

凝着力・真実接触面積の荷重速度依存性

須田 斎（東海大学開発工学部生物工学科）

【序 論】

摩擦は、凝着と強い相関があること⁽¹⁾から凝着の過程に関して詳細な研究を行うことは摩擦の物理的研究をする上で極めて重要である。これまで得られた我々の結論では、接触した2つの結合面の破断過程におけるその破断のメカニズムは、破断力と結合寿命との密接な関係によっていることが指摘された。^(2,3)ところで、2つの弾性体が接着する場合における弾性理論の代表としてJ K R理論(Johnson—Kendall—Roberts)⁽⁴⁾がある。通常、破断力や破断する直前の接触面積は、速度に依存しないと思われる。⁽⁵⁾そこで我々は、2つの固体面間の凝着における引き離し速度に対する破断過程を詳細に調べ、破断直前の接触面積が速度に依存すること、そして単位接触面積あたりの破断力が速度に依存することを報告する。J K R理論は力学的平衡の条件下で解かれているが、引き離し過程は熱力学的非平衡過程であるから、凝着仕事を一定として扱うことができないはずである。つまり熱力学的な物理量である表面自由エネルギーを用いることができない。本来は非平衡熱力学的に解くことが要求される。従って、破断する瞬間において、破断力や接触面積に速度依存性や時間依存性がありうる。今の我々の目的は、この点を明らかにすることである。

【材料および方法】

2つの固体表面の接触面積と破断力を同時に測定するために、表面間力測定装置(図1)を用いた。通常2個のDCモーターと1つの圧電素子により位置制御を行う。材料は、原子レベルで平坦なマイカ表面にシランカップリング剤で化学修飾を施して使用した。測定のしやすさのために表面自由エネルギーを減らしたいからである。1つの試料としてメチル基をもつOTE (Octadecytriethoxysilane)、もう1つの試料としてアミノ基をもつLS2480 (3-(2-Aminoethylaminopropyl) trimethoxysilane)を使用した。OTEは、単分子層状に配向固定して実験に使用した。⁽⁶⁾LS2480は、物理吸着でマイカ表面に固定した。測定前、試料室の空気は、窒素ガスで充分還流して乾燥状態にした。その上、五酸化燐の粉末をチャンバー内に入れて含まれ

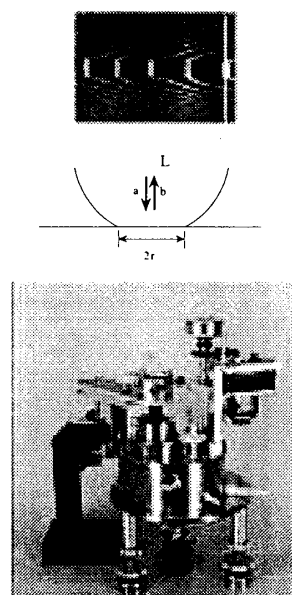


図1 2表面間の接触面積と荷重の同時測定 r は接触半径、 L は荷重である。使用したダブルカンチレバーのバネ定数は 2957 ± 175 N/m である。

る水分をさらに排除し、可能な限りチャンバー内は乾燥状態にした。すべての測定は実験室内を空調で調整し約 25℃で行われた。

2 表面は同一種のもの同士で接着をさせた。スピードは、表面を遠くから等速で近づけ、さらに押し付けて接触半径が数十ミクロンまで押したつけた。連続的に等速で引き離して図 1 で示されるような等次数干渉縞をリアルタイムでビデオ記録して、オフラインで引き離し力（＝破断力、 L_{rup} ）と引き離れる瞬間の接触半径（ r_s ）のそれぞれを解析した。このとき荷重速度は、スピードとバネ定数との掛け算で与えられる。

J K R 理論を簡単にまとめておこう。図 1 の挿絵のように同じ材質からなる平面と球体の接着を考えよう。荷重（ L ）の下で接触半径（ r ）は、次の式で与えられる。

$$r^3 = \frac{R_m}{K} \left(L + 6\pi\gamma R_m + \sqrt{12\pi\gamma R_m L + (6\pi\gamma R_m)^2} \right) \quad (1)$$

そして $K = 2/3(E/(1-\nu^2))$ 、ここで R_m 2 表面の局所平均半径を、 γ 固体の表面自由エネルギー、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。無荷重でも 2 表面は接着しており、このときの接

触半径は、 $r_0 = \left(\frac{12\pi\gamma R_m^2}{K} \right)^{1/3}$ で与えられる。J K R 理論における重要な結論は、負の荷重条

