

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03836

研究課題名（和文）液中表面間力に対する溶媒および吸着分子の影響

研究課題名（英文）Effects of Solvation and Adsorbed Molecules on Surface Forces in Water

研究代表者

松岡 広成（Matsuoka, Hiroshige）

鳥取大学・工学部・教授

研究者番号：10314569

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究で得られた成果は以下の3点である。（1）超高精度表面間力測定装置を用いて液体中での球・平面間の表面間力を2面間距離の関数として測定した。（2）これを真空中・空気中での測定結果と比較することによって、種々の材料の組み合わせでの液体の溶媒および吸着分子の影響を明らかにした。（3）さらに、上記の測定装置を用いた場合の表面間力計測シミュレーションのための数値計算プログラムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体表面近傍の液体分子の溶媒和による表面間力の測定、表面分子吸着層間の相互作用力測定結果には、様々な表面間力の成分が含まれているため、これまで定性的な議論にとどまっていた。本研究の成果は、この分野のこうした弱点を克服し、表面間力成分の詳細な特性解明のみならず、従来定性的な特性比較・評価にとどまっていた本研究分野をより定量的な段階へと押し上げるものである。すなわち、本研究成果は、学術的に大きな意義を持つと共に、研究分野自体の発展を促す重要な研究成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The following three results were obtained: (1) surface force between sphere and plane in water was measured as a function of surface distance using a surface force apparatus with ultra-high resolution, (2) the effects of solvation and adsorbed molecules on the surface force for some material combinations were clarified by comparing with the measurement results in vacuum or air, and (3) numerical calculation program to simulate the surface force measurements using the surface force apparatus was developed.

研究分野：トライボロジー

キーワード：表面力 溶媒和 吸着分子 トライボロジー 表面間相互作用

1. 研究開始当初の背景

高度な要素技術の集積である超精密機器や情報機器のさらなる高性能化あるいは小型軽量化は、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、構成部品同士の相対運動を伴う機械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・トライボロジー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。

この微小領域における物理現象に起因したものの一つとして、表面間力がある。表面間力は近接した2物体表面間に働く力である。この力はいかなる物体同士の間でも発生し、マクロスケールでは慣性力や重力等の体積力と比べると無視できるほど小さい。しかし、上で述べたような機械の小型化に伴いスケール効果が生じるため、凝着力やファンデルワールス力、メニスカス力等の表面間力が、体積力に比べて相対的に大きくなる(表面積はスケールの2乗で減少するのに対し、体積は3乗で減少するため)。また、しゅう動面を有する超精密位置決め機構等でも、固体表面同士の接触・しゅう動による摩擦力、凝着力等の表面間力が位置決め精度に大きな影響を及ぼす。さらに、表面間力は材料の組み合わせや雰囲気、表面処理等によって大きく変化する。このように、表面間力は微小機械の作動性や超精密動作性能を左右することになり、表面間力の発生メカニズムと基本特性の解明、さらにはそれを考慮した機械設計手法や動作解析手法、およびその制御技術の開発が課題となっている。

表面間力は、広義には摩擦や潤滑等の面内方向の物理現象を包含したものであるが、本研究では面外方向の力のみを考えることにする。表面間力に関して、1956年に Lifshitz (Lifshitz EM (1956) *Soviet Phys JETP*, 2, 73) が理論的な研究を行っている。その後、表面間力を考慮した弾性接触理論へと発展した (Johnson KL, et al. (1971) *Proc R Soc Lond Ser A*, 324, 301; Derjaguin BV, et al. (1975) *J Colloid Interface Sci*, 53, 314; Maugis D (1992) *J Colloid Interface Sci*, 150, 243 等)。また、固体表面薄膜を考慮した解析等も行われている (Israelachvili JN (1972) *Proc Roy Soc Lond Ser A*, 331, 39; Matsuoka H, et al. (2005) *Microsyst Technol*, 11, 824 等)。液体中での表面間力測定については、固体表面近傍の液体分子の溶媒和(構造化)による溶媒和力の測定 (Christenson HK, et al. (1982) *J Colloid Interface Sci*, 88, 79; Matsuoka H, et al. (1996) *Trans ASME J Tribol*, 118, 832 等) や動的な挙動の測定 (Granick S (1991) *Science*, 253, 1374; Dushkin C, et al. (1997) *Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp*, 131, 129; Fukuzawa K, et al. (2003) *IEEE Trans Mag*, 39, 2453 等)、表面分子吸着層間の相互作用力測定 (Klein et al. (1982) *Nature*, 300, 429; MacIntosh et al. (1986) *Biochemistry*, 25, 4058; Taunton HJ, et al. (1990) *Macromolecules*, 23, 571 等) が行われている。しかし、使用している材料の組み合わせは限られている上に、これらの測定結果には様々な表面間力の成分(ファンデルワールス力、溶媒和力、流体力、分子凝集力、立体力等)が含まれており、それらの中の支配的な因子に着目してその特性を論じているものの、各表面間力成分の分離・抽出が高精度に行われているとは言い難い。すなわち、実験データからカーブフィットによってパラメータを評価することが多く、その結果にはかなりのばらつきがみられ、定性的な評価を行うにとどまっている。従って、これらの表面間力成分をより高精度に抽出し、その特性をより定量的に評価・解明することがこの研究分野の次の段階である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、液体中での表面間力を対象として、液体の固体表面への溶媒和および吸着分子の影響を明らかにすることである。より具体的には、

