

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2012～2015
 課題番号：24560154
 研究課題名(和文) サブナノメートルの粗さと潤滑膜をもつ球・平面間の吸引・接触特性の解析的研究

 研究課題名(英文) Analytical Study of Adhesive Contact between Sphere and Flat with Subnanometer Roughness and Lubricant

 研究代表者
 小野 京右 (Ono, Kyosuke)

 東京工業大学・工学院・名誉教授

 研究者番号：40152524

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：記録ヘッドの磁気ディスク面への近接・接触時における諸現象を数理的に明らかにした。まずヘッドスライダの磁気ディスク面への近接・接触時における振動現象について、球面ヘッドの凝着力として簡便なJKR理論を用いて、実験的に知られている接触開始時のスライダ振動数の変化のメカニズム明らかにした。次に単分子層以下の希薄潤滑液膜の流動に関する新しい拡散流動方程式を開発し、ヘッドがディスクに接触したときに生じる排除痕が修復される速度を定量的に評価できることを明らかにした。また、1 nm以下の希薄潤滑液膜によるメニスカス弾性接触特性の数値解析法を開発し、液膜厚さにより変化する凝着特性を明らかに明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Various problems encountered in proximity and asperity contact regime of flying magnetic head in magnetic disk storages were theoretically clarified. Firstly, vibration characteristics of head slider in light contact regime was theoretically explained based on the JKR adhesion theory. Secondly, a new diffusion equation for submonolayer liquid film was developed and it was shown that the replenishment flow of lubricant into a depleted groove can be well evaluated by using this equation. Thirdly, numerical analysis method of elastic contact caused by meniscus adhesion pressure was newly proposed and it was shown that many experimental results were consistently explained by elastic meniscus contact analysis under various conditions of lubricant thickness, asperity radius and elastic modulus. Fourthly, asperity parameter values of current magnetic disks were measured. This is necessary for correct evaluation for asprity adhesion contact characteristics in the head-disk interface.

研究分野：トライボロジー

キーワード：ナノトライボロジー ヘッド・ディスクインタフェース 希薄液膜流動 表面分子間力 コンタクトメカニクス ナノメニスカス

1. 研究開始当初の背景

2012 年頃の磁気ディスク装置における磁気ヘッドと磁気ディスク媒体面との浮上すきまは 1.5~2.0 nm で、記録密度は 500 GB/平方インチ程度であった。そこで記録密度 1TB/平方インチの高密度化を目標に、浮上すきまを 1 nm 以下に接近させたときに生じるスライダ振動、潤滑剤との接触による排除された潤滑膜の修復特性の解明が課題であった。また突起接触によるヘッドのディスク面への吸引特性と摩擦・摩耗現象を明らかにする実験的研究がおこなわれていた。これらを解明しようとする理論的研究は、米国では UC Berkeley の Prof. Bogy のグループ、Illinois 大学の Prof. Polycarpou のグループ、シンガポールの Data Storage Institute (DSI) の Liu グループ、および鳥取大学の福井・松岡グループがある。しかし、Bogy, Polycarpou, Liu グループはスライダ振動に関して複雑な数値計算をしているものの、振動数変化に関する物理的解明はほとんどなされていなかった。また福井・松岡グループはミクロンサイズレベルのメニスカスに対する研究を長くしているが、ヘッド・ディスクインタフェース(HDI)のナノメートルスケールのメニスカス現象は解明されていなかった。その原因はディスクの突起特性と希薄液膜のメニスカス特性が不明なため、ヘッド・ディスク間相互作用力が正しく評価されていないためと考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、磁気ディスクのヘッド・ディスク媒体間に生じる物理現象を解明するため、ヘッド・ディスク間の相互作用力を支配している 1 nm 以下の粗さをもつ固体表面の分子間引力と単分子以下の潤滑液膜によるメニスカスを考慮した球・平面間接触特性を評価できる解析法を確立する。まず現在の垂直記録用磁気ディスク面の突起特性を AFM 測定と分析により明らかにし、次に希薄液膜

の突起接触時のメニスカス凝着力の解析手法を開発する。また突起接触による潤滑膜の摺動排除痕の修復特性を明確にして、ヘッド摩耗のない潤滑膜と浮上すきまの条件を明らかにする。更に、これらにより突起接触の van der Waals (vdW) 力、メニスカス力を考慮した球面・平面間の接触特性を用いてスライダの突起接触時の振動特性を明らかにし、記録密度 1 テラビット/平方インチ実現に必須な、浮上すきま約 1 nm の高信頼 HDI 設計指針を明らかにする。即ち、以下の 4 つの課題を明らかにすることを目的とした。

