

粘弾性モデルを用いたグリース物性の数値解析 Simulating Material Property Tests for Grease with Viscoelasticity

日本精工（株）（正）*山本 和也, 日本精工（株）（正）野田 隆史

Kazuya Yamamoto¹, Takashi Noda¹

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。代表的な特性として、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や、外力に対する応答がせん断速度のみならずひずみにも依存する粘弾性が挙げられる。これら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)}。また著者ら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⁴⁾）がひずみ速度依存性をレオロジーモデルに適用した流体解析⁵⁾によりどの程度表現できるか過去に調査した⁶⁾。一方で粘弾性については実験的な測定及び軸受内グリース挙動への影響に関する定性的な議論がこれまでなされてきたものの、グリースの分野で粘弾性モデルに関する議論や数値解析の事例はない。本研究では粘弾性モデルを実装した流体解析によりちょう度試験のシミュレーションを行い、その効果を従来の粘度のせん断速度依存性モデルと比較検証した結果を報告する。

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、標準円錐が試料に進入する距離”として定義されている⁷⁾。グリースの場合、室温環境下（25°C）において既定の円錐を試料表面と接した状態から自由落下させ、5 秒間に円錐が進入した深さを読み取り算出する（1/4 円錐の場合、 $P=3.75p+24$ 。ここで P : 求めるちょう度, p : 1/4 円錐を用いて得られたちょう度）。円錐モデルの寸法、質量は、ASTM D1403⁷⁾に基づき設定した。本研究ではちょう度の値に加えて高速度カメラにより円錐の変位を追跡した。NLGI グレード 3 のリチウム石鹸グリース 1 種を対象とした。解析での粘性モデル(V)には Fig.1 に示す Carreau-Yasuda モデルによりフィッティングした流動曲線を用いた。一方粘弾性モデル(VE)には Fig.2 に示す動的粘弾性試験結果に Bird-Carreau ひずみ速度依存性を組み込んだ White-Metzner モデル^{8,9)}にフィッティング^{10,11)}して得られたパラメータを用いた。多数存在する粘弾性モデル¹²⁾の中で、同モデルはグリースに特徴的な低ひずみ速度域で一定となる貯蔵・損失弾性率を比較的良く再現出来る。空気とグリースの界面捕獲には VOF (Volume of Fluid) 法、円錐の運動は、メッシュモーフティングとリメッシングに基づく流体機構連成解析により、グリースと円錐間に働く相互作用を考慮して計算した。また、現象の対称性を考慮して計算負荷軽減のため 1/4 周モデルを使用した。

3. 結果と考察

ちょう度試験の実験・計算（粘弾性モデル）結果を Fig.3 に示す。円錐に押し退けられたグリースが円すい表面からカップ端部にかけて隆起する様子が両者で一致した。Fig.4 に試験初期 0.2s 間の円錐の変位を示す。実験では円錐が初期に急激に落下した後、0.04s 付近で下降から上昇に転じ、僅かに再下降してその後ほぼ停止する。この上昇は円錐の下降によりグリースに蓄えられたひずみ弾性エネルギーの一部が解放されたことによると考えられる。粘性モデルの解析では円錐が初期に急激に落下するが、上昇には転じず緩やかに下降した。一方粘弾性モデルでは上述のひずみ弾性エネルギーが考慮されているため、初期 0.04s の円錐の急激な落下後の上昇と 0.05s からの再下降が再現された。Fig.5 に示す 0.04s と 0.05s における応力の z-z 方向成分の分布を見ると、粘性モデルではせん断速度場がほぼ変わらないため応力分布も変化が小さいのに対し、粘弾性モデルでは円錐上昇に伴い円錐下部の圧縮応力が解放されたことが分かる。ちょう度は実験(混和)で 255 であったのに対し、粘性モデルでは 207 と小さい値となった。その一因は Carreau-Yasuda モデルのフィッティングで $1E-4/s$ 以上のせん断速度域で粘度を過大評価していることであると考えられる(例えばせん断速度 $1/s$ での粘度は実験の $1.4E+3Pa\cdot s$ に対しフィッティングでは $3.2E+3Pa\cdot s$)。一方粘弾性モデルでのちょう度は 268 と、1/4 混和ちょう度試験で一般に許容される誤差範囲 ± 18 内⁷⁾であり、ちょう度試験におけるグリースの応答が十分に再現されていると言える。

