

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：15101  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22360071  
 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トライボダイナミクス評価  
 研究課題名（英文） Tribo-Dynamics 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（和文）：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、3 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た。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research project is to analyze the static and dynamic characteristics of near contact heads considering the interactions between molecular gas film lubrication (MGL) effects and molecular liquid film lubrication (MLL) effects which are indispensable for ultra thin physical spacings between recording head and disk. We established highly accurate simulation scheme and measurement methods for ultra-high density magnetic recording system.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	10,800,000	3,240,000	14,040,000

### 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

(1) 大容量高記録密度の社会的要請：目標 4～8 Tbit/in<sup>2</sup>

高度情報化社会では、膨大な情報の蓄積技術への要請が高く、産業界では、現在の磁気ディスク（ハードディスク）装置の記録密度（単位面積当りの情報ビット数：数百 Gbit/in<sup>2</sup>）に対し、4～5 年後にはその数 10 倍の記録密度（数 Tbit/in<sup>2</sup>：テラビット）の実現を目標に研究が進められている（図1）。

(2) 浮動ヘッドスライダの浮上すきま量の更なる超微小化：目標 1～2 nm

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超微小すきまで浮上させる浮動ヘッドスライダが用いられ、高密度記録実現のため、その浮上すきま量は分子気体潤滑 (MGL) 理論を駆使して、すでに 0.005  $\mu\text{m}$  (5 nm) 程度にまで超微小化されている。

今後、4～8 Tbit/in<sup>2</sup>の実現のためには、浮上

すきま量 1~2 nm程度以下が必要である。この場合、気体薄層の気体圧力のほか、分子間力であるファンデルワールス引力をも考慮した分子気体潤滑 (MGL) 理論の精緻化と妥当性の検証、浮動ヘッドスライダの動的挙動の把握も重要となる (図 2)。

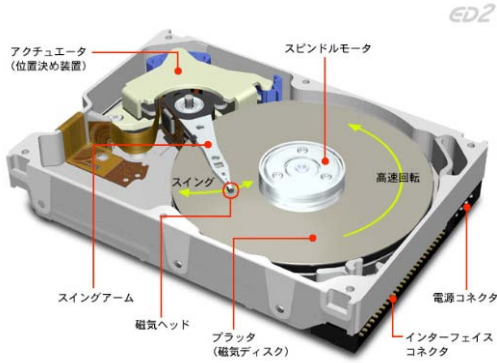


図 1 コンピュータ用ハードディスクの構造

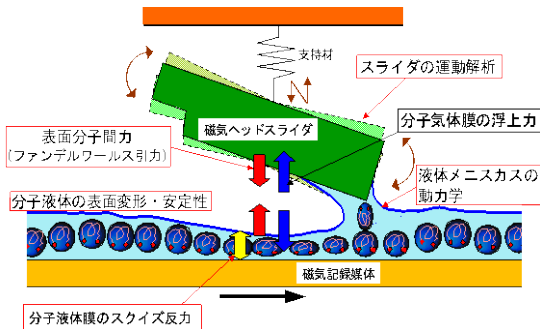


図 2 ナノメータすきまにおける気液 2 層潤滑系

## 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、3 nm 程度以下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や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

