

ソフト EHL におけるグリース潤滑の粒子法解析

Analytics using the Particle Method for Grease Lubrication in Soft EHL

JAXA (正) *雨川 洋章 JAXA (非) 根岸 秀世 JAXA (正) 小原 新吾 JAXA (正) 松岡 範子

Hiroaki Amakawa*, Hideyo Negishi*, Shingo Obara*, Noriko Matsuoka*

* Japan Aerospace Exploration Agency

1. はじめに

グリース潤滑軸受は高い潤滑性能と保油性から産業界全般において近年利用が拡大しており、省エネルギー/省資源の観点から低トルク化、長寿命化が強く求められている。過剰なグリースを与えると転がり粘性抵抗や攪拌抵抗によるトルク増につながるため、微量なグリースで長期間適切な潤滑状態を維持することが期待されている。微量グリースによる潤滑設計のためには、軸受内しゅう動部のミクロな弾性流体潤滑 (ElastoHydrodynamic Lubrication, 以下 EHL) 挙動に加えて軸受全体におけるマクロなグリース挙動も把握し、グリース流動や膜厚分布を制御する必要がある。

軸受内全体の EHL とマクロ挙動の連成問題は計測手段の制約から実験での把握は難しい。また数値計算も、従来の Reynolds 方程式ベースの手法では解析領域がしゅう動部に限定されるため適用に限界がある。最近では、軸受内のグリースマクロ挙動の把握のため CFD (Computational Fluid Dynamics) の適用事例¹⁾も見られるようになってきたが、グリースのレオロジー特性の取り扱い、しゅう動部における流体潤滑や弾性流体潤滑への適用、軸受内の保持器等機構部品の運動とグリース挙動の連成など課題は多く、CFD の利用は限定的である。

著者らは、CFD 分野で近年注目されている粒子法の 1 種である MPS (Moving Particle Simulation) 法²⁾に着目し、軸受内のミクロ・マクロ挙動を予測可能な解析技術の研究に着手した。MPS 法は、メッシュレス法であるため軸受など複雑な境界形状やその運動の扱いが容易であり、液体の大変形や分裂等の計算に適している。また流体挙動に限らず剛体、弾性体等の固体についても同一の計算原理が適用可能でマルチフィジックスの計算に向いている利点がある。これまでに著者らは非圧縮性流体を仮定した Navier-Stokes 方程式に基づく MPS 法にグリースのレオロジー特性として非ニュートン流体モデルを導入し、グリースのダム崩壊実験に適用して有効性を示した³⁾。また、MPS 法にソフト EHL モデルを導入しニュートン流体の線接触ソフト EHL 問題に適用した⁴⁾。

本稿では、MPS 法に基づくグリース挙動の数値解析手法構築を目的として、これまで構築したグリースの非ニュートン流体モデルを線接触純滑り EHL 問題に適用し、従来の Reynolds 方程式ベースの解析手法と比較して妥当性を検証した。EHL は既報⁴⁾と同様にソフト EHL を対象とし、流体計算に MPS 法、固体計算に弾性変形式を採用し、双方向連成計算を行った。

2. 数値計算手法および計算条件

本研究では、グリースを高粘性の非圧縮性流体として扱い、以下の 2 次元 Navier-Stokes 方程式を計算した。

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\nabla(2\mu(\dot{\gamma})\mathbf{S}) + \vec{g} \quad (2)$$

ここで $t, p, \rho, \mu, \dot{\gamma}, \mathbf{S}, \vec{u}, \vec{g}$ は時刻、圧力、密度、粘性係数、せん断速度、変形速度テンソル、変位ベクトル、重力加速度ベクトルである。一般に式(2)の右辺は第一項から順に圧力項、粘性項、外力項と呼ばれ、圧力項と粘性項は粒子間相互作用モデルで空間的に離散化する。本研究では、圧力項、粘性項共に陰解法で時間発展させる Implicit MPS 法を採用した。グリースの粘性係数は、非ニュートン (ビンガム塑性) 流体モデルの Papanastasiou 式⁵⁾を採用し、 $\mu(\dot{\gamma}) = \eta_p + (\tau_Y/\dot{\gamma})(1 - e^{-m\dot{\gamma}})$ で与えた。ここで η_p は塑性粘度、 τ_Y は降伏応力、 m は応力成長指数である。グリースの塑性粘度を基油の粘度と同じ 0.0831 Pa·s とし、 τ_Y と m は $\tau_Y = 128$ Pa, $m = 4.5$ とした。せん断応力-せん断速度曲線を Fig. 1 に示す。

