

グリースの組成によるパーミアビリティの変化および低速 EHL 厚膜への影響

Changes in Permeability of Grease with Its Composition and Their Effect on Thick EHL Film Formation at Low Speeds

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潤滑膜が形成されるという特異な現象、厚膜化が認められている。著者らは、厚膜化が生じた際に出口側の馬蹄形の領域で膜厚が減少していること、軌道面に残存するグリース中の増ちょう剤の濃度が上昇することなどの実験結果に基づき、この現象はEHL（弾性流体潤滑）下で生じており、入口領域において基油を主体とする低粘性成分が絞り出されて増ちょう剤の濃度が上昇し、その結果グリースの見かけ粘度が上昇して膜厚が増加するというメカニズムを提案してきた。本稿では、Table 1に示す増ちょう剤の粘度、基油の粘度、増ちょう剤の種類を変えたグリースについて厚膜化の解析を行った¹⁾。

2. グリースのパーミアビリティ

増ちょう剤の網目構造を透過する基油の流れにDarcy則を適用すると、基油の流速uは、圧力勾配を $\Delta P/L$ 、基油の粘度を μ_0 として

$$u = \frac{K \Delta P}{\mu_0 L} \quad (1)$$

によって与えられる。この式のKがパーミアビリティである。Kと増ちょう剤の質量濃度fの関係として、修正を加えたKozeny-Carmanの式

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

を仮定する。Kはfの上昇に伴って低下する。

遠心分離機を用い、グリースを充填したバケットの金網を通過した基油の重量から離油度を求めた。一方、式(2)を用いてグリース中の基油が受ける毛細管力による圧力勾配を求め、それを遠心力による圧力勾配から差し引いて $\Delta P/L$ を求めるとき、式(1)の数値積分によって離油度が求められる。δとmは、増ちょう剤の種類によって決まる定数とし、離油度の計算結果を測定結果に当てはめて求めた。

グリースA₂、Cの結果をそれぞれFigs. 1、2に示す。増ちょう剤の濃度の上昇に伴って毛細管力は増加し、遠心力と毛細管力が釣り合うと離油度は一定になる。また、他のグリースをグリースA₂と比較すると、増ちょう剤の濃度と基油の粘度が高いほど離油度が低いという結果が得られた。これらの計算結果と測定結果はよく一致しており、パーミアビリティは式(2)によって十分な精度で表されることがわかる。

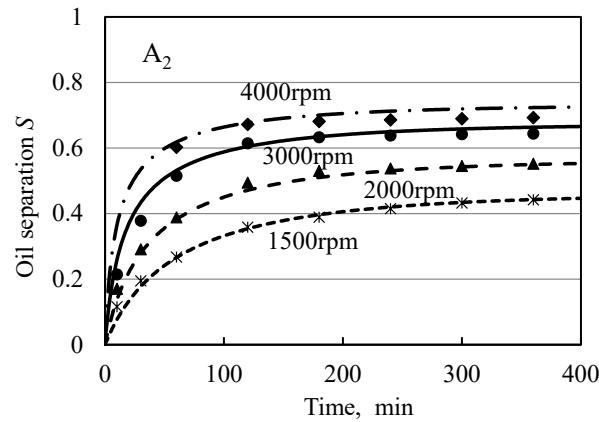


Fig. 1 Oil separation of grease A₂ under different rotational speeds

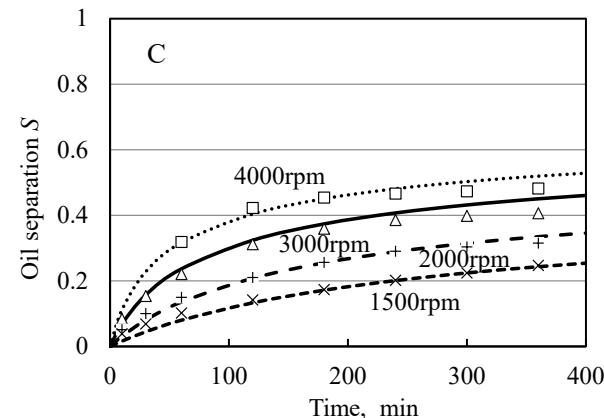


Fig. 2 Oil separation of grease C under different rotational speeds

Table 1 Sample greases

Sample grease	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	C
Thickener type	Li(12OH)St					LiSt
Initial concentration of thickener, mass%	6.0	9.5	12.5	9.5	9.5	17.0
Base oil type	PAO					
Base oil viscosity @25°C, mPa·s		50		144	440	50
Worked penetration	356	302	261	268	256	294
Permeability at initial concentration, 10 ⁻¹⁴ m ²	9.5	2.2	0.88		2.2	0.41

3. EHL 膜厚

グリースの非ニュートン粘性は、せん断速度 $\dot{\gamma}$ の上昇に伴って μ_1 から μ_0 へ遷移する Carreau-Yasuda 式

$$\eta_0 = (\mu_1 - \mu_0)[1 + (\lambda\dot{\gamma})^{a_Y}]^{(n-1)/a_Y} + \mu_0 \quad (3)$$

