

Shear-Thinning レオロジーモデルを用いた熱弾性流体潤滑解析 —トラクション特性評価—

Thermal EHL analysis applying a Shear-Thinning Rheology model

- Estimation of Traction Properties -

佐賀大・理工（正）*馬渡 俊文 佐賀大・院（非）稲垣 研心 佐賀大・院（非）佐藤 陽向

Toshifumi Mawatari, Kenshi Inagaki, Hinata Sato

Saga University

1. はじめに

弾性流体潤滑（EHL）油膜を介したトラクション特性は、高圧と高せん断が作用する油膜のレオロジー特性に多大な影響を受ける。前報⁽¹⁾では、Carreau モデルを基にした Shear-Thinning レオロジーモデルを、一般化 Reynolds 方程式と油膜内部のエネルギー方程式に適用し、自動車用 CVT 合成トラクション油 KTF-1 と高密度のパーフルオロポリエーテル（PFPE）流体の一種、フォンブリンの熱弾性流体潤滑（Thermal EHL）解析を行った。解析結果から得られるトラクション係数を、実験結果と比較したところ、粘性項で構成されるレオロジーモデルを用いた解析では、高圧粘度の違いによる影響が認められた。本報では、PFPE 流体のうち、粘度圧力係数が高いクライトックス（Krytox, 分子構造： $\text{F}[\text{C}(\text{CF}_3)\text{FCF}_2\text{O}]_n\text{CF}_2\text{CF}_3$ ）による潤滑状態を想定して、前報⁽¹⁾と同じレオロジーモデルによる Thermal EHL 解析を行った。また、すべり率 $\Sigma=90\%$ までのトラクション係数を推算するとともに、実験値と比較した。

2. 解析方法

ボールオンディスク型トラクション試験機（PCS Instruments 社製 MTM トラクション試験機、鋼製ディスク直径： $\phi 46\text{ mm}$ 、鋼球直径： $\phi 19\text{ mm}$ ）によるトラクション試験⁽²⁾を模擬して Thermal EHL 解析を行った。最大ヘルツ圧力は $P_H=0.5\text{ GPa}$ 、潤滑油入口温度は $T_0=313\text{ K}$ 、平均転がり速度は $u_e=0.05\text{ m/s}$ 、すべり率は $\Sigma=0\%\sim 90\%$ である。解析では、温度 313 K での粘度圧力係数が $\alpha=33.6\text{ GPa}^{-1}$ の高密度 PFPE 流体 Krytox（動粘度 $\nu: 168.1\text{ mm}^2/\text{s}$ at 313 K , $18.24\text{ mm}^2/\text{s}$ at 373 K , 密度 $\rho: 1.910\text{ g/cm}^3$ at 288 K , 粘度指数 $VI: 121$ ）を試料油として想定するとともに、解析領域での粘度 η を推算するため、式(1)で与えられる Sorab 式⁽³⁾を使用した。

$$\eta = \eta_{s0} \cdot \exp[A_1(p/p_{s0} - 1) + A_2(T_{s0}/T - 1) + A_3(p/p_{s0} - 1)^2 + A_4(T_{s0}/T - 1)^2 + A_5(p/p_{s0} - 1)(T_{s0}/T - 1)] \quad (1)$$

ここで、 p は圧力、 T は温度、 p_{s0} は基準圧力、 T_{s0} は基準温度であり、 $p_{s0}=0.101\text{ MPa}$ 、 $T_{s0}=313\text{ K}$ とした。式中の η_{s0} , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 は、それぞれ、 $0.3185\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 3.397×10^{-3} , 16.64 , -4.189×10^{-9} , 18.06 , 169.1×10^{-4} である。

EHL 油膜のレオロジー特性は、これまでと同じく、式(2)で示される Shear-Thinning モデルに従うと仮定した⁽¹⁾。

$$\dot{\gamma}_e = (\tau_e/\eta)[1 + (\tau_e/G)^a]^{(1-n)/(an)} \quad (2)$$

上式において、 τ_e は油膜のせん断応力、 $\dot{\gamma}_e$ は膜厚 z 方向のせん断速度である。 τ_e は、転がり x 方向と軸 y 方向のせん断応力成分を τ_x , τ_y とすれば、 $\tau_e^2 = \tau_x^2 + \tau_y^2$ で与えられる。 a , n , G は、流体粘度のせん断速度依存性を表すパラメータである。今回の解析では、 $\phi 25.4\text{ mm}$ の鋼球とガラス板（ヤング率： 81 GPa 、ポアソン比： 0.21 ）を組み合わせ、 $P_H=0.5\text{ GPa}$ 、 $T_0=313\text{ K}$ 、 $u_e=0.05\text{ m/s}$ の純転がり試験で計測された最小膜厚さ h_{min} 、中央膜厚さ h_c と数値計算の結果を比較して、3つのパラメータ a , G , n を設定した。

