

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04236

研究課題名（和文）粒子法を用いた流体潤滑シミュレータの開発

研究課題名（英文）Numerical Simulator for Hydrodynamic Lubrication by Particle-based Method

研究代表者

田中 健太郎（Kentaro, Tanaka）

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：60359693

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：気液界面の大変形を含む激しい流動を無理なく数値解析できるとされる粒子法を用いて、流体潤滑解析を行うことを目的とした。新規に表面張力の計算方法を提案し、理論・実験との比較により、その作用を検証した計算コードを開発した。これを用いて流体潤滑解析を行い、従来の実験結果、数値解析結果と同じ結果が得られることを確認した。さらに、従来に方法では解析することがむずかしかった入口側油膜が油で満たされていない場合の解析を行って、その油膜形状が油膜圧力分布へ影響を及ぼすことがあることを確認することができた。また実験では観測が難しい油膜内の流動構造を可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発をした粒子法に基づく流体潤滑解析のための計算手法は、従来の方法では難しかった入口側が油で満たされていない場合の解析を可能とした。これは攪拌抵抗の低減や省資源を意図して行われつつある貧潤滑条件下での運転にとって、重要な解析手段が得られたことを意味する。また新規に開発した表面張力の計算方法は、流体潤滑に限らず、液滴や濡れ、気泡の計算にも応用可能である。液滴の表面張力振動を対象にした計算モデルの検証方法は、粒子法に限らず、表面張力計算を行う全ての数値計算手法の検証の対象となりうる。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to analyze hydrodynamic lubrication using the particle-based method, which is considered to be able to numerically analyze violent flow with large deformations of the gas-liquid interface. A method for calculating surface tension was proposed and a calculation code was developed to verify its action by comparison with theory and conventional experiments. Hydrodynamic lubrication analysis was carried out using the code, and it was confirmed that the results were the same as those obtained by conventional experimental and numerical analysis. Furthermore, we analyzed the case where the inlet side oil film was not full-filled with oil, which was difficult to analyze with conventional methods, and confirmed that the shape of the inlet oil film could affect the pressure profile. The flow field in the oil film, which is difficult to observe experimentally, was visualized.

研究分野：トライボロジー

キーワード：流体潤滑 表面張力振動 液体架橋破断 粒子法

1. 研究開始当初の背景

1886年に提案された Reynolds 方程式は狭い隙間に挟まれた潤滑面の圧力分布を計算し、負荷容量の発生を説明することができる。しかし、最近のテクスチャ付きの潤滑面設計や厳しさを増す運転条件は、Reynolds 方程式導出の際のいくつかの仮定、また Reynolds 方程式を解く際に必要となる境界条件の設定について、その適用の限界が顕在化するケースがあった。たとえば、潤滑面入口側の境界条件は「十分に油量がある」ことを前提する以外の選択肢がほぼなく、たとえば攪拌抵抗の低下と省資源を期待しての微量の潤滑油による極微量潤滑は解析の対象にすることが難しい。入口部にどれだけの油量が存在するかは、供給油量、潤滑面の形状・性状、運転条件によって決まるが、これを知るためにはマクロな流れの解析、すなわち Navier-Stokes 方程式を用いた解析が必要である。油膜の破断や気液界面の大変形を含む流動を Navier-Stokes 方程式で扱うる数値計算手法が求められていた。

2. 研究の目的

気液界面の大変形を含む激しい流動を無理なく数値解析できるとされる粒子法を用いて、流体潤滑解析を行うことが研究の目的である。既往の実験と従来手法による数値計算の結果と比較し、粒子法による解析結果を検証する。また狭い隙間での気液界面では、表面張力の作用が支配的である。この表面張力を精度良く計算できる手法を開発し、またその検証方法を確立することを第2の目的とした。

3. 研究の方法

代表的な粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法をベースに、まさに気液界面の最近傍に位置する粒子にのみ表面張力が作用する計算モデルを開発する。計算モデルの検証をおよび妥当性確認のために、液滴の表面張力振動を題材として、理論解、実験結果と数値計算結果の比較を行う。検証を行い、妥当性の範囲を確認した表面張力モデルを用いて流体潤滑の数値解析を行う。既往の実験と従来手法による数値計算の結果と比較し、粒子法による解析結果を検証する。これまでの手法では解析することが難しかった、入口側油膜形状や入口油膜内の流動構造が油膜圧力に与える影響を議論する。

