

## 鋼材と接触する PA66 製しゅう動部品の耐摩耗性に関する研究 第 1 報: 繊維種の影響

Effect of fiber type on the wear resistance of PA66 sliding parts in contact with steel

ジェイテクト (正) \*国島 武史 ジェイテクト (正) \*長井 康晴 LTDS (非) \*\*Vincent Fridrici

LTDS (非) \*\*Philippe Kapsa

Takeshi Kunishima\*, Yasuharu Nagai\*, Vincent Fridrici\*\*, Philippe Kapsa\*\*

\*JTEKT CORPORATION, \*\* Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes

## 1. はじめに

近年、自動車の軽量化および静粛性向上の要求から、樹脂製のしゅう動部品が増加している。特に、PA66 は優れた機械的特性および耐熱性を有し、樹脂歯車をはじめとする自動車の機構部品に広く使用されている。PA66 にガラス繊維(GF)や炭素繊維(CF)といった強化繊維を配合することによって、強度や剛性を向上することが可能である。一般に、これら樹脂材料は自己潤滑性を有するため、無潤滑下での使用を想定されることが多い。しかしながら、電動パワーステアリングのウォーム減速機における、樹脂製ウォームホイールと鋼製ウォームシャフトの噛み合いのような 100 MPa を超える高面圧条件においては、しゅう動発熱の低減を目的としてグリース潤滑下において使用されることがある。繊維強化 PA66 の耐摩耗性に及ぼす繊維種の影響に関しては、相手材鋼への攻撃性の違いを含め過去に研究がなされているが、グリース潤滑下における研究例は少ない。そこで本研究では、樹脂製しゅう動部品の小型・軽量化要求を満足する材料組成設計の指針を得るため、グリース潤滑下において鋼としゅう動する、異なる繊維を用いた繊維強化 PA66 のトライボロジー特性を評価し、無潤滑下におけるトライボロジー特性との比較を行った。

## 2. 試験手法

## 2.1 評価材料

樹脂材料としては市販の非強化 PA66、GF および CF でそれぞれ強化した PA66 を用いた。Table 1 に各材料の組成および常温のヤング率を示す。鋼材は熱処理を行っていない S45C を用いた。潤滑剤としては、樹脂製しゅう動部品の潤滑剤として多用されている、ウレアグリースを用いた。

## 2.2 摩擦摩耗試験

固定された 4 本の鋼製の円筒試験片の側面に、樹脂リングを接触させて一方方向に回転しゅう動する摩擦摩耗試験を、無潤滑およびグリース潤滑下において実施した<sup>2)</sup>。Figure 1 に本試験の接触形態を示す。また Table 2 に試験条件を示す。本試験では、過度の昇温を避けるため、10 s 駆動させた後に 1 s 停止する間欠運転とした。樹脂試験片の摩耗と塑性変形は、試験前後の重量および高さ変化を測定することにより切り分けて評価した。一方、鋼の摩耗は、光干渉法で試験後の表面形態を観察し、4 本の円筒試験片の摩耗体積を合計することで、摩耗量を算出した。試験では、摩擦力、垂直方向の変位、および相手材鋼のしゅう動面近傍の温度を測定した。

Table 1 Composition and properties of specimens.

| No. | Polymer | Fiber type and fraction | Young's modulus |
|-----|---------|-------------------------|-----------------|
| 1   | PA66    | -                       | 3.0 GPa         |
| 2   | PA66    | GF 15 wt%               | 5.9 GPa         |
| 3   | PA66    | CF 10 wt%               | 9.5 GPa         |
| 4   | PA66    | GF 33 wt%               | 10.7 GPa        |

Table 2 Test conditions for the sliding tests.

|                         |                    |  |
|-------------------------|--------------------|--|
| PA66 ring specimen      | Outer diameter     | 25.6 mm                                |
|                         | Inner diameter     | 20 mm                                  |
|                         | Height             | 12 mm                                  |
| Steel cylinder          | Diameter           | 3.5 mm                                 |
|                         | Length             | 30 mm                                  |
| Rotation speed          |                    | 790 rpm                                |
| Sliding speed           |                    | 1 m/s                                  |
| Normal load             | Dry condition      | 120 N                                  |
|                         | Grease lubrication | 350 N                                  |
| Environment temperature |                    | RT                                     |
| Total sliding cycles    |                    | 7,575-61,500<br>(Intermittent contact) |

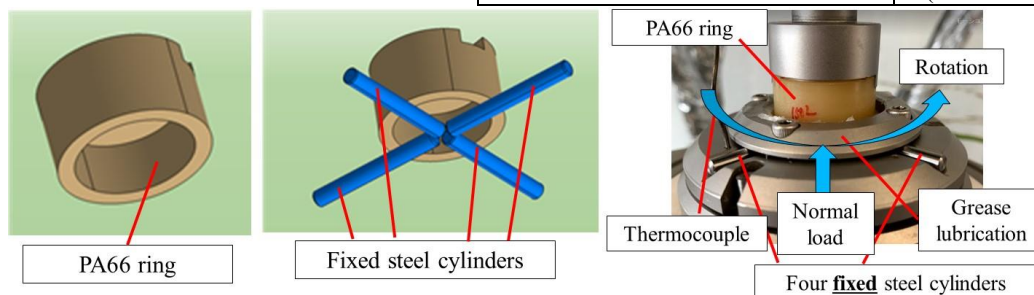


Fig. 1 Schematics of the test specimens and sliding test setup.

