接触を考慮したトライパッドスライダの浮上解析*

村 富 洋 一^{*1}, 小 野 京 右^{*2}Analysis of Flying Characteristics of Tri-Pad Slider
Considering Asperity ContactYoichi MURATOMI^{*3} and Kyosuke ONO^{*3} Electronic Products and Systems Group, Mitsubishi Electric Corporation,
2-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8310 Japan

In this paper, we present numerical results of the static contact and flying behavior of a tri-pad head slider in a low disk speed range. In order to analyze the mixed-lubrication characteristics of the head slider, both of Greenwood & Williamson model for rough surface contact problem and the Boltzman-Reynolds equation for ultra-thin air lubrication problem were taken into consideration. From numerical calculation, we found a hysteresis of flying height versus disk speed in the transition between contact and flying, where the tri-pad slider can take three different values of minimum spacing and pitch angel numerically. The flying characteristics of the slider focusing on the hysteresis of flying height are examined in relation to the surface roughness, contact stiffness, frictional coefficient, ambient pressure and crownheight.

Key Words: Contact Recording, Mixed Lubrication, Surface Roughness, Air Lubrication, Magnetic Disk, Magnetic Head Slider, Flying Height, Finite Element Method

1. 結 言

近年, 磁気ディスク記憶装置の記録密度は年率2倍の速度で増大してきた。これを支える技術課題の一つに磁気ヘッドスライダ (以後, 単にスライダと称す) と磁気ディスク (以後, 単にディスクと称す) 間のすきまの微小化がある。ハードディスク装置においては, スライダをディスクから浮上させて強い空気膜剛性を利用してこのすきまを微小で安定に保つ構造となっている。既にすきまは 10 nm 程度に微小化されており, 今後数ナノメートルの微小すきま化が要求されているが, この領域ではスライダとディスク面との間歇接触が不可避とされている。実際にハードディスク装置の起動・停止時やスライダのロード・アンロード時のような過渡状態においては, 既に部分的な接触を許容している。また意図的にスライダをディスクに接触させるトライパッドスライダ¹⁾の方式が提案されてから接触記録スライダの研究も活発になされている^{2, 3, 4)}。このような接触を伴うスライダの現象解析およびスライダの設計に対しては, 接触と浮上の両方を考慮した解析が必要となる。つまり, スライダに加わる外力をこれまでの空気膜潤滑による空気圧力に加え, ディスク表面の突起先端での接触圧力と摩擦力も考慮する必要がある。

筆者の一人はこのような観点から, 空気圧力にボルツマン・レイノルズ方程式⁵⁾を, 接触圧力に接触部

の表面粗さの統計量を用いた Greenwood & Williamson⁶⁾のモデル (以下GWモデルと称す) を用いて, 摩擦力を含めた力の釣り合いからスライダの姿勢を連成して解く解析を行い, フレキシブルディスク装置のスライダを対象に摩擦力とディスク速度の関係が実験結果とよい対応をとれることを示した⁷⁾。

その後, Talke らはハードディスク装置のトライパッドスライダにおいて接触を考慮した解析的検討を行った⁸⁾。しかし接触剛性としてすきまの2次関数を仮定したモデルを用いており, この仮定の物理的な意味合いが不明確であり実際のスライダおよびディスクの表面の状態との対応も得られないため, 装置への明快な設計指針とはなりえないと考えられる。

一方, 近年粗さの小さいディスク面で浮上ヘッドスライダのすきまを数 nm に低下させていくとディスク面に接触する touch-down と再び浮上する take-off のヒステシス現象⁹⁾や接触時に烈しく跳躍振動する現象が報告され^{2, 4)}。今後のすきま微小化の最大の障害になっている。しかしこれらの解析では, スライダの空気膜剛性は線形集中ばねモデルが用いられている。

そこで本論文では, トライパッドスライダを対象に数ナノメートルの希薄気体分子混合潤滑領域の静的浮上特性に及ぼす接触表面のパラメータおよびスライダクラウンの影響を数値解析により詳細に調べた。

