

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14641

研究課題名（和文）マイクロスケールにおける凝着力の引き離し速度依存性と粘弾性を考慮した理論の構築

研究課題名（英文）Influence of withdrawal speed on adhesion force considering the viscoelasticity

研究代表者

石川 功（Ishikawa, Takumi）

鳥取大学・工学研究科・助教

研究者番号：70845164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はこれまで明らかにされていなかった凝着力の時間依存性について調べた研究である。時間依存性を調べるために、接触待機時間と引き離し速度を実験パラメータとして2面の材料間に働く凝着力を測定した。その結果、引き離し速度・接触待機時間が増加するにつれて凝着力が増加することが分かった。また、2面間の材料の組み合わせを変化させることにより、凝着力の時間依存性は材料の粘弾性に大きく左右されることが分かった。また、表面力測定装置のシミュレーションを行った結果、実験結果と良い一致を示す計算結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では引き離し速度と接触時間が凝着力に大きな影響を与えることを明らかにした。また、表面力測定装置のシミュレーションを行うことにより、引き離し速度と接触時間が凝着力に与える影響を定量化した。これらの結果は表面力が支配的となるマイクロデバイスの設計や性能向上に役立つ。また、本研究は2面間の垂直方向に働く表面力を主眼に置いた研究であるが、せん断方向に働く摩擦力も表面力と切り離せない関係にある。つまり、今後の摩擦・摩耗の分野に波及効果があり、更なる低摩擦・高耐久性を持った材料の組み合わせの選定にも役立つ可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This study investigates the time dependence of adhesion force, which has not been clarified previously. To investigate the time dependence property on adhesion force, the surface force between two materials was measured using the surface force apparatus by changing the contact time and the withdrawal speed during the experiment. The results showed that the adhesion force increased as the withdrawal speed and contact time increased. By changing the combination of materials between the two surfaces, we found that the time dependence of the adhesion force was mainly dominated by the viscoelasticity of the materials. The simulation of the surface force apparatus was conducted and showed good agreement with the experimental results.

研究分野：トライボロジー

キーワード：凝着力 時間依存性 引き離し速度 総接触時間 粘弾性特性 JKR理論 表面力測定装置のシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年、高性能なデバイスの小型化が加速しており、ミクロな世界での加工が重要性を増した。それに伴いスケール効果が生じ、凝着力などの表面力の影響が慣性力などの体積力に比べて顕著となる。その結果、表面力が微小構造物の性能を左右する現象が起き、表面間力の発生メカニズムと基本特性の解明が課題となっている。しかし、任意の固体表面間に対して凝着力を正確に予測する接触理論は確立されていない。また、表面力の時間依存性、例えば、引き離し速度や接触時間依存性等については、系統的な研究は皆無である。

2. 研究の目的

本研究では、特に 2 面の引き離し速度や接触時間が凝着力に与える影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、超高精度表面力測定装置を用いて球・平面間の凝着力を測定し、固体材料の粘弾性が凝着力に与える影響を明らかにする。また、表面力測定装置のシミュレーションを行うことにより、表面間力を予測する手法を開発し、材料特性を考慮した 2 物体間に働く表面力の特性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では球面プローブとして、粘弾性の大きいシリコン材料のポリジメチルシロキサン (PDMS)、粘弾性の小さいガラス材料の BK7 を用いた。平面基板のサンプルとしてはシリコン (Si)、白金 (Pt)、金 (Au)、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、を用いた。引き離し速度は 1 nm/s から 1 μm/s の範囲で変化させ、各組み合わせにおいて凝着力を複数回測定した。また、得られた凝着力のデータと先行研究の弾性接触理論 (JKR, DMT 理論) とを比較し、引き離し速度と凝着力の関係を明らかにした。また、粘弾性モデル (マクスウェルモデル、ケルビン・フォークトモデル、標準線形固体モデル) と実験データを比較することで、粘弾性を考慮した引き離し速度と凝着力の関係を理論的に明らかにした。

4. 研究成果

2020 年度では、実験環境設定および実験を行った。実験装置では表面力測定装置 (エリオクス社製 ESF-5000) を用いた。本装置は荷重制御を行うことによって引き離し実験を行うという装置であり、引き離し速度が引き離し中に変化してしまう問題点があったが、企業と連携することで、速度制御ができるようになった。図 1(a), (b) は引き離し速度を変化させた実験結果であるが、(a) は荷重制御、(b) は引き離し速度一定の下で行った実験である。両者とも PDMS 球と Si 基板の引き離し実験結果であるが、結果は定性的に一致しており、引き離し速度が増加するにつれ凝着力 (表面力の最大値) が増加することがわかった。この引き離し速度依存性は PDMS の粘弾性によるものである。引き離し速度が大きくなると、PDMS の変形が変位の変化にตอบสนองしきれず、接触開始時により近い接触面積が大きい状態で引き離れが生じるため、2 面間の引力が強くなり、凝着力が大きくなる。

