

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3月31日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560143

研究課題名（和文） 液体メニスカス架橋の破断による潤滑剤ピックアップ特性の解明

研究課題名（英文） Characteristics of lubricant pick-up due to breakage of liquid meniscus bridge

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（和文）：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）における液体潤滑剤のピックアップ現象について、特に、液体メニスカス架橋の破断によるピックアップ現象の特性を理論的・実験的に解明した。具体的には、液体メニスカス架橋の破断特性および破断後のピックアップ特性を、応募者らが開発した測定装置によって実験的に解明すると共に、構築した理論を検証することにより、基本的知識とデータを蓄積した。

研究成果の概要（英文）：Characteristics of lubricant pick-up due to breakage of liquid meniscus bridge have been clarified theoretically and experimentally. An apparatus that the researchers developed was used in the experiments and a theory that the researchers proposed was verified using the experimental data. Finally, we could obtain basic knowledge and data with respect to the lubricant pick-up.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：トライボロジー、情報マイクロ／ナノシステム

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、Micro/Nano-electromechanical System (MEMS/NEMS)) 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）があ

る。回転するディスク上に浮動形磁気ヘッドが数ナノメートル (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。このように、ヘッドが媒体に非常に近接して浮上している場合、媒体上の液体潤滑剤がヘッドに移着し (これを潤滑剤のピックアップと呼ぶ)、ヘッドの浮上特性や記録信号の書き込み・読み出しに影響することが、超低浮上化による磁気ディスク装置の大容量化の1つの問題となってきた。この液体潤滑剤のピックアップの主な機構としては、(1)ディスク表面から蒸発した潤滑剤がヘッド表面で凝縮すること、(2)表面粗さや振動によってヘッドが潤滑剤に接触し、その際に形成された液体メニスカス架橋が破断してヘッド側に液体が残ることなどが挙げられる。

応募者は、これまでヘッドの浮上特性解析 (S. Fukui, T. Kanamaru and H. Matsuoka, *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 44, Pt.2, pp. 3671-3674, 2008) やディスク上の液体超薄膜の挙動解析 (F. Saeki, S. Fukui and H. Matsuoka, *IEEE Trans. on MAG.*)、さらには液体メニスカス架橋の静的・動的特性の解明 (H. Matsuoka, K. Ishihara, K. Inada and S. Fukui, *ASME Proc. IJTC2007*) を、実験・理論の両面から行ってきた。従って、研究開始当初において、応募者は、上記ピックアップの問題解明のカギとなる基本的な知見や技術を蓄積していた。

また、こうした現象は古くから知られていたが、磁気ヘッドの超低浮上化が進んだごく最近になって問題となり得ることが顕在化したものであり、研究開始当初においてはその系統的かつ詳細な研究は皆無であった。いち早く本研究に着手し、科学的知見および技術的優位を確保することが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、特に上記(2)の液体メニスカス架橋の破断による潤滑剤のピックアップに関して、実験的・理論的にその基本特性を明らかにするとともに、その具体的な応用として磁気ディスク装置を対象とし、将来のさらなる高記録密度化の実現に向けた基本的知識の蓄積とそれらを応用した設計指針を得ることを目的とした。これにより、液体メニスカス架橋の破断による潤滑剤ピックアップ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た。

3. 研究の方法

本研究は、液体メニスカス架橋の破断による潤滑剤のピックアップに関して、実験的・理論的にその基本特性を明らかにすると

もに、その具体的な応用として磁気ディスク装置を対象とし、将来のさらなる高記録密度化の実現に向けた基本的知識の蓄積とそれらを応用した設計指針を得ることを目的とした。具体的には、以下の項目について研究を行い、上記目的の達成を目指した。

- (1) 液体メニスカス力測定装置 (研究代表者らが独自開発したものを本研究の目的に合致するように改良予定) を用いて、面外方向の引っ張りによる液体メニスカス架橋の破断特性・ピックアップ特性の実験的解明とその予測理論の構築
- (2) ピン・オン・ディスク型しゅう動試験装置 (現有) を用いて、面内方向のせん断による液体メニスカス架橋の破断特性・ピックアップ特性の実験的解明とその理論の構築
- (3) 原子間力顕微鏡 (AFM) (現有) を用いた液体分子効果の検討
- (4) 潤滑剤ピックアップを考慮した磁気ヘッドの浮上特性解析と HDI の設計指針の提案

