

令和元年6月6日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06039

研究課題名(和文) サブナノメートルの浮上すきまにおけるスライダの振動と液膜潤滑機構の理論的解明

研究課題名(英文) Theoretical Study on Touchdown Vibration of Subnanometer Flying Head Slider and Molecularily Thin Liquid Film Lubrication

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)： 実測した磁気ディスク面の粗さ突起特性とDLC膜、固定・流動潤滑膜を考慮してヘッド・ディスク表面間力を定量的に評価できる理論を確立した。次にこれを用いて、実用装置におけるヘッド・ディスク接触時の振動特性を、表面力の不安定域におけるディスク面うねりによるスライダの応答解析として明らかにした。次に液膜と固体面との分離圧式を、分子間引力の積分により厳密に導出し、これを用いて希薄液膜および多層膜の厳密な拡散流動方程式を導出し、実験データをよく評価できることを示した。更に上記拡散流動式を、相対すべり面で挟まれた流体潤滑膜に拡張し、固体表面に高粘度の吸着分子層をもつ液膜の流体潤滑方程式を始めて定式化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気ディスク装置の浮上ヘッド・ディスク間すきまは分子間引力が支配する1 nm以下になっており、分子間力を考慮した解析理論が必要である。本研究により、近接・接触二面間の表面力を定量的に評価できる統計的な力学理論を確立すると共に、これによりヘッドスライダの近接・接触時の動的現象を始めて理論的に明らかにした。また従来経験的に用いられてきた液膜と固体面との引力式やこれに基づく液膜の拡散現象に関する厳密理論を確立し、分子間力に起因する現象を連続体力学で効率よく評価できることを始めて明らかにした。さらに従来から実験的に評価されてきた添加剤による境界潤滑機構を理論的に評価できる潤滑方程式を開発した。

研究成果の概要(英文)： By measuring the surface textures of magnetic disk and considering the vdW force of Diamond-like-carbon layer, bonded and mobile lubricant layers, and asperity meniscus force, I established a theory of surface force between head and disk surface. Then, by using this surface force, I analyzed microwaviness (MW)-excited vibration of the head slider during touchdown and found that the experimental complex touchdown behaviors are caused by the MW-excited vibration in relation to the static instability of surface force. Next I derived the strict disjoining pressure equation by integrating molecular forces based on Lennard-Jones potential. Then by using the strict disjoining pressure, I newly derived rigorous diffusion equation for sub-monolayer and multi-layer liquid films. The validity of sub-monolayer diffusion equation was confirmed by experimental data. Moreover, as an extension of this theory, I developed a new Reynolds equation used for high viscosity boundary layer lubrication.

研究分野：機械力学，トライボロジー

キーワード：ヘッド・ディスクインタフェース 表面力 分子間力 ヘッドタッチダウン 分離圧式 希薄液膜拡散
方程式 弾性メニスカス接触理論 高粘度境界潤滑方程式

1. 研究開始当初の背景

1.1 磁気ディスク装置のヘッド・ディスクインタフェース技術の課題

データセンタ、PC、AV家電等の記憶装置である磁気ディスク装置は、現在、記録密度 1.5 テラビット/平方インチを有し、3.5 インチディスク装置で 6 テラバイトが達成されているが、ビッグデータ時代を迎えて高密度・大容量化の要望は強く、数テラビット/平方インチの記録密度の実現が要望されている。このため熱補助記録等の新記録原理技術の開発と共に、当面現在の垂直記録方式で重ね書きする「瓦記録」により高記録密度化が進んでいる。高記録密度化のためには、微小化されたビットセルへのヘッド・記録媒体間の信号変換効率を高めることが必須であり、このため空気軸受スライダで浮上しているヘッドと周速 20 m/s 以上で回転しているディスク媒体面間の記録再生時の間隙を、現状の約 1 nm から 0.5 nm 程度に半減することが要求されている。