4. 研究成果

4. 1. 1 表面張力計算モデルの開発と検証

マイクロメートルスケール以下の微小機械では、固液の濡れや、液体の表面張力の影響を考慮した設計が重要となることが多い。気液の界面の大変形を伴う濡れ等の現象は、解析的に扱うことが難しく、数値計算への期待が大きい。ただ数値計算であれば濡れや表面張力が簡単に扱えるというわけではなく、日進月歩で計算手法の開発が進んでいるところである。一方で最近の数値計算では計算手法の検証、計算モデルの妥当性の評価が必須であるが、表面張力が関係する計算の検証・妥当性評価は容易ではなく、特に動的な側面に関しては2次元矩形液滴の表面張力振動の理論解との比較に留まる。ここでは、孤立液滴の表面張力振動が、液体架橋破断法を用いることで、再現性良く、かつ簡易に観察できることに注目する。粒子法による計算結果と比較を行い、表面張力計算の検証・妥当性評価を行った。

4. 1. 2 液体架橋破断法

二本の丸棒の間に液体架橋を形成する (Fig. 1)。棒を引き離すことによって液体架橋を伸長させると、液体架橋の中央付近のくびれが徐々に細くなり、破断する。この破断の際に、微小な液滴が生成されることがある。この液滴をサテライト液滴と呼ぶことがある。サテライト液滴は、二本の丸棒の隙間のちょうど中間地点に生成されるため、生成直後の液滴を観察するのが容易である。生成直後の液滴は、丸棒の軸方向に引き伸ばされた棒形状をしており、その後は表面張力の作用によって、振動変形をしつつ球形状に至る (Fig. 2 左⑥)。

4. 1. 3 表面張力計算モデル

粒子法で表面張力を計算する方法として、粒子間にポテンシャル力に類似した力を作用させる方法、界面自由エネルギー理論に基づく方法などが提案されている。本研究では、界面の湾曲に基づく作用を粒子に与える方法、CSF(continuum surface force)モデルを採用した。また気液界面粒子の精密な判定を行って表面張力が作用する計算粒子を気液界面の最近傍に位置する粒子みに限定するアルゴリズムを組み込み、さらに拡散則に基づく界面粒子近傍粒子の再配置を行って気液界面の粒

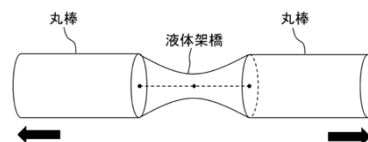


Fig.1 Capillary bridge breakup method

子配置がなめらかになるようにする工夫を行った。円形液滴のラプラス圧力が理論値に一致するように表面張力計算におけるパラメータの調整を行う必要がある。

4. 1. 4 液滴の表面張力振動による検証

マイクロメートルスケールの液滴の表面張力振動を対象に、実験と SPH 法による数値計算との比較を行った。

実験では、直径 2mm の丸棒（ステンレス製）の間に、1.5 μ L のオクタンによる液体架橋を形成し液体架橋破断を行う。この場合、直径 76 μ m 程度の液滴が生成される。SPH 計算では、断面に 25 粒子 \times 25 粒子、また球形に達したときに直径が 76 μ m になるように粒子間隔、横幅を決めて配置する（粒子間隔 1.93 μ m）。Fig.2 は、架橋が破断する直前からの変形の様子を 20 万 fps で撮影した結果（Fig.2 左側）と、角棒を初期形状とした SPH 法による数値計算の結果（Fig.2 右側）を示す。図内の丸囲み数字は Fig.2 内の数字に対応する。実験では、液体架橋が破断した直後には端部が尖った細長い棒状（①）であるが、両端が球形になりつつ縮まってダンベル状（②）となった後、その両端の球がさらに近づき潰れてパンケーキ状（③）になる。続いて、反動により再び横に伸長し（④）、棒状（⑤）に戻る。その後は③～⑤を繰り返しつつ減衰して、球形状（⑥）に至る。

