

高面圧・乾燥水素ガス環境における炭素繊維充てん PTFE の特異的低摩擦・低摩耗現象 Characteristic low friction and wear behaviors of CF-filled PTFE under high contact pressure in dry hydrogen gas environment

九州大・工（正）*陳 乾 九州大・工（正）森田 健敬 九州大・工（正）澤江 義則

Qian Chen*, Takehiro Morita*, Yoshinori Sawae*

* Kyushu University

1. はじめに

PTFE (Polytetrafluoroethylene) は自己潤滑性、耐熱性、化学的安定性に優れ、様々な機械要素に用いられている。その複合材料の摩擦・摩耗特性は、摩擦相手面上の転移膜に大きく依存し、転移膜の形成は、充てん材や周囲雰囲気などのしゅう動条件に大きく依存している。水素ガスコンプレッサーのシール材の一種である PAN 系炭素繊維充てん PTFE は高純度水素ガス雰囲気において、炭素を主成分とするトライボ膜の形成により低摩擦・低摩耗になることが報告されている¹⁾。また、水素ガス雰囲気中の微量水分がそのトライボ膜の形成に影響を与えることも明らかになっている²⁻⁴⁾。一方、PTFE 複合材料のしゅう動試験において、相手面との接触圧力が高くなった際に、充てん材が表面に突出して荷重を支持することで、母材である PTFE の相手面への接触を防止し、複合材の耐摩耗性を向上させたことも示唆された⁵⁾。水素雰囲気中の微量水分によって高面圧条件での炭素繊維充てん PTFE のトライボ膜の形成に影響を及ぼす場合があり、シール材の長寿命化のために、さらなる理解が必要である。

本研究では、接触面圧と微量水分が PAN 系炭素繊維充てん PTFE の摩擦、摩耗及びトライボ膜形成に及ぼす影響を評価し、そのメカニズムを把握することを目的とする。

2. 実験方法

高度雰囲気制御チャンバーを有するピン・オン・ディスク摩擦試験機を用いてしゅう動試験が行われた³⁻⁴⁾。本装置は加湿装置を備えており、ガス中の水分量を ppm レベルで制御することが可能である。PAN 系炭素繊維 20wt% 充てん PTFE をピン試験片、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C をディスク試験片とした。ディスク試験片は外径 56mm、内径 20mm、厚み 3mm のリング状であり、その表面粗さが $R_a=0.05\mu\text{m}$ になるように耐水ペーパーにより研磨した。ピン試験片は、長さ 15mm、直径 6mm の円柱型である。ガス中の水分を 1 ppm 以下に維持し、すべり速度を 2m/s、ピンとディスクの接触面圧を 7 MPa とし、すべり距離 40000m においてピン試験片の重量を測定し、試験前との重量変化から比摩耗量を求めた。実験を 12 回行った。

すべり試験後のピン試験片摩耗面とディスク試験片表面のしゅう動痕について、共焦点レーザー顕微鏡 (VK-X260, KEYENCE) により表面粗さや高さ分布を測定した。また、レーザーラマン顕微鏡 (DXR2xi, Thermo Fisher Scientific) を用い、摩耗面と摺動部の化学組成分析を行った。さらに、X 線光電子分光装置 (XPS, JPS-9200KM, JEOL) を用い、ディスク試験片上のしゅう動痕部について、表面から深さ 1 μm までの化学組成分布を求めた。

3. 実験結果

Figure. 1 に、横軸をすべり距離、縦軸を摩擦係数と雰囲気中の水分量としたものを示す。すべり実験は 12 回行われ、全ての試験において、摩擦結果は二つのパターンに分けられた。雰囲気中の平均水分量を 1 ppm 以下にコントロールされたが、図に示されたように、初期なじみ過程での水分量が低い時、摩擦係数は極めて低い (0.01 以下)。一方、初期水分量が高い時、摩擦係数は 0.15 辺りの高摩擦に安定している。図に示した赤の初期エリアでの水分量を計算した。Figure. 2 に、横軸を初期なじみ過程での水分子数、縦軸をピン試験片比摩耗量としてまとめたものを示す。摩擦係数の結果と同様、比摩耗量も初期水分量によって二つのグループに分けられる。初期水分量が低い時、比摩耗量は $1.E-07$ 辺りで、初期水分量が高くなると、比摩耗量は $6.E-07$ 辺りの高摩耗まで上昇した。

