

鋼と接触しゅう動する繊維強化 PA のトライボロジー特性に及ぼす 繊維種の影響と歯車への適用

Effect of fiber type on the tribological properties of fiber reinforced-PA
in contact with steel and application to polymer gear

ジェイテクト（正）*国島 武史 LTDS（非）**Vincent Fridrici LTDS（非）**Philippe Kapsa

Takeshi Kunishima*, Vincent Fridrici**, Philippe Kapsa**

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

1. はじめに

近年、自動車の軽量化や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。特にポリアミド(PA)は優れた機械的特性を有し、歯車等の機構部品に広く使用されている。PA にガラス繊維(GF)や炭素繊維(CF)等の強化繊維を配合することにより、強度や剛性をさらに向上することが可能である。これにより、部品の小型・高出力化など高負荷下での使用要求にも応えることが期待される。このような用途の一つにウォーム減速機の樹脂歯車がある。ウォーム減速機における樹脂製ウォームホイール(樹脂歯車)と鋼製ウォームの噛み合いのようなすべりの影響が大きい部品では、摩擦およびしゅう動発熱の低減を目的としてグリース潤滑で使用されている。本研究では、特にグリース潤滑下で鋼と接触する樹脂歯車の材料組成設計の指針を得るため、異なる繊維を用いた繊維強化 PA のトライボロジー特性を、基礎的な摩擦摩耗試験と歯車試験の双方で評価し考察した事例を紹介する。

2. 試験手法

2.1 評価材料

樹脂材料として非強化 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ヤング率を示す。鋼材は熱処理を行っていない炭素鋼を用いた。潤滑剤としては、樹脂製しゅう動部品で多用され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 本の鋼製円筒の側面に、樹脂リングを接触させて一方向に回転しゅう動する摩擦摩耗試験を、グリース潤滑下で実施した^{1,2)}。Figure 1 に接触形態を示す。また Table 2 に試験条件を示す。樹脂リング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個別に評価した。一方、鋼の摩耗は、光干渉法で試験後の表面形状を測定し、4 本の鋼製円筒の摩耗体積を合計することにより算出した。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		350 N
Environment temperature		RT
Max sliding cycles		61,500

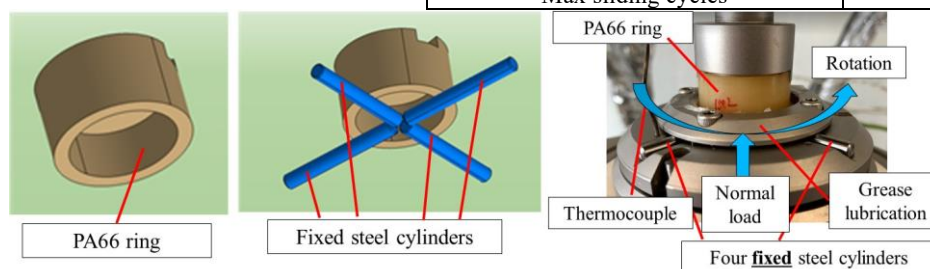


Fig. 1 Schematics of the test specimens and sliding test setup.

2.3 歯車試験

樹脂歯車と鋼製のウォームを、グリース潤滑下で噛み合わせた上で、所定のサイクル数における樹脂歯車の歯面の歯厚減少量および、破損に至るまでの耐久寿命を評価した。試験は、ウォーム減速機の使用環境を考慮し、所定のトルク・回転速度および温度を付与させ実施した。併せて、試験後の歯面の損傷形態について、顕微鏡観察を行った。

3. 試験結果

3.1 摩擦摩耗試験

Figure 2 に、 μ , 温度, 変位の推移を示す. 非強化 PA66 は, 初期に μ , 温度および変位の上昇が認められ, 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後 μ , 温度および変位の変曲点が認められた. GF 33 wt%材は, GF 15 wt%材と比較し変位の増加速度が大きかった. また, CF 強化材は, GF 材よりも更に早期の変位増加が認められた. CF 10 wt%材と GF 33 wt%は, 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. CF は, 無潤滑下では黒鉛構造に由来した低 μ 化および凝着抑制に効果がある. しかしながら, グリース潤滑下においては無潤滑下で認められる凝着が発生しないため, CF 特有の低摩擦化効果が得られなかったと推定する.

Figure 3 に鋼の摩耗量の推移を示す. CF 強化材と組み合わせた際は, GF 強化材と比較して摩耗速度が大きく, 無潤滑下における過去の研究と逆の傾向を示した³⁾. この理由として, 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を用いて GF および CF の表面硬度測定を実施した. Figure 4 に測定方法の概略, 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 の硬度は異方性が認められ, 垂直方向の硬度は, GF の硬度よりも 35%低く, 鋼の硬度(4.5 GPa)よりも低くなった. 一方, GF の硬度には異方性は認められなかった. これは繊維の化学構造の差異に起因すると考える. CF は結晶性が高く, 硬度は黒鉛結晶の方向性に依存する. 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い⁴⁾. 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面積比に顕著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繊維の攻撃性は, 硬度だけで決定されないことが示された.