現在磁気ディスク内の記録再生ヘッドは空気軸受スライダ後端に薄膜技術で形成されており、非記録再生時は、ヘッド面は約 10 nm のすきままで浮上しており、記録再生時だけヘッド面をディスク面に約 1 nm まで接近させる Thermal Fly-height Control (TFC) 技術が使われている。これは $\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiC}$ 材の微小スライダ(長さ 0.85 mm×幅 0.7 mm×厚さ 0.23 mm：フェムトスライダと呼ばれる)の後端に記録生素子を薄膜技術で形成する際に、ヘッド面の数十ミクロン内部に heater 用コイルを形成する。そして記録再生時にこの埋設した heater に電流を流してヘッド部を加熱し、ヘッド面の熱膨張突出により、まずディスク面へ接触させる。このヘッド面のディスク面への接触の検出のため、さらにヘッド面近くに微小コイルが埋設してあり、接触熱による抵抗値の増加から接触を検知し、その状態をすきまゼロとする。そしてそのときの heater 電力からヘッド面が 1 nm だけ離れる(backoff と呼ぶ)ように heater 電力を小さくして浮上すきまを設定する。このためあらかじめ heater への入力電力とヘッド面すきまとの関係を校正しておく。これから分かるように、ヘッド面のディスク面へのすきま設定操作には Touchdown(TD)特性が重要で、Touchdown-Takeoff の応答にヒステリシスがあってはならない。また TD 特性の再現性も重要で、ディスク面とヘッド面との記録再生のすきまを 0.5 nm にするには TD 操作による浮上すきま設定値の再現性が誤差 0.05 nm 以下で実現されなければならない。

しかしヘッド・ディスク間隙を小さくすると、突起接触部の潤滑薄膜による架橋ないしメニスカス形成や粗さ突起接触による van der Waals (vdW) 吸着力がスライダ浮上力より大きくなり、静的不安定すきま領域が生じることによるスライダの浮上すきまの跳躍現象が観測されている。また磁気ディスク面の微小うねりが大きくなると、近接領域で、低周波領域成分をもつ顕著に大きいすきま変動が生じるという非線形現象も観察されている。また TD 現象は磁気ディスクの内周、中周・外周で異なることも知られている。

そこでこれらの TD 現象のメカニズムを解明し、何が最も標準的で正常な応答であるかを明らかにすることが強く望まれている。一方では、HDI の摩耗信頼性を保つために必須の潤滑膜は単分子層となり、更に潤滑膜の固定率を 85%程度に高めて、表面力の不安定要因である流動層は単分子膜以下になっている。しかし流動成分を無くすると、間欠突起接触時のヘッド摩耗が大きくなることも実験的に知られており、単分子層以下の希薄液膜の流動・修復特性、潤滑特性を解明することも重要な課題になっている。

従来、TD 特性の最適化と潤滑膜の最適化は専ら実験的に試行錯誤的に探求されてきた。そこでこれらの TD 現象のメカニズムを解明し、何が最も標準的で正常な応答かを明らかにすることが重要な課題になっている。このためには、まず、(1)Diamond-Like Carbon (DLC)膜の上に単分子層の固定膜と流動膜をもつ面とヘッド面間の表面粗さをも考慮した表面力を理論的に評価できる理論を開発することが必要である。次に、(2)その表面力を用いて浮上スライダの TD 特性を解析し、上記の現象のメカニズムを明らかにし、現実的で理想的な TD 特性を示し、且つ主要設計諸元の TD 特性に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。また、(3)単分子層以下の希薄液膜の流動拡散特性の基礎理論を確立し、希薄液膜の修復特性を明らかにすること、および(4)突起接触時の希薄液膜の潤滑特性を解析できる理論的基礎を確立することが望まれる。

