

グリース潤滑下における繊維強化 PA66 と鋼のトライボロジー特性に関する研究 —樹脂歯車への適用に向けて—

Study on the Tribological Properties of Fiber-reinforced PA66 in Contact with Steel under Grease Lubrication
— Application to Polymer Gear —

国島武史 T. KUNISHIMA ヴィンセント・フリデリシ V. FRIDRICI フィリップ・カプサ P. KAPSA

We examined the tribological behavior of fiber-reinforced PA66 and steel under grease lubrication. This allowed us to clarify the wear mechanism of glass fiber-reinforced PA66 and steel, and through clarification of the tribochemical reaction at the sliding interface, we could explain the temperature dependence of wear resistance. This also allowed us to determine the effects of glass fiber-reinforced PA66 composition including PA66 molecular mass and reinforcement fiber types. We can then apply these findings to future high-performance polymer gears.

Key Words: polymer gear, PA66, glass fiber, carbon fiber, grease, tribology

1. はじめに

自動車の軽量化や静粛性の要求から、樹脂製のしゅう動部品が増加している。たとえば、電動パワーステアリング (Electric Power Steering : EPS) のウォーム減速機には、軽量化とともにステアリングホイールに伝わる歯打ち音や振動を抑制するため、樹脂歯車の一種であるウォームホイールが使用されている。本歯車はグリース潤滑下にて鋼製のウォームシャフトとしゅう動する (図 1)。本部品は転がりと比較しすべりの影響がきわめて強く、また自動車のエンジンルームに配置されるため、氷点下から 100℃ を超えるような幅広い温度域で使用される。ウォーム減速機は自動車の前軸荷重を支え操舵力をアシストする重要保安部品であり、非常に高い信頼性が求められる¹⁾。

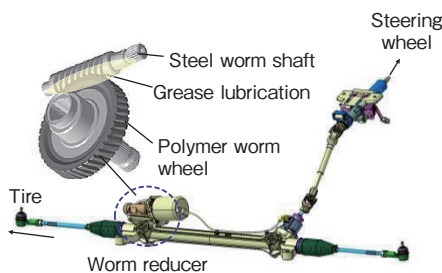


図 1 デュアルピニオンアシスト EPS (DP-EPS) とウォーム減速機の構造
Structure of dual-pinion assisted EPS (DP-EPS) and worm reducer

近年、電動化や環境規制に伴う部品の小型・軽量化に関する要求が高まっており、樹脂歯車にも高い強度や耐久性が求められる。一般に、負荷の増大は歯車の変形や寿命低下をもたらすため、これに対応する樹脂材料およびトライボロジー技術が必要である。このような過酷な環境で利用される材料として、優れた機械的特性および耐熱性を有するポリアミド 66 (Polyamide 66 : PA66) が知られ、樹脂歯車にも広く使用されている²⁾。さらに PA66 にガラス繊維 (Glass Fiber : GF) や炭素繊維 (Carbon Fiber : CF) などの強化繊維を配合し、歯車の強度や剛性を向上させることもできる³⁾。しかし繊維強化 PA66 では、非強化 PA66 と比較し繊維由来の歯面摩擦が増加する¹⁾。さらに硬質な繊維は相手材鋼の摩擦を増加させる。対策として鋼歯面に熱処理を行い硬化させる手法も知られているが、コストの増加とともに熱処理ひずみにより、かみあい精度の低下を招く⁴⁾。このことから、総合的な繊維強化樹脂歯車のしゅう動面設計技術が必要になる。

PA66 を始めとする樹脂材料は自己潤滑性を有するため、無潤滑下で使用されることが多いが、ウォーム減速機のかみあいのような高面圧条件では、しゅう動発熱の低減を目的としてグリース潤滑下で使用される¹⁾。グリースには摩擦摩耗特性を向上させるため、油性剤や極圧添加剤・摩擦調整剤などの添加剤が配合されるが、繊維強化樹脂-鋼の接触において添加剤が摩擦摩耗特性に及

ばす影響に着目した例は少ない。さらに、グリース潤滑下での繊維強化 PA66 や相手材鋼の耐摩耗性に及ぼす繊維種や分子量などの樹脂組成の影響も明らかになっていない。

そこで本報では、グリース潤滑下における繊維強化 PA66 と鋼の接触しゅう動特有の摩擦摩耗特性を基礎試験にて評価し、そのメカニズムを解明した結果を報告する。さらに、樹脂分子量や強化繊維種などの樹脂組成の影響や鋼の硬度、ならびにグリース中の添加剤が摩擦摩耗特性に及ぼす影響を評価した結果もあわせて報告する。最後に、より高負荷条件下にて使用されるウォーム減速機や樹脂歯車への開発技術の適用可能性について提言する。

2. 評価材料と基礎試験手法

2.1 評価材料

評価対象の樹脂材料は、GF の表面処理剤、繊維径、繊維充填量および PA66 分子量の異なる GF 強化 PA66 を用いた。比較として GF を含んでいない非強化 PA66 および CF 強化 PA66 も評価した。評価用試験片は、射出成形でリング状に成形した後、機械加工後の樹脂歯車の歯面を模擬するためスキン層を除去し、しゅう動面に繊維を露出させた。表 1 に各繊維強化 PA66 の組成・分子量に相関のある粘度数 (VN) および常温におけるヤング率を示す。相手材鋼は S45C でナノインデント硬度：4.5GPa を基準とし、鋼硬度の影響も評価するため熱処理条件を変更し、異なる表面硬度の S45C を調整した。また、鋼の表面粗さは S_a : 0.12 μ m とした。潤滑剤には樹脂製しゅう動部品に多用されており、耐熱性にも優れるウレアグリースを用いて、グリース中の脂肪酸金属塩と硫黄系酸化防止剤が摩擦摩耗特性に及ぼす影響も評価した。使用したグリースの組成を表 2 に示す。

