

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06137

研究課題名(和文) グリースの粘塑性流体モデルを導入したマクロ・弾性流体力学統合CFD解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of Unified Macro-EHL Computational Fluid Dynamics Simulation with Viscoplastic Fluid Model of Grease

研究代表者

根岸 秀世 (Negishi, Hideyo)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹

研究者番号：20568208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機械要素内グリースのマクロ挙動と潤滑部における弾性流体潤滑を統一的に計算し、潤滑膜分布や摩擦損失の予測を可能とする数値流体力学(CFD)技術基盤を構築した。機械要素内の複雑形状、流体および固体を統一的に計算可能なメッシュフリー法の一種のMPS法を採用し、グリースの非ニュートン性を表現する粘塑性モデル、種々の高精度粒子法と可変解像度手法を組み合わせることで極小隙間で高圧となる流体潤滑の計算を安定にかつ精度よく計算できることを示した。これらのモデルや計算手法を組み合わせることでグリース潤滑の油膜厚さや摩擦損失の予測が可能となり、機械要素の長寿命化・低摩擦損失化設計に資することが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業機械の多くが回転機構を有しており、それを支える重要機械要素が転がり軸受である。転がり軸受は弾性流体潤滑状態で利用され、高い潤滑性能と保油性から潤滑グリースの利用が拡大している。近年は省資源・省エネルギーの観点で低摩擦化、小型軽量化、長寿命化の要求が高度化しており、これらの要求に対しては軸受全体における潤滑グリースのミクロからマクロの挙動を統一的に把握し、その流動や摩擦損失等を予測し制御する必要がある。本研究で開発したCFD解析手法は、従来の数値解析手法では対応できなかったマクロ・弾性流体力学を統一的に計算するものであり、今後の省資源・省エネルギーに向けた軸受設計・運用方法の提案に資するものである。

研究成果の概要(英文)：This study has developed a CFD (Computational Fluid Dynamics) technology that enables to accurately predict lubricant distribution and friction loss by calculating macroscopic flow of grease lubricant and elastohydrodynamic lubrication inside mechanical elements at the same time. In the proposed approach, MPS (Moving Particle Simulation) method, which is a kind of mesh-free methods and can easily model complex geometries and fluid as well as solid in a uniform manner, was employed together with a viscoplastic non-Newtonian fluid model of grease, higher order schemes, and multi-resolution method. The proposed approach was validated against several test cases and compared with experimental and theoretical results, which showed reasonable results under high pressure and extremely thin film thickness in a stable manner. By combining the models and numerical methods proposed in this study, it will be possible to contribute on design of long life and low friction mechanical elements.

研究分野：数値流体力学、熱流体力学、トライボロジー

キーワード：非ニュートン流体 グリース 流体潤滑 粒子法

### 1. 研究開始当初の背景

転がり軸受におけるグリース潤滑はその高い潤滑性能と保油性から自動車等の一般産業界のみならず人工衛星等の宇宙機でも利用が拡大している(図1)。地上の一般産業機械と異なり、宇宙機は宇宙空間での運用中に修理やメンテナンスが困難であるため、太陽電池パドル等の駆動部(1機当たり50箇所以上)が動作不良を起こすとミッションの成否に大きく影響する。実際、宇宙機器のトラブルの多くが軸受の動作不良が原因である。また、宇宙機では搭載機器が使える電力は限られるため、低摩擦で長寿命のグリース潤滑が強く求められる。低摩擦化の観点では、しゅう動部での粘性抵抗を低減するため使用するグリース量を極力少なくする事が望ましい。一方、長寿命化の観点では金属同士の直接接触を防ぐために長期間一定以上の油膜厚さが必要となる。従って、低摩擦化と長寿命化は相反する要求であるため、両者を両立させるために極少量グリースによる最適な潤滑・軸受設計が大きな課題となっている。