1.2 ヘッド・ディスク間の表面間引力と潤滑膜の流動に関する学術的研究の経緯

ヘッド・ディスク間の分子間表面力に関する学術的研究は、2003～2006 年頃、当時使用されていたピコスライダ(長さ 1.25 mm×幅 1.0 mm×厚さ 0.3 mm)がディスクに吸着し、跳躍振動する現象の原因解明に関して行われた。UC. Berkeley の Bogy らは、ヘッドスライダと磁気ディスク面間の vdW 分子間引力に基づく静的不安定理論を提案した[Ambekar et al. 2006]。一方筆者らは、ガラス球を各種の厚さの潤滑液膜をもつ磁気ディスクに衝突させる跳躍運動の実験結果[Ono & Nakagawa, Tribology Letters 2008]から、メニスカス力説を提案し、メニスカス吸引力によりピコスライダが自励跳躍振動することを明らかにした[Ono & Yamane ASME J. Tribology, Vol. 129(1) and (2), 2007]。当時どちらが正しいかについての論争があったが、現在ではスライダ機構と潤滑膜特性の相違により両者のいずれかの現象が強く現れたことが分かっている。

その後 2005 年頃、スライダの質量を 1/3 以下に微小化したフェムトスライダの採用により自励跳躍振動を生じないピコスライダに TFC 技術を組み込んだヘッドスライダが開発され、また単分子潤滑膜層の固定率を 80%程度とし、流動層厚さ 0.2～0.3 nm にすることにより潤滑膜のメ

メニスカスを低減させつつ突起接触による潤滑膜修復特性を維持して、ヘッド・ディスク間すきま 1~2 nm の高信頼記録条件を実現してきた。

2010 年頃より、今後更に浮上すきまを 1 nm 以下とし、接触記録の可能性も調べるため、フェムトスライダの TD 特性が実験的に研究され上記の不可解な諸現象が明らかにされた。これらの TD 現象に関する理論的研究は 2010 年代の前半に、UC. バークレーの Bogy らおよび Illinois 大の Polycarpou らにより行われた。そこでの表面力理論は、接触突起と非接触突起の vdW 力と液膜の vdW 力積分する Stanley-Etson-Bogy(SEB)理論[1990]に基づいている。Bogy らはスライダ浮上力を厳密に計算し、更にサスペンションの多自由度振動特性をも考慮した TD 特性の解析を行ったが、TD 時における上記の特異現象は解明されなかった。

これに対して筆者は、HDI 作用力は接触突起におけるメニスカスによる吸着力が支配的であるとの立場をとりつつも、比較のため Lennard-Jones (LJ)圧力を用いた球面・平面の弾性接触特性の数値解析研究を行った。即ち、実際の TFC ヘッドスライダの球面・平面接触問題に関して、突起の弾性変形だけでなく、平均面の弾性変形をも考慮し、且つ粗さ平均面近傍および谷部を含むすべての非接触面の LJ 表面力を考慮した粗さ接触理論を提案し、跳躍吸着現象を厳密に評価した。その結果、突起半径が小さく、突起密度の高い垂直記録媒体の vdW 力による吸着力は実測される吸着力よりかなり小さく、よってメニスカスが支配的であることを明らかにした[小野, 機論, 2011, Ono, J. Adhesion Science and Technology, 2010].

1.3 研究代表者の先行研究(基盤研究 C 平成 23~27 年度)における研究成果

先行基盤研究(C), No. 24560154 「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」において、上記の直面する課題を探究した。即ち、まずヘッド接触振動のメカニズムを解明するため、JKR 理論に基づく吸引力による空気軸受剛性の低下を考慮してディスク面うねりに対する追従性を解析し、接触開始領域でスライダ支持機構の固有振動数成分が励起され、押し込み量増加につれスライダ振動モードが励起されることを示した[小野, 機論 2013].

