

粒子法を用いた流体潤滑の数値計算

～入口側油膜形状と流動形態～

Numerical Simulation of Hydrodynamic Lubrication by SPH

-Inlet Side Oil Film Profile and Flow Structure-

海洋大・工（正）*田中 健太郎

Kentaro Tanaka*

*Tokyo University of Marine Science and Technology

1. はじめに

貧潤滑条件で潤滑面が油で完全に満たされていない場合や、キャビテーションにより出口側に気相が引き込まれている場合には、気液界面の位置や形状が境界条件となり油膜圧力が発達する。このような気液界面の大変形を伴う流体運動を数値解析するのが得意とされている SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法を、流体潤滑問題に適用することを試みている。

これまでの報告¹⁻⁴⁾により、CSF モデルに基づく表面張力の計算方法を検証し、孤立液滴のラプラス圧力と表面張力振動が精度良く計算できていることを確認した上で、SPH 法による流体潤滑の計算結果と、既存の数値計算 (FEM) および実験結果との比較を行っている。

本報では、特に油膜内の流動構造に着目し、入口側隙間に滞留して渦運動をする部分と隙間を通り抜けて出口側に流れる部分が明確に区別できることについて報告をする。

2. 計算モデル、計算条件

SPH 法では、Navier-Stokes の式に基づいて流体を表す計算粒子の時間発展を追跡する。圧力勾配、粘性抵抗に加えて表面張力と重力による作用を考慮した計算を行った。計算モデルと計算条件は、Bruyere らが有限要素法を用いて流体潤滑の数値解析⁵⁾を行った際に、その検証として Floberg の実験⁶⁾との比較に用いたモデル・条件を踏襲している。すなわち、図 1 に示す通りの典型的な平面と円筒面間の流体潤滑で、最小油膜厚さ 400 μm で固定、円筒面の曲率半径 50 mm、平面は一定速度 0.131m/s で左から右に動く。計算領域の左右両端は周期境界条件が課しており、右端から流出する油は左端から再流入する。平面、円筒面と流体の境界は滑りなし条件である。また潤滑油は、密度850kg/m³、粘度0.114Pa・s、表面張力0.032N/mである。厚さ 1200 μm 分の油膜を平面に塗布した状態で計算を