また凝着力の引き離し速度依存性に加え、接触待機時間依存性についても同様に調べた。その結果接触待機時間が増加するほど、凝着力が増加することが分かった。これは 2 面間の接触時間が増加するにつれ、二面間がよりなじみ、接触面積が増加したためだと考えられる。

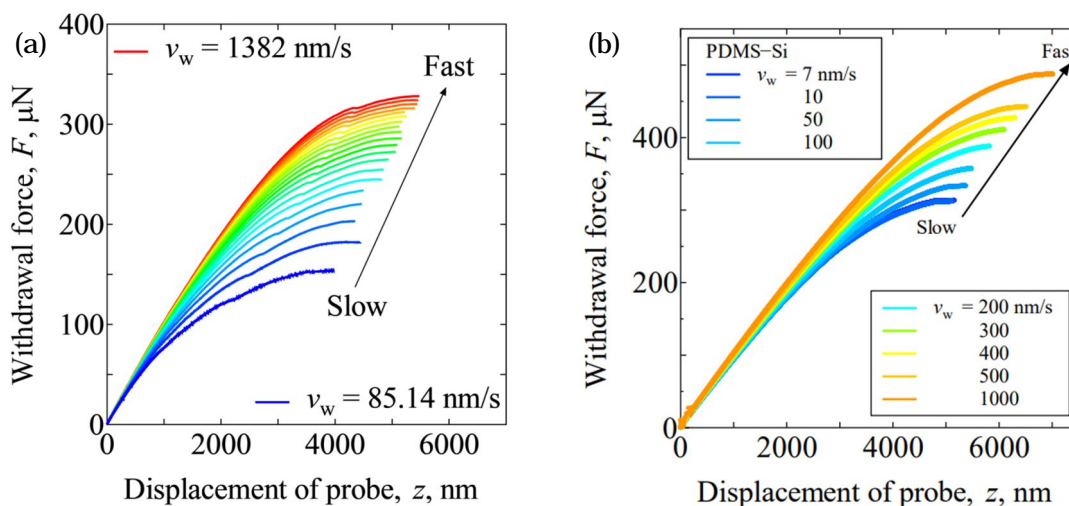


図 1 各引き離し速度におけるプローブの変位と表面力の関係。(a)は荷重制御試験であり、引き離し全体における平均的な引き離し速度を明記している。一方、(b)は速度制御試験であり、引き離し試験中の引き離し速度は一定の試験である。

2021 年度では、様々な材料の組み合わせによる引き離し実験を行った。実験結果を図 2 に示す。図 2(a)は PDMS 球を用いた実験結果であり、図 2(b)は BK7 球を用いた実験結果である。引き離し速度依存性は PDMS 球の実験結果にのみ現れたことから、引き離し速度依存性は PDMS の粘弾性によるものであることが再確認できた。また、その速度依存性は材料の組み合わせによって大きく異なることが分かった。

また、引き離し速度や接触待機時間をパラメータとしていろいろな条件の元で引き離し実験をしていくうちに、引き離し速度依存性が引き離し速度によって変化することが新たに分かった。図 3 がその実験結果であり、引き離し速度が 10 nm/s 以下では、引き離し速度が増加するにつれ、凝着力が下がる傾向が見られた。この傾向は図 2(a)のどの組み合わせを用いても同様の結果が見られた。これは引き離し速度が遅いと、引き離しまでにかかる接触時間が増加し、接触面積がそれだけ増加したためだと考えられた。

実験と並行して、実験装置のシミュレーションを行った。シミュレーションでは実験では直接得られない接触状態（接触半径、弾性変形量、押し込み深さなど）の予測が可能となる。2021 年度では BK7 球を用いた実験のシミュレーションを弾性接触理論を用いることにより行った。図 4 は JKR 理論を用いて計算した結果を実験結果とともに示した図である。赤点の実験結果と緑の曲線の計算結果はよく一致しており、JKR 理論が適用できることが分かった。

