

球状接触系を用いた凝着仕事の測定方法
(ソウル大学, 東京工業大学) ○白斗永, 金顯中, 高橋邦夫

Method of Measuring Work of Adhesion using Spherical Contact System
Dooyoung BAEK, Hyun-Joong KIM and Kunio TAKAHASHI
Seoul National University, Tokyo Institute of Technology
baek.s.dy@snu.ac.kr, hjokim@snu.ac.kr, takahak@tse.ens.titech.ac.jp

1. 緒言

近年, ファンデルワールス力に起因する固体間の凝着現象を考慮したハンドリングデバイス開発関連の研究が進んでいる. 自重を支えながら壁や天井を素早く歩くヤモリ足裏の対象物把持・脱離機構の模倣に由来しているその研究らは, エラストマーなどのソフトマテリアルをコア材料として毛構造単体の近似モデルのメカニズムを論じる接触力学から実用に向けて毛構造単体を無数に並べるマイクロファブリケーション技術まで多様に行われ諸学系に発表されている. ハンドリングデバイス開発の根底には可逆的な把持と脱離の可能性から表面粗さを有する物体の操作可能性及びハンドリング対象物体に傷や痕跡を残さない可能性が考慮されていて, その活用次第ではロボットの壁面走行技術・半導体工程におけるハンドリング技術・宇宙といった極限環境における船外活動ロボットに実装されるハンドリング技術などの実現が可能となる. これらのデバイスを工学設計するためには, 毛構造の形状・動き・把持脱離のメカニズム及び実装に用いる材料の接触特性に関する理解が伴われる必要がある. 特に接触系に関わるエネルギーの変化を考慮して毛構造単体近似モデルの凝着現象メカニズムを論じ予測する接触力学[1]では, 接触する二つの物体表面の表面自由エネルギー及び界面自由エネルギーから構成される凝着仕事 (Dupré Thermodynamic Reversible Work of Adhesion) が最も重要なパラメータとして働く. 凝着仕事の測定方法としては, 2つ以上の液滴の接触角測定によって推定する間接的な方法と, 測定したい2つの固体間を変位操作のもとで接触させながら力と接触面積を同時測定し理論式とフィッティングさせ求める直接的な方法がある. 接触角測定には前進接触角と後退接触角におけるヒステリシス (Contact Angle Hysteresis) 問題があり, 固体間接触においてもソフトマテリアルを用いる際には接触面の前進と後退の力曲線が互いに異なるパスを通る凝着ヒステリシス (Adhesion Hysteresis) 問題がある. いずれにしても現実的な問題はあるもののこれといった代案がないため伝統的な接触角測定が一般に使われている. 一部の接触型AFMやナノインデント装置のメーカーではその解析ソフトウェアに凝着仕事測定機能を取り入れる場合もあるが, ヒステリシスのある前進と後退の力曲線のうち一つを選択してJohnson-Kendall-Roberts接触モデルの多様な変形型理論解をフィッティングさせる方法が用いられている. しかし, エネルギー散逸によって凝着ヒステリシスが発生する実際の接触系にエネルギー平衡仮定で導出されたJKR理論をそのまま適応することは矛盾を生じさせ正確な凝着仕事の測定を阻害し凝着デバイスの設計に致命的な問題を引き起こす可能性がある. 本発表では, 以上の背景をもとにHertz理論やJKR理論でも用いられる基礎的な球剛体-平面弾性体間の球状接触系を採用して凝着ヒステリシスを理論的に考慮し, 固体間接触における凝着仕事の新たな測定方法[2]を紹介するとともに既存の測定方法との比較を行う. 加えて, 接触型AFMやナノインデント試験装置等を用いた提案方法の適応可能性を考える.

