

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360078
 研究課題名 (和文) ナノ複合膜間に働く表面力の特性解明と微小機械設計への応用
 研究課題名 (英文) Surface Forces between Multi-layers in Nano-scale and Application to MEMS/NEMS
 研究代表者
 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

研究成果の概要：

複数の任意の物質で構成されるナノ複合膜間の表面間相互作用の特性解明とその応用を目指し、理論的取扱い手法、計測手法を開発するとともに、実際の微小機械、具体的には、磁気ディスクのヘッド・ディスク・インターフェース (HDI) および原子間力顕微鏡 (AFM) のカンチレバー振動の特性解析に応用し、それらの挙動に与える影響を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

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：ナノ複合膜、表面・界面物性、ナノマシン、機械要素、超精密計測、
 ヘッド・ディスク・インターフェース、原子間力顕微鏡、ナノトライボロジー

1. 研究開始当初の背景

高度な情報技術 (IT) の集積である情報機器のさらなる小型軽量化・高性能化は、将来の社会的・経済的発展のために欠くことができないものである。特に、機械的運動を伴う情報マイクロシステムにおいては、微小な機械要素の精密な動きを制御する必要があり、微小領域における物理現象の解明とその応用技術、さらには設計手法・ツールの確立が、ハードウェア開発の基礎技術として必要不可欠となる。また、一般的に微小機械 (マイクロ/ナノマシン、あるいは、Microelectromechanical System (MEMS)) においては、信頼性・耐久性・高効率化の観点から何らかの表面処理、例えばダイヤモンドライクカーボ

ン (DLC) などの超硬質材料コーティングやフッ素系潤滑剤などの液体 (軟質材料) コーティングが施される場合が多く、これらのコーティング膜厚さはナノメートルのオーダーで制御されている。身近な例として、コンピュータ用磁気ディスク装置におけるヘッド・媒体インターフェース (HDI) の構成例を図 1 に示す。回転するディスク上に浮動形磁気ヘッドが 10 ナノメートル (nm) 程度の空気の薄膜を介して浮上しており、さらには液体潤滑膜、固体保護膜 (共に厚さ数 nm) があり、複数の物質の薄膜 (複合膜) から成ることがわかる。このようなナノメータオーダーの複合膜 (ナノ複合膜) で構成された表面間の相互作用は構成物質の組み合わせによって大き

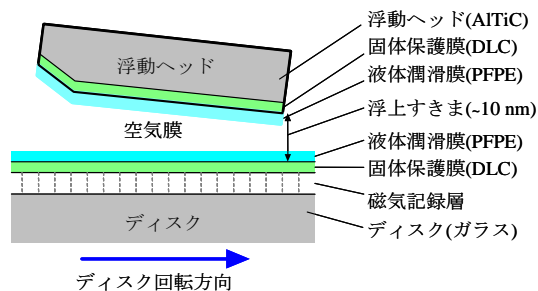


図1 コンピュータ用磁気ディスク装置のヘッド・媒体インターフェース (HDI) の構成例

く変化し、微小機械の挙動・性能に多大な影響を及ぼすが、その基本的な特性はほとんど解明されていない。また、技術的には、ナノテクノロジーを応用した微小機械設計にナノ複合膜間の表面間相互作用の考慮が必要な段階にさしかかっているにもかかわらず、解析手法や計測手法、設計手法が確立されていないのが現状であった。

