

水素環境下における PEEK 樹脂の長距離摺動特性（第 1 報）

Friction and Wear of PEEK Composites on Long Distance Sliding in Hydrogen Environment (first report)

神戸製鋼所（正）*兼井 直史，神戸製鋼所（非）稲岡 雄二，九州大学（正）澤江 義則，九州大学（正）陳 乾

Naofumi Kanei*, Yuji Inaoka*, Yoshinori Sawae**, Qian Chen**

*Kobe Steel, LTD, **Kyushu University

1. はじめに

カーボンニュートラル社会に向け、各国で様々な取り組みがなされている。その中で、水素は CO₂ 削減が困難な Hard to abate な領域で化石燃料からの代替エネルギーとして期待されている。水素社会に向け、取り組みが進んでいる分野の 1 つに Mobility の分野があり、燃料電池を搭載した乗用車（FCEV）はその代表例である。FCEV は 70MPa の高圧水素をタンクに充填し、その水素を供給する水素ステーションでは 70～90MPa に水素が圧縮される。

水素ステーションの水素圧縮にはレシプロ型ピストンリング式圧縮機が多く採用されている。この圧縮機のピストンリングは金属製のシリンダやシリンダライナの内壁に沿って往復摺動し、その材料は PTFE や PEEK, PI をベースとした複合材が用いられている¹⁾。また、圧力帯により使用する材料が使い分けられ、20MPa 以下においては実績あるものの最終段の 82MPa（日本の場合）への圧縮のために使用するピストンリングは更なる改良が必要とされている¹⁾。

圧縮機のピストンリング摺動距離を考慮すると、これまでの研究の多くは比較的短い摺動距離での評価となっている²⁻⁶⁾。そこで、本研究では水素環境における長距離摺動を実施し、各距離における摩擦・摩耗特性を調査した。

2. 実験材料と方法

樹脂材料は水素ステーション用圧縮機のピストンリング材料として実績のある NTN 製ベアリー-PK5303 を使用する。ベアリー-PK5303 は PEEK を基材に固体潤滑剤やカーボンファイバー（CF）等を配合した複合材で、高圧水素環境における標準摺動部材である。ベアリー-PK5303 の機械的特性を表 1 に示す。また、相手材となる金属材料は、日本産業規格（JIS）G4311 で規定されている SUH660 を使用した。摺動試験はピンオンディスク摺動試験機を用いて水素雰囲気下で実施した。ピン試験片は、φ5mm 長さ 10mm、摺動面の表面粗さは Ra=0.4μm とし、表 1 に示す材料を用いて製作した。SUH660 ディスクは、φ55mm、厚み 5.0mm、摺動面の表面粗さ Ra=0.2μm とした。試験中は 100 sccm の水素ガス（純度 99.999%以上）をチャンバに流し、チャンバ内の圧力は 0.12 MPa、ディスクの回転速度を 4.2 m/s、ピン試験片の初期平均接触圧力が 8.7 MPa の条件で試験を実施した。

Table 1 Test material of sliding tests

Item	Value	Note
Specific Gravity	1.50	ASTM D792
Tensile Strength, MPa	55	ASTM D638
Elongation, %	2.8	ASTM D638
Bending Strength, MPa	100	ASTM D790
Rockwell Hardness, R scale	114	ASTM D785

3. 実験結果と考察

摺動試験結果を Fig. 1 に示す。本試験条件における摩耗特性は 3 つの領域に分けられる。40km までは摺動距離とともに摩耗量が増加し、比摩耗量は大きく減少する（領域 A）。40km～120km までは摺動距離に関わらず摩耗量は概ね同じ値となり、比摩耗量の減少は領域 A よりもなだらかになる（領域 B）。その後、120km 以降では摺動距離とともに摩耗量は増えるが、比摩耗量は概ね一定の値となる（領域 C）。

ピン試験片の摺動面を顕微鏡で観察した結果を Table 2 に示す。5km 摺動後（領域 A）のピン摺動面では長い CF が他より多く、CF が引きずられたような溝があることが確認された。85km 摺動後になると 5km で確認された長い CF は少なくなり、多くの CF は折損していることが確認され CF としては分散した状態のように見える（領域 B）。また、CF の周りの樹脂が脱離している箇所や CF が脱離したと考えられる形跡が確認された。さらに、領域 C の 285km 摺動後では CF はさらに小さく砕かれ、全体的に細かな CF が分散しているように見える。また、85km 時と同様に CF の脱離と思われる箇所も確認され、CF の数が減少しているように見え、樹脂部分に摺動キズが確認された。

Table 2 と Fig. 2 の結果を考慮すると、摩擦・摩耗の観点からは CF がある程度の大きさに砕け摺動面全体に分散した状態が保たれ CF が摺動を支えるようになると、摺動距離によらず摩耗量が概ね一定となる可能性がある。さらに摺動し、CF の離脱が多くなると、ベース樹脂と相手材が接触し、摺動距離とともにベース樹脂も摩耗すると推察される。

ディスク側摺動面に形成された転移膜をラマン分析した結果、摺動距離とともに G-band 半値幅は減少し、G-band 波数が増加する傾向が確認された。その影響は 70km までが大きく、以降への影響は小さいと考えられる結果が得られ

た (Fig. 7, 8) . グラファイト構造 (sp² 結合) の完全性の低下 (非晶質化) により G-band 半値幅は増加するため, 摺動距離が短い方が転移膜は非晶質となっていると推察される. また, G-band 波数は sp² 結合の非晶質化にともなって 1580 cm⁻¹ から高波数シフトするが, さらに非晶質化が進むと逆に低波数シフトすることもある⁷⁾. 今回の結果が後者の範囲であると考えれば, 前述の G-band 半値幅から推測される現象と矛盾しない.