宇宙機的设计開発はこれまで主に試験に基づく経験的な設計が行われてきたため、転がり軸受内のグリース挙動は未解明であり、摩擦抵抗や油膜厚さの定量予測手法も確立されていない。一方、今後の宇宙機的设计開発では、観測精度等の向上のための軸受の低擾乱化と従来寿命の倍を目指した20年寿命が大きな目標となっており、極少量グリースによる軸受内潤滑メカニズムの理解と、最適な軸受設計を実現するための摩擦抵抗および油膜厚さの定量予測手法の確立が急務である。

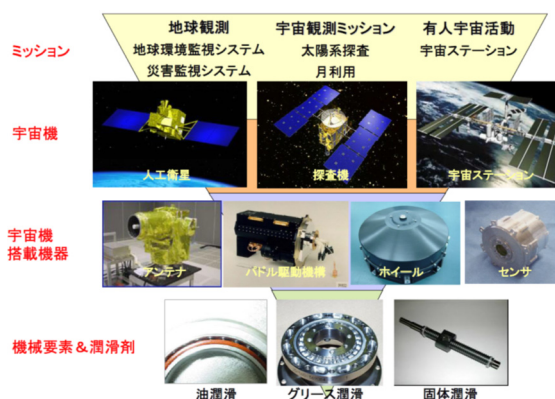


図1. 宇宙開発のミッションと機械要素

### 2. 研究の目的

本研究は、極少量グリース潤滑の現象理解と予測技術構築を目的として、近年技術進歩が著しいCFD(Computational Fluid Dynamics)技術をベースに、グリースのレオロジー特性、軸受内のマクロ流れ、高圧しゅう動部の弾性流体力学それぞれに関する現象理解と物理数学モデルの構築、そしてそれらを統合した数値解析手法の技術基盤を確立することを目標とする。得られる研究成果は、宇宙開発分野はもとより広く産業界での活用が期待でき、軸受の摩擦に伴う機械損失を低減し、高性能化、高効率化、省エネ化、低コスト化、長寿命化に貢献することができる。

### 3. 研究の方法

機械要素内の複雑形状、流体および固体を統一的に計算可能なメッシュフリー法の一つのMPS(Moving Particle Simulation)法を採用し、グリースの非ニュートン性を表現する粘塑性モデル、流体-剛体連成手法、流体-弾性体連成手法、種々の高精度粒子法と可変解像度手法を組み合わせることで極小隙間で高圧となる流体潤滑の計算を安定にかつ精度よく計算可能な手法を目指した。構築した手法については、基礎実験や理論解との比較を通してその妥当性検証を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) グリースの粘塑性モデルの構築とダム崩壊問題での検証

本研究では、流動時を主な解析対象とし、不動時は非常に粘度の高い流体として、グリースの代表的なレオロジー特性式であるHerschel-Bulkley式にPapanastasiouの修正式を加えたHerschel-Bulkley-Papanastasiou(HBP)式(Mitsoulis, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2008)により粘性係数を与える形とした。図2は本研究の供試グリースについてせん断応力-せん断速度曲線を示したものである。図から分かるように、基油は傾き一定のニュートン流体の特性を示しているが、供試グリースは降伏応力を持ち、せん断速度が増加するにつれてせん断応力の増加量が低下するShear-thinning特性を示している。本研究で導入したHBP式は、粘度計による計測値をよく再現している。図3は粘度計計測から得られる見かけの粘性係数(図2で示した曲線の勾配に相当)とHBP式を比較したものである。ここでも参考までに基油の粘性係数( $8.31 \times 10^{-2}$  Pa-s)も示しているが、供試グリースは1桁以上大きな見かけの粘性係数を示している。特に低せん断速度域では、 $10^2$  Pa-sオーダーに達し、非常に高い粘性係数を示すことが見て取れる。

