

## 格子法による流体潤滑問題の基礎検討

### Fundamental Study on Hydrodynamic Lubrication Problems Using a Grid Method

JAXA (正) \*雨川 洋章 (株)菱友システムズ (非) 藤原 大典 JAXA (非) 根岸 秀世 JAXA (正) 間庭 和聡

Hiroaki Amakawa\*, Hironori Fujihara\*\*, Hideyo Negishi\*, Kazuaki Maniwa\*

\* Japan Aerospace Exploration Agency, \*\* Ryoyu Systems Co., Ltd.

#### 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機械要素である。近年では、カーボンニュートラルの実現に向けた省資源・省エネルギー化の社会的要請を背景に、転がり軸受の低トルク化および長寿命化が強く求められている<sup>1,2)</sup>。

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。この課題に対し、近年では Computational Fluid Dynamics (CFD) を用いた数値解析が進展している<sup>3)</sup>。著者らも、軸受内部の複雑形状やマルチフィジックス現象への対応を目的として、粒子法に基づく数値解析手法の構築に取り組んできた<sup>4-9)</sup>。しかしながら、粒子法は比較的新しく安定性や計算コストの面で課題が残されており、産業応用には未だ発展途上である。一方、格子法は航空宇宙や自動車分野において実際の製品開発に活用されており、技術的成熟度が高い。潤滑問題への適用も急速に進んでおり、線接触流体潤滑問題<sup>10)</sup>や弾性流体潤滑問題を対象として、熱流体連成<sup>11)</sup>、非ニュートン流体<sup>12)</sup>、キャビテーション<sup>13)</sup>など、潤滑解析において重要な物理モデルの検証が報告されている。さらに近年では、商用ソフト ANSYS の Fluent と Mechanical を連成して点接触弾性流体潤滑問題に適用した例も報告されており<sup>14)</sup>、格子法の定量的有効性が示されている。

本研究では、格子法による流体潤滑問題への適用に向けた基礎的検討として、ミクロスケールの線接触流体潤滑解析を実施した。具体的には、流体潤滑における圧力発生機構として知られる「くさび膜効果」および「絞り膜効果」について検証を行い、圧力分布およびその時刻歴を実験結果と解析解と比較評価した。

#### 2. 数値計算手法

本研究では、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、非構造格子法による有限体積法で非定常計算を実施した。気液界面の追跡には VOF (Volume Of Fluid) 法を用い、表面張力には CSF (Continuum Surface Force) モデルを用いた。物性は全て一定値とし、密度は  $850 \text{ kg/m}^3$ 、粘性係数は  $0.114 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力係数は  $0.032 \text{ N/m}$  とした。壁面での濡れ性は静的接触角  $60^\circ$  を与えた。Navier-Stokes 方程式の粘性項は Laminar モデルを使用し、乱流とキャビテーションは非考慮とした。対流項は 2 次精度風上法で離散化し、時間積分は 1 次精度陰解法を使用した。計算ソルバーには ANSYS Fluent ver. 2023.R2 を用いた。

#### 3. 線接触流体潤滑解析

##### 3.1 くさび膜

静止円柱と移動平板に挟まれた純滑り条件の二次元線接触流体潤滑油膜を対象に、定常状態における圧力分布を検証した。計算体系は Bruyere et al.<sup>10)</sup>に準じ、計算結果は Floberg の実験結果<sup>15)</sup>と比較した。計算条件を図 1(a)に示す。計算は 2 次元で実施し、静止円柱の半径を  $50 \text{ mm}$ 、最小膜厚を  $400 \mu\text{m}$  とした。移動平板は  $+x$  方向速度  $0.131 \text{ m/s}$  の速度境界条件とし、静止円柱は壁面すべり無し条件とした。水平方向に周期境界条件を、 $z$  軸+側壁面に圧力出口境界を与え、全体に重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$  を  $-z$  方向に負荷した。本条件の Reynolds 数は  $0.391$  である。計算に用いた計算格子を図 1(b)に示す。最小隙間部に 8 格子設けるよう格子幅  $50 \mu\text{m}$  程度で分割し、最小隙間部以外は格子幅  $100 \mu\text{m}$  程度で分割した。総計算格子数は  $74,062$  である。