式(2)より、 x , y 方向のせん断速度成分： $\partial u/\partial z$, $\partial v/\partial z$ を求め、 z 方向に膜厚 0 から h まで積分すれば、両式の値は、潤滑面を構成する固体 A , B の x , y 方向速度成分差に等しくなる⁽⁴⁾。これら 2 つの積分式と、薄い油膜内部での力の釣り合い式を連立し、油膜内部のせん断応力： τ_x , τ_y 、速度： u , v 、せん断速度： $\partial u/\partial z$, $\partial v/\partial z$ 、等価粘度： η_x^* , η_y^* ⁽⁵⁾ の各成分を求めた後、これらを一般化 Reynolds 方程式⁽⁵⁾と油膜のエネルギー方程式に代入した。そして、潤滑面を構成する固体内の熱伝導方程式、接触面の弾性変形を考慮した膜厚式、力の釣り合い式と連立し、油膜の圧力と温度の分布を算出した。無次元荷重、速度、材料パラメータは、トラクション試験を模擬した解析では、 $W=2.23\times 10^{-7}$ 、 $U=7.36\times 10^{-12}$ 、 $G=7.53\times 10^3$ 、一方、鋼球とガラス板での純転がり試験の場合、 $W=1.35\times 10^{-6}$ 、 $U=1.00\times 10^{-11}$ 、 $G=4.13\times 10^3$ となる。なお、上記以外の材料定数と解析条件は、既報^(6,7)と同じ値を用いた。

3. 解析結果と考察

Table1 は、鋼球とガラス板の純転がり解析より算出された最小膜厚さ h_{min} と中央膜厚さ h_c であり、式(2)のパラメータ n 毎にこれらの値を示している。解析では、 $a=2.0$ 、 $G=0.45\text{ MPa}$ とした。膜厚計算式で得られる h_{min} と h_c の値は、 120 nm と

Table 1 Film thickness obtained by analysis ($\Sigma=0\%$)

n	h_{min}, nm	h_c, nm
0.36	92	184
0.37	92	185
0.38	93	186

210 nm であり、実験で計測された 91 nm, 192 nm よりも厚く評価され、最小膜厚は、30%以上の差が見られた。EHL 油膜の Shear-Thinning 性を考慮した解析では、純転がり条件でもその効果が認められ、 $n=0.36, 0.37, 0.38$ の場合、実験結果との差異が 5 %以内に留まった。この結果から、トラクション試験を模擬した数値解析では、式中のパラメータ a, G を、2.0, 0.45 MPa とし、 n は Table1 の 3つの値を各々適用した。

すべり率 $\Sigma=90\%$ までの転がり－滑り条件下で数値解析を行い、その結果を基に作成したトラクション曲線を、実験結果⁽²⁾と併せて Fig.1 に示す。実験結果と比較すると、 $n=0.38$ の場合、平均でおおよそ 7 %の差があるが、両者の違いは、すべり率が高くなるにつれ、拡大する傾向にある。一方、 $n=0.36$ では、低すべり率の領域で 25 %程度小さくなっている。すべり率の増加とともに実験値に近い値を示すものの、平均で約 16 %低くなっている。 $n=0.37$ の場合、低すべり率の領域では実験値より低く、高すべり率の領域では高い値を示しているが、実験結果との差異は平均で約 5 %となり、今回の解析において、最も小さい結果が得られた。なお、数値解析において、油膜温度の変化は認められず、トラクション係数は、すべり率とともに増加する傾向を示している。

Figure 2 は、低速側固体 B 接触面上に生じるせん断応力 τ_x の分布を P_H で無次元化したものである。図中の X, Y は、 x, y をヘルツの接触円半径 a_H ($\approx 65.9 \mu\text{m}$) で無次元化した座標軸である。すべり率 $\Sigma=3.0\%$ の場合、せん断応力は、流体出口部での局所的な変化が目立つ以外、いずれも低い値を示している。一方、 $\Sigma=90\%$ でのせん断応力は、 $\Sigma=3.0\%$ に比べ、高压が作用する接触面中心部付近で急増している。また、Fig.1 のトラクション係数と同じく、すべり率が大きくなるにつれ、パラメータ n の僅かな変化でも、せん断応力の大きさに明確な差異が生じることがわかる。