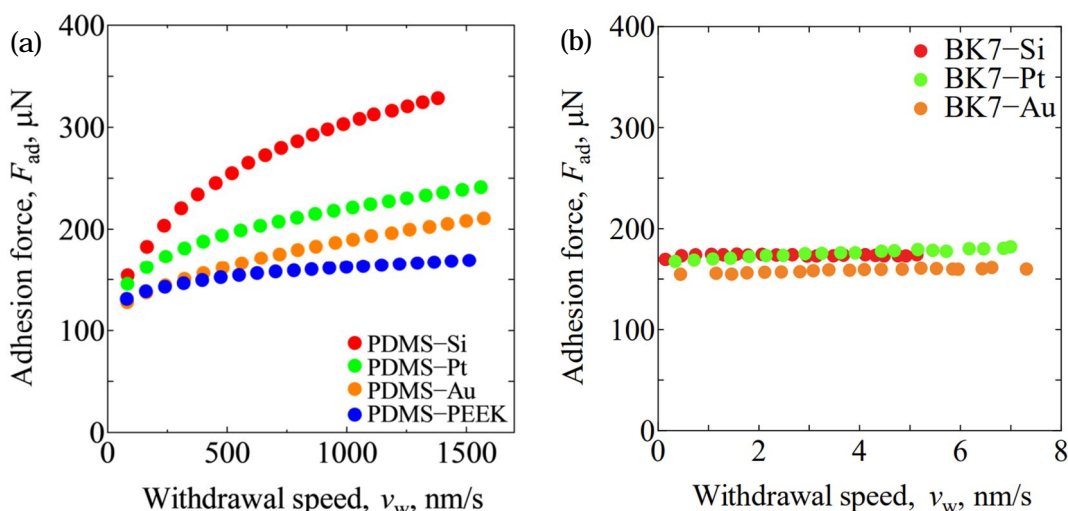


図 2 凝着力の引き離し速度依存性

(a)PDMS 球を用いた実験結果、(b)BK7 球を用いた実験結果

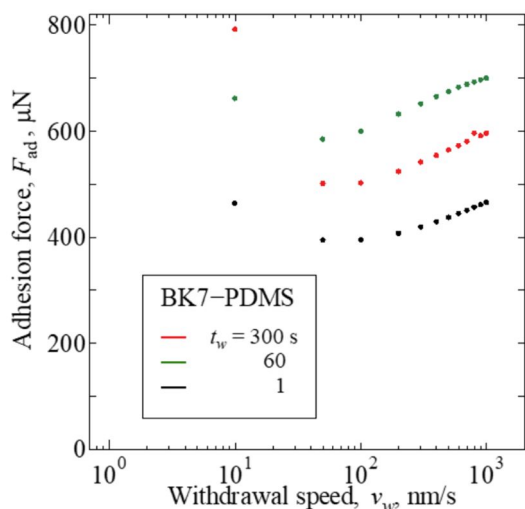


図 3 低速領域の凝着力の引き離し速度依存性

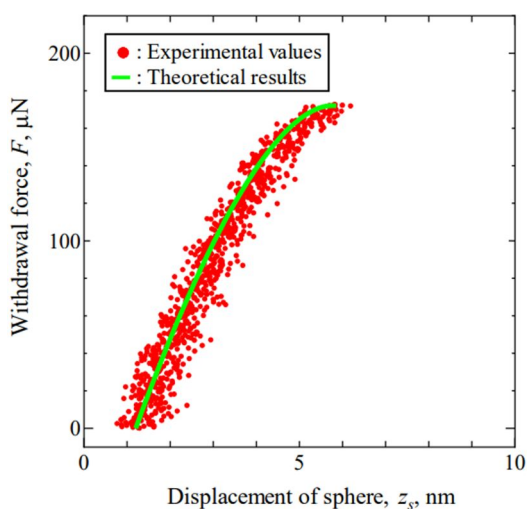


図 4 BK7 球と Si 基板の力 変位曲線

2022 年度では、図 3 に示した、低速度領域における凝着力の引き離し速度依存性についてより詳細に調べるため、総接触時間を固定にしたうえで、引き離し速度を変化させる実験を行った。その結果が図 5 である。総接触時間を一定にしたところ、速度が小さい場合においても、引き離し速度が増加すると凝着力が増加することが分かった。つまり、総接触時間と引き離し速度が凝着力の支配因子であることが明らかになった。

実験装置のシミュレーションでは粘弾性を持つ PDMS 球を用いた計算について取り組んだ。

図 6 は弾性接触理論を用いた PDMS 球の計算結果を実験結果とともに示した図である。図より実験結果と計算結果で大きな違いが見られた。つまり、表面力の予測には粘弾性の影響を取り入れる必要がある。粘弾性の特徴的な特性であるクリープや応力緩和の影響を取り入れた計算式を導入してさらに計算を行ったが、接触開始から引き離し開始までは実験値ととてもよく一致するものの、引き離し開始から引き離れまでの計算結果についてはよい一致を示さず、まだ検討が必要である。