- (A) 超高精度表面間力測定装置を用いて液体中での球・平面間の表面間力を2面間距離の関数として測定し、これを真空中・空気中での測定結果と比較することによって、種々の材料の組み合わせでの液体の溶媒和および吸着分子の影響を明らかにすること
- (B) 上記の測定装置を用いた場合の表面間力計測シミュレーションを行い、液中表面間力の特性抽出・成分抽出をより高精度に行う手法を開発すること

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2つの項目(A)、(B)について、松岡(代表者)は(A)と(B)の一部、石川(分担者)は(B)の一部を担当し、有機的に連携して研究を遂行する。各項目における研究実施内容等を表1にまとめる。特に、実験で用いる表面力測定装置(SFA)は、現有のエリオニクス社のESF-5000Kを用いる。これは、変位を0.1 nm以下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ため、これを利用して種々の材料間の表面間力測定を行った。使用する材料は、平面はシリコンとPEEK、球はPDMS、液体は水を用いた。

4. 研究成果

令和3年度(初年度)は、既存の超高精度表面力測定装置を改良し、真空および空気中のみ

らず液体中でも表面力を測定できるようにし、液体中でも十分に精度良く計測できることを確認した。これを用いて水中での表面力計測実験を行い、押し上げ過程において2面の接触が空気中よりも緩やかに進行すること、および引き離し時の凝着力が大きくなることを観測した。これは、水のスクイズ力および固体表面近傍での溶媒和力と粘度上昇に起因するものであると考えられる。また、表面力測定装置をモデル化し、そのシミュレーションに着手した。表面接触をJKRの弾性接触と仮定し、シミュレーションソフトの開発を行った(図1)。

令和4年度(2年目)は、引き続き水中での実験を行い、より高精度に再現性の高いデータを測定できるようになった。特に、接近・引き離し速度を変化させてその表面力の変化を観察した。また、液体中での固体表面の吸着分子を定量的に把握しつつ表面力を測定する必要性から、QCMを表面力測定装置に組み込み、表面力と同時にQCMの周波数シフトを測定

表1 研究内容・担当・設備

(A)溶媒和・吸着分子成分抽出実験

- ・表面間力から溶媒和・吸着分子成分の抽出手法の開発
- ・溶媒和の影響の特性解明
- ・吸着分子の影響の特性解明
- ・種々の材料による実験

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，接触角計，表面張力計，データ処理用計算機

↓↑データ共有・フィードバック

(B)シミュレーション・実験高精度化への応用

- ・球・平面間の相互作用理論を用いた表面力測定装置(SFA)のシミュレーション手法の開発およびシミュレーション(石川)
- ・実験との比較および高精度成分抽出手法の開発(松岡)