4. 研究成果

上記の具体的な実施事項(1)～(4)に関する研究成果について、実験結果および計算結果のグラフを示して説明する。

- (1) 液体メニスカス力測定装置を用いた実験

図1のように、液体メニスカス架橋を面外方向に引っ張り、破断後の液体のピックアップ割合 (液体の全体積に対してピックアップされた液体の体積の割合) を測定した。また、同時に液体メニスカス架橋破断の理論解析モデルを提案し、実験値と比較した。その結果を図2, 3に示す。実験による液体ピックアップ割合の測定技術を確立すると共に、固体表面の引き離し速度を変化させてピックアップ割合を測定した。本研究の実験範囲では、引き離し速度への依存性はないことが分かった。また、実験値と理論値は比較的良く一致し、理論の妥当性を示すことができた。さらに、固体の種類を変えた実験も行い、表面粗さの影響の可能性を示した。これについては、今後さらに実験を重ねて特性解明を行う予定である。

- (2) ピン・オン・ディスク型しゅう動試験装

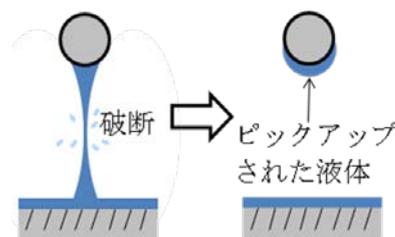


図1 液体メニスカス架橋の破断によるピックアップ

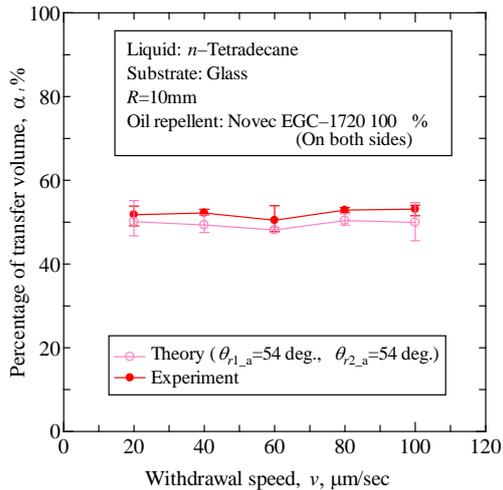


図2 液体メニスカス架橋の破断によるピックアップ割合 (ガラス間)

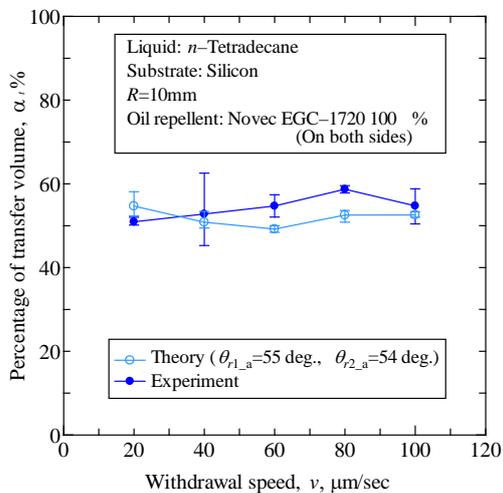


図3 液体メニスカス架橋の破断によるピックアップ割合 (ガラス-シリコン間)

置を用いた実験

図4のように、固体表面間に形成した液体メニスカス架橋の一方の固体壁面をせん断方向にスライドさせ、液体の臨界せん断速度 u_{sm} を測定した。実験方法は、実験前の液体メニスカス架橋の液体の体積を測定しておき、一定速度でディスクを回転させ、10分後の液体の体積を測定することで液量変化割合 α_r を算出した。この割合 α_r が急激に変化するディスク速度が臨界せん断速度 u_{sm} である。また、同時に理論解析も行った。結果を図5に示す。これより、理論値 ($u_{sm} = 11.36$ mm/s) と実験値がほぼ一致することがわかった。従って、本研究で提案した理論解析が妥当であることが示されたとともに、実験技術を確認することができた。

