バルク変形・粗さ接触・潤滑剤の吸着力を考慮した
2 面間の接触特性*山 根 正 巳^{*1}, 小 野 京 右^{*1}Analysis of Contact Characteristics of Rough Surface Considering
Bulk Deformation and Meniscus ForceMasami YAMANE^{*2} and Kyosuke ONO^{*2} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2 12 1 13 10 Ookayama, Meguro ku, Tokyo, 152 8552 Japan

We calculated the characteristics of contact force and adhesion force between a contact pad and a magnetic disk surface which has computer generated asperities with Gaussian distribution. In calculation, we considered asperity contact, bulk deformation and meniscus force of the lubricant. First by comparing the results of our model with numerical GW model, we found that the bulk deformation becomes predominant when the asperity density is large and the rms value of asperity peak height is small as cases of current slider and disk surfaces. Next, we examined effects of asperity density, contact pad area, rms value of the peak height, asperity radius and lubricant thickness on the resultant contact force, adhesion force and the contact stiffness as a function of separation between contact pad and disk. It was found that the rough surface can be modeled by a simple bulk contact force and attractive force can be modeled as a constant adhesion force when the asperity density is large and the rms value of asperity peak height is small as the cases of current slider and disk conditions.

Key Words: Tribology, Head Disk Interface, Contact, Mechanics, Asperity Contact, Meniscus Force

1. 緒 論

磁気ディスク装置の面記録密度は 1992 年頃から 10 年間、年率 60~100%で増加したが、ここ 2~3 年の増加年率は 30%程度となっている。現在商用機では面記録密度 100 Gbit/inch²が約 10nm のヘッド・ディスク間すきまで実現されているが、今後高密度化のためにはヘッドスライダの浮上すきまは数ナノメートルにしなければならない。しかし、現在のヘッドスライダの浮上量を数ナノメートルに低減すると、スライダがディスク面に接触し、跳躍振動を生じてしまうという問題が生じている。特にディスク面の表面粗さを小さくすると跳躍振動が発生しやすくなるため、高密度化の隘路となっている。この原因はスライダのパッドとディスク面間に働くメニスカス吸着力^①と摩擦力によるスライダの自励振動であると考えられる^②。浮上す

きまを小さくするためには、ディスク面を平滑にする必要があるが、その場合 2 面間における吸着力および摩擦力が大きくなり、自励振動が発生しやすくなる。このためスライダパッド面とディスク面の 2 面間に働く接触力、吸着力および摩擦力の特性の解明が重要となっている。

2 面間の接触特性はディスク面の粗さ、突起密度により大きく影響することが知られている。そのためディスク面等の粗さや突起密度などの影響を調べた研究は多数行われている。従来の 2 面間の接触特性を解析的に求める研究として GW モデル^③や、有限要素法に基づく数値解析法^④などがある。前者ではバルク的な変形を考慮していないため、押し込み量が大さいと接触力を大きく見積もりすぎ、スライダの動特性を解析するために重要な接触剛性を大きく見積もりすぎてしまう。またプローブを接触させ引き離す実験的な研究で接近過程と分離過程で力が異なるという報告^⑤があるが、前者ではそのような接触特性を得ることはできない。また後者では解析が膨大になるという欠点がある。このため、飯田らはバルク的な変形も考慮した

* 原稿受付 2005 年 3 月 17 日。

^{*1} 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 12 1 13 10)。

E mail: yamanem@stu.mech.titech.ac.jp

GWモデルと有限要素法の中間的な解析法を提案している⁶⁾。

本論文では、まず飯田らが提案した粗さ接触、潤滑剤、バルクのな変形を考慮したモデルを用い、GWモデルとの違いを示し、次に現状の粗さが小さく突起数の多いディスク面とパッド面との2面間の接触特性について解析的に明らかにする。筆者らは既に本解析結果を用いて、ヘッドスライダの跳躍振動を解析したが、各種粗さパラメータに対する接触特性は貴重なデータと考えられるのでここに報告する。

