

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：15101  
 研究種目：基盤研究(C) (一般)  
 研究期間：2018～2020  
 課題番号：18K03908  
 研究課題名(和文) 分子間力による非接触弾性体の応力・変形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) Stress and deformation analyses of elastic body without contact generated by intermolecular forces and its application to the next generation ultra-high density magnetic recording

研究代表者  
 松岡 広成 (MATSUOKA, Hiroshige)  
 鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：10314569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：分子間の引力と斥力の両成分を含むレナード・ジョーンズ(LJ)ポテンシャルから出発し、一様な材料で構成される物体内部の分子が、1次元あるいは2次元の面内方向材料分布を有する物体から受ける応力を算出した。また、表面力測定装置を用いて、時間依存性の一つである引き離し速度に着目して表面力の変化を調べ、その特性を明らかにした。さらに、理論を磁気ヘッドの浮上特性解析に組み込むため、表面力に空気膜による反力を加味する検討を行った。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

弾性体が非接触の状態において、分子間力に起因する表面間応力(垂直・せん断応力)分布および弾性変形の基本特性を理論的に計算する手法を構築し、その基本特性を解明した。弾性体に対する分子間力による応力と弾性変形の系統的な研究は皆無であるため、学術的な独自性・先駆性をもつと共に、次世代高密度磁気記録技術において今後確実に重要になると考えられ、創造性・先進性に富むものである。また、磁気ディスク装置の超高記録密度化のみならず、同様の問題を包含するすべての科学技術(例えば、MEMS/NEMSの設計手法、接触・凝着理論、複合材料の相互作用の解明等)の発展に大きく寄与し得る汎用性・応用性の高いものである。

研究成果の概要(英文)：Stress acting on the molecules in a body that consists of homogeneous material generated by the molecules in another body that has 1- or 2-dimensional material distribution in in-plane direction was calculated from the Lennard-Jones potential that includes the intermolecular attractive and repulsive forces. The dependence of surface force on the withdrawal speed, which is one of the time-dependent characteristics, was observed by using a surface force apparatus and its characteristics were clarified. Furthermore, the repulsive force by gas-film lubrication was considered in addition to the surface force, in order to introduce the above theory into analyses of flying characteristics of a magnetic head.

研究分野：トライボロジー

キーワード：表面力 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 超高精度測定

## 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）が挙げられる。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、このような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、ビット・パターンド・メディア（BPM）と呼ばれる微細加工技術を応用したパターンドメディア、Heat-assisted magnetic recording (HAMR) や Microwave-assisted magnetic recording (MAMR) と呼ばれるエネルギーアシステッド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)を対象とする。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る。さらに、ナノメータ領域においては、こうした分子間力によって生ずる物体の微小な弾性変形も機械の作動特性に大きく影響する。従って、分子間力による弾性変形特性も解明する必要がある。すなわち、分子間力によって発生する弾性体の応力分布・変形特性の解明が必須である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、分子間力によって発生する弾性体内部の応力発生特性・弾性変形特性の解明およびその次世代超高密度磁気記録への応用である。より具体的には、

- (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、弾性体が非接触の状態において、分子間力に起因する表面間応力（垂直・せん断応力）分布および弾性変形の基本特性を理論的に解明すること。
- (2) 表面力測定装置（SFA）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、ビット・パターンド・メディア（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

上で示した本研究の目的の具体的な 3 つの項目について、松岡（代表者）、福井（分担者）の 2 名で分担して研究を遂行した。各項目における研究実施内容、担当、主な使用（予定）設備を表 1 にまとめる。特に、項目(2)の実験検証で用いた表面力測定装置（SFA）は、エリオニクス社の ESF-5000K を用いた。これは、変位を 0.1 nm の精度で測定することができ、球と平面間のフォースカーブの超高精度測定が可能である。

## 4. 研究成果

平成 30 年度（初年度）は、まず、分子間の引力と斥力の両成分を含むレナード・ジョーンズ（LJ）ポテンシャルから出発し、一様な材料で構成される物体内部の分子が、1 次元の面内方向材料分布を有する物体から受ける力を算出した。これを弾性体内部の点荷重としてミンドリンの解に代入し、非接触状態において弾性体内部に生じる垂直応力・せん断応力分布を求める計算手法を提案した。また、これを数値計算するプログラムの開発に着手し、その基本部分を作成す

ると共に、応力分布をカラーマップで表し（図 1）、表面間距離依存性や材料定数依存性等の基本特性を示した。実験に関しては、表面力測定装置を用いて高分子材料の一種である PDMS とガラス間の表面力を超高精度測定し、その特性を明らかにした。また、この理論を磁気ヘッドの浮上特性解析に組み込むための手法に関する基礎検討を行った。

令和元年度（2 年目）は、まず、前年度に確立した計算手法を応用し、一様な材料で構成される物体内部の分子が、面内方向に 2 種類の 1 次元的材料分布を有する物体から受ける力を算出した。これを弾性体内部の点荷重として Mindlin の解に代入し、非接触状態において弾性体内部に生じる垂直応力・せん断応力分布を求める計算手法を提案した。前年度は材料分布が周期的な場合を取り扱ったが、今年度は 2 種類の物質が 1 か所で接合する場合を取り扱い、より本質的かつ一般的な問題に適用できるように計算手法の拡張