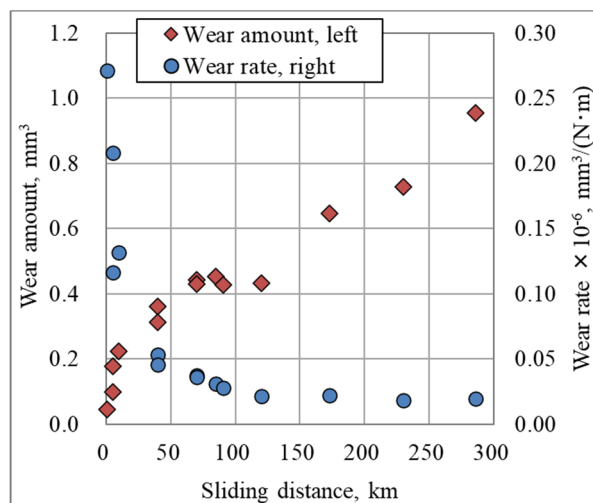


Fig. 1 The relationship between sliding distance and wear amount, wear rate.

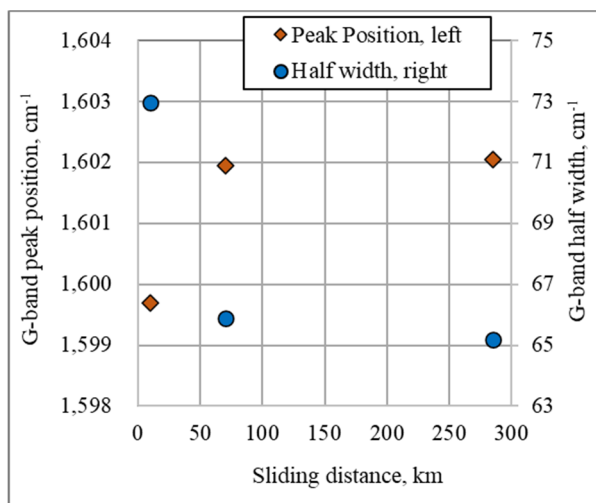
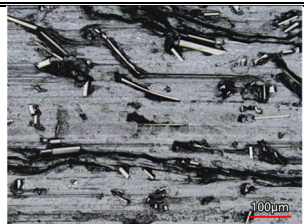
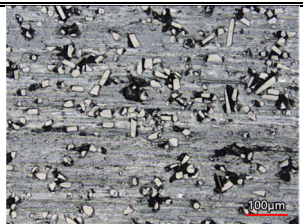
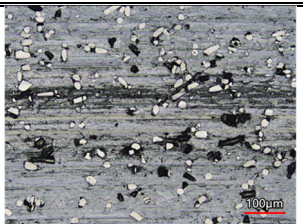


Fig. 2 The results of Raman analysis, G-band half-width and G-band peak position.

Table 2 Sliding surface of the pin specimen after sliding tests.

Sliding distance	5km	85km	285km
Region	A	B	C
Micrograph			

4. 結果

ベアリーPK5303 を用いて, 長距離摺動における摩擦・摩耗特性の変化を調査し, 次の結果を得た.

- ① 本試験条件における摩擦・摩耗は, 摺動距離とともに摩耗量が増加し, 比摩耗量は大きく減少する領域 A, 摺動距離に関わらず摩耗量は概ね同じ値, 比摩耗量の減少は領域 A よりもなだらかになる領域 B, 摺動距離とともに摩耗量は増えるが, 比摩耗量は概ね一定の値となる領域 C, の3つに分けられた.
- ② 試験後のピン摺動面は, 領域 A では CF 長さが長い状態で保持できているものが多いが, 一部は CF が引きずられたような跡が確認された. 領域 B では CF は折損し小さくなり, 分散しているように見える. また, CF の周りの樹脂や CF 自体が脱離したと考えられる形跡が確認された. 領域 C では CF はさらに小さく砕かれ, 領域 B 同様に CF の脱離と思われる箇所も確認され, その数は増加した.
- ③ 摺動距離とともに, 形成される転移膜の G-band 半値幅は減少し, ピークの波数は上昇するが, 領域 B, C ではその影響は小さい. この結果より, 転移膜のカーボン層は摺動距離とともにグラファイトの構造化が進んでいる可能性が示唆された.

参考文献

- 1) 兼井: 高圧水素供給分野における圧縮技術動向, 第 294 回ゴム技術シンポジウム, (2024).
- 2) Y. Sawae, T. Morita, K. Takeda, et al.: Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas, Tribol. Int., 157(2021).
- 3) Q. Chen, T. Morita, Y. Sawae, et al.: Effects of trace moisture content of tribofilm formation, friction and wear of CF-filled PTFE in hydrogen, Tribol. Int., 188(2023).
- 4) G. K. Friedrich, Z.P. Lu: On sliding friction and wear of PEEK and its composites, Wear, 1995(181-183)624-631.
- 5) G. Theiler, T. Gradt: Environmental effects on the sliding behaviour of PEEK composites, Wear, 368-369(2016)278.
- 6) I. Sivebaek, M. Hintze, N. Eliassen: Wear and friction of PEEK composites, dry or lubricated, Wear, 2023
- 7) A.C. Ferrari, J. Robertson: Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. Physical Review B, 61(2000)14095.