### 3. 試験結果

#### 3.1 無潤滑下におけるトライボロジー特性

Figure 2 に無潤滑下における、 $\mu$ , 温度, および変位の推移を示す. 非強化 PA66 は,  $\mu$  および温度が繊維強化材と比較して高い値を示し, 変位に関しては時間と共に比例的な増加が認められた. 一方, 繊維強化材では, GF 強化材の  $\mu$  は CF 強化材と比較し 20-30% 高い値であり, 温度も高い値を示した. またいずれも初期の変位増加は抑制されたが, GF 材では 22,000 cycles で急激な変形が認められた. これに対し CF 材では, 摩擦に起因する変位の僅かな増加は確認されたが, GF 材のような急激な変化は認められなかった. 強化材と組み合わせた試験後の鋼には, PA66 および繊維に由来する元素を含む移着膜の形成が認められたことから, 無潤滑下における樹脂の摩耗は凝着摩耗であると推察した. 繊維強化材では, 鋼と樹脂との接触面積が減少するため, 凝着も大きく低減すると考える. 特に CF は, グラファイト構造の c 軸に垂直な平面が繊維軸に対して平行に並んだ黒鉛化炭素であり, 潤滑作用に優れるため, GF 強化材と比較し優れたトライボロジー特性が得られたと考える<sup>1)</sup>.

#### 3.2 グリース潤滑下におけるトライボロジー特性

Figure 3 にグリース潤滑下における,  $\mu$ , 温度, および変位の推移を示す. 全ての材料で, 無潤滑時より低い  $\mu$  が得られた. 非強化 PA66 は, 試験初期に繊維強化材よりも高い  $\mu$  や変位を示し, その後安定した. 一方, 繊維強化材は, 一定の試験時間が経過した時に  $\mu$  や変位が急激に増加した. GF 33 wt% 材は, GF 15 wt% 材と比較し早期に変位の増加が認められた. また, CF 10 wt% 材は, GF 材よりも更に早期に変位の増加が認められた. CF 10 wt% 材と GF 33 wt% はほぼ同等のヤング率を有することから, 繊維量や発生面圧を考慮しても, CF 強化材の方が耐摩耗性に劣ることが分かった. 試験後の表面観察より, グリース潤滑下における繊維強化 PA66 の摩耗形態は, 無潤滑下で認められた凝着摩耗とは異なり 2 元アブレーション摩耗の影響が大きいと考える. これは以前の検討結果と一致し<sup>2)</sup>, 無潤滑下にて認められた PA66 と鋼の直接接触がグリースによって抑制されると共に, グリースによる低摩擦化の効果が大きいため, CF 特有の低摩擦化効果が得られなかったものとする.

Figure 4 に鋼の摩耗量の推移を示す. CF 強化材と組み合わせた際の摩耗は, GF 強化材の場合と比較して摩耗速度が速く, 無潤滑下における過去の研究と逆の傾向を示した<sup>1)</sup>. この理由の一因として, 繊維と鋼の硬度の関係が推定された. そこで, ナノインデンテーションによる GF と CF の表面硬度測定を実施した. Figure 5 に繊維の硬度測定法の概略, 測定後の繊維表面の原子間力顕微鏡像および各測定位置における GF および CF の硬度測定結果を示す. CF の硬度は, 垂直方向と水平方向で異なり, 垂直方向の硬度は, GF の硬度よりも 35% 低い値となった. 一方, GF の硬度には異方性は認められなかった. これは繊維の分子構造の差異に起因するものと考えられ, CF は結晶性が高く, 黒鉛結晶の方向性に依存し, これに対して GF は非晶質構造を有するため, 異方性が認められなかったと考える<sup>4)</sup>. さらに, 同様に測定した鋼の硬度は 4.5 GPa であり, CF は鋼よりも硬度が低いことがわかった. また, しゅう動面の画像解析の結果, それぞれの繊維強化材で繊維の面積比に大きな差は認められなかった. これらのことから, グリース潤滑下における鋼に対する強化材の攻撃性は, 硬度だけで決定されないことが分かった.