表 1 評価した PA66 材料一覧

Evaluated PA66 and fiber-reinforced composite

No.	Fiber type	GF surface treatment agent	Fiber diameter, μ m	Fiber amount, wt%	VN, ml/g	Young's modulus, GPa
1	GF	A	6.5	15	145	5.9
2	GF	A	6.5	15	193	6.0
3	GF	B	6.5	15	193	6.0
4	GF	A	6.5	15	235	5.4
5	GF	A	6.5	15	356	6.0
6	GF	A	9.5	15	193	5.9
7	GF	A	13	15	193	6.5
8	GF	A	19	15	193	5.8
9	GF	A	6.5	33	145	10.7
10	—	—	—	0	150	3.0
11	CF	—	8	10	150	9.5

表 2 評価グリース一覧

Evaluated grease

Type	Thickener	Base oil	Carboxylate	Anti-oxidation agent
a	Urea	PAO	Added	Added
b	Urea	PAO	—	Added
c	Urea	PAO	Added	—

2.2 基礎試験手法

摩擦摩耗特性は、従来手法では再現が難しかった高圧接触を模擬するため、グリース潤滑下において固定された PA66 リングに対し、4 本の鋼シリンダーを回転させてすべり接触させる手法で評価した (図 2)^{1,7)}。試験時の変位 (PA66 の摩耗および塑性変形) は、変位計を用いてその場で測定した。試験前後における PA66 リングの重量変化および密度の値から摩耗高さを算出し、全高さ変化から差し引くことで摩耗と塑性変形を切り分けて算出した。また鋼の摩耗形態は、白色光干渉顕微鏡で観察を行い、摩耗断面積の算出を行った。さらに、試験後のしゅう動面について、マイクロ스코ブおよび走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察を行った。試験条件および試験片の寸法を表 3 に示す。

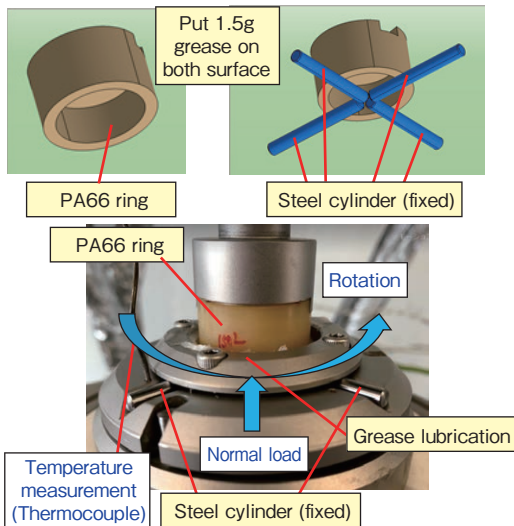


図2 接触形態の概略と摩擦摩耗試験機
Schematic of contact geometry and tribometer

表3 摩擦摩耗試験条件
Sliding test conditions

Items	Conditions
Sliding speed	1m/s
Rotation speed	838min ⁻¹
Normal load	350N
Contact pressure	189MPa (GF 15% reinforced-PA66, RT)
Ambient temperature	RT, 80°C, 100°C, 120°C
Cycle numbers	Max 140 000cycles (1cycle: 1 rotation of PA66 ring)
Measured items	Friction coefficient (μ) · Temperature · Vertical displacement
Dimension of PA66 ring	Outer diameter: 25.6mm, Inner diameter: 20mm, Height: 12mm
Dimension of steel cylinder	Outer diameter: 3.5mm, Length: 30mm

3. グリース潤滑下における GF 強化 PA66 と鋼の摩耗メカニズム⁸⁾

3.1 GF 強化 PA66 と鋼の摩耗形態の経時変化

図3に、GF強化PA66 (No. 1) と表面硬度：4.5GPaの鋼およびウレアグリース (Type a) を用いた場合の摩擦係数(μ)、温度および垂直変位の推移を示す。20 000サイクル付近で、 μ および塑性変形に伴う変位の増加がはじまり、その後変位は摩耗により比例的に増加した。図4に、 μ と変位が増加しはじめた22 531サイクルで停止し、GF強化PA66のしゅう動面をマイクロSCOPEとSEMで観察した結果を示す。鋼とのしゅう動で生じたしゅう動面の剥離に加え、GFの脱落や折損、微小なき裂の発生および鋼摩耗粉の付着が認められ

た。また、マイクロインデンテーション測定では、しゅう動面の硬度やヤング率の低下が認められた。このことから、しゅう動面の経時的な損傷により μ が増大するとともに機械的特性が低下し、塑性変形が生じたと推定する。図5に同じく22 531サイクルで停止した際の、鋼の摩耗形態をマイクロSCOPEおよび光干渉顕微鏡で観察した結果を示す。鋼に樹脂成分の移着は認められなかったが、二元アブレッシブ摩耗と推定される一方向の特徴的な摩耗痕が確認された。これは軟質な鋼を使用しているため、相対的に硬度の高い樹脂中のGFが鋼を削るためと考える。摩耗モードの検証のため、GF強化PA66や鋼の摩耗粉が混入した試験後のグリースを意図的に用いたうえで新品のGF強化PA66および鋼を使用して評価を行ったが、摩擦摩耗特性の悪化は認められなかった。さらに、意図的に損傷を与えたGF強化PA66を用いたうえで新品のグリースと鋼を使用して評価すると、摩擦摩耗特性は悪化した。これらのことから、GF強化PA66の二元アブレッシブ摩耗の影響は、グリース中に混入した摩耗粉に由来する三元アブレッシブ摩耗の影響より大きいと推察された。

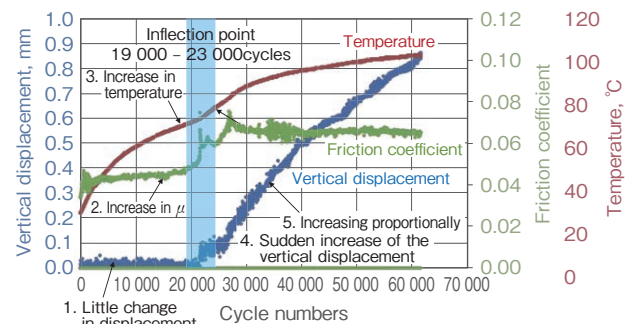


図3 摩擦係数 (μ) · 温度 · 変位の推移
Evolutions of friction coefficient (μ), temperature, and displacement

