

SPH 法を用いた金属の固体摩擦および焼き付きのシミュレーション

Simulation of Solid Friction and Seizure of Metals using the SPH Method

兵県大・情報（院）*江良 瑞樹 鹿児島高専 兵県大（正）杉村 奈都子 兵県大（正）鷲津 仁志
 Mizuki Era*, Natuko Sugimura**,*, Hitoshi Washizu*
 *University of Hyogo, **National Institute of Technology Kagoshima College

1. はじめに

摺動面の課題として未だに解決されていないものの中に、摩耗と焼き付がある。摩耗および焼き付きを抑えるため、摩擦を軽減させる潤滑油やコーティングの議論は幅広くなされているが、固体摩擦による焼き付きのメカニズムについては明らかとなっていない。近年は、システムの高効率化や高機能化のため、ストライベック曲線 (Fig. 1) の左側の境界潤滑状態を利用する機会が増えており、固体摩擦による焼き付きのメカニズムの解明は非常に重要であると考える。計算科学により、この機構を解明するためには、有限要素法や分子シミュレーションなどを用いることが考えられる。しかし、有限要素法は格子を用いる連続体シミュレーションのため、変化の大きい焼き付きまでのプロセスを扱うことは難しい。また、分子シミュレーションは、原子レベルでの解析が可能だが、スケールが小さいため Fig. 2 で示す固体接触時の真実接触部全体を模擬することは難しく、固体摩擦の発生から塑性流動を起こし、焼き付きに至るプロセスを再現できない²⁾。

そこで我々は、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた原子レベルからのボトムアップのシミュレーション技術を提案している³⁾。SPH 法は系全体を粒子で表し、重み関数を用いて連続体の構成式を解いて系の時間発展を扱う解析手法である。本モデルでは大量の分子を 1 粒子に粗視化する。また、SPH 法は粒子を用いるため大変形を扱え、分子シミュレーションよりも大きいスケールのモデルを解析することができるため、摩擦から焼き付きまでのプロセスを解析できると考えている。本研究では SPH 法を用いて固体摩擦の解析を行い、摺動面の違いによる摩擦熱の比較を行った。

2. 計算手法

本研究ではアルミニウム (Al) を対象とする。SPH 法では i 番目の粒子の運動方程式は近傍粒子 j を用いて式(1)のように表される⁴⁾。

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} \sim \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} - \Pi_{ij} \delta^{\alpha\beta} \right) \frac{\partial}{\partial x_i^\beta} W_{ij} + \frac{f_i^\alpha}{m_i} \quad (1)$$

ここで、 v は速度、 t は時間、 σ は応力、 ρ は密度、 m は質量、 f_i^α は i 粒子に掛かる力、 W_{ij} は重み関数 (スカラー)、 Π_{ij} は人工粘性係数である。この式は、状態変化を考慮しない我々のモデル⁵⁾と同じものとなっている。また、散逸エネルギーの式と摩擦熱導出の式は式(2)、式(3)とする。

$$\frac{dD_i}{dt} \sim \zeta' \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{1}{2} \Pi_{ij} \right) (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \frac{\partial}{\partial x_i^\beta} W_{ij} + \frac{2\kappa}{\rho_i} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{T_i - T_j}{|x_i - x_j|^2} (x_i^\alpha - x_j^\alpha) \frac{\partial}{\partial x_i^\alpha} W_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{dT_i}{dt} \sim \frac{1}{c_v} \frac{dD_i}{dt} \quad (3)$$

ここで ζ' は熱交換率、 κ が熱伝導率、 c_v が熱容量である。SPH 法による物理モデルのソルバー部分を C++ 言語を用いて作成し、理化学研究所牧野グループが開発した Framework for Developing Particle Simulators (FDPS) を用いて大規模並列化を行った。

