

# グリース潤滑下における GF 強化 PA66 のトライボロジー特性に及ぼす GF 種の影響

## Effect of GF type on the tribological properties of GF-reinforced PA66 under grease lubrication

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、歯車や軸受などの部品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を用いる例が増えている。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)などの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。一方、特にグリース潤滑下において、繊維強化樹脂は非強化樹脂と比較し、しゅう動面の 2 元アブレッシブ摩耗が促進されることが知られている。加えて、繊維の存在により相手材鋼への攻撃性も増加する。対策として鋼表面への熱処理が挙げられるが、コスト増や鋼部品の变形などの課題がある<sup>1)</sup>。そのため、PA66 および鋼の摩耗を抑制できる、材料の設計指針が必要となる。本研究では、特にグリース潤滑で使用される部品を想定し、GF 種 (表面処理・径) がトライボロジー特性に及ぼす影響について評価した事例を紹介する。

### 2. 試験手法

#### 2.1 評価材料

樹脂材料は GF を 15% 配合した PA66 を用いた。GF として、PA66-GF 間の密着性の指標である界面せん断強度の影響を評価するため、異なる化学組成の処理剤 (Type A, B) で表面処理した GF を使用した。また、GF 径の影響を評価するため、同じ処理剤により表面処理した異なる径の GF も用いた。Table 1 に本評価で用いた GF 強化 PA66 の GF 種と機械的特性を示す。なお、相手材となる鋼は表面硬度: 4.5 GPa の熱処理を行っていない S45C を用い、潤滑剤には、樹脂製しゅう動部品に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

固定した 4 本の鋼製の円筒試験片の側面に GF 強化 PA66 製リングを接触させ、一方向に回転しゅう動する摩擦摩耗試験を実施した<sup>1)</sup>。Figure 1 に本試験の接触形態を示す。また、Table 2 および 3 に試験片の寸法と試験条件をそれぞれ示す。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。GF 強化 PA66 製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切り分けて評価した。また、光干渉法で試験後の鋼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、鋼の摩耗量を算出した。試験後の GF 強化 PA66 のしゅう動面は、マイクロスコープおよび SEM を用いて観察を行った。

Table 1 Properties of evaluated GF-reinforced PA66.

No.	GF diameter	GF surface treatment agent	Tensile strength	Young's modulus	Tensile strain at break
1	6.5 $\mu\text{m}$	Type A	154 $\pm$ 0.4 MPa	6.0 $\pm$ 0.4 GPa	5.1 $\pm$ 0.1 %
2	6.5 $\mu\text{m}$	Type B	142 $\pm$ 2.9 MPa	6.0 $\pm$ 0.4 GPa	3.5 $\pm$ 0.2 %
3	9.5 $\mu\text{m}$	Type A	148 $\pm$ 1.4 MPa	5.9 $\pm$ 0.4 GPa	4.1 $\pm$ 0.4 %
4	13 $\mu\text{m}$	Type A	136 $\pm$ 2.1 MPa	6.5 $\pm$ 0.9 GPa	3.1 $\pm$ 0.2 %
5	19 $\mu\text{m}$	Type A	116 $\pm$ 1.3 MPa	5.8 $\pm$ 0.1 GPa	2.6 $\pm$ 0.1 %

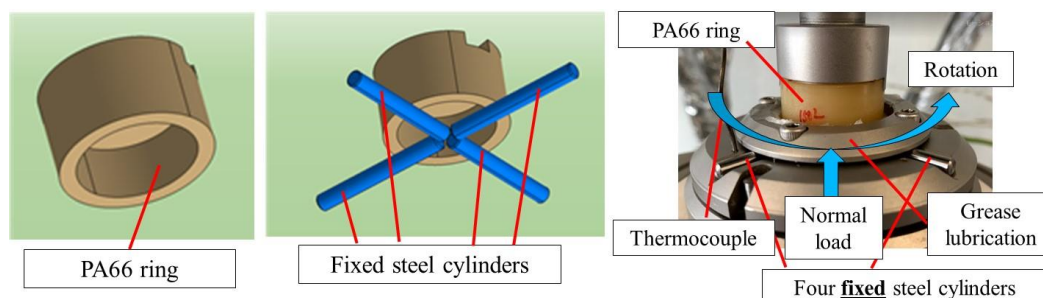


Fig. 1 Schematics of the test specimens and sliding test setup.

