

高面圧域の POM 摩擦における摩耗粉再凝着による摩擦メカニズム

Friction Mechanism due to Re-adhesion of Wear Debris in POM Friction under High Contact Pressure

兵庫県大・工（正）○木之下 博, 兵庫県大・工（非）中山美聖(兵庫県立大), 兵庫県大・工（学）穂本典偉
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,

Hiroshi Kinoshita^{1,*}, Misato Nakayama¹, Teni Akimoto¹,

Serina Tanaka¹, Matsumoto Naohiro¹ Yoshiyuki Sugai^{1,2},

¹University of Hyogo, ²Daicel Corporation

1. はじめに

近年、樹脂の軽量性や自己潤滑性を活かして、トライボマテリアルへの応用が急速に進んでいる。しかし、樹脂のトライボロジーに関する理解はまだ不十分である。摩擦の研究は主に金属を対象に行われ、樹脂に関しては金属の類推を用いて説明されることが多い。樹脂の場合、摩擦力が荷重に比例しないケースが多く、摩擦力の予測が非常に困難である。また樹脂の摩擦では、相手面への移着や摩耗粉の発生が顕著であり、これらが摩擦力に大きく影響すると考えられる。そのため移着膜や摩耗粉の摩擦への寄与の解明には、摩擦界面のその場観察が非常に有効だと思われる。これまでに、我々は比較的高面圧におけるポリアセタール（POM）の摩擦界面をその場観察し、摩擦界面はバルクの POM と摩耗粉で構成されていることを明らかにしてきた¹⁾。

本研究では、接触界面の面積と摩擦力の関係を様々な摩擦条件で測定してその関係を明らかにし、さらに摩耗粉の摩擦への寄与を考察した。

2. 方法

2.1 試験装置

本研究では、Fig.1 に示すソーダ石灰ガラスディスクと POM 球を用いたピンオンディスク型のトライボメータで摩擦試験を行なった。設定した速度で回転するソーダ石灰ガラスディスクに固定した POM 球を設定した荷重で押しつけ摩擦させた。このときの摩擦力をロードセルを用いて計測し、同時に光学顕微鏡を用いてガラスディスク越しに摩擦界面を観察した。Fig.1 の右上に示すのは撮影した摩擦界面像である。接触部は暗く結像されるので、その部分のドット数を読み取り、そこから接触面積を算出した。

2.2 試験条件

本研究では、すべり速度を 0.31m/s, 0.63m/s, 1.26m/s, 1.88m/s, 荷重を 5N, 10N, ボール直径 2mm, 4mm, 10mm の各組み合わせで摩擦試験を行なった。最大ヘルツ接触面圧を単純に計算すると 68MPa~251MPa になっており、引張降伏応力以上のかかなり高い値となっている。摩擦試験は全て無潤滑で行なった。

3. 結果

Fig.2 に POM ボールの直径が 2mm, 荷重 5N, 摩擦速度が 0.31m/s の時の(a)摩擦係数 μ と摩擦時間 t の関係, (b)接触面積 S と摩擦時間 t の関係, (c)せん断応力 τ と摩擦時間 t の関係, (d)摩擦力 F と接触面積 S の関係を示している。摩擦実験は同じ条件で 3 回行った。Fig.2(a)を見ると同じ摩擦条件であっても、摩擦係数は全く異なる値であった。Fig.2(b)の接触面積では、どの実験でも摩擦時間が経過するほど接触面積は摩耗によって大きくなり、摩擦係数が大きくなるほど接触面積は大きくなっている。これらの傾向は摩擦条件を変えてもおおよそ似たようなものであった。Fig.2(c)のせん断応力 τ は、

