

引き離し速度と総接触時間が凝着力に及ぼす影響

Effects of withdrawal speed and total contact time on adhesion force

鳥取大・工（学） *田中 一吉 鳥取大・工（正）石川 功 鳥取大（正）松岡 広成

エリオニクス（正）小林 隼人 エリオニクス（正）長谷川 正之 東京大（正）加藤 孝久

Kazuyoshi Tanaka*, Takumi Ishikawa*, Hiroshige Matsuoka *, Hayato Kobayashi**, Masayuki Hasegawa**, Takahisa Kato***

*Tottori University, **Elionix Incorporated, ***The University of Tokyo

1. 研究背景及び研究概要

近年、MEMS/NEMS などに代表される機械部品の小型化により、近接あるいは接触する 2 物体間に働く表面力の理解が不可欠になっている。また、その力の一種である凝着力は機械要素の摺動面において摩擦、摩耗を引き起こす要因となる。特に微小機械では体積力が非常に小さいためその影響が顕在化する。微小機械の作動性の向上には凝着力の理解が必要となる。

凝着力に関する理論的・実験的研究⁽¹⁻²⁾は従来から行われているが、そのほとんどは静的な状況を仮定しているため、凝着力の時間依存特性が十分に考慮されていない。そこで著者らは、凝着力の引き離し速度依存性に関する研究⁽³⁾を行い、引き離し速度が増加するにつれて凝着力も増加する傾向があることを見出した。しかし、超低速度領域では異なる傾向を示すことも明らかになってきた。本研究では、凝着力の時間依存特性である引き離し速度依存性と総接触時間の依存性について実験的検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

本研究で用いた実験装置である表面力測定装置（エリオニクス社製、ESF-5000K）（以下 ESF と表記）の概略図を Fig. 1 に示す。球には PDMS（ポリジメチルシロキサン）を、平面試料には PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）を用いた。ESF では、球の変位 z と球に加えた引き離し力 F を記録しながら球-平面間の引張試験を行う（図 2）。Figure 1 におけるモーターステージと PZT ステージを上昇させ、平面試料を球に接近させる。ある位置まで上昇すると、球と平面が表面間引力によって引き込まれて接触する。これは Fig. 2 の(A)→(C)の過程である。その後、球と平面が接触した状態で待機させる((D)→(E))。この馴染み過程が終わると、球-平面間の引き離し過程に入る。引き離し過程では(F)のように球が弾性変形し、ある位置まで球を引張ると(G)のように両者が分離し、試験が終了する。

これらの過程の中での最大引張力を「凝着力 F_{ad} 」、接触待機させる時間を接触待機時間 t_w 、球と平面が接触してから凝着力 F_{ad} を示すまでの時間を「総接触時間 t_{tot} 」と定義する。本研究では引き離し速度 v_w を 1~1000 nm/s、接触待機時間 t_w を 1~3000 s で変化させることで総接触時間 t_{tot} を変えて測定を行った。