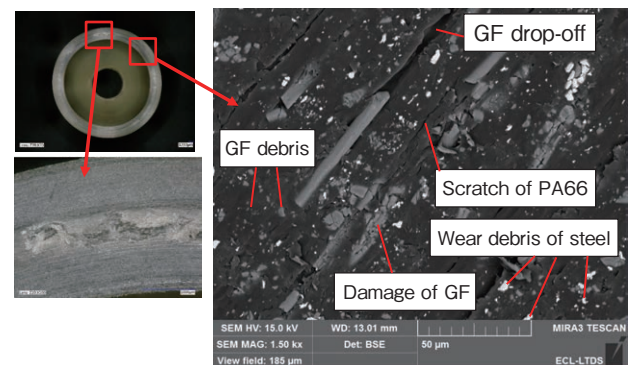


図4 GF強化PA66のしゅう動面の観察図
Observation of GF-reinforced PA66 sliding surface

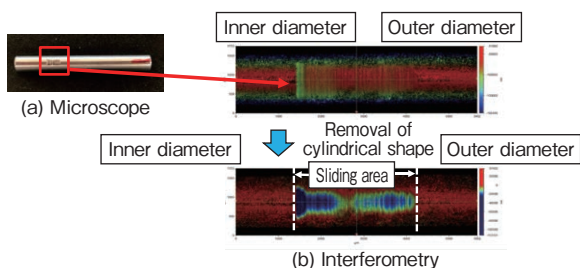


図5 鋼のしゅう動面の観察図
Observation of steel sliding surface

3.2 鋼の硬度が GF 強化 PA66 の耐摩耗性に及ぼす影響

次に、鋼の硬度が GF 強化 PA66 の耐摩耗性に及ぼす影響を評価した。その結果、鋼の硬度が低いと GF 強化 PA66 の摩耗および塑性変形が減少した (図6)。ナノインデンテーション測定で得られた垂直方向における GF 単体の硬度 (約 5.8GPa, 後述) とあわせて考察すると、鋼の硬度が高い場合は硬度の低い GF の折損や脱落が促進され、GF の脱落部を起点とするき裂が進展し、GF 強化 PA66 の耐摩耗性が悪化したと推察する。一方、鋼の硬度が低い場合は、硬度の高い GF の折損・脱落が抑制されるとともに、鋼の摩耗で接触面積が増加し、面圧低減により GF 強化 PA66 の摩耗も低減されたと推察する。

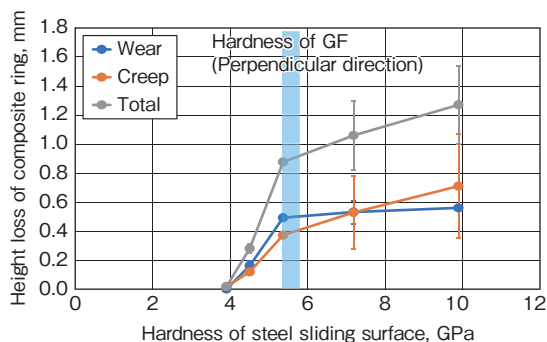


図6 鋼硬度と GF 強化 PA66 の摩耗・塑性変形の関係

Relation between hardness of steel and wear and creep of GF-reinforced PA66

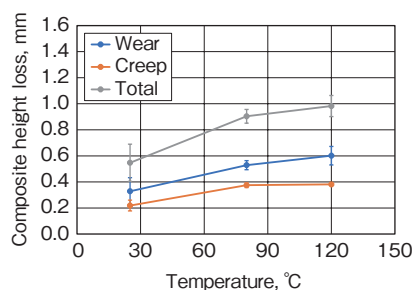
4. 摩擦摩耗特性の温度依存性と、グリース中の脂肪酸金属塩の影響⁹⁾

4.1 摩擦摩耗特性の温度依存性

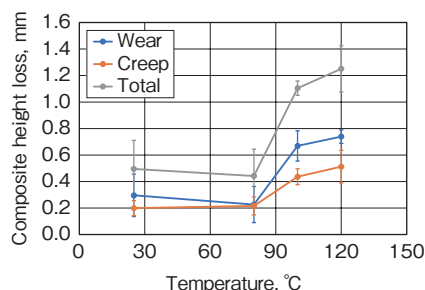
摩擦摩耗特性の温度依存性を精密に評価するため、雰囲気温度からのしゅう動発熱による昇温を抑制すべく、10秒駆動した後に200秒の間欠時間を導入する条件で

試験を行った。試験には GF 強化 PA66 (No. 1) および硬度: 4.5GPa の鋼を使用した。図7に、グリースに脂肪酸金属塩を添加しない場合 (Type b) と添加した場合 (Type a) の 42 000 サイクル後における GF 強化 PA66 の摩耗 (Wear) と塑性変形量 (Creep) を示す。脂肪酸金属塩を含まないグリースでは、温度の上昇とともに摩耗と塑性変形が増加した。一方、脂肪酸金属塩を含むグリースでは、80℃にて摩耗の低減が認められたが、25℃や120℃では脂肪酸の添加による摩耗の抑制効果は認められなかった。

摩擦摩耗特性の温度依存性について、マイクロインデンテーション測定により得られた GF 強化 PA66 のしゅう動面の硬度およびヤング率から考察した (図8)。脂肪酸金属塩を添加していない場合、GF 強化 PA66 の摩耗および塑性変形は、室温 (RT), 80℃, 120℃のそれぞれにおけるしゅう動面の硬度およびヤング率と相関があることを確認した。このことから、摩擦摩耗特性の温度依存性は、GF 強化 PA66 の機械的特性の温度依存性で説明できることが分かった。これに対し、脂肪酸金属塩を添加した場合は、摩耗および塑性変形と機械的特性に相関がないため、しゅう動界面のトライボケミカル反応が影響していると推察する。これを確認するため、しゅう動面のトライボフィルム分析を実施した。