- (1) 垂直磁気ディスクの表面形状を測定し、突起形状パラメータを分析する。
- (2) 弾性変形を考慮した球・平面間のメニスカス接触特性を解析する手法を確立し、ヘッド・ディスク間の吸引力を解明する。
- (3) 1 nm 以下の平均膜厚さをもつ潤滑液膜の修復特性を明らかにできる希薄液膜の拡散流動の基礎式を開発する。
- (4) 突起接触領域におけるヘッドスライダの接触振動特性を明らかにする。

3. 研究の方法

課題(1)の遂行には、まず AFM 装置による磁気ディスク表面の高精度の測定が必要で、次に AFM データから突起特性を分析することが必要である。AFM 測定は東芝の HDI グループに依頼し、突起パラメータの分析は、長岡技科大の柳らが開発し、現在東工大の原精一郎氏が所有している Summit Plus ソフトを使用させていただいた。このため当初原精一郎氏を協力研究者としてお願いした。また東芝の AFM 測定技術向上のため名古屋大学の張賀東氏の支援を得た。

課題(2)に関しては、潤滑液膜が厚いと吸引特性が Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) 理論に適合し、潤滑膜を固定化して流動成分を薄くしていくと吸引特性が Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 理論の特性に適合するとの実験データが報告されているので、この現象を

明らかにするため、1 nm 以下の厚さをもつ希薄液膜のメニスカス特性を解析することにした。流動液膜が薄くなるとメニスカスの Laplace 圧力が高まり、接触面の弾性変形を考慮する必要が出てくる。接触面の局所的な弾性変形を考慮したメニスカス接触特性に関する解析はエネルギー法による解析研究はあるが、接触圧力と変形分布に関する数値解析は初めてである。研究代表者は突起球面と平面の vdW 圧力による弾性接触を解析してきたので、この手法を適用して収束解が得られる数値解法を開発することとした。

課題(3)に関しては、東芝の HDI グループが周囲圧を下げることによってヘッドをディスクに接触させたときに生じる潤滑膜の排除痕の修復特性に関する実験結果を提供してくれたので、この特性を解明できる理論を開発することを目標にした。一般に単分子膜以下の液膜流動特性は分子動力学に頼らざるを得ないと考えられている。しかしマイクロレベルの広い領域の平均的特性を解明することが重要なので、本研究では、連続体理論に基づく理論を開発することとした。

課題(4)に関しては、まず簡単な JKR 凝着理論と 1 自由度スライダモデルにより、接触開始時の振動特性を解明することを第一目標とした。次に突起接触反力、vdW 吸引圧力、突起メニスカス圧力を考慮したより厳密なヘッド・ディスク相互作用力を用いてスライダの振動特性を解明することとした。

4. 研究成果

(1) 垂直磁気ディスク面の表面形状の AFM 測定と突起形状パラメータの分析

東芝の HDI グループに現状装置の気ディスク面の表面形状を測定依頼したところ、様々な努力にもかかわらず垂直磁気ディスク面の磁性粒子が見えないほど分解能が低かった。そこで、名古屋大学の張氏に最近の Bruker 社の Nanoscope を用いて、東芝から提供した磁気ディスク面の表面形状を測定していた

だいた。その結果、AFM 探針の曲率半径は 2 nm 程度に小さくしないと、磁性粒子による突起分解能が得られないことが明らかになった。しかし張氏所有の Nanoscope の測定出力は Summit Plus の入力データ様式と整合性が取れず分析できなかった。そこで、3 年目に張氏の測定条件と測定結果を参考に東芝で測定技術を高めた結果、空間分解能として 500 nm×500 nm の領域を 512×512 の標本点で測定すればほぼ所望の分解能を得られることが分かった（測定機器は Nanoscope）。そこで延長した 4 年目に、記憶容量 500 GB/ディスクの異なる 5 製造会社の実用磁気ディスク装置の磁気ディスク円板の表面形状を測定していただき、Summit Plus ソフトを用いて、表面粗さ高さと表面突起特性パラメータを分析した。その結果、 $R_a = 0.22 \text{ nm}$ の滑らかな磁気ディスク面の実効面積は完全平滑面の 2 倍ある、突起密度は $5044 \mu\text{m}^{-2}$ 、突起半径の平均値は約 20 nm で、接触に寄与する高さの大きい突起半径は 10 nm 程度である、等を明らかにした。上記グループらの解析的論文では、突起密度が $100 \mu\text{m}^{-2}$ 前後、突起半径は 1 μm 前後が用いられているので、本研究成果はインパクトがある。本成果は、既に日本機械学会論文として掲載され、日本トライボロジー会議春 2016 で発表した。2016 年 7 月にアジア太平洋磁気記録会議で発表し、IEEE Trans. on Magnetism に投稿する予定である。

