

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560155

研究課題名(和文) 微量潤滑時に顕在化する凝着による摩擦増大を抑制する手法の開発

研究課題名(英文) Development of the adhesive friction reduction method under low quantity lubrication

研究代表者

桃園 聡 (Momozono, Satoshi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70262300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：液体中の固体間の摩擦力を制御することを目的として、接触部の液体と固体の界面自由エネルギーが及ぼす影響を理論によるモデル化および実験によって調べた。理論では接触部の分子の運動とマクロな凝着部の破壊とを結びつけてモデル化し、摩擦時の凝着部の観察と比較し考察した。本モデルは平均的な摩擦特性は説明可能であるが、実際の摩擦時には凝着が強くなるに従い摩擦力の変動が観察され、そのような条件においては凝着に伴う変形状態を考慮に入れた動的なモデルを作成する必要がある、それが今後の課題である。

研究成果の概要(英文)：For controlling the friction between elastomer and solid in liquid, theoretical and experimental study about the effect of interfacial free energy has been studied. The proposed theoretical model considers dynamically molecular chain behavior on elastomer surface and interfacial fracture.

This model can explain the stationary friction characteristics, but not enough to explain the variation of dynamic frictional force under dynamically sliding conditions.

研究分野：機械要素・トライボロジー

キーワード：凝着 摩擦 エラストマー 濡れ 制御 界面自由エネルギー

1. 研究開始当初の背景

近年、省資源・環境保全から潤滑油量削減や水系を含む低環境負荷潤滑剤の推奨などが求められ、一方省エネルギーから低摩擦化も強く求められている。特に潤滑能力不足から顕在化する表面間の凝着が摩擦を増大させるため、潤滑剤が微量でも凝着を抑制する手法の開発が求められている。液体中の固体間の凝着現象と摩擦現象は液体と両表面の固体の相互作用によるものであるが、界面の静的な凝着現象だけではなく、液体の流動や弾性体の変形、界面の生成・破壊など関与する複雑な現象であり、摩擦力の発生機構は十分わかっていないために摩擦力の制御方法が確立していない。

2. 研究の目的

液体中で接触する固体表面の摩擦において、接触界面に液体が浸入・排除が界面の凝着に影響を及ぼすため、この侵入・排除現象を制御することが摩擦力の制御に有効であると推察できる。本研究ではこの考えに基づき、現象を支配するパラメータと凝着が顕在化する条件を調べ、その上でそれらを利用した凝着力制御手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

3.1 単一突起の凝着特性評価：理論モデル

(1) 分子レベルの境界潤滑機構

液体中のエラストマーの表面にはエラストマーを構成している分子鎖が露出している。液体中の分子鎖は、その分子鎖は、分子運動や液体によるせん断攪拌などである程度運動している。液体中でエラストマーの表面が相手表面に押し付けられ近づくとき、分子鎖が相手表面と接触し、荷重を支えることになる。この時、相手面に接触する分子のうち、相手面と活性のある一部の分子が相手面に吸着・脱離を繰り返していると考えられる。エラストマーの分子鎖は、その吸着・脱離の特性時間 τ_m で吸着し、すべりによって距離 l_r 動くことに伸ばされ、脱離するとすれば、単位面積あたり v 個の結合点の数は、次の平衡方程式で表すことができる。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_0 - v}{\tau_m} - \frac{v v}{l_r} \quad (1)$$

ここで特性速度 $v_s = l_r / \tau_m$ を定義し式(1)を解くと、平衡状態($t \rightarrow \infty$)での結合密度は、次のように表すことができる。

$$v = \frac{v_0}{1 + (v/v_s)} \quad (2)$$

エラストマーと相手面との単位面積あたりの結合の強さ(有効な凝着仕事) $\Delta\gamma_{eff}$ は、結合密度に比例するので、静的な凝着仕事 $\Delta\gamma_0$ を用いると、次式のようになる。

$$\Delta\gamma_{eff} = \frac{v}{v_0} \Delta\gamma_0 = \frac{\Delta\gamma_0}{1 + (v/v_s)} = \frac{|S|}{1 + (v/v_s)} \quad (3)$$

