

窒素雰囲気下の円筒容器中に存在するグリースに含まれる基油の毛管力と拡散を考慮した物質移動モデル

Modeling Mass Transfer of Base Oil in Grease under Nitrogen Atmosphere:
Influence of Capillary Forces and Diffusion in a Cylindrical Container

日本精工(株) (正) *前田 成志 (正) 中川 和紀 Science Tokyo (正) 桃園 聰
Masayuki Maeda*, Kazunori Nakagawa*, Satoshi Momozono**

*NSK Ltd, **Science Tokyo

1. はじめに

転がり軸受は、正しく使用してもある運転期間を経過すると潤滑剤が劣化してその機能が果たせなくなり、発熱・摩擦増大・摩耗などが生じ、最終的には焼付きに至る場合がある¹⁾。これは潤滑寿命であり、特に、グリース潤滑下の転がり軸受の場合はグリース寿命とも呼ばれる。昨今、SDGs (Sustainable Development Goals) の観点から、機械の安全・信頼性が求められており、転がり軸受においても、より一層の低トルク化・長寿命化および寿命予測技術が必要とされる。しかし、今のところグリース寿命を定量的に予測できる純粋な物理化学モデルは存在せず²⁾、寿命試験結果に基づく実験式での寿命予測に留まっている³⁾。本稿では、グリースの潤滑性能が低下する原因の一つとして、高温下での基油の「蒸発」現象に着目し、窒素雰囲気下の円筒容器に存在するグリースに含まれる基油の蒸発量を算出するモデルを提案し、実験結果と合う未知パラメータを求めた結果について報告する。

2. 実験

供試グリースには100°Cにおける動粘度が2 mm²/sの合成油 PAO (Poly- α -olefin oil) を基油としたウレアグリースを、混和ちよう度 250 に調整したものを用いた。蒸発試験は TG (Thermogravimetry) にて、窒素雰囲気下、180°Cで行い、質量の経時変化を取得した。サンプルパンは、直径φ5mm、高さ5mmのものを使用した。

3. 解析

3.1 グリースに含まれる基油の拡散による物質移動

高さが L_c [m]の円筒容器中に存在する厚さ L [m]の液体が、気体となって z 方向に拡散する際、拡散のフラックス N_{dif} [mol/(m² · s)]は式(1)となる⁴⁾。

$$N_{\text{dif}} = \frac{D}{RTZ} \frac{(p_1 - p_2)}{y_{B,\text{lm}}} \quad (1)$$

ここで、 D [m²/s]は窒素雰囲気中の気化した気体の拡散係数、 R [J/(mol · K)]は気体定数、 T [K]は温度、 Z [m]は距離 ($Z = L_c - L$)、 p_1 [Pa]は気液界面、 p_2 [Pa]は容器頂点の位置での気体となった基油成分の分圧、 $y_{B,\text{lm}}$ [-]は周囲ガスの対流の影響を示す値で $0 \leq y_{B,\text{lm}} \leq 1.0$ である。Figure 1 に示すグリースの場合、増ちよう剤の影響によって基油が蒸気圧降下すると考えれば、ラウールの法則より、 p_1 は式(2)となる。

$$p_1 = \frac{n_{0\text{oil}}}{n_{0\text{oil}} + n_{0\text{thick}}} P_{\text{vap}} \quad (2)$$

ここで、 $n_{0\text{oil}}$ [mol]は初期の基油、 $n_{0\text{thick}}$ [mol]は初期の増ちよう剤の物質量、 P_{vap} [Pa]は基油の飽和蒸気圧である。

3.2 毛管力によるグリース内部の基油の物質移動

グリースを等価半径 r_e [m]、実流路の長さ L_e [m]、曲路率 k [-]の毛細管の集合体として近似すると、グリース中を透過する基油の体積流量 Q [m³/s]は相馬らの方法^{5), 6)}で求めることができ、毛管力と重力のつり合いから式(3)となる。

$$Q = \frac{K_p A}{\mu} \left(\frac{2T_s \cos \theta}{r_e L k} - \rho g \right) \quad (3)$$

