

マイクロトライボロジーにおける水中と乾燥条件下での樹脂の摩擦の荷重依存性の比較

Comparison of Load Dependence of Polymer Friction under Aqueous and Dry Conditions in Microtribology

兵庫県大・工（学）＊國本 敬太 兵庫県大・工（非）石田 亮太 兵庫県大・工（正）田中 芹奈
 兵庫県大・工（正）松本 直浩 兵庫県大・理，ダイセル（正）須貝 幸廉 兵庫県大・工（正）木之下 博
 Takahiro Kunimoto*, Ryota Ishida*, Serina Tanaka*,
 Naohiro Matsumoto*, Yoshiyuki Sugai**, Hiroshi Kinoshita*,
 *University of Hyogo, **Daicel Corporation

1. はじめに

樹脂は軽量で機械的特性に優れるといった理由から，軽量化・省エネルギー化・高性能化の目的で，近年金属の代替品として自動車部品や電子機器，医療機器など幅広い分野で摩擦材料として使用されている．しかし，樹脂の摩擦摩擦に関してはいまだ未解明な部分が多い．そこで，我々はミリニュートン（mN）オーダーの荷重条件における樹脂の摩擦に着目した．mN 荷重における樹脂の摩擦では，樹脂の摩耗粉の形成や再凝着などのプロセスが通常のニュートン（N）オーダーに比べ時間オーダーが長いことから観察しやすく，さらに微小な凝着力も測定可能である．これまでに，mN 荷重での摩擦における凝着力の測定を様々な樹脂で行い，室温において，ポリアセタール（POM）ではほとんど無視できるほど凝着力が小さいこと，ポリエチレン（PE）では樹脂の中では比較的大きな凝着力を有することが明らかとなった⁽¹⁾．mN では凝着力はメニスカスが大きく影響し，水の影響を調べる必要がある．

本研究では，凝着力の大きさが異なる，上述の 2 つ樹脂を用い，摩擦界面をその場観察し，接触面積と摩擦力の関係に及ぼす凝着力の影響について，水中と乾燥条件下での試験結果を比較し考察した．

2. 方法.

2.1. 試験装置

Fig.1 にて試験装置のミリニュートントライボメータの概略図を示す．装置上部には先端に試験球を取り付けたロードセル，装置中央にはピエゾ素子に接続された試験基板，装置下部には光学顕微鏡を設置している．ピエゾ素子によって試験基板を微小変動させることにより基板を試験球に押し付けて，ミリニュートン（mN）単位の荷重を発生させ，往復しゅう動摩擦した．その時の荷重・摩擦力をロードセルによって測定した．試験中には光学顕微鏡を用いて摩擦界面を下からその場観察した．また，その場観察した映像から接触面積を算出した．

2.2. 試験条件

試験球には POM，PE の $\phi 1/8$ インチ（3.175mm）球を使用し，摩擦相手であるディスクの材料にはその場観察を可能にするために透明であるソーダ石灰ガラスを使用した．荷重範囲は 1～20mN とし，それぞれの荷重で摩擦力を測定した．また，しゅう動幅を 315 μm ，しゅう動周波数を 0.25Hz，試験温度を室温（23 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$ ），対物レンズ倍率を $\times 10$ とし，潤滑条件は無潤滑（乾燥）と水潤滑とし，両方で試験した．水潤滑ではスポイトを用いて，ガラス基板に水を 2 滴（約 100 μL ）滴下し，そこで樹脂球を接触させ摩擦した．Fig.2 に水潤滑試験での摩擦部分の様子を示す．

