

重合粒子を用いた MPS 法によるボールオンディスク流体潤滑解析

Fluid lubrication simulation of the ball-on-disk by the MPS method with the overlapping particle technique

○ 山田 大輔, 東京大学工学系研究科, 東京都文京区本郷 7-3-1, yamada-daisuke@mps.q.t.u-tokyo.ac.jp

松永 拓也, 東京大学工学系研究科, 東京都文京区本郷 7-3-1

越塚 誠一, 東京大学工学系研究科, 東京都文京区本郷 7-3-1

柴田 和也, 東京大学工学系研究科, 東京都文京区本郷 7-3-1

間庭 和聡, JAXA/ 研究開発部門, 茨城県つくば市千現 2-1-1

根岸 秀世, JAXA/ 研究開発部門, 茨城県つくば市千現 2-1-1

Daisuke Yamada, School of Engineering/ the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Takuya Matsunaga, School of Engineering/ the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Seiichi Koshizuka, School of Engineering/ the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Kazuya Shibata, School of Engineering/ the University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Kazuaki Maniwa, JAXA/Research and Development Directorate, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki

Hideyo Negishi, JAXA/Research and Development Directorate, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki

It is very important to simulate the fluid lubrication for designing machines with bearings. Therefore, we simulated the lubrication of a ball-on-disk by the MPS method which is one of the mesh-free methods. A novelty of this research is that overlapping particle technique, which is the multi-resolution method of the MPS method, is applied to the fluid lubrication in order to reduce the number of particles and computation time. In this research, we simulated a ball-on-disk by the MPS method with the overlapping particle technique, and we verified the method by the comparing the pressure distribution of the simulation result.

1. はじめに

ボールベアリングの潤滑は、機械の品質向上設計にとって必要不可欠な技術である。例えば、潤滑機能の向上により、人工衛星の長寿命化が可能であると期待できる¹⁾。しかし、ボールベアリング潤滑は非常にミクロな現象 (1~10 μm オーダー) であるので、実験的に目視で観察を行うことは難しいのが現状である。したがって、ボールベアリング流体潤滑挙動を再現、予測するためには、数値流体力学に基づく手法が有効と思われる。流体の大変形に強い特徴を持つ粒子法についても、ボールベアリングの計算が行われている²⁾⁶⁾。本研究では、ボールベアリング潤滑解析の前段階として、粒子法の一つである MPS 法⁴⁾を用いて、ボールの径が数 cm、膜厚が 100 μm オーダー程度のボールオンディスク流体潤滑解析を行った。ボールオンディスクとは、ディスクを動かすことで、ボールとディスクから生じるすべり摩擦を計測する試験である。粒子法を用いた解析によって、ボールオンディスク部の圧力などの物性値を精度良く表現することが本研究の目的である。

また、本研究の新規性として、粒子法の変解像度手法である重合粒子法⁵⁾を用いて計算を行った。重合粒子法を用い、接触部近傍のみ局所的に高解像度で計算を行い、他の領域を低解像度で計算することで、粒子数と計算時間の短縮を試みた。

2. 計算手法

2-1. 支配方程式

MPS法で用いられる支配方程式はナビエ・ストークス方程式 (式(1)), 連続の式 (式(2)) である。

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\Delta\vec{u} + \vec{g} \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$\vec{u}, \vec{g}, \rho, P$ はそれぞれ、速度ベクトル、動粘度、外力項 (本研究では重力加速度)、密度、圧力を示す。

2-2. 重合粒子法

本研究では重合粒子法を用いて図1のような解析領域を計算した。具体的には、ボールオンディスク潤滑部 (図1中央) については高解像度粒子、流体 (潤滑油) の流入部 (図1左端部)、流出部 (図1右端部) については低解像度粒子を用いた。

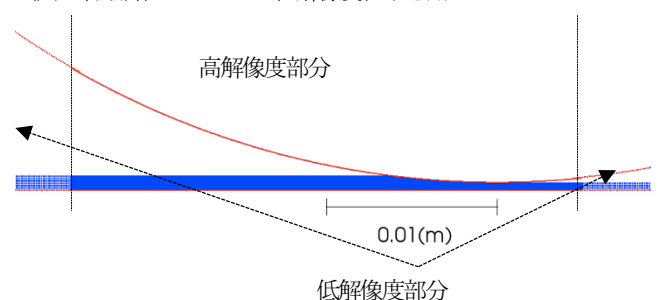


図1 : 重合粒子法を用いた解析領域の潤滑部分

2-3. 粘性項の取扱い

MPS法では、ナビエ・ストークス方程式 (式(1)) の粘性項は陽的に解くのが通常である。しかし、本研究では、潤滑油の粘度が水よりも比較的大きく、粒子サイズが小さいために、拡散数の制限を大きく受ける。その結果、時間刻み幅 Δt を小さくする必要はある。