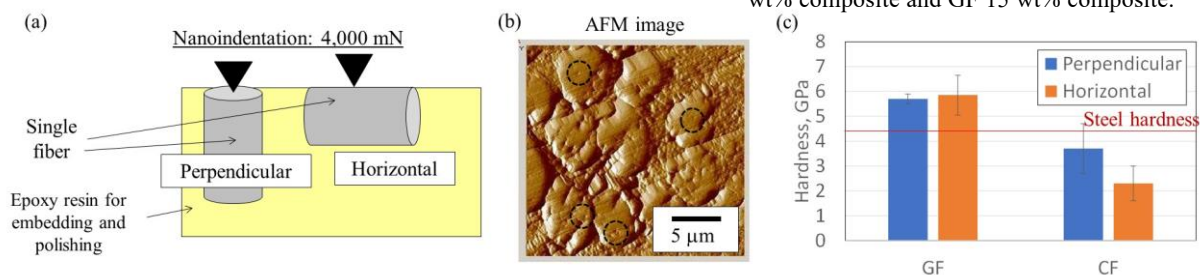


Fig. 4 (a) Schematic of the nanoindentation hardness measurement of fibers; (b) AFM images of the CFs after the hardness measurements; (c) the hardness of the GFs and CFs measured at various positions.

繊維種が耐摩耗性におよぼす影響について, 繊維と PA66 の密着性に注目し考察した. Figure 5 に CF および GF 強化 PA66 の, 120°Cにおける引張試験後の破断面を電子顕微鏡で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 に付着せず露出していた. 一方, GF 強化材では, PA66 と GF の間に隙間をほとんど形成せず, PA66 の全面に GF が強く付着していた. この結果は PA66 と CF および GF の密着性の違いを明確に示している. Figure 6 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⁵⁾. 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.

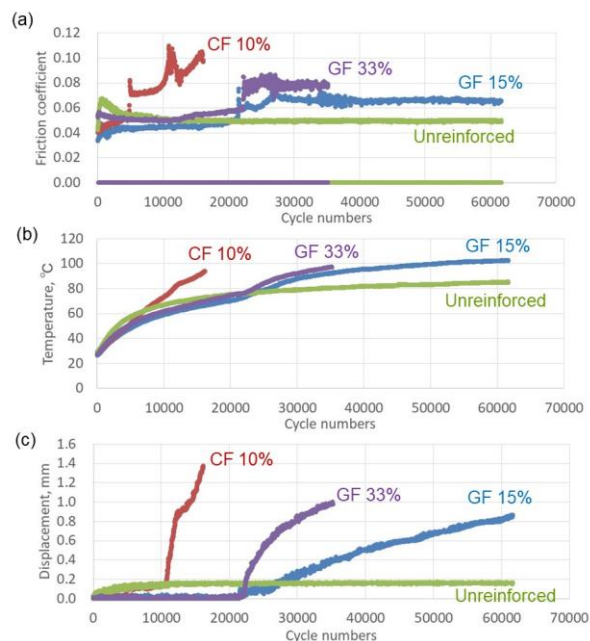


Fig. 2 Evolutions of (a) friction coefficient, (b) temperature, and (c) displacement under grease lubrication.

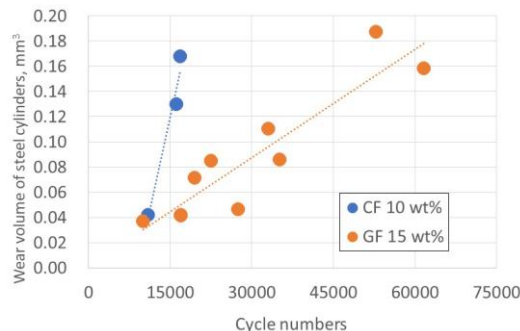


Fig. 3 Wear volume of steel cylinders tested with CF 10 wt% composite and GF 15 wt% composite.

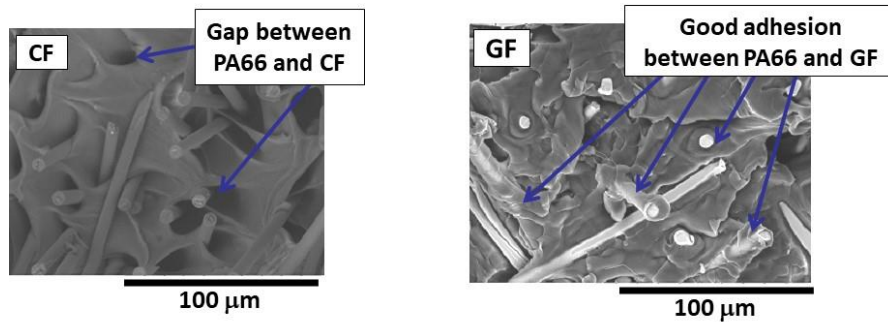


Fig.5 SEM observation of the fracture surfaces from the tensile tests of CF composite and GF composite at 120 °C ⁵⁾.

