

高純度水素雰囲気における樹脂複合材の摩擦・摩耗

Friction and wear of polymer composites in hydrogen

九大・工（正）*澤江 義則 九大・工（正）新盛 弘法 九大・工（正）森田 健敬 九大・工（学）何 悦
 九大・工（正）李 文肖 九大・工（正）陳 乾

Yoshinori Sawae*, Hironori Shinmori*, Takehiro Morita*, Yue He*, Wenxiao Li*, Qian Chen*

*Kyushu University

1. はじめに

燃料電池自動車（FCV, Fuel Cell Vehicle）と、それに高圧水素ガスを供給する水素ステーション（HRS, Hydrogen Refueling Station）内の機器では、自己潤滑性に優れる樹脂材料やその複合材が、しゅう動部材やシール部材として数多く使用されている。これは、FCV が使用する水素燃料への油脂の混入を避けるため、潤滑油やグリースによる潤滑が制限されているためである。FCV が搭載する固体高分子形燃料電池では、燃料極の触媒により水素がプロトンと電子に分解され、そのプロトンが固体高分子膜を通過し空気極側の酸素イオンと反応して水となるプロセスにより発電が行われる。しかし、燃料となる水素に特定の不純物が加わると、それが触媒や高分子膜に付着して触媒反応やプロトン移動を阻害し、電池の出力を低下させてしまう。このような不純物の影響は燃料電池の被毒と呼ばれる。潤滑油やグリースもその原因となる可能性があることから、水素ガスを昇圧する圧縮機やガスの流れを制御するバルブ類についても、直接水素ガスに触れながらしゅう動する部分への使用が避けられている¹⁾。

FCV 用水素燃料の品質を定めた ISO14687 では、水素に含まれる不純物の濃度について、成分ごとに許容値が厳格に規定されている²⁾。水や酸素も制限の対象に含まれ、それぞれ濃度を 5 ppm 以下とすることが求められている。これは相対湿度に換算すると 0.1% 以下であり、つまり FCV や HRS で使用される樹脂しゅう動部材は、極めて乾燥した高純度水素の中で使用されることとなる。しかし、例えばしゅう動部材に使用される代表的な樹脂材料である四フッ化エチレン（PTFE, Polytetrafluoroethylene）の場合、しゅう動相手面上への転移膜形成に周囲の水分子が関与しており、その摩擦・摩耗が雰囲気湿度の影響を強く受けることが報告されている³⁾。そのため、水をほとんど含まない高純度水素雰囲気でのしゅう動用途に適した材質を選定するにあたっては、水素そのものが摩擦・摩耗に与える影響に加え、水や酸素が少ないことの影響についても理解することが望まれる。

本研究では、水分濃度を ppm レベルで調整した高純度水素雰囲気において、樹脂複合材の摩擦・摩耗特性を実験的に評価すると共に、実験後の試験片表面の分析結果から、摩擦・摩耗に対する高純度水素の影響について探究した。

2. 実験装置及び実験方法

高純度水素ガス雰囲気におけるしゅう動試験には、環境制御用チャンバー内にピン・オン・ディスク型トライボ試験機を設置した高度雰囲気制御摩擦試験機を使用した。試験機の概要を Fig.1 に示す。環境制御用チャンバーは真空排気機構とベーキング機構を備えており、水素ガスを充てんする前にチャンバー内を 10^{-4} Pa 程度まで真空排気し、必要に応じてベーキングを行うことで、チャンバー内に高純度の水素ガス雰囲気を形成した。またガス供給配管にフィルターと精密加湿器からなる微量水分調整機構を設置し、チャンバーに充てんする水素ガスの水分量を調整することで、雰囲気中の水分濃度を 1 ppm 以下から 40 ppm 程度まで設定可能とした。試験中の水素雰囲気の水分濃度は、排気される水素の水分量を排気配管に設置した精密水分計により測定し評価した。