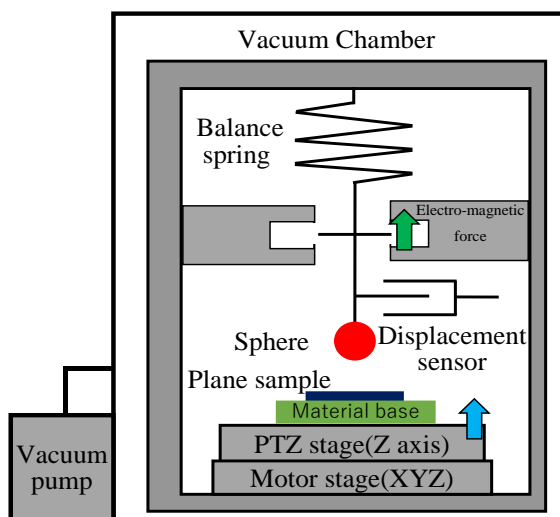


Fig. 1 Schematic of ESF

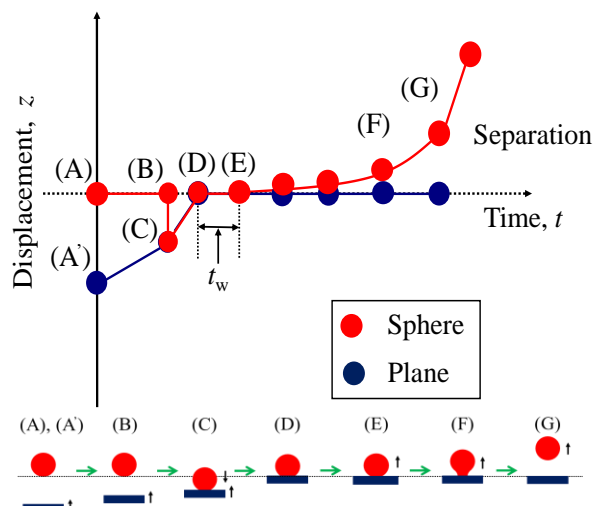


Fig. 2 Measurement flow

3. 実験結果

Figure 3 に、プローブに PDMS、サンプルに PEEK を用いた時の凝着力 F_{ad} と引き離し速度 v_w と総接触時間 t_{tot} の関係を示す。引き離し速度 v_w と総接触時間 t_{tot} が増加するにつれて、凝着力 F_{ad} も増加している。

3.1 引き離し速度による影響

Figure 4 に総接触時間を 1200 s として、引き離し速度を 2 ~ 1000 nm/s の範囲で変化させたときの凝着力 F_{ad} と引き離し速度 v_w の関係を示す。総接触時間 t_{tot} が一定の時、引き離し速度 v_w が大きくなるほど凝着力 F_{ad} が大きくなる。これは、PDMS 球の粘弾性によるものであると考えられる。球が変位の変化に伴って変形することで引き離し過程において球-平面間の接触面積も変化する。引き離し速度 v_w が小さいとき、PDMS 球の変位の変化にตอบสนองすることで 2 面間の接触面積が小さい状態で引き離れが生じ、凝着力 F_{ad} が小さくなる。これに対して引き離し速度 v_w が大きいとき、球の変形が変位の変化に対してตอบสนองしきれなくなるため、大きな接触面積を保ったまま引き離れが生じ、その結果、凝着力 F_{ad} が大きくなる。

引き離し速度 v_w が大きくなるにつれて凝着力 F_{ad} の増加率は下がっているが、2 面間の接触面積は有限なので凝着力 F_{ad} は特定の値に収束すると考えられる。

3.2 総接触時間による影響

Figure 5 に引き離し速度 v_w を 1000, 500, 5 nm/s として、接触待機時間 t_w を 1 ~ 3000 s に変化させたときの凝着力 F_{ad} と総接触時間 t_{tot} の関係を示す。同じ引き離し速度 v_w では総接触時間 t_{tot} が増加するにつれて凝着力 F_{ad} も増加する。これは総接触時間 t_{tot} の増加により、PDMS 球と PEEK 平面間の引力によって 2 面間がより馴染むことで接触面積が増加し、凝着力 F_{ad} が大きくなると考えられる。

また、凝着力 F_{ad} の増加率は総接触時間 t_{tot} が大きくなるほど小さくなる。球の変形には限界があるので凝着力 F_{ad} の増加率も小さくなっていると考えられる。

4. 結論

表面力測定装置を用いて PDMS-PEEK 間の速度制御試験を行い、球-平面間の凝着力の引き離し速度依存性と総接触時間の依存性を実験的に検討した。その結果以下の結論を得た。

1. 総接触時間が一定の場合、凝着力は引き離し速度の増加に伴って大きくなる。
2. 引き離し速度が一定の場合、凝着力は総接触時間の増加に伴って、大きくなる。

また、これらの関係をまとめて 3 次元図に示した。

文献

- 1) K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts, "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids," *Proc. Roy. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, Vol. 324, No. 1558, (1971), pp. 301-313.
- 2) B. V. Derjaguin, V. M. Muller, Y. P. Toporov, "Effect of contact deformations on the adhesion of particles," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 53, (1975), pp. 314-326.
- 3) R. Kishimoto, T. Ishikawa, J. Taneoka, M. Hasegawa, H. Kobayashi, H. Matsuoka, S. Fukui, and T. Kato, "Influence of Withdrawal Speed on adhesion Force," *Tribology Online*, Vol. 15, No. 2, (2020), pp. 60-67.

