

引き離し速度と接触時間が凝着力と凝着変位に及ぼす影響

Effects of withdrawal speed and contact time on adhesion force and adhesion displacement

鳥取大・工（学）*池田 龍 鳥取大・工（正）石川 功 （株）エリオニクス（正）長谷川 真之
（株）エリオニクス（正）小林 隼人 鳥取大・工（正）松岡 広成

Ryu Ikeda*, Takumi Ishikawa*, Masayuki Hasegawa**, Hayato Kobayashi**, Hiroshige Matsuoka*

*Tottori University, **Elionix Incorporated

1. はじめに

近年、MEMS/NEMS などの微小機械の発展につれて、近接あるいは接触する 2 物体間に働く表面力の理解が必要不可欠となっている。また、その表面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。よって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。

凝着力に関する様々な理論的・実験的研究⁽¹⁻²⁾が行われているが、その多く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。また、時間依存特性として凝着力の引き離し速度依存性を調べた先行研究⁽³⁾においても、総括的な研究には至っていない。そこで本研究では、凝着力と凝着変位の引き離し速度依存性と接触時間依存性に着目し、固体平面間の凝着力と凝着変位を表面力測定装置によって測定した。具体的には、表面力測定装置を用いて、球面-平面間の凝着力と凝着変位を 2 面が引き離れるまで一定の速度を保つように制御した引張試験により測定し、球の引き離し速度と 2 面の接触時間が凝着力と凝着変位に及ぼす影響を実験的に検討した。

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 BK7（ホウケイ酸ガラス）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（Fig. 2）。始めに、Fig. 1 におけるモーターステージと PZT ステージの上昇により、平面試料を球に接近させる。ある位置まで上昇すると、表面間引力によって球が平面に引き込まれて接触する。これは Fig. 2 の(A)→(C)の過程である。球と平面が接触した状態で待機させる(D)→(E)の時間を「接触後待機時間 t_w 」と定義する。この過程が終わると次に球-平面の引き離し過程に入る。引き離し過程では平面は固定し、球の支持棒に電磁力を加えて上向きに引っ張る。(F)のように球が弾性変形し、ある位置まで球を引っ張ると(G)のように両者が分離し、試験が終了する。

実験条件を Table 1 に示す。引き離し力（＝表面力）は球に印加した電磁力からばねの復元力を引いた力であり、引張試験において観測された最大の引き離し力を凝着力 F_{ad} 、またその時に観測される球の変位を凝着変位 z_{ad} 、球と平面が接触してから凝着力を観測するまでの接触時間を総接触時間 t_{tot} と定義する。本研究では、引き離し速度 v_w を 10~1000 nm/s、接触後待機時間 t_w を 1~1800 s で変化させることで総接触時間を変えて測定を行った。

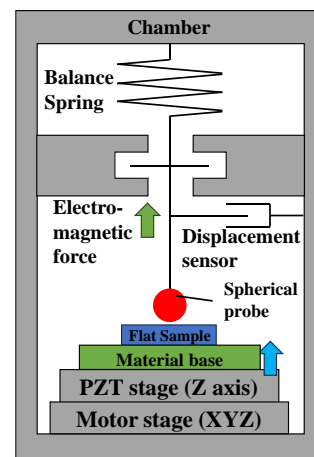


Fig. 1 Schematic of ESF

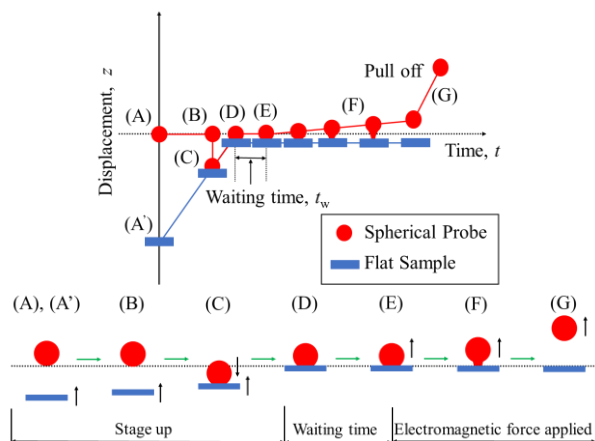


Fig. 2 Measurement flow

Table 1 Measurement conditions

	Fig. 1	Fig. 2	Fig. 3
Waiting time (t_w , s)	1~1800	1	1~600
Total contact time (t_{tot} , s)	100~1830	100~700	700
Withdrawal speed (v_w , nm/s)	100~1000	10~1000	10~100

3. 実験結果

Figure 3 は、引き離し速度を 100~1000 nm/s、総接触時間を 100~1830 s で変化させたときの引張試験結果より、凝着力と引き離し速度と総接触時間の関係を表したものである。図から、引き離し速度と総接触時間が大きくなるほど凝着力が大きくなることがわかる。

Figure 4 は、引き離し速度を 10~1000 nm/s、接触後待機時間を 1 s としたときの引張試験結果より、凝着力および凝着変位と引き離し速度の関係を表したものである。図から、引き離し速度が 100~1000 nm/s の範囲では、引き離し速度が大きくなるほど凝着力と凝着変位が大きくなっていることがわかる。一方で、引き離し速度が 10 nm/s になると凝着力は小さくなっているにもかかわらず、凝着変位は大きくなるという結果となった。