Table 2 Geometry of test specimen.

PA66 ring specimen	Outer diameter	25.6 mm
	Inner diameter	20 mm
	Height	12 mm
Steel cylinder	Diameter	3.5 mm
	Length	30 mm

Table 3 Test conditions for the sliding tests.

Normal load	350 N
Rotation speed	790 rpm
Sliding speed	1 m/s
Environment temperature	25°C
Total sliding cycles	Max 130,000 cycles

### 3. 試験結果

#### 3.1 PA66-GF 間の界面せん断強度の影響

GF 径を 6.5  $\mu\text{m}$  に固定し(No. 1, 2), PA66-GF 間の界面せん断強度がトライボロジー特性に及ぼす影響を評価した。Table1 に示すように、これらのサンプルは、GF の表面処理剤が異なるがヤング率は同等である。一方、引張強度および引張破断伸びは表面処理剤により異なり、Type A を用いた場合 (No. 1), Type B を用いた場合(No. 2)より高い値を示した。Figure 2 にこれらのサンプルの摩擦摩耗試験における垂直変位の経時変化を示す。機械的特性に劣る Type B を用いた場合、14,200-21,000 cycle にて変位が急激に増加し、その後 48,700-61,600 cycles で更に増加した。一方、機械的特性に優れる Type A を用いた場合、80,000 cycles まで変位の急激な増加は認められなかった。本メカニズムを明らかにするために、摩擦摩耗試験を意図的に 6,500 および 22,300 cycles で停止させ、GF 強化 PA66 のしゅう動面を SEM で観察した。その結果を Fig. 3 に示す。Type B を用いた場合、Type A と比較して GF の界面剥離や、GF 脱離による穴部の形成などが顕著に認められた。特に、22,300 cycles 後の Type B は、GF の破壊は抑制されているものの、PA66 との間にすき間の形成が多数観察された。これらのことから、Type B を用いた場合の界面せん断強度は、Type A を用いた場合と比較して低く、しゅう動に伴うせん断応力に対し容易に GF が剥離し、耐摩耗/変形性の悪化を引き起こしたものと考える。さらに、相手材鋼の摩耗量も、Type B を用いた場合の方が大きかった (Fig. 4)。これは、鋼に対して特に高い攻撃性を持つ GF のエッジ部が、界面せん断強度が低い Type B の方が露出しやすく、グリース潤滑下特有の鋼の 2 元アブレッシブ摩耗が進行したものと考える<sup>1)</sup>。このことから、PA66-GF 間の界面せん断強度は、GF 強化 PA66 のみならず、相手材鋼の耐摩耗性にも影響することが分かった。

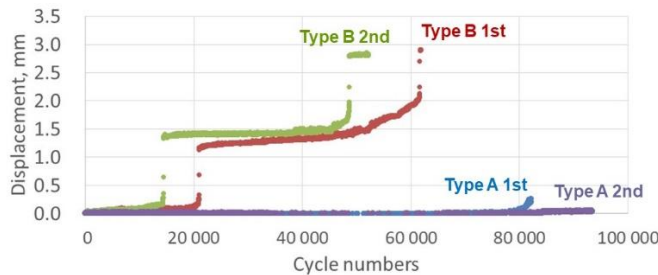


Fig.2 Evolutions of the displacement of GF composite in the sliding test using GF with different type of treatment agent.

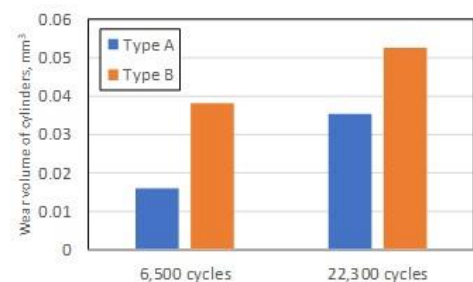


Fig.4 Wear volume of the steel cylinders at different cycle numbers using GF with different type of treatment agent.

