

論文の内容の要旨

論文題目 粒子法による流体潤滑モデルの開発に関する研究
Research on the development of
the fluid lubrication analysis model by the particle method

氏名 山田 大輔

機械の長寿命化や省エネを実現するためには、機械内の軸受などの潤滑形態の解明が必要である。潤滑形態の解明には、従来では実験による予測が幅広く行われており、実際に潤滑形態の解明に非常に大きく貢献している。例えば、高圧条件下において、構造体の弾性変形を伴う弾性流体潤滑現象(EHL)については、圧力分布や油膜厚さ分布について幅広く予測が行われている。このように、潤滑形態の解明には、実験で行うことが主流となっている。

ただし、宇宙機のような過酷な条件下で運用される機械に対しては、実験のみで潤滑形態の解明を行うには、非常に高いコストを要してしまうという問題がある。例えば、宇宙機で用いられる軸受の潤滑形態の解明を行うには、まず真空条件下の環境で実験をする必要があることから、実験コストが高くなる。また、宇宙機については、電力の確保が難しく、電力使用量の削減における重要性がかなり大きい。したがって、宇宙機の潤滑に用いるグリースの量は、粘性抵抗などによる過剰の電力の消費を抑制するためにかなり少なくすることが要求されている。油量が少なくても安全に運用し続けられるようにするためには、非常に高価なグリースを用いることが必要である。よって、潤滑剤(グリース)は、通常の機械で用いられる潤滑剤よりもかなり高価になるので、実験コストもそれに伴って高くなる。さらに、近年では宇宙機の寿命が15年程度と長くなっており、耐久試験の期間も長くなり、それに伴って実験のコストも増大する。このように、実験のみでは、宇宙機などの潤滑形態の解明には非常にコストが高くなってしまう。

したがって、宇宙機などの過酷な条件下で行われる機械の潤滑形態の解明には、実験に加えて数値流体力学(CFD)に基づく解析による予測が有効である。潤滑問題の解析については、ナビエ・ストークス方程式に完全非圧縮条件などの仮定を設けたレイノルズ方程式がよく用いられている。レイノルズ方程式は、圧力分布などについて非常に短い計算時間で解析を行うことができ、非常に高い実用性を持つ手法である。

しかし、レイノルズ方程式は、ある時点で圧力の境界条件を定め、解析領域内については油膜が完全に満ちていると仮定を置く静的に解析を行う手法である。したがって、動的な現象である時刻ごとの油膜形状分布や軸受ごとの時刻ごとの油量の変化などの現象については、レイノルズ方程式の代わりに、レイノルズ方程式の仮定を外したナビエ・ストークス方程式による解析が有効である。ナビエ・ストークス方程式を用いて現時点では有限要素法(FEM)や、有限体積法(FVM)、有限差分法(FDM)などの格子法によって多く行われており、圧力計算精度についての高精度計算に成功している。

本研究では、このようなCFD手法の一つである粒子法(MPS法)を用いて潤滑解析モデルの開発を行った。粒子法の特徴としては、メッシュレス法であり、解析領域全体を粒子の集合として計算を行うので、メッシュ破断が発生しないことから、大変形を伴う現象をロバストに計算を行うことができることがある。すなわち、粒子法は表面形状をロバストに表現できる手法である。また、粒子法は通常は構造体と流体の両方を粒子として表現を行い、気体領域を計算する必要がないので、機構解析との連成を比較的容易に行うことができる。さらに、粒子法は速度更新の際に移流項を計算しないラグランジュ法を用いることから、移流項の計算時に生じる数値拡散などの数値不安定性が生じない。以上の背景から、粒子法は津波や表面張力などの現象解析によく用いられている手法である。潤滑問題については、潤滑油の逆流によって、潤滑油のマクロな表面形状の変化が発生し、表面張力やキャビテーションなどによって表面形状が複雑になると見られることから、粒子法は潤滑解析に適している手法である。また軸受機構全体での潤滑油の流れについても表面形状が複雑になる傾向にあることから、粒子法を用いて潤滑解析モデルを開発することは重要である。このような背景から、潤滑解析モデルにおいてはSPH法やMPS法における先行研究が存在する。

しかし、潤滑問題は、油膜厚さの解析スケールが非常に小さく(1~100 μm 程度)、必要空間解像度が非常に大きく、それに伴って計算時間が非常に大きいという問題がある。実用的に解析を行うためには、2日~1週間程度で計算を行う必要があるが、潤滑問題の実用的な解析を行うために、計算コストの削減は潤滑解析に最も大きな課題がある。とくに、粒子法は通常は単一空間解像度で計算を行うので、計算コストがさらに増大してしまう問題がある。よって、本研究の目的としては、実問題解析の前段階として、潤滑現象の実問題を実的に解析できるようにするために、潤滑問題の解析についての計算コスト削減手法の構築を行った。

具体的には、本研究では、計算コストの削減を目的として、粒子法の変解像度手法の一つである重合粒子法を用いて、潤滑問題では最も基本的な系である2次元流体潤滑問題へ適用を行った。ここで、計算精度検証として、定常状態にて、圧力分布について理論解として用いたレイノルズ方程式との比較検討を行った。その結果、重合粒子法において高解像度領域と低解像度領域を設けて計算することにより計算精度を保ちながら、粒子数と計算時間の大幅な削減に成功した。なお、本研究では、重合粒子をも行い

