

鋼-PTFE しゅう動の耐摩耗性に及ぼすグリース組成および性状の影響

Effect of grease composition and properties on the wear resistance of steel-PTFE sliding system

ジェイテクト（正）\*河北 恭佑      ジェイテクト（正）\*山下 侑里恵

Kyosuke Kawakita\*, Yurie Yamashita\*

\*JTEKT CORPORATION

1. はじめに

軽量化・静粛性向上の観点から、自動車のしゅう動材料として樹脂材料が使用されており、特に、自己潤滑性・耐熱性・化学的安定性に優れる PTFE が広く採用されている。一般に PTFE は無潤滑で使用されることが多いが、自己犠牲的に潤滑するため摩耗が多くなる。対策としてグリースが併用されるが、グリース組成や性状が PTFE の摩耗に及ぼす影響については不明な点が多い。そこで本研究では、組成を変更したグリースの性状を定量化し、統計解析および機械学習手法によりグリース組成や性状が PTFE の摩耗に及ぼす影響を明らかにした。

2. 評価内容

2.1 評価グリース

グリース組成や性状が PTFE の摩耗に及ぼす影響を明らかにするため、異なるグリースを調製した。評価グリースの組成および均質分散処理条件を Table1 に示す。増ちょう剤凝集体の大きさによる影響を明らかにするため、均質分散処理方法として分散性および均質能力が異なるコロイドミルと 3 本ロールミルの 2 種類を用いた。

Table 1 Compositions and properties of sample greases

Sample	L1	L2	L3	L4	L5	U1	U2	U3
Thickener	Lithium soap	Lithium soap	Lithium soap	Lithium soap	Lithium soap	Aliphatic diurea	Alicyclic diurea	Aromatic diurea
Base oil	PAO	PAO +Ester1 (1:1)	PAO +Ester2 (1:1)	PAO +Ester2 (8:2)	PAO +Ester2 (8:2)	PAO	PAO	PAO
Grinding and dispersing method	Three roll mill	Three roll mill	Three roll mill	Three roll mill	Colloid mill	Three roll mill	Three roll mill	Three roll mill
Worked penetration (RT)	318	305	297	314	317	280	299	317

PAO: Poly- $\alpha$ -olefin

2.2 グリース性状の定量化

PTFE の摩耗に影響すると考えられる因子として、A: グリースの見かけ粘度、B: 粘性移行応力<sup>1)</sup>、C: 増ちょう剤の繊維形態、D: 増ちょう剤の凝集体数、E: 基油分子のトポロジカル極性表面積 (Topological Polar Surface Area; TPSA) の最大値、F: 増ちょう剤分子のアルキル鎖長に着目した。これらの因子は以下に示す手法を用いて測定した。グリースのレオロジー特性 (A, B) は、レオメータ (MCR302, Anton Paar 製) を用いて評価した。測定条件を Table 2 に示す。増ちょう剤の繊維形態 (C) は走査型電子顕微鏡 (JSM-7100F, 日本電子製) による観察像から、繊維の 2 次元真円度 (Circularity) を測定し定量化した。増ちょう剤の凝集体数 (D) は共焦点レーザー蛍光顕微鏡を用い、5  $\mu$ m を凝集体の閾値として設定し、5  $\mu$ m 以上のものを凝集体としてカウントした。TPSA (E) は基油分子表面のうち極性を帯びている部分の面積を表しており<sup>2)</sup>、データ分析ソフト Chemistry Development Kit を用いて評価した。増ちょう剤分子のアルキル鎖長 (F) は、増ちょう剤分子構造から最も鎖長が長いアルキル基の炭素数を用いた。

Table 2 Rheological property test conditions

Test of apparent viscosity	Plate	$\phi$ 25 Cone plate
	Clearance, mm	0.1
	Shear rate, s <sup>-1</sup>	1
	Test duration, min	5
	Temperature, °C	25
Test of transition stress of viscoelasticity	Plate	$\phi$ 25 Parallel plate
	Clearance, mm	1
	Frequency, Hz	1
	Strain, %	0.01-100
	Temperature, °C	25

2.3 耐摩耗性評価

グリース潤滑下における PTFE の耐摩耗性を評価するため、鋼シリンダー (SUJ2 製円筒,  $\phi$  15 $\times$ 22 mm, Ra: 0.1  $\mu$ m)