本研究では Fig. 3 と Fig. 4 のようなモデルを比較する。モデルは id2 と id3 を境に上下二つに分かれており、上部 X 軸の正方向へ移動させ、下部を固定する。粒子数は Fig. 3 のものが $N=463,792$ 、Fig. 4 のものが $N=424,240$ となっており、X 方向の長さを $3\mu\text{m}$ 、Y 方向の幅を $3\mu\text{m}$ 、Z 方向の高さを $1.97\mu\text{m}$ 、粒子サイズを $0.1\mu\text{m}$ とする。粒子数は $N=800,000$ 程度まで増やすことが可能であるが、あまり大きい場合は時間発展を十分にシミュレートできないため、この粒子数としている。系の温度が大きく上昇すると Z 方向の厚みが薄い場合モデルでは計算が破綻することが分かつ

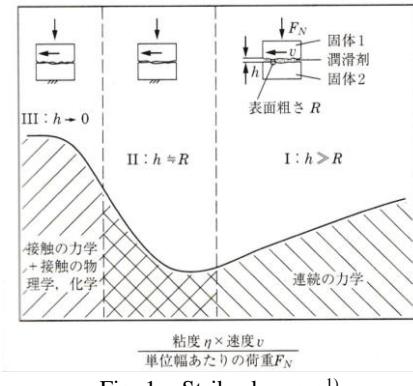


Fig. 1 Stribeck curve¹⁾.

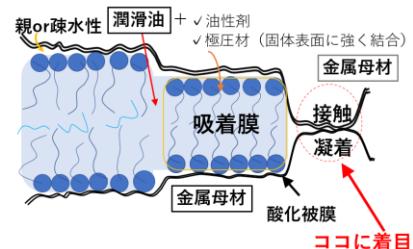


Fig. 2 Sliding surface.

ており、今回はZ方向に大きく厚みを持たせている。また、摺動面の突起はFig. 3 のものが半径 1.0 μm , 高さ 0.5 μm , スロープ部分の傾きを 0.5, 突起間の間隔を 1.5 μm とし, Fig. 4 のものは半径 0.25 μm , 高さ 0.5 μm , スロープ部分の傾きを 2.0, 突起間の間隔を 1.5 μm に設定する。

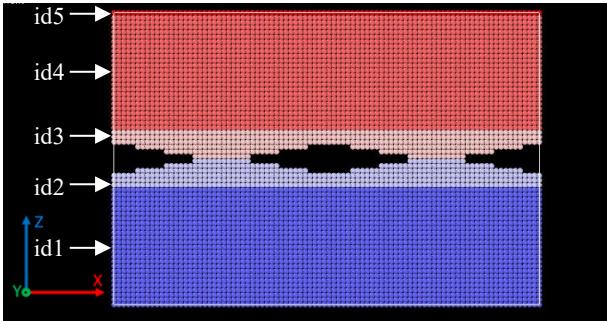


Fig. 3 Analysis Model ($N=463,792$).

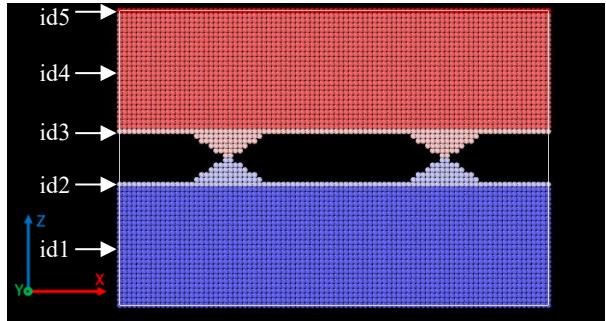


Fig. 4 Analysis Model ($N=424,240$).