(a) without addition of carboxylate



(b) with addition of carboxylate

図7 GF 強化 PA66 の摩耗・塑性変形量の温度依存性
Wear and creep of GF-reinforced PA66 at each temperature

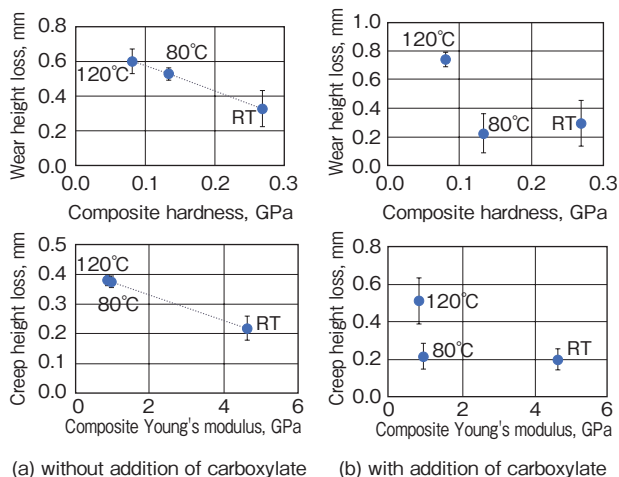


図8 GF強化PA66のしゅう動面における硬度・ヤング率と摩耗・塑性変形の関係
Relation between hardness and Young's modulus of GF-reinforced PA66 sliding surface and wear/creep

4.2 しゅう動面のトライボフィルム分析

80°Cにおける脂肪酸金属塩の添加効果を明らかにするため、変位が増加する前の13 000サイクルで意図的に試験を停止させた。鋼のしゅう動面をSEM-EDXで分析したところ、炭化水素(C, H, O)から成る数十μm程度の斑点状膜の形成が観察された(図9)。また、鋼を飛行時間型二次イオン質量分析法(ToF-SIMS)で分析したところ、脂肪酸の強度は非しゅう動部(80°Cでグリースと接触)と比較してしゅう動部のほうが高くなることを確認した(図10)。これより、高温で脂肪酸が吸着し、滑りによって吸着が促進されたと推定した。

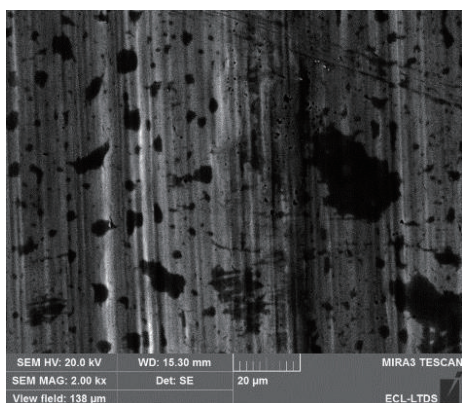


図9 13 000サイクル後の鋼しゅう動面のSEM観察
SEM observation of steel sliding surface after 13 000cycles

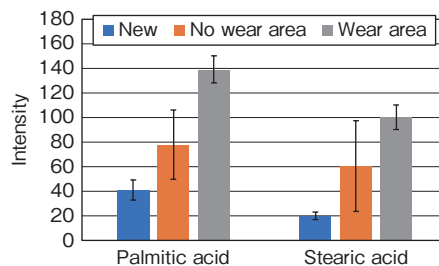
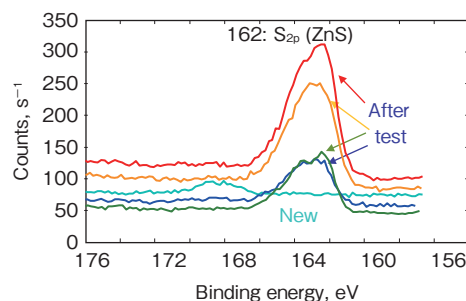


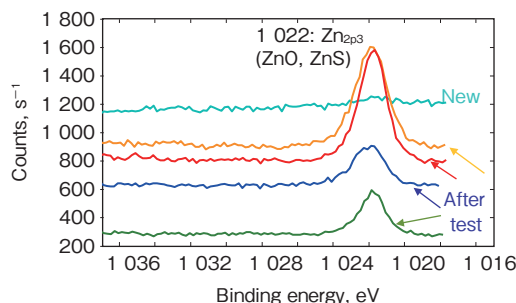
図10 ToF-SIMS分析による鋼しゅう動面における脂肪酸(パルミチン酸, ステアリン酸)の相対強度

Intensity of carboxylate (palmitic/stearic acid) on steel sliding surface through ToF-SIMS

一方、13 000サイクル後のGF強化PA66のしゅう動面も同様にToF-SIMS分析したが、脂肪酸は同定されなかった。これより、脂肪酸はGF強化PA66よりも鋼に優先的に吸着すると推察した。また、X線光電子分光法(XPS)にて異なる4箇所を分析したところ(図11)、しゅう動面のPA66部のみにZnSから成る反応膜の選択的な形成が認められた。これは脂肪酸金属塩中のZnと硫黄系酸化防止剤のトライボケミカル反応で形成したと推定する。



(a) S_{2p}



(b) Zn_{2p3}

図11 試験前および13 000サイクル後のGF強化PA66しゅう動面のXPS分析結果

XPS analysis of GF-reinforced PA66 sliding surface before test and after 13 000cycles

図12に、前述の分析結果より推定される、GF強化PA66および鋼のしゅう動面におけるトライボケミカル反応の概念図を示す。グリース中に存在する脂肪酸金属塩は、しゅう動時によるせん断力および発熱の影響により脂肪酸がかい離し、鋼表面に脂肪酸鉄の吸着膜を局所的に形成する。また脂肪酸金属塩から脱離したZnは硫黄系酸化防止剤とのトライボケミカル反応により、特にGF強化PA66のPA66部に、選択的に金属硫化物(ZnS)の膜を形成するものと考えられる。