SPH 計算で、サテライト液滴の振動変形を十分な解像度で計算しつつ、液体架橋の変形破断過程をも対象とするのは計算負荷が大きすぎる。このため破断後にあらわれる棒状液塊のみを計算対象とする。初期形状を角棒（Fig.2 右上）として粒子を初期配置し、その後の変形の時間発展を計算する。初期形状に差異があるため、はじめのうちは実験と計算が一致しない（①, ②）。しかし、横幅が最初に最小値に達して以降（③）の形状は、よく一致している。Fig.3 は、液滴の横幅と縦幅の時間変化をプロットしたものであるが、③の時点以降は横幅（major）、縦幅（minor）ともに、非常によく一致している。SPH 計算に組み込んだ表面張力と粘性の計算モデルがうまく機能していると判断できる。

液滴の表面張力振動の振動数は液体の表面張力と、振動の減衰係数は液体の粘性係数と関連付けられることが知られている。Fig.3 に示したように、表面張力振動を比較対象として実験結果と数値計算の結果を直接比較することで、数値計算における表面張力と粘性の計算モデルの妥当性を確認することができる。

4. 2. 1 流体潤滑の数値解析

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た。

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¹⁾を行った際に、その検証として Floberg の実験²⁾との比較に用いたモデル・条件を踏襲している。すなわち、

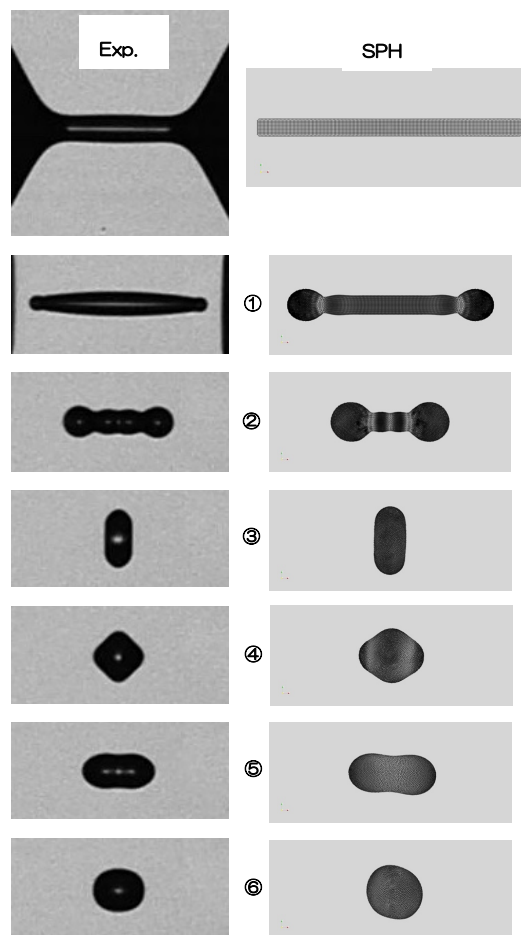


Fig.2 Surface tension oscillation of the droplet

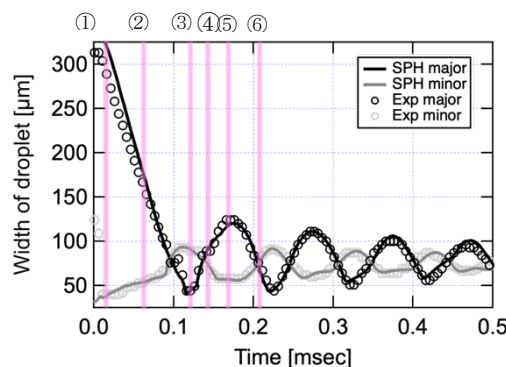


Fig.3 Time evolution of surface tension oscillation of the droplet

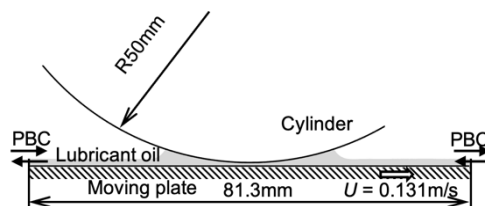


Fig. 4 Model geometry and operating condition

Fig.4 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 $400\mu\text{m}$ で固定、円筒面の曲率半径 50mm 、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あり、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/m^3 、粘度 $0.114\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力 0.032N/m である。厚さ $1200\mu\text{m}$ 分の油膜を平面に塗布した状態で計算を開始する。