2. 研究の目的

上記のような背景から、情報技術 (IT) およびナノテクノロジーの応用、とりわけ情報マイクロシステムの発展に寄与するための1つの方向性として、複数の任意の物質で構成されるナノ複合膜間 (図2参照) の表面間相互作用に関する理論的解明、計測手法の開発、さらには実際の微小機械に対する解析手法、設計手法の確立などが挙げられる。これにより、ナノ複合膜間の複雑な表面間相互作用の科学的知見と工学的応用技術を得ることができ、科学技術の発展に大きく貢献するものと考えられる。これが、研究の全体構想である。その中で本研究課題は、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およびそれが微小機械の挙動に与える影響を実験的・理論的に解明することを目的とする。具体的には、(1)AFM (原子間力顕微鏡) を用いてナノ複合膜間に働くファンデルワールス力を静的・動的に超高精度計測する手法の確立とその理論的裏づけ、(2)ファンデルワールス力が働く場合の微小機械のダイナミクス解析とその実験検証を行う (対象として図1に示すHDIを考えている)。さらにこれらの学術的考察のみならず、ナノ複合膜間の表面力を考慮したHDIの設計指針を提案するところまで交付期間内での遂行を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ナノ複合膜間に働く表面力の特性およびそれが浮動ヘッドの挙動に与える影響を実験的・理論的に解明する。

(1) AFM (原子間力顕微鏡) を用いてナノ複合膜間に働く表面力を静的・動的に超高

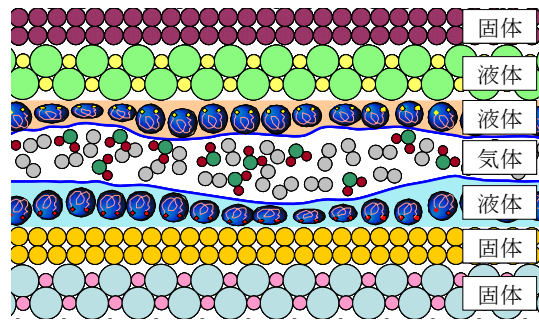


図2 一般的なナノ複合膜のイメージ図

(固体・液体・気体の多くの分子薄膜から構成される。任意の2つの分子膜表面間の相互作用は、他の分子膜の影響により非常に複雑になる。)

精度計測する手法の確立

- ① 試料作成・評価に関する習熟：ディップ法による液体超薄膜の作成方法・条件出し、エリプソメータを用いた固体および液体超薄膜厚さの精密同定、など。本質的・系統的な実験結果を得るためには、まず、試料作成・評価技術の習熟が必須である。
- ② Well-defined な試料を用いた表面力測定の前準備実験：まずは、Well-defined な試料を用いて実験手法・実験条件等の検討を行い、測定手法を確立する。カンチレバーとその相手側の試料としては、表面間力の実験によく使われるシリコンあるいはそれに金を十分厚くコーティングしたものを考えている。
- ③ 複合膜厚さ、材質の組み合わせ等、実験パラメータを変化させた場合の表面力の特性変化の解明。液体薄膜厚さは、1 nm~20 nm 程度。液体薄膜の材質は、実際の磁気ディスクに用いられているフッ素系潤滑剤 (PFPE) のうち、無極性 PFPE と極性 PFPE を 5 種程度使用し、固定層と流動層厚さを制御する (注)。また、アルカンチオール系自己組織化膜 (SAM), LB 膜についても、複合膜間ファンデルワールス力の特性に関するより系統的な知見を得るため、実施したい。固体の材質は、シリコン、金、DLC 等を考えている。(注) 固定層：液体分子が固体に化学的に結合した層。流動層：固体との化学的な結合は無く、液体分子が流動できる層。
- ④ 表面力が作用する場合の AFM カンチレバーの振動特性と補正係数の導出：表面力は 2 面間距離に依存する非線形な力であるため、カンチレバ

一の振動特性に影響を与え、力の超精密測定のためには、その場合の補正係数を求める必要がある。その他、空気膜やコーティング、分布質量の影響など、超精密測定のために必要となるカンチレバーの振動と補正係数に関する理論的検討課題は多い。

(2) 表面力が働く場合の微小機械のダイナミクス解析とその実験検証 (対象は、ヘッド・媒体インターフェース(HDI))