表 1 研究内容・担当・設備

<p>(1) 応力・変形解析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Mindlin の解を適用した解析手法の確立（その後、有限要素解析も検討）</li> <li>・ 1 次元材料分布の後、2 次元分布を解析</li> <li>・ 周期的分布と非周期的分布を並行して解析</li> <li>・ 球・平面間の場合の解析</li> </ul> <p>担当：松岡（研究代表者）          主な使用設備：応力・変形解析用高速計算機</p>
<p>(2) 実験検証</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 球・平面間の超高精度フォースカーブ測定による検証手法の開発</li> </ul> <p>担当：松岡（研究代表者），研究補助学生          主な使用設備：表面力測定装置（SFA），各種 SFA サンプル類，エプソメータ，ディッピング装置</p>
<p>(3) 磁気ヘッド浮上解析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 既存のものに(1)の理論を組み込んだ静特性・動特性解析プログラムの開発</li> </ul> <p>担当：福井（研究分担者）          主な使用設備：高速計算機</p>

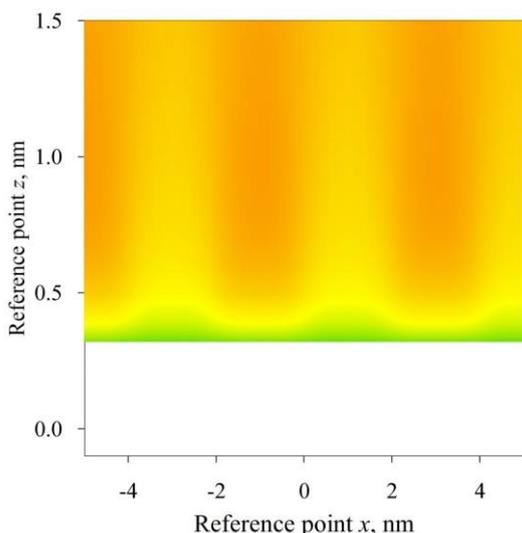


図 1 分子間力による垂直応力の分布（1次元理論計算）

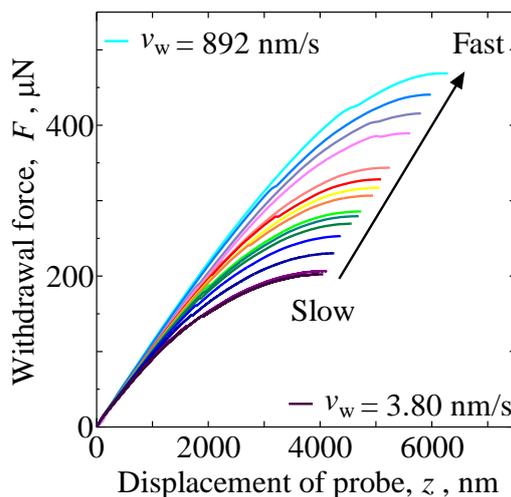


図 2 表面力の引き離し速度依存性（実験）

を達成することができた。また、前年度と同様にこれを数値計算するプログラムを開発し、応力分布をカラーマップで表し、基本特性を明らかにした。さらに、この応力を積分して力を計算するプログラムの開発に着手した。実験に関しては、表面力測定装置を用いて高分子材料の一種である PDMS とガラス間の表面力を超高精度測定した。特に、時間依存性の一つである引き離し速度に着目して表面力の変化を調べ、その特性を明らかにした（図 2）。また、弾性接触面の粘弾性を仮定した新しい接触・非接触モデルを提案した。さらに、この理論を磁気ヘッドの浮上特性解析に組み込むための手法の検討を行った。

