

| | | | |
|--|---|----|---------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 根 岸 秀 世 |
| 論文題目 | Numerical Simulations of Multi-physics Phenomena in Fluid Film Lubrication Using a Physically Consistent Particle Method (物理的健全性を有する粒子法を用いた流体潤滑のマルチフィジックスシミュレーション) | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、流体潤滑と関連する各種問題（流体－構造連成、流体－剛体連成、非ニュートン流体）に粒子法を適用した研究結果をまとめたものであり、7章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景および既往研究との関連性について概観し、本研究の目的と重要性について述べている。</p> <p>第2章では、本研究で採用した物理的健全性を有する粒子法、すなわち Moving Particle Hydrodynamics (MPH) 法について概説している。ここで物理的健全性とは、離散化された支配方程式が、質量保存、並進・角運動量保存および熱力学的第二法則等の基本的物理法則を本質的に満足する性質のことをいう。本章では、MPH法で用いられる流体の支配方程式、離散化手法、表面張力および濡れ性モデル、物理的健全性、時間積分法、境界条件、ビリアル圧力について述べている。</p> <p>第3章では、流体潤滑の基本的な圧力発生メカニズムである、くさび膜効果と絞り膜効果を対象に、2次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。具体的には、圧力発生メカニズム、特に負圧の発生メカニズムについて詳しく調査している。また、狭い隙間流れを効率的に計算するため、MPH法に表面張力および濡れ性モデルを時間陰解法で組み合わせる手法を提案している。</p> <p>この結果、提案手法による2次元円弧軸受を対象としたくさび膜効果の計算では、Reynolds方程式による理論解および過去の実験結果との比較を通して、従来の粒子法では困難であった負圧領域を含めて、油膜内の圧力分布を定量的に再現可能であることを明らかにしている。特に負圧の再現は、摺動部出口のメニスカスを適切に再現することが重要であることを明らかにしている。また、正弦波振動させた2次元並行平板間の絞り膜効果の計算でも、Reynolds方程式による理論解との比較を通して、油膜厚さが減少する際に正圧が発生する正の絞り膜効果、また油膜厚さが増加する際に負圧が発生する負の絞り膜効果を定量的に再現可能であることを明らかにしている。特に、負の絞り膜効果の再現は、表面張力と濡れ性の考慮により油膜を安定に保持し、そこに発生する張力を適切に再現することが有効であることを明らかにしている。</p> <p>第4章では、流体潤滑に係る流体－構造連成問題を対象に2次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。具体的には、固体の弾性変形を伴う流体潤滑問題（Elastohydrodynamic Lubrication, EHL）のうち、潤滑油の密度と粘性係数が一定とみなせる Soft EHL を対象に、MPH法に油膜厚さの式と弾性変形式を組み合わせた流体－構造連成解析手法を提案している。また、2次元円弧軸受の線接触流体潤滑の計算を実施することで、油膜内に発生する圧力と円弧の弾性変形について詳しく調査している。この結果、荷重が付加された円弧が下方に移動し、くさび膜効果で油膜内に発生する圧力に伴い円弧が弾性変形する様子を提案手法により再現できることを明らかにしている。また、計算で求めた油膜厚さおよび圧力分布は、従来の Reynolds 方程式ベースの数値解析結果と良好に一致し、提案手法により Soft EHL 現象を定量的に再現可能で</p> | | | |

