

大規模並列化 SPH 摩擦モデルによる摩耗凝着シミュレーション

Seizure simulation using a large parallelized SPH friction model

鹿児島高専（学）石原 大嵩 鹿児島高専（学）上ノ園 悠大

兵庫県大（学）藤田 晃徳 兵庫県大（正）鷲津 仁志

鹿児島高専（正）杉村 奈都子

Hiroataka Ishihara*, Yudai Uenosono* Akinori Fujita** Hitoshi Washizu** Natsuko Sugimura*.*

*National Institute of Technology, Kagoshima College, **University of Hyogo

1. 背景

焼付きの抑制および摩擦低減を目的として、近年では潤滑油の粘弾性特性の最適化、金属表面の化学的修飾、表面テクスチャの導入、さらには金属表面と潤滑油・摩耗生成物との相互作用の制御など、さまざまな技術的改良が進められている。これらの取り組みにより、長寿命化および低摩擦化の実現が報告されているものの、摺動時に金属表面で発生する摩耗、なじみ現象、凝着、発熱、焼付きなどの進行メカニズムに対して、これらの改良がどのように影響を与えているのか、すなわち、摩擦低減の本質的な仕組みについては依然として体系的な理解が十分とは言えない。とりわけ焼付きの発生過程においては、摩擦界面の温度変化や、スカuffing（scuffing）と呼ばれる急激な表面損傷の挙動を把握することが極めて重要であると考えられている^[1]。しかしながら、これらの現象は動的観測が極めて困難であり、とくに界面で発生する瞬間的な閃光温度の計測は、実験的にはほぼ不可能であるとされる。

このような背景から、計算機シミュレーションによる現象の再現と分析に対する期待が高まっている。中でも、Smoothed Particle Hydrodynamics（SPH）法を基盤とした大規模並列化摩擦シミュレーターの開発が進展しており、メソスケールの現象を粒子レベルで捉える手法として注目されている^[2]。

本研究では、ドライ摩擦領域において発生する凝着摩耗現象に着目し、これまでにない長時間のせん断シミュレーションを実施することで、凝着の持続条件および焼付き過程の理解を深めることを目的とする。これまでの試験結果から、せん断速度の上昇に伴い、接触面温度および応力が増加することが確認された。そこに新たな試みとして、金属表面の形状（テクスチャ）に変化を加えたモデルを導入し、表面形状の違いが摩擦挙動や凝着の進行に与える影響を解析的に評価する。これにより、表面設計と摩擦損傷の関係性についての新たな知見の獲得を目指す。

また、長時間せん断計算の安定化および効率化に向けた数値的工夫についても併せて報告し、メソスケールにおける凝着摩耗挙動の理解に資する結果を提示する。

2. 実験方法

SPH 法を用いた計算機シミュレーションを行う。計算機はテスト計算などの小規模なものには鹿児島高専計算機（kcm1）を、大規模な計算には名古屋大学のスーパーコンピュータ不老を用いる。材料をアルミニウム（Al）などの金属とし、界面に規則的な凹凸を加えた金属固体を上下に対向させ、上部固体に定速せん断と鉛直荷重を加える。このとき、鉛直荷重、せん断速度、金属材料、界面の形状等を変更して、シミュレーションを繰り返す。今回の計算機シミュレーションで並列化を行う際に用いたものは Framework for Developing Particle Simulator（以下、FDPS）である。FDPS は大規模並列化多体相関シミュレーションプログラムの開発フレームワークで、MPI や OpenMP を用いた並列化のコーディングを簡便化する。Fig. 1 は実験で使用したモデルの応力分布例である。

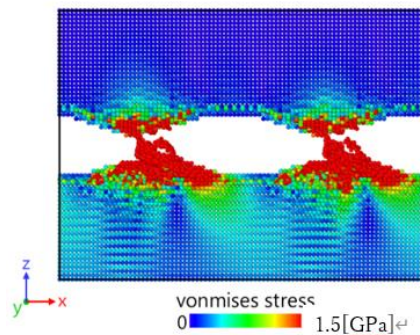


Fig.1 Equivalent stress distribution

3. 実験結果

まず、冒頭で触れた、せん断速度を変化(50m/s, 100m/s, 200m/s)させながら実施した荷重負荷試験(1 Nおよび10 N)による接触面の平均温度を Fig. 2 に示す。荷重を1 N および 10 N に設定した場合のいずれにおいても、せん断速度の増加に伴い接触面の平均温度および Von Mises 応力が上昇する傾向が確認された。しかしながら、1 N と 10 N の荷重条件間に顕著な差異は認められなかった。

