

平成 21 年 6 月 4 現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206019
 研究課題名（和文） 超高密度情報記録システムのためのナノ分子流体膜の力学特性のダイナミクス評価
 研究課題名（英文） Dynamic Evaluation of Mechanical Characteristics of Molecularly Thin Fluid Film for Ultra-high Density Information Storage
 研究代表者
 福井 茂壽（FUKUI SHIGEHISA）
 鳥取大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：40273883

研究成果の概要：

超高密度磁気ディスク装置用のヘッド機構実現を目指して、5 nm 程度の超微小すきまで相対すべり運動する記録ヘッドの動的挙動を、マイクロ/ナノメートル領域における分子気体および分子液体による力学作用を考慮して詳細に解析しうるシミュレーション技術および物性評価の高精度技術を開発し、これによりヘッド形状設計のための指針を得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2007年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	29,600,000	8,880,000	38,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：液体超薄膜、表面張力、分子間力、メニスカス、長波方程式、
 ヘッド・ディスク・インターフェース、分子気体潤滑、ナノトライボロジー

1. 研究開始当初の背景

インターネットの普及に伴う高度情報化社会では、大規模アプリケーションソフトや画像データなどの膨大な情報の蓄積技術への要請が高く、そのための小形大容量なファイル記憶装置の実現が益々望まれている。このため産業界では、現在の磁気ディスク（ハードディスク）装置の最高記録密度（単位面積当りの情報ビット数：現状では数 10 Gbit/in²）に対し、3～5 年後にはその数 10 倍の記録密度（数 100 Gbit/in²）を有する超高密度磁気ディスク装置の実現に向けて、精力的に研究が進められている。現用の磁気ディスク装置では、磁気ヘッドを記録媒体上で気体軸受の原理によりごくわずかに浮上させる

浮動ヘッドスライダが用いられ、その浮上すきま量は 0.02 μ m (20nm) 程度にまで超微小化されている（図 1）。

今後、数 100 Gbit/in² 程度の記録密度を実現するためには、浮上すきま量を現在の数分の一の 5 nm 程度以下の超微小すきまに保持する必要がある。この場合、数 nm 程度の分子レベルの気体薄層のみならず、記録媒体上の液体薄層の影響も重要となり（図 2 参照）、また分子レベルの相互作用（ファンデルワールス力、分子間力）をも考慮したナノ分子流体膜の力学特性、そこに発生する圧力で支持される記録・再生ヘッドの動的挙動の把握が重要になり、従来の完全浮上方式とは異なる概念での研究展開が必要であった。

