

平成 30 年 8 月 21 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05764

研究課題名(和文) 分子間力によって生じる非接触物体間の応力解析とその次世代超高密度磁気記録への応用

研究課題名(英文) Analyses of stress between incontacting bodies due to intermolecular force and its application to ultra-high density magnetic recording in the next generation

研究代表者

松岡 広成 (Matsuoka, Hiroshige)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10314569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1)レナードジョーンズポテンシャルに基づいて1次元面内方向材料分布を有する物体の非接触状態における垂直・せん断応力を導出する手法を確立し、それらの基本特性を明らかにした。(2)上記1次元の計算手法を拡張し、周期的2次元分布についての垂直応力・せん断応力の導出に成功した。(3)球・平面間における応力分布を求め、その基本特性を明らかにした。(4)表面力測定装置を使用し、球・平面間の表面間力を超高精度に測定すると共に、表面粗さの影響を明らかにした。(5)表面間力を考慮した磁気ヘッドスライダの浮上特性解析を行い、温度分布および固体表面の適応係数の影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：(1)A method of deriving the normal and shear stresses under the non-contact condition has been established considering one-dimensional material distributions in the in-plane direction based on the Lennard-Jones potential. (2)Based on the above one-dimensional calculation, the stresses for periodical two-dimensional material distribution have been successfully derived. (3)Stress distributions between a sphere and a plane have been calculated and the basic characteristics were clarified. (4)Using a surface force tester, the surface forces between a sphere and a plane were measured with an ultra-high resolution. The effects of surface roughness has been clarified. (5)Flying characteristics of a magnetic head slider were analyzed considering the surface forces. The effects of temperature distribution and accommodation coefficients of boundaries were clarified.

研究分野：トライボロジー

キーワード：表面間力 応力分布 非接触状態の応力分布 材料分布によるせん断応力 材料分布による表面間力の変化

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/nanoelectromechanical 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、例えば超硬質材料被膜や液体 (軟質材料) 被膜が施される場合が多く、これらの被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・ディスク・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スライダが数ナノメートル (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、多層超薄膜系における様々な問題が顕在化し、HDI 設計はこれらを克服する必要がある。さらに、最近では次世代の高密度記録方式として、Discrete track media (DTM) や Bit-patterned media (BPM) と呼ばれる微細加工技術を応用したパターンメディア、Heat-assisted magnetic recording (HAMR) や Microwave-assisted magnetic recording (MAMR) と呼ばれるエネルギーアシスト磁気記録方式等も考案され、これらに特有の諸現象の解明とともに、実用化に向けた研究が進められている。

本研究では、これらの新方式の中で、Bit-patterned media (BPM) を対象とした。従来の HDI における材料構成は、ディスクの走行方向に対して垂直な方向に固体・液体・気体の超薄膜の多層構造を有しているが、BPM では、それに加えて走行方向に材料が変化する。すなわち、物性値の異なる磁性体と非磁性体が磁気ヘッドスライダの直下を通過する。これにより、磁気ヘッドスライダと磁気ディスク間の表面間力が時間的に変化する。ビットパターンは非常に小さく、それのみでは高周波 (例えば 1 GHz) の外乱となるため機械系への影響は少ないが、BPM 上にはデータ領域やサーボ領域等のパターンが変化する領域があり、これらの領域の変化は低周波成分 (kHz オーダー) を含むため、スライダの浮上特性に影響を及ぼす。また、均一に作製した材料であっても、物性値にばらつきが生じるため、これも表面間力変化の低周波成分になり得る。従って、BPM の実用化のためには、