他方、接触初期に生じる弾性衝突により、剪断固体上部が上方へずれる現象が確認された。この問題に対処するため、せん断速度を低速(20m/s)に設定して試験を行った。その結果、複数回の接触摩擦が発生し、各接触に伴って温度が上昇することが確認された。さらに、この試験における Von Mises 応力の変化を Fig. 3 に示す。図より、Von Mises 応力は一定値まで上昇し、その後は塑性変形大きな変化を示さないことが分かる。この傾向は、高速せん断時の試験結果にも共通して観察された。

さらに、せん断速度を2m/sに設定し、荷重条件を変更して試験を実施した。結果として、荷重が0 N の場合には接触後に凝着部が剥離する現象が観察されたが、1 N の荷重条件下では凝着状態がより長時間維持されることが確認された。

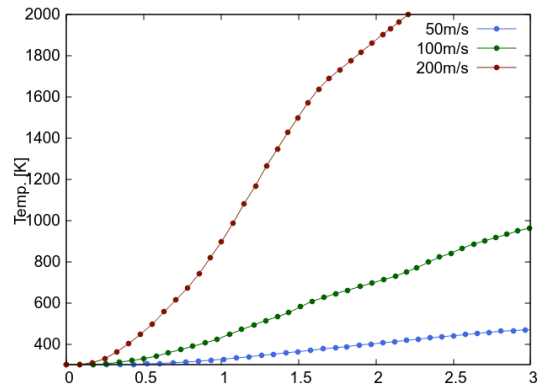


Fig.2 Calculation Results (temp)

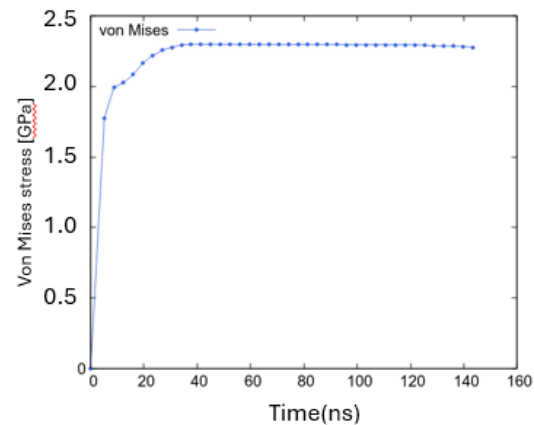


Fig.3 Calculation Results (Von Mises stress)

4. 考察

本試験を通じて得られた重要な知見の一つとして、せん断速度の上昇に伴い、接触面における温度および Von Mises 応力が増加する傾向が挙げられる。この傾向は、高速せん断条件および低速せん断条件のいずれにおいても観察されており、せん断速度が接触界面の熱および力学的挙動に大きく影響を与えることを示唆している。これらの結果は、せん断速度の増加に伴う摩擦エネルギーの増大が、シミュレーション内で適切に再現されていることを示すものである。また、荷重による影響がせん断速度に比べて小さいと考えられる要因としては、接触後に剪断上部固体が上方にズレる現象が生じたことにより、凝着状態が短時間で終了したことが挙げられる。これにより、荷重が凝着の維持や応力分布に及ぼす影響が十分に反映されなかった可能性がある。今般、剪断速度 2m/s の試験を通じて凝着の維持に荷重がかかわることが示唆されたため、今後さらに試験を進めて発熱温度の差異を議論する予定である。なお、Fig. 3 において Von Mises 応力が一定値に達した後に上昇しなかった理由として、材料が塑性域へ移行したことが原因であると考えられるが、接触や凝着前後の応力分布の詳細についても精査し、凝着維持の特徴を明確にしてゆく予定である。

5. 文献

- [1] Y. Matsuzaki, K. Yagi, J. Sugimura “In-situ Observation of Heat Generation Behavior on Steel Surfaces During Scuffing Process”, Tribology Letters, 66(2018)142
- [2] N. Sugimura, L.V. Sang, Y. Mihara, H. Washizu “Mesoscale smoothed particle hydrodynamics simulation of seizure and flash temperature for dry friction of elastoplastic solids in a newly developed model”, Journal of Computational Science, 82, (2024) 102325