

格子ボルツマン法を用いた気液界面の大変形を伴う流体潤滑の数値計算

Numerical simulation of hydrodynamic lubrication with gas-liquid interface by the lattice Boltzmann method

海洋大・工（院）*本田 龍一 海洋大・工（正）田中 健太郎

Ryuichi Honda*, Kentaro Tanaka*

*Tokyo University of Marine Science and Technology

1. 緒言

多くの潤滑システムは、潤滑油の供給が不十分な状態で運転されており、軸受すきまの入口部が必ずしも油で完全に満たされているとは限らない。また、先広がり領域の出口部では、負圧によって気相が流入し、油膜が破断することがある。こうした貧潤滑条件下においては、気液界面の位置が境界条件を与え、油膜圧力の発達を決定づける重要な役割を担う。

田中らは、粒子法を流体潤滑問題に適用し、軸受の入口部および出口部に明示的な圧力境界条件を課すことなく、実験結果とよく一致した圧力分布を得ている¹⁾。しかし、粒子法には計算負荷が大きいという特有の課題があり、潤滑面の広さに対してすきまが微小な場合や三次元問題へ拡張する際には、系全体の粒子数が増大し、計算が困難となる。そこで、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, 以下 LBM) に着目する。LBM は数値流体力学の一手法であり、陽的なアルゴリズムでメモリアクセスが局所的であることから、大規模な流体解析に適している。また、質量保存に優れており、気液界面は特別に境界として追跡する必要がなく、場の一部として自律的に形成されるため、混相流の計算にも有効である。

本研究では、まず LBM により液滴の表面張力振動を計算し、ラプラス圧と振動周期に関する解析解と比較することで、表面張力モデルの妥当性を検証した。さらに、この検証済みモデルを用いて、円弧平板軸受における気液界面の大変形を伴う二次元流体潤滑問題への適用を試みた。

2. 方法

LBM では、計算対象を構造格子で離散化し、各格子点における離散速度に対応した分布関数の時間発展を解く。支配方程式である離散化された Boltzmann 方程式からは、連続の式と Navier-Stokes 方程式が数学的に導出でき、流体の速度や圧力は分布関数のモーメントから算出される。本研究では、気液二相流モデルとして疑似ポテンシャルモデルを採用した²⁾。このモデルは、実在気体の状態方程式に基づいて疑似ポテンシャルを設定し、二相間の相互作用を外力項に組み込むことで気液界面を表現する。なお、数値計算の実装には、オープンソースの C++ ライブラリである OpenLB (Open Source Lattice Boltzmann Code) を利用した³⁾。

液滴の表面張力振動計算では、空気で満たされた領域の中心に、1 辺 $L = 1\text{mm} \sim 10\text{mm}$ の正方形液滴を配置した。計算領域の 1 辺の長さは、液滴の 1 辺の長さの 2 倍となるように設定している (図 1 (a))。空気の物性値は、密度 1.2kg/m^3 、粘度 $1.8 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ とした。液体の密度と表面張力は、後述の流体潤滑計算における潤滑油と同じ値を用いている。一方、潤滑油の粘度をそのまま適用すると、過減衰となり表面張力振動が生じないため、粘度は約 1/10 に設定した。また表面張力は、正方形液滴が円形に達した際のラプラス圧が理論値に一致するように補正した。

円弧平板軸受の流体潤滑計算におけるモデルと計算条件は、Bruyere らが有限要素法による流体潤滑の数値解析⁴⁾を行った際に、その検証として Floberg の実験⁵⁾と比較するために用いたものを踏襲している。図 1 (b)に示すように、最小油膜厚さ $h_{min} = 400\mu\text{m}$ で固定し、上面を半径 $R = 50\text{mm}$ の円弧、下面を長さ $L = 81.3\text{mm}$ の平板とした。平板は一定速度 $U = 0.131\text{m/s}$ で左から右に移動する。計算領域の左右端には周期境界条件を課し、右端から流出した油は左端から再流入する。また、円弧と平板の流体との境界には滑りなし条件を課した。潤滑油の物性値は、密度 850kg/m^3 、粘度 $0.114\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力 0.032N/m とし、初期状態では厚さ $h_{init} = 1400\mu\text{m}$ の油膜を平板上に塗布した。