(3) 原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた実験

微小な液量における液体メニスカス架橋の破断特性を解明するため、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いてナノメートルオーダーの膜厚の

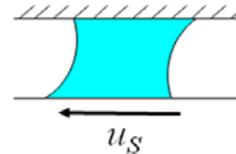


図4 液体メニスカス架橋のせん断

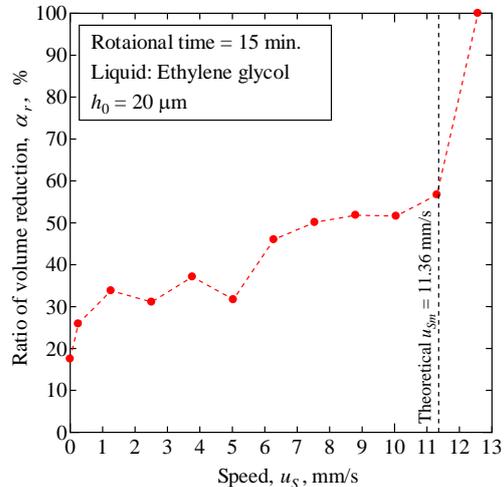


図5 液体メニスカス架橋の臨界せん断速度測定結果

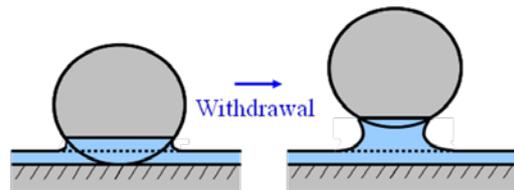


図6 原子間力顕微鏡 (AFM) による微小メニスカス架橋の特性測定

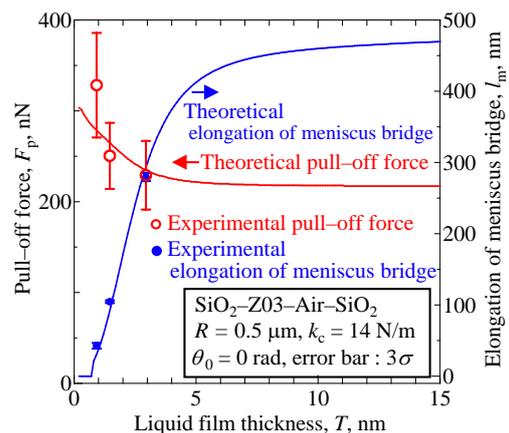


図7 微小メニスカス架橋のメニスカス力・破断長さのAFM測定結果および理論計算結果

液体膜によって形成される液体メニスカス架橋 (図6参照) のメニスカス力と破断長さを測定した。また、同時に液膜の分離圧を考慮した理論モデルを構築し、実験値と比較し

た。実験結果および理論解析結果を図7に示す。これらより、実験値と理論値は比較的良く一致していることが示された。

(4) 潤滑剤ピックアップを考慮した磁気ヘッドの浮上特性解析とHDIの設計指針の提案
上記の通り、各項目について実験および理論の構築を並行して行い、それらを比較することによって、理論の妥当性を検証した。これらより、概ね妥当な理論の構築がなされたと考えられる。これらを応用した磁気ヘッドの挙動解析プログラムの開発に着手し、近年開発が進んでいるビット・パターンド・メディア(BPM)や熱アシスト記録(HAMR)におけるヘッド・ディスク・インターフェース(HDI)解析の基本ソフトウェアを作製した。

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6件)