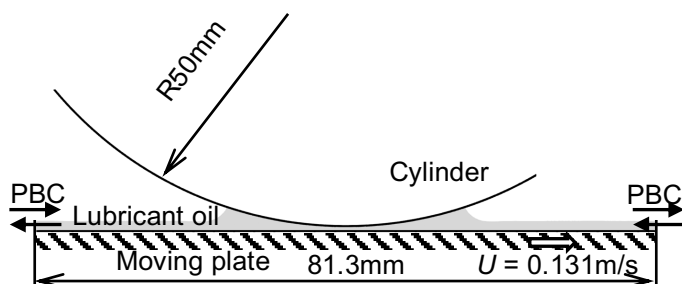


Fig. 1 Model geometry and operating condition

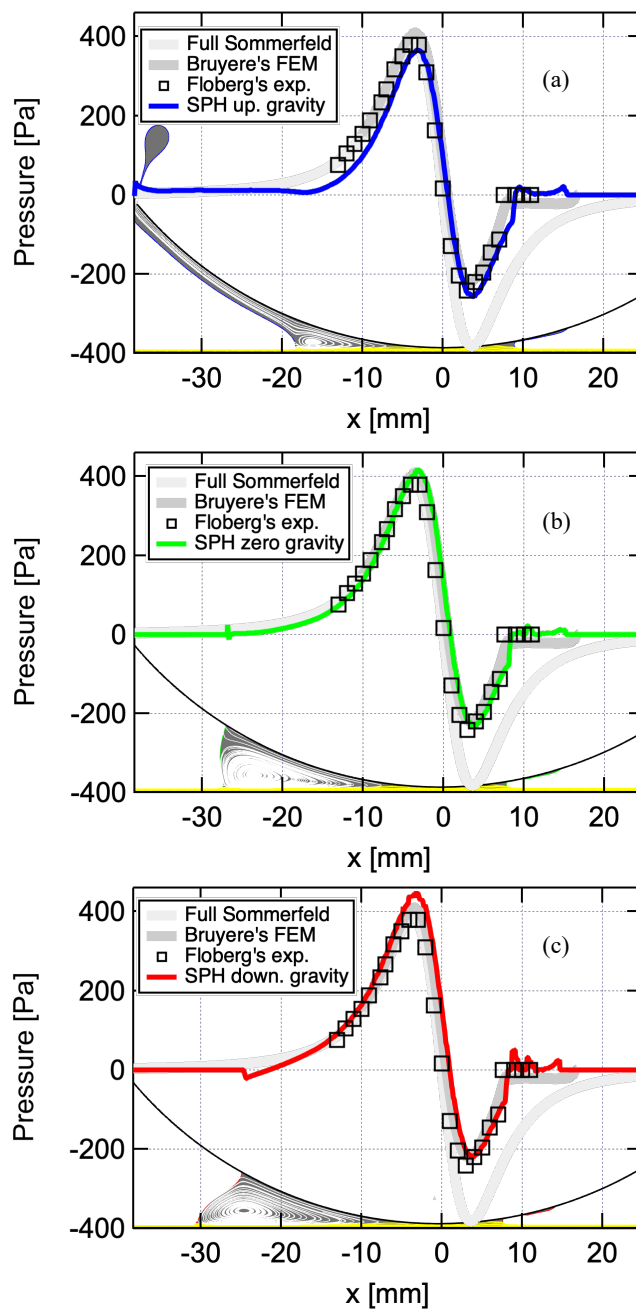


Fig. 2 Pressure profile and oil film profile with streamline (a) upward gravity (b) zero gravity (c) downward gravity

開始する。

最小油膜厚さ $400\mu\text{m}$ の隙間に 6 個の SPH 計算粒子が挟まるように粒子の大きさを決めている。5 個以下の場合は、あとに説明する解析結果と実験結果の乖離が大きくなり、8 個の場合は計算負荷が大きい。

3. 解析結果

Fig. 2 に平面が 100mm 移動した時点での圧力分布と油膜形状を示す。濃い灰色線は Bruyere らによる FEM 数値計算の結果、四角点は Floberg による実験結果でいずれも上向き重力の場合である。薄い灰色線は Sommerfeld の境界条件での Reynolds 方程式の解析解である。各図の下部に油膜形状を描画している。図内白線と黄線は流線を示しており、白線は入口側先すばまり部で渦をなす流れ、黄線は最小油膜部を通り出口側に抜ける流れである。Fig. 3 は重力なしの場合の油膜形状の拡大図である。

Fig. 2(a) は上向き重力、(b) は重力なし、(c) は下向き重力の場合である。実験と FEM の条件と一致するのは、(a) の上向き重力の場合であるが、いずれの場合もほぼ同じ圧力分布になっており、正圧側のピークに比べて負圧のピークが小さい。これは、出口側先広がり部において気相（気体粒子は計算していない）が引き込まれ、油膜が形成されないためである。負圧側の圧力分布には重力の有無・向きによる差はほとんどなく、いずれも（重力上向きの）実験・FEM の結果によく一致している。一方で、正圧側の圧力分布は詳細に比較すると、重力の上向き、なし、下向きの順にピークが大きくなっている。重力上向きの場合に、ピークが小さいのは、油膜形状からわかるように、重力の作用によって、入口側の油が円弧面に沿って流出してしまい、十分な量の油膜が形成されていないためである。実験・FEM の結果と一致しないのは、実験では油が絶えず供給される状況にあり、また FEM でも入口側が油で満たされている条件で計算が行なわれているためである。むしろ、入口側に油が滞留する重力なしの場合に正圧が十分に発達し、実験・FEM の結果に近い。重力下向きの場合は、重力の作用が加算されることでピークがわずかに高くなっている。

重力の向きに関わらず、入口側の油膜内で渦が生じる。この渦構造は安定で、渦内をながれる油はその場にとどまり続ける。また新たに入口側から供給される油は、渦内に取り込まれることはなく、最小油膜部を通り出口側に抜けているのがわかる。

4. おわりに

粒子法を用いて流体潤滑の数値解析を行った。既往の数値計算と実験の結果と比較し、よく一致した圧力分布が得られることを確認した。入口側の油膜内に現れる渦構造は安定で、その場に留まり続けることがわかった。

謝辞

この研究の一部は、TRAMI, NSK メカトロニクス技術高度化財団および科研費 20K04236 による研究助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

文献

- 1) 田中・岩本：流体潤滑の数値計算への粒子法適用の試み，トライボロジー会議予稿集(東京) (2016) 110- 111.
- 2) 田中：粒子法を用いた流体潤滑の数値計算～解析結果の検証と重力の影響～，トライボロジー会議予稿集(東京) (2021) 354- 355.
- 3) 田中：孤立液滴の表面張力振動に基づく液体物性の評価，トライボロジー会議予稿集(福井)(2022) C9.
- 4) K. Tanaka & K. Iwamoto : Numerical Simulation of Hydrodynamic Lubrication by SPH method -Oil Film Profile at Inlet -, World Tribology Congress 2021, THU-T1-S11-R4 (2022).
- 5) V. Bruyere, et al. : A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts. ASME J. Tribol. 134, 041503:1-041503:10 (2012)
- 6) L. Floberg : On Hydrodynamic Lubrication with Special Reference to Sub- cavity Pressures and Number of Streamers in Cavitation Regions. Royal Swedish Acad. of Engineering Sciences Acta Poly. Scan Mech. Eng. 19, 3-35 (1965)



Fig. 3 Enlarged view of oil film profile with streamline in vase with zero gravity