試験後の PTFE 複合材ピン試験片表面のレーザー観察結果を Fig. 3 に示す。3D 画像の色は各成分の高さを示した。初期水分量が低い時、PTFE 複合

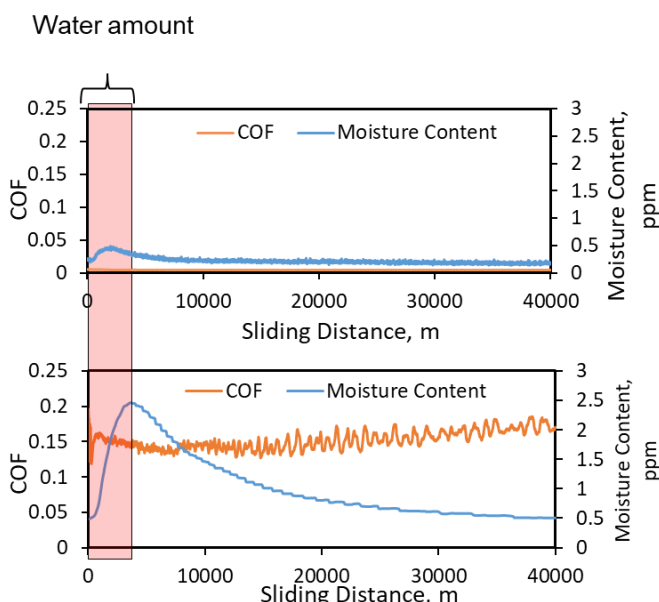


Fig.1. Variations of friction coefficient with sliding distance

材表面に平滑かつ連続なトライボ膜が形成されたに
対し、初期水分量が高くなると炭素繊維は複合材表
面から突出して一部の荷重を分担し、複合材表面は
粗くかつ不連続なトライボ膜に覆われた。

PTFE 複合材ピン試験片及びステンレス鋼ディスク
試験片表面を顕微ラマンで分析した結果、炭素を主
成分としたトライボ膜が検出された。また、ラマン
スペクトルから (900 cm^{-1} - 1900 cm^{-1}) の炭素面積強度を
計算した結果は Figure. 4 の左図に示した。PTFE 複合
材ピン試験片表面のトライボ膜に対して、低摩擦及
び高摩擦の時の炭素量は顕著な差は見られないの
ですが、ステンレス鋼ディスク試験片表面転移膜に
対して、初期水分量が低い低摩擦・低摩擦の時、ディ
スク表面は厚い炭素膜が形成された。一方、初期水分
量が高くなり、摩擦・摩擦も高い時、ディスク表面は
薄い炭素膜でしか検出されない。更に、トライボ膜
及び転移膜のラマンスペクトルから炭素の G/D を
計算した結果は Figure. 4 の右図に示した。摩擦・
摩擦が高い時と比べ、摩擦・摩擦が低い時の転移
膜に欠陥が少ないグラファイト構造の炭素膜が形成
され、トライボ膜の炭素構造は明確な差は見つ
かりませんでした。