件下でまだ付着した 2 平面は付着したままであること。そして、さらに引き離してゆくと、 $L_{rup} = -3\pi\gamma R_m$ に達した瞬間、次のような有限の接触半径で突然引き離れることを定量的に説明している点である。

$$r_s = \frac{r_0}{4^{1/3}} \cong 0.63r_0. \quad (2)$$

そこで、本研究では、このときの接触半径が荷重速度に関して測定を行い。その依存性を明らかにしたので報告する。つまり γ が一定として処理できないということである。

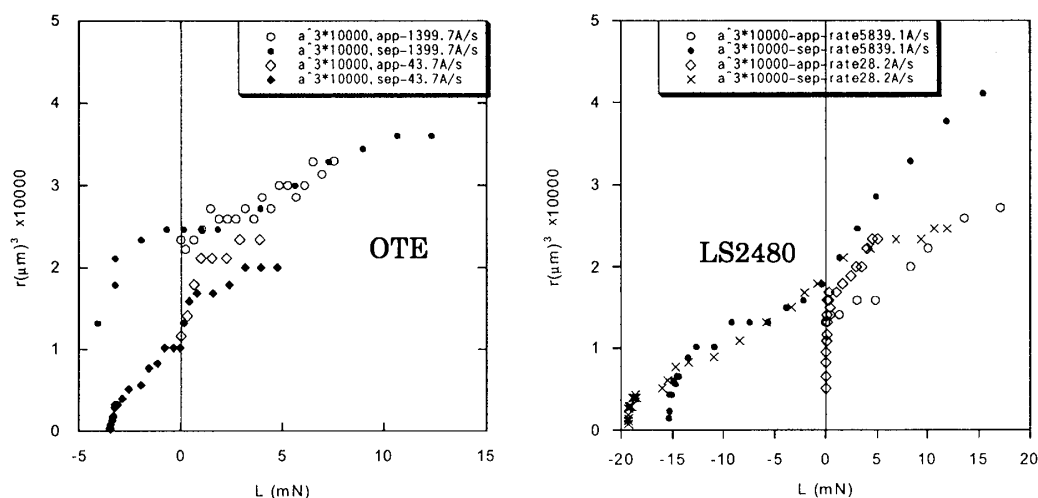


図 2 接触半径の荷重依存性 app: 近づける過程 sep: 引き離し過程

【結果と議論】

図2は、接触半径の荷重依存性を示したものである。等速で近づけ、ある時点で止めすぐに引き離れた。遅い速度と速い速度での速度依存性を観察したところ、(1)式に従うような振る舞いをするけれども、明らかに速度依存性が認められる。2種の表面処理での違いは、アミノ化したLS2480の場合の方がメチル化のOTEより凝着力が強い。通常言われるような引き離しと近づける過程でのヒステリシスがLS2480の場合が顕著に観察される。

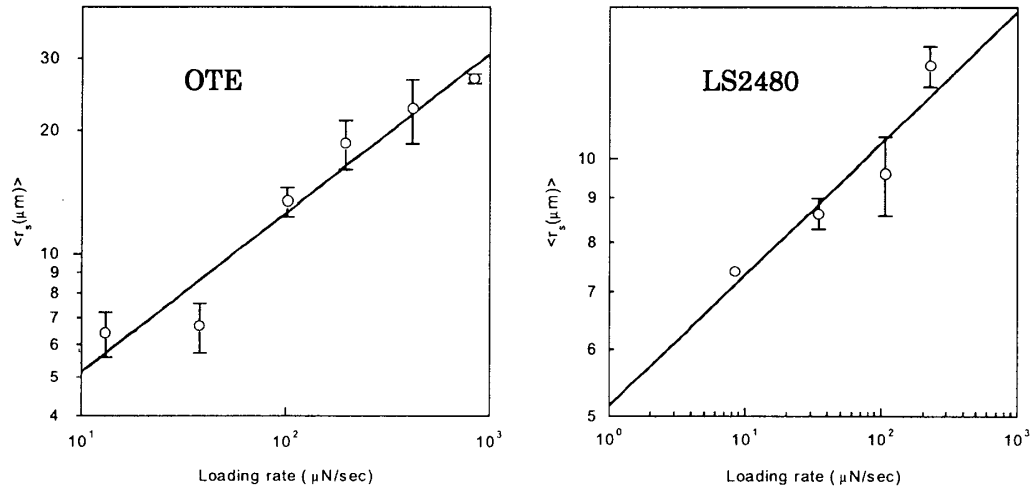


図3 破断直前の接触半径の荷重速度依存性 OTE: $\langle r_s(\mu\text{m}) \rangle = 2.105 \dot{L} (\mu\text{N/sec})^{0.388}$, $R_m=2.4\text{cm}$. LS2480: $\langle r_s(\mu\text{m}) \rangle = 5.1465 \dot{L} (\mu\text{N/sec})^{0.153}$, $R_m=2.1\text{cm}$.