グリースのビンガム擬塑性モデルを導入したMPS法の検証のため、自由表面流の代表的ベンチマーク問題であるダム崩壊問題をグリースに適用し検証実験を実施した。グリースが自重により崩壊するマクロ挙動について実験結果と計算結果を比較検証するとともに、構築した数値解析手法については特に粘性項の離散化方法に着目して種々の方法を試行し比較評価した。なお、ビンガム擬塑性流体はせん断速度の違いが粘性係数の差となり、それが空間的に分布することで流動が誘起される。そのため、せん断速度すなわち速度分布の予測精度が重要と考えられ

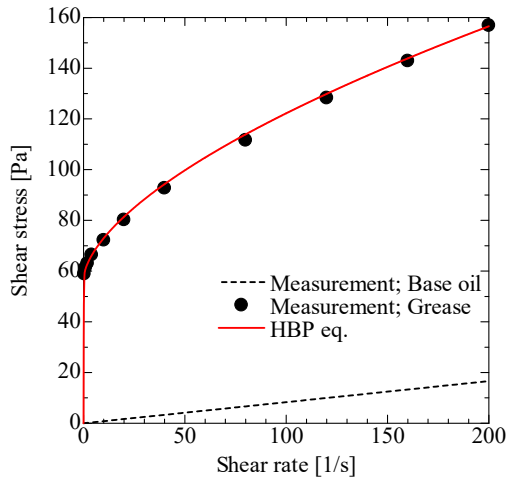


図 2. 供試グリースの流動特性

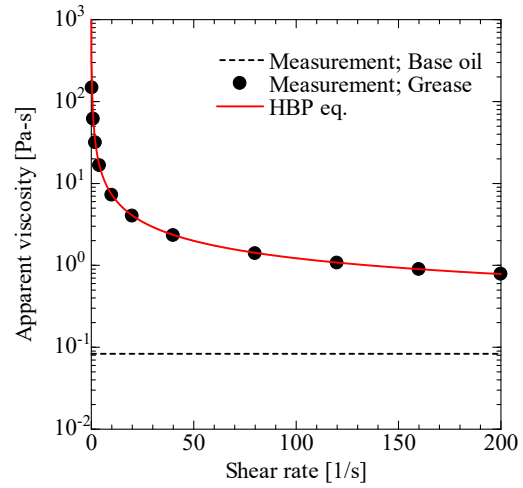
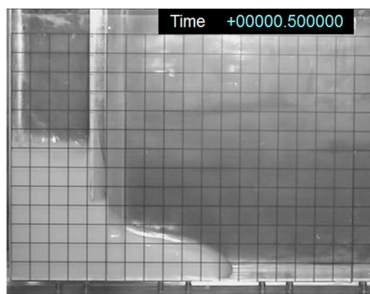
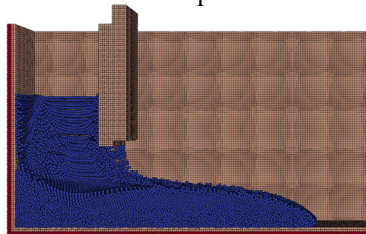


図 3. 供試グリースの見かけの粘性係数

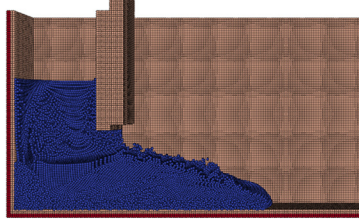
る. そこで本研究では, 勾配及びラプラシアン計算に高精度粒子法である Gradient correction (GC) 法 (Khayyer and Gotoh, Journal of Computational Physics, 2011) を導入し高精度化を図った. また, 圧力勾配計算に高精度粒子法である Dynamic stabilization (DS) 法 (Tsuruta et al., Computers & Fluids, 2013) を導入し, 必要最低限の人工斥力で数値安定性を確保しつつ運動量保存を満たす様にした.



Exp.