したがって、拡散数の制限を受けないように、本研究では、粘性項を陰的に解く⁶⁾ことを行った。粘性項を陰的に解くことで、時間刻み幅を大きくとることができる。

2-4. 圧力計算

本研究では、圧力計算の精度を高めるために、柴田ら⁷⁾の手法を用いた。具体的な手法を以下に列挙する。

- ・ 仮想光源と仮想スクリーン法を用いた表面粒子判定法
- ・ 圧力ポアソン方程式右辺の粒子数密度の抑制
- ・ 圧力勾配項における改良手法の導入

2-5. 重み関数

MPS法の重み関数について、本研究では、近藤モデル⁸⁾の重み関数(式(3))での検討を行った。この重み関数を用いることで、近接した粒子間においても比較的安定に計算を行うことができる。

$$w(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r}{r_e}\right)^2 & (r < r_e) \\ 0 & (r \geq r_e) \end{cases} \quad (3)$$

3. 解析条件

3-1. 解析領域

2次元である本計算の解析領域を図2に示す。この図に示すように、ボールオンディスクの潤滑部分である $-0.025 \leq x \leq 0.005$ (m)の部分は高解像度粒子、それ以外の部分においては低解像度粒子を用いた。

また、初期最小油膜厚さ $h_0 = 4.0 \times 10^{-4}$ (m)、ボール半径 $R = 0.05$ (m)、壁速度 $U_1 = 0.131$ (m/s)と定めた。

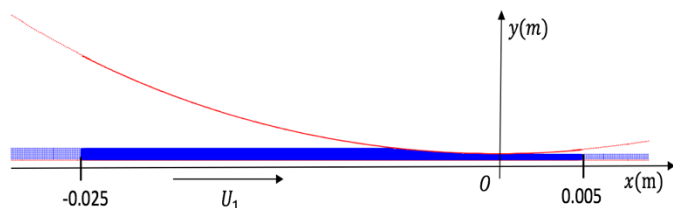


図2：解析領域（潤滑部分）

3-2. 物性値、パラメータの設定

潤滑油の物性値を表1に示す。潤滑油の物性値は文献⁹⁾を参考に決定した。また、MPS法におけるパラメータを表2で定めた。なお、本研究で使用したPCは、MacBook Pro(2.9GHz Intel Core i5 2コア、メモリ 16GB)である。

表1：潤滑油の主要物性値

密度 (kg/m ³)	850
動粘性係数 (m ² /s)	1.34×10^{-4}
重力 (m/s ²)	9.81

表2：MPS法の解析条件、パラメータの設定

解析時間 (s)	0.4
時間刻み幅 Δt (s)	1.0×10^{-5}
初期粒子間距離 l_0 (高解像度) (m)	5.0×10^{-5}
初期粒子間距離 l_0 (低解像度) (m)	1.0×10^{-4}
影響半径 r_e (m)	$2.1 \times l_0$

4. 解析結果

4-1. 圧力分布

時刻 $t = 0.1, 0.2, 0.4$ (s)時点の圧力分布を図3に示す。この図から、低解像度粒子で表された潤滑油が左側から右側に流入し $x = -0.025$ から、高解像度で表され、ボールと壁の間の狭い領域を流れることがわかる。流路が狭くなるため、左方向への逆流が生じる様子を再現できていることがわかる。圧力分布は、一番狭い部分の少し手前で高く、鉛直方向では圧力勾配値がゼロであり、高圧部の箇所が一定であることがわかる。一方、圧力振動も見られた。