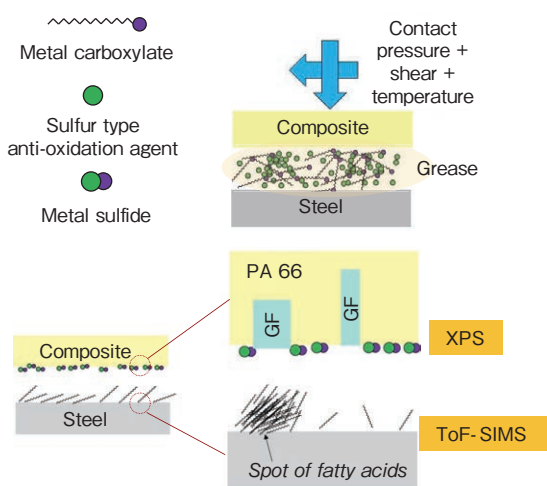


図12 しゅう動面におけるトライボケミカル反応
Tribochemical reaction on the sliding surface

4.3 GF強化PA66／鋼上に形成されたトライボフィルムの影響と耐摩耗性向上メカニズム

次に、GF強化PA66および鋼にそれぞれ形成されたトライボフィルムが摩擦摩耗特性に及ぼす影響を確認するため、脂肪酸金属塩を含み、硫黄系酸化防止剤を含まないグリース (Type c) を新たに調整し、80℃で摩擦摩耗特性を評価した。その結果、脂肪酸金属塩を含んだグリース (Type a, c) のほうが、より長時間にわたり低摩擦状態を維持でき、変位の増大を抑制できた。このことから、GF強化PA66表面に形成されたZnS膜より、鋼表面に形成された脂肪酸膜のほうが、耐摩耗性向上の効果が大きいことを確認できた。図13に80℃における、脂肪酸金属塩の添加有無による、動 μ と静 μ の経時変化を示す。脂肪酸金属塩の添加により、特に静 μ の低減効果が大きいことを確認した。鋼表面の脂肪酸膜は間欠接触時におけるGF強化PA66－鋼間の凝着を抑制し、再起動時のせん断を抑制するため、GF強化PA66の耐摩耗性を向上させたと考えられる。

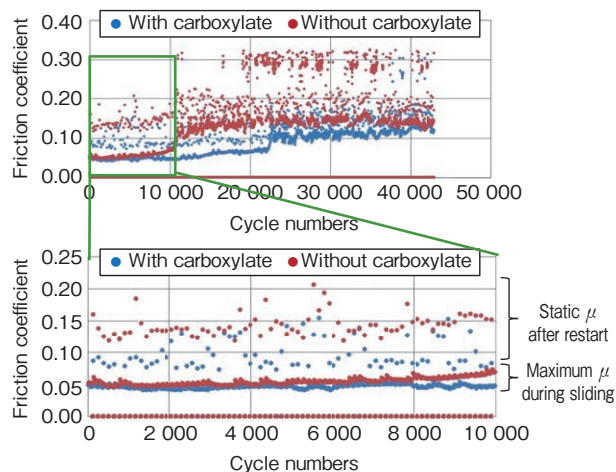


図13 80℃における動 μ と静 μ の推移
Evolutions of dynamic and static μ at 80℃

5. GF強化PA66組成が摩擦摩耗特性に及ぼす影響⁴⁾

前述のメカニズムに基づき、GF強化PA66の組成が摩擦摩耗特性に及ぼす影響を評価した。以降の検討は脂肪酸金属塩ならびに酸化防止剤を含んだグリース (Type a) および硬度4.5GPaの鋼を用いた。

5.1 PA66－GF間の界面せん断強度の影響

まず、PA66とGFの密着性を担保するGF表面処理剤に着目し、PA66－GF間の界面せん断強度の影響を検証した。処理剤A (No. 2) は処理剤B (No. 3)と比較して密着性に優れ、GF強化PA66および鋼の耐摩耗性を大きく向上できることを確認した (図14)。これはしゅう動面において、鋼への攻撃性が高いGFエッジの露出が抑制されるため、鋼の二元アプレッシブ摩耗を抑制でき、また界面を起点とするPA66のき裂の発生も抑制されたためと考える。界面せん断強度を修正Kelly-Tyson則¹⁰⁾に基づき算出したところ、処理剤A, Bでそれぞれ34, 26MPaとなった。このことは、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を示している。

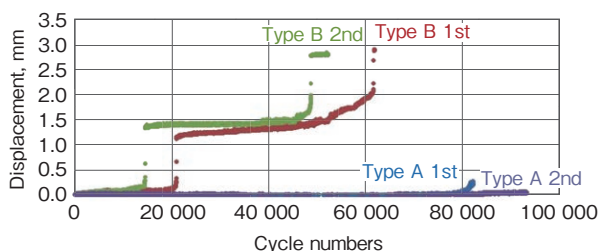


図14 変位に及ぼす GF 表面处理剤種の影響
Effect of GF surface treatment agent on the displacement

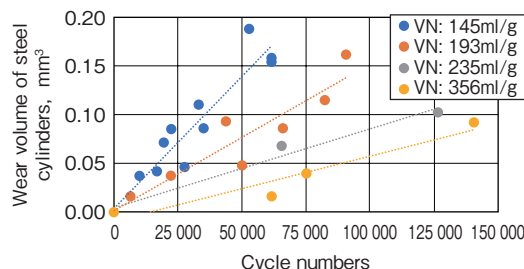


図16 相手材鋼の耐摩耗性に及ぼす PA66 分子量の影響
Effect of PA66 molecular mass on the wear resistance of steel counterpart

5.2 樹脂分子量の影響

次に、同一の GF 種を使用した際の PA66 の分子量が耐摩耗性に及ぼす影響を評価した (No. 1, 2, 4, 5). 分子量の増加に伴い、変位が増大するまでの時間が長くなった (図15). 分子量の増加はじん性を向上し、しゅう動によるせん断応力に由来する GF - PA66 間の界面剥離を抑制する. その結果、界面を基点とする PA66 のき裂進展が抑制されるため、前述の GF 強化 PA66 の二元アブレッシブ摩耗も抑制されたと推察する. さらに、PA66 の分子量増加により、分子鎖の絡み合いがより強固になることで、疲労特性が向上したことも一因である¹⁾. また、分子量の増加により、GF 強化 PA66 の耐摩耗性のみならず、相手材鋼の耐摩耗性も向上することを確認した (図16). これは PA66 - GF 間の界面剥離の抑制で、鋼に対して攻撃性を持つ GF エッジの露出が抑制されるためと推察する.

