

グリースの EHL における低速厚膜化への温度の影響

Effects of Temperature on Thick EHL Film Formation with Grease

協同油脂（正）*相馬 実波 （正）野木 高 （正）董 大明 東大・香川大（名誉）木村 好次

Minami Soma*, Takashi Nogi*, Daming Dong*, Yoshitsugu Kimura**

*Kyodo Yushi Co., Ltd., ** The University of Tokyo/Kagawa University

1. はじめに

グリースで潤滑した転がり接触では、低速域において基油で潤滑した場合よりはるかに厚い膜が形成されるという特異な現象がある。著者らのグループは、それが EHL 効果によるものであることを示し、入口領域における基油を主体とする低粘性成分の選択的な排除による増ちょう剤の濃度の上昇と、その結果としての粘度の上昇により膜厚が増加するというメカニズムを提示してきた¹⁾。次いでそのメカニズムに定量的な裏付けを与えること目指し、グリースの流れを基油と増ちょう剤の二相流として扱う EHL 解析を行った²⁾。このメカニズムにおけるキー・パラメータの一つが、増ちょう剤の網目構造中の油分の透過性、パーミアビリティであり、組成の異なるグリースについて、遠心離油試験の結果から算出したパーミアビリティを解析に用いることにより、低速における膜厚の増加が予測可能であることを示した³⁻⁶⁾。本報では、グリースのこのような挙動に及ぼす温度の影響について述べる。

2. 供試グリース

供試グリースには、PAO とエステル油を 80 : 20 で混合し、25 °C における粘度を 50 mPa·s とした基油に、増ちょう剤として 12-ヒドロキシステアリン酸リチウムを 9.5 mass%配合して、混和ちょう度を 300 に調整したものを用いた。

3. 離油度にもとづくパーミアビリティの算出²⁾

解析の対象とした離油度の時間変化の測定結果⁴⁾を、Fig. 1 に示す。図中の●、▲などのマーカーは、遠心離油試験により一定温度 25 °C において求めた 4 段階の回転速度における測定結果であり、カーブは以下による解析結果である。

グリースを多孔体で近似し、基油の透過を Darcy 流れと仮定すると、遠心離油試験における離油量の増加速度 dV/dt は次式で与えられる。

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{K \Delta p}{\mu_0 L} \quad (1)$$

A は遠心離油試験機のバケット中のグリースの断面積、 μ_0 は基油の粘度、 $\Delta p/L$ はグリースに働く遠心力と毛細管力による圧力勾配であって、比例定数 K がパーミアビリティである。

毛細管力による圧力勾配は、グリースを等価半径が r_e 、実流路の長さ L_e が L の k 倍であるような円管の集合体とみなすと、次式で与えられる。

$$\frac{\Delta p_c}{Lk} = \frac{2T \cos \theta}{r_e L k} \quad (2)$$

ここで、 T は油分の表面張力、 θ は増ちょう剤壁面における油分の接触角である。

一方、パーミアビリティ K と油分の体積濃度 ε の関係を、Kozeny-Carman の式を修正した次式で表す⁴⁾。

$$K = \delta \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^{2+m}} \quad (3)$$

式中、 ε は油分の体積濃度であり、 δ と m の値は、それらを用いて算出した離油度が、Fig. 1 の測定結果にベストフィットするように最適値を求める。

これらの関係を用いて算出した離油度が、Fig. 1 のカーブである。どの回転速度における結果も測定値と解析結果は良好な一致を見せており、上記の方法によるパーミアビリティの推定が有効であることを示している。

4. パーミアビリティへの温度の影響

各パラメータに及ぼす温度の影響としては、式(1)中の基油の粘度および式(2)中の表面張力の変化を考慮する。基油の粘度は Walther-ASTM の式で推定し、表面張力は同種の基油について Wilhelm 法で 80°C まで実測して、それ以上の温度に対しては Eötvös rule による線形の外挿を行った結果を用いる。