(2) 弾性変形を考慮した球・平面間のメニスカス接触特性を解析する手法を確立し、ヘッド・ディスク間の吸着力を解明する。

筆者の実験的・解析的研究によれば、ガラス球面と磁気ディスク面との吸引力特性は固体面としての vdW 力より液膜によるメニスカス力によるものと予想された。そこで、単分子以下の液膜厚さにおいてもメニスカスが形成されるという仮説を基に、球・平面のメニスカス接触モデルにおいて、接触面の弾性変形を考慮したメニスカス接触特性を明

らかにする数値解法を開発した。本数値解法は近似解法であるが、計算された平面の変形は広いパラメータ範囲で接触球面とよく一致する結果を与えることが明らかになった。そこで、半径 2 mm, 2 μm, 20 nm のガラス球面が固定層と流動層からなる潤滑膜が塗布された磁気ディスク面と接触するときのメニスカス接触特性に及ぼす流動液膜厚さと接触面の等価ヤング率の影響を明らかにした。本研究で得られた主な事項を以下に記す。

半径 2 mm のガラス球と磁気ディスク面とのメニスカス弾性接触力特性は、流動液膜厚さが 1 nm 程度以上に大きくなると DMT 理論に漸近する。また流動液膜厚さが 0.4 nm 以下に小さくなると、弾性変形効果のため JKR 理論に近くなる。この特性は実験結果報告と整合する。

外力として観測されるメニスカス吸引力の押し込み量に対する特性は、固体接触している範囲では流動液膜の厚さにはほとんど影響されない。メニスカス吸引力の最大値は固体接触が分離する直前に生じ、その大きさは流動膜厚さに関係なくほぼ $4\pi R\gamma$ (R : 球半径, γ : 表面張力) に等しい。固体接触しない領域におけるメニスカス吸着力は分離量に比例して減少する。メニスカス破断するときのメニスカス長さは流動液膜厚さの 2 乗以上で増大する。

β 流動液膜厚さが 0.3 nm 程度に小さくなると、メニスカス破断時のメニスカス長さがゼロとなり、メニスカス破断と固体接触分離が同時に生じるようになる。このときの液膜厚さはメニスカス接触から固体接触への遷移点に相当し、ディスク面の液膜が接触により球面に移着しなくなる条件と考えられる。この流動液膜厚さは磁気ディスク面の潤滑剤がヘッドへ付着するのを防ぐ現在の流動液膜厚さ 0.2~0.3 nm に整合している。

本解析結果は 2015 年日本機械学会論文として掲載された。また 2014 年 11 月、米

国の Frontier Tribology Conference で発表し注目された。しかし英論文の作成は予算不足のため遅延し、2016 年の新規計画の科研費を用いて作成投稿する予定である。

(3) 1 nm 以下の平均膜厚さをもつ潤滑液膜の修復特性を明らかにできる希薄液膜の拡散流動の基礎式を開発する。

ヘッドがディスク面に突起接触したときのヘッド面のマイルド摩耗は、潤滑剤の流動成分を多くすると低減できることが実験的に明らかにされており、このため単分子層潤滑膜の流動成分が 20% 程度しかない希薄液膜の排除痕への修復特性を解析した。まず東芝から提供されたヘッド接触により排除された流動層の修復特性の実験結果を、従来の連続体理論によりシミュレーションした結果、等価粘度をバルク値の 50 倍程度に見積もれば、連続体理論により修復特性をほぼ定量的に評価できることを明らかにした。これに基づき、突起接触により排除された排除痕が 50% 修復できる、排除痕幅、潤滑剤粘度、潤滑膜厚さの関係を評価する設計チャートを提案した。また粗さ分布特性から 50% 修復できるヘッド・ディスク平均面間距離を求める方法も示した。この結果は日本機械学会論文と共に、Tribology Letters に掲載された。

球面と平面の nm レベルの狭いすきまに押し込まれた液膜の往復摺動による粘度の測定によれば等価粘度はバルクの 30 倍程度まで増大することが示されているが、本解析モデルに近い自由表面における希薄液膜の粘度を測定する Blow-off 実験結果によれば、粘度の増加はバルク値の数倍程度にすぎないことが報告されている。また従来理論は液膜密度がバルクと同じと仮定した単層以上の液膜に対する連続体理論であり、単層膜以下の希薄液膜に適用することに矛盾がある。

