

# 摩耗・凝着に関する粒子法シミュレーション Seizure simulation by Smoothed Particle Hydrodynamics method

鹿児島高専（学）\*石原 大嵩 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\*, Akinori Fujita\*\*, Hitoshi Washizu\*\* Natsuko Sugimura\*

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

## 1. 背景

今回の研究の主な目的として摩擦潤滑の中でも焼付きについて調べる。現在、焼付きの発生を抑えることを目的として油の粘弾性、金属固体表面の化学的修飾、表面形状（テクスチャ）、金属固体表面と油や摩耗粉との相互作用などの改良がなされ、長寿命低摩擦の実現が積極的に報告されている。しかしこれらの改良が、摺動時に起こる金属表面の摩耗、なじみ、凝着、発熱、焼き付きの進行や度合をどのように左右しているのか、つまり、なぜうまく摩擦を低減できたのかという仕組みは、実は体系的には説明できない。この摩擦摩耗発熱の実過程はどうなっているのか解析することが今回の研究の目的である。この解明には、塑性流動を観測し且つ分子間相互作用も考慮できるスケール、すなわちマイクロメートル（メソ）スケールでの機構解明が欠かせない。なぜなら、油膜厚さが分子膜程度であるのみならず、摩擦発熱とその熱拡散が摩擦体表面の態、構造、化学反応性を劇的に変え、界面付近の運動を大きく変えると予想され、この現象を捉え得る最小の基本単位が結晶粒程度のメソスケールだからである。しかし実際にメソスケールの界面で何が起きているのかは、動的観測がそもそも困難な上に、サイズが小さく閃光温度などもほぼ観測不可能であるなど、やはりよく分かっていない。そこで期待されるのが計算機シミュレーションであるが、現状、観測結果に基づくパラメータと理論的仮定を用いずして、信頼できる結果を得られる状況ではない。そこで現況、原子分子の運動を基本とするミクロスケールと、連続体の運動を基本とするマクロスケールの中間にあたるこのメソスケールでは、両方の要素をいかにうまく取り込んで粗視化、モデル化できるかが非常に重要である。本研究では潤滑油のないドライ摩擦のモデルを用いて境界潤滑摩擦の機構の解明を SPH 法を用いて計算機シミュレーションを行う。

## 2. 実験方法

今回の研究では SPH 法を用いた計算機シミュレーションを行う。実験に用いる計算機としてテスト計算などの小規模なものには鹿児島高専計算機（k c m l）を用いて大規模な計算には大阪大学のスーパーコンピューター S Q U I Dを用いた。実験の方法としては、摩擦面上部を定速で引っ張るせん断シミュレーションを行い、その結果を検証して計算条件を修正し再度計算を行う。これを何度も繰り返した。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 とは理化学研究所の牧野グループが開発した多体シミュレーションプログラム開発フレームワークである。FDPS を用いると、MPI を用いた並列及び OpenMP を用いた並列をフレームワークが勝手に行う。c++言語のクラスを用いオブジェクトとして粒子を表現することで、粒子のコピーが可能になり、粒子の位置や質量などを提供することで長距離力のためのツリー構造を作ることにも可能である。Fig. 1 は実験で使用したモデルとサイズ、Table. 1 は計算の初期条件を示している。

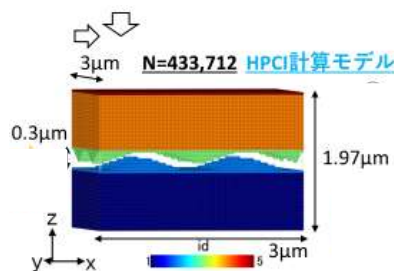


Fig.1 System size

Table.1 initial conditions

粒子数	433712
x方向の速度 (v_sliding)	42m/ s
z方向の加速度 (v_load)	10m/ s
ヤング率	69MPa
降伏応力	25MPa
鉛直荷重 (Pload1)	1N

### 3. 実験結果

実験結果として以下の5つが得られた

- (1) 初期条件でのシミュレーション結果
- (2) 鉛直の荷重を10Nに変更したシミュレーション結果
- (3) ヤング率と降伏応力を減少させたシミュレーション結果
- (4) ヤング率と降伏応力を増加させたシミュレーション結果
- (5) 材料を鉄と仮定した場合のシミュレーション結果