図 1(c), (d)に定常状態における油膜形状と内部圧力分布を示す。図 1(c)の体積分率コンターは液体の場所が  $1.0$ 、気体の場所が  $0$  で可視化した。図 1(c)(d)より、表面張力と濡れ性により、しゅう動部入口および出口部でメニスカスが形成され、油膜内ではくさび膜効果によりしゅう動部付近で高い圧力が発生している。またしゅう動部出口部では、末広がり形状に伴う負圧の発生が見られる。図 1(e)は、実験結果との圧力分布比較である。計算結果は実験結果を良好に再現した。

##### 3.2 絞り膜

鉛直方向に正弦波振動する移動板と平板で挟まれた二次元油膜を対象に、非定常状態における圧力の時刻歴や圧力分布を検証した。計算結果は Reynolds 方程式の解析解と比較した。計算条件を図 2(a)に示す。計算領域は  $20 \text{ mm}$  四方とし、幅  $10 \text{ mm}$ ・厚さ  $2 \text{ mm}$  の移動板を初期膜厚  $1 \text{ mm}$  の位置に設けた。移動板の膜厚  $H(t)$ は、正弦波で加振を行い振幅  $0.3 \text{ mm}$ 、周波数  $1 \text{ Hz}$  を与えた。移動板の移動に伴い、図 2(a)の Grid stretch domain の格子幅を伸び縮みさせる格子モーフィングを行った。境界条件は、計算領域上部に圧力出口境界条件を、それ以外の壁面にすべり無し壁面境界条