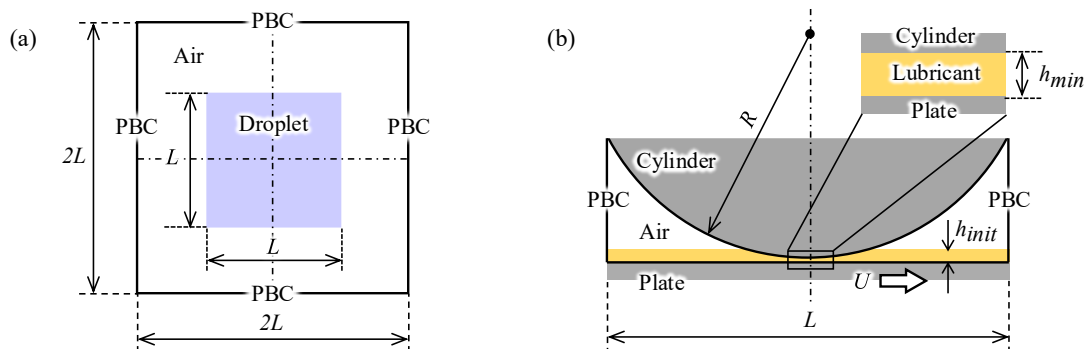


図 1 モデルと計算条件：(a) 液滴の表面張力振動，(b) 円弧平板軸受の流体潤滑

3. 結果および考察

図 2 (a)は、液滴の表面張力振動計算の結果 ($L=5\text{mm}$) を示している。液滴は、表面張力を復元力として周期的に変形を繰り返しながら次第に減衰し、最終的には円形へと至る。液滴のラプラス圧 Δp と振動周期 T は表面張力 γ に関連付けられ、次式で表される⁶⁾: $\Delta p = \gamma/R$, $T = 2\pi\{\rho R^3/(n(n^2-1)\gamma)\}^{1/2}$ 。ここで、 ρ は液体の密度、 R は液滴半径、 $n (=4)$ は振動モードである。図 2 (b)は、横幅の経時変化を表す波形 ($L=5\text{mm}$) であり、これを解析することで液滴半径と振動周期の関係を求めた。その結果、液滴のラプラス圧および振動周期は、様々な液滴半径において前述の式から得られる理論値とよく一致した (図 2 (c))。したがって、本手法における表面張力モデルは妥当であると考えられる。

図 3 (a)は、流体潤滑計算の結果を示している。平板が静止している状態では、油膜は円弧に濡れ広がり、左右対称の液体架橋を形成する。平板が 100mm 移動した時点では、入口側に油が滞留し、出口側には気相が引き込まれ、気液界面の位置は上流側 (紙面左) へ移動する。このときの圧力分布を図 3 (b)に示す。四角点は Floberg の実験、灰色線は田中らによる粒子法、赤線は本研究の結果である。LBM の結果は、両者と良好に一致しているが、正圧側のピークはやや小さく、負圧側の圧力変化は緩やかで、下流側へと広がる傾向がみられる。この差異は、円弧形状が格子点に沿って階段状に近似されることによる幾何学的誤差に起因すると考えられる。解像度を高めたり、補間により格子点間にある任意の位置に壁面境界を設定できる手法を導入したりすることで、さらなる精度改善が期待される。