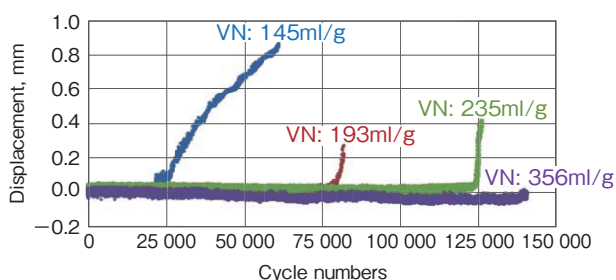


図15 変位に及ぼす GF 強化 PA66 分子量の影響
Effect of GF-reinforced PA66 molecular mass on the displacement

図17に、前述の考察に基づく、分子量の差異が GF 強化 PA66 および鋼の摩耗に及ぼす影響を模式的に示す. 分子量の向上により、PA66 のじん性が向上し、しゅう動によるせん断変形に伴う PA66 - GF 間のすきまの生成が抑制される. 結果、相手材鋼への攻撃性が特に大きい GF エッジの露出が抑制され、鋼の摩耗が抑制されるとともに、すきまを起点とした PA66 のき裂進展が抑制されるため、GF 強化 PA66 の耐摩耗性が向上したものと考えられる.

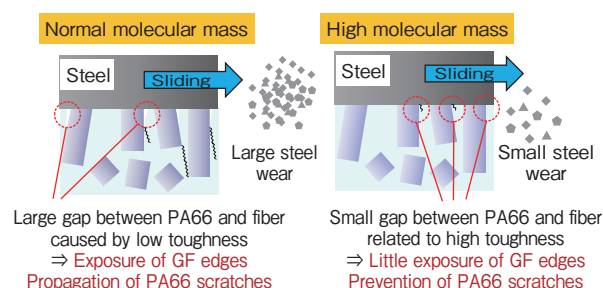


図17 分子量が GF 強化 PA66 および鋼の耐摩耗性に及ぼす影響の概念図

Schematic of effect of molecular mass on wear resistance of GF-reinforced PA66 and steel

5.3 GF 径の影響

同一の GF 種および PA66 分子量において、GF 径が GF 強化 PA66 および鋼の摩耗に及ぼす影響を評価した (No. 2, 6~8). GF 径が小さくなるにつれ、変位の増大が開始するサイクル数は長くなり (図18), 相手材鋼の摩耗は減少した (図19). GF 量が同一においては、GF 径が小さいほど、GF と PA66 の接触面積が増大するため、しゅう動面における GF と PA66 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 エッジの露出が抑制されたと考える. また GF 径を小さくすると、界面剥離を基点と

した樹脂のクラック進展の抑制に加え、GF 強化 PA66 の強度とじん性が向上するため、摩耗と塑性変形も抑制されると考える。図20に、前述の考察に基づく、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。

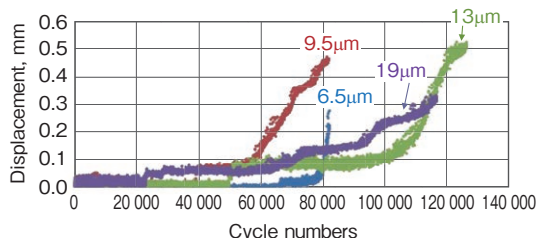


図18 異なる径のGFで強化したPA66の変位推移
Evolutions of displacement using GF-reinforced PA66 with different GF diameter

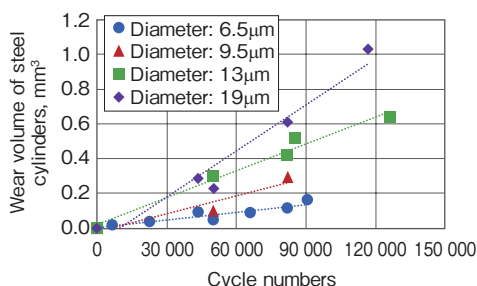


図19 GF強化PA66の異なるGF径における鋼の摩耗量の推移
Evolutions of steel wear using GF-reinforced PA66 with different GF diameter

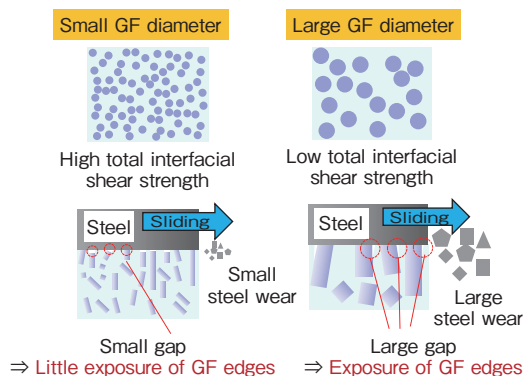


図20 GF径の差異がGF強化PA66および鋼の耐摩耗性に及ぼす影響の概念図
Schematic of effect of GF diameter on wear resistance of GF-reinforced PA66 and steel

上記の結果から、高い界面せん断強度を発現できるGF表面処理剤を適用し、GF強化PA66の分子量を増加させ、さらに細径GFを適用することにより、GF強化PA66のみではなく相手材鋼の摩耗も抑制できるこ

とを確認した。冒頭で述べたように、GF強化材と鋼を接触しゅう動させる場合は、鋼部品の耐摩耗性を向上させるため、熱処理で硬化させることが設計常識であった。これに対し今回の知見は、GF強化PA66の組成の工夫で鋼の耐摩耗性を向上でき、熱処理工程を削減できる可能性を示唆している。