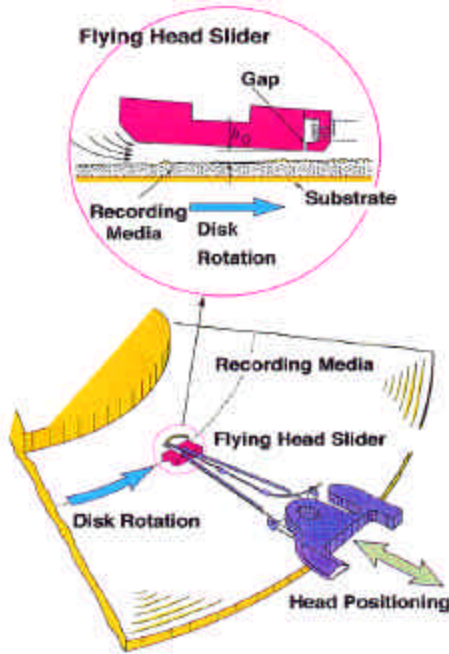


図1 磁気ディスク（ハードディスク）装置の基本構成とヘッド・メディアの関係

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高密度磁気ディスク装置用のヘッド機構実現を目指して、5 nm 程度の超微小すきまで相対すべり運動する記録ヘッドの動的挙動を、マイクロ/ナノメータ領域における分子気体および分子液体による力学作用を考慮して詳細に解析しうるシミュレーション技術および物性評価の高精度技術を開発し、これによりヘッド形状設計のための指針を得ることである。このため、分子レベルからマクロレベルにわたって、着目するスケールに応じた最適な解析手法を選択・駆使し、その結果を融合することにより（マルチスケール手法）、分子レベルのレオロジーからマクロレベルのスライダ動特性までを包括する解析手法の確立を目指した。その際に必要な、分子レベルの物性値の同定を、液体超薄膜を対象とした高精度実験により求め、より現実的な系に適用しうる様にした。具体的には、対象とするスケールに応じて、i) 実績ある分子気体潤滑方程式による解析（MGL 解析）、モンテカルロ直接シミュレーション（DSMC）法による精緻な気体浮上特性の解析、ii) 表面張力、ファンデルワールス力等を考慮したスライダ動特性解析、iii) 気液2層に対するぬれの流体力学（長波理論）を適用したナノ分子流体膜の変形・流動特性のダイナミクス解析等を融合し、気液2層潤滑下のヘッドスライダの挙動解析手法を確立する。さらには、この解析に必要なパラメータである分子レベル液体超薄膜の物性値

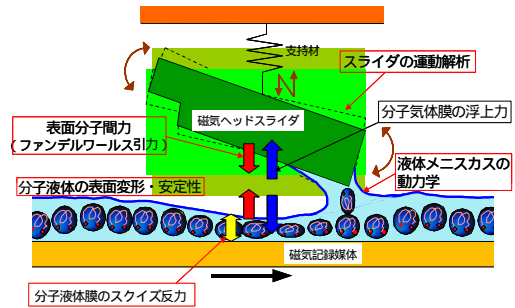


図2 ナノメータすきまにおける気液2層間関係の諸問題

（レオロジー特性）の実験的同定手法として、原子間力顕微鏡（AFM）による分子流体力の高精度計測の継続的探求の他、その液種、液膜厚さによる特性変化を定量的に把握するものである。

3. 研究の方法

本研究では、次の様な単純化モデル化とシミュレーション基本技術の確立、シミュレーションに必要な物性値（レオロジー特性）の同定を経て、最終的に設計指針の抽出を図る。特に、気体潤滑手法（DSMC 法と MGL 解析）および液体潤滑手法（ぬれの流体力学、分子レベル解析）の融合を図り、さらには物性値同定のための高精度実験によるデータ蓄積を重点的に行った。

(1) 気液界面変形の解析

浮動ヘッドスライダの浮上すきまが磁気ディスク面の液体潤滑剤の厚さと同程度の数ナノメータになると、液体表面の変形や液体の流動特性を考慮した浮上特性解析が必須になる。走行面の液体超薄膜の流動特性を、液体界面の変化を支配するぬれ方程式（長波方程式）の時間発展問題として数値的に解き、次のことを定量的に明らかにする。

極性流体のナノ流動特性の解析：分子間力としてファンデルワールス力の分散成分のみを考慮する無極性液体、さらには交番的な分子間力をも考慮する極性液体を対象とし、それぞれの流動特性を長波方程式に基づく非線形シミュレーションにより求める手法を確立する。特に、極性流体に対して実験的に確認されているテラス構造の理論的解明、特定の膜厚での凹凸出現の有無を定量的に調べる。まず、ステップ状液膜などの単純形状を対象に解析手法の確立を図る。次に、任意の初期形状に対する流動・変形特性を調べ、実験事実との対比を行う。特に、複合膜における物性値およびその組み合わせの影響を明確化し、流動の面で最適な構成を得る。これらを総合して、ナノメータ領域の液体薄膜の最適な物性値の指針を得る。

スライダ並進運動に伴うナノ液面凹凸現

象の解明：浮上するスライダの並進運動によって生ずる気体応力（圧力、せん断応力）の繰り返し印加等による液体膜表面の隆起（液膜表面のうねり）の可能性を、モデルに基づいて解明する。まず、最も単純な質量・ばねモデルによる隆起の可能性を検証する。次に、より現実に近い液層、気層を対象にした隆起現象のモデリングを行い、これまでの実験事実との対比を行う。これらを総合しナノ液面の凹凸現象のメカニズムを示し、最適な液種、スライダ形状等の指針を得る。