計算対象は Fig. 2 に示す二次元線接触純滑りソフト EHL 問題とした。速度 U で水平方向に移動する平板の上に流体膜を介して円筒が静止したモデルとして、円筒の弾性変形による油膜厚さの変化を考慮した。油膜厚さ $h(x)$ は式(3)から求めた⁶⁾。

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{R} - \frac{4}{\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left| \frac{x-x'}{b} \right| p(x') dx' \quad (3)$$

ここで h_0, R, E, b はそれぞれ最小油膜厚さ、円柱の半径、弾性係数、ヘルツ接触幅である。1 time step ごとに h_0 を変化させることで、円柱に負荷する荷重と、流体膜から受ける圧力の積分値との釣り合いを模擬した。円筒半径 R は 10 mm、弾性係数 E は 19.466 MPa、入力荷重 W は 1 kN、初期最小膜厚 h_0 は 80 μm 、膜厚 h_1 は 100 μm 、移動平板の速度 U は 8.0 m/s とした。流体の密度は 870 kg/m³ とした。計算条件は初期粒子間距離 $l_0 = 34, 17, 8.5 \mu\text{m}$ の 3 条件とし、総粒子数を 3,044, 8,164, 24,674 とした。時間刻み Δt を 5.0×10^{-8} s とし 0.05 s 間の計算を実施した。従来の Reynolds 方程式ベースの解析解は Ping らの緩和法⁶⁾により求めた。

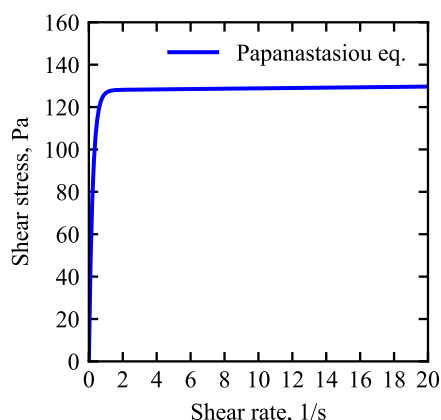


Fig. 1 Shear stress-shear rate behavior.

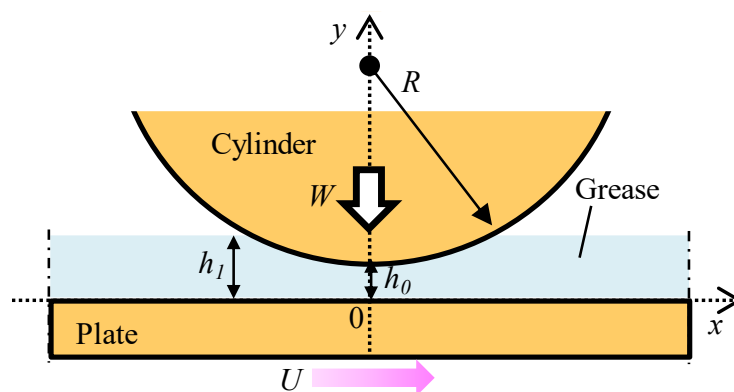


Fig. 2 Schematic of line contact model.