特に接触と空気膜潤滑の混合領域で, スライダが数値的に三通りの姿勢をとり得る現象を発見した。この現象は, 最近話題となっている粗さ接触スライダにおいて発生する浮上すきまのヒステシス現象や跳躍振動^{3, 4)}にも関連すると考えられるので以下に報告する。

* 原稿受付 2004 年 1 月 15 日。

^{*1} 正員, 三菱電機(株) (〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-2-3)。^{*2} 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-21-1)。

E-mail: Yoichi.Muratomi@hq.melco.co.jp

2. 解析モデルおよび仮定

2. 1 仮定 本解析は、以下の仮定に基づいている。

- 1) 接触はスライダとディスクの表面あらかの突起部分にて確率的に発生する。
- 2) 実接触点先端ではすきまがゼロとなり荷重分担されるが、その周辺領域での平均すきまと平均接触圧力、平均接触点数などの統計量のみを考慮して個々の接触点での挙動は考えない。
- 3) 上記の平均すきまを空気膜潤滑のすきまとして扱い、スライダとディスク間の空気圧力を求める。表面粗さの空気膜潤滑への影響も確率論的な流量係数によるものとする。

2. 2 表面粗さを考慮した接触モデル 表面粗さを考慮した接触理論として広く用いられている Greenwood と Williamson が提案する GW モデル⁸⁾を採用する。このモデルは数式的により厳密なモデルの結果と比べて大きな差がないため、広く適用され、非常に汎用性の高いモデルである。表面粗さがガウス分布であると仮定すると、以下の近似式が得られる⁹⁾。

$$H = h / \sigma_p = 1.40 [\log (0.57 / P_c)]^{0.65} \quad (1)$$

ここで σ_p は表面の突起高さの標準偏差、 h は表面粗さの中心線距離で定義したすきま、 P_c は式(2)で定義される見かけの接触圧力の無次元量である。無次元の見かけの接触圧力 P_c はディスクおよびスライダ表面の接触剛性 p_{c0} と有次元の見かけの接触圧力 p_c より次式で表まる。

$$P_c = \frac{p_c}{p_{c0}} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} p_{c0} = (\eta R_p \sigma_p) E_c \left(\frac{\sigma_p}{R_p} \right)^{1/2}$$

ここで突起の曲率半径 R_p 、単位面積当たりの突起数 η 、スライダとディスクの複合ヤング率 E_c を用いる。複合ヤング率 E_c は E_s 、 ν_s 、 E_m 、 ν_m をそれぞれスライダとディスクのヤング率とポアソン比とすると以下で与えられる。

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_m^2}{E_m} \quad (3)$$

以上より、すきまと見かけの接触圧力の関係が得られるが、これは表面粗さによる接触剛性を有するバネがスムーズなディスク平面に貼られていると見なすことができる。図1にこのモデルを示す。この接触剛性バネは、スライダが追従できない微細なうねりの領域で適用されるもので軸受け面の大きさに比べて、はるかに小さい領域での粗さによる効果である。実際の解析に当たってはスライダ形状の有限要素節点ごとのすきまに対する平均接触圧力を求める。よって図1におい

て $\square A$ の面積はほぼ有限要素メッシュと同等のサイズを想定している。

以上のようにスライダとディスクの接触の特性は、突起高さの標準偏差 σ_p と接触剛性 p_{c0} の2つのパラメータのみにて記述できるので非常に便利である。表1に磁気ディスク装置に用いられているスライダおよびディスクの表面粗さ等の接触に関するパラメータの一例を示す。

本論文では、表1の値を参考に突起高さの標準偏差 σ_p を 2 nm、接触剛性 p_{c0} を 100 MPa とし、これを中心に適宜変化させて特性を検討することとする。

Fig. 1 Contact model between slider and disk

Table 1 Typical surface topography parameters of disk

Standard deviation of asperity height σ_p nm	2
Mean asperity radius of curvature R μ m	2
Asperity density η $1/\mu$ m ²	18
Slider Young's Modulus GPa	385
Slider Poisson's Ratio	0.3
Disk Young's Modulus GPa	71
Disk Poisson's Ratio	0.24
Contact stiffness p_{c0} MPa	150