ディスクの走行方向、すなわち固体表面の広がり方向に材料あるいは材料特性が分布し、かつ、物体が非接触状態で分子間力によって生じる表面間応力 (材料が面内分布する場合は、垂直応力に加えてせん断応力も発生) の特性を理論的・実験的に解明する必要があった。本研究では、レナード・ジョーンズ (LJ) ポテンシャルに基づいた表面間応力を取り扱う。表面に垂直な方向の多層構造に対する表面間力、特にファンデルワールス (vdW) 引力に関しては既に研究例が数件あり、応募者も研究成果を発表している (例えば、H. Matsuoka, *et al.*, *Microsyst. Technol.*, Vol. 11, 2005, pp. 824)。これに対し、表面内の材料分布についての研究例は、研究代表者らが最近発表したもの (H. Matsuoka, *et al.*, *Microsyst. Technol.*, Vol. 19, 2013, pp. 1661; *同誌*, 2014, DOI 10.1007/s00542-014-2129-4) の他は皆無であり、学術・技術の両面から当該分野の発展が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) 面内方向に材料分布あるいは材料特性分布があり、かつ、物体が非接触状態での分子間力に起因する表面間応力 (垂直・せん断応力) の基本特性を理論的に解明すること、(2) 原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、理論により得られる結果を実験的に検証すること、(3) 磁気ヘッドの浮上特性解析に適用し、BPM におけるヘッド・ディスク・インターフェース (HDI) 設計の指針を得ることである。

3. 研究の方法

3 つの具体的研究項目について、松岡 (代表者)、福井 (分担者) の 2 名で分担して研究を遂行する。(1) 材料分布を有する表面に働く表面間応力の理論の構築と基本特性の解明 (松岡)、(2) AFM を用いた実験計測手法の確立と理論の検証 (松岡)、(3) BPM 上の磁気ヘッドスライダの浮上特性解析と設計指針の抽出 (福井)。平成 27 年度は特に (1) に力を入れ、(2)、(3) については準備を開始する。

4. 研究成果

初年度 (平成 27 年度) は、まず、分子間の引力と斥力の双方を含むレナード・ジョーンズ (LJ) ポテンシャルから出発し、1 次元の面内方向材料分布を有する物体の非接触状態における垂直・せん断応力を導出した。従来の研究では、ファンデルワールス引力のみを考慮した理論が展開されていたが、LJ ポテンシャルを用いることにより、固体表面が近接した場合の表面間力の垂直応力 (圧力) とせん断応力を精密に計算することが可能となった。特に、面内方向に材料分布を有する場合のせん断応力を計算できるようになったのは、従来の垂直応力

(圧力)のみの計算とは大きく異なる点である。この理論を用いて、非接触状態における物体内部の応力分布をベクトル図で示した。また、垂直応力(圧力)とせん断応力のそれぞれの引力成分と斥力成分が釣り合う条件を明らかにした。次に、相互作用する物体の形状を平行平面に特定し、これらの応力を積分することによって、物体間に働く相互作用力を計算した。その結果、材料界面上部での相互作用力の変化は材質の変化よりも緩やかであること、物体の長さを材料分布の周期の整数倍にすると垂直力は変化しないこと等を明らかにした。

平成 28 年度は、昨年度の 1 次元面内方向材料分布の計算を拡張し、周期的 2 次元分布についての垂直応力・せん断応力の導出を行った。周期的 2 次元面内方向材料分布に対する材料特性分布関数を複素フーリエ級数展開し、レナード・ジョーンズ(LJ)ポテンシャルをベースに計算した。数値計算の必要な定積分については、かなり大きな計算時間を必要とするため、データベース化し、補間することによって計算するようプログラミングを行った。これにより、計算時間の飛躍的な短縮を実現できた。また、具体的な応力分布の計算例として、2 種類の材料が周期的に分布した面を対象に非接触状態での表面間力の計算を行い、その垂直応力・せん断応力の分布を定量的に示した。せん断応力については、表面内の分布をベクトルで示した。求めた応力を積分し、物体間に働く相互作用力を計算すると共に、それらの基本特性を明らかにした。

最終年度(平成 29 年度)においては、まず、前年度までに導出手法を確立した周期的 2 次元面内方向材料分に対する垂直応力・せん断応力の式に基づいて、球・平面間における各応力分布を求める手法を確立した。球・平面間における応力分布の最小 2 面間距離依存性、曲率半径依存性、材料分布の空間周期依存性、屈折率依存性等の諸特性を明らかにした。これは、実験においては応力分布を直接得ることができず、特定の形状の固体表面間に働く力が測定されるため、実験と理論との橋渡しを強く意識した解析である。次に、これらを実験的に検証するための手法として、表面力測定装置を使用し、球・平面間の表面力の超高精度測定を試みた。その結果、非接触時の表面力を捉えることができた。また、接触時から 2 固体表面を引き離す時の凝着力(表面力の 1 種)について、その表面粗さ依存性を詳細に調べ、基本特性を明らかにした。さらに、表面間力を考慮した磁気ヘッドスライダの浮上特性解析(静特性・動特性)を行い、温度分布および固体表面の適応係数の影響を明らかにした。

