコンタミネーション付着による浮上量低下等が考えられる。

Table 2 Results of seek tests

No	Wear			margin $h_{2min}-h_{to}$ (nm)		
	front pad	rear pad	disk	inmost	medium	outmost
1	not measurable	small	not measurable	2.5	-4.0	-3.0
2	not measurable			2.3	-2.0	-1.5
3	not measurable	worn out of C-coat	visible O.M	8.6	6.5	9.0
4	not measurable					

5・5・4 装置取付時の磁気的スペーシング推定

No 2ヘッドの758時間経過後の磁気的スペーシング h_m を、Williams-Comstockモデルから推定した(4)。その結果、 h_m 推定値は最内周、中周、最外周それぞれ 70 ± 10 nm、 75 ± 10 nm、 80 ± 10 nmであった。

一方、試験前の h_m は、最内周の場合、図20に示すように、ヘッド保護膜厚10 nm、媒体保護膜厚22 nm、MR素子位置浮上量29 nm(測定値)を合計すると63 nmとなる。この値は、上記758時間経過後の推定値70 nmとほぼ一致する。

すなわち、媒体面と接触した状態でランダムシーク758時間経過後の流出端浮上量は試験前と比較して変化無と推定できる。これは、試験終了後の摩耗観察結果と一致する。

Fig. 20 Distribution of magnetic spacing

6. 結 言

スライダ流出端が面粗さが小さい媒体表面と接触した場合においても、安定浮上走行、低摩擦力、低摩耗性能に優れかつ浮上プロファイル平坦化を実現するスライダを開発するために、パッド面を傾斜させた微小面積3パッドスライダ(CWS)の浮上面検討及び試作、性能評価を行った。得られた結論は以下の通りである。

(1) パッド面の傾斜角度を 0.7 mrad 以下、長さ比べて幅広いパッド面にすることによって、浮上プロファイルが5 nm以内まで平坦化できる浮上面設計を実現できた。さらに、浮上量測定より6 nm以内の浮上プロファイル平坦化を確認した。

(2) 傾斜角度 0.5 mrad 及び上記(1)に示した浮上面仕様で設計したCWSを作製すれば、CSS4万回までの摩擦力変化の最大値が4 gf以下、媒体面と接触した状態でランダムシーク1000時間終了までの再生出力は一方的に増加あるいは減少せず、かつヘッド摩耗も軽微となり、安定浮上走行、低摩擦力、低摩耗が実現できる。

参 考 文 献

- (1) 特開平6-325530
- (2) 特開平11-203812
- (3) F.Hendriks, STLE Trib. Trans., 39-3(1996), p603-608
- (4) 特開平6-52645
- (5) 土山, 川久保, 石井, 徳山, 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集(5)[NO.97-1](1997), p506-507
- (6) 徳山, 川久保, トライ・ロジスト, 43, 5(1998), p7-12
- (7) 土山, 川久保, 石井, 徳山, 日本機械学会IIP98講演会講演論文集[NO.98-26](1998), p90-91