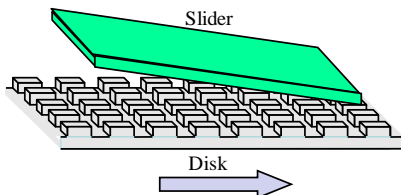


図 3 Bit Patterned Media (BPM) 記録方式: 記録面を磁区ごとに分離し、磁氣的干渉を排除。非磁性体での充填も検討されている

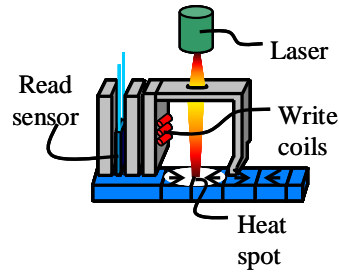


図 4 (a) HAMR 方式の模式図 (拡大)  
記録面をレーザ加熱によりキュリー一点温度以上にし記録を可能にする新方式

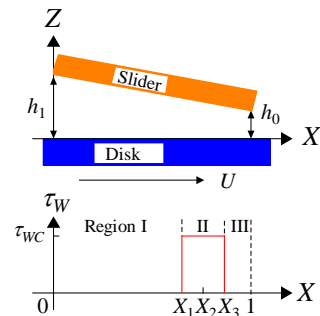


図 4 (b) 記録面の局所加熱時の圧力発生解析のモデル

ための指針を得ることである。

(1) **Bit Patterned Media (BPM)** 方式における浮動ヘッド・スライダ浮上特性の解明: 記録面の磁区 (記録の最小単位) の磁氣的干渉をさけるため、記録面にあたかも剣山のように不要な領域を削除する方式 (図 3 参照)。これによる、浮動ヘッドスライダの静的浮上特性や浮上安定性の著しい劣化が見込まれるため、それらを考慮した浮上特性解析手法を確立する。

(2) **Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR)** 方式における浮動ヘッド・スライダ浮上特性の解明: 電磁変換時の記録特性を改善するため、記録面の一部をレーザによりキュリー一点温度以上に加熱し記録する方式 (図 4 (a) 参照)。加熱による境界面温度分布を考慮した高度な浮上特性解析手法の確立を行う (図 4 (b) 参照)。

(3) 液体超薄膜 (潤滑剤) の変形・流動特性の解明とスライダ浮上特性への影響の明確化

液体超薄膜における表面張力の不均一、ファンデルワールス圧力による液膜の変形・流動は、浮動ヘッドスライダの超微小すきま化や安定浮上を阻害し、記録情報に重大な損傷・劣化の可能性がある。このため、液体超薄膜の力学特性をモデル化した変形・流動特性の解析、温度印加時の表面張力の不均一や周囲環境による膜厚さの精緻な挙動の解明

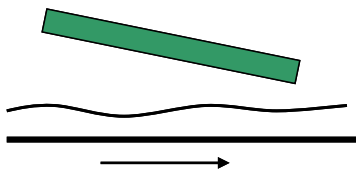


図 5 (a) 液体潤滑剤上の浮動ヘッドスライダ：液膜と超微小すきまで相対することによる潤滑剤のスライダへの付着（ピックアップ）

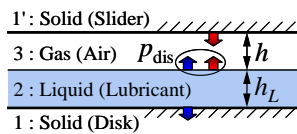


図 5 (b) 潤滑剤ピックアップ現象の力学：上側固体（スライダ）からのファンデルワールス引力（分離圧）により引き上げ

が不可避である。図 5 (a), (b) は、超微小すきまで浮上する浮動ヘッドによる液膜の引き上げ現象（ピックアップ）の模式図であり、解明を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 境界面温度を考慮した分子気体潤滑問題の解析手法の開拓

① 温度効果を考慮した分子気体潤滑理論（t-MGL 理論）の構築

熱援用磁気記録（HAMR, 図 4 (a)）方式における分子気体潤滑解析では、これまでの等温を仮定した分子気体潤滑（MGL）理論をより一般化し、熱的効果を考慮した新しい理論（t-MGL）の構築とそれによる数値解析手法の開発を行った。また、スライダ浮上姿勢の変化、動的挙動などの基本特性を解析した。

② 改良モンテカルロ直接シミュレーション法（DPMC 法）の分子気体潤滑問題への適用

分子気体潤滑問題の解析において相補的關係にある「モンテカルロ直接シミュレーション（DSMC）法」では、浮動ヘッドスライダの様に音速等に比べ低速な現象では分子の速度分布の平衡状態からのずれ（偏差）はわずかで、このため平衡状態を求める平均化操作に多大な時間を要していた。本研究では、平衡状態からの偏差を変化量として取り扱う「改良モンテカルロ直接シミュレーション（DPMC: Deviativational Particle Monte Carlo）法」を分子気体潤滑問題に適用し、境界面温度を考慮した分子気体潤滑問題（図 4 (b)）の高速解析を追求した。