3. 計算結果

Figure 3 に初期粒子間距離 $l_0 = 8.5 \mu\text{m}$ の条件における計算結果を示す。図は定常状態に達した時刻 0.05 s のグリース膜内に発生する圧力分布の瞬時場を示す。Figure 3 からわかるように、グリース膜は最小隙間部の上流側に厚い膜を形成し、最小隙間部に向かって圧力が増加するくさび膜効果を示す。また円筒部は圧力分布に従って弾性変形することを確認した。圧力分布と膜厚分布の解析解との比較結果を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。Fig. 4 は時間平均圧力分布を示す。Figure 4 および Fig. 5 より、圧力分布と膜厚分布のいずれにおいても、初期粒子間距離 $l_0 = 35 \mu\text{m}$ では、解像度不足のため非物理的な圧力ピークなどが見られ、解析解の再現性は悪かった。一方で、 $l_0 = 17 \mu\text{m}$, $8.5 \mu\text{m}$ では解析解をほぼ再現した。以上のことからグリースのソフト EHL 問題において MPS 法が有効であることを確認した。

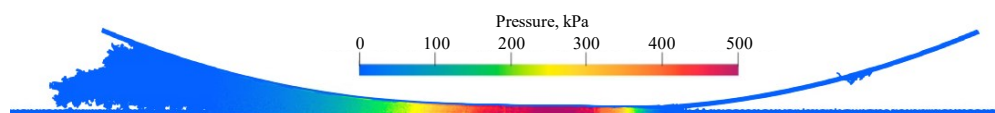


Fig. 3 Pressure contour of grease-lubricated line contact for $l_0 = 8.5 \mu\text{m}$ by MPS.

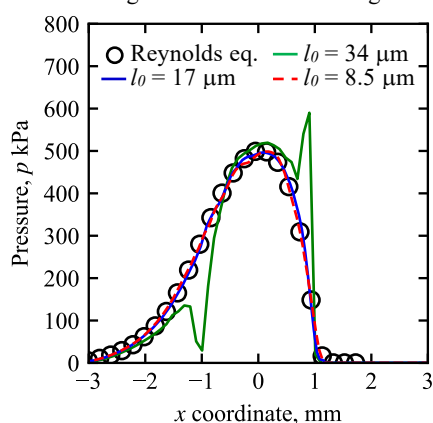


Fig. 4 Pressure distribution.

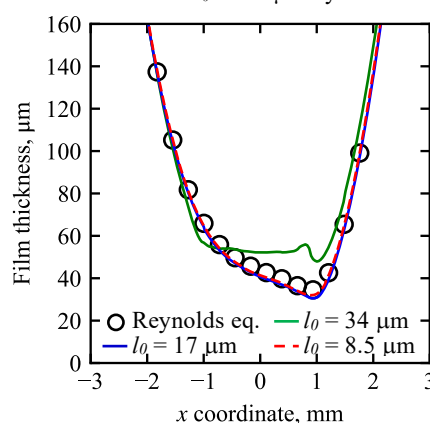


Fig. 5 Film thickness distribution.

4. おわりに

MPS 法に基づくグリース挙動の数値解析手法構築を目的として、グリースの非ニュートン（ビンガム塑性）流体モデルを線接触純滑りソフト EHL 問題に適用し、その妥当性を検証した。計算の結果、圧力分布と円筒形状は解析解をほぼ再現し、また粒子解像度依存性も確認できたことから、本手法の有効性が確認された。

謝辞

本研究は科学研究費(基盤研究(C), 課題番号: 21K03847)の助成を受けている。また、本報で示した解析結果は JAXA Supercomputer System generation 3 (JSS3) を用いて実施した。ここに記し著者らの謝意を表する。

文献

- 1) 野田他: 玉軸受におけるグリース挙動の X 線観察および多相流解析の妥当性確認, トライボロジスト, 61, 4 (2016).
- 2) 後藤: 粒子法, 森北出版 (2018).
- 3) 根岸他: Explicit MPS 法によるビンガム擬塑性流体ダム崩壊挙動の数値解析, 日本機械学会論文集 (2020).
- 4) 山田他: 粒子法を用いたソフト EHL 現象への数値解析手法の開発, トライボロジー会議 2021 秋松江予稿集 (2021).
- 5) Papanastasiou, T. C., "Flows of Materials with Yield," Journal of Rheology, 31, 5 (1987) 385-404.
- 6) Ping H., "Numerical Calculation of Elastohydrodynamic Lubrication; Methods and Programs," Wiley (2015).