Figure 5 は、引き離し速度を 10~100 nm/s、接触後待機時間を 1~600 s で変化させ総接触時間を 700 s に固定したときの引張試験結果より、凝着力および凝着変位と引き離し速度の関係を表したものである。図中のすべての速度範囲において、引き離し速度が大きくなるほど凝着力と凝着変位も大きくなっていることがわかる。

基本的には、引き離し速度が増加するにつれ凝着力と凝着変位が共に増加する。一方で、接触待機時間を固定して引き離し速度を変化させた実験 (Fig. 4) では、低速度領域において凝着力と凝着変位が逆の傾向を示した。これは低速度になるほど総接触時間が大きくなり、PDMS の粘弾性の影響により凝着変位が増加したためだと考えられる。実際に、総接触時間を固定して引き離し速度を変化させた実験 (Fig. 5) では、凝着力を示すまでの時間が固定であるため、すべての速度範囲において凝着力と凝着変位が同じ傾向を示した。

4. 結論

本研究では、表面力測定装置を用いて球-平面間の凝着力と凝着変位を測定し、引き離し速度と接触時間が凝着力と凝着変位に及ぼす影響について実験的検討を行った。引き離し速度と総接触時間が大きくなるほど凝着力が大きくなることがわかった。また、凝着変位についても総接触時間が一定の下では、引き離し速度とともに増加した。以上の結果より、凝着力が増加すると凝着変位が増加する傾向があると考えられたが、総接触時間が異なる条件下で比較すると、凝着力が増加する一方、凝着変位が減少する現象がみられた。

文献

- 1) K. L. Johnson, K. Kendall, & 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, & T. Kato, "Influence of Withdrawal Speed on adhesion Force," *Tribology Online*, Vol. 15, No. 2, (2020), pp. 60-67.

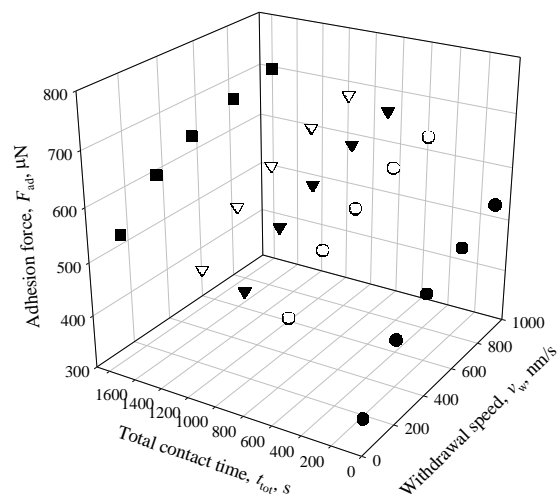


Fig. 3 Dependence of adhesion force on withdrawal speed and total contact time

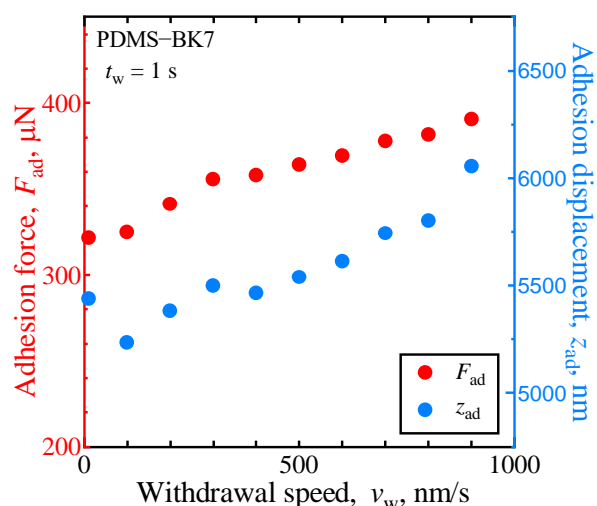


Fig. 4 Dependence of adhesion force and adhesion displacement on withdrawal speed ($t_w = 1$ s)

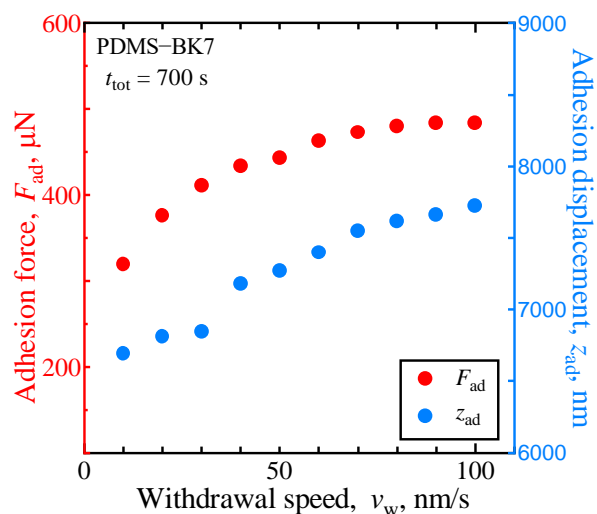


Fig. 5 Dependence of adhesion force and adhesion displacement on withdrawal speed ($t_{tot} = 700$ s)