6. 繊維種による摩擦摩耗特性の変化¹¹⁾

6.1 繊維種による繊維強化PA66および鋼の摩耗の変化

これまではGF15%強化PA66の摩擦摩耗特性を評価したが、本章では繊維強化PA66の摩擦摩耗特性に及ぼす繊維種の影響を評価するため、非強化PA66 (No. 10) ならびにCF強化PA66 (No. 11) を評価し、GF強化PA66 (No. 1, 9) と比較した。図21に変位の推移を示す。

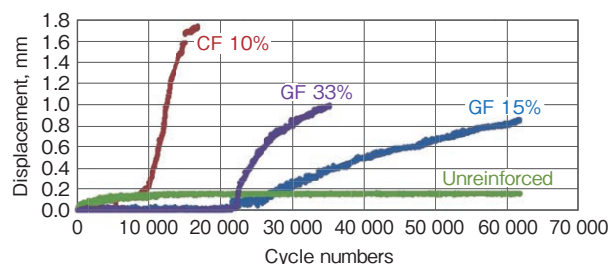


図21 異なる繊維種/量における変位の推移
Evolutions of displacement with different fiber type and amount

非強化PA66は初期に相対的に高い変位を示し、その後安定した。一方、繊維強化PA66は、一定時間が経過した後に変位が急激に増加した。GF33%強化PA66は、GF15%強化PA66と比較し変位の増加速度が大きかった。これに対しCF強化PA66は、GF強化PA66よりもさらに早期に変位の増加が認められた。CF強化PA66とGF33%強化PA66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強化材のほうが耐摩耗性に劣ることが分かった。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が、グリース潤滑下では、グリースによる低摩擦化の効果で凝着が発生しない。このことからCF特有の低摩擦化効果が得られなかったと推定される。

図22に鋼の摩耗量の推移を示す。CF強化PA66と

組み合わせた際は、GF15% 強化 PA66 と比較し摩耗速度が大きく、無潤滑下における過去の研究と逆の傾向を示した⁵⁾。この理由として、繊維と鋼の硬度の関係が考えられる。そこで、ナノインデンテーションを用いて、GFに加えCFの表面硬度測定を実施した(図23)。CFでは硬度の異方性が認められ、垂直方向の硬度はGFよりも35%低く、また鋼の硬度(4.5GPa)よりも低かった。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よると推察する。CFは結晶性が高く、黒鉛結晶の方向性に依存するが、非晶質構造を有するGFでは異方性が認められなかったと考える¹²⁾。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。これより、グリース潤滑下での鋼に対する繊維強化PA66の攻撃性は、繊維や鋼の硬度だけでは決定できないことが分かった。

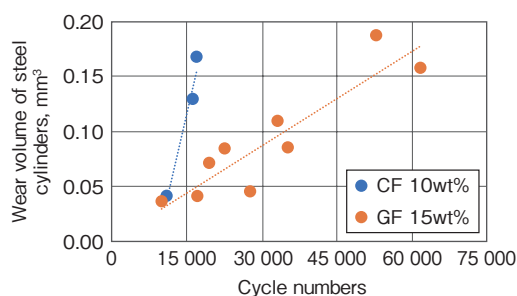


図22 異なる繊維種のPA66と組み合わせた際の鋼の摩耗量の推移

Evolutions of steel wear tested with different type fiber-reinforced PA66

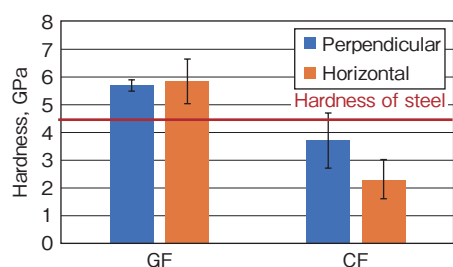


図23 垂直/水平方向におけるGFとCFの硬度
Hardness of GF and CF measured in perpendicular/horizontal direction

6.2 繊維種の差異がPA66の密着性に及ぼす影響

繊維種が耐摩耗性に及ぼす影響について、繊維とPA66の密着性に注目し考察した。図24にCFとGF強化PA66の、120℃における引張試験後の破断面をSEM観察した結果を示す。CF強化PA66では、界面

に空隙が観察され、PA66の伸びに対しCFは付着せず露出していた。一方、GF強化PA66では、界面に空隙はほとんど形成されずGFが強く付着していた。これはCFとGFのPA66に対する密着性の差異を明確に示している。CF強化PA66は、CFとPA66の密着性に劣るため界面にすきまが生じ、CFのエッジが露出し鋼を摩耗させる。さらに、PA66とCFのすきまからき裂が伝搬し、CF強化PA66の摩耗も進行する。これに対しGF強化PA66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のすきまが生成しづらいため、GF強化PA66の二元アブレッシブ摩耗も抑制される。以上より、グリース潤滑下におけるGF強化PA66とCF強化PA66の耐摩耗性の差異は、繊維と鋼の硬度差ではなく、PA66と繊維の密着力の影響が大きいと推察する。

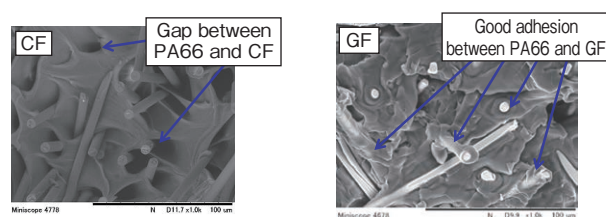


図24 引張試験後の破断面のSEM観察図

SEM observation of fracture surface after tensile test

7. ウォーム減速機ならびに樹脂歯車への適用可能性

最後に、より高負荷条件下にて使用されるウォーム減速機や樹脂歯車への開発技術の適用可能性について提言する。EPSウォーム減速機の樹脂製ウォームホイールには、従来ポリアミド6やPA66といった非強化樹脂が多く適用されてきたが、近年の小型化・高出力化要求により、歯車に対する負荷は増大している。その結果、歯面における変形が増大するとともに歯元強度が不足するため、ラトル音の増加や耐久寿命の不足を招く。これに対し、繊維強化により樹脂歯車の歯元強度を向上させ、かつ本技術により歯面の摩耗や相手材鋼への攻撃性も低減できることから、ウォーム減速機の商品力向上に貢献できる。具体的には、従来の減速機では強度不足でEPSを適用できなかった大型車でもEPSの搭載が可能となり、燃費向上¹⁾ならびに電動化による自動運転への貢献などが期待される。また、すでにEPSが適用されている自動車でも、歯車ならびに周辺部品の小型化が