これらより、本研究課題の目的は、概ね達成されたものと考えられる。また、これらの成果は、磁気ディスク装置を含む微小

機械の設計、ひいては固体接触理論等の基礎科学に重要な役割を果たすものである。

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 3 件)

1. H. Matsuoka, T. Tanaka, and S. Fukui, "Theoretical study of surface interaction stresses considering one-dimensional material distributions in the in-plane direction based on the Lennard-Jones potential," *Microsystem Technologies*, 10.1007/s00542-016-3194-7.
2. S. Fukui, Y. Okamura, A. Nakasuji, and H. Matsuoka, "Thermo-molecular gas-film lubrication dynamics considering boundary temperature and ambient gas (2-DOF numerical analysis by t-MGL equation)," *Microsystem Technologies*, 10.1007/s00542-015-2808-9.
3. H. Matsuoka, R. Miyake, S. Maegawa, and S. Fukui, "Theoretical analyses of surface interaction stresses considering two-dimensional periodic material distributions," *Microsystem Technologies*, 10.1007/s00542-018-3841-2.

〔学会発表〕(計 26 件)

1. 大谷稔紀, 三宅諒哉, 松岡広成, 福井茂壽, 「1 次元繰り返し分布を有する固体表面間に働く相互作用力の理論解析」, 日本機械学会中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2016 年, 愛媛大学.
2. 宮本慧, 三宅諒哉, 松岡広成, 福井茂壽, 「2 種類の媒質からなる物体に働く相互作用力の理論解析(微小機械要素表面間働く相互作用力)」, 日本機械学会中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2016 年, 愛媛大学.
3. 岡村祐輝, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面温度を考慮した分子気体潤滑(t-MGL)解析 - 自由分子流領域における圧力・せん断応力解析 - 」, 日本機械学会中国四国支部第 54 期総会・講演会, 2016 年, 愛媛大学.
4. 岡村祐輝, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度と適応係数を考慮した分子気体潤滑(t-MGL)理論の構築 - 自由分子流領域に着目したスライダ浮上基本特性 - 」, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会(IIP2016), 2016 年, 東洋大学.
5. H. Matsuoka, T. Tanaka, R. Miyake, and S. Fukui, "Theoretical Study of Surface Interaction Stresses Considering One-dimensional Material Distributions in the In-plane Direction Based on the Lennard-Jones Potential," 2016 ASME Information Storage and Processing System (ISPS2016), 2016, Santa Clara, USA.
6. S. Fukui, Y. Okamura, and H. Matsuoka, "Thermo-molecular Gas-film Lubrication (t-MGL) Analysis in the Free Molecular Limit (Effects of Accommodation Coefficients on

Static Pressure),” 2016 ASME Information Storage and Processing System (ISPS2016), 2016, Santa Clara, USA.

7. 大谷稔紀, 三宅諒哉, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「LJ ポテンシャルに基づく1次元繰り返し媒質分布を有する固体表面間に働く相互作用力の理論解析」, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016年, 九州大学.

8. 浅田凌太, 岡村祐輝, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) 解析 (自由分子流 t-MGL 静特性における適応係数の影響)」, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016年, 九州大学.

9. 種岡純哉, 岡村祐輝, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) 解析 (自由分子流 t-MGL ダイナミクスにおける適応係数の影響)」, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016年, 九州大学.

10. 三宅諒哉, 大谷稔紀, 北濱仁希, 松岡広成, 福井茂壽, 「周期的媒質分布を有する固体表面間に働く相互作用応力の2次元解析 (LJ ポテンシャルに基づく解析)」, 日本トライボロジー学会2016秋新潟, 2016年, 新潟.