2. 粗さ接触モデルと解析法

2.1 接触モデル 本研究では、ランダムな突起頂点の変形と弾性体としての表面の変形を計算機上で統計処理するGW法と有限要素法の中間的な解析法を行う。本研究における接触パッドモデルを図1に示す。実際のスライダ接触パッド面の粗さはディスク面に対して無視できる程小さいので、剛体パッドが粗さを有する弾性ディスク表面と接触すると仮定する。また突起の形状・配置は、図1に示すようにGWモデルと同様、同一の先端曲率半径をもつ球面状の突起が x, y 面内で等方的に一樣分布し、高さ方向には突起頂点高さの平均値を基準として標準偏差 σ の正規分布をしていると仮定する。さらに、図1のように、突起相互の影響(高い突起が接触した時、周囲の突起の基礎が沈む効果、以後これを表面のバルク的な変形と呼ぶ)も考慮する。潤滑剤による吸着力の影響についてはOno, Oohara⁹⁾らの衝突時の分離過程で生じるメニスカス吸着力の実験的研究に基づき、以下の仮定を行う。

- (1) 突起頂点とパッドのすきまが潤滑剤厚 h_l より小さくなったら潤滑剤によりメニスカスが形成される。
- (2) メニスカスが形成されるときは、突起頂点がパッド面と接触しているか否かにかかわらず、常に図2に示すtoe-dipping regimeにある。
- (3) メニスカスは常に単独の突起を囲むものとする。
- (4) メニスカスの接触角は0度と近似できる。
- (5) メニスカス力は形成された突起とパッド面間に引力として働き、かつその力により周りの突起も変位する。(メニスカス力についても突起は互いに非独立)

以上の仮定を行うことにより、メニスカスが形成された時はその突起・パッド面間に常に次式で表される一定メニスカス力 F_m が吸着力として働くと考えることができる。

Fig. 1: Contact pad model with asperity and bulk deformation

Fig. 2: Toe-dipping regime

$$F_m = 4\pi R\gamma \quad (1)$$

ここで R は突起先端半径、 γ は潤滑剤の表面張力である。なお、式(1)はRennard-Jonesポテンシャルに基づき、DMTモデルから導かれる吸着力に等しい。

2.2 接触解析法 図1に示すモデルにおいて、ある突起 i における接触反力 F_{ci} はヘルツの理論式から

$$F_{ci} = \begin{cases} \frac{4}{3} E^* R^{1/2} h_i^{3/2} - F_m & (h_i > 0) \\ -F_m & (0 > h_i > -h_l) \\ 0 & (h_i < -h_l) \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる。ここで h_l は潤滑剤膜厚であり、また h_i はパッド面と突起のオーバーラップ量で、バルク的な変形がないときの突起頂点高さの平均値を基準としたパッド面位置を d 、突起高さを z_{si} とすると

$$h_i = z_{si} - d \quad (3)$$

で表される。また R は突起先端半径、 E は等価的なヤング率で接触する2物体(本研究の場合スライダの接触パッドとディスク面)のヤング率、ポアソン比をそれぞれ E_1, E_2, ν_1, ν_2 として $1/E^* = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$ で与えられる。ある突起の接触により式(2)で与えられる接触力 F_{ci} が生じ、その力により他の全ての突起位置において基礎部分が変形する。そのとき突起先端に作用する接触力を集中力とみなすと、突起 j における接触力 F_{cj} による突起 i の基礎部分の変位 u_{ij} は半無限弾性体のグリーン関数を用いて次式となる。

$$u_{ij} = \frac{F_{ij}}{\pi E^* \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (4)$$

ここで (x_i, y_i) , (x_j, y_j) は各突起の平面における座標である。したがって、突起 i の基礎部分は他全ての $N-1$ 個の突起の接触力により

$$u_{zi} = \sum_{j=1}^N u_{zj} \quad (j \neq i) \quad (5)$$

だけ変位することになる。ここで、 $h > -h_i$ の場合、突起に吸着力が作用する。突起と平面との接触力は他の突起に影響する一方、接触した突起自身の変位には無関係(既にヘルツの式に変位が入っている)だが、吸着力はその突起に対しても外力として働く点と考えられる。そこで、潤滑剤による吸着力によるその突起自身の変形をヘルツの理論による押し込み量の式を引っ張り力による持ち上げ量とみなして計算する。上記のことから、式(3)のオーバーラップ量 h は次式で修正される。

$$h_i = \begin{cases} z_{si} - d - u_{zi} & (h_i < -h_i) \\ z_{si} - d - u_{zi} + \sqrt{\frac{9F_m^2}{16E^{*2}R}} & (h_i > -h_i) \end{cases} \quad (6)$$