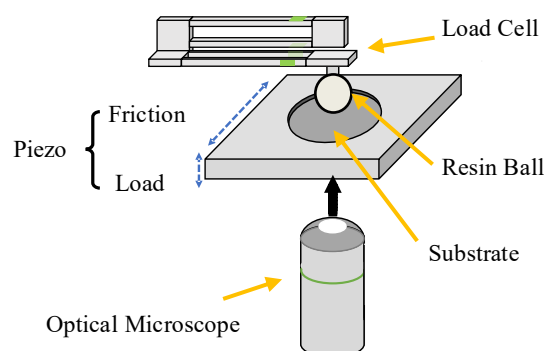


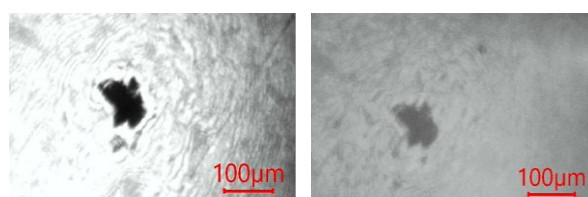
Fig.1 Schematic of the millinewton tribometer



Fig.2 Image of the test stage during water-lubricated testing

3. 試験結果

Fig.3 に POM の(a)乾燥と(b)水中での荷重 20mN におけるその場観察の摩擦界面像を示す．これらは同一球でガラスに対して同じ場所に接触させた．中央の暗く映っている部分が POM とガラスが接触している箇所である．水中での試験では水の影響で全体的に薄暗く映っており，水が摩擦界面に侵入していると考えられるが，乾燥と水中での接触面はほとんど同一形状であった．ただし，接触面の形状



(a) Under dry conditions (b) Under aqueous conditions

Fig.3 Image of the contact area for POM

は樹脂表面の凹凸によって異なるため、接触面の形は試験ごとに異なった。

Fig.4 では乾燥と水中での POM の摩擦力の荷重に対する変化を示している。乾燥と水中での摩擦力の試験結果を比較したときに異なる点は2つある。1つ目は水中試験での摩擦力のほう荷重 20mN で約 1~4mN 大きいこと。2つ目は水中のほうが乾燥より荷重に対して摩擦力が曲線的に増加していることである。PE については POM と異なり水中試験での摩擦力のほう荷重 20mN で約 1~3mN 小さく、水中と乾燥の両方において摩擦力は荷重に対して曲線的に増加した。

JOHNSON らの JKR 理論⁽²⁾によると、半径 R_s の球が平面と荷重 L_0 で接触するときの見かけのヘルツ荷重 L_1 は次のように示される。

$$L_1 = L_0 + 3\pi\gamma R_s + \sqrt{6\pi\gamma R_s L_0 + (3\pi\gamma R_s)^2} \quad (1)$$

ここで、 γ は単位面積当たりの凝着エネルギーである。また、安藤らは先端に曲率をつけた銅とシリコンウェハを用いて、摩擦中に垂直荷重を漸減させて摩擦力を測定し、ヘルツ接触をする試料では摩擦力は JKR 理論の見かけの接触力（式(1)）に比例することを明らかにした⁽³⁾。Fig.5 では Fig.4 で示した水中条件下での摩擦力に、

$$F = \mu L_1 \quad (2)$$

とにおいて（ F ：摩擦力、 μ ：摩擦係数）、最小二乗法で μ と γ を求め近似した結果を示す。この時の μ は約 0.39、 γ は約 0.031mN/mm であった。近似曲線と測定値はほぼ一致しており、本試験条件下での摩擦力も JKR 理論の見かけのヘルツ荷重に比例した。また、POM の乾燥条件下での凝着エネルギー γ はほぼ 0 で、 $L_1=L_0$ となり摩擦力は荷重 L_0 に比例した。摩擦係数 μ を比較すると、POM では水中のほうが乾燥よりも大きく、PE では水中のほうが乾燥よりも小さくなり、それぞれ異なる結果を示した。