と PTFE の平板 (24×16×1.5 mm, Ra: 0.5 μm) を用いて往復動摩擦摩耗試験 (SRV 試験) を行った。試験条件を Table 3 に示す。試験後の試験片の摩耗痕は、レーザー顕微鏡 (OLS4100, OLYMPUS 製) を用いた。本研究ではこの高さ情報から PTFE の最大摩耗深さを測定し、耐摩耗性の評価は各グリースにおいて 2 回測定した平均値を比較した。

Table 3 SRV test conditions

Load, N	100
Amplitude, mm	1.0
Frequency, Hz	50
Average speed, mm/s	100
Temperature, °C	120
Test duration, h	1

## 2.4 データ解析手法

グリース性状や増ちょう剤形態の各因子が摩耗に及ぼす影響度を明らかにするため、統計解析および機械学習を行った。説明変数は 2.2 項で示した A から F までの因子を用いた。今回のサンプル数における解析精度を比較するため、重回帰分析、Elastic Net 回帰分析を実施した。一連の検証には解析ソフト (Stat Works, 日本科学技術研修所製) を使用した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 グリース組成が PTFE の耐摩耗性に及ぼす影響

Figure 1 に各グリースにおける PTFE の摩耗量を評価した結果を示す。Li 石けん増ちょう剤を用いた場合は、ウレア増ちょう剤を用いた場合と比較し良好な耐摩耗性が得られた。ウレア増ちょう剤の中では、特に脂肪族ウレアを用いた際に摩耗が少なくなった。一方、Li 石けん系 (L1~L5) の比較より、基油および均質分散処理方法は、耐摩耗性にほとんど影響しなかった。これらの影響を考察するため、グリース性状の定量化を試みた。

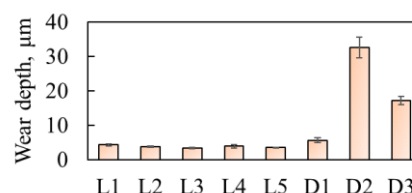


Fig. 1 Results of SRV test

### 3.2 グリース性状の定量化

Figure 2 に各グリースにおける A から F の因子を定量化した結果を示す。A: グリースの見かけ粘度や B: 粘性移行応力についてはグリース組成や均質分散処理条件による明確な影響が確認されなかった。C: 増ちょう剤繊維の真円度に注目すると、脂肪族ウレア, Li 石けん, その他のウレア増ちょう剤の順に繊維が細長くなることがわかった。D: 増ちょう剤の凝集体数は 3 本ロールミル処理の方が少なく、狙い通り凝集体が微細化されていた。E: 基油分子の TPSA の最大値を定量化した結果, Ester2, Ester1, PAO の順に大きいことがわかった。F: 増ちょう剤分子のアルキル鎖長は Li 石けん, 脂肪族ウレア, その他ウレアの順に大きい。この結果を用いて、各グリースにおける A-F の因子が耐摩耗性に及ぼす影響を評価するため、統計解析および機械学習を行った。