そこで平均膜厚が単分子層の 20% 程度しかない希薄液膜に対して適用でき、修復特性と粘度特性の実験結果を合理的に説明でき

るような連続体理論に基づく拡散流動の基礎式を新たに提案した。基礎となる概念のひとつは、計測される単分子層以下の潤滑膜厚さは、被覆率 1 の単分子膜の密度に対する分子密度の比で表現されるとするものである。Hamaker 定数も膜厚に比例するので分離圧式も従来の式と異なる。希薄液膜流動に関する他の重要な新機軸は、単分子層以下の流動に対応する新しいポアゼイル流れの基礎式を導出したことである。これらのモデルと基礎式に基づき、自由表面をもつ薄膜の質量保存則を用いて新しい希薄液膜に関する拡散方程式を導出した。得られた単分子層以下の希薄液膜の拡散方程式を用いて液膜境界の拡散特性、矩形排除溝の修復特性および既報の修復特性の実験結果をシミュレーションし、従来の連続体力学に基づく拡散方程式と比較した。また、流動成分膜厚さが 0.24 nm の単分子潤滑膜にヘッドの接触摺動により形成した最大深さ 0.035 nm の排除痕が修復される過程の実験結果を本理論で解析した。その結果、バルク値の数倍の粘度と合理的な Hamaker 定数を用いることにより数時間から数日にわたる修復特性がよく把握できることが明らかになった。本理論は日本機械学会論文と Tribology Letters 論文として公開された。Waltman は 2016 年の Tribology Online の論文において、単分子膜以下の希薄液膜の拡散係数が本理論により正しく評価できることを示している。本理論の 2 次元長波方程式や Reynolds 方程式への普遍化は平成 28 ~ 30 年度の科研費研究（基盤研究(C) 16K06039）の課題として行われる。

(4) 突起接触領域におけるヘッドスライダの接触振動特性の解明。

2010 年代の初期は、高密度化のため、ヘッドを磁気ディスク面にわずかに接触させる接触記録ないし潤滑膜上にヘッドを Surfing させる記録方式の可能性が追及された。接触開始時にはヘッドサスペンションに

起因する 20 ~ 30 kHz 以下の低周波のスライダ振動が生じ、更にヘッドの接触量を増していくと、100 kHz 近傍のピッチ 1 次(P1)モードが、最後に 200~300 kHz のピッチ 2 次(P2)モードが生じることが知られている。この接触時の振動特性に関する理論解析は Bogy グループ、Polycarpou のグループ、Liu グループによってなされたが、上記の振動モードの変遷機構は解明されていなかった。

そこで TFC ヘッドスライダの吸引接触特性を JKR 理論により評価し、ディスクの微小うねりによる 1 自由度ヘッドスライダモデルの接触振動特性を解明した。得られた主な諸点を以下に記す。

ヘッド接触量を大きくしていくと、吸引力によりスライダの共振周波数 f_r が零から逐次増加して行く。上下方向の振動により接触力が変化するので、摩擦力も同じ周波数で変化する。このため、接触直後はトラックずれ方向とトラック方向の 50 kHz 以下の減衰比の小さいスライダ・サスペンション系の振動が励振される。次に f_r が P1 モードの固有振動数 f_{P1} に一致する近傍で浮上スライダの P1 モードが励振される。更に f_r が浮上スライダの P2 モードの固有振動数 f_{P2} と一致する近傍で、P2 モードの共振が生じる。更に接触量を増加させると、接触剛性が高くなるため、接触スライダの f_r が浮上スライダとしての f_{P2} より大きくなっていく。

TFC ヘッドの平均面の接触圧力は 50 MPa 以下であり、この程度の接触圧力下では潤滑膜は接触面から排除されない。よってディスク面の表面粗さと突起高さを更に原子間平衡距離レベルに低減させて、接触突起の真実接触圧力を平均面圧に近くできれば、On demand 接触記録に必要な摩耗信頼性を得ることができると予想される。