一方、厚さが 0.5 nm 以下の流動潤滑膜が突起接触により除去されたときの修復特性を従来の連続流体に対する拡散方程式で解析すると、等価粘度をバルクの値の 50~100 倍にしなければならないことを明らかにした[小野, 機論 2013, Ono, Tribology Letters 2013]. そこで単分子層以下の希薄液膜では液膜厚さが液膜密度のバルク密度との比で定義されることを考慮して、液膜と固体面の密度の積を含む vdW 力の強さを示す係数である Hamaker 定数が液膜厚さに比例するとする新しい分離圧式を導入した。さらにこの分離圧式を用いて単分子膜以下の液膜に関する新しい 1 次元拡散方程式を定式化し、単分子膜以下の液膜の粘度の実測値を用いて実際の修復特性や拡散係数が評価できることを示した[小野, 機論, 2014, Ono, Tribology Letters 2015].

更に、液膜厚さが 1~0.3 nm の領域でのメニスカス弾性接触特性を数値解析した。磁気ディスク面とガラス球面との凝着力に関する実験結果が、従来固体面の表面エネルギーによると考えられてきたが、メニスカス弾性接触モデルで説明できることを明らかにした[小野, 機論, 2015].

2. 研究の目的

上記の磁気ディスク装置の HDI に関する技術的課題と従来の研究状況および筆者の先行研究の成果を基礎に、ヘッドスライダの近接・接触時の振動現象と単分子層以下の希薄液膜の拡散流動特性を解明するため、以下の研究課題を達成することを目的とした。

- (1) サブナノメートルの粗さ突起を考慮して、ヘッド・ディスク間の表面力を明確にするため、まず市販磁気ディスク面の粗さ突起特性を明らかにする。
- (2) 計測した磁気ディスク面の粗さ突起接触理論を用いて DLC 保護膜と固定・流動潤滑膜層の vdW 力と流動潤滑膜の突起メニスカス特性を考慮して、ヘッド・ディスク面間距離が 1 nm 以下の近接・接触時の表面力を定量的に評価できる理論を確立する。
- (3) ヘッド・ディスク面間の表面力とスライダ空気軸受力の和を用いてヘッドスライダの近接・接触時のヘッド作用力特性とディスク面の微小うねり(MW)によって励起される振動を解析し、loss of contact 現象や MW の大きさによって顕著に変化するすきま変動のメカニズムを明らかにする。また実用機のヘッドスライダの磁気ディスクの内、中、外周位置によって異なる TD 特性の相違のメカニズムも明らかにし、0.5 nm の安定すきまを実現する HDI 設計指針を示す。
- (4) 薄い液膜の固体面上での濡れ特性や凝集特性は、液膜と固体面との引力である分離圧式により支配される。その分離圧式は分子間力である Lennard-Jones Potential に対応して 3 種類ぐらいの表現がある。しかしそれらの導出根拠は不明で、厳密な導出は行われていない。既に筆者は磁気ディスクの潤滑膜現象の分野で使用されてきた分離圧式に疑問をもち、単分子層以下の希薄液膜に対する新しい分離圧式を提案しその有効性を示している。しかしこれらの分離圧式の理論的根拠が弱いので、新たに分子間引力を積分することにより厳密な分離圧式を導出し、さらにこれを用いて液膜の粘度変化をも考慮した拡散流動方程式を導出し、薄膜流動現象の基礎方程式を確立する。
- (5) 流体潤滑分野では添加剤の吸着分子層による高粘度層の特性が明らかにされつつある。そこ

で HDI における接触突起部の潤滑機構を解明する予備研究として、上記の拡散方程式導出法を相対運動する固体壁に挟まれた潤滑流体の圧力を求めるレイノルズ方程式に適用し、高粘度化層をもつ液膜の潤滑を解明できる新たな潤滑方程式を提案する。