Fig.5 では Fig.4 の乾燥条件と同じ試験中に、その場観察した映像から算出した摩擦中の POM の接触面積の荷重に対する変化を示している。摩擦中の接触面積は荷重に対して非線形的に増加した。試験ごとに多少の違いがあるが、これはヘルツの接触理論の荷重の 2/3 乗に近い推移である。また、その他試験条件においても同様に非線形的に増加した。しかしながら、摩擦力は荷重に対して線形的に増加しており（Fig.4）、荷重に対する推移は摩擦力と接触面積で明らかに異なる。摩擦の凝着説によると摩擦力と接触面積は比例することから、その場観察で得られた接触面積のすべてが摩擦力に寄与しているのではなく一部が荷重を支え摩擦しており、その面積は見かけのヘルツ荷重（式(1)）に比例していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、水中と乾燥条件下で POM、PE を用いたマイクロ荷重での摩擦試験を行い、比較した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) マイクロ荷重での樹脂摩擦において、摩擦力は JKR 理論の見かけのヘルツ荷重に比例した。
- 2) その場観察より得られる接触面積のうち、実際に摩擦をしているのは一部であり、その面積は見かけのヘルツ荷重に比例していると考えられる。

文献

- 1) 國本、田中、松本、須貝、木之下：樹脂の摩擦力・凝着力の温度依存性のマイクロトライボロジーによる解明、トライボロジー会議 2024 秋 名護（2024）B26。
- 2) K. L. Johnson, K Kendall & A. D. Roberts : Proc. R. Soc. Lond., A324（1971）301。
- 3) 安藤泰久、石川雄一、北原時雄：正から負の垂直荷重での摩擦力の測定—接触状態の違いが凝着力に与える影響、トライボロジスト、41（1996）p.663~670。

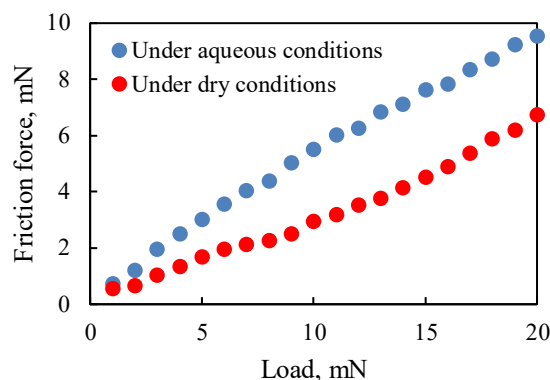


Fig.4 Friction force vs load for POM under aqueous and dry conditions

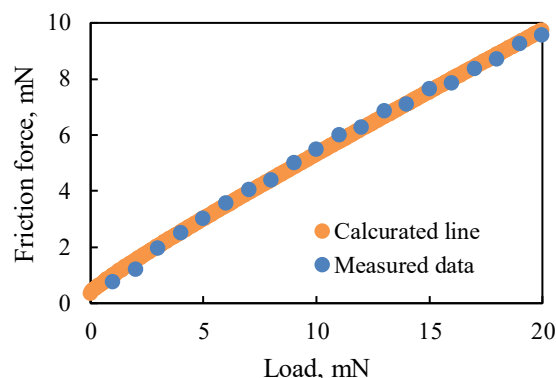


Fig.5 Comparison of experimental and calculated values

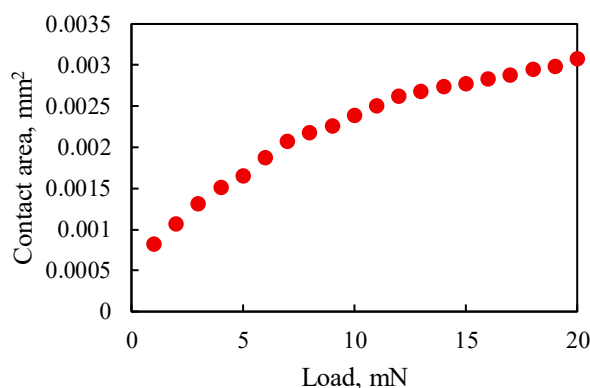


Fig.6 Contact area vs load under dry conditions for POM