破断直前で接触面積が荷重速度にどのように依存するかを示すのが図3である。両者の関係は、指数的というよりはべき乗でよく近似できた。図中の直線は回帰曲線である。

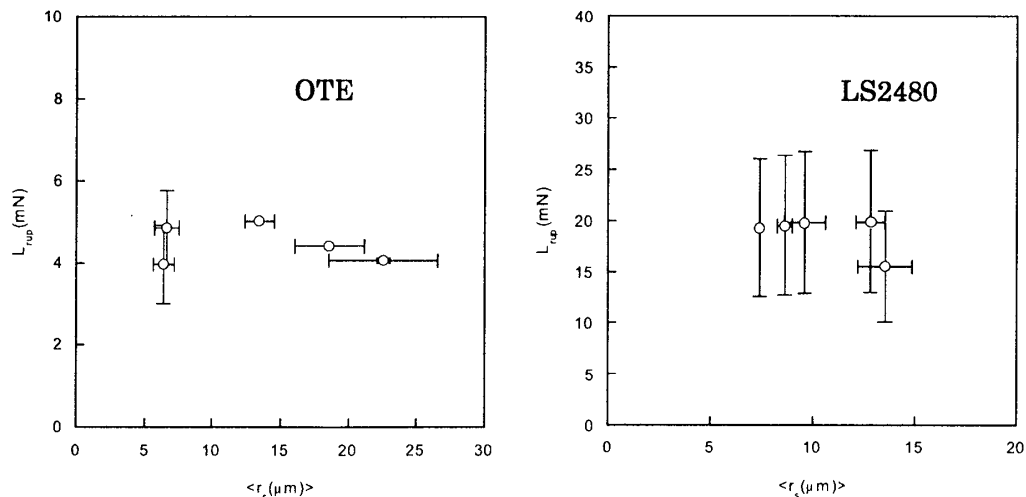


図4 破断直前の接触半径と荷重の関係

図4は、破断直前の接触面積と破断力の関係を示す。引き離し速度を小さくしてゆくと図3のように接触面積は小さくなって行くが、図5に示すように破断力は、ほぼ一定である。つまり、単位面積におよぶ破断力が速度を増やすに従って減少行くような振る舞いをする。破断力は、単位結合あたり速度と指数関係にあるので、これは、単位面積あたりの結合数が変化している可能性を示している。

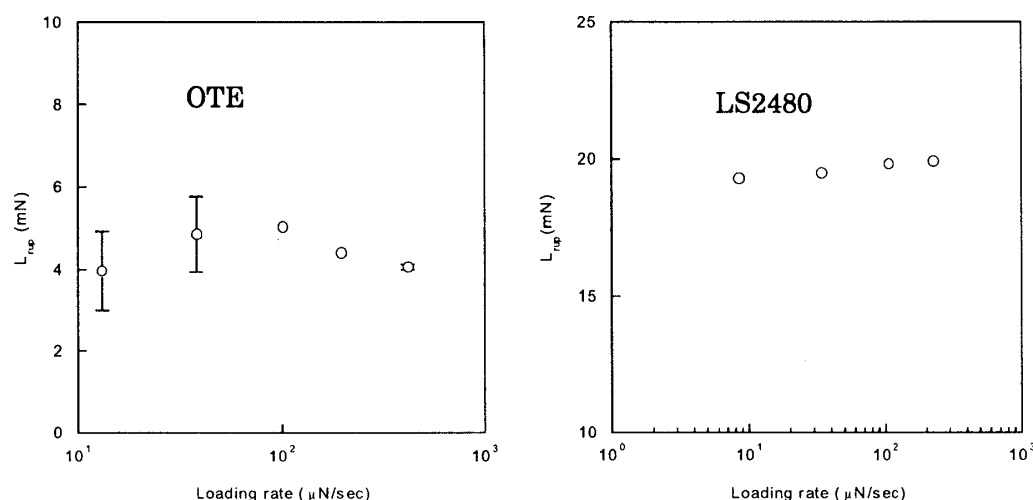


図5 破断力の荷重速度依存性

結論として、JKR理論で導入される凝着仕事を 2γ に置き換えた(1)式は速度依存性が入ること。それは凝着仕事が一様でなく熱力学的平衡が実現していないことを反映していることを示している。元々JKR理論では凝着仕事を表面自由エネルギーに変換して表記していない。おそらく始めてこのような置き換えを行ったのは、イスラエラチビリら⁽¹⁾であろう。このような矛盾を解消するために非平衡熱力学過程を考慮した厳密な解が必要である。

【文献】

- (1) Yoshizawa, H.; Chen, Y-L.; Israelachvili, J. *J. Phys. Chem.* **1993**, *97*, 4128.
- (2) Suda, H. *Langmuir* **2001**, *17*, 6045.
- (3) Suda, H.; Yamada, S. *Langmuir* **2003**, *19*, 529.
- (4) Johnson, K. L.; Kendall, K.; Roberts, A. D. *Proc. R. Soc. London Ser. A* **1971**, *324*, 301.
- (5) Ando, Y.; Ino, J. *Wear* **1998**, *216*, 115.
- (6) Kessel, C. R.; Granick, S. *Langmuir* **1991**, *7*, 532.
- (7) Evans, E.; Ritchie, K. *Biophys. J.* **1997**, *72*, 1541.