接触解析では、まずランダムな粗さをもつ表面を計算機で創生し、各突起における接触力 F_{ij} を式(6)の h を用いて計算し、 F_{ij} の合計値である接触合力 F_c が誤差0.01%未満に収束するまで繰り返し計算を行う。この計算を、2面間距離 d を $5\text{nm} \rightarrow 5\text{nm} \rightarrow 5\text{nm}$ と徐々に 0.1nm 間隔で接近・分離させる過程で行った。

なお各突起自体の変形量と接触力の関係は突起半径で決まり、各突起高さは分散 σ のガウス分布で与えており、接触面のバルク変形は突起平均値の変形で表現されるから、変形前の突起平均高さを基準とするディスク面とパッドとの距離 d の関数として接触力特性が計算できることに注意されたい。

解析に用いるパラメータ値を表1に示す。解析パラメータの値は、現在商用されている磁気ディスクの諸元を参考に、接触パッド面積 S 、突起頂点分散 σ 、突起密度 ρ 、突起先端半径 R 、潤滑剤膜厚 h を上記の範囲で変化させ、その接触合力、接触剛性、吸着力に及ぼす影響を調べた。なお、現在の商用ディスク面の粗さパラメータ値は、 $\sigma = 0.2 \sim 0.4\text{nm}$ 、 $\rho = 100/\text{mm}^2$ 、 $R = 1.2\mu\text{m}$ 、 $h = 1.0\text{nm}$ 程度である。

3. 解析結果

Table 1: Parameter values

Contact pad area	S	$1 \times 1 \sim 30 \times 30 \mu\text{m}^2$
RMS value of peak height	σ	$0.2 \sim 1.0 \text{ nm}$
Asp. density	ρ	$1.0 \sim 100 / \mu\text{m}^2$
Asp. radius of curvature	R	$0.1 \sim 5.0 \mu\text{m}$
Lubricant thickness	h_l	$0.0 \sim 2.0 \text{ nm}$
Surface tension of lubricant	γ	24 mN/m
Slider Young's modulus	E_1	200 GPa
Disk Young's modulus	E_2	140 GPa
Slider Poisson's ratio	ν_1	0.3
Disk Poisson's ratio	ν_2	0.3

3.1 バルク変形の影響 まず上記モデルの解析結果と GW モデルの解析結果を比較検討する。接触パッド面積 $S = 20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 、突起密度 $\rho = 30/\mu\text{m}^2$ 、突起先端半径 $R = 2.0 \mu\text{m}$ 、潤滑剤膜厚 $h = 1.0 \text{ nm}$ の場合の解析結果を図3に示す。実線は本解析モデルの解析結果であり、鎖線は本解析モデルにおいて、式(6)の h の修正を行わず、バルク的な変形を考慮しない GW モデルの解析結果である。図(a)は接触合力 F_c であり、吸着力 F_a とディスク面反力 F_d の和である。図(b)はディスク面反力の接触剛性 k_r である。また図(c), (d)はそれぞれ突起頂点分散 σ が 0.5 、 1.0 nm の場合である。図3(d)の突起頂点分散 $\sigma = 1.0 \text{ nm}$ の場合、接触開始時、2面間距離が 2 nm 以上の領域では GW モデルと本解析モデルの解析結果には大きな違いが無い。これは接触変位が小さく、突起の変形が支配的であるためと考えられる。しかし2面間距離が 2 nm 以下の場合、本解析モデルと GW モデルの解析結果には差が生じ、本解析モデルでは、接触剛性は一定値に収束しているが、GW モデルでは、接触剛性が 10^8 N/m と大きくなっている。これは本解析モデルでは、バルク的な変形を考慮しており、2面間距離を小さくすると、バルク的な変形が主となるためである。

図3(d)の突起頂点分散 $\sigma = 0.5 \text{ nm}$ の場合、GW モデルおよび本解析モデルの接触合力の最小値は $\sigma = 1.0 \text{ nm}$ の場合に比べ共に小さくなっている。しかし本解析モデルでは、接近過程と分離過程で接触特性が異なり、ヒステリシス特性がみられる。このことは一般の実験的事実と定性的に一致する。また本解析モデルでの接触剛性をみると、接近過程および分離過程で0とある一定値でほぼステップ的に変化している。本解析モデルにおいて接触剛性が収束する値は、(d)の場合と同じ値であり、バルク的な変形が主となっているものと考えられる。

