

# 高純度水素ガス雰囲気における樹脂複合材のトライボロジー特性に対するしゅう動相手材料の影響

Influence of the counter surface materials on the tribological property of polymer composites in high purity hydrogen gas atmosphere

九大（正）\*新盛 弘法, NOK（株）（正）橋本 光, 九大（正）森田 健敬  
 NOK（株）（正）青柳 彩子, NOK（株）（正）本田 重信 九大（正）澤江 義則  
 Hironori Shinmori\*, Hikaru Hashimoto\*\*, Takehiro Morita\*  
 Ayako Aoyagi\*\*, Shigenobu Honda\*\*, Yoshinori Sawae\*  
 \*Kyushu University, \*\*NOK Corporation

## 1. 緒言

水素エネルギーと燃料電池自動車（FCV）は、化石燃料に代わるクリーンエネルギー源およびその実用として注目されている。これらの普及には水素ステーションなどのインフラ設備の整備・普及が不可欠である。特に水素ステーションで用いられる水素ガス圧縮機は、高圧水素ガスへの曝露、断熱圧縮による高温環境、高速度でのしゅう動など厳しい条件・環境で運転している（1）。さらに、FCVで使用される高圧水素ガスの品質はISO規格で厳格に管理されており、上記の運動条件をオイル・グリースなしで潤滑せねばならない。そのため、水素ガス圧縮機内のピストンリングには自己潤滑性を持つポリテトラフルオロエチレン（Poly Tetra Fluoro Ethylene, PTFE）の複合材が採用されている。しかし、過酷な条件下ではピストンリングの摩耗が課題となっており、メンテナンスコスト削減のためにはさらなる高強度化と高機能化が求められている。加えて、トライボロジー特性はシステム応答であるため、相手材料の影響も理解が必要であるが、水素雰囲気での知見はいまだ乏しい。本研究では、機械的強度がより高いポリエーテルエーテルケトン（Poly Ether Ether Ketone, PEEK）複合材に着目し、水素雰囲気下でのしゅう動における相手材の影響を調査することで、次世代の高性能材料の開発を目指す。

## 2. 試験方法

本研究では、高度雰囲気制御チャンバを有するピン・オン・ディスク摩擦・摩耗試験機を用いて、高純度水素雰囲気中でのしゅう動試験を行った。本装置はガス導入部に脱酸カラムと水分フィルターを設置することにより、水分量 1 ppm 以下の超高純度雰囲気を再現することができる。ピン試験片には炭素繊維およびグラファイトを充てんした PEEK 複合材を、ディスク試験片にはオーステナイト系ステンレス鋼である SUS316L とマルテンサイト系ステンレス鋼である SUS440C を用いた。ピン・ディスク試験片のビッカース硬度を計測した結果、PEEK は 50HV、SUS316L は 194HV、SUS440C は 753HV となった。なおディスク試験片については、表面粗さ  $Ra=0.05\ \mu\text{m}$  程度となるように実験前に調整した。試験条件としては、試験片近傍温度を  $100^{\circ}\text{C}$ 、平均接触面圧を 2 MPa、滑り速度を 1 m/s、滑り距離 10000 m とした。これらの条件はレシプロ式高圧水素ガス圧縮機に用いられるピストンリング材のしゅう動環境を参考に選定した。摩耗評価として、試験前後の重量差を計測し、比摩耗量 ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ) を算出し比較を行った。また実験後の試験片に対し、顕微鏡による表面観察とラマン分光装置を用いた表面分析を行った。

## 3. 結果および考察

Figure. 1 に、摩擦係数の推移の結果を示す。両ディスク材料ともに摩擦係数 0.1 以下の低い値が共通して確認され

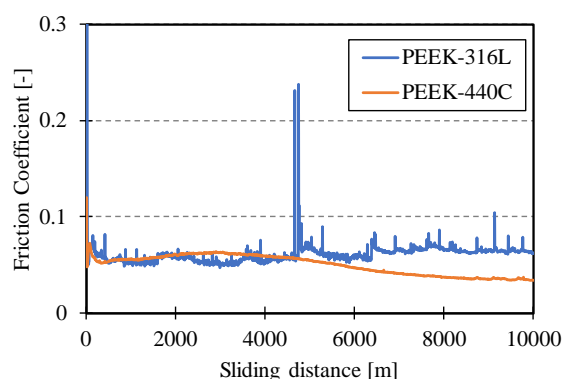


Fig. 1 Test results of transition of friction coefficient

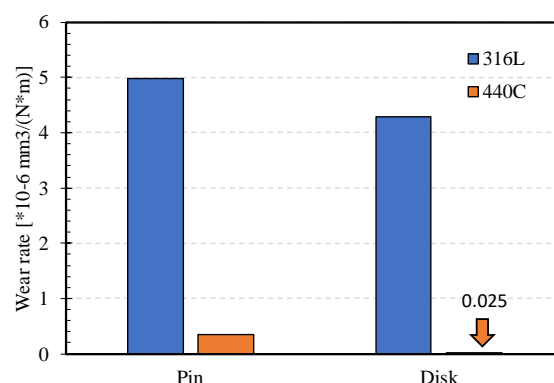


Fig. 2 Wear rate of each specimen

た．しかしながら，SUS316L を相手材に用いた場合，瞬間的に値が増大する不安定な挙動が見られ，最大で摩擦係数が 0.2 を超える挙動も見られた．一方で，SUS440C を用いた場合，安定な推移が確認された．加えて，試験終盤を比較すると，SUS440C はさらに減少する傾向が見られた．