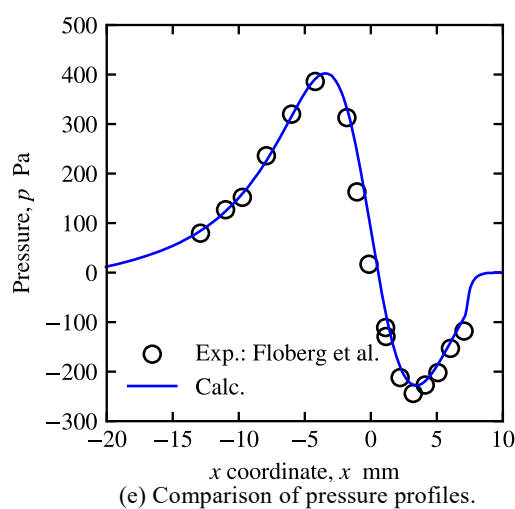
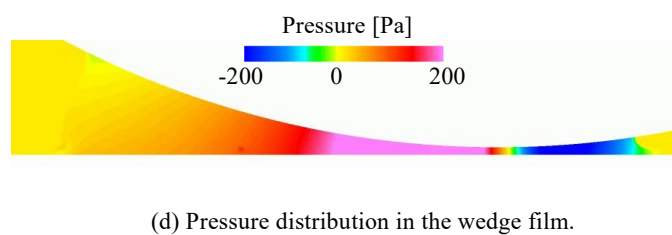
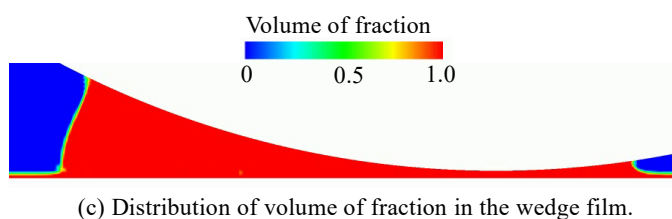
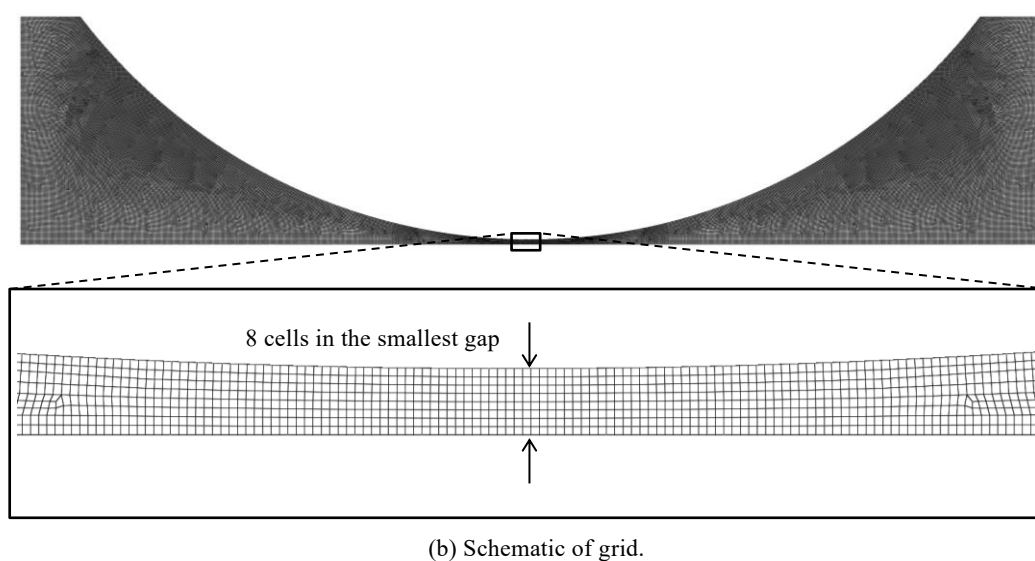
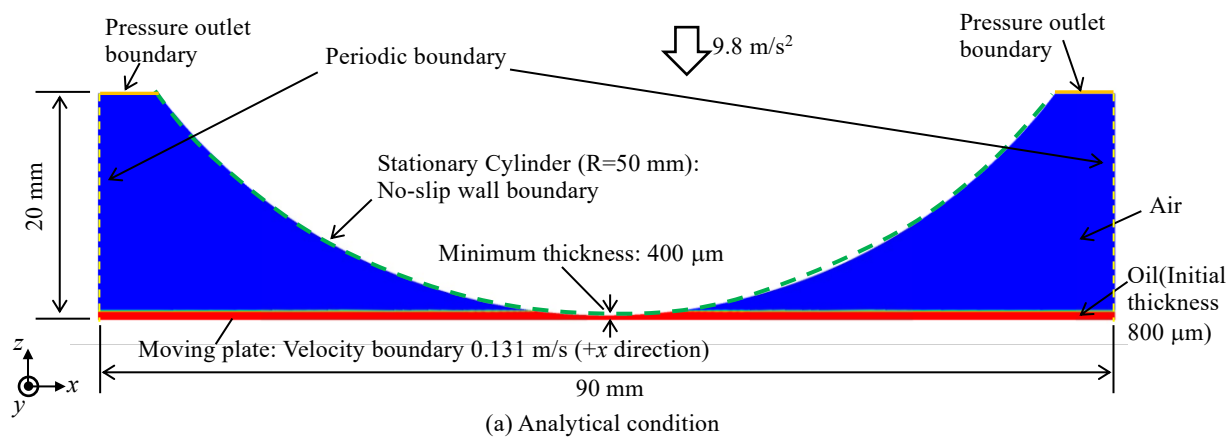
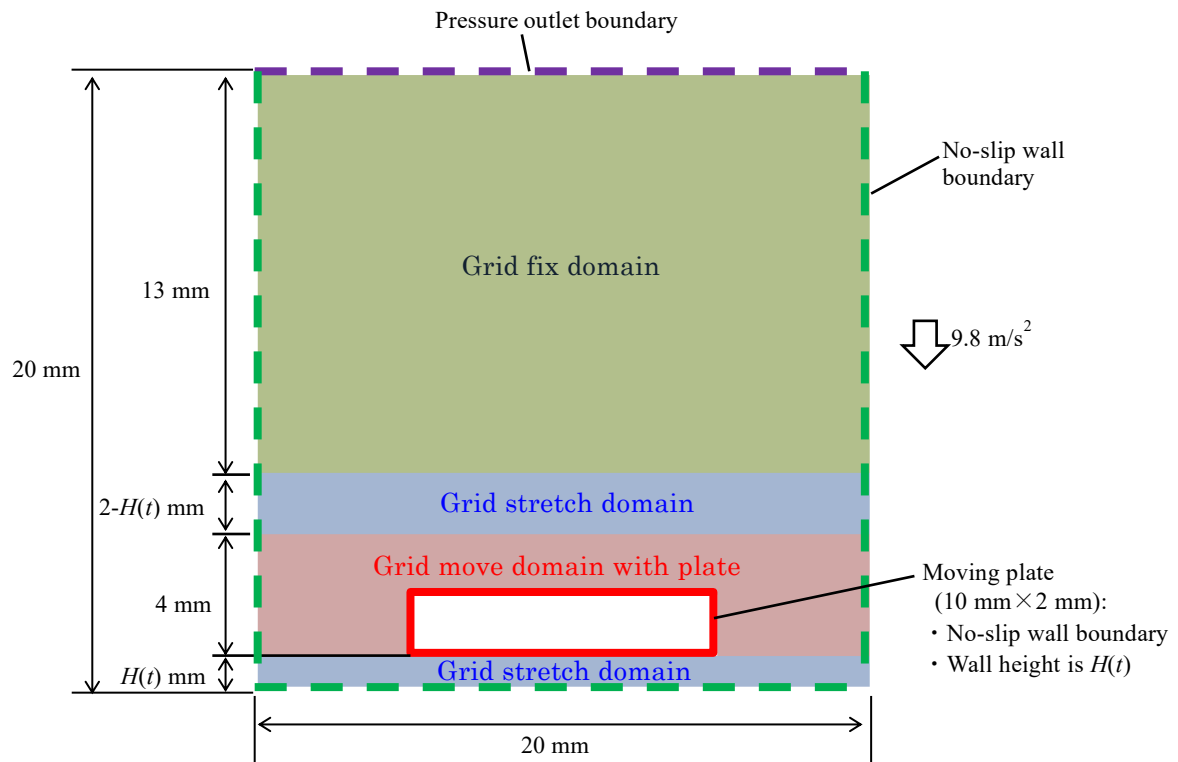
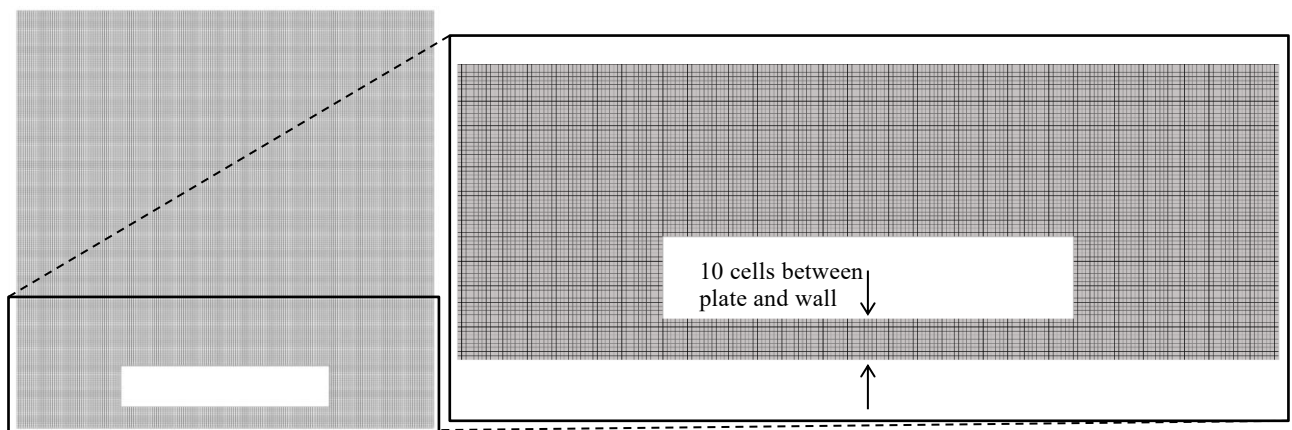


