

POM-アクリル摩擦により生成した摩耗粉の構造変化に及ぼすしゅう動速度の影響

Effect of Sliding Speed on the Structural Changes of Wear Debris Generated by Friction between POM and Acrylic Resin

兵庫県立大・工（正）*田中 芹奈 兵庫県立大・工（院）吉岡 拓翔 兵庫県立大・工（学）今井 彩乃
兵庫県立大・工（正）松本 直浩 兵庫県立大・ダイセル（正）須貝 幸廉 兵庫県立大・工（正）木之下 博

Serina Tanaka*, Takuto Yoshioka*, Ayano Imai*, Naohiro Matsumoto*, Yoshiyuki Sugai*, **, Hiroshi Kinoshita*

*University of Hyogo, **Daicel Corporation

1. はじめに

ポリアセタール（POM）はエンジニアリングプラスチックの一種であり、高い機械強度、寸法安定性、耐摩耗性を備え、さらに自己潤滑性を有することから、摺動部材やギヤなどの機械要素に広く利用されている^{1,2)}。一方、アクリル樹脂（PMMA）は高い透明性と剛性を特徴とし、光学部品や構造材として用いられるが、比較的摩耗しやすく、摩擦発熱による変形や劣化を受けやすい特性を有している³⁾。樹脂材料同士の摩擦挙動を詳細に理解するためには、摩擦中の界面状態を直接観察することが有効である⁴⁾。そこで本研究では、摩擦界面その場観察を可能とするため、高い透明性を有するPMMAをPOMの相手材に選定した。

これらの樹脂材料は軽量化や低摩擦化を目的とした機械システムにおいて重要な役割を担う一方、使用環境に応じて摩擦・摩耗挙動が大きく変化し、その信頼性に影響を与えることが知られている。特に、摩耗により生成する摩耗粉の形態や構造は、摩擦界面での潤滑挙動やさらなる摩耗進行に寄与することが報告されており²⁾、摩擦界面と摩耗粉との相互作用を含めた評価が必要である。摩耗粉は摩擦界面に再付着し、摩擦係数や摩耗メカニズムを変化させる要因となりうるが、その構造や物性はしゅう動条件に強く依存すると考えられる。

我々の研究グループではこれまで、POM-PMMAにおいて、摩擦界面の形状に着目し、摩擦係数や摩耗量に関する評価を行ってきた⁴⁾。一方で、摩耗粉の構造変化に焦点を当て、その熱的・化学的性質をしゅう動速度の観点から評価する取り組みは行っていない。そこで本研究では、POMとPMMAの摩擦により生成した摩耗粉に着目し、しゅう動速度が摩耗粉の融解挙動や結晶化度といった熱的性質、ならびに化学的構造に及ぼす影響を評価することを目的とした。

2. 実験方法

摩擦特性の評価にはピンオンディスク試験を用いた。ピンには直径4mmのPOM球（表面粗さRa：約1.9 μm）を、ディスク材には厚さ3mm、50mm角のPMMA板（表面粗さRa：約0.03 μm）を用いた。試験は荷重10N、しゅう動速度0.25、0.56、0.70、0.84 m/sの条件で、総すべり距離900mまで大気中・無潤滑下で実施した。また、摩擦中の摩擦界面付近を赤外線カメラで真横から測定し、摩擦界面温度とした。試験後、生成した摩耗粉を回収し、電界放出形走査電子顕微鏡（FE-SEM）により形態を観察した。さらに、摩耗粉の熱的性質を示差走査熱量測定（DSC）で、表面化学状態をX線光電子分光分析（XPS）で評価した。

3. 結果と考察

3-1：摩擦係数および摩擦界面温度

しゅう動速度0.25 m/sでは、摩擦係数は試験開始直後に約0.08と低い値を示し、その後徐々に上昇し、終了時には約0.20に達した。一方、しゅう動速度0.56 m/s以上では、試験開始直後に0.35～0.40まで急上昇するものの、その後は0.15～0.23の範囲をほぼ一定で推移した。これらの結果から、しゅう動速度0.25 m/sでは摩擦係数に時間依存性が見られたのに対し、0.25 m/s以外のしゅう動速度条件では初期に高い値を示すものの、その後は安定することがわかった。

