

高面圧・高純度水素雰囲気における炭素繊維充てん PTFE の低摩擦・低摩耗現象

Low friction and wear behaviors of CF-filled PTFE under high contact pressure in high-purity hydrogen 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) は優れた自己潤滑性能と高融点を持つため、その複合材料は水素ステーションのオイルフリーガス圧縮機のシール材として広く用いられている。特に、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トライボ膜の形成に影響を与えることも報告されている²⁻⁵⁾。一方、水素ステーションの高性能化を実現するために、更なる高圧ガス環境におけるピストンリングの耐久性向上が課題となる。従って、高面圧条件下のトライボ膜形成に対する、水素ガス雰囲気中の微量水分の影響を解明することが重要となる。

本研究では、高面圧・高純度水素ガス雰囲気中における微量水分が、PAN 系炭素繊維充てん PTFE のトライボロジー特性に及ぼす影響を調べることを目的とする。具体的に、雰囲気中の初期水分量を 0.2 ppm から 1.1 ppm の範囲で調整してすべり試験を行った。更に、試験後の PTFE 複合材表面のトライボ膜と相手面上の転移膜について、トポグラフィ観察および元素分析を行い、雰囲気中の水分がトライボ膜の形成に及ぼす影響を調査した。

2. 実験方法

本研究では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を行った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 の円柱型であり、ディスク試験片は外径 56mm、内径 20mm、厚み 3mm のリング状である。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。

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、光学顕微鏡により観察した後、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 46 nm での化学組成分布を求めた。

3. 実験結果

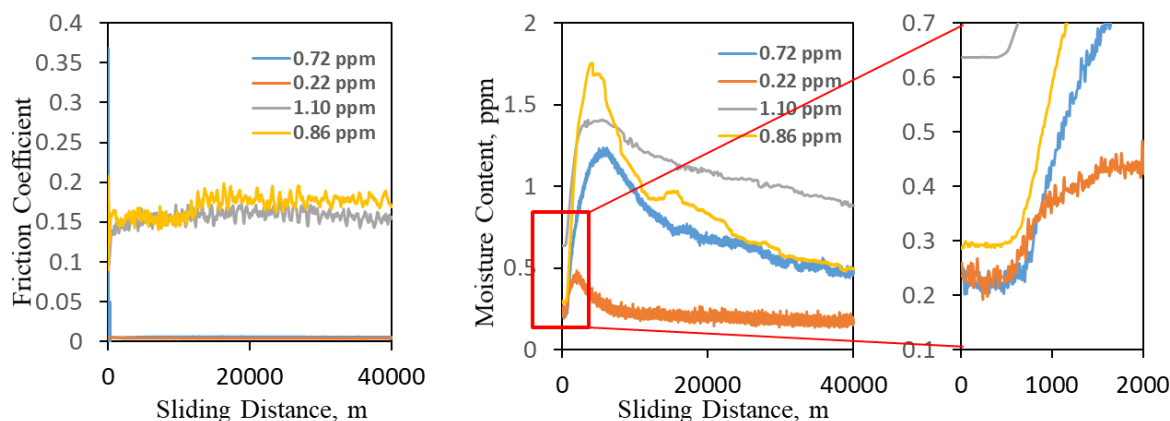


Fig.1. Variations of friction coefficient and moisture content with sliding distance

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てまとめたものを示す。Figure. 2 に、横軸を水素ガス雰囲気中の平均水分量、縦軸をピン試験片比摩耗量としてまとめたものを示す。全ての試験において、水素ガス中の水分量が多いほど、ピン試験片の比摩耗量は多くなる傾向が見られた。摩擦係数については、初期水分量

が 0.25 ppm 以下の時、非常に低い (0.01 以下) かつ安定な摩擦挙動が確認されたが、初期水分量が 0.25 ppm を超えた後、安定な高摩擦係数が示した。

試験後のステンレスディスク表面転移膜の XPS 分析結果を Fig. 3 に示す。PTFE 複合材由来の F 1s, C 1s, ステンレス鋼由来の Fe 2p_{3/2}, Cr 2p_{3/2} に O 1s を加えた合計 5 元素について深さ 46 nm までスペクトルを取得した。初期水分量が 0.25 ppm 以下の時、純鉄と純クロムのスペクトルが転移膜の深さ 46 nm で検出されたことに対し、初期水分量が 0.25 ppm を超えると金属酸化物のスペクトルしか検出されなかった。一方、初期水分量が 0.25 ppm 以下の時、酸素と炭素のスペクトルから炭酸化合物や PTFE 由来の成分が検出された。初期水分量が 0.25 ppm を超えると、それらの成分は転移膜の最表面にしか存在しなかった。また、フッ素のスペクトルから、初期水分量が 0.25 ppm を超えると転移膜の主成分がフッ化鉄になることを示された。