2. 3 空気膜潤滑方程式 無次元化されたボルツマン・レイノルズ方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \bar{Q}_p \cdot PH^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \bar{Q}_p \cdot PH^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right\} = \Lambda_x \cdot \left(\frac{\partial(PH)}{\partial x} \right) + \Lambda_y \cdot \left(\frac{\partial(PH)}{\partial y} \right) \quad (4)$$

である。ここで以下の無次元量、

$$\bar{Q}_p(D) = \frac{Q_p(D)}{Q_{con}(D)} \quad (\text{流量係数}) \quad (5)$$

は空気の希薄性による流量係数で、福井らによって逆クヌッセン数から計算できるようにデータベース化されている¹⁰⁾。また、表面粗さによる流量係数の影響を考慮する場合には、表面粗さによる効果は、統計的

に流量係数として示されるが¹⁰⁾、接触領域は局所的であるため本論文ではこの効果は省略した。式(4)について

$$Z(X, Y, T) = P(X, Y, T) \cdot H(X, Y, T) \quad (6)$$

と変数変換すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} \left\{ \bar{Q}_p \cdot \left(H \cdot Z \frac{\partial Z}{\partial X} - Z^2 \frac{\partial H}{\partial X} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial Y} \left\{ \bar{Q}_p \cdot \left(H \cdot Z \frac{\partial Z}{\partial Y} - Z^2 \frac{\partial H}{\partial Y} \right) \right\} \\ = \Lambda_x \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right) + \Lambda_y \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。この変数変換は

$$\Lambda \rightarrow \infty \text{ のとき、 } ph(=Z) = \text{const.}$$

となることから、比較的高い軸受定数に対してもZは圧力pほどの急峻な変化をしないため、誤差の少ない解析が期待できる。前報⁷⁾のように、式(7)はガラーキン法を用いた有限要素法を適用し、非線形項についてはニュートン・ラフソン法による線形化を行ない反復計算にて解を求めた。

2 4 スライダの釣り合い方程式 スライダとディスク間にすきま h があると式(1)および式(2)より、それぞれ接触圧力 p_c と空気圧力 p_a が求められ、荷重とモーメントの集中外力を次式より求める。

$$\begin{bmatrix} F_k \\ M_{kp} \\ M_{kr} \end{bmatrix} = \int_A \begin{bmatrix} 1 \\ (y - y_G) \\ (x - x_G) \end{bmatrix} \cdot p_k(x, y) \, dA \quad (8)$$

ただし添字 $k=c, a$ (c : 接触圧力, a : 空気圧力)

これよりスライダの力の釣り合い方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_0 \\ \theta_p \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_a + F_c - F_0 \\ M_{ap} + M_{cp} - \mu F_c \cdot Z_h \\ M_{ar} + M_{cr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

このスライダの運動方程式を解くことにより、スライダとディスクの間のすきま分布 h は、

$$h = H_0 + \theta_p \cdot x + \theta_r \cdot y \quad (10)$$

として求まる。このすきま分布 h を用いて、接触圧力は式(1)、空気圧力は式(7)より求め、式(8)よりスライダに加わる集中外力を計算して、再び式(9)を解く反復法により収束計算を行うことで解を求める。なお、本論文では簡単化のためロール方向を拘束した2自由度系にて以後の解析を実施した。

3. 解析結果

3. 1 解析に用いたトライパッドスライダ

表2にサスペンションの仕様を、図2に解析の対象となるトライパッドスライダ形状を示す。このスライダは、擬似接触スライダとして最初に発表された¹⁾もので、ナノスライダと通称される大きさのものである。

図2において解析に用いる有限要素もあわせて示した。要素は三角要素を用いて、分割にはデローニー法によった。要素数39995、節点数20000でトライパッドの流出側、2つのレールがある流入側、その他の部分の三領域に分けて圧力が急峻に変化する度合いを考慮して、一つの要素の面積比がそれぞれ1:2:32となるようにメッシュの大きさを変化させている。図において流出側のパッドが黒く塗りつぶしたように見

Table 2 Suspension parameters for tripod slider

Suspension load mN	34.34
Vertical stiffness N/m	18.00
Pitch stiffness μ N/rad	114.59
Roll stiffness μ N/rad	143.24

Fig. 2 Tripod slider and mesh with 20000 nodes.

