

グリース表面の溝における基油の流動

Base Oil Flow in Grooves on Grease Surfaces

工学院大 (正) *鶴田 琉聖 NTN (正) 江川 航平 NTN・阪大 (正) 坂口 智也 工学院大 (正) 山本 憲

Ryuto Tsuruta*, Kouhei Egawa**, Tomoya Sakaguchi***, Ken Yamamoto*

*Kogakuin University, **NTN Corporation, ***The University of Osaka

1. 緒言

玉軸受のグリース潤滑において、潤滑寿命の予測および損傷のメカニズム理解が求められている。潤滑寿命には、基油の枯渇 (離油) が関係していると考えられており、離油は軌道面接触部において特に進行することが実験により確認されている¹⁾。さらに、グリース潤滑は油を塗布したのみの潤滑と比較して長寿命となることから、グリースを構成する増ちょう剤を経由して肩部から接触部へと基油が供給され、離油の進行を抑制していると考えられている²⁾。接触部への基油の供給について、市村ら²⁾は、増ちょう剤の網目構造内の浸透を支配的なメカニズムと仮定したモデルを提案している。これに対して本研究では、基油は網目構造内の浸透だけでなくグリース表面の毛管流れによっても供給されると考え、グリース表面における基油の流動特性およびその効果を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

本研究では、以下に述べる 2 つの実験を行った。まず、離油の進行に伴うグリース内部の幾何的な形状変化を調べる目的で、(1) ヘレーショウ・セル内のグリースにおける基油吸引実験を行った。次に、グリース表面における基油の輸送の影響を調べる目的で、(2) グリース製オープンチャネル内の毛管流れ観察実験を行った。両実験に用いたグリースの増ちょう剤および基油は、それぞれ脂肪族ウレア、エーテル油 (0.0598 Pa s @ 25°C) である。

実験 (1) では、スライドガラス上にスペーサー (厚さ約 60 μm のメンディングテープ) を 1 mm の間隔で配置し、その上に別のスライドガラスを配置して、幅 1 mm、厚さ約 60 μm の簡易的なヘレーショウ・セルを作製した。スペーサーに用いたメンディングテープは片面のみ粘着性を有しているため、スペーサーと上側のスライドガラスとの間には 10 μm 程度の微小な隙間が存在する。本実験では、この隙間を利用してグリースから基油を吸引する。

グリースを構成する増ちょう剤は、網目構造を形成して塊として存在するため、移動には機械的な外力を必要とする。一方、基油は液体であるので、毛管現象によって微小な隙間に吸引される。したがって、セル内をグリースで満たした状態で $t=0$ s において上側のスライドガラスを置くことにより、基油の選択的な吸引 (離油) が開始され、離油の進行に伴う増ちょう剤塊の変化を観察できる。

実験 (2) では、壁面がグリースで構成された厚さ約 0.3 mm、幅 w ($w = 0.4, 0.8$ mm) の矩形オープンチャネル内の基油の毛管流れを観察した。オープンチャネル作製手順は以下の通りである。すなわち、治具を用いて表面が平滑なグリース層を準備し、隙間ゲージを用いてこの層に直線形状の溝を作製する。溝幅 w は隙間ゲージの厚さ w により規定される。上記手順で作製したオープンチャネルを水平に置き、時刻 $t=0$ において、チャネルの一端に基油を蓄えたりザーバーを接触させることで毛管流れを発生させた (Fig. 1)。

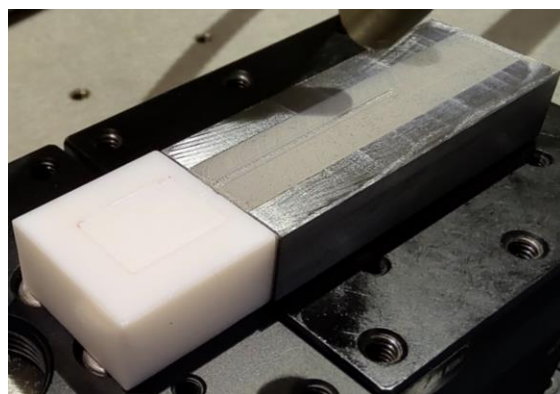


Fig. 1 An image of the oil reservoir (white block) and the grease groove (rectangular open channel).