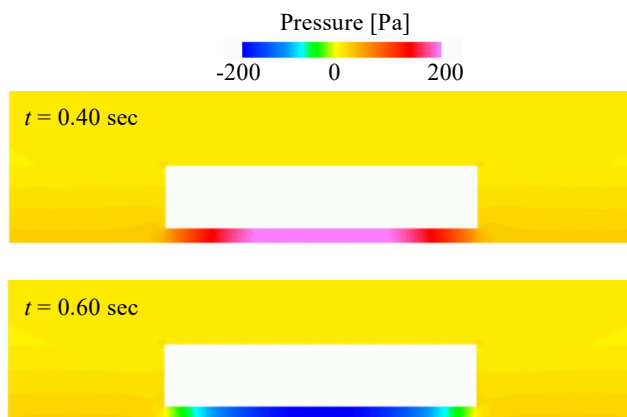
Fig. 1 Calculation condition and result of the wedge film.



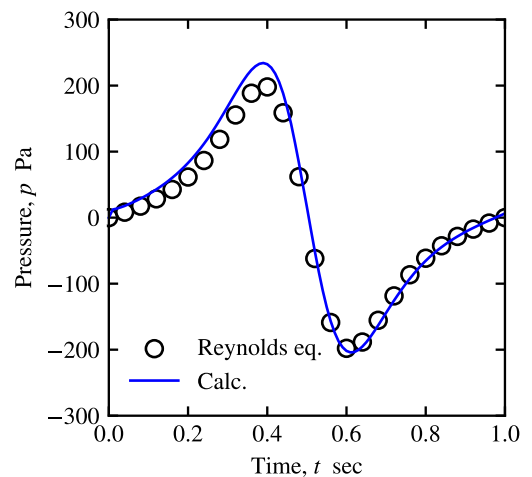
(a) Analytical condition



(b) Schematic of grid.