(2) ナノ複合膜に働くファンデルワールス力の理論と実験的検証

ナノ複合膜間に働く代表的な表面力の1つであるファンデルワールス力の特性の解明は、記録ヘッド等の微小機械要素の挙動を正確に予測する上で非常に重要である。このため、ナノ複合膜間に働くファンデルワールス力の実験的検証とその理論的裏づけを行う。具体的には、液膜試料の作成・評価手法の確立、ファンデルワールス力測定のAFM計測データの蓄積、さらにAFMダイナミック測定における光てこ法利用時の補正係数の理論的導出を行う。まず、液膜試料の作成・評価手法の確立とファンデルワールス力のAFM計測の予備検討を進める。次に、ファンデルワールス力のAFM計測データの蓄積、AFMダイナミクス計測における修正係数を考慮し分子流体の粘弾性特性（ばね性、減衰能）の同定手法を確立する。これらを総合しファンデルワールス力の計測データベースの構築を試みる。

(3) ナノ分子流体膜のダイナミクスの理論と実験的検証

擬似接触型（ニアコンタクト）ヘッドあるいは接触型（コンタクト）ヘッドでは、ヘッドとディスク面上の液体潤滑膜の接触部に形成されるメニスカスにより生ずる吸引力は、ヘッドが超微小・軽量であることから無視できず、特にその動的特性の把握は非常に重要である。メニスカスの動的特性と力学作用に関しては、すでに有用なモデルとして、境界位置変化モデル、接触角変化モデル、それらの融合モデルを提案し、液量等のパラメータによって最適なモデルが与えられることを見出している。ところが、固体上に付与した撥油剤上に滴下したナノ分子流体膜では、上記モデルのいずれにも適合しない特異な現象を示すことが予備検討で確認された。この現象の解明は、固体表面の表面処理等によるメニスカス動特性の予測に不可避であり、超小型軽量の磁気ヘッドの動的挙動の究明に重要である。

まず、この現象を種々のパラメータを代えた場合について、実験データを蓄積する。このデータは、撥油剤等の表面処理を施した界面でのメニスカスのモデル構築の基礎デー

タとなる。次に、撥油剤等の表面処理をした場合のメニスカスの実験データをもとに、現象のモデル化を行い、実験との比較を行う。さらに、より一般的かつwell-definedな表面、例えばLB膜を施した表面におけるメニスカスを対象として実験およびモデル化を行う。

4. 研究成果

主な研究成果を、以下に示す。これらの成果のうち、下記の(4)に示す成果は、米国機械学会セッション優秀論文賞を受賞した（学会発表の2.）。また、本研究の一連の成果に対し、日本機械学会船井特別賞（受賞者：福井茂壽）および船井情報科学振興賞（受賞者：松岡広成）をそれぞれ受賞した（受賞の項参照）。

(1) 液体超薄膜の安定性・流動特性解析

液体超薄膜の変形・流動特性を、液体界面の変形を支配する長波方程式の時間発展問題として数値的に解き、液膜の挙動の解析を進めた。

計算スキームの探求：基礎式である長波方程式を、i)液膜変形が微小であるとした線形化方程式およびii)液膜変形が必ずしも微小でない場合の非線形方程式について、定常および非定常問題の解析手法を確立した。特に非線形方程式の3次元時間発展問題の解析においては、新たに拡張ADI法を適用し、液体表面の圧力・せん断応力、表面張力の空間分布に対する液膜の変形を精緻に求めた。

種々の境界条件・物質定数に対する液体超薄膜の変形・流動特性：予め存在する固体面粗さ、表面張力分布、液膜段差形状等によって生ずる液膜形状の時間変化を定量的に求めた。特に、3次元時間発展問題の数値シミュレーションにより、圧力・せん断応力の突如の印加あるいは表面張力の急変による変形の波動的広がりを明らかにした。さらに、極性基を有する液体のポテンシャルを用いて、液体超薄膜の安定性・流動特性解析を行い、その基本特性を明らかにした。

液膜に働く繰り返し圧力・せん断応力による液膜変動：圧力・せん断応力が表面に繰り返し働く場合の微小液膜変形特性の解析を、固定境界および周期境界に対して可能にした。これに関連して、浮動ヘッドの振動による液体超薄膜表面の安定性解析を、空気膜動特性の周波数依存性とナノ複合膜間のファンデルワールス力を考慮して行い、基本的な特性を明らかにした。

(2) 記録面が不均一で超微小すきまで浮上するスライダのダイナミクス特性

2次元CIPスキームによるナノメータ浮上ヘッドの分子気体潤滑解析：超微小すきまのダイナミクス解析で有用な高精度数値スキームとして、CIP法を新たに有限幅スライダに適用し、変動圧力を定量的に求めた。