ここで、拡張係数 S は

$$S = \gamma_{rs} - (\gamma_{rl} + \gamma_{sl}) \quad (4)$$

なお、液体中でのすべりのない接触における凝着の強さは、静的な拡張係数に相当($\Delta\gamma_0 = -S = |S|$, 但し $S < 0$ の場合)する。

摩擦により、エラストマーの相手面との「接触界面」が破壊されるとすると、凝着せん断応力は、界面破壊で散逸されるエネルギーから次のように書くことができる。

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \frac{1 + (E_\infty/E_0)(v_e/v_s)^{-n}(v/v_s)^n}{1 + (v/v_s)} \quad (5)$$

なお E_0 は静的な弾性率、 E_∞ はガラス状態での弾性率、 v_e は変形の時定数を決める特性速度であり、 l_0 は接触界面の境界(三重境界線)長に相当する特性長さとする、 $\sigma_{s0} = |S|/l_0$ と仮定した。

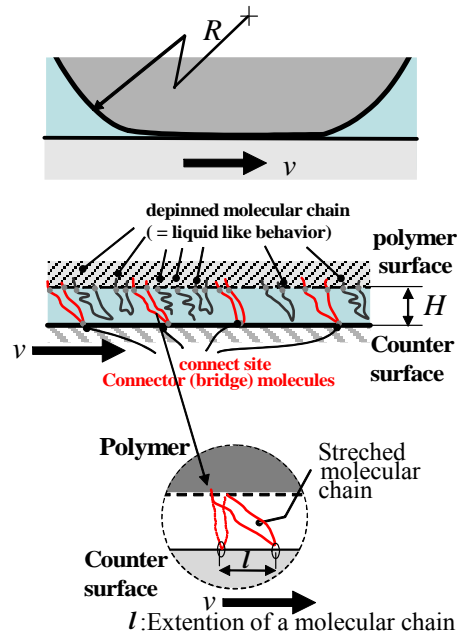


図1 理論モデル

(2) 液体中の高分子鎖の粘性抵抗

一方、面内で相手と吸着していない分子鎖は、ある程度自由に動けるが、せん断に対しては粘性の抵抗を示す。これを、Drummondら⁹⁾のように粘性係数 η_{pol} である高分子溶液がすき間 H の平板間でクエット流れをするものと考えれば、粘性せん断応力は以下のようにおける。

$$\sigma_{vis} \approx \eta_{pol} \frac{v}{H} \quad (6)$$

隙間 H は、高分子鎖の剛性と、液体の入口部

の液体の粘性による Soft EHL 効果で決まる。すき間は速度のべき乗で決まるので、指数を β とした時、粘性抵抗は次のようにおける¹⁰⁾。

$$\sigma_{vis} = \sigma_{vis0} \frac{(v/v_s)}{1+(v/v_s)} v^\beta \quad (6)$$

エラストマーの摩擦力は、凝着摩擦と粘性摩擦の合計であるので、次のように表すことができる。

$$\sigma = \sigma_{ad} + \sigma_{vis} \quad (7)$$

3.2 単一突起における凝着面への液体侵入状態の可視化

液体中のエラストマーと相手面との接触部に対する液体の関与が摩擦特性に大きな影響を及ぼしていることからエラストマーおよび液体の表面エネルギーを変えた様々な条件下で接触状態や液体膜の状態を観察する必要がある。そのため2種類の可視化方法を試みた。

一つはエラストマー単一突起と透明なガラス板のしゅう動部を同軸落射顕微鏡で観察し、反射像を観察する方法である。接触部と非接触部はそれほど明確ではないが、液膜の干渉縞などを利用して液膜厚さの分布を推定することも可能である。図2にこの方式の摩擦実験装置を示す。垂直力はゴム試験片の固定部に設置した平行板バネの歪により測定し、摩擦力はガラス板側に設けた同じ機構で測定している。すべり速度はガラス平板側を駆動することで、荷重はゴム試験片側の押し付け変位を調整して負荷している。エラストマーは、キャピラリーチューブ端部に成形した液滴状半球(直径約1mm)のポリジメチルシロキサン(PDMS, 東レダウ・Sylgard 184)を使用した。