で表し、 μ_1 と f の関係としてべき乗の式を仮定する。式中の定数は、レオメータによって得られた測定値に式(3)を当てはめて求めた。

EHL 解析では Ertel-Grubin モデルを用いる。グリースの連続の式すなわちレイノルズ方程式は単位幅当たりのせん断流量を Q_C 、圧力流量を Q_P として

$$Q_C + Q_P = \text{const.} \quad (4)$$

で表される。グリースの流れを基油と増ちょう剤の二相流と考えると、増ちょう剤の連続の式は

$$(Q_C + \frac{1}{1+R}Q_P)C = \text{const.} \quad (5)$$

で与えられる。この式の左辺の括弧内は増ちょう剤の網目構造の流量を表しており、 C は増ちょう剤の体積濃度である。

グリースと網目構造の流量の差が Darcy 流量であり、 R は Darcy 流量と網目構造の圧力流量の比として

$$R = \frac{12K}{h^2} \left(\frac{\eta}{\mu} - 1 \right) \quad (6)$$

で表される。低速域ではグリースの見かけ粘度が基油の粘度に比べて高くなるため R は大きくなる。式(4), (5)からそれぞれ圧力、増ちょう剤の濃度が求められる。

EHL 実験は、ガラスディスクと鋼球との純転がり接触、温度 25°C、荷重 20 N、最大ヘルツ圧 0.51 GPa で行い、光干渉法で中央膜厚を測定した。解析では接触半幅が実験の接触半径と一致するように荷重を設定した。

初期状態の増ちょう剤の濃度、基油の粘度、増ちょう剤の種類を変えた場合の膜厚をそれぞれ Figs. 3, 4, 5 に示す。同図のシンボルとカーブはそれぞれ測定値と計算値であり、いずれの場合も両者は良好な一致を示している。

式(4)は各速度においてグリースの流量が一定であることを意味しているが、速度を低下させていくと、 R が増加するため、網目構造の流量は接触部に近づくにつれて減少し、増ちょう剤の濃度は式(5)に従って上昇することになる。この結果グリースの見かけ粘度が上昇して厚膜化がもたらされる。

Fig. 3 におけるグリース間の膜厚の違いは、Figs. 4, 5 に比べて小さい。これは、増ちょう剤の初期濃度が低い、すなわちパーミアビリティが大きいほど濃度の上昇率が高く、各グリースの濃度の上昇に伴ってグリース相互の差が小さくなるためである。Figs. 4, 5 で基油の粘度の上昇、パーミアビリティの減少に伴って厚膜化の開始速度が低下するのは R の減少によるものである。Fig. 5 でグリース C の低速域の膜厚が A₂ より小さいのはグリース C の高濃度における見かけ粘度が A₂ より低いためである。

4. おわりに

本稿では、遠心分離試験によって測定した離油度からグリースのパーミアビリティを求め、それが修正を加えた Kozeny-Carman の式によって十分な精度で表されることを示した。また、グリースの圧力流れを増ちょう剤の網目構造の流れと網目構造を透過する基油の流れに分けて扱う二相流モデルと Ertel-Grubin モデルを用いて増ちょう剤の濃度の上昇を考慮した EHL 解析を行い、膜厚の測定結果と良好に一致する計算結果を示すとともに、厚膜化に及ぼすグリースの組成の影響を考察した。

文献

- 1) 相馬・野木・董・木村：グリースの組成によるパーミアビリティの変化および低速 EHL 厚膜への影響、トライボロジスト、68, 3 (2023) 185.

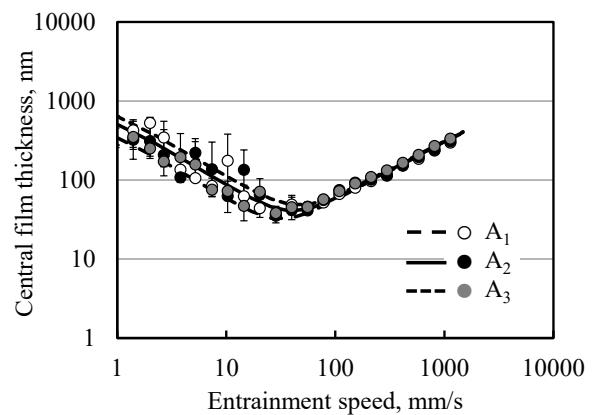


Fig. 3 Film thickness of greases with different thickener concentration; A₁, A₂, A₃

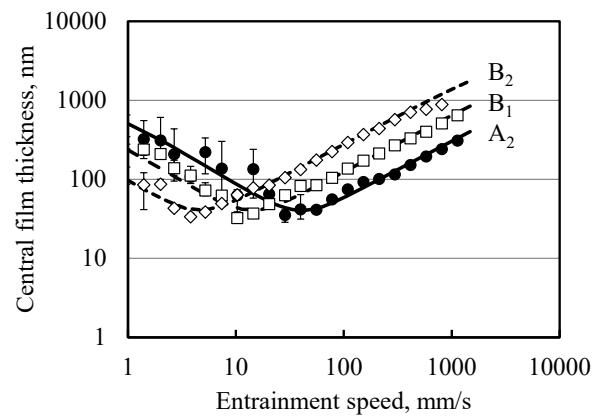


Fig. 4 Film thickness of greases with different base oils; A₂, B₁, B₂

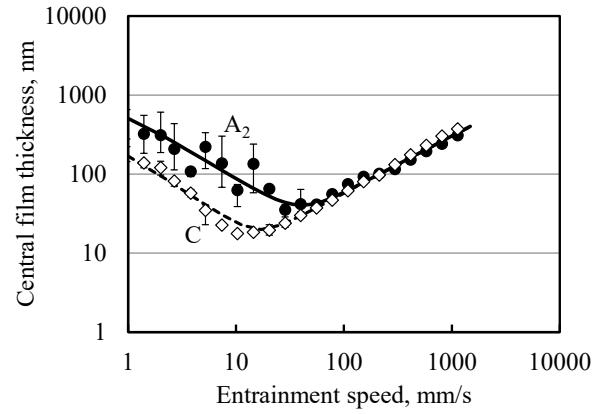


Fig. 5 Film thickness of greases with different thickeners; A₂, C