③ BPM ディスク上の浮動ヘッドスライダ浮上特性の解析手法の確立

BPM ディスクの様に、ディスク面が平坦でなく突起状の集合体である場合（図 3）は、本質的にスライダの動的挙動を伴う動的な問題となるが、BPM ディスクを正弦波の重畳と考える方法、平均化し準静的な浮上特性を求める方法等が考えられる。本研究では、矩形の凹凸と見なした場合の静的および動的浮上特性について、詳細な特性解析を進めた。

(2) 異種材料からなる物質間に働くファンデルワールス力の理論

ナノ複合膜間に働く表面力であるファンデルワールス（vdW）力の解明は、浮動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。特に、BPM ディスクの様に、固体が不均一または異種材料からなる場合には、浮動ヘッドスライダに働く vdW 引力が空間分布を持ち、さらにはディスク走行時には時間的に変動するため、スライダ浮上への外乱成分として作用し浮上安定性を損なう可能性がある。本研究では、異種材料からなるナノ複合膜間に働く vdW 力の理論解析を行い、それを外乱成分としたスライダ動特性解析を展開する。初期検討として、2 種の異種材料が周期的分布する場合、互いに半無限体である単一接合の場合について圧力式の導出を目指した。

(3) 気液界面変形の解析と精密計測

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 1~2 nm になると、液体表面の変形や流動特性を考慮したスライダ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、液膜厚さを支配するぬれの方程式（長波方程式）の時間発展問題として数値解析し、さらに膜厚の高精度計測によって、次のことを定量的に明らかにした。

① 超薄膜流体のナノ流動特性のモデル化と数値解析

超微小すきまで薄膜流体上を浮上するスライダによって生じる液膜の隆起・付着現象（ピックアップ現象）をモデル化し、現象の理論的解明、液膜表面の変形量を定量的に調べ、浮上特性への影響を調べた。

② 局所加熱による液膜変形・流動の精密計測

HAMR ディスクでは局所的な加熱により液体超薄膜の変形・流動が生じ、場合によっては浮動ヘッドの浮上特性の劣化を生じる。加熱による液膜の変形・流動、経時変化を詳細に調べた。

### 4. 研究成果

主な研究成果を、以下に示す。

(1) 境界面温度を考慮した分子気体潤滑問題の解析手法の開拓

① 温度効果を考慮した分子気体潤滑理論 (t-MGL) の構築

HAMRヘッドを想定した境界面温度を考慮した分子気体潤滑理論 (t-MGL) では、気体内部の温度分布は陽には得られず、別途ボルツマン方程式に基づき算出する必要があった。ボルツマン方程式を援用して速度プロフィール、温度分布を詳細に求め、下記②のモンテカルロ直接シミュレーション (DSMC) 法との比較により、t-MGL理論の妥当性の検証および物理的現象の理解を進めた。一方、t-MGL理論式を用いた2次元解析・動特性解析を遂行した。(学会発表1, 5参照)

② 改良モンテカルロ直接シミュレーション法 (DPMC 法) の分子気体潤滑問題への適用

境界面温度を考慮した気体潤滑問題におけるDPMC (Deviational Particle Monte Carlo) 法の結果を、t-MGL理論による解析結果と比較し、さらには計算時間および精度の吟味し、両者がよく一致することを確認した。(学会発表①, ⑥参照)

③ BPM ディスク上の浮動ヘッドスライダ浮上特性の解析手法の確立

BPMディスクの数学モデルをより精緻化し、得られる浮上特性と実験事実との対応を図った。特に、静的浮上すきまの低下量と動的すきま変動量に分けて検討し、浮上特性劣化への影響を明確化した。(雑誌論文②, ⑧参照)

(2) 異種材料からなる物質間に働くファンデルワールス力の理論

ディスク走行方向に2種の材料が配置される場合のほか、走行方向と幅方向にも分布がある場合など、対象とするBPMディスクにより近い一般的な材料分布特性を想定してファンデルワールス力の解析を行った。今後、これらを外乱とした場合の浮動ヘッドスライダの動特性 (2自由度, 3自由度) を求める。(学会発表③参照)

