

粘弾性・粗さ・接線力を考慮したエラストマーの微視的な摩擦の寄与因子調査

Investigation of microscopic friction components of elastomers
considering viscoelasticity, roughness, and tangential force

Science Tokyo (正) *小野塚 頌人 Science Tokyo (正) 中嶋 健

Nobuhito Onozuka*, Ken Nakajima*

*Science Tokyo

1. 緒言

エラストマーの摩擦は、粘弾性や凝着といった複数の要因の交絡により、その本質理解が困難である。ナノスケールの微視的な摩擦は、真実接触面積が支配する Bowden-Tabor 則に基づいて解釈されることが一般的であるが¹⁾、交絡因子の多いエラストマーに対する適用には限界がある。本研究では、LFM を用いてエラストマーの微視的な摩擦を解析し、併せて AFM フォースカーブ解析に基づく接触面積推定への粘弾性・接線力・粗さの影響を考慮したうえで、各因子が微視的な摩擦に与える寄与を定量的に明らかにすることを目的とする。

2. 実験

軽微な粘弾性を示すエラストマーとして、 $T_g = -125^\circ\text{C}$ の Polydimethylsiloxane (PDMS) を用意した。Bruker 社製 AFM (Dimension ICON) の LFM および ramp モードを用い、異なる scan 或いは ramp 速度のもとで、同一 PDMS の摩擦とフォースカーブを同一探針 ($R = 755\text{ nm}$) で測定した。

LFM 測定中の真実接触面積は、並行して取得したフォースカーブを解析することで推定した。その際、一般的な弾性接触モデルに加えて、粘弾性・接線力・粗さを考慮した接触モデルを用いた。それぞれのモデルから推定された真実接触面積と LFM で得られた摩擦との関係を調査し、Bowden-Tabor 則 (摩擦 \propto 真実接触面積) からの逸脱に対する各因子の寄与を定量的に解析した。

3. 結果

PDMS の LFM およびフォースカーブ測定結果を Figure 1(a)、1(b) に示す。摩擦は速度依存性を示している。フォースカーブは極低速では弾性的な一方、高速域では粘弾性損失に基づく Loading と Unloading のヒステリシスが見られている。

弾性的なフォースカーブが得られる速度域 (20 nm/s) での摩擦に対し、弾性理論 (JKR モデル) から接触面積を推定したところ、Bowden-Tabor 則から推定される摩擦と実験的な摩擦には乖離があった (Fig. 2)。この原因として、粘弾性・接線力・粗さのそれぞれが接触面積に影響している可能性を考え、各因子を考慮した接触面積推定を行なった。

まず粘弾性が推定接触面積に与える影響を、Barthel による粘弾性接触モデルに基づいて評価したところ²⁾、試料の軽微な粘弾性および使用した scan 速度範囲において、粘弾性は接触面積にはほとんど影響を及ぼさないと推定された。一方で、粘弾性が進行方向前方後方での接触状態の非対称性を引き起こし³⁾、これがわずかではあるが摩擦に寄与していると推定された (F_{asym})。