上記のことから、接触変位が大きい場合や突起頂点分散が小さい場合は、バルク的な変形の影響が大きくな

Fig. 3: Comparison of external force and contact stiffness between present model and GW model ($S=20 \times 20 \mu\text{m}^2$, $\rho=30/\mu\text{m}^2$, $R=2.0 \mu\text{m}$, $h_f=1.0 \text{ nm}$); (a) external force; (b) contact stiffness

と考えられ、現在用いられている突起分散の小さいディスク面の接触特性を評価するにはバルク的な変形を考慮する必要があると考えられる。

3.2 突起密度と接触パッド面積の影響 次に現在用いられている滑らかなディスク面の接触特性を明らかにするために、パラメータスタディを行い、各種パラメータの影響について調べた。接触パッド面積 $S=10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 、突起頂点分散 $\sigma=0.5 \text{ nm}$ 、突起先端半径 $R=2.0 \mu\text{m}$ 、潤滑剤膜厚 $h_f=1.0 \text{ nm}$ の場合において、突起密度 ρ を変化させたときの接触特性の解析結果を図4に示す。図4において(i)は、2面間距離 d を $5 \text{ nm} \rightarrow -5 \text{ nm}$ と、徐々に小さくした接近過程の解析結果であり、(ii)は(i)の2面間距離 d を $-5 \text{ nm} \rightarrow 5 \text{ nm}$ と、徐々に大きくした分離過程の解析結果である。また、図(a), (b), (c), (d)はそれぞれ、接触合力 $F_c (=F_a + F_r)$ 、吸着力比 $F_a/|F_{\text{atmx}}|$ 、接触反力 F_r 、接触剛性 $k_{cr} (= -F'_c)$ を示している。ここで $F_{\text{atmx}} = 4\pi R \rho S \rho$ であり、突起全てが接触したときの吸着力である。よって、図(b)は吸着力の変化を示すと共に、メニスカスが形成されている突起の割合を示す指標ともなる。図中において点線、一点鎖線、鎖線および実線はそれぞれ突起密度 ρ が 3, 10, 30, $100/\mu\text{m}^2$ の場合であり、これらの場合の F_{atmx} は、それぞれ 0.181, 0.603, 1.81, 6.03 mN である。

図4(i)(a)(b)(c)より、突起密度が大きいとパッドがディスクの突起と接触開始に接触力は急激に変化していることがわかる。これは突起密度が大きい場合、吸着力によりバルク的な変形が発生するとき他の突起がパ

Fig. 4: Effect of the asperity density on contact characteristics ($\sigma=0.5 \text{ nm}$, $S=10 \times 10 \mu\text{m}^2$, $R=2.0 \mu\text{m}$, $h_f=1.0 \text{ nm}$); (a) external force; (b) ratio of adhesion force to its minimum value; (c) contact force; (d) contact stiffness

ッドに接触する確率が高く、それが連鎖で起こるためであると考えられる。図4(i)(d)より、接触剛性も突起密度が多い場合は、急激に変化し、ある一定値に収束することがわかる。またこの図より、突起密度が大きいほうが、剛性はやや大きくなることがわかる。図4(i)と(ii)を比較すると、2面間距離を小さくした場合と、その後大きくした場合でヒステリシス特性があり、突起密度が大きいほうが、ヒステリシスが大きくなっている。

突起の接触開始・分離点および接近・分離過程における接触合力が最小値をとる点の2面間距離と、突起密度の関係を図5(a)に示す。また、図5(b)に接触合力の最小値と突起密度との関係を示す。図5(a)より、密度によらず、接触開始の2面間距離はほぼ一定値の 2.5 nm となっている。この 2.5 nm は、「突起分散の3倍」+「潤滑剤の膜厚」($3\sigma + h_f$)に相当している。接近過程において接触合力が最小値となる点は、突起密度が大きいほど接触開始点に近づいており、分離過程ではさらに分離点と最小値となる点との差が小さくなっている。このことは突起密度が大きくなると、接触力の変化率が急であり、突起変形が支配的となる領域が小さくなることを示している。また接触開始点と