- ① 浮動形磁気ヘッドのダイナミクス解析：ナノ複合膜間に働く表面力を考慮した場合の磁気ヘッドの挙動について、より現実的なヘッド形状に対応した数値計算ソフトウェアの開発およびその精緻化。
- ② 浮動形磁気ヘッド挙動の実験検証に関する予備検討：スピンスターによる磁気ヘッドの浮上特性計測実験の立ち上げと手法の確立および装置の特性の把握、操作の習熟。さらには、せん断下での表面力特性の実験的解析。

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、(1)の①に示す成果は、米国機械学会優秀講演論文賞を受賞した(学会発表の2.)。また、本研究の一連の成果に対し、船井情報科学振興賞(受賞者：松岡広成)および日本機械学会船井特別賞(受賞者：福井茂壽)をそれぞれ受賞した(受賞の項参照)。

(1) AFM (原子間力顕微鏡) を用いてナノ複合膜間に働く表面力を静的・動的に超高精度計測する手法の確立

- ① 固体基板上における超薄膜の表面エネルギーの有効分散成分理論の構築とその実験的検証：固体基板上の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(フォンブリン Z-dol, Z03)を対象に、膜厚に対する表面エネルギー変化の実験結果と、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。
- ② 固体間インターフェースモデルとその実験および液体メナスカス力の特徴的説明：固体基板上に液体超薄膜が存在する場合の表面間力を理論的に評価する固体間インターフェースモデルについて、原子間力顕微鏡(AFM)を用いてその検証を行った。すなわち、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AFM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

した。これを用いて液体超薄膜介在下での固体間凝着力および液体メナスカス力を計算し、AFMによる実験結果との一致を確認した。さらに、マクロな液体メナスカス架橋の面内・面外方向の特性を、自作の動的メナスカス力測定装置およびスピンスターを用いて実験的に解明した。また、これらの実験に対する理論を構築し、実験結果を定性的に説明できることを示した。

③ 原子間力顕微鏡(AFM)カンチレバーの振動特性解析とそれを用いた表面間力の精密測定：AFMのチップ・試料間に働く表面力をばねとダンピングで線形近似し、カンチレバーの振動特性からばね定数と減衰係数を求める手法を確立した。AFMにおけるカンチレバーのたわみの測定手法である光てこ法の特性を加味し、カンチレバーの変位と位相を補正する理論を確立するとともに、これを応用して、共振曲線と位相曲線から表面間力のばね定数と減衰係数を高精度に求める手法を提案した。また、熱ゆらぎを利用したカンチレバーのばね定数測定に関する補正を行い、数~数十%の補正が必要であることを予測した。

(2) 表面力が働く場合の微小機械のダイナミクス解析とその実験検証 (対象は、ヘッド・媒体インターフェース(HDI))

- ① ナノ複合膜間の表面間力を考慮した浮動ヘッドのダイナミクス解析：HDIにおいて、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 液体表面エネルギーの温度・膜厚依存性を考慮した液体超薄膜の変形・流動特性解析：液体の表面エネルギーの温度依存性を実験的に評価するとともに、液体超薄膜における表面エネルギーの膜厚依存性の理論式を考慮し、液体表面エネルギーの温度・膜厚依存性を提案した。これを液体界面の変形を支配する長波方程式に組み込み、空間的な温度分布を与えた場合の液体超薄膜の変形特性解析の手法を確立した。
- ③ 将来型記録ディスク上の浮上ダイナミクス：将来型記録ディスクとして有望な、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。

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. 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
2. 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
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, 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," *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
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 Micromechatronics 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 Micromechatronics 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 Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2006), S14-01, Santa Clara, CA, June 21-23, 2006

[解説] (計1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

[図書] (計0件)

なし

[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. 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：松岡広成、小野克典、福井茂寿
受賞日：2008年6月16日
受賞論文：A New Evaluation Method of Surface Energy of Ultra-thin Film
2. 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
3. 日本機械学会船井特別賞
受賞者：福井茂寿

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

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

福井 茂寿 (FUKUI SHIGEHISA)

鳥取大学大学院・工学研究科・教授

研究者番号：40273883

(3)連携研究者

なし