担当：石川(研究分担者)，松岡
 主な使用設備：シミュレーション用計算機

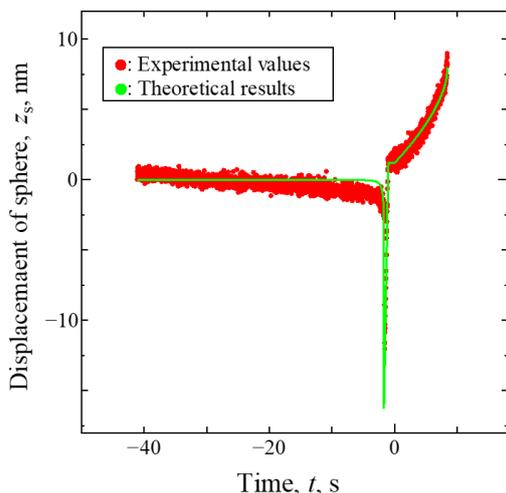


図1 表面間力測定シミュレーション

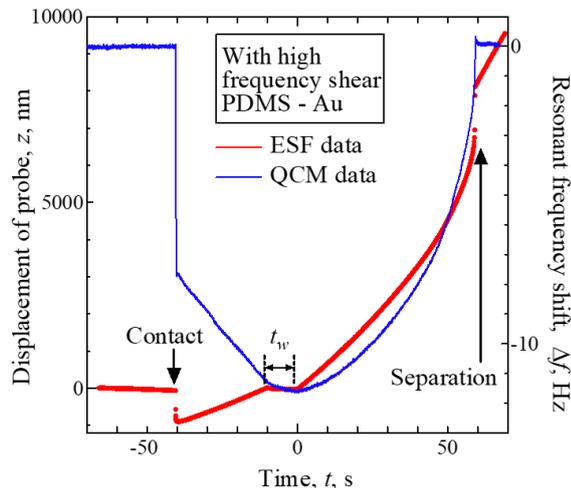


図2 表面力・QCM同時測定

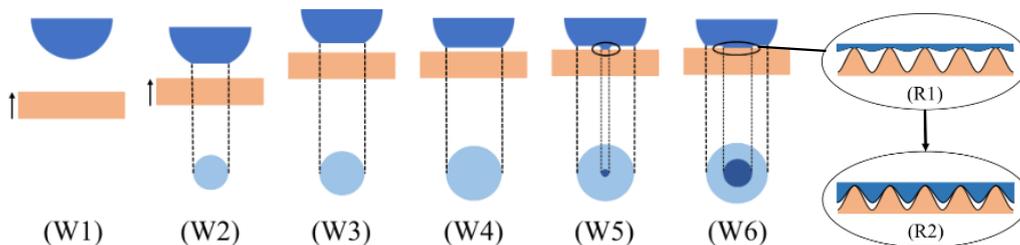
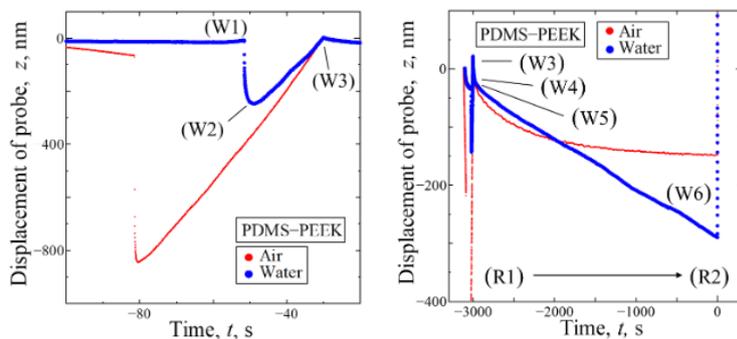


図3 水中における表面力と2面の接触状態

する手法の構築に着手した（図 2）。また、昨年度開発に着手したシミュレーションソフトをベースに、粘弾性および周囲液体を考慮できるよう改良を行った。

令和 5 年度（3 年目）は、真空および空気中に加えて水中で表面力を測定した。その結果、水中では 2 面間の van der Waals 力が空気中よりも弱いため引き込み距離が小さくなり、かつ接触時の変位変化が緩やかになること、ステージ上昇時は 2 面間の水の影響によりステージ上昇速度が同じでも球の変位速度が異なること、ステージ上昇後の静止時に固体表面への水分子の吸着による溶媒和力によって固体面変位に対する水膜の破断過程の影響が観察されること等が明らかとなった（図 3）。また、接触円の変形抵抗を考慮したシミュレーションに関する定式化を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Y. Hanamitsu, T. Ishikawa, M. Hasegawa, H. Kobayashi and H. Matsuoka	4. 巻 -
2. 論文標題 Dependence of Adhesion Force on Withdrawal Speed in Water	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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17件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 田中一吉, 石川 功, 松岡広成, 小林隼人, 長谷川 正之, 加藤孝久
2. 発表標題 引き離し速度と総接触時間が凝着力に及ぼす影響
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2023春東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 斎藤千夏, 西本菜理, 石川 功, 柳澤憲史, 松岡広成
2. 発表標題 疎水性表面における三重線の移動抵抗係数の測定
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2023春東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Hanamitsu, Takumi Ishikawa, Hiroshige Matsuoka
2. 発表標題 Dependence of adhesion force on withdrawal speed in water
3. 学会等名 9th International Tribology Conference, Fukuoka 2023 (ITC Fukuoka 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chinatsu Saito, Takumi Ishikawa, Kenji Yanagisawa, and Hiroshige Matsuoka
2. 発表標題 Analysis of Dynamic Wetting and Dewetting on a Hydrophobic Surface Using Molecular Kinetic Theory
3. 学会等名 9th International Tribology Conference, Fukuoka 2023 (ITC Fukuoka 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 花蜜優希, 石川 功, 長谷川 真之, 小林隼人, 松岡広成
2. 発表標題 大気中と水中における表面力の比較
3. 学会等名 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会 (IIP2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 花蜜優希, 石川 功, 長谷川 真之, 小林隼人, 松岡広成
2. 発表標題 水中での球・平面間表面力特性 (引き離し速度の影響)
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第62期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Matsuoka, T. Kono and T. Ishikawa
2. 発表標題 Simultaneous Measurements of Surface Force and Resonant Frequency Shift of QCM
3. 学会等名 7th World Tribology Congress (WTC 2022) (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 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 日本機械学会 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 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 日本機械学会 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 日本機械学会 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 日本機械学会 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 R. Suzuki, T. Ishikawa, M. Hasegawa, H. Kobayashi, H. Matsuoka, and T. 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 T. Shigemoto, T. Kono, T. Ishikawa, and H. 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 仲林 聡, 別所 慶祐, 石川 功, 松岡 広成
2. 発表標題 2次元繰り返し媒質分布を有する固体表面が球面に及ぼす相互作用力の理論解析 (球面-平面間距離と力の関係)
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, 石川 功, 松岡 広成, 加藤 孝久
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

〔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	石川 功 (Ishikawa Takumi) (70845164)	鳥取大学・工学研究科・助教 (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
---------	---------