各種樹脂複合材より直径 6 mm、長さ 15 mm のピン試験片を作成し、外径 56 mm、厚さ 3 mm の金属ディスク試験片を相手面としたしゅう動試験を行った。ピン試験片表面は旋削仕上げとし、ディスク試験片表面は、表面粗さ $R_a=0.05$ 程度となるよう、耐水ペーパーにより研磨した。梃子を介して荷重錘によりピン試験片に荷重を負荷し、サーボモータによりディスク試験片を一定速度で回転させることでしゅう動試験を行った。試験中はディスク試験片表面近傍の温度を熱電対により計測しながら、ヒーターにより設定した温度に調整した。

試験片間に生じる摩擦係数は、ピン試験片基部に設置した二軸ロードセルの出力から評価した。樹脂ピンおよび金属ディスクの摩耗量は、試験前後の重量を精密電子天秤により測定し、その差分により定量した。またしゅう動中のピン/ディスク接触界面近傍から採取した雰囲気ガスをガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS）に送り、しゅう動界面から雰囲気中に排出される分解ガス成分の分析も可能とした。試験後の試験片表面については、各種顕微

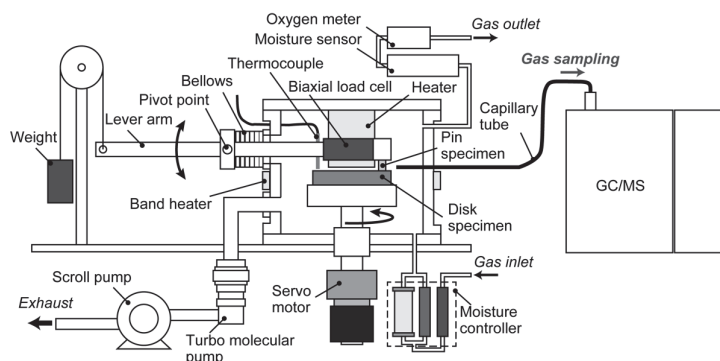


Fig.1 Pin-on-disk tribometer installed in environmental control chamber

鏡による形態観察に加え、X線光電子分光法（XPS）をはじめとする各種化学組成分析を行った。

3. 結果および考察

ここでは実験結果の一例として、ポリエーテルエーテルケトン（PEEK, Polyetheretherketone）に炭素繊維と PTFE を 10 vol% 充てんした PEEK 複合材のしゅう動試験結果を示す。しゅう動相手面には鋳鉄（FC250）を使用し、平均接触面圧を 4 MPa、滑り速度を 2 m/s、ディスク表面近傍温度を 150℃ とした。1 回のしゅう動試験の総滑り距離は 60 km とし、滑り距離 30

km と 60 km にて摩耗量を計測した。水分濃度を 5 ppm 以下に調整した水素中における試験を 3 回繰り返し、再現性を確認すると共に、同様に水分濃度を 5 ppm 以下に調整した窒素、および大

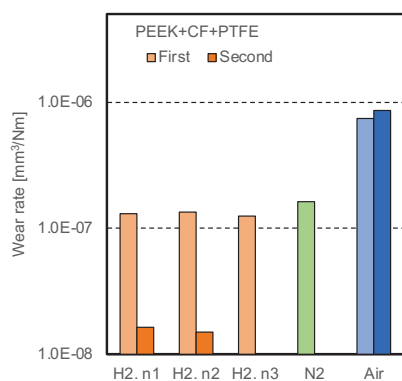


Fig.2 Comparison of specific wear rate

気中においても 1 回ずつ試験を行い、水素と結果を比較した。

Fig.2 に比摩耗量の比較を示す。3 回の水素中での試験では同程度の比摩耗量が得られており、良い再現性が得られた。水素中の比摩耗量は大気中と比較し著しく小さいものの、窒素中とは同等となった。最初の滑り距離 30 km での摩擦係数の変化を Fig.3 に示す。水素中では摩擦挙動についても良い再現性が得られたため、代表的な 1 例のみを示した。比摩耗量では水素と窒素の間に大きな差異は認められなかったが、摩擦挙動は水素と窒素とで大きく異なっており、水素中での摩擦係数は窒素中と比較し著しく低かった。