$$\tau = F/S \quad (1)$$

で求めている。Fig.2(c)に示すように、この実験条件では同じ条件でもせん断応力が全く異なる値であった。他の実験

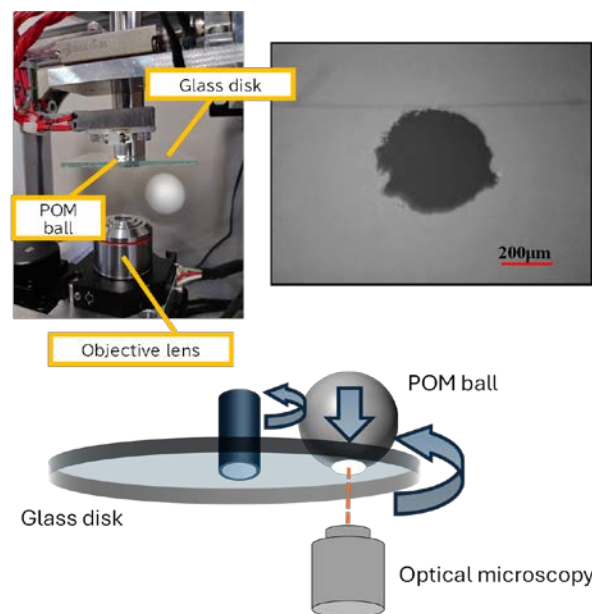


Fig. 1 Photo and schematic diagram of the pin-on-disk tribometer, and a micrograph of the friction interface.

条件ではおおそ似たような値となった。
Fig.2(d)の摩擦力 F と接触面積 S の関係は、3つの実験結果が1つの直線に沿っている。摩擦の凝着論によると、摩擦力は接触面積と比例関係があり、当然その直線は原点を通る。しかし Fig.2(d)では、直線は縦軸の切片と負で交わる。これは、今までに報告されていない現象である。

Fig.3 は POM ボールの直径が 4mm, 荷重 10N の時に、4 つの摩擦速度での摩擦力と接触面積の関係を示したものである。それぞれの摩擦速度で少なくとも 3 回は同じ条件で摩擦実験を行っている。この図から、同じ摩擦速度であれば同じ直線に沿っており、摩擦速度が速くなればそれに従って直線の傾きは小さくなっている。そして最も特徴的なのが、全ての直線が一点で交わっていることである。他のボール直径、荷重の組合せでも全て同じように、同じ摩擦速度であれば同じ直線上に沿っており、それらの直線は一点で交わる。これは最も接触面積が小さいときから接触面積が大きくなるに従って、摩擦速度に依存する傾き（せん断応力）で線形的に摩擦力が大きくなるように見える。そこで摩擦力 F は次の式になると仮定した。

$$F = \tau_i S_i + \tau_g \Delta S_g \quad (2)$$

ここで τ_i と S_i は最も接触面積が小さいとき（直線が交わる点）のせん断応力と接触面積である。これより小さな接触面積は測定されておらず、 S_i はおそらく降伏応力以下になるように POM が塑性変形してガラスと接触する最小接触面積と思われる。この値は、ボールの直径と荷重で決まる値で、この部分ではほぼ全ての荷重を支えていると思われる。一方、 ΔS_g は S_i からの面積の増加分で、 τ_g はその増えた面積でのせん断応力である。 S_i の部分で荷重を支えているとすれば ΔS_g の部分では荷重をほとんど支えていないと考えられる。 τ_i は摩擦速度に依存しないが、 τ_g は摩擦速度で大きく異なる。

Fig.4 はボールの直径が 2mm, 荷重 10N, 摩擦速度が 1.26m/s の時の摩擦後半の摩擦界面像を示している。摩擦初期に比べかなり摩耗している。摩擦界面の右側が顕著であるが、再凝着した微小な摩耗粉が摩擦界面全体で見られている。この摩耗粉は一度摩擦界面から脱離したものが、ディスクの回転で再び摩擦界面に侵入したものである。またこの摩耗粉は摩擦界面に留まっているのではなく、ディスクの回転によって回転方向に動いている。動く摩耗粉の部分で荷重を支えるのは困難で、この部分が ΔS_g に相当すると考えられる。摩擦速度が速いほど摩擦界面内の摩耗粉は速く動くことが観察された。それゆえ、摩擦速度が速いほど摩耗粉は摩擦界面を抜けやすく、摩擦界面に与える横方向の力が小さくなり、せん断応力 τ_g も小さくなったと考えられる。これは、温度の影響などが考えられるが現時点では不明である。