図1に、定常領域（100-900 m）における平均摩擦係数としゅう動速度の関係を示す。各値は同一条件で5回測定した結果の平均値であり、図中のエラーバーは標準偏差を示す。平均摩擦係数は0.25 m/sで約0.15、0.56 m/sで約0.16、0.7 m/sで約0.19、0.84 m/sで約0.22となり、しゅう

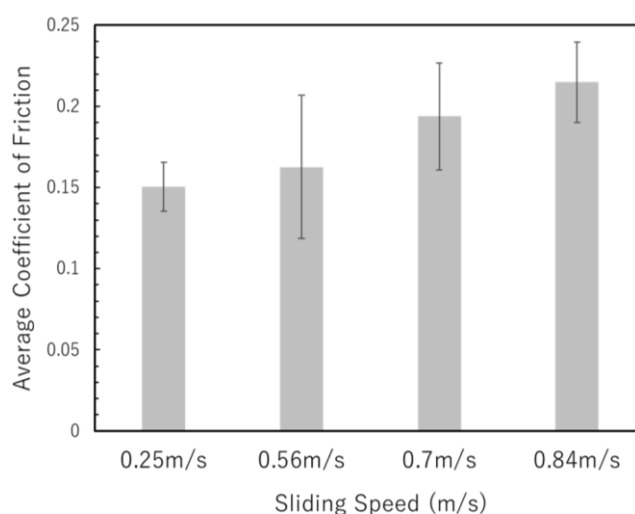


Fig. 1 Relationship between sliding speed and average coefficient of friction (error bars indicate standard deviation).

動速度の増加に伴い明確な増加傾向を示した。図2に、摩擦界面温度の変化を示す。しゅう動速度 0.56 m/s 以上では試験開始直後に温度が急上昇し、その後はほぼ一定で推移したのに対し、0.25 m/s では温度上昇は緩やかで、試験全体を通じて約 35℃前後で推移した。定常領域の摩擦界面温度は、しゅう動速度 0.56 m/s で約 48℃、0.70 m/s で約 50℃、0.84 m/s で約 56℃前後となり、速度上昇に伴う顕著な温度増加が明らかとなった。この結果から、しゅう動速度が高いほど摩擦発熱が大きく、摩耗粉の熱的・化学的性質に影響を及ぼす可能性が高いことが示唆される。

3-2 : SEM, DSC, XPS

摩耗粉の SEM 観察では、しゅう動速度 0.25 m/s で生成した摩耗粉は剥離片状で比較的小さな粒子が主体であったのに対し、0.84 m/s ではロール状に変形した摩耗粉が観察された。この形態差は、しゅう動速度の増加により、摩耗粉が界面で受ける力学的作用⁴⁾と温度条件が変化したこと起因すると考えられる。

DSC 測定の結果、摩耗粉の結晶構造には速度依存性が認められた。POM バルク材は 165℃に鋭い融解ピークを示し、結晶化度は約 54%であった。一方、しゅう動速度 0.56 m/s で得られた摩耗粉は 161℃に融解ピークを示し、結晶化度は約 5%と著しく低下した。これは、摩擦界面温度が約 48℃と比較的低く、結晶化を促す条件を満たさないまま分子鎖がせん断され、非晶質化が進行したためと考えられる。これに対し、0.84 m/s で得られた摩耗粉は同じ 161℃に融解ピークを示したものの、結晶化度は約 75%と高く、バルク材を上回った。この傾向は、界面温度が約 60℃まで上昇し、摩擦過程で分子運動性が増したことで再結晶化が生じた可能性を示唆している。すなわち、しゅう動速度の違いによる摩擦過程における温度履歴が、摩耗粉の結晶性を大きく左右することが明らかとなった。

図3にXPS測定結果より求めた摩耗粉のO/C比を示す。O/C比はPMMAバルク材で約0.27、POMバルク材で約0.13であったのに対し、摩耗粉ではしゅう動速度 0.56 m/s で約0.50、0.84 m/s で約0.57となり、バルク材に比べて大幅に増加した。この増加は摩擦過程での酸化進行を示すものであり、さらにXPSプロファイルのピーク分離解析からカルボニル基(C=O)の生成が顕著であることが明らかになった。特に高速条件でこの傾向が強く、界面温度の上昇により酸化反応が進行し、カルボニル基の導入が促進されたと考えられる。