えるのは要素の大きさが小さいためである。

3. 2 スライダ姿勢の速度特性の基本解 表1の

Fig. 3 Relation between relative speed and slider attitudes

表面粗さを適用した場合のスライダ姿勢の速度依存性を図3に示す。図においてディスク速度が3 m/s以上の領域では、ディスク速度の増加に伴い最小すきまやピッチング角が増加し、通常の浮上スライダと同様の空気膜潤滑による圧力増加の作用と考えられる。これに対してディスク速度が1~2 m/sの領域（図において○で囲んだ領域）は特異な挙動を示すことがわかる。この領域を拡大して示したものを図4に示す。図よりディスク速度が2 m/s以下の低速時では、ディスク速度の増加に伴って最小すきまが減少し、ピッチング角が増加するが、それぞれ逆S字、S字の特性を持ち同一の速度において三つの姿勢をとることがわかる（以

Fig. 4 Relation between relative speed and slider attitudes (detail drawing in circle area of Fig. 3)

後、三値解と称す）。

この特異な現象の物理的な意味について考察するため、図5にスライダの姿勢とスライダに加わる外力を表現した図を示す。スライダに加わる外力は空気圧力、接触圧力、摩擦力であるが、図5には空気圧力と接触圧力を式(8)より集中外力の浮上力と接触力として求め、荷重中心点と合わせて示した。サスペンションの剛性が低いので浮上力と接触力の和は加圧力(表3)にほぼ等しい。また、スライダ中心回りのモーメントも摩擦によるモーメントも含めて常に釣り合っている。なお、図においてスライダの流出端を示す●点は最小すきまの値であり、破線で示すカーブは図4の最小すきまに対応しているが、ピッチング角および流入側のすきまの値は表示の都合上相対値で示してある。

つぎに、図4、図5をもとにディスク速度が低速から増加するときの状態変化について考察する。

まず、図に示す領域ではディスク速度の増加に伴いスライダ後端の最小すきまが減少しているのは、前側軸受面の浮上力が増大するが後端軸受面の浮上力はまだほとんど発生しないために、スライダ後端が粗さ面にめり込む量が增大するためである。低速の状態a、

Fig. 5 Slider attitude, air bearing force, contact force varying relative speed.

bは、前側軸受面の浮上力が小さくモーメントが発生しないため、ピッチング角が小さい。そのため接触圧力は軸受面全域でほぼ均一で小さいが、スライダ全面に作用するため積分値としての接触力は大きく荷重中心点はスライダの中心部近くにある。ピッチング角が小さく接触圧力が小さいため、ディスク表面突起の押し込み量が小さいため最小すきまは大きくなる。ここからディスク速度を増加させると浮上力とそのモーメントが増加するため、ピッチング角が増加して状態c、dへと移行する。ピッチング角が増加するので、接触力の荷重中心点はスライダの流出側へと移動する。接触力は減少するが、流出側での接触圧力が高くディスク表面突起が押し込まれて最小すきまは状態bよりも小さくなる。さらにディスク速度を増加させるとスライダの姿勢の連続性を保ったままでは、力とモーメントの釣り合いを維持できずに図4の破線で示す状態dからd'へ不連続に最小すきまが減少しピッチング角が増加する。このとき浮上力は増加し接触力は急激に減少し、荷重中心点はスライダの流出端へ移動する。

ディスク速度をさらに増加させると、前側軸受面の浮上力が増加し接触力は減少するがピッチ角の増加が大きいために後端すきまはさらに低下する状態h、iへ連続的に移行する。このとき接触力が減少するのは後端軸受面の接触領域が減少するためと考えられる。