4. まとめ

本研究の結果、POM とソーダ石灰ガラスの摩擦では、摩擦力は $F = \tau_i S_i + \tau_g \Delta S_g$ で与えられると考えられる。現時点では、第 1 項は圧縮降伏応力に関係し荷重を支えている部分の摩擦力で、第 2 項は再凝着した摩耗粉が POM 球に与えている横方向の力と推測している。

1) Misato Nakayama, Teni Akimoto, Naohiro Matsumoto, Hiroshi Kinoshita, “Investigations on the Friction and Wear Mechanisms of Polyacetal Resins by the Insitu Observation of the Friction Interfaces,” ITC 2023 Fukuoka, 28-PO-38.

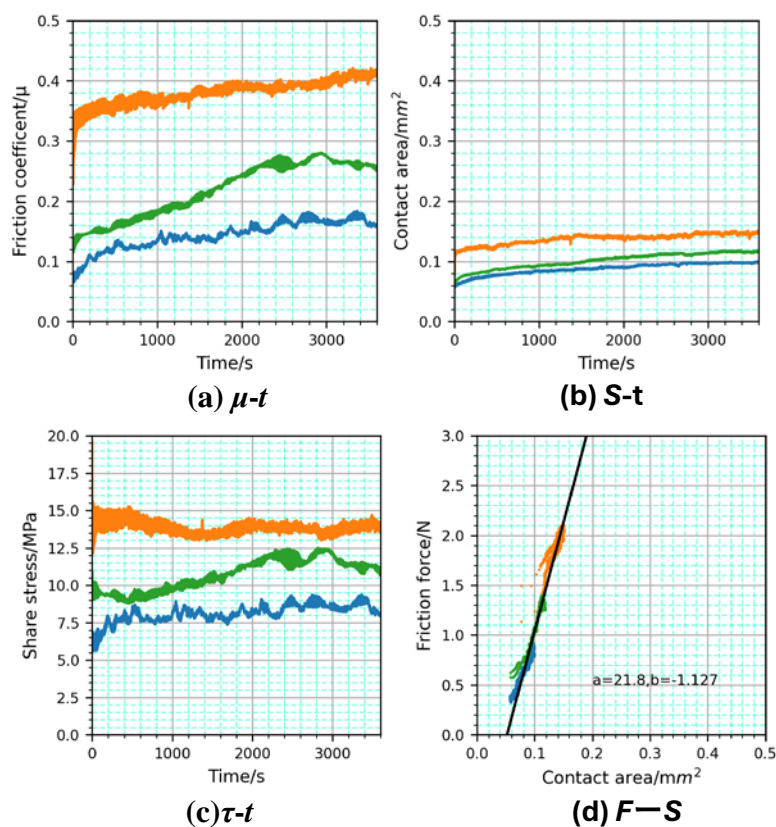


Fig. 2 Frictional test results. (a) Friction coefficient vs. friction time, (b) Contact area vs. friction time, (c) Share stress vs. friction time, (d) Friction force vs. contact area.

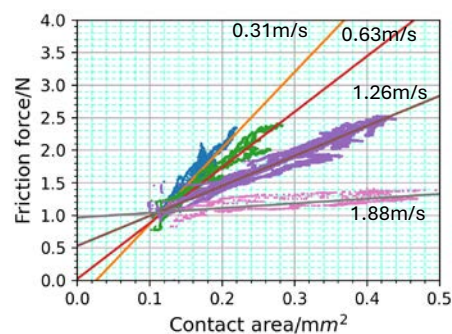


Fig. 3 Friction force vs. contact area at various friction speed.

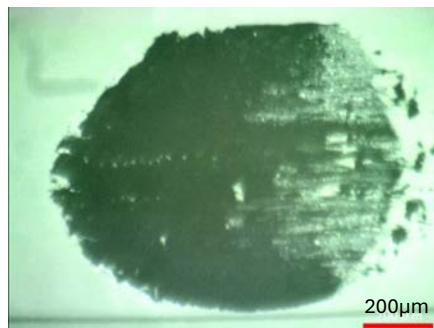


Fig. 4 A micrograph of the friction interface.