ここで、 K_p [m²]はパーミアビリティ、 A [m²]は容器中のグリースの断面積、 μ [Pa · s]は基油の粘度、 T_s [N/m]は基油の表面張力、 θ [rad]は増ちよう剤壁面における基油の接触角、 ρ [kg/m³]は密度（油とグリースの密度の差は無視する）、 g [m/s²]は重力加速度である。実流路の断面積の総和 S [m²]が式(4)の関係にある⁷⁾と仮定すると、毛管力による浸透のフラックス N_{cap} [mol/(m² · s)]は式(5)となる。

$$S = \varepsilon A \frac{L}{L_e} = \varepsilon A \sqrt{\frac{2k'}{k}} \quad (4)$$

$$N_{\text{cap}} = \frac{\rho Q}{MS} \quad (5)$$

ここで、 ε [-]は基油の濃度、 k' [-]は実流路の断面形状に関する係数、 M [kg/mol]は基油の分子量である。

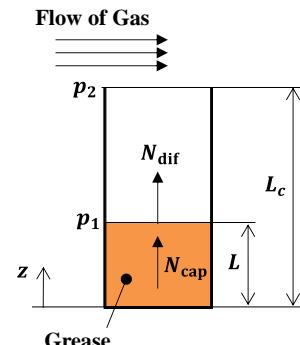


Fig. 1 Mass transfer model of base oil in grease

3.3 基油の蒸発により減少するグリースの質量変化の算出

ある時間 $t[\text{s}]$ におけるグリースの質量 $m_t[\text{kg}]$ から $\Delta t[\text{s}]$ 後の間にグリースに含まれる基油が蒸発した量=グリースが減った量と仮定すると、 $t + \Delta t[\text{s}]$ のグリースの質量 $m_{t+\Delta t}[\text{kg}]$ は式(6)となる。

$$m_{t+\Delta t} = m_t + \Delta m = m_t - M A N \Delta t \quad (6)$$

ここで、 $N[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ はフラックスであり、上記 N_{dif} と N_{cap} の小さい方に律速されると考える。初期値を与えて、 $m_{t+\Delta t}$ を求めた後、 m_t に $m_{t+\Delta t}$ を代入して逐次計算を行うことで、基油の蒸発により経時的に減少するグリースの質量変化が算出できる。事前に供試グリースの K_p と k は別途求めておく^{5), 6)}、蒸発試験結果と合うように未知パラメータ p_2 と k' を求める。

4. 結果

Figure 2 に基油の蒸発試験結果を示す。(a) フラックス、(b) 温度、(c) 質量の経時変化を示している。図中のプロットが実験値、破線が計算値である。 $n_{\text{0thick}} = 0$ 、 $N_{\text{cap}} = \infty$ と考え、 $p_2 = 8500 \text{ Pa}$ で計算すると質量の経時変化がおおよそ実験値と一致した。次に、グリースの結果を Fig.3 に示す。(a) フラックス、(b) 温度、(c) 質量、(d) 増ちょう剤の濃度の経時変化を示している。図中のプロットが実験値、破線が計算値である。(a) は破線が N_{dif} 、一点鎖線が N_{cap} 。 $p_2 = 8175 \text{ Pa}$ 、 $k' = 0.001$ で計算すると、フラックス N_{dif} と N_{cap} の小さい方が実験値とほぼ一致しており、質量の経時変化もおおよそ実験値と一致した。 p_2 が基油よりグリースの方が小さかった理由について、 p_2 が蒸気圧降下の影響でグリースの方が小さかったからだと考えられる。 $k' = 0.001$ ではグリースの見かけの長さと実流路の比 $L_e/L = 87.9$ となるが、その妥当性については今後検証する必要があると考える。