(3) 気液界面変形のモデルによる解析と精密計測

気液界面の変形を扱うぬれの流体力学 (長波方程式) を用いた潤滑剤のピックアップ現象のモデル解析を行った。ぬれの流体力学 (長波方程式) で得られる時間発展問題のほか、不安定現象および自発的形狀形成に着目し、スライダのナノメータ浮上への阻害要因を明らかにした。また、HAMRディスクのように加熱による液体超薄膜 (潤滑剤) の膜厚変化の精密計測を行い、熱や液体物性の影響を明確にした。(雑誌論文①, ③, ④, ⑤, ⑦参照)

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7件)

① Matsuoka, H., K. Matsuda K. and Fukui, S., “Theoretical Model for Lubricant Pickup Considering Disjoining Pressure of Nanometer Thick Film”, *Trans. on Mag*, 査読有 Vol. 48 (2012) pp. 4257-4260, DOI 10.1109/TMAG.2012.2197735

② Fukui, S., Sato, A. and Matsuoka, H., “Static and dynamic flying characteristics of a slider on bit-patterned media (dynamic responses based on frequency domain analysis)”, *Microsyst Technol*, 査読有 Vol. 18 (2012) pp. 1633-1643, Published online, 29 June (2012), DOI 10.1007/s00542-012-1601-2

③ Matsuoka, H., Kan-nen, M. and Fukui, S., “Lubricant transfer caused by breakage of liquid meniscus bridge”, *Microsyst Technol*, 査読有 Vol. 18 (2012) pp. 1607-1613, Published online, 28 June (2012), DOI 10.1007/s00542-012-1598-6

④ Saeki, F., Fukui, S. and Matsuoka, H., “Optical interference effect on pattern formation in thin liquid films on solid substrates induced by irradiative heating”, *Physics of Fluids*, 査読有 Vol. 23, Issue 11, 112102 (2011)

⑤ Matsuoka, H., Kan-nen, M. and Fukui, S., “Theoretical model for lubricant pick-up (Breakage of liquid meniscus bridge due to elongation in bridged direction)”, *IEEE Trans. on Magnetics.*, 査読有 Vol. 44, No. 10 (2011) pp. 3582-3585

⑥ Fukui, S., Hozumi K. and Matsuoka, H., “Frequency domain analyses of a thin liquid film surface by repetitively applied stress (dynamic response analyses by the long wave equation)”, *Microsyst Technol*, 査読有 Vol. 17 (2011) pp. 1099-1107, Published online, 22 January (2011), DOI 10.1007/s00542-010-1214-6

⑦ Matsuoka, H., Oka, K., Yamashita, Y., Saeki, F. and Fukui, S., “Deformation characteristics of ultra-thin liquid film considering temperature and film thickness dependence of surface tension”, *Microsyst Technol*, 査読有 Vol. 17 (2011) pp. 983-990, Published online, 18 January (2011), DOI 10.1007/s00542-011-1223-0

〔学会発表〕(計67件)

