

## 粒子法による枯渇潤滑ソフト EHL 解析

Numerical analysis of starved soft elasto-hydrodynamic lubrication by using the Particle method

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

転がり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/省資源の観点で低トルク化、長寿命化が強く求められている。過剰な潤滑油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、微量な潤滑油で潤滑される枯渇潤滑条件で適切な弾性流体潤滑 (ElastoHydrodynamic Lubrication, 以下 EHL) 膜厚を長期間維持することが期待される。枯渇潤滑下の EHL 膜厚の予測のためには、軸受全体のマクロな潤滑油挙動から転がり接触入口部に潤滑油が流入し、EHL 油膜を形成する挙動を予測可能な技術が不可欠である。

潤滑油の軸受内のマクロな挙動と転がり接触部のミクロな挙動を実験的に同時に把握することは計測手段の制約で難しい。また数値計算も、従来の Reynolds 方程式ベースの手法では、転がり接触入口部の膜厚を既知として取り扱う必要があるため適用に限界がある。最近では、潤滑油のマクロ挙動の把握のために CFD (Computational Fluid Dynamics) を適用する事例<sup>1)</sup>も見られるようになってきたが、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潤滑油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。また弾性体、剛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。著者らはこれまでに非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とする MPS 法を導入し、流体潤滑のくさび膜および絞リ膜効果の再現を進めた<sup>2)</sup>。またソフト EHL モデル<sup>3)</sup>や表面張力モデル<sup>4)</sup>を導入し、線接触すべり問題で各々のモデルの有効性を検証した。

本稿では、枯渇潤滑への粒子法の適用可能性を評価するため、種々の初期油量に対して入口メニスカス距離と EHL 中央膜厚の特性を従来の Reynolds 方程式ベースの解析手法と比較し妥当性を検証した。EHL は既報<sup>3)</sup>と同様に潤滑油を非圧縮性流体として扱えるソフト EHL とした。入口メニスカスと EHL の再現のためにこれまで流体潤滑問題で検証した表面張力モデルをソフト EHL に適用して、流体計算と固体弾性計算の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

本研究では以下の 2 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とした。

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

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{g} + \frac{1}{\rho}\vec{F}_{st} \quad (2)$$

ここで  $t, p, \rho, \nu, \vec{u}, \vec{g}, \vec{F}_{st}$  は時刻、圧力、密度、動粘性係数、流速ベクトル、重力加速度ベクトル、単位体積当たりの表面張力ベクトルである。本研究では、右辺第一項の圧力項、第二項の粘性項と共に陰解法で時間発展させる Implicit MPS 法を採用した。表面張力モデルには Density dependent potential モデル<sup>4)</sup>を使用した。

計算対象は Fig. 1 に示す 2 次元線接触ソフト EHL 問題とした。速度  $U$  で水平方向に移動する平板上に流体膜を介して円筒が静止したモデルとして、円筒の弾性変形を考慮した。油膜厚さ  $h(x)$  は式(3)から求めた<sup>5)</sup>。

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

ここで  $h_0, R, E, b$  はそれぞれ初期最小膜厚、円柱の半径、弾性係数、ヘルツ接触半幅である。1 time step ごとに  $\Delta h$  を変化させることで円柱への入力荷重と流体膜からの圧力積分値との釣り合いを模擬した。円筒半径  $R$  は 100 mm、弾性係数  $E$  は 19.466 MPa、入力荷重  $W$  は 1 kN、平板の速度  $U$  は 0.4 m/s とし、本条件のヘルツ接触半幅  $b$  は 3.62 mm だった。流体の密度と粘度は 870 kg/m<sup>3</sup> と 0.0831 Pa-s とし、表面張力モデルの表面張力と接触角は 32 mN/m, 60 deg とした。初期膜厚  $h_0, h_1$  を 5.0 μm から 60 μm とし潤滑油量を調整した。入口/出口側の計算範囲  $L_{lin}, L_{lout}$  は 10.1 mm と 7.1 mm とし、入口/出口側の初期膜厚  $h_0$  の範囲  $L_{0in}, L_{0out}$  は 4.0 mm と 2.0 mm とした。初期粒子間距離  $l_0$  は 5.0 μm、時間刻み  $\Delta t$  は  $1.0 \times 10^{-7}$  s とし 0.2 s の計算を実施した。従来の Reynolds 方程式の解析解は Ping の緩和法<sup>5)</sup>で求めた。