3. 結果と考察

粒子のヤング率を 69 MPa, ポアソン比を 0.345, 密度を 2.7 g/cm³ と設定している。また、初期配置は Fig. 3 と Fig. 4 と同じようになっており、上のスライダーを X の正方向に 210 m/s, Z の負方向に 1.0 m/s の速さで動かし解析を行う。

Fig. 5 は Fig. 3, Fig. 6 は Fig. 4 のモデルの摩擦熱の解析結果を示している。摩擦熱として各モデルの最大温度をプロットしている。横軸は摺動時間 (ns), 縦軸は摩擦熱 (K) を示している。Fig. 5 と Fig. 6 より、両モデルともに摺動時間が長くなるにつれ摩擦熱は上昇していく傾向がみられた。ただし、上昇の傾向は Fig. 5 のほうが激しくなっており、摩擦熱は接触面積の大きいほうが同時刻では高くなることが分かった。

これは、2 粒子間の界面相互作用が近傍粒子により決まり、接触面が大きいほど近傍粒子も接触しているものが多くなるため、相互作用も大きくなる。そのため、接触面積が大きいほうの発熱量が大きくなつたと考えられる。また、本研究で用いた最大温度は各突起の中心部となっており、その理由としては接触面の中心部は周りが接触している部分が多いいため、一番発熱量が大きくなつたと考えられる。

4. 今後の展望

本研究では、異なる突起の形状を有する系の解析を行った。今後は摺動時間を長くして摩擦係数や焼き付きの形態を解析する。また、突起の傾きの違いによる摩擦係数の変化をみるために、本研究のように突起の頂点同士を接触させるよりも、突起の側面同士を接触させて摺動させる必要があると考える。

また、今後は以上のものに加え、摺動面の表面粗さを変えたものを複数解析し、表面粗さによる摩擦への影響をより深く調べるとともに、モデルの材料を変えて実施することで幅広い材料の摩擦形態を解析したい。現在は発熱熱伝導計算の制限のため、せん断速度を速く設定しているが、現実的なせん断速度まで小さくし、実際の摩擦形態に近づけたモデルへと改良していきたい。

文献

- 1) 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック，養賢堂，(2001).
- 2) 鷲津：bmt (Bearing&Motion-Tech) No.022, 2020 (1), 38-41 (2020).
- 3) N.Sugimura, Le Van Sang, Y. Mihara, H. Washizu, Proc. 6th Asia International Conference on Tribology (ASIATRIB2018), Hilton-Kuching, Sarawak, Malaysia (2018. 09. 19).
- 4) 矢川・酒井：粒子法:基礎と応用 第1版, 岩波書店 (2016).
- 5) Le Van Sang, A.Yano, A.Isohashi, N.Sugimura, H.Washizu: ASME J.Tribol, 142(9): 091702 (2020).

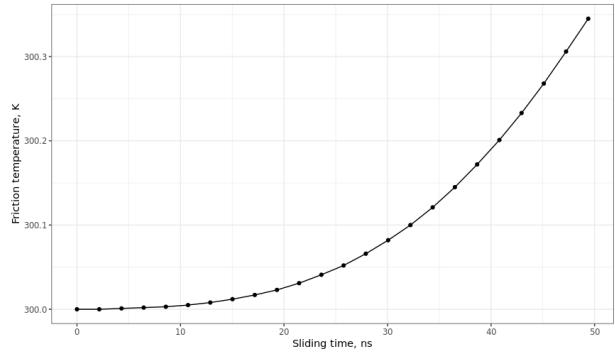


Fig. 5 Evolution of friction temperature via sliding time ($N=463,792$).

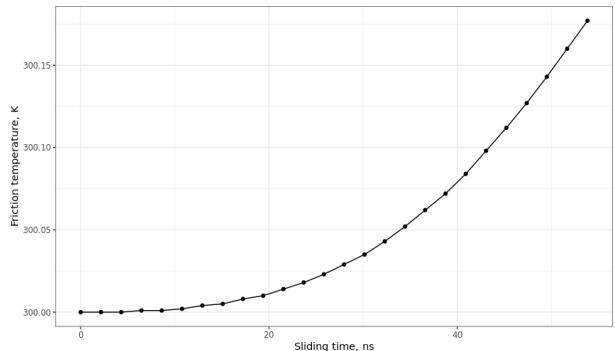


Fig. 6 Evolution of friction temperature via sliding time ($N=424,240$).