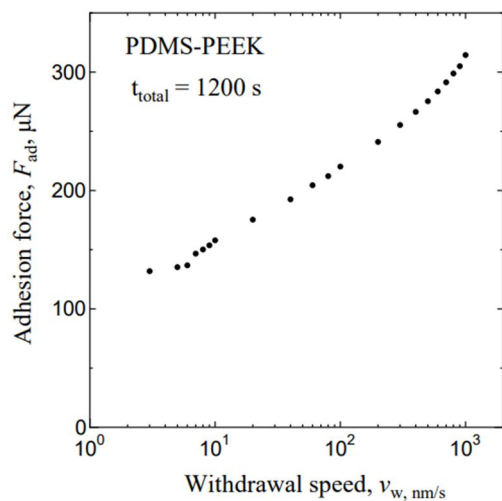


図 5 凝着力の速度依存性 (総接触時間固定)

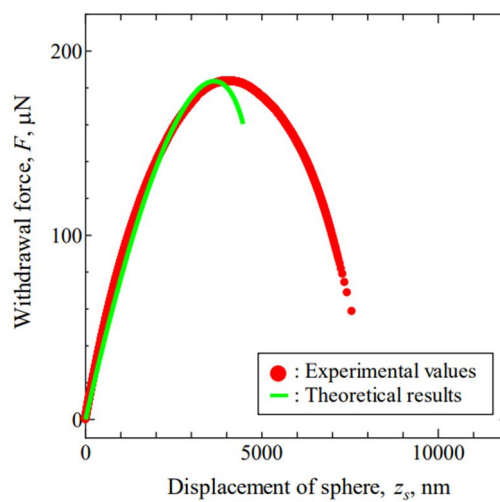


図 6 PDMS 球と Si 基板の力 変位曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鈴木礼生, 石川功, 長谷川真之, 小林隼人, 松岡広成, 加藤孝久
2. 発表標題 弾性接触理論を用いた表面力測定装置のシミュレーション
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 春 東京
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reo Suzuki, Takumi Ishikawa, Masayuki Hasegawa, Hayato Kobayashi, Hiroshige Matsuoka, and Takahisa Kato
2. 発表標題 Simulation of Surface Force Apparatus During Withdrawal Process Using Elastic Contact Theory
3. 学会等名 The 8th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University and Tottori University (JSMME 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taketo Shigemoto, Taichi Kono, Takumi Ishikawa, and Hiroshige Matsuoka
2. 発表標題 Withdrawal Speed Dependence of Surface Force and Resonant Frequency Shift of QCM During Contact Between Au Electrode Plane and PDMS Spherical Surface
3. 学会等名 The 8th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University and Tottori University (JSMME 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村拓己, 石川功, 松岡広成, 長谷川真之, 小林隼人, 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（速度制御型表面力装置を用いた高精度測定）
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第60期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中一吉, 中村拓己, 小林隼人, 長谷川真之, 加藤孝久, 石川功, 松岡広成
2. 発表標題 引き離し速度を制御した表面力の高精度測定
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川功, 岸本涼太, 長谷川真之, 小林隼人, 松岡広成, 福井茂寿, 加藤孝久
2. 発表標題 凝着力の時間依存性に関する研究 (2面の材料が凝着力に与える影響)
3. 学会等名 トライボロジー会議2020 秋 別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuyoshi Tanaka, Hayato Kobayashi, Masayuki Hasegawa, Takahisa Kato, Takumi Ishikawa, and Hiroshige Matsuoka
2. 発表標題 Effects of withdrawal speed on adhesion force at very low speed
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Informaiton and Precision Equipment (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 礼生、小林 隼人、長谷川 真之、加藤 孝久、石川 功、松岡 広成
2. 発表標題 表面力測定装置のシミュレーション (球・平面に対する理論解析)
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白濱 修己、重本 武人、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 (引き離し速度および総接触時間の影響)
3. 学会等名 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 重本 武人、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 (QCM電極と球状物体の接触力学モデル)
3. 学会等名 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 礼生、小林 隼人、長谷川 真之、加藤 孝久、石川 功、松岡 広成
2. 発表標題 球・平面間の表面力測定シミュレーション
3. 学会等名 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田 龍、田中 一吉、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 (超低速度領域での測定)
3. 学会等名 中国四国学生会 第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 広歩、鈴木 礼生、石川 功、松岡 広成
2. 発表標題 表面力測定装置のシミュレーション (水中での実験に対する理論解析)
3. 学会等名 中国四国学生会 第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------