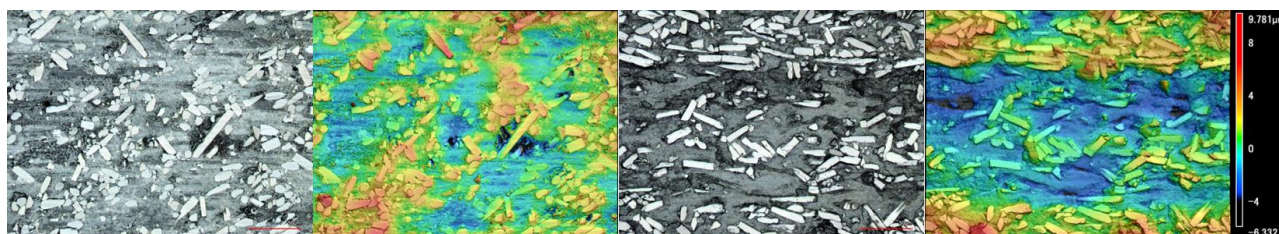


Fig.3. Laser and 3D images of worn surfaces of PTFE composites (left: at low friction and wear, right: at high friction and wear)

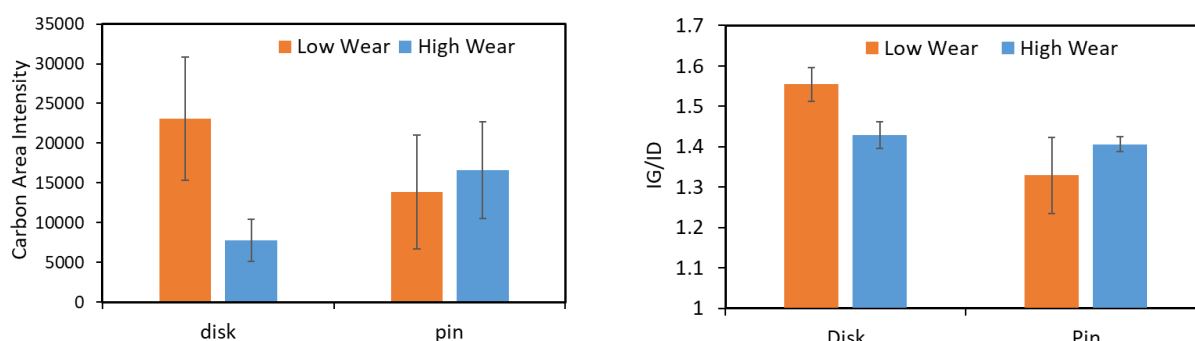


Fig.4. Comparison of area intensity of carbon and ratio of intensity of G-band to intensity of D-band between tribofilms at low wear and high wear(n=100)

以上より、初期水分が低い場合に得られる低摩擦・低摩擦は、ディスク表面に厚いかつ欠陥が少ないグラファイト
構造の炭素膜が形成され、表面間に働くファンデルワールス力を減少させ、低せん断強度を持つ界面が形成されたこ
とが一因と考えられる。

4. 結言

高面圧・乾燥水素ガス雰囲気において、PAN 系炭素繊維 20wt% 充てん PTFE とステンレス鋼 SUS440C のすべり試験を
行い、雰囲気中の微量水分が摩擦・摩擦特性およびトライボ膜の形成に及ぼす影響を調べた。摩擦面の分析結果から、
ディスク表面に形成された転移膜は初期水分量が変化するにつれて炭素膜の量と構造が変化し、その結果、異なる摩
擦・摩擦挙動が生じることが示唆された。

文献

- 1) Sawae Y, Morita T, Takeda K, Onitsuka S, Kaneuti J, Yamaguchi T, et al. Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas. Tribol Int 2021;157:106884. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106884>.
- 2) R. Umei, R. Taninoguchi, K. Sakaki, T. Morita, Y. Sawae, J. Sugimura, Effect of trace moisture content on low friction mechanism of carbon fiber filled PTFE, Proceedings of Asia Int Conf on Tri 2018, pp. 259-260, Sept 2018.
- 3) Q. Chen, T. Morita, Y. Sawae, K. Fukuda, J. Sugimura, Effects of trace moisture content on tribofilm formation, friction and wear of CF-filled PTFE in hydrogen. Tribology International 188 (2023) 108905.
- 4) Q. Chen, Doctor Thesis, Kyushu University, 2024.
- 5) M. Koga, Master Thesis, Kyushu University, 2020.