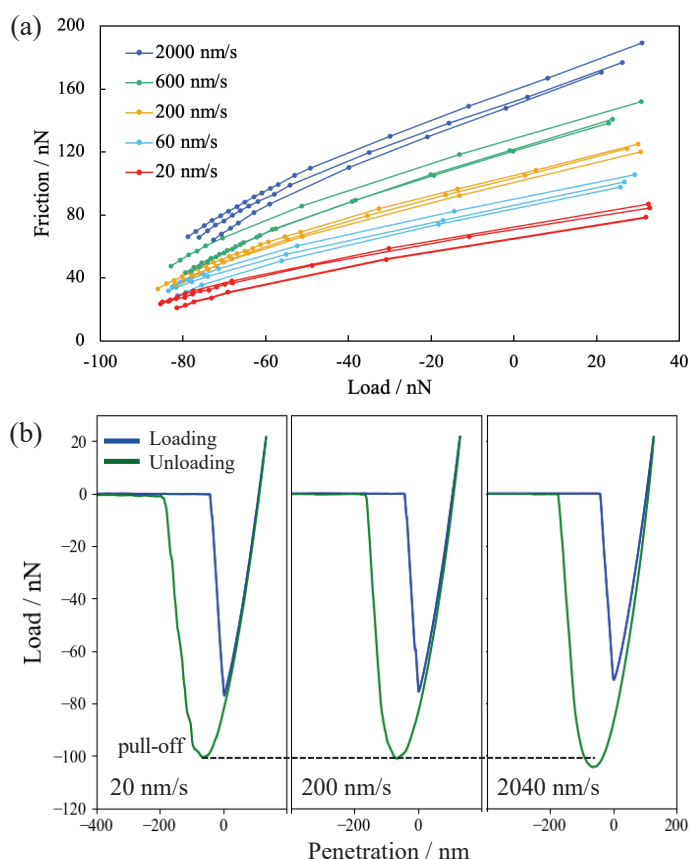


Fig. 1 LFM (a) and force curve (b) of PDMS.

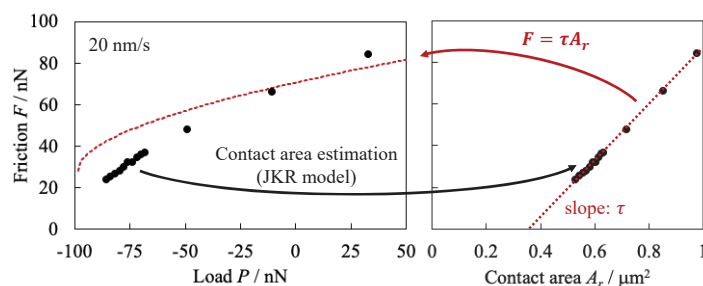


Fig. 2 Contact area estimated from JKR model and deviation from Bowden-Tabor's law.

次に接線力が推定接触面積に与える影響を、Ciavarella によるモデル⁴⁾に基づいて評価したが、こちらも接触面積への影響は極めて小さいと見積もられた。

さらに粗さの影響を考慮するため、JKR モデルを粗さの存在する系に拡張する形で、rough-JKR モデルを新たに構築した。20 nm/s での摩擦に対し、rough-JKR モデルから接触面積を改めて推定すると、粗さに基づく真実接触面積縮小に伴い、低荷重領域に向かって Bowden-Tabor 則に従うような挙動に漸近していく傾向が見られた(Fig. 3a)。これは、pull-off に近く凝着応力が主成分の接触状態においては Bowden-Tabor 則が成立し、荷重が大きくなるにつれてそこから乖離すると解釈できる。

そこで、LFM 中の接触面積は rough-JKR モデルによって推定したうえで、LFM の微視的な摩擦を次の 3 成分に分離して考えることとした。

1. 接触面積に比例する Bowden-Tabor 成分 (F_{BT})
2. 接触状態の非対称性に起因する摩擦成分 (F_{asym})
3. 残差としての追加摩擦成分 (F_{add})

Fig. 3b は 2000 nm/s における摩擦を分離した結果である。Fig. 3a と比較して Bowden-Tabor 則からの乖離が大きくなっているが、 F_{asym} の寄与度は小さく、大部分は F_{add} に帰属される結果だった。

F_{add} の具体的な要因については今後さらなる研究が求められるが、Fig. 4 に示すように、 F_{add} は探針直下の垂直方向の変形速度との相関がよい傾向が見られていた。このことは、 F_{add} がバルクの粘弾性損失に起因するヒステリシス摩擦と結びつく可能性を示していると考えられる。

以上から、PDMS の摩擦の Bowden-Tabor 則からの乖離は、接触面積に比例する成分 F_{BT} 以外の摩擦成分が存在するためであることが示唆された。既存の多くの研究では、エラストマーの LFM 摩擦に対しても Bowden-Tabor 則の成立を前提することが一般的であったが、比較的弾性的な PDMS においてすら F_{BT} 以外の成分の寄与があることを考えると、Bowden-Tabor 則の成立を前提とする考え方は、摩擦現象の誤った理解に繋がりがねず、注意が必要であると考えられる。

