

転がり軸受におけるグリース潤滑シミュレーション ―ちょう度試験解析― Grease Lubrication Simulations in Rolling Bearings – Penetration Test –

日本精工（株）（正）*野田 隆史, 日本精工（株）（正）柳澤 穂波

日本精工（株）（非）和田 克啓, 日本精工（株）（非）山本 和也

Takashi Noda¹, Honami Yanagisawa¹, Katsuhiko Wada¹, Kazuya Yamamoto¹

¹ NSK Ltd.

1. はじめに

グリースは基油と増ちょう剤を主成分とする半固体状の物質である。取扱いの容易さから転がり軸受に頻繁に採用され、脱炭素社会に向けた自動車の電動化の流れを受けてグリース潤滑に対する要求や期待が高まっている。また、液体の油に繊維状の構造物が混ざったコロイド分散体を成すことから、油にはない複雑な特性を外的作用に対して示すことが知られている。せん断の程度に応じて見かけ粘度が 10^9 スケールの範囲で変化するせん断速度依存性が代表的な特性であり、その発現過程には分子ミセルの配向や破壊といった増ちょう剤構造の挙動が深く関わっていると考えられている¹⁾。これまで著者らは、大型放射光施設 SPring-8 を利用した Rheo-USAXS 測定や小角散乱シミュレーションにより、サブミクロンスケールで起こる増ちょう剤構造のダイナミクスについて解明を進めてきた^{2,3)}。また、基油と増ちょう剤成分の相互作用から繊維凝集プロセスを再現した研究⁴⁾や、グリースの組成、構造、物性の繋がりを数値シミュレーションにより様々な時空間スケールで深く理解しようという取り組み⁵⁾が、近年盛んに行われている。しかし、上記のようなミクロ・メソシミュレーションをスケールアップしてマクロスケールの製品価値に繋げることは、計算時間の観点から容易ではない。現状は、グリース潤滑に関わる諸々の物理・化学的現象を階層化して切り分け、各階層間の入出力を時空間スケールで適切に連結するという方法が、グリースのような複雑流体を Cyber 空間上で扱う際には有効と考えられる。

本研究では、転がり軸受におけるグリース潤滑のマルチスケールシミュレーション技術の構築を見据えて、マクロ側の受け手になり得るちょう度試験（グリース品質管理項目のひとつ⁶⁾）に注目し、せん断速度依存性をレオロジーモデルに適用した流体解析⁷⁾が、グリースのちょう度をどの程度表現できるか調査した結果について報告する。

2. 計算手法

ちょう度とは試料の硬さに関する指標であり、“力（荷重）、時間及び温度の規定条件において、標準円すいが試料に進入する距離”として定義されている⁸⁾。グリースの場合、室温環境下（25℃）において既定の円すいを試料表面と接した状態から自由落下させ、5 秒間に円すいが進入した深さを読み取り算出する（1/4 円すいの場合、 $P=3.75p+24$ 。ここで P : 求めるちょう度、 p : 1/4 円すいを用いて得られたちょう度）。Figure. 1 にちょう度試験装置（1/4 円すい）の外観とその解析モデルを示す。円すいモデルの寸法、質量は、JIS K2220⁸⁾に基づき設定した。今回扱ったグリース（7 種）の混和ちょう度を Table 1、流動曲線及び Carreau-Yasuda モデルによりフィッティングした曲線を Fig. 2 にそれぞれ示す。空気とグリースの界面捕獲には VOF（Volume of Fluid）法、円すいの運動は、オーバーセットメッシュ制御に基づく流体機構連成解析により、グリースと円すい間に働く相互作用を考慮して計算した。

3. 結果と考察

円すいがグリースに進入する様子とグリース内部の粘度分布を Fig.3 左に示す。円すいの進入に伴い界面付近を中心にグリース粘度が低下して円すいは沈降を続けるが、約 0.05 秒（フェーズ I）にかけて円すいの自重とグリースからの反力が釣り合う方向に進むことにより急激なブレーキがかかり落下が一旦停止した。そしてその後約 4.95 秒（フェーズ II）かけて徐々に沈み込んでいく様子が計算された。Figure. 3 右は、5 秒間の進入距離を基に算出したちょう度と混和ちょう度の実測値との関係を 7 種類のグリース（Table 1）について整理したグラフである。計算ちょう度は実測値よりも大きめの値を示す傾向となったが、せん断速度依存性を考慮した流体解析によりちょう度試験の評価が概ね可能であることが分かった。計算ちょう度が大きく（グリースとしては軟らかく）なった原因は、フェーズ II の円すいの挙動が現実と乖離していることが挙げられる。フェーズ II において円すいの沈み込みは実験的に観測されないが、計算では円すい付近に生じる僅かな速度変動がグリースの軟化を引き起こし、その結果徐々に沈み込む結果となった。この点については、グリースの弾性力が円すいを支える効果を粘弾性モデルで与えることで改善されると考える。