Fig. 5: Separations at the start and end of contact and the minimum contact force as a function of asperity density ($\sigma=0.5$ nm, $S=10 \times 10 \mu\text{m}^2$, $R=2.0 \mu\text{m}$, $h=1.0$ nm); (a) separations at the start and end of contact, (b) minimum external force

分離点を見ると、突起密度が小さい場合は、その差はあまりないが、突起密度が $50 \mu\text{m}^2$ より大きくなると、その差が大きくなることからわかる。これはメニスカスによる吸着力が大きくなりバルク的な変形の影響が大きく、パッドとディスクが離れにくくなるためであると考えられる。突起密度が $50 \mu\text{m}^2$ 以下の場合、差が 0.2 nm 程度となっているが、この値は式(6)の下側右辺第4項の「潤滑剤による吸着力によるその突起自身の変形」に対応するものであり、突起一つによるヒステリシス特性である。また図5(b)より、接触合力の最小値は、突起密度にほぼ比例して大きく、接近過程と分離過程では分離過程のほうが小さいことがわかる。分離過程での接触合力の最小値は突起密度に対してはほぼ比例的に小さくなる。

突起密度 $\rho=30 \mu\text{m}^2$ 、突起頂点分散 $\sigma=0.5 \text{ nm}$ 、突起先端半径 $R=2.0 \mu\text{m}$ 、潤滑剤膜厚 $h=1.0 \text{ nm}$ の場合において、接触パッド面積を変化させたときの接触特性の解析結果を図6に示す。図中において点線、一点鎖線、鎖線および実線はそれぞれパッド面積 S が 1×1 , 5×5 , 10×10 , $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ の場合である。図6より、パッド面積が大きいほうが、ディスク面との接触開始と分離時の接触特性の変化が急であることがわかる。ま

Fig. 6: Effect of the contact pad area on contact characteristics ($\sigma=0.5$ nm, $\rho=30 \mu\text{m}^2$, $R=2.0 \mu\text{m}$, $h=1.0$ nm); (a) external force; (b) ratio of adhesion force to its minimum value; (c) contact force; (d) contact stiffness

たパッド面積が大きいほうが接近過程と分離過程でヒステリシスが大きいことがわかる。

図4, 6において、接触剛性がある値に収束しているが、これは、この領域ではディスクのバルク的な変形が支配的であるためと考えられる。そこで解析により収束した接触剛性値と一様面圧で正方形のパッドがディスク面に接触したと仮定したときの接触剛性 $k_0 = 1.79 E^* \sqrt{S}$ との関係調べた。各突起密度における

パッド面積に対する剛性の収束値と上記の理論値の比を図7に示す。図7より、突起密度が大きくなるとその値は大きくなる。またパッド面積が大きくなると、剛性比は大きくなり、ほぼ一定値になることがわかる。このことは収束する剛性はパッド面積の2分の一乗倍に比例することを示している。面積が小さく突起密度が小さい場合、一定値から外れる理由は、本解析において突起数が少なすぎ、集中力による変形に近づくためであると考えられる。以上のことから面積および突起密度が十分大きい場合、接触剛性は面積の2分の一乗倍に比例するとみなしてよいと考えられる。

上記のことから、接近過程の接触開始点は、突起頂点分散がガウス分布の場合、突起分散の3倍と潤滑剤

Fig. 7: Relationship between the ratio of contact stiffness and contact pad area at each asperity density ($R=2.0 \mu\text{m}$, $h_f=1.0 \text{ nm}$)

膜厚の和で接触し始める。また接触剛性は面積の2分の一乗に比例する。突起密度およびパッド面積が大きくなると、接近過程と分離過程における接触特性のヒステリシスは大きくなり、また接触開始点および分離点では、接触の変化は急であり、吸着力は F_{max} 、接触剛性は一様面王のパッドがディスク面に接触したときの定数倍の一定値にモデル化できると考えられる。