以上の結果から、しゅう動速度の増加は摩擦界面温度を上昇させ、摩耗粉は熱的性質である結晶化度に大きな変化を示すとともに、化学的性質として酸化傾向が強まり、カルボニル基の生成が顕著に進行したことが明らかとなった。これらの知見は、摩耗粉の構造変化が摩擦メカニズムに及ぼす影響を理解するうえで重要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、POM-PMMA間の摩擦において、しゅう動速度が摩擦特性および摩耗粉の構造に及ぼす影響を調査した。その結果、しゅう動速度の増加に伴い摩擦界面温度が上昇し、摩耗粉は結晶化度に大きな変化を示すと共に、酸化傾向が強まりカルボニル基の生成が顕著に進行することが明らかとなった。これらの知見は、摩耗粉の構造変化が摩擦メカニズムに及ぼす影響を理解するうえで重要であり、今後の摩耗制御技術の指針となることが期待される。

参考文献

- 1) 竹市 嘉紀：高分子材料のトライボロジー，表面技術，65，12(2014)，562-567.
- 2) 西谷 要介：高分子トライボロジーの基礎 その1，トライボロジスト，62，6(2017)，393-398.
- 3) Biswajit Saha, Wei Quan Toh, Erjia Liu, Shu Beng Tor, Junghoon Lee : A study on frictional behavior of PMMA against FDTS coated silicon as a function of load, velocity and temperature, Tribology International, Vol 102 (2016), 44-51.
- 4) 田中 芹奈, 松本 直浩, 須貝 幸廉, 木之下 博：トライボロジー会議 2025 春 東京 予稿集, 305-306.

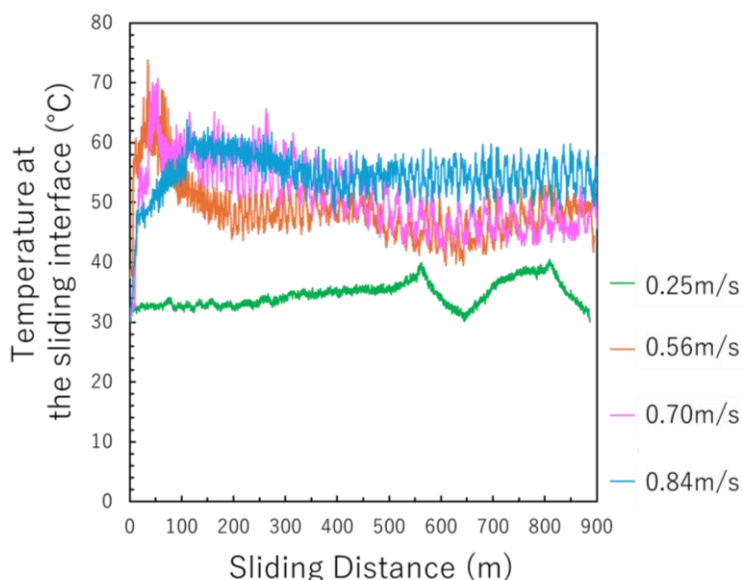


Fig. 2 Changes in sliding interface temperature with sliding distance under different sliding speeds.

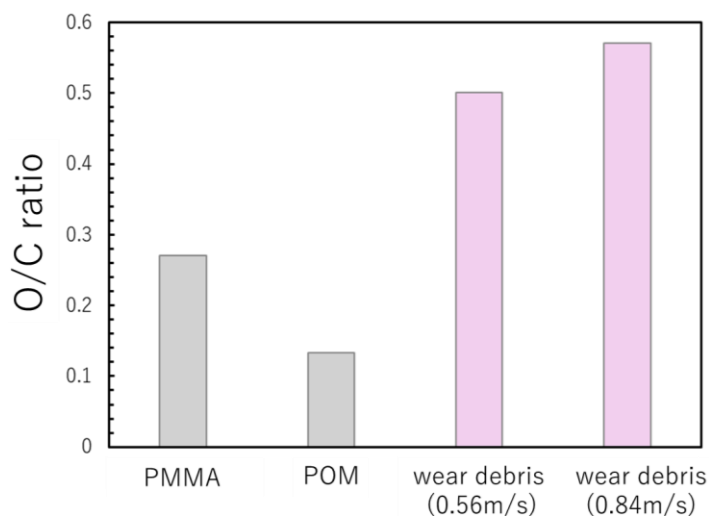


Fig. 3 Oxygen-to-carbon (O/C) ratio of PMMA, POM, and wear debris at different sliding speeds.