可能となるため、EPS の商品力向上に貢献ができる。

さらに、構築技術は、ウォーム減速機のみならず、異分野で使用される樹脂歯車ならびに減速機の高性能化にも貢献できる。今後、電気自動車に代表される次世代新エネルギー車が増加する中で、軽量化・静粛性の向上・ならびに低コスト化のニーズは大きくなる。樹脂歯車は鋼歯車と比較し、低比重で NV 特性に優れる。加えて、材料の切削や歯部の機械加工・熱処理・歯研磨といった工程を経て製造される鋼歯車と比較し、樹脂歯車は射出成形で安価に製造可能なため、駆動部品やアクチュエーターに適用する動きが加速すると考える。加えて、新エネルギー車は従来のエンジン車と比較し部品の環境温度が低減されるため、これまで耐熱性の観点で樹脂を用いることが困難であった歯車についても樹脂化の可能性が高まるものとする。非自動車用途においても、今後、協調ロボットを始めとする産業用ロボットの増加で、軽量化による省エネルギー・安全性の確保、ならびに静音性の向上による作業環境の改善や、低コスト化のニーズが増加すると予想される。これら樹脂歯車は、一般的にはポリアセタールや PA66 などに代表される非強化樹脂を、無潤滑下で使用するケースが大半を占めていた。これらに対し、本報で紹介した、樹脂歯車の性能向上につながる材料・トライボロジーの技術を活用することにより、繊維強化樹脂を用いた歯車をグリース潤滑下で使用できるため、今後樹脂歯車を適用できる領域はますます増加するものとする。

8. おわりに

グリース潤滑下における繊維強化 PA66 と鋼のトライボロジー挙動を基礎試験にて評価し、GF 強化 PA66 と鋼の摩耗メカニズムを明らかにした。また、しゅう動界面におけるトライボケミカル反応の解明により、耐摩耗性の温度依存性を説明した。さらに、PA66 の高分子量と細径 GF の適用により、GF 強化 PA66 と鋼の耐摩耗性を向上できることを見出し、そのメカニズムを明らかにした。これらの技術は、EPS のウォーム減速機の小型化・高出力化および高負荷条件下での使用が期待される樹脂歯車に適用が可能であるものとする。

* 1 DP-EPS は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 国島武史, 三宅一徳, 黒川貴則, 新井大和: 電動パワーステアリング用樹脂製ウォームホイール歯面におけるトライボロジー挙動の解明, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013 (2015) 29-35.
- 2) K. Friedrich: Polymer composites for tribological applications, Adv. Ind. Eng. Polym. Res., 1 (2018) 3-39. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>
- 3) N. Myshkin, A. Kovalev: Handbook of polymer tribology: chapter 1: Adhesion and friction of polymers and polymer composite, (2018) 3-45.
- 4) T. Kunishima, Y. Nagai, S. Nagai, T. Kurokawa, G. Bouvard, J.-C. Abry, V. Fridrici, Ph. Kapsa: Effects of glass fiber properties and polymer molecular mass on the mechanical and tribological properties of a polyamide-66-based composite in contact with carbon steel under grease lubrication, Wear 462-463 (2020) 203500. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203500>
- 5) J. Theberge, B. Arkles: Wear characteristics of carbon fiber reinforced thermoplastics, Lubr. Eng. 30 12 (1974) 585-589.
- 6) M.W. Shin, S.S. Kim, H. Jang: Friction and wear of polyamide 66 with different weight average molar mass, Tribol. Lett. 44 (2011) 151-158. <https://doi.org/10.1007/s11249-011-9833-3>
- 7) T. Kunishima, T. Kurokawa, H. Arai, V. Fridrici, Ph. Kapsa: Reactive extrusion mechanism, mechanical and tribological behavior of fiber reinforced polyamide 66 with added carbodiimide, Mater. Des. 188 (2020) 108447. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108447>
- 8) T. Kunishima, Y. Nagai, T. Kurokawa, G. Bouvard, J.-C. Abry, V. Fridrici, Ph. Kapsa: Tribological behavior of glass fiber reinforced-PA66 in contact with carbon steel under high contact pressure, sliding and grease lubricated conditions, Wear 456-457 (2020) 203383. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203383>
- 9) T. Kunishima, S. Nagai, T. Kurokawa, J. Galipaud, G. Guillonnet, G. Bouvard, J.-C. Abry, C. Minfray, V. Fridrici, Ph. Kapsa: Effects of temperature and addition of zinc carboxylate to grease on the tribological properties of PA66 in contact with carbon steel, Tribo. Int. 153 (2021) 106578. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106578>
- 10) H. Fukuda, T. Chou: A probability theory of the strength of short-fibre composites with variable

- fibre length and orientation, J. Mater. Sci. 17 (1982) 1003-1011. <https://doi.org/10.1007/BF00543519>
- 11) T. Kunishima, Y. Nagai, G. Bouvard, J.-C. Abry, V. Fridrici, Ph. Kapsa: Comparison of the tribological properties of carbon/glass fiber reinforced PA66-based composites in contact with steel, with and without grease lubrication, Wear (2021) 203899. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203899>
- 12) Y. Sun, G. Zhao, F. Yang: Anisotropic behavior of the nanoindentation of single carbon fibers, Nanosci. Nanotechnol. Lett. 6 (2014) 596-600. <https://doi.org/10.1166/nnl.2014.1809>

筆 者



国島武史*

T. KUNISHIMA



ヴァンセント・フリデリシ**

V. FRIDRICI



フィリップ・カプサ**

P. KAPSA

* 研究開発本部 材料研究部 博士 (工学)

** Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon 博士 (工学)