3. 研究の方法

以下の手順で研究を進めた。

平成 28~29 年度の研究

- 1) 市販磁気ディスクの表面テクスチャ特性の測定分析。異なる 5 社のベンダーの磁気ディスクのテクスチャの AFM による測定では東芝の HDD 開発グループの協力を受けた。
- 2) 微小粗さをもつ球面ヘッドとディスク間の表面相互作用力の解析
- 3) 近接・接触領域におけるヘッドスライダのディスク微小うねり励振応答特性の解析
実際の磁気ディスク装置のタッチダウン特性の詳細データに関して日本発条 (NHK) 社の協力を受けた。

平成 29~30 年度の研究

- 1) 単分子以下の希薄液膜に関する分離圧式と拡散方程式の理論的導出
- 2) 高粘度層をもつ潤滑液膜の流体潤滑方程式の開発

4. 研究成果

4.1 現状の 500 GB/板の磁気ディスク面の振幅パラメータと突起パラメータの測定・分析

東芝の HDD の開発グループの好意的協力により、市販の異なる 5 社の 500GB/板の磁気ディスクの表面テクスチャの AFM 測定データを得ることができた。そこでこれを分析ソフト「Summit plus」で分析した。測定結果の詳細は日本機械学会論文「垂直記録磁気ディスクの表面形状の測定・分析結果」[1]、および IEEE Transaction on Magnetism 論文「Surface Texture Parameters of Perpendicular Magnetic Recording Disks」[2]に掲載されている。粗さ高さの代表的パラメータである中心線平均粗さ Ra の平均値は 0.224 nm、2 乗平均平方根値 Sq は 0.249~0.32 nm で 5 種の平均値は 0.281 nm である。またスキューネスはゼロに近く、クルトシスは 3 に近い値なので、粗さ高さは正規分布と見なすことができる。また突起接触における表面力を解析するために必須の突起パラメータ値は、突起平均高さ 0.49 nm、その標準偏差 0.21 nm、突起密度 5044 μm^{-2} 、突起半径 20 nm であることが明らかになった。最初に接触する高い突起の曲率半径は突起半径と突起高さの相関分布から 15 nm 程度に小さいものが多かった。

4.2 磁気ディスクの表面圧力とヘッドに作用する表面力の解析

ディスク表面の DLC 膜+固定潤滑膜+流動潤滑膜の三層を考慮して、接触突起と非接触突起の vdW 力および流動膜によるメニスカス力を総和する表面力の理論式を確立した。各圧力成分の分離量に対する変化、ヘッド面とディスク面の平面と見たときの表面圧力およびヘッド球面に作用する表面力のヘッド・ディスク面間距離に対する特性に及ぼす固定率および潤滑液膜の影響の詳細は、「トライボロジスト」に掲載された論文「単分子潤滑膜で被覆された Diamond-Like-Carbon (DLC) 面の表面力の理論的解明」[3]および Tribology Online 論文「Numerical Analysis of Surface Force of Diamond-Like Carbon Surface Coated with Monolayer Lubricant Film」[4]に述べられている。解析で明らかになった表面力の主な特性は、(1)潤滑剤の固定率がゼロのときメニスカス力が支配的で最も表面引力が大きくなる。(2)固定率 BR が大きくなるに従い、また液膜厚さ T_L を小さくするほどメニスカス力による表面引力は低下するが、BR = 0.85 のとき表面力は潤滑膜厚さ T_L に無関係となる。(3)BR=1 の固定成分のみの場合には、潤滑膜厚さ T_L を小さくした方が表面力が大きくなる。これは表面エネルギーの小さい潤滑膜厚さが小さくなると、その下にある表面エネルギーの大きい DLC の表面引力の効果が強くなるからである。(4)このことから流動膜をゼロにした方が表面力は小さくなるが、膜厚さ T_L により表面力が変動するので表面力の膜厚さに関するロバスト性の観点からは BR = 0.85 が最適といえる。(5)現在の固定率は 0.85 程度といわれており、本理論により現在の実機における固定率が、膜厚変化に対する表面力の感度が最低になる最適条件であることが明らかになった。また、(6)BR=0.85 の場合、潤滑膜厚さが 0.6 nm 近傍で表面力の最小値がわずかではあるが最小となる。よって今後膜厚さを 0.6 nm と減少させると表面引力が最小になりむしろ望ましい状態になることが明らかになった。

