

樹脂複合材 - 金属間の摺動特性に対する各種水素雰囲気の影響

Effect of the hydrogen conditions on the tribological behavior  
between polymer composites and metal sliding pairs

九大（正）\*新盛弘法, BAM（非）Geraldine Theiler, 九大（正）李文肖, NOK（株）（正）青柳彩子,  
FTI（非）Emiel Dobbelaar, NOK（株）（正）本田重信, 九大（正）澤江義則  
Hironori Shinmori\*, Géraldine Theiler\*\*, Wenxiao Li\*, Ayako Aoyagi\*\*\*  
Emiel Dobbelaar\*\*\*\*, Shigenobu Honda\*\*\*, Yoshinori Sawae\*  
\*Kyushu University, \*\*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
\*\*\*NOK Corporation, \*\*\*\*Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG

1. はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、エネルギーとしての水素の利活用が注目されており、燃料電池自動車などのモビリティや都市発電への実装・普及が期待されている。しかしながら、常温常圧での水素のエネルギー密度は低く、十分なエネルギーを確保するために高圧圧縮もしくは極低温まで冷却し液化させ体積密度を増やす必要がある。そのためには圧縮機や冷却器など様々なインフラ設備が必要となり、それに伴うシールやピストンリングなどの機械要素も重要となる。圧縮機を例にみると、水素ガス純度の規制から自己潤滑性を有する PTFE 複合材がピストンリング材料として使用されているが、さらなる高機能化が求められる。Sawae らは種々の充てん材を添加した PTFE 複合材を、常圧の水素ガス・空気中にて摺動評価した<sup>(1)</sup>。その結果、充てん材、特に炭素繊維を添加することで顕著な摩耗の低減を確認した。また高圧水素ガス下では金属表面が還元されることにより、その上に形成される転移膜の組成が異なることが報告されている<sup>(2, 3)</sup>。さらに極低温の液化水素中でも、樹脂材料は常温水素ガスと異なるトライボロジー特性を示すことが報告されている<sup>(4)</sup>。このように、一言で“水素”と言ってもその状態によって大きくトライボロジー特性に影響を与える。本研究では、特に水素雰囲気の違いにより生じる樹脂複合材のトライボロジー挙動について、各種分析と通してメカニズムの探求を行った。

2. 試験方法

本研究では、各種チャンバーを有するピン・オン・ディスク型摩擦試験機にて試験を行った。ピン試験片を保持するアームに荷重を負荷し、ディスク試験片に取り付けられたモーターを回転させることで、一方向回転滑り試験を行った。水素雰囲気として、1. 大気圧 (0.1 MPa)・室温, 2. 大気圧・-150℃, 3. 大気圧・100℃, 4. 高圧 (40 MPa)・100℃, の4条件にて評価を行った。ピン試験片 (φ6 mm \* 15 mm) として、炭素繊維・ブロンズ充てん PTFE, 炭素繊維充てん PEEK (以下 PEEKa) と炭素繊維・PTFE 充てん PEEK (以下 PEEKb) の3種を用意した。相手面には、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L をディスク試験片 (直径 56 mm, 内径 20 mm, 厚さ 3 mm) として用いた。しゅう動条件は、滑り速度 0.25 または 0.5 m/s, 荷重 50.89 または 85 N (平均接触圧力 1.8, 3 MPa), 総滑り距離は 1800 m または 4500 m とした (Table. 1)。また比摩耗量の算出のために、試験前後で重量計測を行った。試験後の試験片に対し、顕微鏡観察, X 線光電子分光法 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS), ラマン分光分析, SEM-EDS などの各種観察・分析を行った。

Table 1 Experimental conditions

|   | Gas pressure, MPa | Temperature, °C | Sliding velocity, m/s | Contact pressure, MPa | Sliding distance, m |
|---|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 0.1               | RT              | 0.5                   | 3.0                   | 1800                |
| 2 | 0.1               | -150            | 0.5                   | 3.0                   | 1800                |
| 3 | 0.1               | 100             | 0.25                  | 1.8                   | 4500                |
| 4 | 40                | 100             | 0.25                  | 1.8                   | 4500                |

3. 結果および考察

摩擦試験の結果を Fig. 1 に示す。大気圧室温および低温条件の結果を比較すると、初期に一度低下しその後上昇する傾向が共通して確認された。しかしながら、低温条件では各樹脂材料で上昇し続ける傾向を示した。また大気圧・高温