また式(3)中のパラメータ δ および m は、既報⁵⁾の結果を踏まえ、25°C の場合の最適値をそのまま用いた。

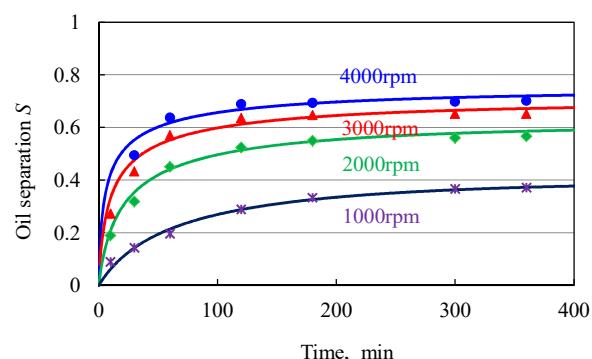


Fig. 1 Oil separation under different rotational speeds⁴⁾

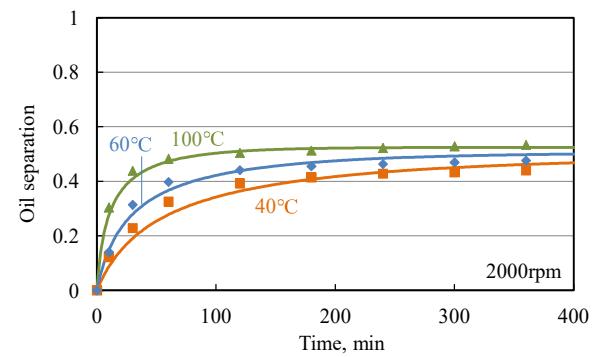


Fig. 2 Oil separation under different temperature

Figure 1 と同様にして求めた、40, 60, 100°Cにおける離油度を、Fig. 2 に示す。なおこの測定では温度を変えるため、パケットは同一だが若干回転半径が小さい遠心機を用いた。

得られた結果、Fig. 2 には、測定値と解析結果の、Fig.1 と同程度の一一致が見られ、上記の方法によるパーミアビリティの推定が同様に有効であることを示している。

5. グリースの等価粘度⁷⁾

グリースの等価粘度 η_0 は、せん断率 $\dot{\gamma}$ の上昇に伴う μ_1 から μ_0 への遷移を表す Carreau-Yasuda 式

$$\eta_0 = (\mu_1 - \mu_0)(1 + (\lambda\dot{\gamma})^{ar})^{\frac{n-1}{ar}} + \mu_0 \quad (4)$$

を用いて計算する。高せん断率における粘度 μ_0 には基油の粘度を用い、 $n=0$ と仮定、 μ_1 , λ , ar は、それらを用いて算出した等価粘度がレオメータによる見かけ粘度の測定値にベストフィットする値を求める。25°Cにおける等価粘度の計算値をカーブで、見かけ粘度をマーカーで、Fig. 3 に重ねて示す。

6. 等価粘度への温度の影響

レオメータによって測定した25, 60, 100°Cでの見かけ粘度を、Fig. 4 にマーカーで示す。極低せん断率での粘度には温度の影響が認められないが、せん断率が 0.1s^{-1} を超えて低下を始めると、温度が高いほど低下幅が大きくなる。この挙動は、式(4)中の μ_0 の温度による変化のみでは表現できないので、パラメータ λ には温度ごとに実験結果にベストフィットする値を用いた。他のパラメータ μ_1 , ar は、25°Cと同一の値を用いている。Figure 4 のカーブが、このようにして算出した等価粘度である。

7. 膜厚の解析結果と考察

以上の解析を EHL 解析⁶⁾に適用して算出した膜厚を、Fig. 5 にカーブで示す。どのカーブも、それぞれの温度における測定結果を表すマーカーと概ね一致しており、25~100°Cの温度範囲において、遠心離油試験で測定した離油度にもとづくパーミアビリティの推定が有効であり、その値を用いた上述の EHL 解析によって、中央膜厚の測定結果、とくにグリースの EHL に特徴的な低速域における膜厚の増加を、良好な精度で予測することが可能であることを示す結果が得られた。