3.3 突起頂点分散の影響 接触パッド面積 $S=20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 、突起密度 $\rho=10/\mu\text{m}^2$ 、突起先端半径 $R=2.0 \mu\text{m}$ 、潤滑剤膜厚 $h_f=1.0 \text{ nm}$ の場合において、突起頂点分散 σ を変化させたときの接触特性の解析結果を図8に示す。図中において点線、鎖線、実線はそれぞれ突起頂点分散 σ が 0.2, 0.5, 1.0 nm の場合である。これらの場合の F_{max} は 241 mN である。図8より、突起分散が小さいほうが接触開始および分離時の接触力の変化が急であり、接触合力 F_c の最小値が小さくなることからわかる。図8(b)の吸着力比に注目すると、突起頂点分散が 0.2 nm の場合、接触開始と同時にほぼ1となっている。これは、他の突起がパッドに接触し引きつけられたとき、その他の突起もその力に引きつけられるが、突起頂点分散が小さい場合、突起頂点分布が密であるため、他の突起が接触しやすいためであると考えられる。一方、突起頂点分散が 1.0 nm の場合、吸着力比は1に近づくものの、その変化は緩やかである。これは突起高さの差が大きいため、一つの突起に吸着力が発生し、バルク的な変形をしても他の突起がパッドに接触する可能性は小さく、また押し込むにつれ接触する突起は増えるが、初期に接触している突起は吸着力より接触反力が大きくなるため、他の突起をパッドから離すように働くためであると考えら

Fig. 8: Effect of the rms value of the asperity height on contact characteristics ($S=20 \times 20 \mu\text{m}^2$, $\rho=10/\mu\text{m}^2$, $R=2.0 \mu\text{m}$, $h_f=1.0 \text{ nm}$); (a) external force; (b) ratio of attractive force to its minimum value; (c) contact force; (d) contact stiffness

れる。また図8(d)から、突起頂点分散 σ によらず、接触剛性の収束値は一定であることがわかる。

現状のディスク面の突起分散は 0.2 nm 以下になりつつあることから、パッドがディスクに接触した場合、ディスク面の突起のほとんどがパッドに接触し、吸着力は F_{max} になると考えられる。また接触剛性も接触と同時にある一定値になると考えられ、接触特性はバルク的な変形が主となると思われる。

3.4 潤滑剤膜厚の影響 接触パッド面積 $S=20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 、突起密度 $\rho=10/\mu\text{m}^2$ 、突起先端半径 $R=2.0 \mu\text{m}$ の場合において、潤滑剤膜厚 h_f を変化させたときの接触特性の解析結果を図9に示す。図中において点線、鎖線、実線はそれぞれ潤滑剤膜厚 h_f が 0.0, 1.0, 2.0 nm の場合である。 $h_f=0.0 \text{ nm}$ の場合、本来表面張力 γ は潤滑剤がある場合に比べて大きくなると考えられるが、ここでは比較のために γ は潤滑剤があるときと同様の値を用いた。

図9(a)より、潤滑剤膜厚が大きいほうが接触合力の最小値が小さくなることからわかる。また図9(b)において、潤滑剤膜厚が 1 nm より 2 nm の場合のほうが、吸着力は急激に変化しているが、図9(d)の接触剛性は 1 nm の場合のほうが急激に変化している。この理由は、潤

Fig. 9: Effect of the lubricant thickness on contact characteristics ($S = 20 \times 20 \mu\text{m}^2$, $\sigma = 0.5 \text{ nm}$, $\rho = 10 / \mu\text{m}^2$, $R = 2.0 \mu\text{m}$); (a) external force, (b) ratio of adhesion force to its minimum value, (c) contact force, (d) contact stiffness

滑膜厚が 2 nm と大きい場合には、軸受パッドのディスクとの接触開始時にほとんどの突起が潤滑剤を介して接触するので吸着力は大きくなるが、この吸着力により突起が引き寄せられても接触反力を生じている突起が少ないため接触剛性は急激に大きくならないからである。一方滑膜厚が 1 nm の場合は、接触し始めると吸着力と共に接触反力を生じている突起の割合が高いので、吸着力の発生は 2 nm の場合よりもやや穏やかであるが、接触剛性の増加はより急激に起こることになる。しかし潤滑剤が少なくなると摩耗耐久性が低下するので、最適な潤滑剤膜厚があると考えられる。