### 3. 計算結果

Figure 2 に定常状態に達した時刻 0.2 s の圧力分布の瞬時場を示す。Fig. 2(a) と (b) は初期膜厚  $(h_0, h_1) = (60, 60) \mu\text{m}, (25, 5) \mu\text{m}$  の結果を例として示す (以下、Case 1, Case 2 と呼ぶ)。Figure 2 からわかるように、油膜は最小隙間部に向かうに従って圧力が増加するくさび膜効果を示し、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。次に圧力分

布と膜厚分布の解析解との比較結果を Fig. 3 と 4 に示す. Reynolds 方程式ベースの解析解は各解析ケースの入口メニスカス距離  $L_b$  を入口境界条件にして求めた. Figure 3 と 4 より, 圧力分布と膜厚分布のいずれも解析解をほぼ再現した. そして Fig. 2 から 4 より, 初期膜厚が小さく潤滑油量の少ない Case 2 は Case 1 に比べ入口メニスカス距離  $L_b$  と中央膜厚  $h_c$  がそれぞれ小さくなる傾向が確認された. これは入口側の潤滑油量が不足すると入口側圧力が発生せず EHL 膜厚が減少する枯渇潤滑状態を粒子法で再現していると考えられる. さらに枯渇潤滑への粒子法の適用可能性を確認するため, 入口メニスカス距離  $L_b$  の無次元数に相当する入口距離パラメータ  $\psi_i$  と, 中央膜厚  $h_c$  と十分潤滑時の中央膜厚  $h_{cf}$  で整理した. 結果を Fig. 5 に示す. 入口距離パラメータ  $\psi_i$  は Wolveridge らの定義より  $\psi_i = Sb^{1/3}/(2Rh_{cf})^{2/3}$  から求めた<sup>6)</sup>.  $S$  は入口距離であり  $S = L_b - b$  で与えられる. また十分潤滑時の中央膜厚  $h_{cf}$  は, Case 1 の初期膜厚  $(h_0, h_i) = (60, 60) \mu\text{m}$  以上にしても中央膜厚  $h_c$  の増加がみられなかったことから, Case 1 の  $h_c = 25.0 \mu\text{m}$  を  $h_{cf}$  とした. Figure 5 より, 粒子法の結果は入口距離パラメータ  $\psi_i$  が小さくなるに従って中央膜厚比  $h_c/h_{cf}$  も小さくなる傾向を捉え, 解析解をほぼ再現することを確認した. 粒子法は入口メニスカス距離  $L_b$  を境界条件として与えることなく油量さえ与えれば枯渇潤滑時の膜厚を精度よく模擬でき, 枯渇潤滑への適用可能性があると考えられる. 本手法はより現実的な転がり軸受内の潤滑油挙動を定量評価できることが期待される.

#### 4. おわりに

枯渇潤滑への粒子法の適用可能性を評価するため, これまで構築したソフト EHL モデルに表面張力を適用して, 種々の初期油量に対する入口メニスカスと EHL 膜厚の関係を検証した. その結果, Reynolds 方程式の解析解との比較を通して, 潤滑油量に対応した圧力と膜厚分布, また油量減少に伴う入口メニスカスと中央膜厚の減少傾向を良好に再現し, 本手法の有効性を確認した.