4. 結言

本研究では、PDMS を対象とした LFM 測定とフォースカーブ測定に基づく接触面積解析を通じて、Bowden-Tabor 則の限界とそこからの乖離要因を明らかにした。粘弾性・接線力・粗さのそれぞれが接触面積に与える影響を定量的に調査したことで、従来の Bowden-Tabor 則は低荷重・低速度においては成立するものの、それ以外の条件では粘弾性や接触状態の非対称性の影響を受け、乖離が生じると推定された。乖離の主成分であった F_{add} の具体的な要因の調査や、これら複合的要因を統合した摩擦モデルの構築が、今後の課題である。

文献

- 1) Carpick, R.W.; Salmeron, M. Scratching the surface: fundamental investigations of tribology with atomic force microscopy. *Chem. Rev.*, **1997**, 97 (4), 1163.
- 2) Onozuka, N.; Nakajima, K. Atomic force microscopy analysis of velocity dependent adhesive viscoelastic contact. *Langmuir*, **2024**, 40 (46), 24565.
- 3) Greenwood, J.A. The theory of viscoelastic crack propagation and healing. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **2004**, 37 (18), 2557.
- 4) Ciavarella, M.; Papangelo, A. On the degree of irreversibility of friction in shared soft adhesive contacts. *Tribol. Lett.*, **2020**, 68:81.

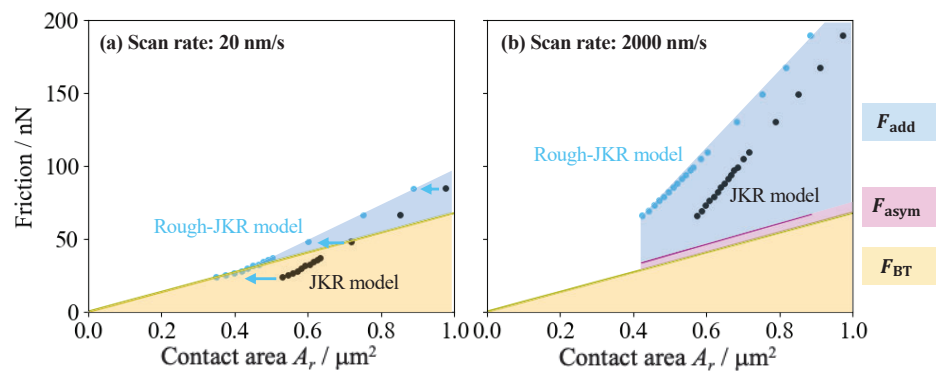


Fig. 3 Decomposition of LFM friction into F_{BT} , F_{asym} , and F_{add} at scan rates of (a) 20 nm/s and (b) 2000 nm/s.

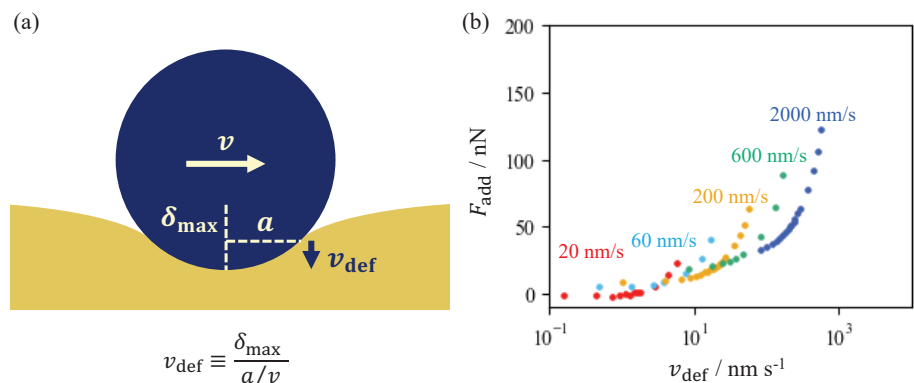


Fig. 4 (a) Schematic illustration of the definition of v_{def} . (b) Relationship between v_{def} and F_{add} at various scan rate.