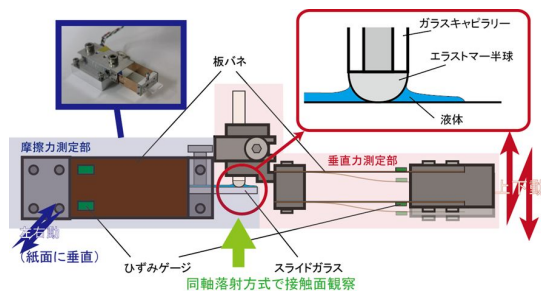


図2 単一突起接触摩擦状態観察装置 (同軸落射方式)

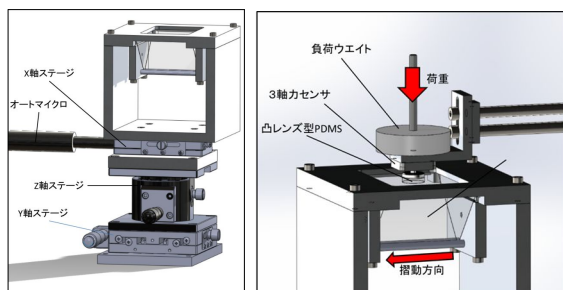


図3 単一突起接触摩擦状態観察装置 (全反射方式)

もう一つの方法は全反射を用いる方法である。この方法では液膜を介さないで接触している部分のみが全反射しないことを利用して、液膜が存在している部分との違いが高コントラストな画像により明確に判別可能である。図3にこの方式の観察装置の概要を示す。3分力計(テック技販 USL06-H5-50N)に固定された半球ゴム試験片をプリズムに押し付けて全反射状態を観察する。荷重は天秤方式であり、カウンタウエイトで調整した無負荷条件を基準に静荷重を与える。プリズム側を平行移動させて一定のしゅう動速度を与える。エラストマー試験片の材料は実験1と同じPDMSを成形したものであり、試験片の曲率半径は51.68mmである。

どちら実験においても使用した液体は、溶解性を有し、表面エネルギーの性質が異なる水とエタノールの混合液を用いた。この液体を利用することにより、水とエタノールの混合比によって界面エネルギーを変化させた実験が可能となる。

4. 研究成果

4.1 単一突起モデルにおける界面エネルギーと摩擦力の関係

まず、ここで拡張係数が、相手面との凝着力に関係することから、単純に式(5)の σ_{s0} が拡張係数の絶対値に比例するものとする。釣鐘状の摩擦特性となり、ストライベック線図のような特性が得られるとされている過去の実験結果と異なる。そこで、液体中のエラストマー分子が、液体中と濡れやすさ(相互作用)により形態(コンフォメーション)により、分子の運動が異なることから界面での凝着現象が影響を受ける。

まず、 $|S|$ が大きな組み合わせでは、分子鎖が縮まり、動きにくくなることを考慮に入れると、 τ_m が大きく、分子鎖が脱離するための変形量 l_r が小さくなるので、 v_s が $|S|$ に反比例するという単純な仮定でせん断応力の速度特性を計算すると Fig.4 のようになる。また、更にべき乗の指数も影響を受けることから、 $n \approx 0.1 \sim 0.3$ まで振ると、低速域の速度特性がややフラットになるが、これは計測されたストライベック線図⁴⁻⁶⁾の傾向に良く似ている。

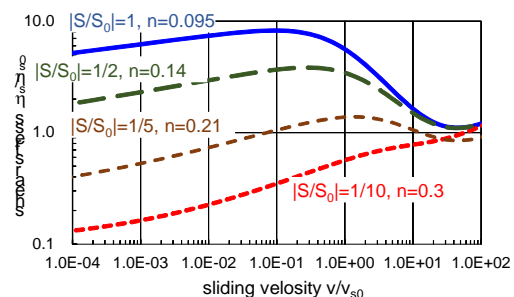


図4 理論モデルにおける摩擦の速度特性 (摩擦力に及ぼす拡張係数の影響)