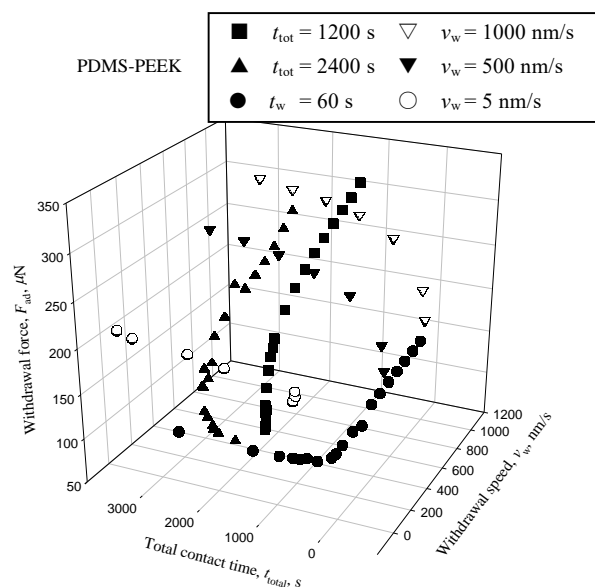


Fig. 3 F_{ad} VS. t_{tot} VS. v_w

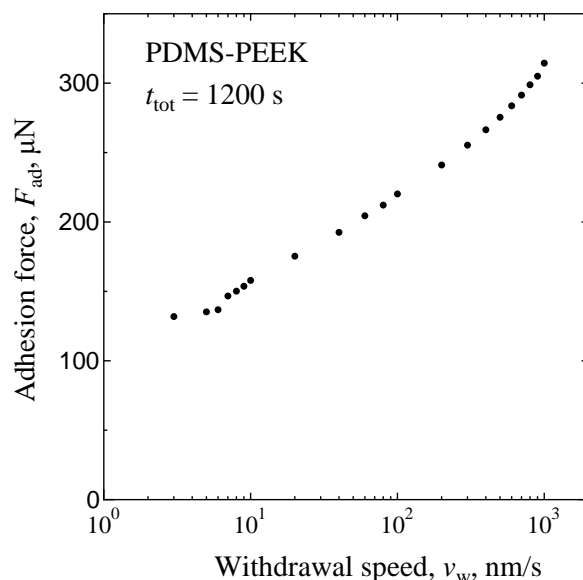


Fig. 4 Force-withdrawal speed

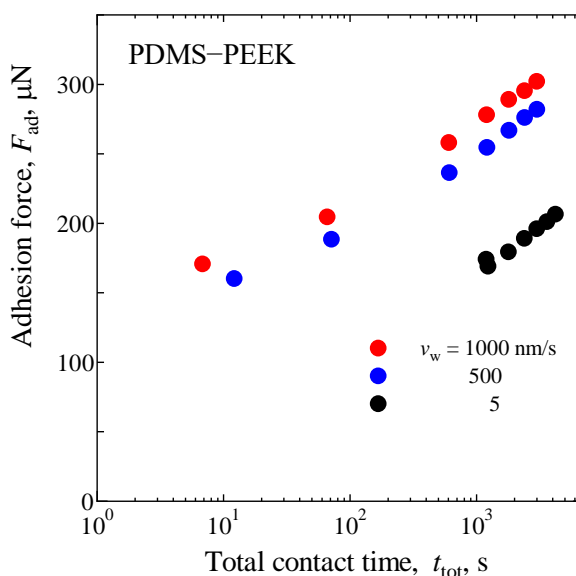


Fig. 5 Force-total contact time