| | | | |
|--|-----------|----|---------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 根 岸 秀 世 |
| <p>あることを明らかにしている。</p> <p>第5章では、流体潤滑に係る流体－剛体連成問題を対象に2次元および3次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。具体的には、従来の粒子法でも利用されてきた剛体計算手法である Passively Moving Solid (PMS) モデルを MPH 法に導入することで、これまで課題とされてきた並進および角運動量保存を満たす流体－剛体連成解析手法を提案している。また、ジャベニコフ効果を伴う剛体回転問題、静的な浮体問題、動的な円柱の水面衝突問題を対象に基礎検証解析を実施し、提案手法の妥当性を詳しく調査している。更に、回転と流体潤滑を伴う問題として、油膜上を転がる円筒の実験と計算を実施し、提案手法の妥当性と現象メカニズムを詳しく調査している。</p> <p>この結果、ジャベニコフ効果を伴う剛体回転問題では、T字物体の回転運動について優れた角運動量保存を示し、Euler 方程式による解析解を良好に再現できることを明らかにしている。また、静的な矩形および円柱物体の浮体問題では、浮力と重力による並進力およびトルクのつり合いにより、剛体の重心位置や姿勢について理論解を再現できることを明らかにしている。更に、動的な円柱の水面衝突問題では、水への剛体貫入深さについて実験結果を良好に再現できることを明らかにしている。加えて、油膜上を転がる円筒の流体－剛体連成問題では、初期の並進および回転速度を有した円筒が油膜に突入後、回転しながら攪拌抵抗、滑り摩擦抵抗を受けて減速し、最終的には停止する挙動を実験的に明らかにしている。また、提案手法による計算でも、円筒の停止挙動を定量的に再現できることを明らかにするとともに、円筒壁面に付着する油膜とそれに伴う表面張力が円筒の停止挙動に大きく影響することを明らかにしている。</p> <p>第6章では、流体潤滑に係る非ニュートン流体問題を対象に2次元および3次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。具体的には、流体潤滑で近年標準的に利用されているグリースを対象に、その半固体の性質をビンガム流体としてモデル化し、MPH 法にビンガム流体の粘性とひずみ速度の構成方程式を導入することで、非ニュートン流体の解析手法を提案している。また、提案手法により、2次元ポアズイユ流れ問題の2次元計算を実施し、その妥当性を詳しく調査している。更に、グリースのマクロ流れ問題として、グリースダム崩壊の実験と計算を実施し、提案手法の妥当性と現象メカニズムを詳しく調査している。</p> <p>この結果、ビンガム塑性流体の2次元ポアズイユ流れ問題では、提案手法による計算で理論解の速度分布を良好に再現できることを明らかにしている。また、グリースのダム崩壊問題では、グリースが自重により崩壊し、その後徐々に減速して2秒後にはブーツ形状となり停止する挙動を実験的に明らかにしている。更に、提案手法による3次元計算でも、グリースをビンガム擬塑性流体としてモデル化し、低ひずみ速度で高粘性を与えることで、グリースの停止挙動を再現できることを明らかにしている。</p> <p>第7章は結論であり、本研究で得られた結果を要約すると共に、今後の研究課題についても言及している。</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、流体潤滑と関連する各種問題（流体－構造連成，流体－剛体連成，非ニュートン流体）に粒子法を適用した研究結果をまとめたものであり，得られた主な成果は以下の通りである．

1. 物理的健全性，すなわち質量保存，並進・角運動量保存および熱力学的第二法則の物理法則を本質的に満足する粒子法である **Moving Particle Hydrodynamics (MPH)** 法に，表面張力および濡れ性モデルを時間陰解法で組み合わせる手法を提案した．また，本手法が，流体潤滑問題の基本的圧力発生メカニズムであるくさび膜効果と絞り膜効果について，張力が働く液膜メニスカス内の負圧現象を含めて定量的に再現可能であることを明らかにした．
2. MPH 法に油膜厚さの式と弾性変形方程式を組み合わせた流体－構造連成解析手法を提案した．また，本手法が，弾性変形を伴うが流体物性は一定とみなせる流体潤滑問題，すなわち **Soft EHL** 現象を定量的に再現可能であることを明らかにした．
3. MPH 法に **Passively Moving Solid (PMS)** モデルを組み合わせた流体－剛体連成解析手法を提案した．また，本手法が，ジャベニコフ効果を伴う T 字物体の回転運動，静的な連成問題である直方体，円柱の浮体挙動，および動的な連成問題である円柱の水面衝突挙動を定量的に再現可能であることを明らかにした．更に，流体潤滑を伴う流体－剛体連成問題として，油膜上を転がる円筒の減速挙動が円筒壁面に付着する液膜とそれに伴う表面張力に大きく影響を受けることを実験により明らかにし，本手法でも定量的に再現可能であることを示した．
4. MPH 法に非ニュートン（ビンガム）流体の構成方程式を組み合わせた解析手法を提案した．また，本手法が，ビンガム塑性流体の 2 次元ポアズイユ流れの流速分布を定量的に再現可能であることを明らかにした．更に，ビンガム擬塑性流体のマクロ挙動問題として，グリースのダム崩壊では初期に自重で崩壊したグリースが徐々に減速してブーツ形状となり停止することを実験により明らかにし，本手法でも定量的に再現可能であることを明らかにした．

以上，本論文は，流体潤滑のマルチフィジックス問題を予測可能な粒子法ベースの解析手法を提案し，本手法が流体潤滑の物理現象理解に有効であることを明らかにしたものであり，学術上，實際上寄与するところが少なくない．よって，本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める．また，令和 6 年 2 月 20 日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行って，申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し，合格と認めた．

なお，本論文は，京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し，公表に際しては，当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める．