4.2 単一突起の接触状態の観察

この現象を詳しく調べるためにエラストマーの単一突起の摩擦時の接触状態を観察し、同時に摩擦力も測定する実験を行った。まず、同軸落射方式での実験によると拡張係数によって、接触状態は大きく異なり、様々なモードがあることが判明した。図5に接触状態の観察結果を分類した例を示す。拡張係数の絶対値を増やすと、モード1からモード6までの様々なしゅう動状態を示すことが観察された。拡張係数の絶対値が低く濡れやすい固体表面の組み合わせだと弾性変形が少なく円形の接触部を保ち(モード1,2)、すき間を液体が動いていることが観察された。凝着力が増えるに従い、局所的な接触により変形が生じ、弾性体表面に皺のようなものが観察され、皺と一緒に液体が運動している様子が観察される(モード3,4)更に凝着力が増えると変形が大きく半月や三日月状の接触部となり(モード5,6)、更に皺の変形が断続的・振動的になることで接触部に液体が取り込まれるようになる。図6に示した通り摩擦力も凝着の強さに比例して大きくなり、摩擦変動(エラーバーの長さ)も同時に大きくなっていることがわかる。

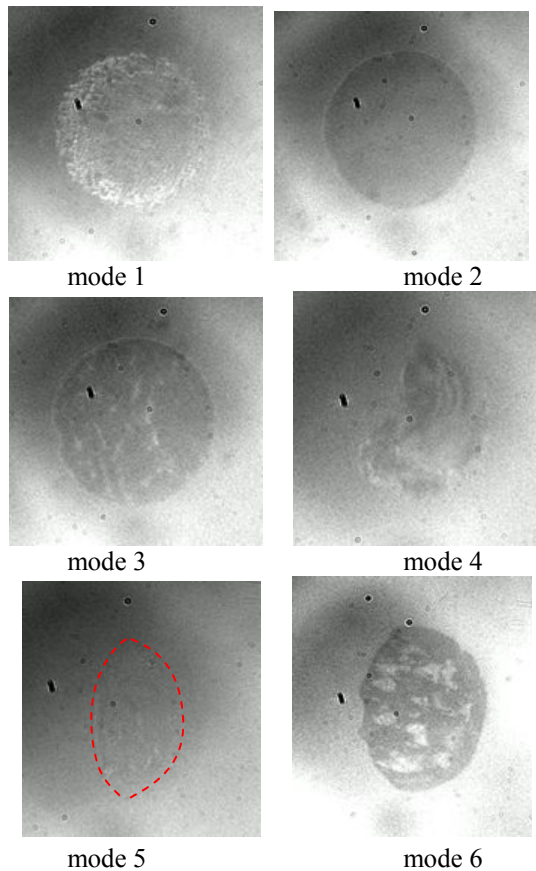


図5 接触状態の観察例

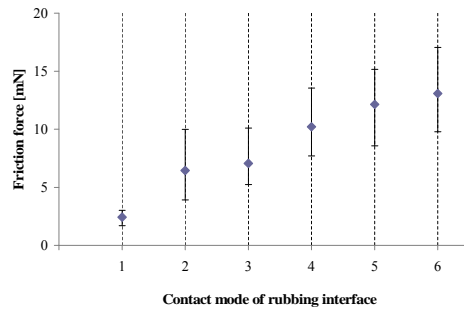
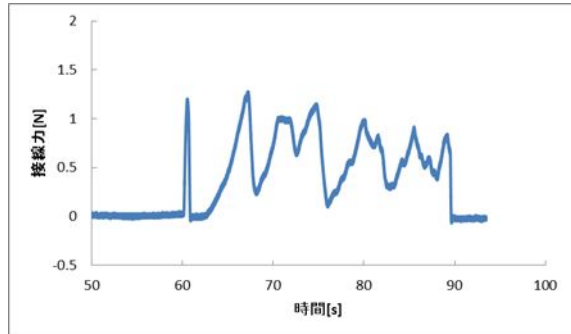
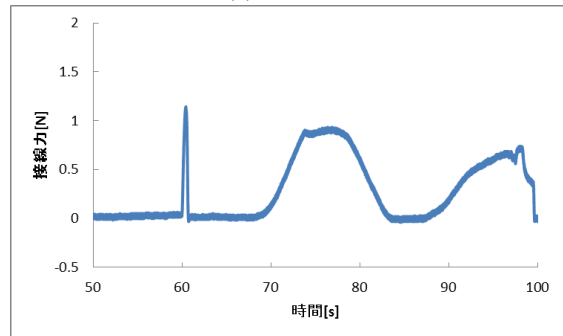


