

スラスト玉軸受のフレッチング摩耗特性に及ぼすグリース増ちょう剤の影響-第 2 報-

The Effect of Grease Thickener Type on Fretting Wear Characteristics of Thrust Ball Bearings -Part2-

出光興産（正）*中島 聡, 出光興産（正）叶野 花菜子, 出光興産（正）藤浪 行敏,

九州大学（院）石原 昌悟, 九州大学（正）田中 宏昌

So Nakajima*, Kanako Kano*, Yukitoshi Fujinami*, Shogo Ishihara**, Hiroyoshi Tanaka**

*Lubricants Research Laboratory, Idemitsu Kosan Co., Ltd.

**Kyushu University

1. 緒言

フレッチング摩耗は、接触する 2 つの物体間の揺動が繰り返されることで接触面に微小な損傷が蓄積し、材料が破損する現象である。自動車や産業機械の様々な分野の転がり軸受にグリース潤滑が適用されており、揺動する環境においては機械面・グリース面からのフレッチング摩耗防止対策が必要となる。軸受設計からの対策としては、軸受の隙間の調整、レースの溝半径の拡大が報告されている¹⁾。グリースに着目すると、金属接触域への潤滑剤の供給が重要なポイントである。例えば、基油粘度が低く離油度が高いほど、接触域に基油が供給され、フレッチング摩耗が低減されると報告されている^{2),3)}。また、ウレアグリースの増ちょう剤粒子径を小さくすることで、フレッチング摩耗が低減される可能性が示唆されている⁴⁾。フレッチング摩耗のみに着目した場合、基油の低粘度化は対策の 1 つとなり得るが、基油粘度は油膜保持あるいは金属接触防止の観点で選定すべきものであり、実用的には基油粘度・離油度・その他の手法も含めた対策が必要となる。第 1 報では増ちょう剤の異なるグリースの流動性に着目し、レオロジー特性の 1 つである flow point と増ちょう剤粒子サイズの点からフレッチング摩耗防止メカニズムを考察した⁵⁾。本報ではグリースの流動状態のその場観察および降伏挙動を始めとするレオロジー特性について検証し、フレッチング摩耗との関連について考察する。

2. 供試サンプル

供試グリース性状を Table 1 に示す。増ちょう剤には A: Li セッケン, B: Li コンプレックスセッケン, C: 脂環式-脂肪族ジウレア, D: 微細化した脂環式-脂肪族ジウレアを用いた。増ちょう剤の影響に着目するため、基油は粘度グレード ISO VG100 のポリアルファオレフィン (PAO) で統一し、混和ちょう度は 265~295 (NLGI No.2) とした。グリース増ちょう剤の粒子径 (メディアン径: D50) は島津製作所製の SALD-7500nano を用いて測定した値を掲載した。

Table 1 General properties of sample greases

Test Items	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Thickener type	Lithium soap	Lithium complex soap	Alicyclic - aliphatic diurea	Alicyclic - aliphatic nano diurea
Thickener content, mass%	11	18	10	12
Base oil type	Poly- α -olefin(VG100)			
Worked penetration (RT)	271	268	268	287
Dropping point, °C	206	252	260<	260<
Thickener median size / D50, μm	5.2	10.3	25.4	1.9

3. 実験方法

3.1. フレッチング摩耗試験

フレッチング摩耗試験は Figure 1 に示す試験機にて実施した。試験条件は Table 2 に示す通りで、試験後軸受のレースの摩耗量の平均値で比較した⁵⁾。

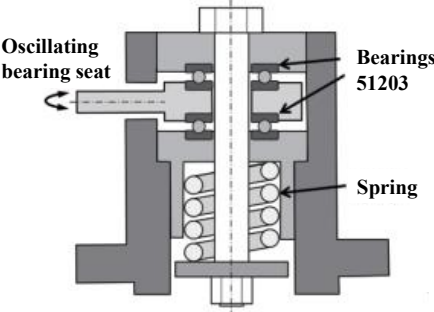


Figure 1 Schematic image of fretting wear test apparatus

Table 2 Fretting wear test conditions

Bearing	51203
Grease amount	1.0 g
Load (Hertzian pressure)	2940N (0.9GPa)
Frequency	25Hz
Oscillation angle	$\pm 6^\circ$ ($\pm 1.05\text{rad}$)
Temperature	RT
Test duration	1, 5, 10, 22h