Cal.: MPS



Cal.: MPS-GC-DS

図 4. ダム崩壊後のグリース形状比較

図 4 にダム崩壊開始から時刻 0.5 s 後におけるグリース形状の比較を示す. 実験では, 時刻  $t = 0.0$  s で可動壁が上方に移動を開始すると, グリース柱は自重により崩壊を開始し,  $t = 0.4$  s 程度まで急速に流動した. それ以降は流動が急速に減速し, 時刻  $t = 0.5$  s に見られるようにブーツ状の形となり完全にグリース流動が停止した. 計算結果でも, グリースが崩壊し時刻  $t = 0.5$  s までにはブーツ型形状となり流動が停止する様子を再現した. 図 5 は崩壊するグリースの水槽底部における先端位置履歴である. 計算結果は実験結果を概ね再現しており, 高精度粒子法を導入することで結果の改善が確認された.

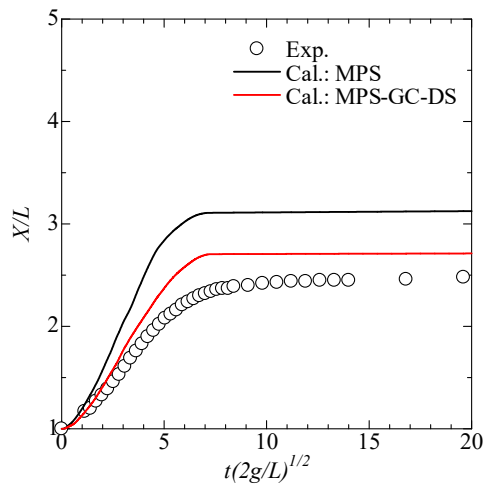


図 5. 崩壊するグリースの先端位置履歴

## (2) グリースの粘塑性モデルを利用した転がり軸受内グリースマクロ流れの計算試行

MPS 法の玉軸受内グリース流動解析適用に向けた検討として, 玉軸受全周を対象に保持器等機構部品の運動を考慮したグリースマクロ挙動の解析を試行し, その有効性確認と課題抽出を行った. グリースの粘塑性モデルには, 成果 (1) で構築した HBP 式を使用した. なお比較評価のため, 供試流体としてグリースと基油のみの 2 ケース計算を実施した.

解析対象は図 6 に示すような内径 15 mm の宇宙機用アンギュラ玉軸受とし, 内輪, 外輪, 転動体 (10 個), 保持器で構成される. なお今回は計算負荷低減のため実物の 1/10 サイズとした. 最小隙間となる転動体と内輪および外輪のしゅう動部は, 通常  $1 \mu\text{m}$  程度のところを  $10 \mu\text{m}$  に拡大した. 本解析では, 外輪を静止座標系に固定し, 内輪を回転軸周りに 100 rpm 一定の回転数を与えて自転させた. この内輪の回転に伴い, 転動体と保持器の回転も考慮した.

初期のグリースは, 図 7 に示すように初期粒子間距離  $2.5 \mu\text{m}$  で内輪壁面上に約 20 層分(厚み

で  $50\ \mu\text{m}$ 配置した. この時, 転動体と内輪および外輪の隙間は 4 粒子で解像され, 計算領域全体の流体粒子数は約 1600 万粒子である. 計算では固体壁をポリゴン壁モデルで与え, 滑りなしとした. 内輪等の回転部の自転と公転は強制変位として与え, グリース挙動との相互作用は考慮しなかった. また今回の計算では重力加速度や表面張力も簡単化のため考慮しなかった. 計算の時間刻みは  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}\ \text{s}$  とした. MPI により 252 コアの並列計算を実行し, 実時間 1 s 間の計算に要する時間は約 14 日であった.