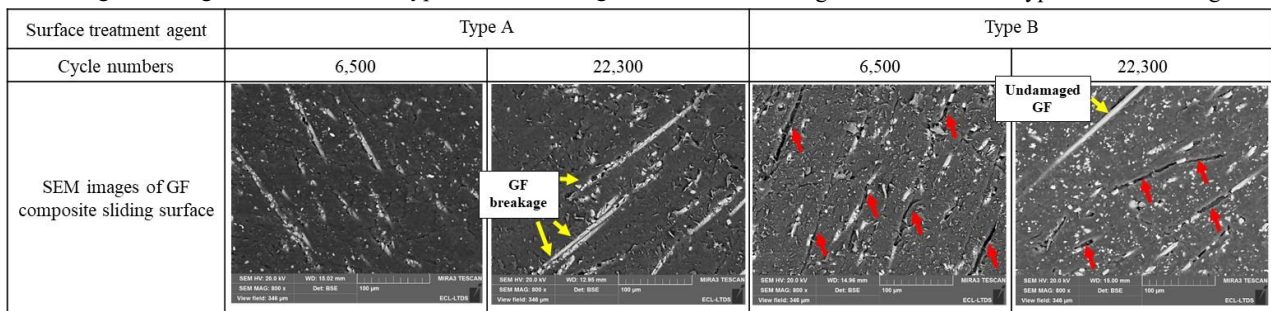


Fig.3 SEM images of the sliding surfaces of the GF composite after 6,500/22,300 cycles with different treatment agent.

次に、異なる表面処理剤を用いた際の、PA66-GF 間の界面せん断強度に及ぼす影響を定量的に評価するため、Kelly-Tyson 則を用いて、界面せん断強度の定量化を試みた。本理論は繊維強化樹脂の強度・繊維配向・繊維長分布を考慮することで、式(1)により界面せん断強度を算出することが可能である<sup>2)</sup>。

$$\sigma_t = f_0 \left\{ \sum_{l_i < l_c} \left( \frac{\sigma_f V_i l_i}{2l_c} \right) + \sum_{l_j > l_c} \left[ \sigma_f V_j \left( 1 - \frac{l_c}{2l_j} \right) \right] \right\} + \sigma_m (1 - V_f) \quad (1)$$

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_t$ : GF 強化 PA66 の引張強度、 $f_0$ : 繊維配向係数、 $\sigma_f$ : GF の強度 (3.2 GPa)、 $\sigma_m$ : 母材である非強化 PA66 の強度 (82 MPa)、 $l_c$ : 臨界繊維長、 $l_i/l_j$ : 臨界繊維長以下/以上の繊維長、 $V_i/V_j$ :  $l_i/l_j$  の繊維体積分率、 $V_f$ : 繊維の体積分率 (7.3%)、 $d$ : GF 径 (6.5  $\mu\text{m}$ )、 $\tau$ : PA66-GF 間の界面せん断強度をそれぞれ示す。 $f_0$  や  $l_c$  は、引張試験片中の GF の SEM 観察および

画像解析から算出した<sup>3)</sup>。また引張試験片中の GF 長は、650℃で試験片を燃焼させ、残渣として得られた GF の長さを画像解析にて測定した。本手法にて算出した  $f_0$ ,  $l_c$ , および  $\tau$  を Table 4 に示す。界面せん断強度は、表面処理剤として Type A を用いた方が 7.9 MPa (30.6%)高い結果となった。これらの値は、過去に報告されている、PA66-GF 間の界面せん断強度と一致している<sup>4)</sup>。このことから、約 30%の界面せん断強度の差異が、GF 強化 PA66 および鋼の耐摩耗性に大きく影響することが明らかになった。

Table 4 Estimated  $f_0$ ,  $l_c$  and  $\tau$  with different types of GF surface treatment agent.

	$f_0$	$l_c$	$\tau$
Type A	0.855	0.305 mm	33.6 +/- 0.8 MPa
Type B	0.870	0.410 mm	25.7 +/- 0.5 MPa