3.2. グリース流動状態の観察

揺動（往復転がり）下におけるグリースの流動性について、蛍光顕微鏡を用いた流れ観察を実施した。装置の概要および試験条件を Figure 2, Table 3 に示す。本装置はディスク・ボールをそれぞれ独立して回転させることで潤滑面を形成させる。各グリースサンプルに蛍光剤の一種である Coumarin6 を 300ppm 添加し、CCD カメラによるグリースの蛍光観察を行った。Coumarin6 は増ちょう剤と親和性が高く、増ちょう剤の蛍光観察に適している。フレッチング摩耗試験を想定した往復転がり条件で、ディスク／ボールの滑り率をゼロとした。

3.3. レオロジー測定

Anton Paar 製の粘弾性測定装置を用いて Table 4 に示す条件で貯蔵弾性率 G' 、損失弾性率 G'' を測定した。本報ではひずみ $\gamma=0.1\%$ における G' に対して、 G' が 10%低下するひずみ： γ_y におけるせん断応力を yield stress: τ_y とした。また、 $G''/G'=1$ となるグリースのせん断応力を flow point: τ_f とし、各グリースサンプルの流動性の指標として比較した⁶⁾。

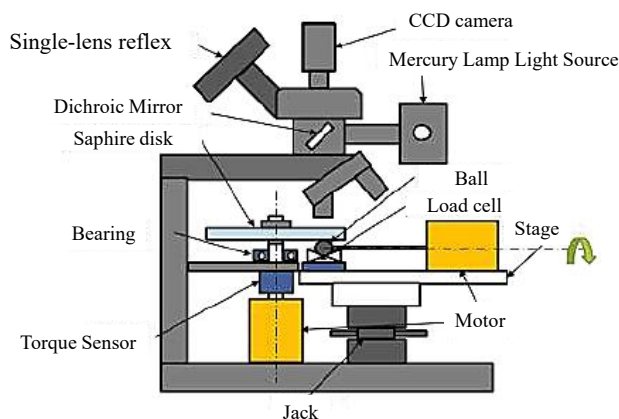


Figure 2 Schematic diagram of rolling sliding contact tester with fluorescence microscope

Table 3 Fluorescence observation conditions

Disc/Ball	Saphire/SUJ2
Load	5N
Frequency	8Hz
Stroke	4.58mm
Speed	73.3mm/s
SRR	0%
Number of rounds	25 cycles

Table 4 Rheological property test conditions

Apparatus	Anton Paar MCR 302
Plate	φ25 Parallel plate
Gap	1.0 mm
Temperature	25°C
ω	10rad/s
Strain γ	0.01 – 1000%

4. 実験結果と考察

4.1. フレッチング摩耗試験結果

供試サンプルのフレッチング摩耗試験結果を Figure 3 に示す。特に Sample B, C の摩耗量が経時的に増加する傾向がみられた。22 時間後の摩耗量を比較すると、Sample C（ジウレア）が最も多く、Sample D（微細化したジウレア）が最も摩耗量が少なかった。なお本結果は既報にて報告済である⁵⁾。

4.2. 流動状態の観察結果

蛍光観察の一例として、25 往復後の静止状態の接触域近傍のグリース観察結果を Figure 4 に示す。緑色蛍光を示した部分にグリース増ちょう剤が存在する。Sample D は 25cycle 後にフィンガーキャビテーション以外の空隙は観察されず、フィンガーキャビテーションの形も端の長い規則的な形となった。Sample A は Sample D と同様に規則的なフィンガーキャビテーションが見られたが、一部空隙が見られ、増ちょう剤の堆積・凝集が確認された。Sample B, C においてはフィンガーキャビテーションが不規則となり、空隙が見られた。フィンガーキャビテーションの形状はせん断場におけるグリースの流動性と関連していると考えられ、流動性の良いサンプル程規則的になることが知られている。