4.3 浮動ヘッドスライダの接触過程におけるディスク微小うねり励振振動の解析

上記の表面力とヘッドスライダの浮上力との和であるスライダ作用力を用いて、1 自由度スライダモデルのディスクうねりによって励起されるすきま変動を数値シミュレーションし、磁気ディスク面の微小うねりの大きさ、スライダ作用力の静的不安定領域の大きさのスライダ振動に及ぼす影響を調べた。解析によって明らかにされた主な事項を以下に記す。

(1) TFC ヘッドのディスクとの設定すきま h_s を低減していく TD 過程 ($F_t(h_s) = 0$ が成立する)において、スライダに作用する合力 F_t が極大・極小値をもつ場合には、極大値と極小値の間の h_s で静的不安定になる。この領域では $F_t(h) = 0$ の釣り合い条件を満たす浮上すきま h が 3 つの解をもつので、複雑な跳躍現象を呈する。このとき MW により励起されるすきま変動は MW の大きさによって異なる。まず、MW の rms 振幅が 0.1 nm 程度以下で不安定領域幅より十

分小さい場合には、 F_t が極大値となるすきまに h_s が近づくと、極大値に近い $F_t=0$ を満たす小さなすきま h_1 に跳躍し、その位置で共振応答特性を示す。設定すきまを更に小さくし極大・極小値の間の静的不安定領域に入ると、 $F_t=0$ を満たす小さい方の安定平衡すきま h_1 で MW 励振振動し続ける。しかし h_s が極小値を与えるすきまに近づくと、 $F_t=0$ を満たす完全浮上領域の大きな安定平衡すきま h_2 に跳躍する。 $F_t(h_s)$ の値が極大値を越える程度に更に h_s が小さくなると、浮上すきまは h_2 から h_1 へ跳躍し、 h_s の平衡点で安定に振動するようになる。

(2) 上記(1)項において、MW の rms 振幅が 0.5 nm 程度に大きい場合には、上記の跳躍現象が現れる領域で、極大値と同じ値をとる合力曲線の小さい方の安定すきま h_1 と極小値と同じ値をとる大きい方の安定すきま h_2 との間ですきまが大きくランダム振動する。このすきま変動は 100 kHz 以下の低周波数成分を含んでいる。このすきま変動は摩擦力の変動を生じるので、100 kHz 以下のヘッドサスペンション系の振動が励起される原因と考えられる。

(3) 空気軸受の浮上力の剛性を高めて極大値と極小値の差を小さくすると、上記(1)項の現象が現れる設定すきまが F_t の変曲点を与えるすきま近傍に狭まる。更に空気軸受浮上力の剛性を高めて合力が不安定域をもたず単調減少関数になるようにすると上記の現象は無くなる。しかし F_t の剛性による共振周波数が 100 kHz 以下になるとスライダの MW に対する追従性が低下する。近接領域のスライダの MW に対する追従性を高めるには合力の剛性による最小の共振周波数を 100 kHz 以上の極力高い値にすることが重要である。

(4) Canchi and Bogoy (2010) が見出した loss of contact 現象は上記(1)項のメカニズムに起因すると理解される。また Xu ら (2013) が報告している MW の大きいディスクの場合、近接領域で 100 kHz 近傍のすきま変動が現れる現象は上記(2)項の現象に対応していると理解される。

この研究成果は日本機械学会論文「浮動ヘッドスライダの近接・接触領域における微小うねり励起振動の解明」[5]、ASME Journal of Tribology 論文 "Analysis of Microwaviness-Excited Vibrations of a Flying Head Slider in Proximity and Asperity Contact Regimes" [6]に掲載された。