ディスク試験片表面に形成された摺動痕の XPS 分析結果を Fig.4 に示す。大気中で形成された摺動痕から得られた鉄と酸素のスペクトルには、酸化鉄のピークのみが強く表れているが、窒素中の摺動痕では、鉄のスペクトルに純鉄由来のピークも認められた。これは、摩耗によりディスク表面から酸化物の一部が除去されたが、窒素が 5 ppm 以下の水分しか含んでいなかったため、酸化物の再形成が制限された結果と考えられる。水素中の摺動痕では、鉄のスペクトルにおいて酸化鉄由来のピークが減衰し、純鉄由来のピークが支配的になるとともに、酸素の信号強度が著しく小さくなった。これは、低水分による酸化物の再形成不全に加え、水素による還元作用により酸化物の一部が還元されたことを示している。純鉄成分が増加したことで金属表面に炭素が強固に移着し、炭素を主成分とする転移膜が形成されたことで、他の雰囲気と比較し低摩擦が得られたと考えられる。

4. まとめ

水分濃度が 5 ppm 程度の高純度水素雰囲気では、水素による還元作用に加え、酸化物の再形成も困難となることから、樹脂複合材のしゅう動相手面である金属表面から酸化物が減少し、純金属成分の割合が増加した。金属表面の化学組成変化は、樹脂からの転移膜形成に顕著な影響を及ぼし、ひいては樹脂複合材の摩擦・摩耗に変化をもたらすことが示された。

文献

- 1) 三浦・兼井・伊藤・福田：トライボロジスト，67，6 (2022) 411.
- 2) ISO 14687:2025 (2025).
- 3) K.L. CAMPBELL, et al.: Macromolecules, 52 (2019) 5268.

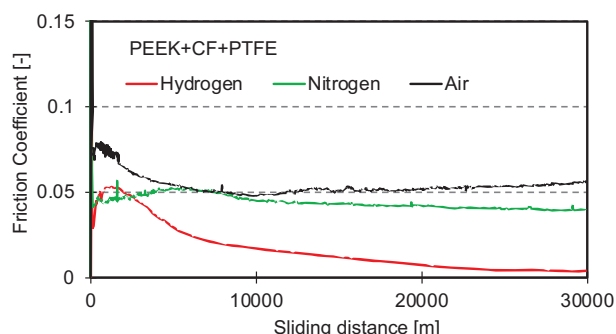


Fig.3 Transition of friction coefficient during initial 30 km sliding

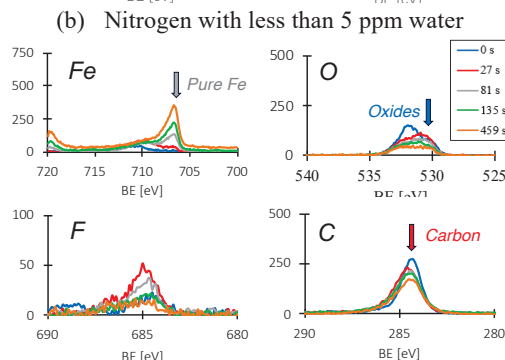
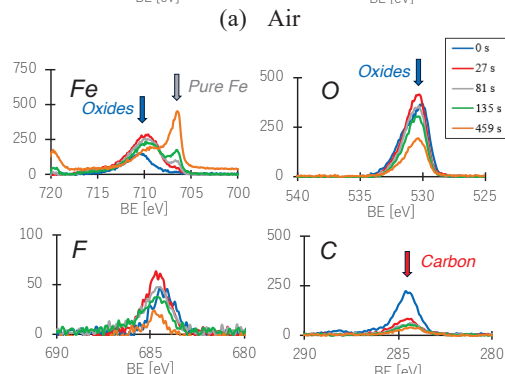
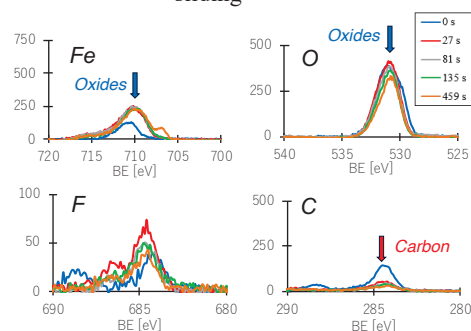


Fig.4 Comparison of XPS spectra obtained from sliding track formed on disk specimens