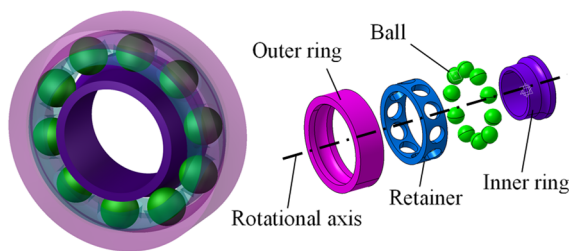


図 6. 転がり軸受の概要図

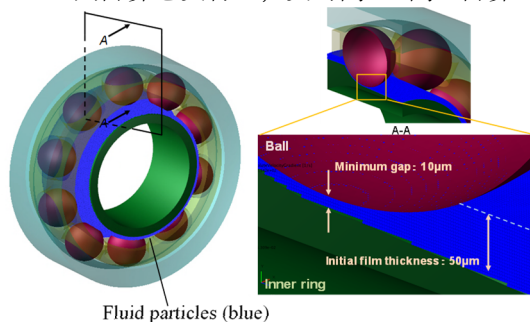
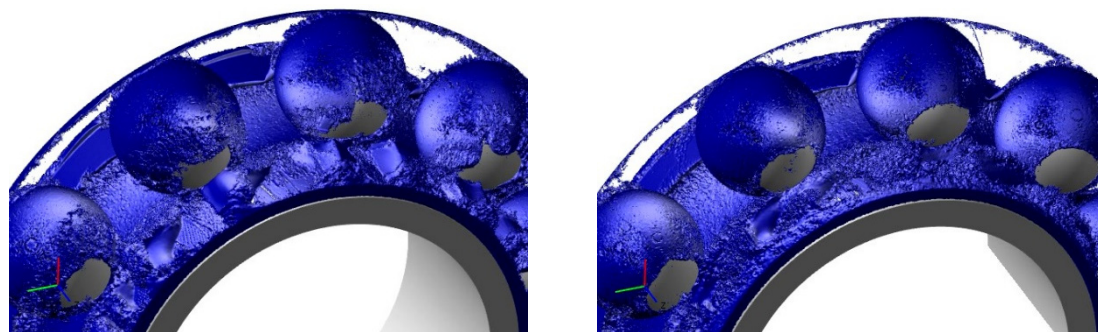


図 7. 流体粒子の初期配置

図 8 に回転開始から 1 秒後のグリースおよび基油分布を示す. 解析結果から, グリースのマクロな挙動としては, 転動体による攪拌効果が支配的であり, 初期のグリース膜が転動体に付着ないし攪拌され, グリース分布が形成されていく様子が確認された. 特に玉軸受内部の 3 次元形状の影響により, 初期の膜厚から薄くなる場所と逆に厚くなる場所が現れることもグリースでは基油に対して顕著となることが明らかとなった.



(a) グリースの場合

(b) 基油の場合

図 8. 回転開始から 1 秒後のグリースおよび基油分布

なお本検討では, 計算負荷低減のため実物の  $1/10$  サイズとし, 最小隙間は通常の 10 倍に拡大して実施した. 実物の計算を実施する場合, 最小隙間  $1\ \mu\text{m}$  に今回同様 4 粒子入れるとしたときの粒子間距離は  $0.25\ \mu\text{m}$  で現状の  $1/10$ , 粒子数は  $10^3$  倍が必要となる. また, 軸受の空間サイズは各方向 10 倍となるため体積では  $10^3$  倍となり, 単純に見積もっても現状 1600 万粒子の  $10^6$  倍の粒子数, すなわち 10 兆オーダーの粒子が必要となり, 非現実的な計算コストとなる. この課題については, 可変解像度粒子法が有効であると考えられ, 後述する成果(4)において説明する.

### (3) MPS 法の線接触流体潤滑問題への適用と検証

成果(2)では, 軸受内のマクロ流れのみ計算対象としたが, 実際の潤滑問題に対する MPS 法の適用に向けては, 基礎的な流体潤滑問題, すなわちくさび膜効果, 絞り膜効果を再現できる必要がある. ここではそれら基礎的な流体潤滑問題に MPS 法を適用し, 理論解と比較検証した.