令和 2 年度（3 年目）は、前年度までに確立した応力計算手法を用いて、一様な材料からなる球面と、面内方向に 2 種

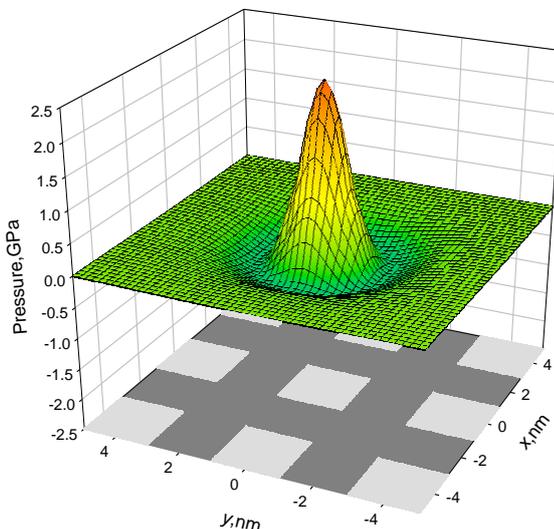


図 3 分子間力による垂直応力の分布（2次元理論計算）

類の1次元的あるいは2次元的な材料分布、特に繰り返し分布を有する半無限物体から受ける垂直応力・せん断応力を算出するプログラムを開発した。これを用いて、球面・平面間に働く各応力に関して、2面間距離および曲率半径への依存性を定量的に明らかにした(図3)。さらに、この応力を積分して力を計算するプログラムの開発を行った。実験に関しては、超高精度表面間力測定装置を用いて昨年引き続き表面力の引き離し速度依存性についてより詳細に調べた。その結果、シリコンゴムの一種であるPDMSの表面力が引き離し速度を大きくするとより急峻に変化することなどを明らかにした。さらに、この装置の引き離し過程のシミュレーションを行い、実験結果と比較した。その結果、硬い材料については計算結果とよく一致するが、柔らかい材料については荷重が負の領域で一致しないことが明らかとなった。また、この理論を磁気ヘッドの浮上特性解析に組み込むため、表面力に空気膜による反力を加味する検討を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroshige Matsuoka, Toshiki Otani, Shigehisa Fukui	4. 巻 Online
2. 論文標題 Stress distributions in an elastic body due to molecular interactions considering one-dimensional periodic material distribution based on Mindlin's solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microsystem Technologies	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00542-019-04537-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigehisa Fukui, Fumiya Shinohara, Ryota Asada, Hiroshige Matsuoka	4. 巻 Online
2. 論文標題 Thermo-molecular gas-film lubrication (t-MGL) considering temperature distributions and accommodation coefficients: analyses by quasi-free-molecular t-MGL equation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microsystem Technologies	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00542-019-04642-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Kishimoto, T. Ishikawa, J. Taneoka, M. Hasegawa, H. Kobayashi, H. Matsuoka, S. Fukui, T. Kato	4. 巻 15
2. 論文標題 Influence of Withdrawal Speed on Adhesion Force	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 60-67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2474/trol.15.60	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ryota Kishimoto, Takumi Ishikawa, Jun-ya Taneoka, Masayuki Hasegawa, Hayato Kobayashi, Hiroshige Matsuoka, Shigehisa Fukui and Takahisa Kato
2. 発表標題 Influence of Withdrawal Speed on Adhesion Force
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 隆広, 大谷 稔紀, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 分子間相互作用によって生じる弾性体内部の応力分布 ( 2 種の媒質が接合した場合の解析 )
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第58 期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸本 涼太, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 凝着力の引き離し速度依存性に関する研究 ( 接触粘弾性特性の実験式の提案 )
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第58 期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田 悠人, 河野 太一, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 水晶振動子 ( QCM ) を用いた表面力測定に関する基礎研究 ( 表面力と共振周波数シフトの基本特性 )
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第58 期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近田 匠, 山中 裕太, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 高周波せん断下における表面間力測定に関する基礎研究 ( 液体ナノ薄膜及び温度の QCM 共振周波数への影響 )
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第58 期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshige Matsuoka, Toshiki Otani and Shigehisa Fukui
2. 発表標題 Stress Distributions in an Elastic Body Due to Molecular Interactions Considering One-dimensional Periodic Material Distribution Based on Mindlin Solution
3. 学会等名 2018 ASME Information Storage & Processing Systems and Micromechatronics for Information and Precision Equipment (ISPS/MIPE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigehisa Fukui, Fumiya Shinohara, Ryota Asada and Hiroshige Matsuoka
2. 発表標題 Thermo-molecular Gas-film Lubrication (t-MGL) Considering Temperature Distributions and Accomodation Coefficients - Analyses by Quasi-free-molecular t-MGL Equation -
3. 学会等名 2018 ASME Information Storage & Processing Systems and Micromechatronics for Information and Precision Equipment (ISPS/MIPE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本 涼太, 種岡 純哉, 松岡 広成, 加藤 孝久
2. 発表標題 凝着力の引き離し速度依存性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近田 匠, 國澤 志生, 山中 裕太, 松岡 広成
2. 発表標題 高周波せん断下における表面間力測定に関する基礎研究 (液体ナノ薄膜及び温度の影響)
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中田 悠人, 河野 太一, 長谷川 真之, 小林 隼人, 松岡 広成, 福井 茂壽, 加藤 孝久
2. 発表標題 水晶振動子 (QCM) を用いた表面力測定に関する基礎研究 (超高精度表面力測定における共振周波数変化の解析)
3. 学会等名 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野 太一, 中田 悠人, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 表面力と水晶振動子 (QCM) の共振周波数シフトの関係
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾澤 賢, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 光でこ AFM 用カンチレバーに働く表面力とその振動特性への影響
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲林 聡, 別所 慶祐, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 一様な材料からなる球面と2次元繰り返し材料分布を有する固体平面との間に働く相互作用応力
3. 学会等名 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議2020秋別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野 太一, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 固体接触中における表面力と水晶振動子(QCM)の共振周波数シフトの基本特性
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部第59期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山福朋宏, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 高周波せん断下における表面間力測定に関する基礎研究 (温度の影響)
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部第59期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野 太一, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 水晶振動子 (QCM) を用いた表面力測定に関する基礎研究 (材料による共振周波数シフトの違い)
3. 学会等名 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2021)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	福井 茂壽 (FUKUI Shigehisa) (40273883)	鳥取大学・工学研究科・特任教授  (15101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------