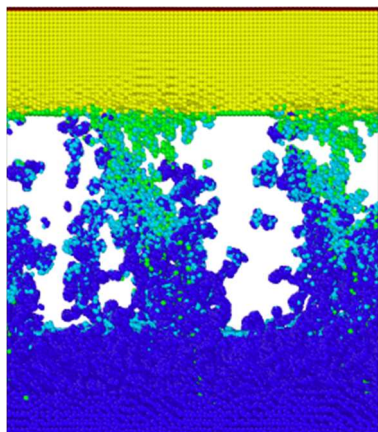


Fig.2 Results of experiment (1)

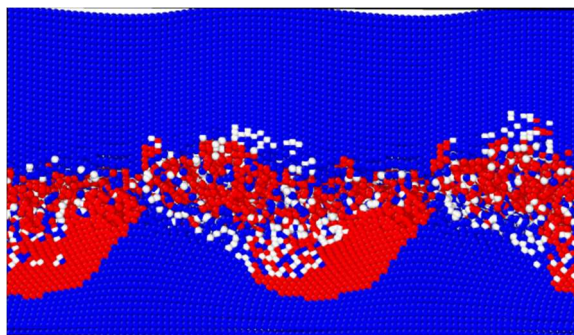


Fig.3 Results of experiment (3)

(1) でシミュレーションを行った結果突起部が接触し凝着が発生する過程を確認することができた。また、Fig.2に示すように凝着がはがれる過程においてモデルの上部が上方へずれていくことが確認できた。(2) では荷重を増やした結果モデル上部の上方へのずれが少なくなっていた。ミーゼス応力の値も(1)に比べて大きくなっていた。また摩擦表面付近に塑性化した粒子が多くなっていた。(3) では凝着が発生する際に突起部分だけでなく全体的に発生していた。Fig.3で示すように塑性化している粒子を示す赤色の粒子が摩擦表面だけでなく広範囲に増加していた。また凝着がはがれる過程において粒子全体の崩壊を確認できた。(4) では凝着する粒子が突起部表面付近のみだった。また、凝着がはがれる過程においても表面のみの粒子がはがれるところの確認できた。(5) では凝着初期段階までのシミュレーションを行うことができた。

### 4. 考察

結果の(1)において凝着がはがれる過程においてモデルの上部がずれていった原因としては突起が接触する際の衝撃と考えた。上方へのずれを減少させるために(2)では鉛直荷重を1Nから10Nに変更をしてシミュレーションを行った。これにより(1)に比べ上方へのずれは少なくなっていることが確認できた。このことから衝撃による上方へのずれを抑えるための手段として鉛直荷重を増加させることは有効だと考えた。また、(1)に比べミーゼス応力の値の増加を確認することができ、ミーゼス応力の理論式にも対応したシミュレーションができていた。(3)ではヤング率の低下により材料が柔らかくなったことにより接触した際のミーゼス応力が発生する範囲が増加していた。塑性化した粒子の数もヤング率が下がってことで増えていた。(4)では摩擦表面付近だけが凝着しはがれていた。この実験(3)と(4)の結果から材料の固さによる変化の再現をおこなうことができていたと考えた。最後にモデルの材料を鉄と仮定した際のシミュレーションに付いて考察する。(4)からヤング率、降伏応力を増加させた場合の結果を得ていたのと同じような結果を得られると予想していた。結果としては凝着が発生する初期段階までのシミュレーションを行うことができた。他の実験と比べて短い物理時間での実験となった。この原因としてはシミュレーションの時間刻みの設定にCFL条件を課しており、ヤング率が増加した事によりサウンドスピードが大きくなり、時間刻みが小さくなるためである。この計算についてはさらに継続的に計算を進め結果の考察を行う予定である。

### 文献

- 1) J. Monaghan, "Smoothed particle hydrodynamics", Reports on Progress in Physics, 68, pp1703-1759 (2005)
- 2) J. W. Swegle "An Analysis of Smoothed Particle Hydrodynamics", SAND93-2513, March 1994, 1-44
- 3) M. Iwasawa, A. Tanikawa, N. Hosono, K. Nitadori, T. Muranushi, J. Makino, "Implementation and performance of FDPS: a framework for developing parallel particlesimulation codes", Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, pp54-1-54-22(2016)
- 4) 小原治樹, 末村潤, 本田真理子, SPH法に関する基礎的研究 日本機械学会論文集(B編)72巻723号(2066-11), 78-82
- 5) 科研費基盤C(20K04245)成果報告書 <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-20K04245/20K04245seika.pdf>