国際会議発表のみ記載。

- ① Fukui, S., Kitagawa, N., Wakabayashi, R., Yamane, K., and Matsuoka, H., “Molecular gas-film lubrication analyses considering boundary temperature distributions”, ASME/JSME Joint Intl Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), Santa Clara, CA June 18-20, 2012, S25-04
- ② Fukui, S., Oono, A. and Matsuoka, H., “Flying characteristics of an air bearing slider over a disk with grooves and distributions of material properties”, ASME/JSME Joint Intl Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), Santa Clara, CA June 18-20, 2012, S25-03
- ③ Matsuoka, H., Kitahama, N. and Fukui, S., “Theoretical study of van der Waals dispersion force between macroscopic bodies with a periodic material distribution”, ASME/JSME Joint Intl Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), Santa Clara, CA June 18-20, 2012, S25-02
- ④ Matsuoka, H., Matsuda, K. and Fukui, S., “Theoretical Model for Lubricant Pick-up Considering Ultra-thin Liquid Film Effect”, IEEE intl conf. on Magnetics (InterMag2012), Vancouver, 9-13, May, 2012, GU-02
- ⑤ Kitagawa, N., Fukui, S. and Matsuoka, H., “Molecular Gas-film Lubrication Analyses Considering Boundary Temperature Distribution”, Intl Tribology Conf., Hiroshima 2011 (ITC Hiroshima 2011) Oct. 30-Nov. 3, 2011, Hiroshima, Japan, P14-05
- ⑥ Yamane, K. and Fukui, S., “Effects of Wall Temperature on the Air Bearing Pressure of the Slider”, Intl Tribology Conf., Hiroshima 2011 (ITC Hiroshima 2011) Oct. 30-Nov. 3, 2011, Hiroshima, Japan, P14-04
- ⑦ Hatanaka, T., Saeki, F., Matsuoka, H. and Fukui, S., “Deformation of Ultra-Thin Liquid Film Due to Local Heating”, Intl Tribology Conf., Hiroshima 2011 (ITC Hiroshima 2011) Oct. 30-Nov. 3, 2011, Hiroshima, Japan, P14-03
- ⑧ Oono, A., Yamamoto, T., Satou, A., Matsuoka, H. and Fukui, S.,

“Dynamic Analyses of Air Bearing Slider Over a Disk with Grooves and Distributions of Material Properties”, Intl Tribology Conf., Hiroshima 2011 (ITC Hiroshima 2011) Oct. 30-Nov. 3, 2011, Hiroshima, Japan, P14-02

- ⑨ Itani, T., Matsuda, K., Matsuoka, H. and Fukui, S., “Analytical Study of Reacting Force of Liquid Meniscus Bridge (Basic Characteristics by Dynamic Contact Angle Model Considering Capillary Force)”, Intl Tribology Conf., Hiroshima 2011 (ITC Hiroshima 2011) Oct. 30-Nov. 3, 2011, Hiroshima, Japan, P13-13
- ⑩ Matsuda, K., Matsuoka, H. and Fukui, S., “Analytical Study on Liquid Transfer by Breakage of Liquid Meniscus Bridge”, Intl Tribology Conf., Hiroshima 2011 (ITC Hiroshima 2011) Oct. 30-Nov. 3, 2011, Hiroshima, Japan, P13-10
- ⑪ Fukui, S., Sato, A. and Matsuoka, H., “Static and Dynamic Flying Characteristics of a Slider on Bit Patterned Media (Dynamic Responses Based on Frequency Domain Analysis)”, ASME Information Storage and Processing Systems Conf. (ISPS 2011), Santa Clara, CA, June 13-14, 2011, TR-C2, pp.131-133
- ⑫ Matsuoka, H., Kan-nen, M. and Fukui, S., “Lubricant Transfer Caused by Breakage of Liquid Meniscus Bridge”. ASME Information Storage and Processing Systems Conf. (ISPS 2011), Santa Clara, CA, June 13-14, 2011 TR-A2, pp.20-22
- ⑬ Matsuoka, H., Kan-nen, M. and Fukui, S., “Characteristics of Lubricant Pick-up due to Breakage of Liquid Meniscus Bridge”, AsiaTrib 2010, Extended Abstract ID1132, Perth, Australia, Dec. 5-9, 2010
- ⑭ Fukui, S., Sato, A. and Matsuoka, H., “Molecular Gas-film Lubrication Analyses of a Slider over a BPM Disk (Static and Dynamic Flying Characteristics of a 3-DOF Slider)”, AsiaTrib 2010, Extended Abstract ID1148, Perth, Australia, Dec. 5-9, 2010

〔解説〕(計1件)

- ① 福井茂寿、気体潤滑への導入、トライボロジスト、第57巻第3号(2012) pp.

155-156

[その他]

ホームページ

[http://www.damp.tottori-u.ac.jp/~lab2/index\\_j.html](http://www.damp.tottori-u.ac.jp/~lab2/index_j.html)

## 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

### (3) 連携研究者

なし