Figure 5 に見られる温度の影響は、高速域と低速域では様相が異なっている。グリースの等価粘度が基油の粘度とほとんど等しくなる高速域ではその影響がストレートに表れ、Fig. 4 に見られるように高温になるほど等価粘度の低下幅が大きいことを反映して、膜厚が減少している。低速域においてもその効果は生じているが、基油の粘度低下による Darcy 流量の増加によって増ちょう剤の濃度が上昇し、Fig. 3 が示すように等価粘度が上昇して膜厚を増加させる効果が拮抗して、温度の影響が不明瞭になっている。

結論

- (1) 温度を変更した場合にも、離油度の測定値から算出したパーミアビリティを用いた解析により、膜厚の推定が可能であることを示した。
- (2) 温度によって高速域では膜厚に明確な差が見られたが、Darcy 流量への影響で低速域の差は不明瞭であった。

文献

- 1) T. Kochi et al. : Experimental Study on the Physics of Thick EHL Film Formation with Grease at Low Speeds, Tribol. Lett., **67** (2019) 55.
- 2) T. Nogi et al. : Numerical analysis of grease film thickness and thickener concentration in elastohydrodynamic lubrication of point contacts, Tribol. Trans., **63**, 5 (2020) 924.
- 3) 相馬他：遠心離油試験によるグリースのパーミアビリティの計測、トライボロジー会議 2018 秋 伊勢 (2018) E34.
- 4) 相馬他：同上（第2報）、トライボロジー会議 2019 春 東京 (2019) F7.
- 5) 相馬他：同上（第3報）、トライボロジー会議 2020 秋 別府 (2020) F29.
- 6) 相馬他：非ニュートン流体を基油とするグリースの EHL 解析、トライボロジー会議 2021 春 (2021) 東京 F1.
- 7) 董・遠藤：様々な潤滑剤での EHL—グリース—、トライボロジスト, **56**, 1 (2011) 24.

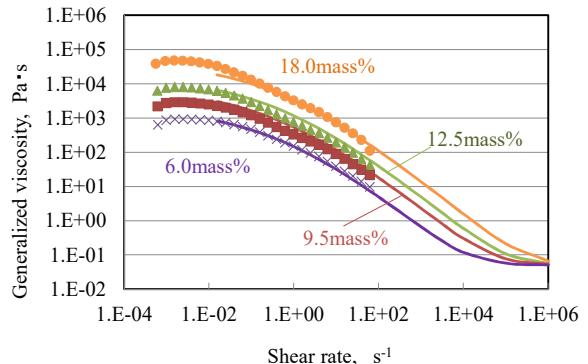


Fig. 3 Generalized viscosity at different shear rate⁴⁾

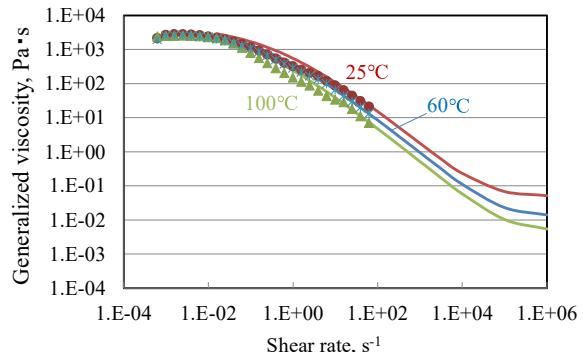


Fig. 4 Generalized viscosity at different temperature

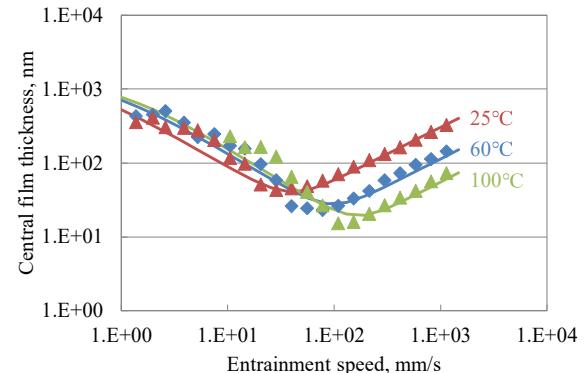


Fig. 5 Film thickness under different temperature