図 9 はくさび膜効果 (最小油膜厚さ  $400\ \mu\text{m}$ ) の計算結果である. 出口隙間 (最小隙間部) が入口隙間よりも小さいために, 流出流量の方が流入流量よりも小さくなり, 隙間内では上流から流体粒子が押し込まれてくることで粒子数密度が増加し隙間内に圧力分布が発生している. これはすなわち, くさび膜効果が再現できていると言える. 図 10 は MPS 法による種々の初期粒子間距離  $l_0$  での計算結果と Reynolds 方程式による理論解との圧力分布比較結果である. 図から明らかのように, MPS 法の結果では  $l_0 = 50\ \mu\text{m}$  以下でほぼ理論解を再現しており, 粒子解像度に依らず同等の収束解が得られることが確認された. 本検証では, 最小油膜厚さは  $400\ \mu\text{m}$  であるため, 解像度に依らない解析結果を得るには, 最小油膜厚さに対して最低でも 8 粒子は必要であることが確認された.

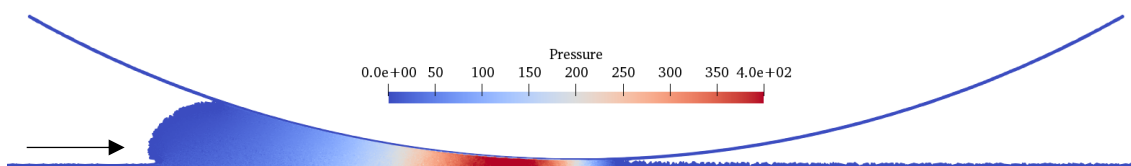


図 9. くさび膜効果の検証結果: 油膜形状と圧力分布

図 11 は絞り膜効果の計算結果である。円筒が降下することで中央部に存在した油膜が押し分けられ周囲に流出していく過程において、油膜が圧縮されて圧力が発生する、すなわち絞り膜効果が再現できていると言える。図 12 は半径方向圧力分布の時刻歴であるが、Reynolds 方程式による理論解をおおよそ再現できている、MPS 法で絞り膜効果も再現できることが確認された。