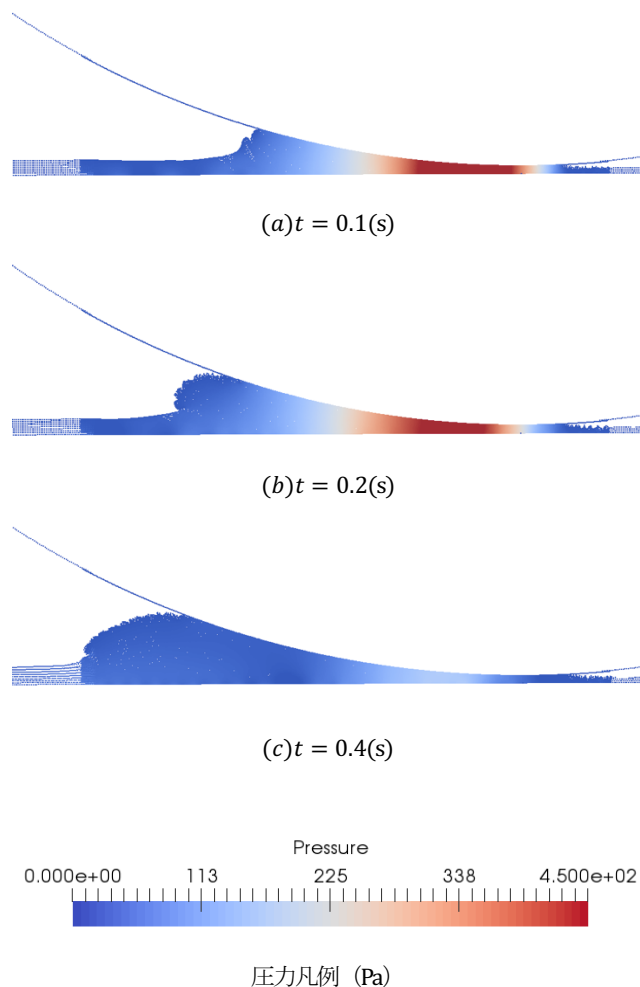
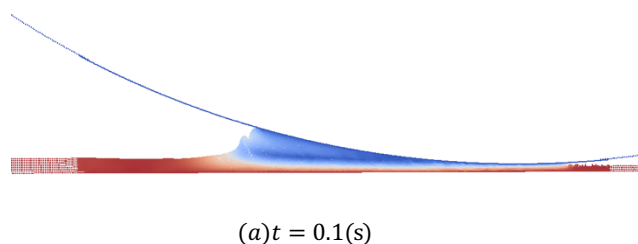


図3：重合粒子計算時の圧力分布

4-2. 速度分布

圧力分布の場合と同様にして、 $t = 0.1, 0.2, 0.4$ (s)の速度分布を図4に示す。この図から逆流部を除いては、速度分布はおおよそ定常状態になっていることがわかる。



(a) $t = 0.1$ (s)

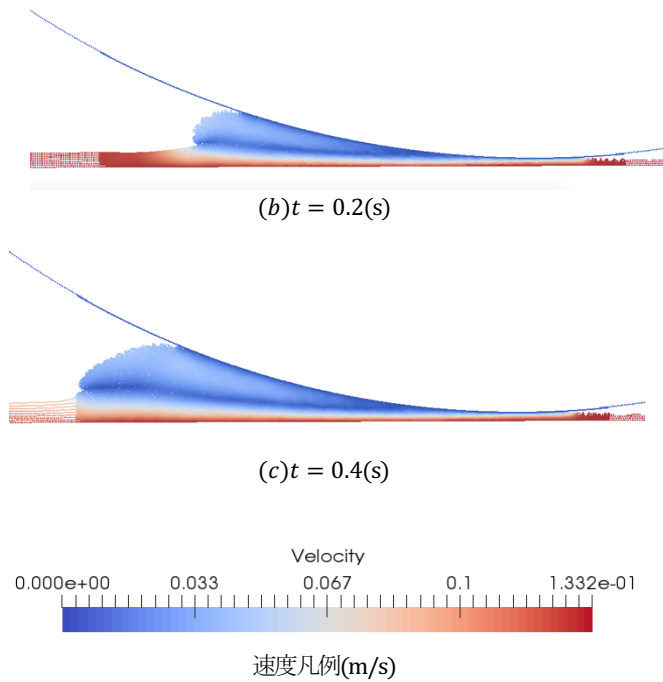


図 4：重合粒子計算時の速度分布

4-3. 圧力の定量的評価

本研究では、圧力を定量的に評価するために、重合粒子を用いない以下の2モデルと圧力分布の比較検討を行った。

モデル1：高解像度粒子モデル（粒子間距離 50 μm ）

モデル2：低解像度粒子モデル（粒子間距離 100 μm ）

粒子法の圧力値は一般に振動成分が含まれるので今回は時間平均値として圧力を評価した。時刻 $0.1 \leq t \leq 0.4(\text{s})$ における圧力の時間平均値を図 5 に示す。なお、理論解は、レイノルズ方程式について、正圧時の境界条件（レイノルズの境界条件）を適用したものである。