図6 各モードでの摩擦力

以上により、より大きな曲面をもつエラストマーを用い、摩擦力変動の周期が小さくなることを期待される高荷重で曲率半径の大きな弾性体を用いて図3の実験装置で観察したところ、滑り出しの摩擦力が拡張係数ではなく、固体間凝着力で決定されるが、再付着までの時間などを入れることで平均的な凝着摩擦力は拡張係数によることなどが判明した。



(a) 純水



(b) エタノール 90%

図7 静止状態の単一突起エラストマーにおける摩擦開始直後の摩擦力変動

[参考文献]

- 1) 井口ほか, トライボロジー会議 2010 福井 予稿集, 189.
- 2) 押切ほか, トライボロジー会議 2011 東京 予稿集 71.
- 3) 桃園ほか, トライボロジー会議 2013 東京 予稿集 E4.
- 4) 桃園・井口・中村, トライボロジー会議 2013 福岡予稿集, C25.
- 5) 西ほか, トライボロジー会議 2013 東京予稿集, A8.

- 6) 西ほか, トライボロジー会議 2013 福岡予稿集, C21.
- 7) 西ほか, トライボロジー会議 2014 東京予稿集, A25.
- 8) S. Momozono, K. Nakamura & K. Kyogoku, J. Chem. Phys. 132 (2010) 114105.
- 9) C. Drummond, J. Israelachvili & P. Richetti, Phys. Rev. E, 67 (2003) 066110.
- 10) 例えば J. de Vicente et al., Food Hydrocolloids, 20, 4 (2005) 483.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

- 桃園 聡, エラストマーの凝着を伴う摩擦の発生機構, 日本ゴム協会誌, 日本ゴム協会, 88, 2, 48-54, Feb. 2015.
- 桃園 聡, エラストマーにおける凝着現象と境界摩擦, トライボロジスト, 日本トライボロジー学会, Vol. 58, No. 10, p. 734, Oct. 2013.

[学会発表](計 5件)

- 桃園 聡, 中村研八. エラストマーの境界潤滑特性, トライボロジー会議予稿集北海道室蘭 2012-9, 一般社団法人に本トライボロジー学会, Aug. 2012.
- 桃園 聡, 井口 洋二, 中村 研八. エラストマーの境界摩擦に及ぼす摺動部への液体浸入の影響, トライボロジー会議 2013 秋福岡予稿集, Oct. 2013.
- Satoshi Momozono, Yoji Iguchi, Kazuya Oshikiri, Kenya Nakamura, Keiji Kyogoku. Effects of Interfacial Free Energy on Adhesive Friction Behavior of Elastomer Surfaces under Wet Conditions, 5th World Tribology Congress, Proceedings of World Tribology Congress, Sep. 2013.
- 桃園 聡, 井口洋二, 押切一矢, 川北成美, 中村研八, 京極啓史. エラストマー摺動面における潤滑状態の観察, トライボロジー会議 2013 春東京予稿集, May. 2013.
- 桃園 聡. エラストマー境界摩擦に関する一考察, トライボロジー会議秋盛岡 2014 予稿集, 日本トライボロジー学会, Nov. 2014.

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

桃園 聡 (MOMOZONO, Satoshi)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 70262300

(2)研究分担者

京極 啓史 (KYOGOKU, Keiji)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 70153236

(3)連携研究者

なし