5. 結論

- (1) 窒素雰囲気下の円筒容器に存在するグリースに含まれる基油の蒸発量を算出するため、毛管力と拡散を考慮した物質移動モデルを提案した。
- (2) (1)のモデルを仮定すると、本条件において実験結果と合う未知パラメータ p_2 と k' を求めることができた。
- (3) グリースに含まれる基油の蒸発量を予測するには、 p_2 と k' が既知である必要がある。

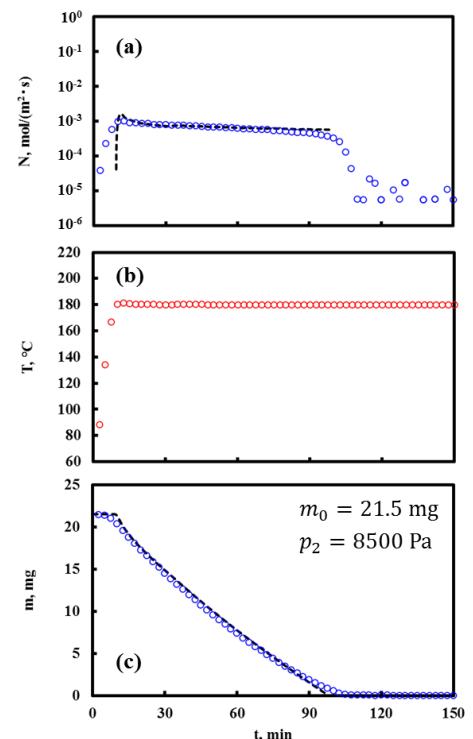


Fig. 2 Evaporation test results of base oil

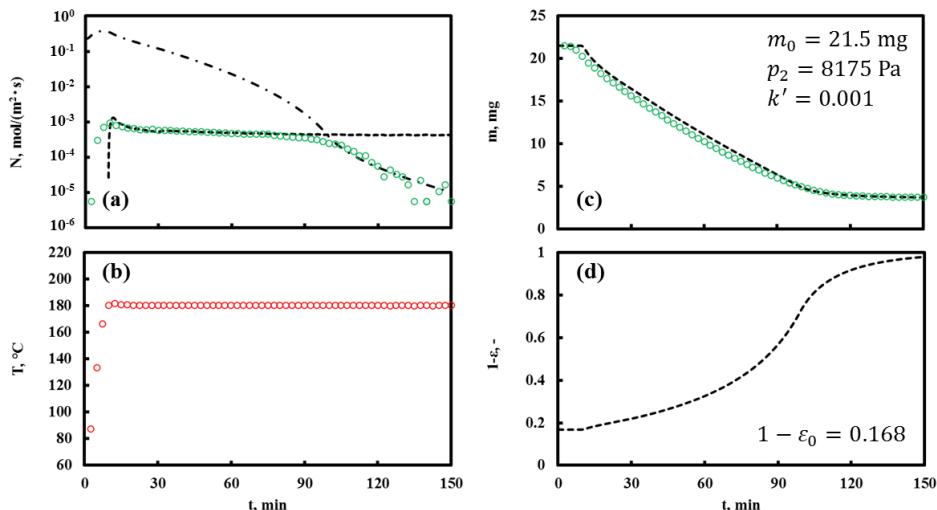


Fig. 3 Evaporation test results of grease

文献

- 1) 高田・相原：転がり軸受の寿命と信頼性、日刊工業新聞社 (2005) 104
- 2) Piet M. Lutz et al. : Grease Performance in Ball and Roller Bearings for ALL-Steel and Hybrid Bearings, Tribology Transactions, 63, 1 (2022) 1-13
- 3) 外尾・横内：転がり軸受用グリースの潤滑寿命推定技術、トライボロジスト, 60, 5 (2015) 314-319
- 4) James R. Welty et al. : Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer Sixth Edition, wiley (2013)
- 5) 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 (2018) E34
- 6) 相馬他：同上（第 2 報），トライボロジー会議 2019 春 (2019) F7
- 7) 中島・田中：透過法による粒度測定について、北海道大学工学部研究報告, 60 (1971) 1-10