本観察はフレッチング摩耗試験と同様に往復転がりの接触形態での試験であり、実際のフレッチング摩耗試験における摩耗との関連について考察する。最も摩耗量が少なかった Sample D ではフィンガーキャビテーションが規則的であり、摩耗量多かった Sample C において、フィンガーキャビテーションが顕著に不規則になっている。これは接触域でのグリースの流動性と摩耗量に一定の相関があることを示すものであると考える。

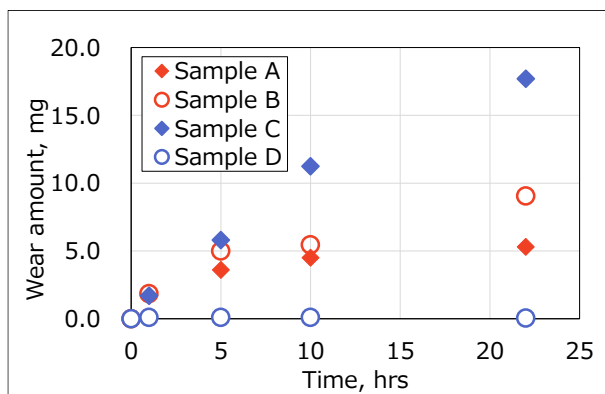


Figure 3 Fretting wear test results for each grease

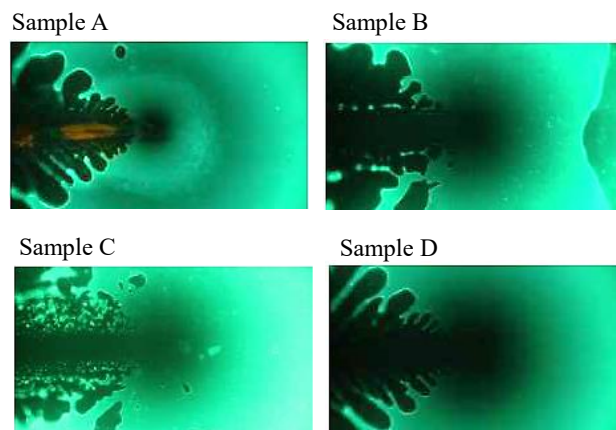


Figure 4 Fluorescence observation after 25 cycles

4.3. レオロジー測定結果

各グリースの流動性の指標として、ひずみ分散測定から得られたせん断応力と G' および G'' との関係、yield stress: τ_y と flow point: τ_f を Figure 5 に示す。ここで τ_y と τ_f の意味について触れる。 τ_y は微細構造・粒子ネットワークが壊れ始め不可逆になる応力であり、最初に動き出すために超えなければならない応力の閾値である。一方、 τ_f は $G' = G''$ になる応力であり、グリースが動き始めてから弾性より粘性が優勢になり、液体として振る舞う点である。いずれもグリースの流動性の指標であるが、 τ_y が小さいほどグリースが動き出しやすく、 τ_f が小さいほど動き始めたグリースが液体的に振る舞うと言える。今回の測定結果では τ_y と τ_f は共に Sample D < A < B < C の順で小さく、Sample D が最も動き始めに必要な応力が小さく、動き始めた後も液体的に振る舞う傾向であることが示唆された。