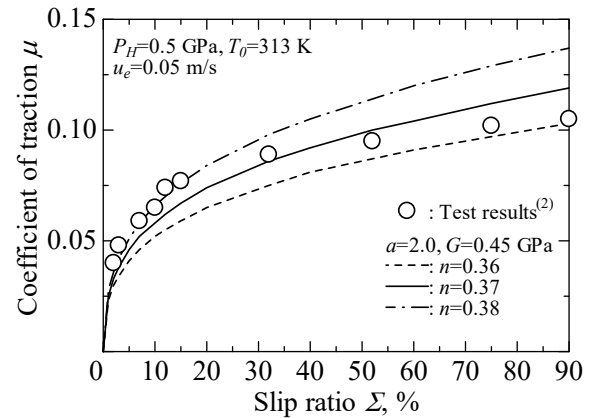


Fig. 1 Traction curves obtained by numerical analysis

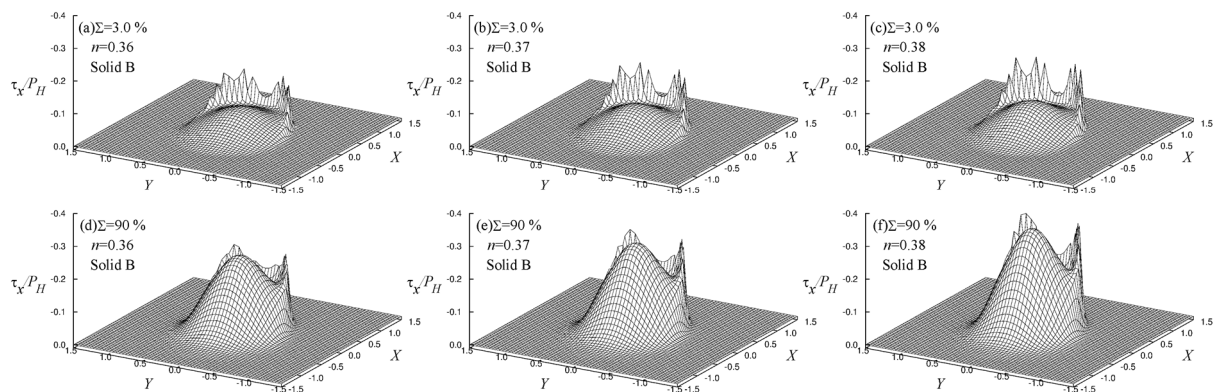


Fig. 2 Dimensionless shear stress τ_x / P_H distributions on the surface of solid B ($a=2.0, G=0.45$ MPa)

4. 結言

Sorab 式を適用した Krytox の Thermal EHL 解析を行った。鋼球とガラス板の純転がり解析で得られた最小膜厚と中央膜厚を、観測結果と比較し、両者の差異が 5 %以内となった Shear-Thinning モデルのパラメータを、転がり－滑り解析に適用したところ、 $a=2.0, G=0.45$ MPa, $n=0.37$ の組み合わせが、すべり率 $\Sigma=90\%$ までのトラクション試験で得られたトラクション特性に最も近い値を示した。

文献

- 1) 壺岐尾・馬渡・張：Shear-Thinning レオロジーモデルを用いた熱弾性流体潤滑解析－高压粘度推定式の影響－，トライボロジー会議 2020 秋 別府 予稿集 (2020) 371.
- 2) T. Mawatari, N. Ohno, B. Zhang, M. Kaneta, P. Sperka, I. Krupka & M. Hartl: EHL Traction Analysis of Perfluoropolyether Fluids based on Bulk Modulus, *Fin. J. Tribol.*, 2 32 (2014) 29.
- 3) J. Sorab, W. Vanarsdale: A Correlation for the Pressure and Temperature Dependence of Viscosity, *STLE Tribol. Trans.*, 34 (1991) 604.
- 4) 壺岐尾・馬渡・張：Shear-Thinning モデルを用いた熱弾性流体潤滑解析に関する研究，日本機械学会講演論文集，No.198-2 (2019) 1.
- 5) P. Yang and S. Wen: A Generalized Reynolds Equation for Non-Newtonian Thermal Elastohydrodynamic Lubrication, *ASME. J. Tribol.*, 112 (1990) 631.
- 6) T. Mawatari, A. Nakajima, & H. Matumoto: Shear Stress Analysis of EHL Oil Films based on Thermal EHL Theory – Effect of Inlet Oil Temperature-, *Tribol. Online*, 3, 5 (2008) 268.
- 7) 馬渡・大野・張：高密度 PFPE 流体の非ニュートン熱弾性流体潤滑解析に関する研究，トライボロジー会議 2016 秋 新潟 予稿集 (2016) 85.