Figure. 2 に，ピン試験片とディスク試験片の比摩耗量をそれぞれ示す．SUS316L と SUS440C を比較した場合，SUS316L ディスクを相手材としたピン試験片の比摩耗量が SUS440C よりも約 15 倍大きい値を示した．加えて，ディスク自体の摩耗に着目すると，SUS316L ディスク試験片の比摩耗量は，同条件の SUS440C ディスク試験片と比較して

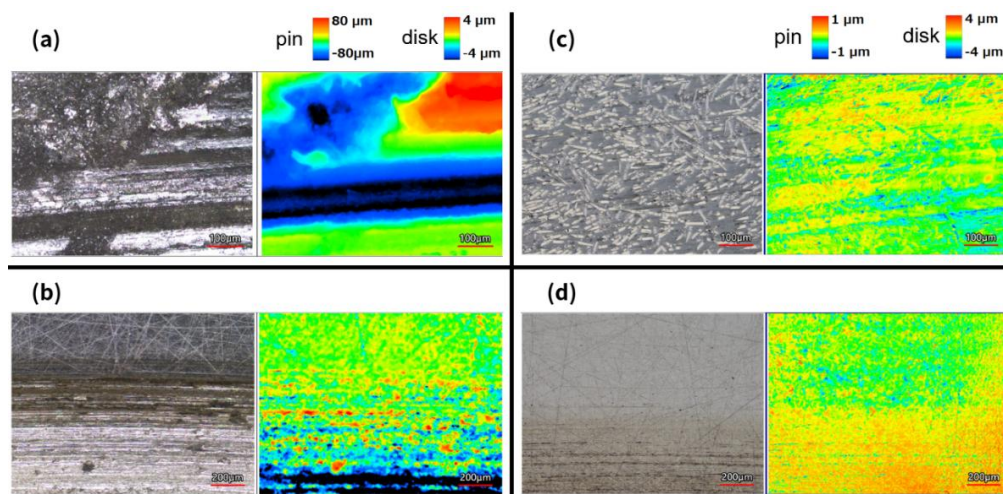


Fig. 3 Surface images by Laser confocal microscope.

(a) Pin with SUS316L (b) Disk with SUS316L, (c) Disk with SUS440C and (d) Disk with SUS440C.

約 170 倍大きい値となった．

試験後の表面観察の結果を Fig. 3 に示す．SUS316L を用いた場合，ピンおよびディスク両表面で激しい摩耗痕が確認された．特にピン表面では，ディスク由来と思われる金属摩耗粉も確認された．一方で，SUS440C を用いた場合，ディスク表面に均一な転移膜が確認された．さらにピン表面では SUS316L のような摩耗は確認されず，代わりに充てん材が形を保った状態で観察された．ラマン分光分析を行った結果，sp<sup>2</sup> 構造に由来する 1580cm<sup>-1</sup> 付近の G バンドが強くシャープに検出されたことから，ディスク表面で確認された転移膜は炭素ベースであることがわかる．この炭素膜の移着および成長過程が摩擦挙動として現れることが報告されている（3）．本研究でも，SUS440C の摩擦挙動は後半からわずかが減少傾向を示している．加えて，ピン表面では充てん材であるグラファイト由来のピークが確認された．このことから，SUS440C 上で炭素膜が十分に形成されかつピン表面でも炭素繊維およびグラファイトが露出した結果，炭素－炭素間のしゅう動となり，低摩擦・低摩耗を示したと考えられる．一方，SUS316L 試験のピン表面にはグラファイトは見られず，前述の通り金属摩耗粉が複数確認できた．硬度に着目すると，SUS440C に比べ SUS316L は低く，相手材である PEEK に近い値となっている．これらのことから，硬度差が低いしゅう動相手材では，樹脂複合材が相手材料に対して攻撃的にふるまい，金属摩耗粉が生成されたと考えられる．この金属摩耗粉がピン・ディスク間で不規則な離脱と移着を繰り返すことで，SUS440C のような転移膜形成を阻害し，不安定な挙動およびシビア摩耗を引き起こしたと考えられる．

#### 4. 結言

水素雰囲気における炭素繊維充てん PEEK 複合材の摩耗特性に対し，しゅう動相手材がどのような影響を及ぼすのかを実験および各種分析にて評価した．結果として，SUS440C は均一な炭素転移膜の形成およびピン表面での充てん材の効果により，低く安定した摩擦係数と低摩耗が確認された．一方，SUS316L は金属ディスクが摩耗し，発生した金属摩耗粉によるアブレシブ摩耗および不安定な摩擦係数の挙動が確認された．これらの要因として，しゅう動材料間の硬度の違いが示唆された．

#### 文献

- 1) Yoshinori Sawae, “Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas”, *Tribology International*, Vol. 157 (2021), 106884.
- 2) Géraldine Theiler, Thomas Gradt, “Influence of counterface and environment on the tribological behaviour of polymer materials”, *Polymer Testing*, Vol. 93, January (2021), 106912.
- 3) 新盛弘法 他，トライボロジー会議 2024 春 東京，2024.