本理論は日本機械学会論文および Tribology Letters 論文として掲載された。しかし本論文では簡便な JKR 理論を用いていた

ので、吸引力を過大に評価していた。またスライダ負荷力を一定に保ちながら浮上すきまを小さくしていく TFC ヘッドスライダ固有の静的釣り合い条件を考慮していなかった。そこで、TFC ヘッドスライダの静的浮上力特性とすきま変動による動的浮上力特性の相違を考慮し、また突起接触による厳密なヘッド・ディスク吸引・接触力を用いて、ディスク微小うねりによって励起されるヘッドスライダの振動特性を時刻歴解析した。その結果、従来明らかにされなかった表面吸引力によって生じる静的不安定領域でのスライダの不可思議な跳躍現象や 100 kHz 以下のすきま変動のメカニズムを解明することができた。これらの成果は 2015 年 6 月の MIPE 国際会議、2016 年 3 月の機械学会 IIP 部門講演会で発表し既に本機械学会論文集に投稿している。今後 2015 年 6 月の米国 ISPS 国際会議で発表し Tribology Letters 論文として投稿する予定である。なお、スライダの 2 自由度モデル、サスペンション系の影響などを考慮した発展的理論研究は新規科研費研究で行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

小野京右, 垂直磁気ディスクの表面形状の測定・分析結果, 日本機械学会論文集, 査読有, 82 巻, 2016, DOI:10.1299/transjsme.15-00633.

小野京右, メニスカス弾性接触特性の解析, 日本機械学会論文集, 査読有, 81 巻, 2015, DOI:10.1299/transjsme.2014-00673.

Kyosuke Ono, Diffusion Equation for Spreading and Replenishment in Submonolayer Lubricant Film, Tribology Letters, 査読有, Vol. 57, 2015, DOI:10.1007/s11249-014-0455-4.

小野京右, 単分子層以下の流動潤滑膜の拡散・修復特性に関する基礎方程式, 日本機械学会論文集, 査読有, 80 巻, 2014, DOI:10.1299/transjsme.2014ms0271.

Kyosuke Ono, Replenishment Speed of Depleted Scar in Submonolayer liquid Film, Tribology Letters, 査読有, Vol. 52, 2013, pp. 195-203.

小野京右, 潤滑薄膜の修復特性解析に基づく磁気ヘッドの摩耗耐久性評価, 日本機械学会論文集, 査読有, 79 巻, 2013, pp. 242-257.

Kyosuke Ono, Design Theory and Vibration Characteristics of a Contact Head Slider, Microsystem Technologies, 査読有, Vol. 19, 2013, pp. 455-467.

小野京右, コンタクトスライダの設計理論と接触振動特性, 日本機械学会論文集, 査読有, 79 巻, 2013, pp. 90-106.

〔学会発表〕(計 16 件, 国際会議のみ記す)

Kyosuke Ono, Analysis of Micro waviness-Excited Vibration of a Flying Head Slider in Asperity Contact Regime, ASME/JSME Jt. MIPE International Conference, 2015/6/15-17, 神戸.

Kyosuke Ono, Analysis of Elastic Contact Due to Meniscus Adhesion Force, STLE Tribology Frontiers Conference, 2014/10/26-28, Chicago (USA).

Kyosuke Ono, Diffusion Equation for Spreading and Replenishment in Submonolayer Lubricant Film, ASME/ISPS Conference, 2014/6/23-24, Santa Clara (USA).

Kyosuke Ono, Elastic Contact Analysis Due to Meniscus Adhesion Pressure, International Nanotribology Forum, 2014/1/10-12, Kerala, Inida.

Kyosuke Ono, Analysis of the Elastic Contact Due to the Meniscus Force, World Tribology Conference, 2013/9/8-13, Torino (Italy).

Kyosuke Ono, Experimental and Theoretical Study in Replenishment Speed of Depleted Scar in Submonolayer Lubricant, ASME ISPS Conference, 2013/6/24-25, Santa Clara (USA).

Kyosuke Ono, Design Theory and Vibration Characteristics of a Contact Head Slide, ASME/JSME Jt MIPE Conference, 2012/6/18-19, Santa Clara (USA).

Kyosuke Ono, Evaluation of Head Wear Durability from Analysis of Asperity Contact and Replenishment Speed of Submonolayer Lubricant, ASME/STLE Jt Tribology Conference, 2012/9/8-10, Denver (USA).

Kyosuke Ono, Experimental and Theoretical Study on Replenishment Speed of Depleted Scar in Submonolayer Lubricant, ASME information Storage and Processing Systems, 2013/6/24-25, Santa Clara (USA).

〔図書〕(計 1 件)

三矢保永, 小野京右, マイクロ・ナノスケールのトライボロジ (Mathew Mate, Tribology on Small Scale, Oxford University Press の邦訳本), 2013, 吉岡書店, 総ページ数 375.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 小野京右, 東京工業大学・工学院・名誉教授, 研究者番号: 24560154
- (2) 研究分担者 なし.
- (3) 連携研究者 なし.