減速時は省略するがほぼ同様の考え方で逆の動作となる。結局、スライダの姿勢はディスク速度の増減で

増速時：a → b → c → d → d' → h → i

減速時：i → h → g → f → f' → b → a

のようにヒステリシス特性を持つ。

数値計算上においてもディスク速度を連続的に変化させると同様の特性となり、 $f \leftrightarrow e \leftrightarrow d$ の特性は単純には得られない。数値計算では、最小すきまとピッチング角をe点に近い値を初期値とすることでe点の収束解を求め、 $e \rightarrow f$ 、 $e \rightarrow d$ と速度を変化させることで図4のような特性値を求めることができた。

3値解が生じる理由を理解するため、式(9)を並進とピッチの2自由度として以下のように書き換える。

$$\begin{cases} f_1(\theta_p, h_{\min}) = F_a + F_c - F_0 - K_{11}H_0 = 0 \\ f_2(\theta_p, h_{\min}) = M_{ap} + M_{cp} - \mu \cdot F_c \cdot Z_h - K_{22}\theta_p = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)のそれぞれの平衡式を満足するピッチ角 θ_p と最小すきま $h_{\min}$ の関係を図6に示す。図には三値解の発生するディスク速度1.38 m/sの場合、および発生しないその前後の速度(1.28, 1.48 m/s)の場合について示す。 $f_1=0$ は力の釣り合いを満足する曲線で、 $f_2=0$ はモーメントの釣り合いを満足する曲線、○はこれらを共に満足する点である。図において $f_1=0$ 曲線のピッチング角がゼロ付近を頂点とする急峻な山は接触に起因する特性によるもので、頂点において接触圧力がほぼ均一となるため最小すきまが最大値で加圧力と釣り合うことを示している。一方速度が大き

なるに従ってピッチング角 $4 \sim 5 \mu\text{rad}$ に現れる山は浮上力に起因するもので、ピッチング角が約 $5 \mu\text{rad}$ のときに最大浮上力が発生する性質がある。

$f_2=0$ 曲線は $f_1=0$ 曲線に比べてディスク速度による変化が小さい。これは図5に示したように、荷重中心が接触力は流出側にあり浮上力は流入側にあつてモーメントが釣り合うように作用することによる。

ディスク速度が1.28 m/sの場合の解は接触力の作用が主で、1.48 m/sの場合の解は浮上力の作用が主である。ディスク速度が1.38 m/sの場合は、これらが複合した解となり、ピッチング角が約 $1 \mu\text{rad}$ の解は接触、約 $7 \mu\text{rad}$ の解は浮上が主である。その中間のe点の解は、接触力と浮上力が共に作用した解と考えられる。このように接触力と浮上力とが拮抗する遷移領域にて三値解が発生することが分かる。

図4, 5の $f \leftrightarrow e \leftrightarrow d$ の特性は、速度増加に伴って浮上力およびピッチング角が減少するなど物理的な意味が理解し難いが、数値計算上は厳密に力とモーメントが釣り合うことは以上の議論より明らかである。しかし実際の現象としては不安定で発生せず、前述のようにヒステレシス領域として二値をもつと考えられる。2つの姿勢状態は外乱によって遷移可能なので安定な浮上すきまが得られない。よってこの速度領域では、スライダの姿勢は著しく不安定となることが予想され、実際には変動する接触力によって異常振動の発生原因となることも予想される。

次節以降では、各種パラメータを変化させたときにこの三値解の発生状況の解析結果を示す。なお以後の図において、本節の解析結果を基準として灰色の線で示す。

Fig. 6 Relation between pitching angle and minimum spacing satisfied equilibrium s varying relative speed

3.3 ディスクの突起高さの標準偏差に関する影響

突起高さの標準偏差を基準値2 nmに対して、1, 3, 4 nmと変化させたときの結果について述べる。図7はスライダの姿勢として最小すきまとピッチング角の速度依存性を示す。図7にはディスクが鏡面で接触がなく空気膜潤滑状態のみの場合も示した。最小すきまとピッチング角は速度増加とともに鏡面の場合に漸近し、標準偏差が小さいほど低速で漸近する。また標準偏差が小さいほど低速で広い速度領域にて三値解が発生し、4 nm以上では発生しないことが分かる。よって磁気ディスクの高密度化のため、今後ますますディスクの表面の平滑化が進むことから、三値解による問題が顕在化することが予想される。