将来型記録ディスク上の浮上ダイナミク

ス：走行方向・トラック方向に磁気的な干渉防止用の溝があるDTMディスク（Discrete Track Media）およびBPMディスク（Bit Patterned Media）によって不可避免的に生ずる、不均一な浮動ヘッドスライダの空気膜圧力およびファンデルワールス引力を考慮したナノメータ浮上スライダの静的浮上特性および動的挙動を、研究代表者・研究分担者が確立した分子気体潤滑方程式と多層膜の分子間力の理論式を用いて解析する手法を概ね確立した。

(3) 原子間力顕微鏡（AFM）計測の超高精度化
AFMを用いて近接する2面間に生ずる力を超高精度に求めるモデルを、より現実に近いカンチレバー探針のたわみ特性を考慮して理論予測する手法を確立し、実験結果との一致を確認した。

(4) 表面エネルギー分散成分の理論とその検証

固体基板上的ナノ薄膜の例としてLB膜（ステアリン酸、アラキジン酸）およびPFPE膜（フォンプリン Z-dol, Z03）を対象に、膜厚に対する表面エネルギーの実験結果と、表面エネルギーの分散成分を多層膜系のファンデルワールス圧力から理論的に求めた結果を比較して、理論の妥当性を示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

1. S. Fukui, K. Hitomi, S. Shimizu, F. Saeki and H. Matsuoka, “Three-dimensional deformation analyses of the ultra-thin liquid film surface (Linearized analyses for the steady state)”, *Microsyst Technol*, 査読有, DOI 10.1007/s00542-008-0764-3, Published online: 14 January 2009

2. H. Matsuoka, K. Ono and S. Fukui, “A new evaluation method of surface energy of ultra-thin film”, *Microsyst Technol*, 査読有, DOI 10.1007/s00542-008-0762-5, Published online: 13 January 2009

3. S. Fukui, T. Kanamaru and H. Matsuoka, “Dynamic analysis schemes for flying head sliders over discrete track media”, *IEEE Trans. on Magnetics.*, 査読有, Vol. 44, Pt.2 (2008) pp. 3671-3674

4. S. Fukui, Shimizu, S. Yamane, K. and Matsuoka, H., “Linearized Analyses of Deformation of the Ultra-thin Lubricant Films under Gas Pressures by the Long Wave Equation,” *Microsyst Technol*, 査読有, Vol. 13 (2007) pp.1339-1345 (Online First:DOI 10.1007/s00542-006-0359-9)

〔学会発表〕（計14件）国際会議発表のみ記載。他に国内会議発表38件

1. F. Saeki, S. Fukui and H. Matsuoka, “Lubricant Deformation Analyses Caused by Gas Stresses and Surface Tension”, *Asia Pacific Magnetic Recording Conference*, Singapore, January 2009

2. H. Matsuoka, K. Ono and S. Fukui, “A new evaluation method of surface energy of ultra-thin film”, *ASME Information Storage and Processing Systems Conference*, Santa Clara, CA, June 16-17, 2008 米国機械学会セッション優秀論文賞

3. S. Fukui, K. Hitomi, S. Shimizu, F. Saeki and H. Matsuoka, “Three-dimensional deformation analyses of the ultra-thin liquid film surface (Linearized analyses for the steady state)”, *ASME Information Storage and Processing Systems Conference*, Santa Clara, CA, June 16-17, 2008

4. H. Matsuoka, H. Kokumai and S. Fukui, “A new contact model for head disk interface (HDI) with ultra-thin liquid film and ultra-small spacing”, *Digest of Intermag Europe*, Madrid, 2008, HO-13

5. S. Fukui, T. Kanamaru and H. Matsuoka, “Dynamic analysis schemes for flying head sliders over discrete track media”, *Digest of Intermag Europe*, Madrid, 2008, GF-05

6. H. Matsuoka, S. Fukui, K. Inada and K. Ishihara, “Experimental study on effects of contact angle on static and dynamic characteristics of a liquid meniscus bridge in macroscopic scale”, *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference (IJTC2007)*, October 22-24, 2007, San Diego, California, USA