#### 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) 根岸他: MPS 法による線接触流体潤滑解析, 日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 890 (2020).
- 3) 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).
- 4) 根岸他: 密度依存ポテンシャルに基づく表面張力モデルを導入した MPS 法流体潤滑解析, 第 35 回数値流体力学シンポジウム (2021) D07-1.
- 5) Ping, H., "Numerical Calculation of Elastohydrodynamic Lubrication; Methods and Programs," Wiley (2015).
- 6) Wolveridge, P. E. *et al*, "The Starved Lubrication of Cylinders in Line Contact," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 185, 1 (1970) 1159-1169.

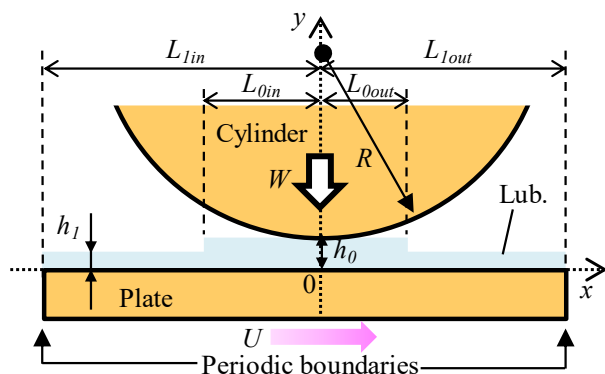


Fig. 1 Schematic of line contact model.

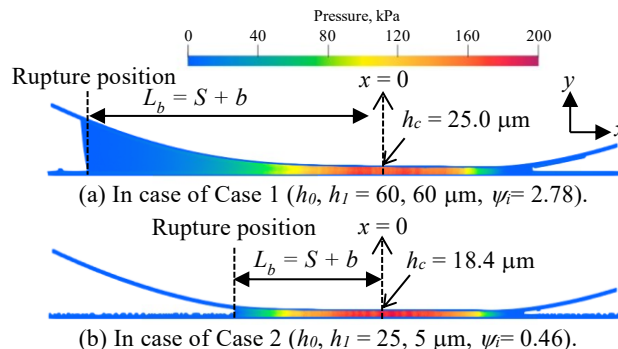


Fig. 2 Pressure contours by MPS.  
(Scale in y direction is enlarged by 5 times)

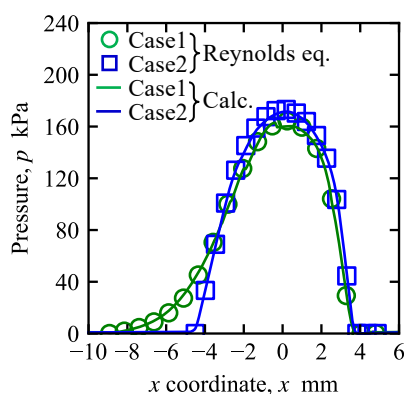


Fig. 3 Pressure distribution.

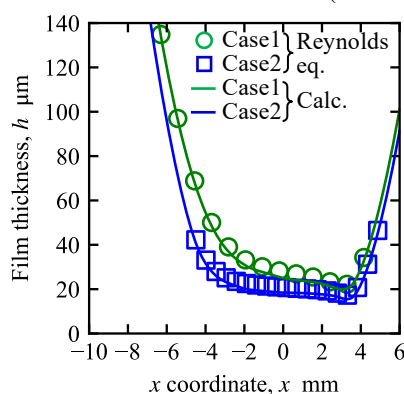


Fig. 4 Film thickness distribution.

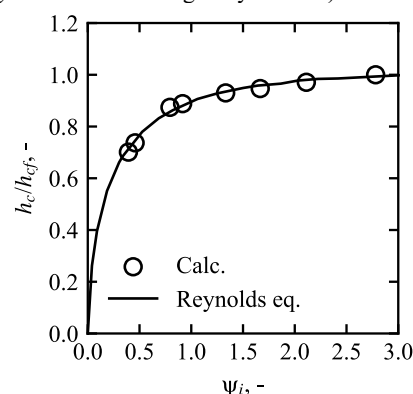


Fig. 5 Film thickness in starvation.