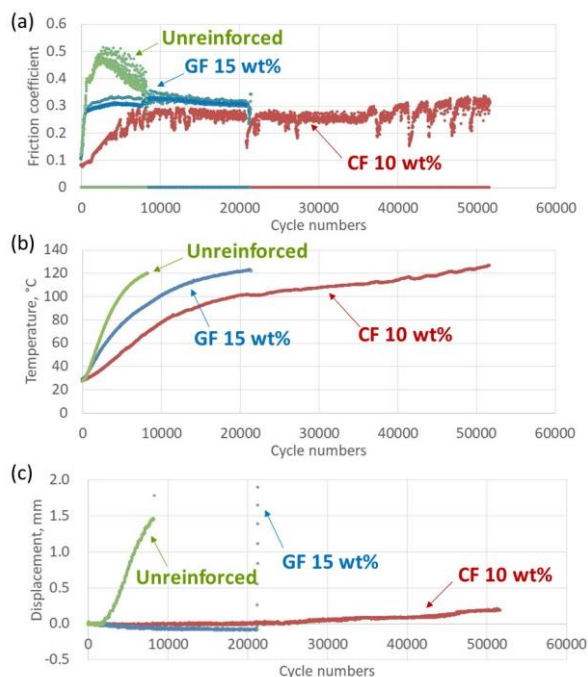


Fig. 2 Evolutions of (a) friction coefficient, (b) temperature, and (c) displacement under dry conditions.

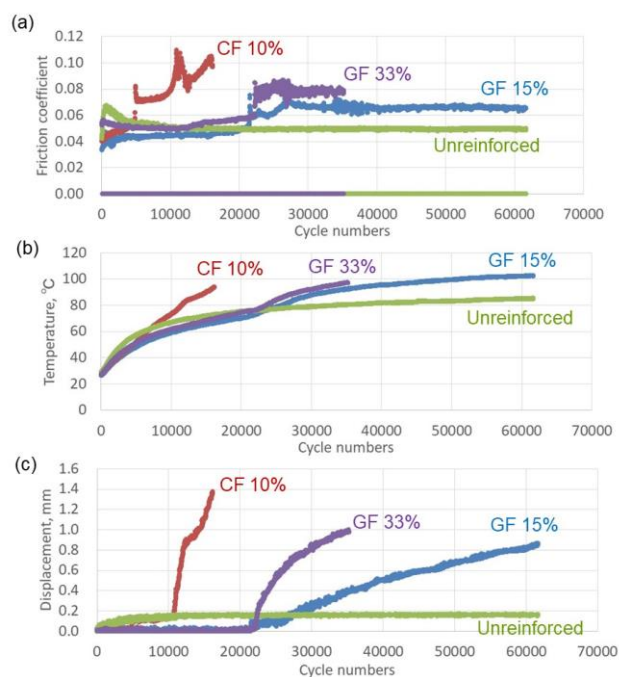


Fig. 3 Evolutions of (a) friction coefficient, (b) temperature, and (c) displacement under grease lubrication.

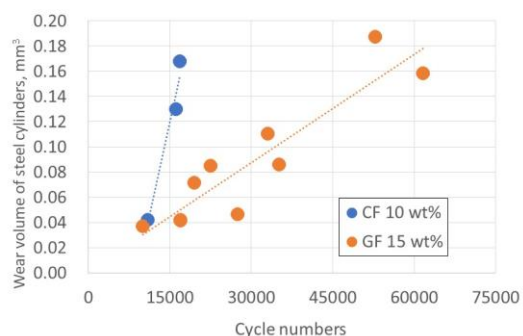


Fig. 4 Wear volume of steel cylinders tested with CF 10 wt% composite and GF 15 wt% composite.

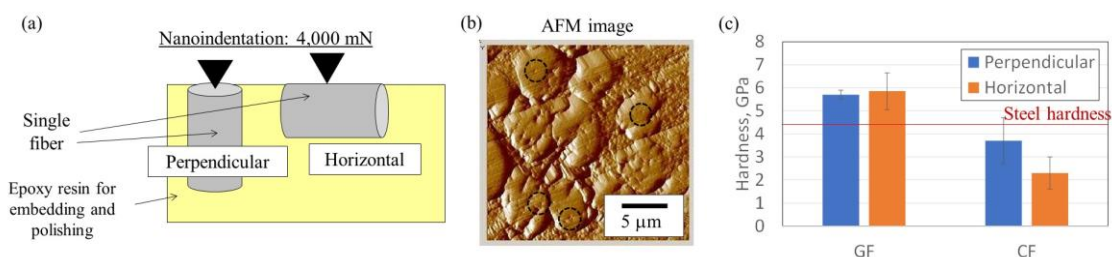


Fig. 5 (a) Schematic of the nanoindentation hardness measurement of fibers; (b) AFM images of the CFs after the hardness measurements; (c) the hardness of the GFs and CFs measured at various positions.