4. 2. 2 計算結果

Fig. 5 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 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. 6 は重力なしの場合の油膜形状の拡大図である。

Fig. 5(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）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 の結果と一致にしないのは、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。重力下向きの場合には、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. 3 まとめ

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。当初の目論見通り、油量に制限がある場合について、重力より入口側の油膜形状が変化することを確認し、また油膜圧力分布へ影響を及ぼすことを確認することができた。実験では観測が難しい油膜内の流動構造を可視化した。

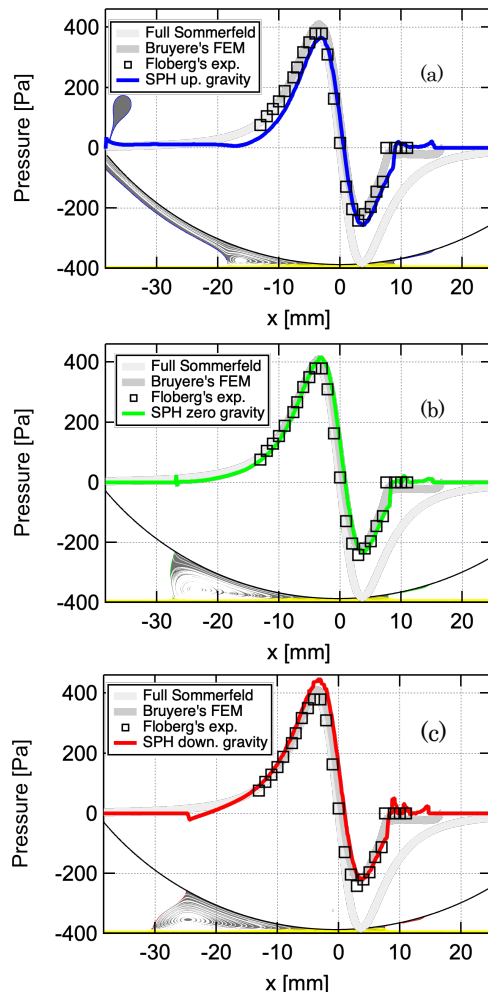


Fig. 5 Pressure profile and oil film profile with streamline

(a) upward gravity (b) zero gravity (c) downward gravity



Fig. 6 Enlarged view of oil film profile with streamline in vane with zero gravity

引用文献

- 1) 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)
- 2) 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)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田中 健太郎、岩本 勝美	4. 巻 66
2. 論文標題 粒子法を用いた流体潤滑解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 98 ~ 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18914/tribologist.66.02_98	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田中健太郎
2. 発表標題 マイクロ液滴の表面張力振動との比較による表面張力計算モデルの妥当性評価
3. 学会等名 IIP2022情報・知能・精密機器部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Tanaka, Toshikazu Fujino, Nicolas Fillot, Philippe Vergne and Katsumi Iwamoto
2. 発表標題 Numerical Simulation of Hydrodynamic Lubrication by SPH method -Oil Film Profile at Inlet-
3. 学会等名 World Tribology Congress (WTC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Tanaka
2. 発表標題 SPH simulation of surface tension oscillation of satellite droplet generated by capillary bridge breakup method
3. 学会等名 MIPE2022(2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤良, 田中健太郎
2. 発表標題 OpenFOAMを用いたマイクロ液滴の表面張力振動解析とその検証
3. 学会等名 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中健太郎
2. 発表標題 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~
3. 学会等名 トライボロジー会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中健太郎
2. 発表標題 粒子法を用いた流体潤滑の数値計算 ~適用例と課題~
3. 学会等名 トライボロジー会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中健太郎
2. 発表標題 マイクロ液滴の表面張力振動との比較による表面張力計算モデルの妥当性評価
3. 学会等名 IIP2021情報・知能・精密機器部門講演会講演論文
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中健太郎
2. 発表標題 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~
3. 学会等名 トライボロジー会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中健太郎
2. 発表標題 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~
3. 学会等名 トライボロジー会議
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中健太郎	4. 発行年 2023年
2. 出版社 新樹社	5. 総ページ数 3
3. 書名 月刊トライボロジー 2023年6月号(発行予定)「解析技術特集」：粒子法を用いた数値解析 -液滴の表面張力振動と流体潤滑-	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------