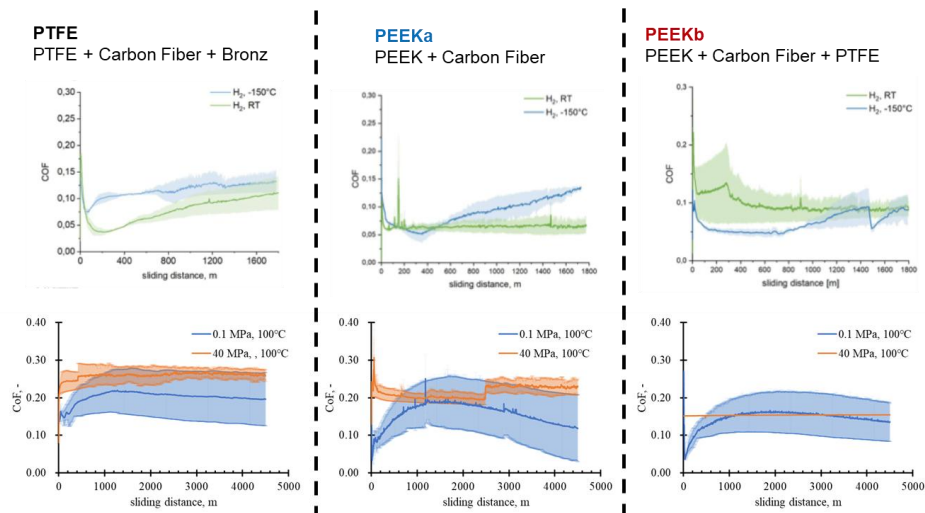


Fig. 1 Transition of friction coefficient

条件において、PEEKa,bで滑り距離1000m付近まで摩擦が増加し、その後は減少傾向が確認された。高圧・高温条件では開始後すぐに摩擦が増加するが、その後一定の摩擦係数で推移する傾向が、両試験片で確認された。摩擦係数の値としては、PEEKbがいずれの条件においても相対的に低い摩擦係数を示した。

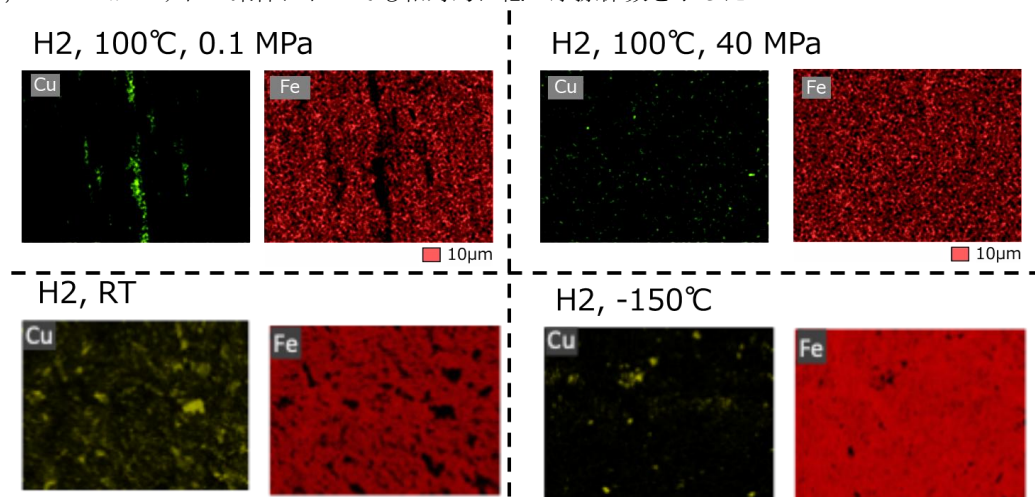


Fig. 2 SEM-EDS images on SUS316L tested against PTFE

Figure. 2に、試験後のディスク表面に関して、CuおよびFeについてのSEM-EDSの分析結果を示す。高圧水素雰囲気下では、金属ディスク表面に平滑な転移膜の形成が確認された。一方で、大気圧・高温条件では金属ディスクへのCuの移着が確認されたが、高圧条件ではCuの移着の抑制が見られた。これはピン側へのFeの移着に関しても同様の傾向が観察された。これらの結果は、高圧水素雰囲気において摩擦相手材間での金属元素の移動が抑制されること、および転移膜の安定化が促進される可能性を示唆している。さらに極低温の水素雰囲気下では、高圧条件と同様に金属ディスク表面に対するCu移着が抑制された。またラマン分光分析の結果から、高圧水素雰囲気下ではしゅう動により金属表面に付着した炭素がグラファイト化する傾向が顕著に見られた。一方、極低温水素雰囲気下では、炭素のグラファイト化は抑制された。これらの結果は、水素雰囲気の圧力および温度が炭素の構造変化、特にグラファイト構造への転移挙動に強く影響を与えることを示している。

#### 4. 結言

本研究では、各種水素雰囲気における樹脂複合材のしゅう動特性について、主に転移膜組成の観点から調査した。結果として、雰囲気ごとに異なる転移膜形成メカニズムが示唆された。水素の利活用の推進のためにも、さらなる知見の蓄積が必要である。本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST) 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP) グラント番号 JPMJSC2121 の支援を受けたものです。

#### 文献

- 1) Y. Sawae, et al., Tribology International, 157 (2021) 106884.
- 2) K. Nakashima, et al., Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. J: J. Eng. Tribology. 224 (2010) 285–292.
- 3) 新盛 弘法 他, トライボロジー会議 2024 春 東京, 2024.
- 4) G. Theiler, et al., Tribology Online, Vol. 18, No. 5 (2023) 218