2. 凝着仕事の測定方法

理論では図1に示す球状接触系を用いて球剛体と平面弾性体を仮定した。力計測系のひずみゲージ等による等価ばね係数を考慮したうえで[3]エネルギー散逸によるヒステリシス発生を考慮してJKR理論におけるエネルギー平衡条件を破棄し力 F ・接触半径 a ・全変位 $-Z$ の関係式を得た。弾性平面体変形の U_{elastic} ・ばね変形の $U_{\text{stiffness}}$ ・接触面積増減の $U_{\text{interface}}$ を考慮した系内の U_{total} を定め、任意の $-Z$ 固定時において U_{total} が安定点に向けて自発的に緩和していくことを考慮した。このエネルギー関係から亀裂の進展を論じるGriffiths's Criterionに類似した前進後退と凝着仕事との関係式が得られ、接触半径の最大値の観測ができるように実験を行えばその最大点におけるひずみエネルギー開放率を凝着仕事としてみなせることを示唆した。

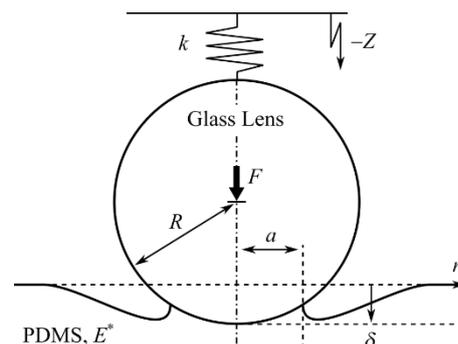


図1. 曲率半径 $R=207.6$ mmのレンズと弾性率 $E^*=2.7$ MPaとの球状接触系。全変位 $-Z$ 操作で実験し力計測系の等価剛性 $k=11.5$ kN/mを考慮する。

3. 球状接触実験と凝着仕事の測定結果

提案方法で凝着仕事を測定するためには線形弾性理論が成り立つ領域で接触実験を行う必要があるため、自動ステージで操作される $-Z$ の最大値をPDMSブロックの厚さ20 mmより十分に小さい20 μm に設定してステージの速度 V_z 及び最大押し込み量 $-Z_{\text{max}}$ を変数として接触面の前進後退を一連に観測できるように実験を行った。結果として、 V_z を変数とした実験群では前進後退の力曲線が全て異なるパスを通り、 $-Z_{\text{max}}$ を変数とした実験群では前進の力曲線は共通したパスを通るものの後退の力曲線が大きく異なりPull-off Forceとも言われる最大凝着力に大きく差が出た。既存研究における凝着仕事の推定では前進又は後退の力曲線を対象にしている、 V_z 及び $-Z_{\text{max}}$ を変数とした本実験の結果にそれらの方法を適応してみると、緒言にも言及した物性値から構成され一定値を持つはずの凝着仕事の実験ごとに異なる凝着仕事の値を持つ結果となった。反面、提案方法に基づいて凝着仕事を推定すると最大最小43-56 mJm^2 範囲の桁を大きく外さない程度の安定した値が得られた。得た凝着仕事は接触角測定実験の文献値を参照にしてOwens-Wendt法で計算した凝着仕事の範囲内24-75 mJm^2 にあることを確認した。

4. 結言

凝着仕事の測定を含む接触問題は材料材質・表面幾何形状・表面層化学組成・接触系雰囲気などの多種多様な因子が絡んでいる複雑系であるが、非常に限定された条件下では以上のように凝着仕事を矛盾なく測定することが可能となる。接触型AFMやナノインデント等においても材料の弾性率が既知の前提で弾性域における球状接触実験を行えば接触面積の逆算プロセスを追加するだけで提案方法の適応が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Sekiguchi, et al. *J. Adhes. Sci. Technol.* **26**(23), 2615-2626 (2012).
- [2] D. Baek, et al. *J. Adhes. Sci. Technol.* **32**(2), 158-172 (2018).
- [3] K. Takahashi, et al. *J. Adhes. Sci. Technol.* **9**(11), 1451-1464 (1995).