3. 実験結果および考察

実験 (1) における、ヘレーショウ・セル内のグリースの時系列変化を Fig. 2 に示す。Figure 2 はセルを上方から撮影した顕微鏡画像であり、画像上部および下部にスペーサー、中央部にグリースが封入されたセルが位置している。前述の通り、スペーサーと上側スライドガラスの隙間に基油のみが (画像の上下方向に) 選択的に吸引されるため、時間経過とともにセル内のグリースが含有する基油の量は減少する。本実験系では、基油減少量の定量的な計測はできないが、時間経過とともにセル外に染み出した基油の総量が増加することが観察されているため (Fig. 2 画像外)、離油が進行していることがわかる。また、Fig. 2 のセル壁面 (ダッシュ線) 近傍に注目すると、基油の染み出し (時間経過) に伴って増ちょう剤塊の輪郭 (点線) がシュリンク (見かけの体積が減少) し

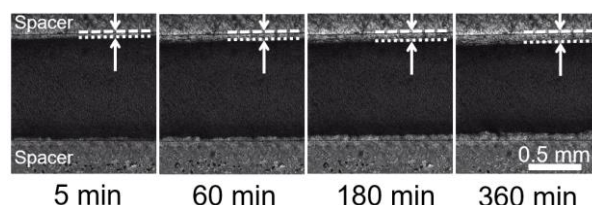


Fig. 2 Distribution of the grease thickener in a Hele-Shaw cell. The thickener contracts over time due to the continuous suction of the base oil.

ている様子が確認できる。このことから、離油が進行すると、増ちょう剤塊の見かけの体積の減少により、多孔質体として近似される増ちょう剤内部の網目構造の実効孔径が減少することがわかる。なお、Fig. 2 からは判別しづらいが、シュリンクとともに増ちょう剤塊表面の粗さが増加することも確認された。

上述の観察結果は、市村ら²⁾が提案するモデルを定性的に支持する。ところで、市村ら²⁾のモデルによると、網目構造内を流れる基油の流速 u は $\sim \Delta p r_e^2 / \eta l$ (Δp , r_e , η , l はそれぞれ基油を駆動する圧力差、網目構造の実効孔径、基油の粘度、基油の移動距離) のスケールとなる。 Δp は、網目構造の実効孔径が流動方向で減少することにより生じるラプラス圧の差に起因し、 $\Delta p \sim \gamma / r_e$ である (γ は基油の表面張力)。ここで、典型的な値として $\gamma = 10^{-2} \text{ N m}^{-1}$, $r_e = 10^{-6} \text{ m}$, $\eta = 10^{-2} \text{ Pa s}$, $l = 10^{-3} \text{ m}$ を用いると、 $u \sim 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ となる。

詳細は割愛するが、上述のモデルでは離油が進行するにつれて u が増加することを予測しており、先ほど求めた値はその上限値 (のオーダー) である。したがって、軌道面におけるグリース層の薄さ (μm 程度) を考えると、単位時間あたりに失われる基油の量が多い運転条件においては、このモデルが考慮している現象のみでは基油の供給を説明できない可能性がある。そこで本研究では、離油に伴って観察されたもう一つの現象、すなわちグリース表面粗さの増加に着目し、表面粗さにより生じる毛管流れの流動特性を明らかにするために、以下に述べる実験 (2) を行った。