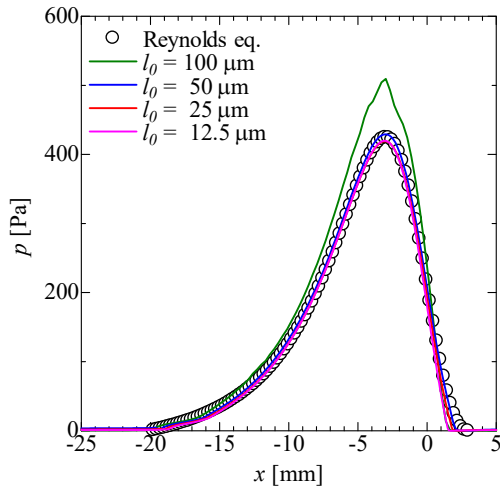


図 10. くさび膜効果の圧力分布比較

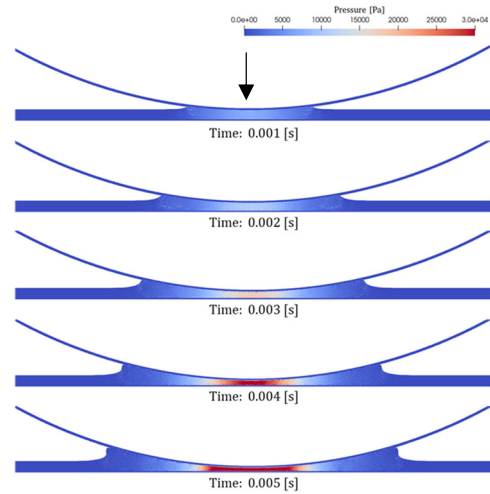


図 11. 絞り膜効果の検証結果：油膜形状と圧力分布

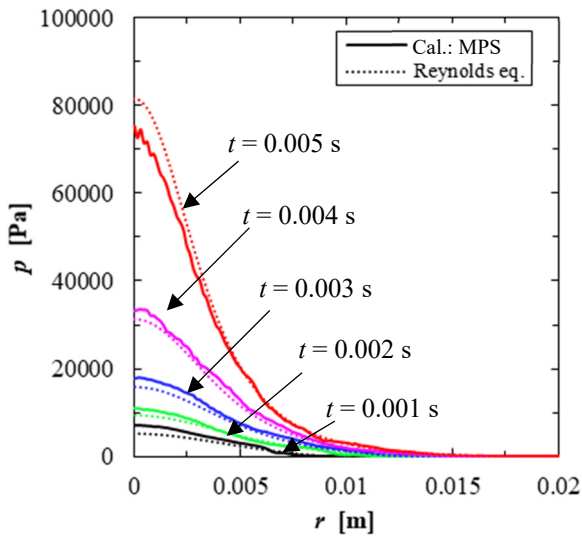


図 12. 絞り膜効果の圧力分布比較

#### (4) 可変解像度粒子法の適用と検証

成果(2)(3)でも述べたように、MPS 法の計算では最小膜厚に 8 粒子以上の粒子を入れる必要があり、実物大の軸受への適用に向けては非現実的となる膨大な粒子数をいかに削減するかが大きな課題である。そこで本研究では、計算領域ごとに粒子間距離を変えることができる可変解像度粒子法の一つである重合粒子法 (Shibata et al., *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2017) を適用し、線接触流体潤滑問題 (くさび膜効果) における圧力分布の再現と、必要な粒子数と計算時間の削減を試みた。

成果(3)と同様の線接触流体潤滑問題 (くさび膜効果) に適用し種々の解像度比を評価した結果、現状の手法では 1:8 程度のサイズ比までであれば安定かつ精度よく圧力分布を再現でき、計算コストは最大で約 7 割低減できることを確認した。

#### (5) 流体-剛体連成手法の構築と転がり円筒流体潤滑問題の検証

ここでは、軸受内全体の潤滑剤挙動と摩擦力の予測手法を確立することを目的とし、軸受内の機構部品である転動体 (Ball) や保持器等の 6 自由度剛体運動計算に応用可能な流体-剛体連成解析手法を構築した。剛体運動の計算には PMS (Passively Moving Solid) モデル (後藤, 粒子法, 2018) を採用した。

構築した手法の検証を目的に、図 13 の様な軸受内の流体潤滑状態を模擬した転がり円筒の流体潤滑基礎実験と検証解析を実施した。構築した手法により転がり円筒の停止挙動を定性的に再現し、また転がり円筒の重心位置履歴も定量的に予測できることを確認した。