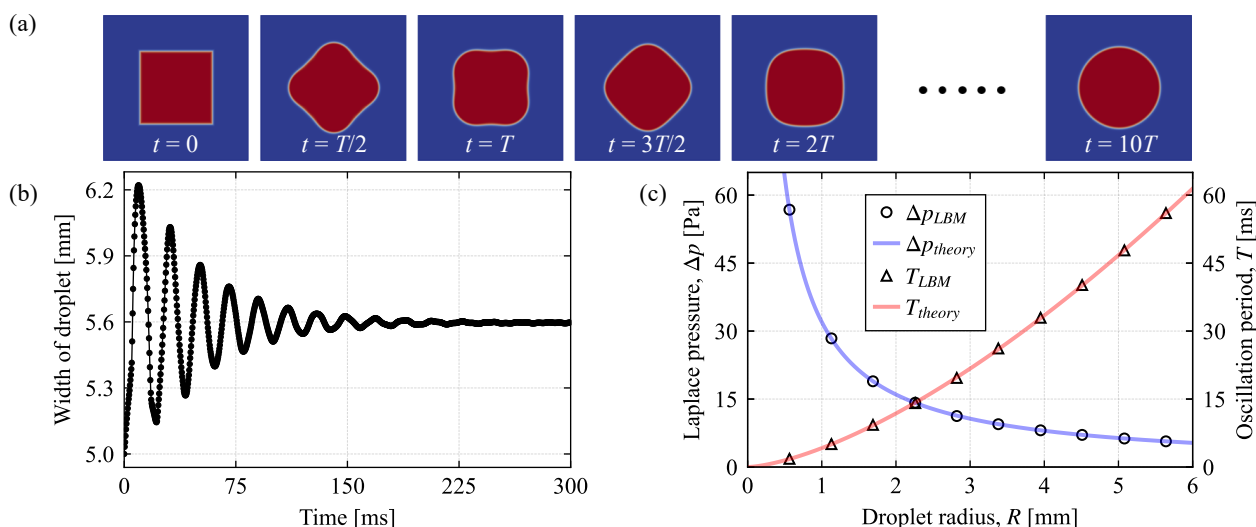


図 2 表面張力モデルの妥当性検証: (a) 液滴形状, (b) 横幅の経時変化, (c) 液滴半径とラプラス圧, 振動周期の関係

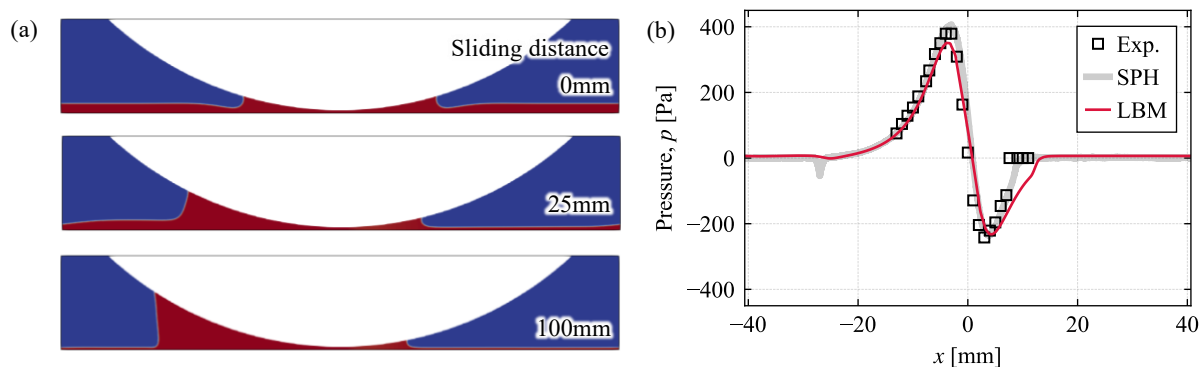


図 3 気液界面の大変形を伴う流体潤滑解析: (a) 油膜形状, (b) 油膜の圧力分布

4. 結言

本研究では、液滴のラプラス圧と表面張力振動を精度良く計算できることを示し、その上で LBM による流体潤滑の数値解析を行った。その結果、既往の実験や数値計算と概ね一致する圧力分布が得られた。

謝辞

この研究の一部は、TRAMI 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) K. Tanaka, et al.: Smooth particle hydrodynamics analysis of hydrodynamic lubrication with free surface flow. Tribol. Lett. (2025)
- 2) X. Shan, et al.: Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components. Phys. Rev. E (1993).
- 3) A. Kummerländer, et al.: Open Source Lattice Boltzmann Code. Version 1.8. (2025)
- 4) V. Bruyere, et al.: A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts. ASME J. Tribol. (2012)
- 5) 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. (1965)
- 6) Lamb, H.: Hydrodynamics. Dover, New York (1932)