た計算コストの削減手法の確立が主目的のため、表面張力やキャビテーションなどの現象は無視して計算を行った。

ここで、計算コストを最大限に削減するための検証課題として、2次元の流体潤滑問題へ重合粒子法を適用する際の高解像度領域と低解像度領域のそれぞれの必要空間解像度の検証と、高解像度領域と低解像度領域の境界座標の検証を行った。一つ目の必要空間解像度の検証の手順として、まずは単一解像度粒子を用いて摺動部に設けた高解像度領域の必要空間解像度を定めた。その次の段階として、重合粒子法を用いて摺動部の周縁部に設けた低解像度粒子の必要空間解像度を定めることを行った。ここでは、低解像度粒子の必要空間解像度を定めると同時に、単一解像度粒子モデルと重合粒子モデルの粒子数と計算時間との比較を行った。その結果、重合粒子法によって、大幅に計算コストが削減できることが示された。次の段階として、さらなる計算コストの削減を目的に、高解像度領域と低解像度領域領域の境界座標の検討を行い、計算精度と計算コストの削減を両立させた境界座標を定めることができた。

以上の手順によって、重合粒子法で流体潤滑現象を計算する際において計算コストを最大限に削減できる手法について構築することができた。

また、潤滑現象で重要な現象として、構造体の弾性変形を伴う弾性流体潤滑 (EHL) 現象がある。本研究では、前述の流体潤滑モデルに加えて、構造体の弾性変形の式と粒子法を連成させることにより、粒子法弾性流体潤滑モデルの開発を行った。ここで、構造体の弾性変形の式は構造体の振動を無視した静的な式を用いても十分な精度で計算でき、実用的に問題がないことから、本研究では静的な弾性変形の式を用いて粒子法と連成を行った。また、本計算では、用いる構造体のヤング率が小さく (10^7 Paオーダー程度)、EHL現象としては比較的小さい圧力 (1~10MPa) で行われることから、潤滑油の粘度変化や密度変化を伴わずにニュートン流体として計算できるソフトEHL現象の解析を行った。計算精度検証としては、定常状態での圧力分布と油膜厚さ分布について、流体潤滑モデルと同様にして、理論解として用いたレイノルズ方程式との比較検討を行った。まず、粒子法ソフトEHLモデル開発については、単一解像度粒子を用いた計算を行い、ソフトEHL解析における必要空間解像度を定めることができた。

次の段階としては、ソフトEHL現象の解析についても、流体潤滑モデルと同様にして重合粒子法の適用を行い、計算コストの削減効果について検証した。まず、流体潤滑モデルと同様に単一空間解像度粒子を用いて高解像度領域の必要空間解像度を定めた。つぎに、重合粒子法を用いて低解像度領域に用いる粒子の必要空間解像度についても定めた。また、重合粒子法モデルと単一空間解像度粒子モデルについて計算精度と計算コストの比較検証を行い、重合粒子法を用いることで計算精度を保ちながら、計算時間を削減することに成功した。

このように、本研究によって、流体潤滑モデルとソフトEHLモデルについて粒子法で計算する際に、重合粒子法を適用することによって、計算精度を保ちながら計算コスト

を削減できることが示された。また、重合粒子法において高解像度領域と低解像度領域それぞれの必要空間解像度と、高解像度領域と低解像度領域の境界座標について定めることができたことから、さらに計算コストを削減することに成功した。以上の結果から、本研究によって潤滑現象の実問題を実用的に解析することができるための計算時間削減手法の構築を行うことができた。ただし、現状では重合粒子法を用いた2次元の流体潤滑問題解析に5~6時間要していることから、時間刻み幅 Δt を大きくとれるようにするなど、後述の3次元の解析領域の計算にはさらなる計算コストの削減(1週間程度以内)を行うことが重要であると考えられる。

今後の課題としては、現状では粒子法における計算コスト削減手法の構築を行なったが、より実問題に近い現象の解析を行うことがある。例えば、3次元の解析領域で計算を行うことで、奥行き方向の油膜の流れや表面形状も予測することができる。また、軸受の形状について、円筒形だけでなく、機械でよく用いられる球形の軸受についても解析を行うことができる。ただし、3次元計算では粒子数が非常に大きくなってしまい、それに伴って非常に大きい計算時間を要してしまう問題がある。また、本研究ではソフトEHL現象について解析を行なったが、構造物のヤング率が大きく(10^{11} Paオーダー)、非常に高圧条件下(GPaオーダー)で潤滑油の粘度変化、温度変化、密度変化を伴うハードEHL現象の解析を行うこともある。ハードEHL現象は、粒子法では潤滑油の密度変化による圧縮性を計算することや、粘性を高精度で計算することのできる手法の確立が必要である。また、最小油膜厚さが $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ と非常に小さいことから、解析スケールがそれに伴って非常に小さくなることから、計算コストも非常に増大しまう問題がある。このように、3次元計算やハードEHL現象解析には、計算コストが最大の課題である。計算コストの課題の解決には、現状では重合粒子法で2種類の粒子空間解像度領域を用いているが、3~4種類の粒子空間解像度領域を定めて、さらに粒子数、計算時間の削減を行うことがある。また、表面張力やキャビテーション、温度変化など潤滑現象では支配的な現象についての導入を行うことも潤滑問題の実問題をより忠実に表現するための今後の課題である。