11. 三宅諒哉, 大谷稔紀, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「周期的媒質分布を有する固体表面間に働く相互作用応力の理論解析 (LJ ポテンシャルに基づく2次元解析)」, 日本機械学会中国四国支部第55期総会・講演会, 2017年, 広島工業大学.

12. 三宅諒哉, 大谷稔紀, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「2次元周期的媒質分布を有する固体表面間に働く相互作用応力の理論解析」, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2017), 2017年, 東洋大学.

13. H. Matsuoka, R. Miyake, S. Maegawa, and S. Fukui, “Theoretical Analyses of Surface Interaction Stresses Considering Two-dimensional Periodic Material Distributions,” 2017 ASME Information Storage and Processing System (ISPS2017), 2017, San Francisco, USA.

14. H. Matsuoka, T. Otani, T. Hikosaka, S. Maegawa, and S. Fukui, “Theoretical Study of Surface Interaction Force Considering One-dimensional Periodic Material Distribution,” World Tribology Congress (WTC) 2017, 2017, Beijing, China.

15. S. Fukui, S. Shimizu, R. Asada, F. Shinohara, S. Maegawa, and H. Matsuoka, “Influence of Accommodation Coefficients on Thermo-Molecular Gas-film Lubrication (t-MGL) Characteristics –Analysis in the Free Molecular Limit–,” World Tribology Congress (WTC) 2017, 2017, Beijing, China.

16. 森知也, 種岡純哉, 小林隼人, 長谷川真之, 小俣有紀子, 前川覚, 松岡広成, 加藤孝久, 福井茂壽, 「表面粗さが凝着力低減に及ぼす影響 表面粗さと凝着力の同位置測定」, 日本トライボロジー学会2017春東

京, 2017年, 東京.

17. 浅田凌太, 篠原郁哉, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度と適応係数を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) 解析 任意の温度分布に対する圧力・せん断応力解析」, 日本機械学会2017年度年次大会, 2017年, 埼玉大学.

18. 松岡広成, 「液体超薄膜と表面間力」(招待講演), 日本機械学会2017年度年次大会, 2017年, 埼玉大学.

19. 種岡純哉, 小林隼人, 長谷川真之, 小俣有紀子, 前川覚, 松岡広成, 加藤孝久, 福井茂壽, 「粗さを有する表面の凝着力に関する実験的検討」, 日本トライボロジー学会2017秋高松, 2017年, 香川.

20. 大谷稔紀, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「分子間相互作用によって生じる固体内部の応力分布」, 日本トライボロジー学会2017秋高松, 2017年, 香川.

21. 種岡純哉, 小林隼人, 長谷川真之, 小俣有紀子, 松岡広成, 加藤孝久, 福井茂壽, 「粗さを有する表面の表面エネルギー低減効果に関する研究」, 日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会, 2018年, 徳島大学.

22. 浅田凌太, 篠原郁哉, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度と適応係数を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) 解析 速度プロフィールに着目した t-MGL 静特性の解明」, 日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会, 2018年, 徳島大学.

23. 篠原郁哉, 浅田凌太, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度と適応係数を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) ダイナミクス スライダ浮上姿勢における適応係数の影響」, 日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会, 2018年, 徳島大学.

24. 浅田凌太, 篠原郁哉, 種岡純哉, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度と適応係数を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) 解析 (t-MGL 特性の数理的考察)」, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2018), 2018年, 東洋大学.

25. 篠原郁哉, 浅田凌太, 種岡純哉, 前川覚, 松岡広成, 福井茂壽, 「境界面の温度と適応係数を考慮した分子気体潤滑 (t-MGL) 解析 有限幅スライダの静的および動的挙動解析」, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2018), 2018年, 東洋大学.

26. 種岡純哉, 小林隼人, 長谷川真之, 小俣有紀子, 松岡広成, 加藤孝久, 福井茂壽, 「表面粗さによる表面エネルギー低減効果に関する研究」, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2018), 2018年, 東洋大学.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

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・教授
研究者番号：10314569

(2)研究分担者

福井 茂壽 (FUKUI, Shigehisa)
鳥取大学・大学院工学研究科・特任教授
研究者番号：40273883

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()