7. S. Fukui, S. Shimizu, K. Yamane and H. Matsuoka, “Deformation characteristics of the ultrathin liquid film surface considering the effects of polar endgroups”, *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference (IJTC2007)*, October 22-24, 2007, San Diego, California, USA

8. T. Kanamaru, K. Yamane, H. Matsuoka and S. Fukui, “Molecular gas-film lubrication analyses under fixed finite-width slider- A comparison between the CIP method and linearized analyses”, *Proceedings of The Third Asia International Conference on Tribology*, Kanazawa, JAPAN, October 16-19, 2006, pp.607-608

9. K. Inada, H. Matsuoka and S. Fukui, “Experimental study on vibration transfer characteristics of a liquid meniscus bridge”, *Proceedings of The Third Asia International Conference on Tribology*, Kanazawa, JAPAN, October 16-19, 2006, pp.597-598

10. S. Shimizu, K. Yamane, H. Matsuoka and S. Fukui, “Time evolution analyses of ultra-thin liquid film surface by the long wave equation

(Influences by initial/boundary configurations and physical parameters of the liquid surface)", Proceedings of The Third Asia International Conference on Tribology, Kanazawa, JAPAN, October 16-19, 2006, pp.595-596

11. S. Suyama, H. Matsuoka and S. Fukui, "A data correction method for the dynamic measurements by the optical lever AFM (Effect for concentrated mass and spring at the cantilever end)", Proceedings of The Third Asia International Conference on Tribology, Kanazawa, JAPAN, October 16-19, 2006, pp.489-490

12. H. Matsuoka, S. Suyama, Y. Hoshina and S. Fukui, "A data correction method for the dynamic measurements by the optical lever AFM", ASME/JSME Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006), S17-03, Santa Clara, CA, June 21-23, 2006

13. H. Matsuoka, K. Inada, A. Yamaguchi and S. Fukui, "Experimental study on dynamic characteristics of a liquid meniscus bridge", ASME/JSME Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006), S02-05, Santa Clara, CA, June 21-23, 2006

14. S. Fukui, S. Shimizu, K. Yamane and H. Matsuoka, "Linearized analyses of deformation of the ultra-thin lubricant films under gas pressures by the long wave equation", ASME/JSME Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006), S14-01, Santa Clara, CA, June 21-23, 2006

〔解説〕(計2件)

1. 福井茂寿、松岡広成、"MEMS要素のナノトライボダイナミクス", 月刊トライボロジー、第22巻第2号 No.246 (2008) pp.12-15
2. 福井茂寿、"分子気体潤滑の数理と数値計算スキーム CIP法の適用", トライボロジスト、第52巻第7号 (2007) pp. 519-524

〔図書〕(計1件)

1. 福井茂寿、「MEMS/NEMS工学全集」、分担執筆、第2節物理学基礎、6.統計力学の項、テクノシステム (2009) pp.78-82

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)
なし

〔その他〕

ホームページ

http://www.damp.tottori-u.ac.jp/~lab2/index_j.html

〔受賞〕

1. 日本機械学会情報知能精密機器部門業績賞
受賞者：福井茂壽
受賞日：2007年3月19日
2. ASME Information Storage and Processing Systems (ISPS) Division, Best Tribology and Head-Disk Interface Track Paper Award (米国機械学会 情報ストレージ・処理システム部門 セッション優秀論文賞)
受賞者：H. Matsuoka, K. Ono, S. Fukui
受賞日：2008年6月16日
受賞論文：A New Evaluation Method of Surface Energy of Ultra-thin Film (学会発表の2.)
3. 日本機械学会船井特別賞
受賞者：福井茂壽
受賞日：2009年3月24日
受賞対象：分子流体潤滑理論の構築とその情報ナノシステム作動性解析への展開
4. 船井情報科学振興賞
受賞者：松岡広成
受賞日：2009年4月18日
受賞対象：液体超薄膜の力学特性の解明と超高密度記録への応用

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 茂壽 (FUKUI SHIGEHISA)
鳥取大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号：40273883

(2) 研究分担者

松岡 広成 (MATSUOKA HIROSHIGE)
鳥取大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号：10314569
山根 清美 (YAMANE KIYOMI)
松江工業高等専門学校・機械工学科・准教授
研究者番号：00413823

(3) 連携研究者

なし