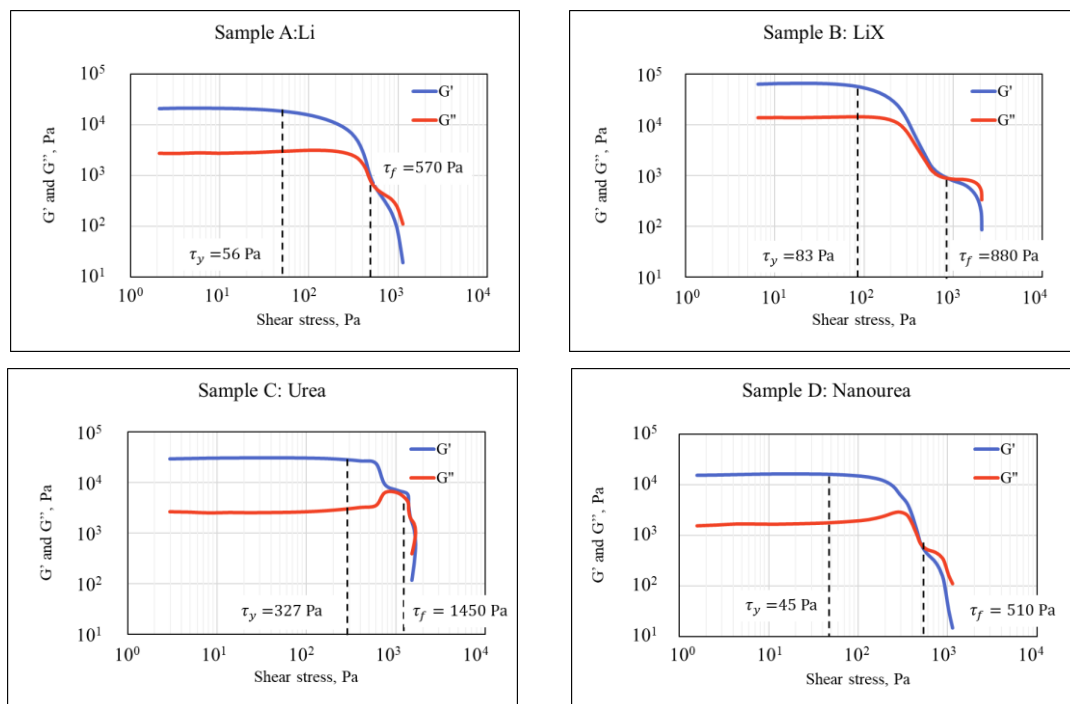


Figure 5 Amplitude sweep test results for sample A~D

4.4. 考察

レオロジー測定において τ_y と τ_f を指標とした流動性でみると Sample D が最も流動性が高く、Sample C が最も流動性が低い結果となった。これは蛍光観察から得られたフィンガーキャビテーションの状態と一定の相関があると考えられる。また、流動性の指標である τ_y と τ_f の大きさの順列：Sample D < A < B < C は、摩耗量の順列：Sample D < A < B < C と一致しており、更にサンプルの粒子径 (D_{50}) の順列とも一致する。以上のことからグリース増ちょう剤のサイズ制御による流動性向上が、フレッチング摩耗防止に有効である可能性が示唆された。一方で、今回の蛍光観察では増ちょう剤の堆積も確認された。実際の接触域では増ちょう剤の濃度変化、基油の分離等が時間経過とともに起こると推察され、今後は摩耗との関連性を考察していきたい。

5. 結言

基油および増ちょう度グレードが同一のリチウム系・ウレア系のグリースにおいて、粒子径サイズの制御および流動性の制御がフレッチング摩耗対策の手法の1つとなることが期待される。

文献

- 1) 其俊, 志摩政幸, 相原了, 山本隆司, 佐藤準一: 転がり軸受のフレッチング摩耗に関する研究 (第6報) トライボロジスト, 42, 6 (1997) 470.
- 2) 喜多武勝, 山本雄二: 揺動スラスト玉軸受におけるリチウム石けんグリースの耐フレッチング摩耗特性, トライボロジスト, 42, 6 (1997) 492.
- 3) 丸山泰右, 齋藤剛: 油およびグリース潤滑下におけるフレッチング摩耗防止メカニズムの違い, トライボロジスト 56, 12 (2011), 788.
- 4) 渡邊剛, 関口浩紀: ウレアグリースのフレッチング摩耗特性, トライボロジー会議 2017 秋(高松)予稿集.
- 5) 中島聡, 藤浪行敏: スラスト玉軸受のフレッチング摩耗特性に及ぼすグリース増ちょう剤の影響, トライボロジー会議 2024 秋(名護)予稿集
- 6) A.J. Abou-Kassem et al.: A review of methods used for rheological characterization of yield-power-law (YPL) fluids and their impact on the assessment of frictional pressure loss in pipe flow, Geoenergy Science and Engineering, 229 (2023), 212050