3.5 突起先端半径の影響 接触パッド面積 $S = 10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 、突起密度 $\rho = 30 / \mu\text{m}^2$ 、突起頂点分散 $\sigma = 0.5 \text{ nm}$ 、潤滑剤膜厚 $h_l = 1.0 \text{ nm}$ の場合において、突起先端半径 R を変化させたときの接触特性の解析結果を図 10 に示す。図中において点線、一点鎖線、鎖線、実線はそれぞれ突起先端半径 R が $0.1, 0.5, 2.0, 5.0 \mu\text{m}$ の場合である。図 10 より、突起先端半径が大きいほうが、接触開始および離れるときの力の変化が急であり、ヒステリシスが大きくなることがわかる。これは吸着力が大きくなり、バルクのな変形の影響が大きくなるためであると考えられる。また図 10(d)の

Fig. 10: Effect of the radius of curvature of asperity summit ($S = 20 \times 20 \mu\text{m}^2$, $\sigma = 0.5 \text{ nm}$, $\rho = 30 / \mu\text{m}^2$, $h_l = 1.0 \text{ nm}$); (a) external force, (b) ratio of adhesion force to its minimum value, (c) contact force, (d) contact stiffness

接触剛性に注目すると、接触剛性の収束値は突起先端半径によらずほぼ一定である。このことから、突起の変形ではなく、バルクのな変形が支配的になっていると考えられる。

4. 結 論

突起高さがガウス分布をもつ粗さ接触において、他の突起接触による基礎の変形と突起にメニスカスが生じた場合の接触力、吸着力、接触剛性等の接触特性を現状の磁気ディスクの粗さ条件近傍でパラメータスタディを行い、以下の結論を得た。

- (1) 突起頂点分散が大きく、スライダ・ディスク面の接近量が小さく、突起の変位が小さい場合には、接触特性は突起の変形が主となる。
- (2) 突起頂点分散が小さく、突起密度が大きい場合、接触変位が小さくても接触特性はバルクのな変形が支配的となる。現在使用されているディスク面は、突起頂点分散が小さく、突起密度が大きいことから、接触特性はバルクのな変形が支配的と考えられる。

- (3) バルク変形を考慮した解析モデルを用いると、接近過程と分離過程で接触特性のヒステリシスを示す。また突起密度、突起先端半径およびパッド面積が大きいほど、突起頂点分散が小さいほど、吸着力が大きくなり、ヒステリシスは大きくなる。
- (4) 接触パッド面積、突起密度が大きいほど、また突起頂点分散が小さいほど接近開始から最小の吸着力へと遷移する接近変位が小さい。この場合、吸着力は全ての突起が接触したときの値となり、接触剛性もある一定値となる。

最後に本研究は情報ストレージ研究推進機構（SRC）および日本学術振興会（基盤研究 B）の助成を受けたことを受けたことを付記し謝意を表明する。

文 献

- (1) Ono, K and Oohara, S., "Experimental Identification of Elastic, Damping and Adhesion Forces in Collision of Spherical Sliders with Stationary Magnetic Disks," *ASME J. of Tribology*, Vol. 127, No.2, (2003), pp. 367-377
- (2) 山根正巳, 小野京右, 山浦弘, "ニアコンタクト領域の荒さ接触/潤滑剤の吸着力を考慮した浮上ヘッドスライダの2自由度接触振動解析", 機論, 69-686, C(2003-10), pp. 2638-2645.
- (3) Greenwood, J. A., and Williamson, J. B. P., "Contact of Nominally Flat Surfaces," *Proc. Roy. Soc., Series A295*, (1966), pp. 300-319.
- (4) Webster, M. N., and Sayles, R. S., "A Numerical Model for the Elastic Frictionless Contact of Real Rough Surfaces," *ASME J. of Tribology*, Vol. 108, (1986-7), pp. 314-320.
- (5) Tian, X., and Bhushan, B., "A Numerical Three-Dimensional Model for the Contact of Rough Surfaces by Variational Principle," *ASME J. of Tribology*, Vol. 118, (1996-1), pp. 33-42.
- (6) Nogi, T., and Kato, T., "Influence of a Hard Surface Layer on the Limit of Elastic Contact --- Part I: Analysis Using a Real Surface Model," *ASME J. of Tribology*, Vol. 119, (1997-7), pp. 493-500.
- (7) Bhushan, B., *Handbook of Micro/Nano Tribology*, Second Edition, CRC Press, 1999, pp. 359-362.
- (8) Iida, K., and Ono, K., "Design Consideration of Contact/Near-Contact Sliders Based on a Rough Surface Contact Model," *ASME J. of Tribology*, Vol. 125, (2003), pp. 562-570.