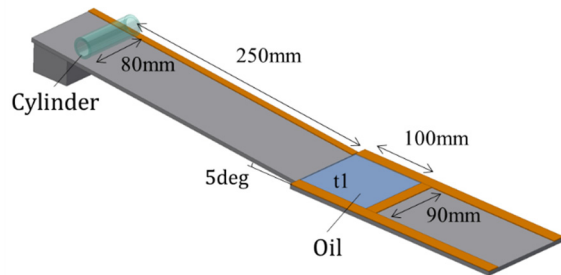


図 13. 転がり円筒の流体潤滑実験概要図

#### (6) 線接触ソフト EHL 解析 (流体-弾性体連成解析) 手法の構築

弾性流体潤滑では、主に転動体の弾性変形と高圧に伴う粘度および密度の上昇が特徴である。本研究では、弾性変形のみ考慮するソフト EHL に着目し、流体-弾性体連成解析手法を構築した。具体的には、流体は MPS 法で計算し、固体表面の弾性変形は従来の EHL 解析と同様に弾性変形式を組み合わせた形とした。成果(3)(4)で示したような線接触問題に適用し、圧力分布と油膜分布をおおよそ再現することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 NEGISHI Hideyo, AMAKAWA Hiroaki, MANIWA Kazuaki, OBARA Shingo, HAYAMA Makoto, DONG Daming	4. 巻 85
2. 論文標題 Numerical analysis of dam breaking behavior of Bingham pseudoplastic fluid by using the explicit MPS method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 19-00086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 NEGISHI Hideyo, FUJIHARA Hironori, TAKAHASHI Hidenao, SHIBATA Kazuya, MANIWA Kazuaki, OBARA Shingo	4. 巻 86
2. 論文標題 Numerical analysis of fluid lubrication in line contact by using the MPS method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Daisuke, Imatani Toshiki, Shibata Kazuya, Maniwa Kazuaki, Obara Shingo, Negishi Hideyo	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Application of improved multiresolution technique for the MPS method to fluid lubrication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40571-021-00420-2	査読の有無 有
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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋秀尚、根岸秀世、小原新吾
2. 発表標題 MPS法による転がり円筒の流体潤滑解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 根岸秀世、藤原大典、高橋秀尚、柴田和也、間庭和聡、小原新吾
2. 発表標題 MPS法による流体潤滑解析の基礎検討
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 穴井達啓、伊藤伸太郎、福澤健二、張賀東、東直輝、根岸秀世
2. 発表標題 しゅう動痕に形成されたサブミクロン厚さグリース膜のファイバーウォブリング法による粘弾性計測
3. 学会等名 トライボロジー会議2018秋 伊勢
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根岸秀世、藤原大典、間庭和聡、小原新吾、柴田和也、政家一誠
2. 発表標題 MPS法による玉軸受内グリース挙動数値解析の基礎検討
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田大輔、松永拓也、越塚誠一、柴田和也、間庭和聡、根岸秀世
2. 発表標題 重合粒子を用いたMPS法によるボールオンディスク流体潤滑解析
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根岸秀世、間庭和聡、小原新吾、政家一誠、柴田和也
2. 発表標題 MPS法による玉軸受内潤滑グリース挙動解析の基礎検討
3. 学会等名 トライボロジー会議2019春 東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋秀尚、根岸秀世、間庭和聡、小原新吾
2. 発表標題 MPS法による流体潤滑解析 -くさび膜効果と絞り膜効果-
3. 学会等名 トライボロジー会議2019春 東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田大輔、松永拓也、越塚誠一、柴田和也、間庭和聡、根岸秀世
2. 発表標題 可変解像度手法を用いたMPSによる流体潤滑解析
3. 学会等名 トライボロジー会議2019春 東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 雨川洋章、根岸秀世、間庭和聡、小原新吾、羽山誠、董大明
2. 発表標題 粒子法によるグリースマクロ流れ解析の基礎検討 -グリースダム崩壊問題の実験と解析検証-
3. 学会等名 トライボロジー会議2017秋 高松
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 根岸秀世、雨川洋章、間庭和聡、小原新吾、羽山誠、董大明
2. 発表標題 宇宙機の長寿命化に向けた転がり玉軸受内グリース流動数値解析技術構築に向けた展望
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	柴田 和也  (Shibata Kazuya)  (30462873)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授   (12601)	
研究分担者	福澤 健二  (Fukuzawa Kenji)  (60324448)	名古屋大学・工学研究科・教授   (13901)	

	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
研究協力者	小原 新吾  (Obara Shingo)  (82645)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域上席   (82645)	
研究協力者	間庭 和聡  (Maniwa Kazuaki)  (90747958)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員   (82645)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	雨川 洋章  (Amakawa Hiroaki)  (20533607)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員    (82645)	
研究協力者	伊藤 伸太郎  (Ito Shintaro)  (50377826)	名古屋大学・工学研究科・准教授    (13901)	

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