最小すきまを突起高さの標準偏差で正規化した値の速度依存性を図8に示す。低速領域では、浮上力が小

さく加圧力の大半を接触力で受け持つため、図8のように突起高さに依存しないほぼ同一の曲線上にのることがわかる。これは接触圧力が式(1)のHに依存することに对应する。ディスク速度が増加するにつれてスライダのピッチング角が増加しスライダの後端が陥没する挙動となり、極小値を経て増加に転じ流体潤滑となる。

図8より、標準偏差が小さいほど正規化すきまの極小値は大きいため、式(1)より接触圧力は小さくなる。また、図7(a)より標準偏差が小さいほど最小すきま

Fig. 7 Effects of the standard deviation of asperity height on slider attitudes

Fig. 8 Effects of the standard deviation of asperity height on normalized minimum spacing

の極小値は小さい。よって標準偏差が小さいほど全速度領域で最小すきまと最大接触圧力ともに小さくすることができるとわかる。

3. 4 ディスクの接触剛性の影響 表1に示した接触剛性の基準値に対して、接触剛性をオーダー的に変化させたときのスライダの姿勢変化を図9に示す。図より、接触剛性が増加するに従って三値解となるディスク速度領域はやや高い領域に移動する。低速域において、最小すきまの値は接触剛性が高くなるにつれて大きくなるがピッチング角は小さくなる。接触領域において接触剛性のスライダ姿勢に対する影響力は、式(1)からわかるようにオーダー的に変化してもスライダ姿勢は対数的にしか変化しない。

Fig. 9 Effects of contact stiffness on slider attitudes

3. 5 ディスク・スライダ間の摩擦係数の影響 摩擦係数の基準値 0.2 に対して、0 と 1 を加えてその影響を検討する。スライダの姿勢変化を図10に示す。ディスク速度が小さくすると摩擦力によるモーメントが働くため、ピッチング角は摩擦係数がゼロの場合以外は負の値となる。特に摩擦係数が1の場合は特に顕著でディスク速度が 1.4 m/s を超えるまで浮上力が負の値となる。これに伴いピッチング角が小さく浮上力が発生しにくいため、低速域では接触力の値が大きいことがわかる。

図より摩擦係数が大きくなると、三値解の領域が極端に広がることが分かる。このことからスティクションが生じると摩擦係数が大きい場合と同等の作用で三値解が発生しやすくなると考えられる。

Fig.10 Effects of friction coefficient on slider attitudes

3. 6 周囲圧力の影響 装置の内部の圧力を下げてスライダの浮上量を低下させる場合がある。

ここではスライダ周辺の圧力 P_b を大気圧 P_a として P_b/P_a の値を 0.25, 0.5, 0.75, 1 と変化した場合のスライダの姿勢変化を図 11 に示す。周囲圧力の低下に伴い接触から浮上へ切り替わるディスク速度は増加するが、三値解は周囲圧力によらず発生し、周囲圧力が低いほど発生するディスク速度は高いことが分かる。このことから、一定の浮上力が発生する状態で接触力と一定の条件で拮抗することで三値解が発生することが分かる。

3. 7 スライダクラウン高さの影響 スライダの面は平面を基準値としているが、実際にはクラウンと称す緩やかな曲面となっていることが多い。図 1 2 (c) 中に示すようにクラウンの端面からの高さをクラウン高さ H_{cr} として、平面のゼロから、10, 20 nm と変化させたときのスライダの姿勢変化を図 1 2 (a), (b), (c) に示す。図においてクラウンの有無が低速時