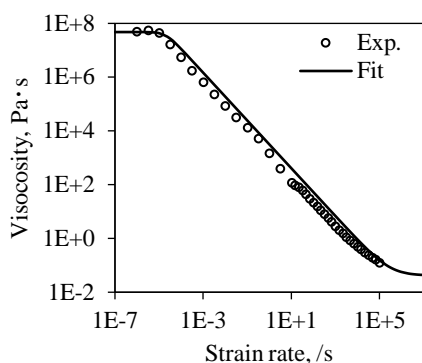


Fig. 1 Flow curves

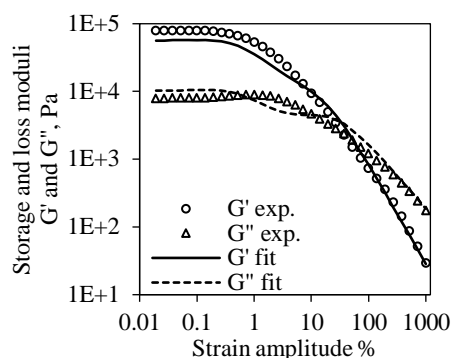


Fig. 2 Storage and loss moduli

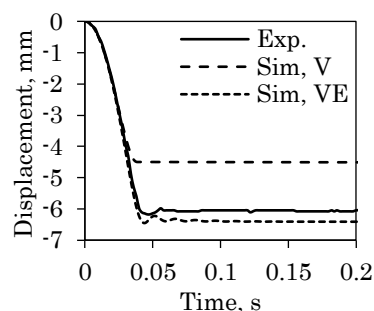


Fig. 4 Displacement of the cone for the first 0.2 s

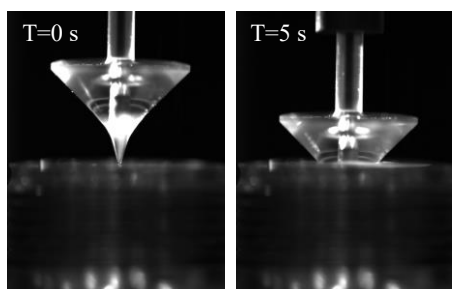


Fig. 3 Surface of grease
From the left, beginning, end of exp, end of sim VE

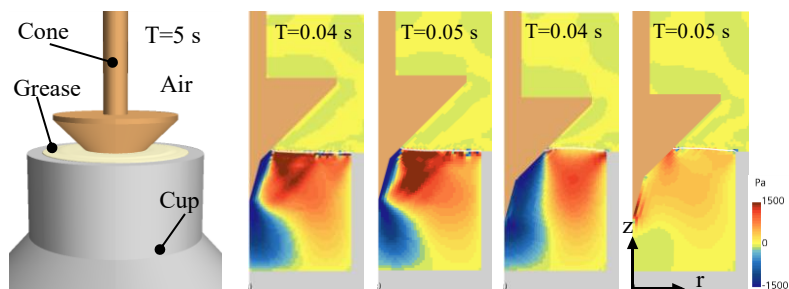


Fig. 5 z-z component of stress tensor
From the left, 0.04s, 0.05s in V, 0.04s, 0.05s in VE

4. おわりに

ちょう度試験の解析に粘弾性モデルを適用した結果、粘性モデルでは見られなかった円錐の上昇が再現され、グリースの固体的挙動がより良く再現されることが分かった。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⁴⁾。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) 小宮: グリースのちょう度一試験法と意義, トライボロジスト, 57, 10 (2012) 701.
- 5) 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.
- 6) 野田・柳澤・和田・山本: 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—, トライボロジー会議 2023 春東京, A15 (2023)
- 7) ASTM standards: Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease Using One-Quarter and One-Half Scale Cone Equipment, Annual Book of ASTM Standards 84, 92 (2016) 1
- 8) J. White, A. Metzner: Development of constitutive equations for polymeric melts and solutions, *Journal of Applied Polymer Science*, 7, 5 (1963) 1867
- 9) L. Abu-Farah, T. Goudoulas, S. Hooshyar et al.: Numerical and experimental investigation of dough kneading in a three-dimensional spiral kneader, *Physics of Fluids*, 31, 11 (2019) 1
- 10) P. Saramito: A new constitutive equation for elastoviscoplastic fluid flows, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 145, 1 (2007) 1
- 11) T. Kajiwara, G. Barakos, E. Mitsoulis: Rheological characterization of polymer solutions and melts with an integral constitutive equation, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 1, 3 (1995) 201.
- 12) D. Fraggedakis, Y. Dimakopoulos, J. Tsamopoulos: Yielding the yield stress analysis: A thorough comparison of recently proposed elasto-visco-plastic (EVP) fluid models, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 238 (2016) 170