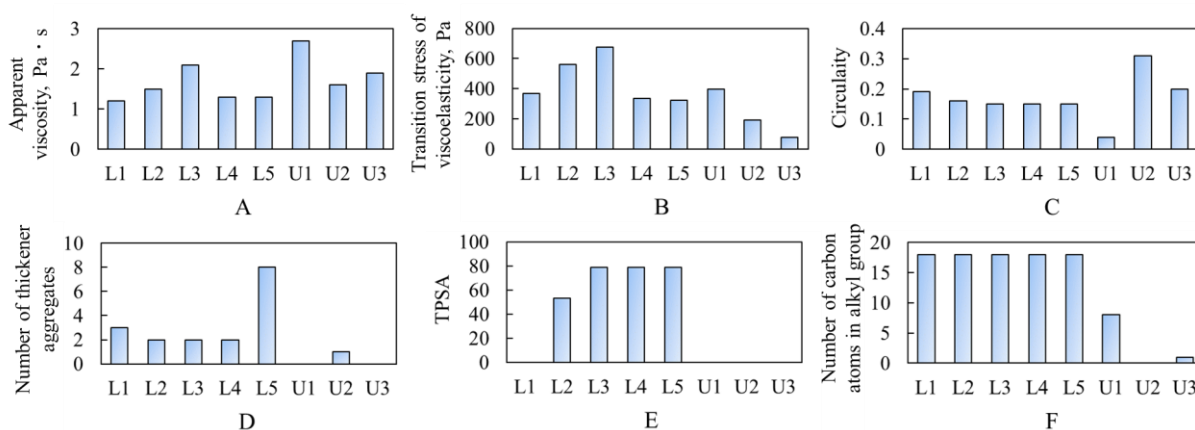


Fig. 2 Results of grease properties and thickener form

### 3.3 グリース性状が PTFE の耐摩耗性に及ぼす影響

重回帰分析モデルを構築した結果、決定係数が 0.95 となった (Figure 3 (a))。このことから、今回のモデルでは説明変数に含まれる因子が目的変数に強い影響を与えていることが確認できた。Figure 3 (b)に重回帰分析における標準偏回帰を示す。C: 増ちょう剤繊維の真円度, F: 増ちょう剤分子のアルキル鎖長の影響度が高く、それ以外の説明変数は目的変数の変動に全く影響を与えていなかった。Elastic Net においても決定係数が 0.96 となり、高いモデル適合性を確認できた。Figure 4 に Elastic Net 回帰分析モデルの決定係数と標準偏回帰係数を示す。重回帰分析の結果と同様に、C および F の影響度が高くなった。今回説明変数に用いたデータ数では、重回帰分析と Elastic Net 回帰分析ともに主な影響因子が C および F となり同様であったが、他因子においてわずかな差が認められた。この差に関しては今後の検討課題である。

これらの結果と標準偏回帰係数から、PTFE の耐摩耗性に及ぼす各因子の寄与度が明確化された。繊維形態が細長く (アスペクト比が大きい)、増ちょう剤分子のアルキル鎖が長いグリースが、PTFE の耐摩耗性を向上させるのに有

効であることが分かった。これは、アスペクト比が大きいほど繊維同士が絡みあい、しゅう動面から排出され難くなり、PTFE の摩耗を抑制したものと考える。また、チェーンマッチング理論<sup>3)</sup>で提案されているように、極性基をもつ増ちょう剤分子のアルキル鎖長が長いほど基油を抱き込むことで、密な潤滑膜を形成でき、PTFE の耐摩耗性が向上したと推定した。一方、基油の極性や増ちょう剤の微細化レベルによる摩耗への影響は認められなかった。基油の表面吸着よりも増ちょう剤分子の抱き込みによる油膜形成が支配的となり、また 5  $\mu\text{m}$  以上の増ちょう剤の凝集体はしゅう動面に侵入できなかったためと考えられる。

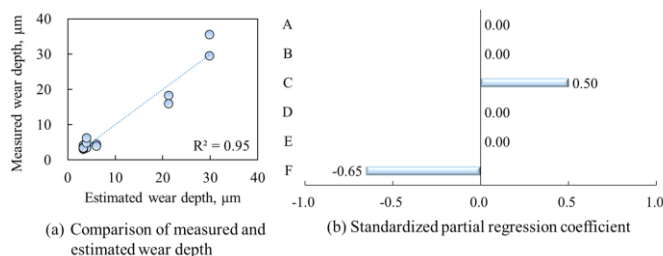


Fig. 3 Multiple regression analysis

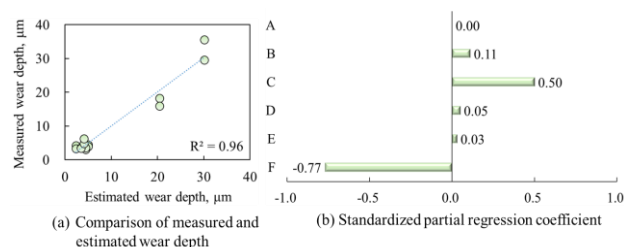


Fig. 4 Elastic net regression analysis

#### 4. おわりに

- 1) PTFE の耐摩耗性に対して、増ちょう剤の繊維形態とアルキル鎖長の寄与が大きいことがわかった。一方で、基油の極性や均質分散処理方法の寄与は小さいことがわかった。
- 2) 重回帰分析や Elastic Net 回帰分析を用いることで PTFE の耐摩耗性に寄与する因子を絞りこめた。今回用いたデータ数では、重回帰分析と Elastic Net 回帰分析の結果に大きな違いは認められなかった。

#### 文献

- 1) 新田・津田・新井・坂本・酒井：転がり軸受のトルクにおけるジウレアグリースの粘性移行応力と増ちょう剤分子構造の影響—脂肪族ジウレアの末端アルキル鎖長の影響—，トライボロジスト，61，10 (2016) 699.
- 2) P. Ertl, B. Rohde & P. Selzer: Fast Calculation of Molecular Polar Surface Area as a Sum of Fragment-Based Contributions and Its Application to the Prediction of Drug Transport Properties, J. Med. Chemistry, 43, 20 (2000) 3714.
- 3) T. C. Askwith, A. Cameron & R. F. Crouch: Proc. Roy. Soc. Lond. A, 291 (1966) 500.