本論文後、スライダのサスペンション機構の製造メーカである日本発条(NHK)社から実機におけるヘッドスライダの TD 特性のデータをいただいた。そこでこの実験データに対する解析を行い、実用磁気ディスク装置における TFC ヘッドスライダの内周、中周、外周の TD 過程の振動特性の相違はヘッドスライダの空気軸受剛性の相違で生じることを明らかにした。また希薄液膜による突起潤滑の可能性も明らかにした。この成果は、日本機械学会論文「浮動ヘッドスライダの接触過程におけるディスク微小うねり励振振動の解析」[7] および Microsystem technologies 論文 "Numerical analysis of microwaviness-excited vibrations of a flying head slider at touchdown" [8]に掲載された。論文[8]は極めて評判がよく、Nanotribology, Material Science & Technology, Physical Chemistry などに関する国際会議からの参加要請、Special Issue や専門書の Guest Editor の勧誘などが来ている。それらのうち 2019 年 11 月に東京で開催予定の EuroSciCon Conference on Nanoscience and Technology 国際会議における Keynote speaker としての要請を受諾している。

4.4 単分子層以下の希薄液膜の分離圧式の Lennard-Jones potential 分子間力の積分による理論的導出と厳密な分離圧式に基づく液膜の拡散流動方程式の導出

これまで使用されてきた液膜の分離圧式の理論的根拠が不明なので、分離圧式を分子間引力である Lennard-Jones potential を積分することにより単分子層以下の希薄液膜と共に多層膜の場合についても厳密に導出した (解析モデルは図 1 参照)。またこの分離圧式を用いて、希薄液膜の粘度が単分子層以上の液膜におけるバルク値と異なる特性をも考慮して、液膜の厳密な拡散流動方程式を導出し、従来の理論と既報の筆者の理論と比較検討した。その結果従来の多分子層膜に対する理論を単分子以下の領域に用いることは誤りであること、筆者が既に提案している Hamaker 定数が膜厚さに比例するとした単分子以下の希薄液膜に対する分離圧式は厳密解とほ

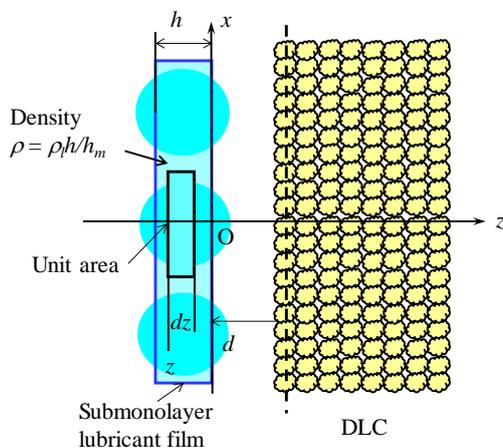


図 1 単分子膜以下の希薄液膜と DLC 固体表面との分離圧を計算する物理モデル

とんど一致することを明らかにした。また従来実験的に決められていた分離圧式中の cutoff 定数 d_0 の値が一对の分子間力の平衡距離で厳密に与えられることを始めて明らかにした。更に本理論による拡散係数は Waltman (2016) の希薄液膜に対する実験値と良く一致することを示した。

この研究成果は日本機械学会論文「単分子層以下の希薄潤滑膜の拡散方程式の厳密化」[9]および Open access ジャーナル Surface (MDPI) の創刊号に "Disjoining Pressure Derived from the Lennard-Jones Potential, Diffusion Equation, and Diffusion Coefficient for Submonolayer Liquid Film"[10] として掲載された。また液膜の分離圧の概念の発案者の Derjaguin を記念して4年に一度ロシアで開催される第16回 Surface Force 国際会議に参加し、この理論を発表した。