(c) Pressure distribution in the squeeze film.



(d) Comparison of pressure histories.

Fig. 2 Calculation condition and result of the squeeze film.

件を設定した。最小膜厚に応じた Reynolds 数は 0.0141 である。計算に用いた計算格子を図 2(b)に示す。移動板と壁の間に 10 格子を設けるよう格子幅 100 mm 程度で計算領域全体を分割した。総計算格子数は 38,000 である。

図 2(c)に圧力が最大となる時刻 0.4 s, 圧力が最小となる時刻 0.6 s の圧力分布を示す。時刻 0.4 s は移動壁が膜厚を減少させることで正のスライズ膜効果による正圧が、時刻 0.6 s は膜厚を増加させることで負のスライズ膜効果による負圧が再現されている。図 2(d)は油膜中央位置での圧力時刻歴であり, Reynolds 方程式の解を良好に再現している。

#### 4. 結言

格子法による流体潤滑問題への適用に向けた基礎的検討として、ミクロスケールの線接触流体潤滑解析を実施した。流体潤滑問題の基本的圧力発生機構であるくさび膜および絞り膜効果を良好に再現し、負圧も含めた圧力分布や時刻歴を定量的に予測できることを確認した。本検討結果から、流体潤滑問題に対する格子法の有効性が確認された。今後は流体と構造の連成解析による弾性流体潤滑へ発展させる。

#### 謝辞

本研究の遂行に当たっては、科学研究費（基盤研究（C）, 課題番号：25K07562）の助成を受けている。

#### 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) 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).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) H. Negishi, M. Kondo, H. Amakawa, S. Obara and R. Kurose, A fluid lubrication analysis including negative pressure using a physically consistent particle method, Computational Particle Mechanics (2023). doi:10.1007/s40571-023-00584-z
- 7) H. Negishi, M. Kondo, H. Amakawa, S. Obara and R. Kurose, Bingham fluid simulations using a physically consistent particle method, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 18, No. 4 (2023). doi:10.1299/jfst.2023jfst0035
- 8) H. Negishi, M. Kondo, H. Takahashi, H. Amakawa, S. Obara and R. Kurose, Fluid-rigid body coupling simulations with the passively moving solid model based on a physically consistent particle method, Physics of Fluids, Vol. 36, 033327 (2024). doi:10.1063/5.0190167
- 9) D. Yamada, T. Ninomiya, S. Hiramoto, K. Matsumoto, K. Shibata, H. Negishi, K. Maniwa, S. Obara, A soft EHL model using a particle method, Computational Particle Mechanics (2025). doi:10.1007/s40571-025-00913-4.
- 10) Bruyere, V., Morales-Espejel, G.E., and Vergne, P., "A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts", ASME Journal of Tribology, Vol. 134 (2012), pp.041503-1-10.
- 11) Almqvist, T., and Larsson, R., "The Navier—Stokes Approach for Thermal EHL Line Contact Solutions," Tribol. Int., 35(3), pp. 163–170 (2022).
- 12) Almqvist, T., Almqvist, A., and Larsson, R., "A Comparison Between Computational Fluid Dynamic and Reynolds Approaches for Simulating Transient EHL Line Contacts," Tribol. Int., 37(1), pp. 61–69 (2004).
- 13) Hartinger, M., Dumont, M.-L., Ioannides, S., Gosman, D., and Spikes, H., "CFD Modeling of a Thermal and Shear-Thinning Elastohydrodynamic Line Contact," ASME J. Tribol., 130(4), p. 041503 (2008).
- 14) W. Peterson, K. Singh, F. Sadeghi, Fluid-Solid Interaction Modeling of Elastohydrodynamic Lubrication Point Contacts, Journal of Tribology, Vol. 144, No. 11, 111601 (2022). doi:10.1115/1.4054589.
- 15) Floberg, L., "On Hydrodynamic Lubrication with Special Reference to Sub-cavity Pressures and Number of Streamers in Cavitation Regions," ed. Royal Swedish Acad. of Engineering Sciences Acta Poly. Scan Mech. Eng., Vol. 19, (1965), pp. 3–35.