### 3.2 GF 径の影響

表面処理剤を同一種類(Type A)とし、異なる GF 径を用いることにより、GF 強化 PA66 および鋼の摩耗に及ぼす GF 径の影響を評価した(No. 2, 6-8)。Figure 5 に、異なる径の GF を用いた場合の、摩擦摩耗試験における垂直変位の経時変化を示す。GF 径が小さいほど、変位が増大し始めるサイクル数が大きく、GF 強化 PA66 の耐摩耗/変形性に優れることを確認した。また、Fig. 6 に各サイクル数における相手材鋼の摩耗量を示す。GF 径が小さいほど、相手材鋼の摩耗が小さくなった。同一の GF 量においては、GF 径が小さいほど GF と PA66 の接触面積が大きくなるため、しゅう動面における PA66-GF 間の界面せん断強度の総和が大きくなり、GF の界面剥離が生じにくくなる。したがって、GF のエッジ部の露出が抑制されたと考える。また、GF 径を小さくすることにより、界面剥離を基点とした樹脂のクラック進展の抑制と共に GF 強化 PA66 の機械的特性が向上するため、摩耗と塑性変形も抑制されると考える。Figure 7 に、上記の考察に基づく、GF 径の差異が GF 強化 PA66 および鋼の摩耗に及ぼす影響を模式的に示す。

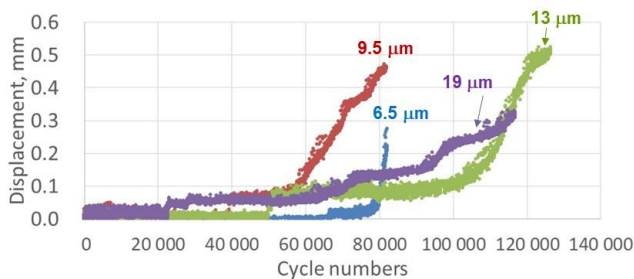


Fig.5 Evolutions of the displacement of GF composite in the sliding test using GF with different diameter.

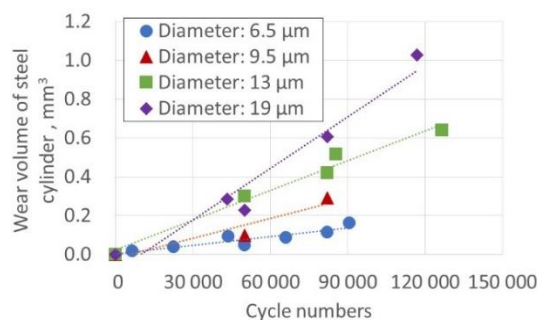


Fig.6 Evolutions of wear volume of steel cylinder in the sliding test using GF with different diameter.

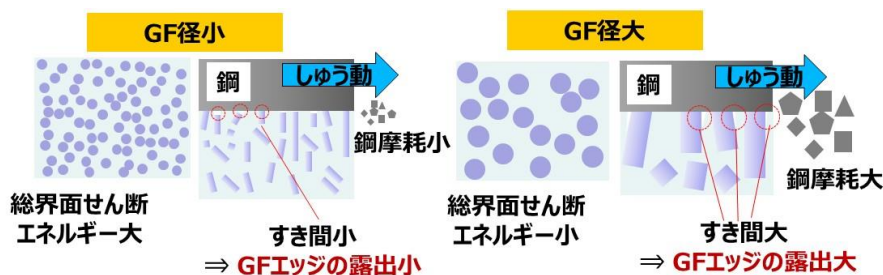


Fig.7 Schematic of effect of GF diameter on wear resistance of GF-reinforced PA66 and steel

### 4. おわりに

グリース潤滑下において鋼と接触する GF 強化 PA66 のトライボロジー特性に注目し、特に PA66-GF 間の界面せん断強度および GF 径が耐摩耗性に及ぼす影響を評価した。PA66-GF 間の密着性に優れる GF を用いた場合、GF 強化 PA66 のみならず相手材鋼の耐摩耗性も向上した。これは PA66 と GF の界面を起点とする GF 強化 PA66 の 2 元アブレーション摩耗が抑制されると共に、相手材鋼に対し攻撃性を有する GF エッジの露出が抑制されたためと考える。また、GF 径に関しては、その径が小さいほど、しゅう動面における PA66 と GF の界面せん断強度の総和が大きくなる。その結果、GF エッジの露出が抑制されることで GF 強化 PA66 および鋼の摩耗が抑制されたものとする。

### 文献

- 1) T. Kunishima et al., Wear 456-457 (2020) 203383.
- 2) A. Kelly et al., J. Mech. Phys. Solids 13 (1965) 329-350.
- 3) T. Kunishima et al., Wear 462-463 (2020) 203500.
- 4) R. Wongpajan et al., Energy Procedia 89 (2016) 328-334.