- ① H. Matsuoka, K. Matsuda, and S. Fukui, "Theoretical Model for Lubricant Pickup Considering Disjoining Pressure of Nanometer Thick Film," *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 48, Issue 11, Nov. 2012, pp. 4257-4260, DOI: 10.1109/TMAG.2012.2197735. (査読有)
- ② H. Matsuoka, M. Kan-nen, and S. Fukui, "Lubricant transfer caused by breakage of liquid meniscus bridge," *Microsystem Technologies*, Vol. 18, Issue 9-10, Sep. 2012, pp. 1607-1613, DOI: 10.1007/s00542-012-1598-6. (査読有)
- ③ S. Fukui, A. Sato, and H. Matsuoka, "Static and dynamic flying characteristics of a slider on bit-patterned media (dynamic responses based on frequency domain analysis)," *Microsystem Technologies*, Vol. 18, Issue 9-10, Sep. 2012, pp. 1633-1643, DOI: 10.1007/s00542-012-1601-2. (査読有)
- ④ H. Matsuoka, M. Kan-Nen, and S. Fukui, "Theoretical Model for Lubricant Pick-Up (Breakage of Liquid Meniscus Bridge Due to Elongation in Bridged Direction)," *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 47, Issue 10, Oct. 2011, pp. 3582-3585, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2148106. (査読有)

⑤ S. Fukui, K. Hozumi, and H. Matsuoka, "Frequency domain analyses of a thin liquid film surface by repetitively applied stress (dynamic response analyses by the long wave equation)," *Microsystem Technologies*, Vol. 17, Issue 5-7, June 2011, pp. 1099-1107, DOI: 10.1007/s00542-010-1214-6. (査読有)

⑥ H. Matsuoka, K. Oka, Y. Yamashita, F. Saeki, and S. Fukui, "Deformation characteristics of ultra-thin liquid film considering temperature and film thickness dependence of surface tension (Three-dimensional analyses by the unsteady and linearized long wave equation)," *Microsystem Technologies*, Vol. 17, Issue 5-7, June 2011, pp. 983-990, DOI: 10.1007/s00542-011-1223-0. (査読有)

[学会発表] (計9件)

- ① S. Fukui, N. Kitagawa, R. Wakabayashi, K. Yamane, and H. Matsuoka, "Molecular gas-film lubrication analyses considering boundary temperature distributions," ASME/JSME Joint Intl Conf. on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), 2012.6.20, 米国サンタクララ大学.
- ② S. Fukui, A. Oono, and H. Matsuoka, "Flying characteristics of an air bearing slider over a disk with grooves and distributions of material properties," ASME/JSME Joint Intl Conf. on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), 2012.6.20, 米国サンタクララ大学.
- ③ H. Matsuoka, N. Kitahama, and S. Fukui, "Theoretical Study of van der Waals Dispersion Force between Macroscopic Bodies with a Periodic Material Distribution," ASME/JSME Joint Intl Conf. on Micromechanics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), 2012.6.20, 米国サンタクララ大学.
- ④ H. Matsuoka, K. Matsuda, and S. Fukui, "Theoretical Model for Lubricant Pick-up Considering Ultra-thin Liquid Film Effect," *Intermag2012*, 2012.5.11,

カナダ・バンクーバー.

- ⑤ S. Fukui, A. Sato, and H. Matsuoka, "Static and Dynamic Flying Characteristics of a Slider on Bit-Patterned Media (Dynamic Responses Based on Frequency Domain Analysis), " ASME ISPS2011, 2011. 6. 13, 米国サンタクララ大学.
- ⑥ H. Matsuoka, M. Kan-nen, and S. Fukui, "Lubricant Transfer Caused by Breakage of Liquid Meniscus Bridge," ASME ISPS2011, 2011. 6. 13, 米国サンタクララ大学.
- ⑦ H. Matsuoka, M. Kan-nen, and S. Fukui, "Theoretical Model for Lubricant Pick-Up (Breakage of Liquid Meniscus Bridge Due to Elongation in Bridged Direction)," Intermag2011, 2011. 4. 28, 台湾・台北国際会議センター.
- ⑧ H. Matsuoka, M. Kan-nen, and S. Fukui, "Characteristics of Lubricant Pick-up due to Breakage of Liquid Meniscus Bridge," AsiaTrib2010, 2010. 12. 7, オーストラリア・パース.
- ⑨ 松岡広成, 「液体メニスカス架橋の動特性」, 第2回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2010. 10. 13, くにびきメッセ(松江市). (招待講演)

[その他]

ホームページ

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

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