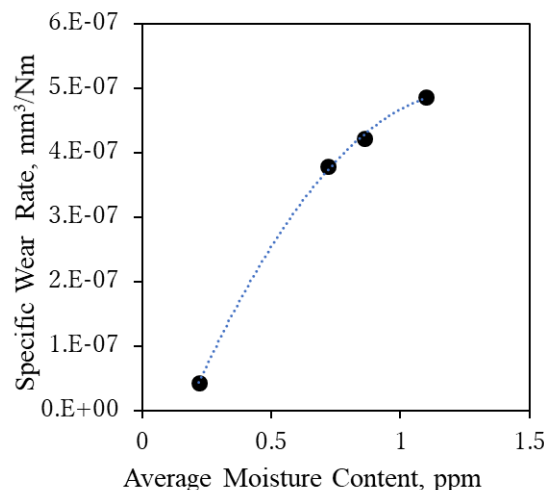


Fig.2. Plots of Specific wear rates against average moisture content

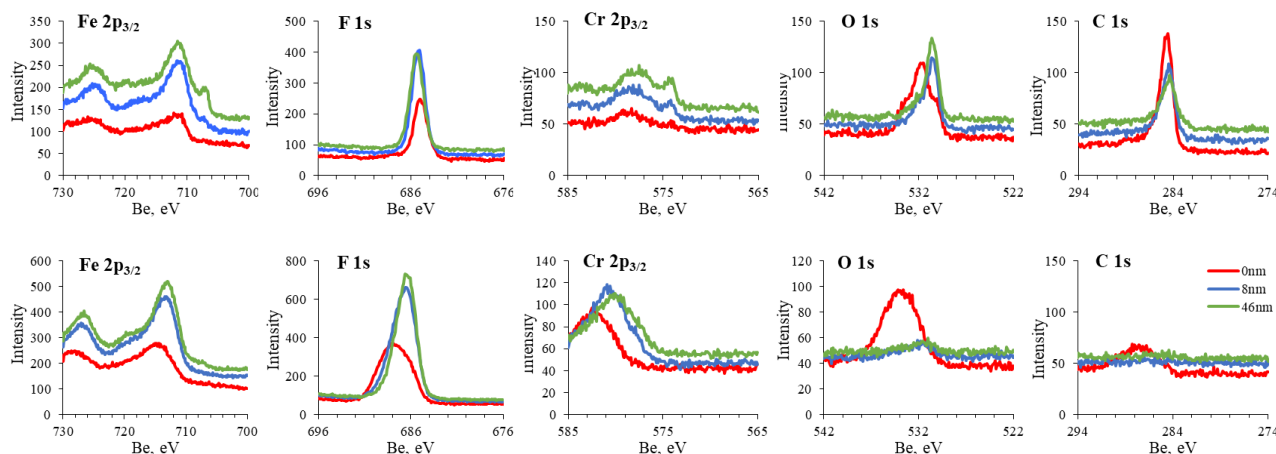


Fig.3. Xps spectra of transfer films formed atop disk surfaces (upper: at initial moisture content less than 0.25 ppm, down: at initial moisture content over 0.25 ppm)

以上より、初期水分 0.25 ppm 以下の場合に得られる低摩擦・低摩耗は、ディスク表面に厚い炭素膜が形成され、雰囲気中の水素が炭素膜表面の sp² 結合に起因する活性サイトに吸着することで、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。初期水分量が 0.25 ppm を超えると、接触界面での水分子と固体表面との衝突頻度が上昇し、トライボケミカル反応が促進され炭素膜の形成が阻害されると共に、PTFE の一部はステンレス鋼と直接接触する。その結果、摩擦が上昇することで接触界面温度が急上昇し、PTFE 複合材の機械的強度が落ちることで摩耗が増加したと考えられる。

4. 結言

高面圧・高純度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・摩耗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化学組成が変化し、その結果、異なる摩擦・摩耗挙動が生じることが示唆された。

文献

- 1) Y. Sawae, T. Morita, K. Takeda, S. Onitsuka, J. Kaneuti, T. Yamaguchi, et al. Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas. Tribol Int 2021; 157:106884.
- 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) K. Sakaki, Master Thesis, Kyushu University, 2020.