

# MPH法を用いたソフトEHLシミュレーション

Soft EHL Simulation Using MPH Method

根岸秀世<sup>1)</sup>, 近藤雅裕<sup>2)</sup>, 雨川洋章<sup>3)</sup>, 小原新吾<sup>4)</sup>, 黒瀬良一<sup>5)</sup>

Hideyo Negishi, Masahiro Kondo, Hiroaki Amakawa, Shingo Obara and Ryoichi Kurose

- 1) 宇宙航空研究開発機構（〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1, E-mail: negishi.hideyo@jaxa.jp）  
京都大学大学院（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3棟, E-mail: negishi.hideyo.27i@st.kyoto-u.ac.jp）
- 2) 博(工) 産業技術総合研究所（〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1, E-mail: kondo.masahiro@aist.go.jp）
- 3) 博(工) 宇宙航空研究開発機構（〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1, E-mail: amakawa.hiroaki@jaxa.jp）
- 4) 博(工) 宇宙航空研究開発機構（〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1, E-mail: obara.shingo@jaxa.jp）
- 5) 博(工) 京都大学大学院（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C3棟, E-mail: kurose@mech.kyoto-u.ac.jp）

In order to predict micro- and macro-behavior of lubricant and torque in rolling element bearings, a numerical method has been studied based on particle methods. In this study, the moving particle hydrodynamics method (MPH), which is a physically consistent particle method, is applied to a soft Elasto-Hydrodynamic Lubrication (EHL) problem in line contact. Specifically, a Fluid-Structure Interaction (FSI) method is developed based on the MPH method incorporating one-dimensional film thickness equation and a load balancing equation. The proposed approach is validated against a numerical solution based on the classic Reynolds equation and predicts well pressure and film thickness distributions. As a result, the capability of the proposed approach for soft EHL problems is confirmed.

**Key Words :** Particle methods, MPH method, FSI, EHL, Lubrication

## 1. はじめに

転がり軸受は，“産業の米”とも呼ばれ、現代社会のあらゆる機械や装置を動かすために必要不可欠な重要機械要素である。近年では、カーボンニュートラルなどの省資源/省エネルギー化に向けた社会的要請に伴い、転がり軸受の低トルク化、長寿命化が強く求められている[1,2]。

転がり軸受の基本動作原理は弾性流体潤滑である[3]。弾性流体潤滑は、軸受内の固体壁面同士が直接接触しないように、充分な厚みの流体膜（潤滑剤と呼ばれる）で離れてることで低摩擦を実現する。このとき、流体膜内にはGPaオーダーの高圧が発生し、潤滑部では固体壁面に弾性変形が生じることが特徴である。弾性流体潤滑では、過剰な潤滑剤を与えると、転がり粘性抵抗や攪拌抵抗によりトルクが増大するため、近年では微量な潤滑剤で潤滑を行う、すなわち枯渇潤滑が注目されている[4]。枯渇潤滑の実現のためには、微量な潤滑剤で長期間適切に流体潤滑状態を維持する必要があり、転がり軸受全体におけるミクロ・マクロの潤滑剤挙動を把握・制御する必要がある。

転がり軸受全体におけるミクロ・マクロの潤滑剤挙動の把握は、計測手段の制約から実験では難しい。そこで近年は、Computational Fluid Dynamics (CFD)による研究が進展している[5]。著者らも、転がり軸受内の複雑形状やマルチフィジックスへの対応を考慮して、粒子法に基づく数値計算手法の構築を進めてきた[6-11]。特に最近は、物理的健全性を有する粒子法として近藤らにより提案さ

れたMoving Particle Hydrodynamics (MPH) 法[12-15]の適用を開始した。MPH法では、離散化したNavier-Stokes方程式が解析力学的な枠組みに従うことで、粒子が力学的に安定に運動することが担保される。これにより、経験的な緩和パラメータや安定化の工夫 (Collision model, Particle shifting等)[16]に頼ることなく、安定に計算が可能となる。また、角運動量保存[13]や負圧の計算[10,14]が可能であるのも利点である。

本報では、既報[9]に引き続き、粒子法による弾性流体潤滑解析手法の構築を目的として、MPH法に基づく流体構造連成解析手法を構築した。解析対象は、弾性流体潤滑のうち、比較的低压で潤滑剤の密度や粘性係数が一定と見なせるソフトEHLとし、移動平板と円筒、流体膜で構成される線接触潤滑問題の検証解析を実施した。

## 2. 計算条件および数値計算手法

図1に計算対象の概要図を示す。解析対象は線接触ソフトEHL問題であり、移動平板と円筒、その間に存在する流体膜で構成される。計算条件として、円筒半径 $R=100\text{ mm}$ 、スライド速度 $U=0.4\text{ m/s}$ 、入力荷重 $W=1.0\text{ kN}$ 、初期液膜厚さ $h_0=60\text{ }\mu\text{m}$ とした。流体物性は密度 $870\text{ kg/m}^3$ 、せん断粘性率 $8.31 \times 10^{-2}\text{ Pa-s}$ 、体積粘性率 $1.0\text{ Pa-s}$ 、体積弾性率 $5 \times 10^6\text{ Pa}$ 、初期粒子間距離 $5.0\text{ }\mu\text{m}$ を与えた。固体は、移動平板はスライド速度を持った剛体、円筒は弾性体として表面付近のみ考慮し、いずれも4粒子層でモデル化した。円