Fig.11 Effects of ambient pressure on slider attitudes

のスライダのピッチング角に大きな影響を与えることが分かる。すなわち、接触力が大半の低速時には摩擦のモーメントによりピッチング角が負となるが平面よりも回転し易いため負の度合いが大きい。しかしくさび効果によって大きな浮上力が発生するためディスク速度の増加に伴い急激に最小すきまおよびピッチング角が増加することが分かる。図 1 2 (c) には、最小すきまの位置の変化を示す。図において A-B 間は図 2 に示すスライダ流入側に配置された 2 本のレールのパッド部に相当する部分で、C-D 間は流出側の第 3 のパッド部に相当する部分を示している。平面スライダの場合はピッチング角に対応して A から D へ最小すきまの位置は不連続に変化するが、クラウンがある場合は連続的に変化しクラウン高さが高いほどディスク速度に対する変化が緩やかであることが分かる。また、クラウンがある場合は平面スライダの場合に比べて、流出端の D が最小すきまとなるディスク速度ははるかに大きく、しかも図 1 2 (a) より最小すきまの値も大きい。図 1 2 (b) よりクラウンがある場合は、低いディスク速度でピッチング角が大きくなっていることから接触力が急激に低下して浮上力が増加するいわゆるデイクオフ特性がよいことが分かる。

図 1 2 から、クラウンがある場合には三値解はなくすべての速度領域において唯一のすきま解が得られることが分かる。

Fig. 12 Effects of crown height on slider attitudes

4. 結 言

媒体の表面粗さによる接触と空気膜潤滑とが同時に発生する場合の解析を行い、トライパッドスライダを用いてパラメータスタディを行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) スライダの姿勢は、媒体の突起高さの標準偏差によらずディスク速度の増加と共に平滑な表面を持つ媒体の特性に漸近する。接触するディスク速度領域では、標準偏差が小さいほど最小すきまおよび最大接触圧力が小さい。
- (2) スライダの姿勢を決定する因子でもっとも大きいものは媒体の突起高さの標準偏差であり、接剛性、摩擦係数、周囲圧力の影響は相対的に小さい。

(3) 摩擦係数が高いとスライダのピッチング角を減少させる効果がある。これに伴いすきまは増加する傾向がある。

(4) 低速域にて、同一の速度でスライダの姿勢が3形態となる三値解の発生を新たに見出した。この傾向は、媒体の突起高さの標準偏差が小さいほど、摩擦係数が高いほど発生しやすい。三値解が発生する場合には周囲圧力を低下させても発生に影響せずディスク速度が高い領域で発生する。この三値解は、数値計算上の解であり現象としては、ヒステリシス特性となると考えられる。

(5) クラウンを持つスライダは、ピッチング角が変化し易くテークオフ特性がよい。またディスク速度の増加につれて最小すきまの位置が流出端まで連続的に変化する点で平面スライダとは挙動が大きく異なる。このため三値解の発生はなくスライダの姿勢変化は連続で唯一のすきま解が得られる。

本論文にて示したすきまの三値解は、接触力と浮上力が拮抗する領域にて発生する。今後、磁気ディスク装置の高密度化を進める上でスライダの小型化が不可欠で、さらに浮上力が低下して接触領域へ踏み込む可能性が高い。この場合には、スライダ特性として三値解の発生の可能性を事前に検証する必要があると考えられる。

また、本論文では静的な特性に基づくヒステリシス特性を示したが、この特性が、磁気ディスク装置で最近問題となっている不安定振動の原因となり得ることが予想される動的特性の検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) C. H. Leung and N. V. Gitis : IEEE Trans. Magn., Vol. 32, No. 5, (1996) 3657.
- 2) H. Kohira, H. Tanaka, M. Matsumoto and F. E. Talke : Trans. ASME, J. Trib., 123, 7(2001) 616.
- 3) K. Iida and K. Ono : Trans. ASME, J. Trib., 125, 7(2003) 562.
- 4) 山根正巳, 小野京右, 山浦弘 : 機論, 69-686, C(2003), 2638-2645
- 5) S. Fukui and R. Kaneko : Trans. ASME, J. Trib., 112, 1(1990) 78.
- 6) J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson : Proc. Roy. Soc. Lond., A295 (1966) 300.
- 7) Y. Muratomi : Advances In Information Storage Systems, 6, (1995), 395.
- 8) M. H. Wahl, H. Kwon and F. E. Talke : TRIBOLOGY TRANSACTIONS, V40 N1, (1997) 75-80.
- 9) B. Bhushan : Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, Springer-Verlag, (1990) 166.
- 10) T. Makino, S. Morohoshi & S. Taniguchi : Trans. ASME, T115 (1993) 185.