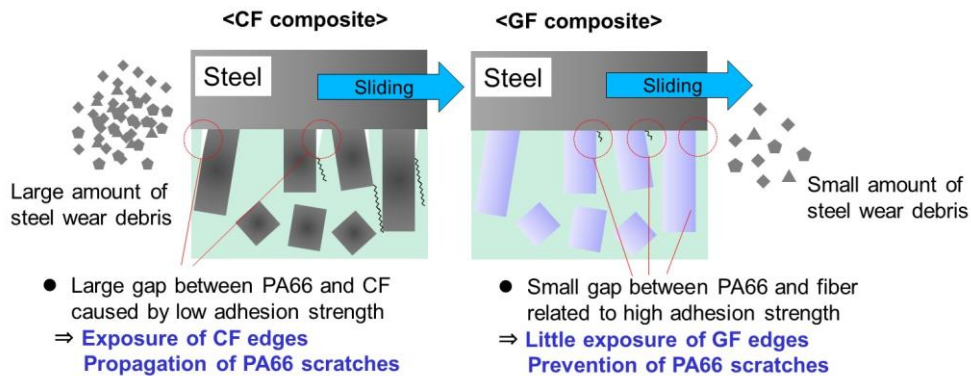


Fig.6 Schematics of the differences in the sliding behavior of the CF composite and GF composite ⁵⁾.

3.2 歯車試験

Figure 7 に、非強化 PA66、GF および CF 強化 PA66 で形成した樹脂歯車の、所定サイクル後における歯厚の減少量および、破損寿命を評価した結果を示す。特に GF 強化 PA66 は、非強化 PA66 と比較し大幅に変形量を低減でき、かつ非強化 PA66 および CF 強化 PA66 を上回る破損寿命が得られた。つまり、GF 強化 PA66 は CF 強化 PA66 と比較し優れた歯車特性を有しており、これは摩擦摩耗試験結果から推定される傾向と一致した。Figure 8 に、破損寿命試験後の GF 強化 PA66 歯車のしゅう動面を SEM 観察した結果を示す。破損部近傍では、GF が PA66 から脱落し埋め込まれていることが確認できた。繊維の脱落のしやすさは PA66 との密着性に左右されると考える。このことから、先述した GF と PA66 の高い密着力により、しゅう動に伴う脱落が抑制され、GF 強化 PA66 歯車は長寿命化に至ったものと考えられる。

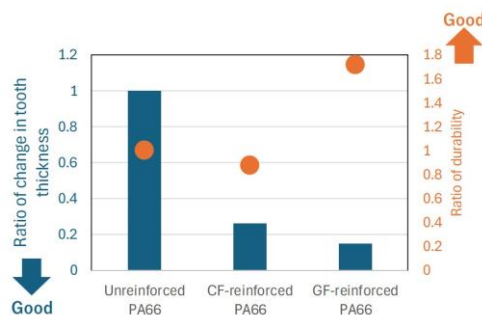


Fig.7 Ratio of change in tooth thickness and durability of each material in gear test

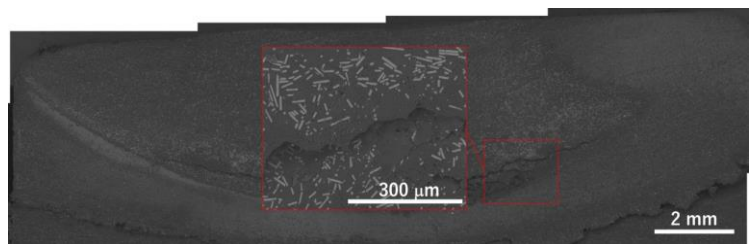


Fig.8 SEM observation of GF-reinforced PA66 gear tooth surface after durability test

4. おわりに

- 1) 摩擦摩耗試験の結果から、GF 強化 PA66 は優れた耐摩耗性を示し、相手材鋼の摩耗も抑制した。これは、繊維と鋼の硬度差ではなく、繊維と PA66 の密着性に関する影響が大きいものと考えられる。
- 2) 樹脂歯車試験においても、GF 強化 PA66 は CF 強化 PA66 と比較し優れた歯車特性が得られた。

文献

- 1) T. Kunishima et al., Wear 456-457 (2020) 203383.
- 2) 国島 他, JTEKT ENGINEERING JOURNAL 1020 (2023) 57-67.
- 3) J.K. Lancaster, J. Physics D: Appl. Phys. 1 5 (1968) 549-559.
- 4) Y. Sun et al., Nanosci. Nanotechnol. Lett. 6 (2014) 596-600.
- 5) T. Kunishima et al., Wear 477 (2021) 203899.