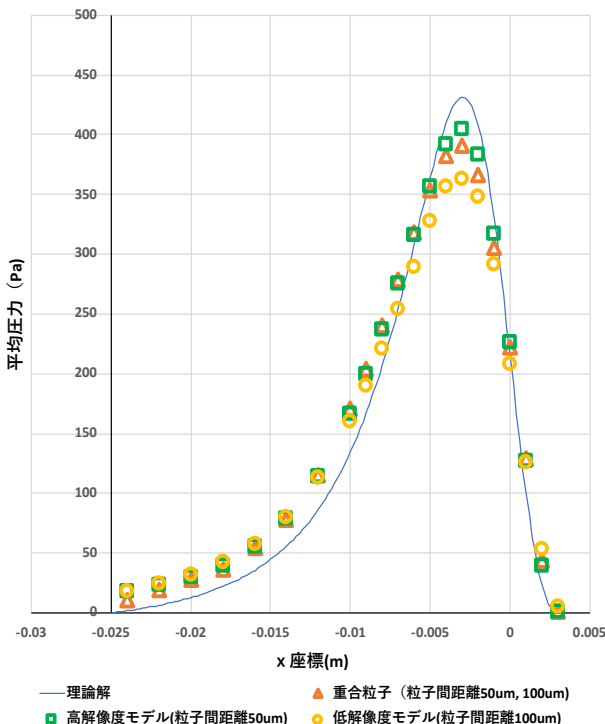


図 5：平均圧力分布

図 5 から、高解像度モデル、重合粒子モデル、低解像度モデルの順に圧力平均値に近いことがわかる。ピーク値 ($x = -0.003(\text{m})$) における解析解の理論解に対する誤差(%)は、高解像度モデルで 6.1%、重合粒子モデルで 9.4%、低解像度粒子で 15.9% であった。この結果から、重合粒子モデルは、高解像度モデルと比較的圧力平均値の誤差が比較的小さい結果が得られた。

また、粘性項を陰的に解く重合粒子の流入・流出境界における速度の境界条件の改良の余地があるので、今後改善していく予定である。

4-4. 計算時間

(3) で比較を行った 3 モデルの初期粒子数と 0.4(s) の現象の計算に要した時間を表 3, 4 に示す。これらの表より、重合粒子を用いることで、高解像度モデルと比較して、28.1% の計算時間の短縮ができたことが分かる。

表 3：初期状態の粒子数

	粒子数
重合粒子（高解像度）	9,300
重合粒子（低解像度）	13,116
高解像度モデル	56,984
低解像度モデル	15,483

表 4：計算時間

	計算時間
重合粒子	26h 52m 03s
高解像度モデル	37h 22m 40s
低解像度モデル	7h 09m 39s

5. 結論

本研究の結果から、重合粒子モデルを用いることで、大きく精度を失わずに計算を行うことができた。さらに、高解像度モデルよりも計算時間を短縮することに成功した。

今後の展望としては、さらなるモデルの検証として、流れ方向のせん断応力の積分から負荷容量、抵抗力の算出を行うことで、耐荷重性の検討を行うことがある。また、3次元の計算や、非ニュートン流体であるグリースでの計算、長時間(1.0s以上)の解析についても今後行っていく予定である。

参考文献

- (1) 間庭和聡, 野木高, "人工衛星用機械要素のトライボロジーに関する最近の研究動向", トライボロジスト, 58, 12, 855-860, 2013
- (2) 根岸秀世ら, "宇宙機の長寿命化に向けた転がり玉軸受内グリース流動数値解析技術構築に向けた展望", 第 31 回数値流体力学シンポジウム, E10-3, 2017
- (3) 田中健太郎, 岩本勝美, "粒子法を用いた流体潤滑の数値計算現状と課題", トライボロジー会議 2017 年春 予稿集, 316~317, 2017
- (4) S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", *Nucl. Sci. Eng.*, 123, 421-434, 1996.
- (5) K. Shibata et al., "The overlapping particle technique for multi-resolution simulation of particle methods", *Comput. Methods Appl.*

Mech. Engrg. 325, 434-462, 2017

- (6) 福澤洋平ら, "MPS 法による高粘性非ニュートン流体の流動解析", *Trans. JSCEs*, Paper No.20140007, 2014
- (7) K. Shibata et al., "Improved pressure calculation for the moving particle semi-implicit method", *CrossMark Comp.Part.Mech.*, 2,91-108, 2015
- (8) 近藤雅裕, 越塚誠一, "MP S法における不自然な数値振動の抑制", *Trans. JSCEs*, 20080015, 2008
- (9) V. Bruyere et al., "A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts", *Trans. ASME*, Vol.134, 041503(0-10), 2012