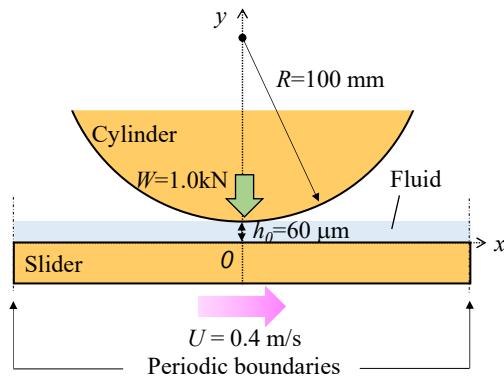


図1 解析モデル概要図

筒の弾性係数 $E$ は $1.95 \times 10^7$  Paを与えた。

流体の支配方程式は2次元非圧縮性Navier-Stokes方程式とし、円筒の弾性変形は以下の1次元膜厚方程式

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2R} - \frac{2}{\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} p(s) \ln \left| \frac{x-s}{b} \right| ds + \Delta h \quad (1)$$

を使用した。ここで $h_0$ ,  $R$ ,  $E$ ,  $b$ はそれぞれ初期最小膜厚、円柱半径、弾性係数、ヘルツ接触半幅である。流体と円筒間の連成は、式(1)の $\Delta h$ を1 time step毎に変化させ、以下のロードバランス式を満たす定常解を探索した。

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx \quad (2)$$

流体計算には、圧力代入型陰解法MPH-I[15]を使用した。

### 3. 計算結果

図2に流体膜内の圧力コンター図を示す。可視化のため高さ方向に5倍した。図から明らかなように、最小隙間上流に厚い流体膜を形成し、最小隙間部に向かって圧力が増加するくさび膜効果が再現されている。円筒部は荷重と流体膜からの圧力に応じて弾性変形している。

図3に流体膜の圧力と膜厚分布を示す。比較のため、従来手法であるレイノルズ方程式の数値解[3]もプロットした。図から明らかなように、本計算結果はレイノルズ方程式の解を良好に再現しており、その有効性が確認された。

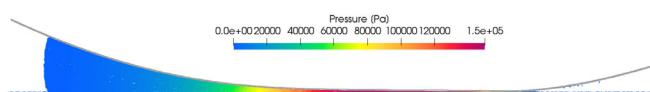


図2 流体膜の圧力コンター図（高さ方向に5倍）

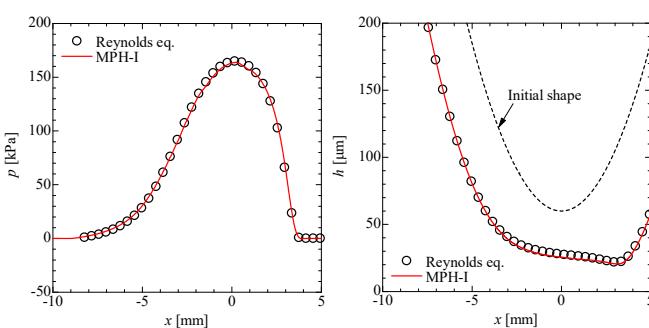


図3 流体膜の圧力分布(左)と膜厚分布(右)

### 4. まとめ

MPH-I法に膜厚方程式と荷重釣合式を組合わせた線接触Soft EHL解析手法を構築した。検証解析によりレイノルズ方程式の数値解を良好に再現し、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所有のスーパーコンピュータJSS3を用いて得られたものである。ここに記し、著者らの謝意を表する。

### 参考文献

- [1] 野口昭治: 転がり軸受の技術・研究動向, 日本機械学会論文集(C編), Vol.70, pp.2805-2813, 2011.
- [2] 林田一徳, 松山博樹: 転がり軸受の進展と将来展望, トライボロジスト, Vol.61, pp.734-741, 2016.
- [3] 山本雄二, 兼田楨宏: トライボロジー, 理工学社, 2012.
- [4] Poll, G. et al.: Starved Lubrication in Roppling Contacts - A Review, Bearing World Journal, Vol. 4, pp.69-81, 2019.
- [5] Vakis, A.I. et al.: Modeling and simulation in tribology across scales: An overview, *Tribology International*, Vol.125, pp.169-199, 2018.
- [6] 根岸秀世ほか: MPS法による玉軸受内グリース挙動数値解析の基礎検討, 第32回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, A08-2, 2018.
- [7] 根岸秀世ほか: 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.20-00241, 2020.
- [8] Yamada, D. et al.: Application of improved multiresolution technique for the MPS method to fluid lubrication, *Comput. Part. Mech.*, Vol.9, pp.421-441, 2021.
- [9] 山田大輔ほか: ソフトEHL現象への粒子法の適用における空間解像度依存性の検証, 第35回国数値流体力学シンポジウム講演予稿集, D07-2, 2021.
- [10] 根岸秀世ほか: MPH-I法による線接触流体潤滑解析, 第35回計算力学講演会(CMD2022) 予稿集, 6-06, 2022.
- [11] 根岸秀世, 近藤雅裕, 雨川洋章, 小原新吾, 黒瀬良一: Moving Particle Hydrodynamics法による転がり円筒の流体潤滑解析, ながれ, Vol. 42, 2023 (in press).
- [12] Kondo, M.: A physically consistent particle method for incompressible fluid flow calculation, *Comput. Part. Mech.*, Vol.8, pp.69-86, 2021.
- [13] Kondo, M. et al.: A physically consistent particle method for high-viscous free-surface flow calculation, *Comput. Part. Mech.*, Vol.9, pp.265-276, 2021.
- [14] Kondo, M. and Matsumoto, J.: Surface tension and wettability calculation using density gradient potential in a physically consistent particle method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, Vol.385, 114072, 2020.
- [15] 近藤雅裕, 松本純一: 高粘性非圧縮MPH法を高速化する圧力代入型陰解法, 日本計算工学会論文集, No.20210016, 2021.
- [16] 後藤仁志: 粒子法, 培風館, 2018.