Figure. 4 は、0.2 秒間にグリース内部に発生するせん断速度分布の時刻歴を可視化したものである。円すいが一時停止する 0.05 秒にかけてせん断速度の支配的なピークが最大 1000 s^{-1} 付近に到達したことが分かる。すなわち、ちょう度試験で考慮できるグリースのせん断速度依存性は 1000 s^{-1} 以下の限定的なものであり、それ以上の速度域の影響について評価範囲外の試験法であることが分かる。

Table 1 Measured worked penetrations of the test greases

Grease	A	B	C	D	E	F	G
Worked penetration	200	226	237	247	268	272	299

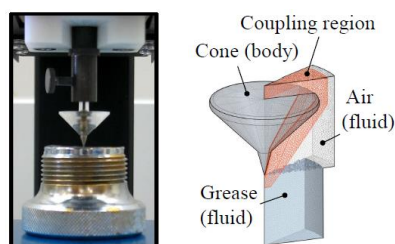


Fig. 1 Left: penetrometer, right: numerical model of 1/12 sector sized penetrometer

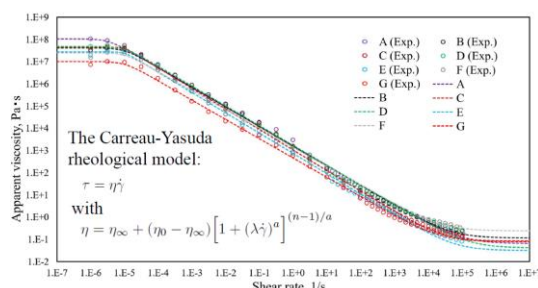


Fig. 2 Flow curve of the test greases

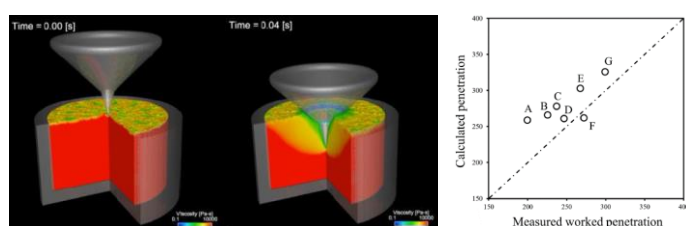


Fig. 3 Left: appearance of grease distribution and viscosity change due to cone dropping, right: comparison of grease consistency derived from calculated penetration depth and measured worked penetration

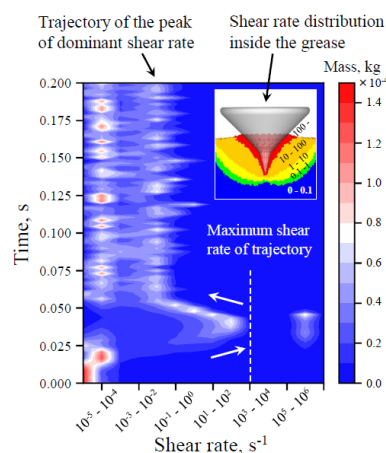


Fig. 4 Time dependency of the mass of each shear rate inside the grease

4. おわりに

流体機構連成解析によりちょう度試験を再現した結果、グリース種違いのちょう度を計算で概ね評価できることが分かった。しかしながら、グリースのレオロジー特性をちょう度だけで示すことは実用上難しいとされている⁶⁾。これはグリースが複雑系システムの様相を呈していることに起因しており、ある評価法ではグリース特性の発現が限定的になるためと考えられる。転がり軸受の価値向上を目指し、潤滑グリースの組成-構造-物性の関係解明を順/逆双方向の視点からアプローチ可能なツールの構築に向け、今後取り組みを進めていく。

文献

- 1) P.M. Lugt: Grease Lubrication in Rolling Bearings, John Wiley & Sons, Ltd. (2013)
- 2) T. Noda, Y. Takayama, S. Kuwamoto, K. Sonoda, H. Washizu: Observation of Shear-Induced Orientation Change of Grease Thickener Structure Using Ultra-Small-Angle X-ray Scattering, TUE-T6-S5-R8, 7th World Tribology Congress, WTC2022, Lyon, France (2022)
- 3) 野田・高山・桑本・園田・鷺津：せん断流下における潤滑グリースの増ちょう剤構造変化とレオロジー特性，トライボロジー会議 2022 秋福井，B36 (2022)
- 4) T. Hasegawa, N. Sugimura, H. Washizu: Coarse graining simulation for behavior analysis of micelles under shear flow, C3-4-03, 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022), Nagoya, Japan (2022)
- 5) R. Si, Q. Ren, Y. He, J. Long: Molecular self-assembling structure and formation mechanism of lubricating grease: A computational simulation approach, *Tribology International*, 179 (2023) 108150.
- 6) 小宮：グリースのちょう度—試験法と意義，トライボロジスト，57, 10 (2012) 701.
- 7) T. Noda, K. Shibasaki, S. Miyata, M. Taniguchi: X-ray CT Imaging of Grease Behavior in Ball Bearing and Numerical Validation of Multi-Phase Flows Simulation, *Tribology Online*, 15, 1 (2020) 36.
- 8) 日本規格協会：JIS K2220, グリース (2013)