4.5 高粘度境界層をもつ液膜の流体潤滑方程式の開発

4.3 項の研究で、単分子層以下の希薄液膜でも接触突起面を流体潤滑されている可能性を明らかにした。そこで4.4 項の希薄液膜の拡散方程式を拡張して、粘度がトライボケミカル層により固体表面でバルク値より増加する流体潤滑機構を解析できる新しい潤滑方程式を導出した。またこれを用いて、近年注目されているなじみ作用によるテクスチャ付きスライダの超低摩擦現象のメカニズムを明らかにした。これらの研究成果は、2019 年春のトライボロジー会議で発表し、また9月仙台で開催される International Tribology Conference (ITC)でも発表予定であり、既に論文を ITC 発表論文の Special Issue として発行される Tribology Online に投稿している。この理論は潤滑理論の歴史に新機軸を与える成果であり、ナノトライボロジーの発展に寄与できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件) 下記 [1]~[10] 全て査読有り。

[1] 小野京右, 垂直記録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, Vol. 82, No.836, 2016, DOI:10.1299/transjsme.15-00633. pp. 1-17.

[2] Kyosuke Ono, Surface Texture Parameters of Perpendicular Magnetic Recording Disks, IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 53, No. 3, 2017, 3300806, DOI: 10.1109/TMAG.2016.2626006. pp. 1-6.

[3] 小野京右, 単分子潤滑膜で被覆された Diamond-Like-Carbon 面の表面力の理論的解明, トライボロジスト, Vol. 62, No. 12, 2017, pp. 784-799. DOI: 10.1299/transjsme.18-00200.

[4] Kyosuke Ono, Numerical Analysis of Surface Force of Diamond-Like Carbon Surface Coated with Monolayer Lubricant Film, Tribology Online, Vol. 13, No. 6, 2018, pp. 301-310, DOI: 10.2374/troll.13.301.

[5] 小野京右, 浮動ヘッドスライダの近接・接触領域における微小うねり励起振動の解明, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No.841, 2016, DOI: 10.1299/transjsme.16-00208. PP. 1-23.

[6] Kyosuke Ono, Analysis of Microwaviness-Excited Vibrations of a Flying Head Slider in Proximity and Asperity Contact Regimes, ASME Transaction, Journal of Tribology, Vol. 139, 2017, 062001, DOI: 10.1115/1.4036174. pp. 1-13.

[7] 小野京右, 浮動ヘッドスライダの接触過程におけるディスク微小うねり励起振動の解析, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No.850, 2017, DOI: 10.1299/transjsme.17-00091. pp. 1-19.

[8] Kyosuke Ono, Numerical Analysis of Microwaviness-Excited Vibrations of a Flying Head Slider at Touchdown, Microsystem Technologies, Vol. 24, No. 11, 2018, DOI: 10.1007/s00542-018- 3756-y. pp. 4689-4702.

[9] 小野京右, 単分子層以下の希薄潤滑膜の拡散方程式の厳密化, 日本機械学会論文集, Vo. 84, No. 864, 2018, DOI: 10.1299/transjsme.18-00200. pp. 1-16.

[10] Kyosuke Ono, Disjoining Pressure Derived from the Lennard-Jones Potential, Diffusion Equation, and Diffusion Coefficient for Submonolayer Liquid Film, Surface 1, 2018, pp. 122-137, DOI:10.3390/surfaces1010010.

[学会発表] (計 17 件)

[1] Kyosuke Ono, Numerical Analysis of Microwaviness-Excited Vibrations of a Flying Head Slider at Touchdown, ASME/ISPS2017 Conference, August 29-30, 2017, San Francisco, USA.

[2] Kyosuke Ono, Disjoining Pressure and Diffusion Equation for Submonolayer Liquid Film, 16th International Conference on Surface Forces, August 20-25, 2018, Kazan, Russia.

[図書] (計 1 件)

佐々木信也監修, 小野京右他, 数値解析と表面分析によるトライボロジーの解析と制御, [テクノシステム], 2018, ISBN978-4-924728-80-6, 総頁数 1158. 小野分担分頁総数 34.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1)研究分担者: なし

(2)研究協力者: なし