グリース表面の流れを模擬するため、幅 w ($w = 0.4, 0.8 \text{ mm}$)、深さ h ($\sim 0.3 \text{ mm}$) の矩形オープンチャネルを作製し、この流路内を進行する基油の毛管流れを観察した (Fig. 3a)。流動は、時刻 $t = 0$ において基油を蓄えたオイルリザーバーをオープンチャネルと接触させることで生じる。Figure 3a に示すように、各時刻における進行界面の位置を $L(t)$ と定義し、その時間発展を Fig. 3b に示す。ここで、Fig. 3b のプロットは異なる流路幅 w における実験結果を示し、実線は各条件における解析解を示している。なお、解析解に用いたモデルは、円管内の毛管流れを表現する Washburn の法則³⁾を、矩形オープンチャネルの境界条件に基づいて修正したものである。Figure 3b は、実験結果が $L(t) \sim t^{1/2}$ の関係を示し、さらに解析解とも概ね一致することを示している。したがって、矩形オープンチャネルにおいても修正 Washburn の法則で流れを予測できることがわかる。

本実験で用いた矩形オープンチャネルのサイズは、グリース表面の典型的な表面粗さ ($\leq 10^1 \mu\text{m}$) と比較すると大きい。表面張力が支配的な領域であることに変わりはない。したがって、修正 Washburn の法則は、グリース表面粗さで生じる流れも予測できるといえる。そこで、第一次近似的に、 $w = h = 0.01 \text{ mm}$, 0.001 mm の正方形オープンチャネルにおける解析解からグリース表面を流動する基油の流速を見積もる。ここで、上述の条件における解析解は、Fig. 3b の2本の青線である。両者を比較すると、流路サイズが1桁小さくなることにより、 $L(t = 60 \text{ s})$ は1/3程度になることがわかる。しかし、流速のオーダーで考えると、どちらも $u \sim L(t) / t \sim 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ となる。この流速は、先に見積もった市村ら²⁾のモデルの流速と比較すると1オーダー程度大きい。このことから、何らかの条件によりグリース表面に基油が存在する場合、基油の輸送はグリース内部ではなく表面の流動が支配的である可能性が示唆される。

4. 結言

本研究は、離油によりグリース表面の粗さが増加することに着目し、グリース表面における基油の流動特性を明らかにするための実験を行った。実験より、境界条件に関して修正を施した Washburn の法則を用いることで矩形オープンチャネル内の毛管流れが予測できることを示した。さらに、同手法を用いてグリース表面の基油の流速を見積もった結果、グリース表面に基油が存在する場合には、支配的な基油輸送メカニズムはグリース内部ではなく表面の流動である可能性が示唆された。

文献

- 1) 小森谷・市村・河内・吉原・酒井・董・木村：玉軸受のグリース潤滑における潤滑寿命の研究 (第1報)，トライボロジスト，66 (2021) 147.
- 2) 市村・小森谷・河内・吉原・酒井・董・木村：玉軸受のグリース潤滑における潤滑寿命の研究 (第2報)，トライボロジスト，66 (2021) 159.
- 3) E. W. Washburn: The dynamics of capillary flow, Phys. Rev., 17 (1921) 273.

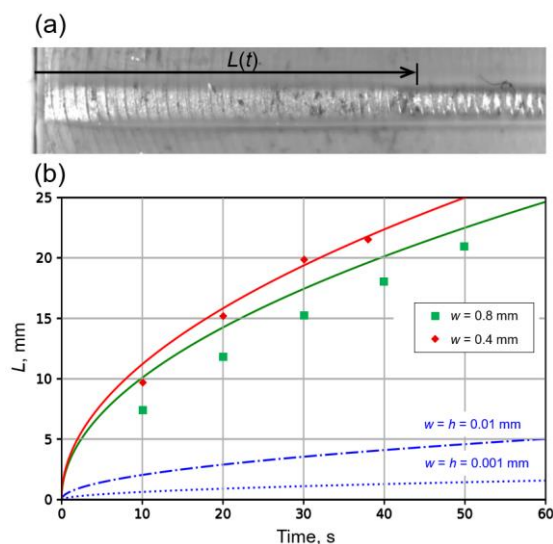


Fig. 3 (a) Top view of an advancing oil front in a grease open channel. (b) Time evolution of L in open channels ($w = 0.4$ and 0.8 mm , $h = 0.3 \text{ mm}$). Solid lines are analytical solutions. Dash-dot and dotted lines are analytical solutions for $w = h = 0.01$ and 0.001 mm , respectively.