Figure 6 に CF 10 wt%材および GF 15 wt%材の、120°Cにおける引張試験後の破断面を SEM にて観察した結果を示す。CF 強化材では、CF と PA66 との間に多数の空隙が観察され、PA66 の伸びに対し CF は PA66 に付着することなく露出していた。一方、GF 強化材では、PA66 と GF の間に隙間はほとんど形成されず、PA66 の全面に GF が強く付着していた。これは PA66 と CF および GF の密着性の違いを明確に示している。Figure 7 に GF および CF 強化材の摩耗挙動の違いの模式図を示した。CF 強化材は密着性に劣るため、PA66 と CF の間に隙間が生じ、鋼への攻撃性がより高い CF のエッジが露出し鋼の摩耗を増大させる。さらに、PA66 と CF の隙間からき裂が伝搬し、CF 強化材も摩耗が進行する。これに対し、GF 強化材は、GF との密着性に優れるため、GF のエッジの露出が抑制され鋼に対する攻撃性が低くなる。また、PA66 と GF の隙間が出来ないため、樹脂中のき裂の発生が抑制され、GF 強化材の 2 元アブレッシブ摩耗も抑制される。これらをまとめると、グリース潤滑下における GF 強化材と CF 強化材の耐摩耗性の違いは、繊維と鋼の硬度差ではなく、PA66 と繊維の密着力の差異による影響が大きいと考える。

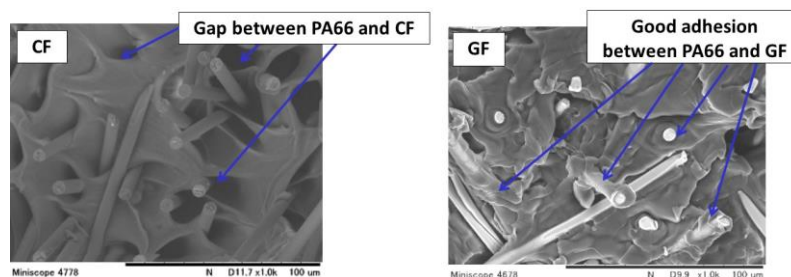


Fig.6 SEM observation of the fracture surfaces from the tensile tests of CF composite and GF composite at 120 °C<sup>5)</sup>.

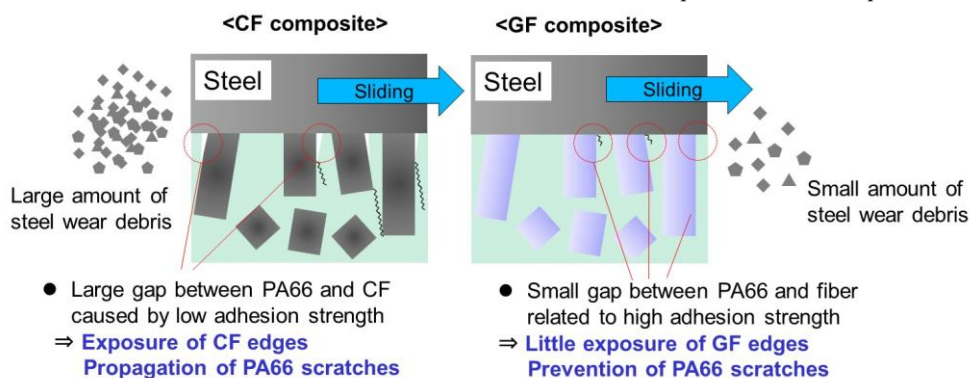


Fig.7 Schematics of the differences in the sliding behavior of the CF composite and GF composite<sup>5)</sup>.

#### 4. 結論

- 1) 無潤滑およびグリース潤滑下において、非強化 PA66、GF および CF でそれぞれ強化した PA66 のトライボロジー特性を比較した結果、潤滑環境により異なる挙動を示すことが明らかとなった。
- 2) 無潤滑下において CF 強化材は変形が抑制され、安定した摩擦係数を示した。これは鋼に CF 由来の低摩擦移着膜が形成されたためと考える。
- 3) グリース潤滑下では、無潤滑時と比較し低い摩擦係数が得られた。また GF 強化材は優れた耐摩耗性を示し、相手材鋼の摩耗も抑制された。これは、繊維と鋼の硬度差ではなく、繊維と PA66 の密着性が影響していると考えられる。

#### 文献

- 1) J.K. Lancaster, J. Physics D: Appl. Phys. 1 5 (1968) 549-559.
- 2) T. Kunishima et al., Wear 456-457 (2020) 203383.
- 3) J. Li et al., Fibers. Polym. 10 (2009) 519-525.
- 4) Y. Sun et al., Nanosci. Nanotechnol. Lett. 6 (2014) 596-600.
- 5) T. Kunishima et al., Wear 477 (2021) 203899.