

SPH 法を用いた金属の固体摩擦シミュレーションによる摩擦熱の解析

Analysis of friction heat in metal wear simulation using

Smoothed Particle Hydrodynamics method

兵庫県・情報（院）*江良 瑞樹 鹿児島高専・機械（正）杉村 奈都子 兵庫県・情報（正）鷲津 仁志

Mizuki Era*, Natsuko Sugimura**, Hitoshi Washizu*

*University of Hyogo, **NIT, Kagoshima College

1. はじめに

近年、システムの高効率化および高機能化のため、ストライベック曲線の低速度域の境界潤滑状態を利用する機会が増えており、固体摩擦における摩耗や焼き付きなどのメカニズムの解明は重要な課題となっている。摩擦を抑制するための潤滑剤やコーティング剤についての議論は幅広くなされているが、固体摩擦に関しては焼き付きおよび摩耗のプロセスなどのまだ解決できていない問題が残されている。計算科学による摩擦の解明には、有限要素法や分子シミュレーションなどが多く用いられている。我々はそこからのスケールアップを図り、SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法を用いた原子レベルからメソスケールレベルまでのボトムアップシミュレーション手法を提案している¹⁾。

SPH 法はモデル全体を粒子で表し、粒子はカーネルという重み関数を用いて滑らかに接続することで連続体を表現し、この連続体の時間発展計算を Lagrange 的に行う解析手法である。本研究では、数マイクロメートルの金属固体を数十万個の SPH 粒子で表現している。粒子を用いるため大変形を扱うことができ、ミクロンスケールへの粗視化も容易なため、ミクロな接触からマクロな変形を有する摩擦の解析に有効であると考えられる。また、分子動力学シミュレーションに見られるように、計算量の制限から、従来は摺動速度を非常に速く設定していたが、高性能のスーパーコンピュータを使用し、コードを改良することで、現実的なレベルにまで摺動速度を低下させ、より実際の摩擦状況に近い計算条件を実現した。

本研究では表面性状の異なるモデルを作成し、SPH 法を用いて固体摩擦の解析を行った。摺動表面の温度は摩耗および焼き付きの進行に大きくかかわってくるため、表面性状と摺動速度の変化が摩擦熱に与える影響について調査した。

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²⁾。

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

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³⁾。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。

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

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

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・神戸大牧野グループが開発した Framework for Developing Particle Simulators (FDPS)⁴⁾を用いて大規模並列化を行った。シミュレーションは大阪大学サイバーメディアセンター大規模並列計算システム SQUID 上で実施した。

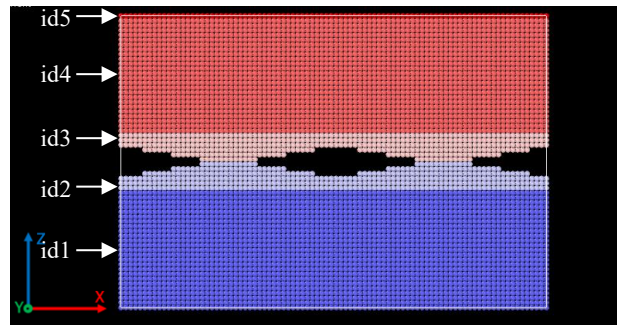


Fig. 1 Analysis Model (N=463,792).

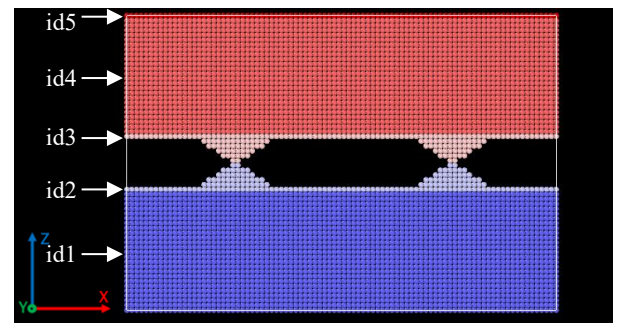


Fig. 2 Analysis Model (N=424,240).

本研究では Fig. 1 と Fig. 2 のような表面性状の異なるモデルを作成し比較する。モデルは id2 と id3 を境に上下二つに分かれており、上部を X 軸の正方向へ移動させ、下部を固定する。粒子数は Fig. 1 のものが $N=463,792$ 、Fig. 2 のものが $N=424,240$ となっており、X 方向の長さを $3\text{ }\mu\text{m}$ 、Y 方向の幅を $3\text{ }\mu\text{m}$ 、Z 方向の高さを $2.06\text{ }\mu\text{m}$ 、粒子サイズを $0.033\text{ }\mu\text{m}$ とする。また、摺動面の突起は Fig. 1 のものが半径 $0.97\text{ }\mu\text{m}$ 、高さ $0.17\text{ }\mu\text{m}$ 、スロープ部分の傾きを 0.17 、突起間隔を $1.5\text{ }\mu\text{m}$ とし、Fig. 2 のものは半径 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 、高さ $0.17\text{ }\mu\text{m}$ 、スロープ部分の傾きを 0.77 、突起間隔を $1.5\text{ }\mu\text{m}$ に設定する。

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/cm^3 と設定している。また、初期配置は Fig. 1 と Fig. 2 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 50 m/s 、 100 m/s 、 120 m/s 、 150 m/s 、 210 m/s と変化させ、Z の負方向に 100 m/s の初速度を与えて解析を行う。

Fig. 3 は Fig. 1、Fig. 4 は Fig. 2 のモデルの各摺動速度における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. 3 と Fig. 4 より、両モデルともに摺動速度が遅くなるにつれて摩擦熱の挙動が穏やかになり、徐々に低下していくことが分かった。また、 210 m/s では突起の大きいもののほうが摩擦熱が高くなる傾向にあったが、 150 m/s 以下になるとどちらも摩擦熱は同じような温度になった。

これは、2 粒子間の速度差が大きいほど衝突時のエネルギーが大きくなり、摩擦熱はこれらのエネルギーから算出されるため、摺動速度が速いほど摩擦熱が高くなったと考えられる。また、突起の小さいもので摺動速度が 150 m/s 以下のものは同じような上昇傾向が見られたが、これは接触している粒子が少ないため周りの粒子による影響を受けにくく、Fig.5 に示すように温度分布が突起の大きいものと比べて変化しないため、計測している最高温度の粒子があまり変わらなかったことが原因であると考えられる。

4. 今後の展望

本研究では、異なる表面性状を有する系に対して摺動速度を変化させて解析を行った。今後は摺動時間を長くして摩擦熱の挙動を調査するとともに、摩擦係数の挙動や焼き付きまでのプロセスも解析したいと考えている。

また、モデルの材料を他の金属材料に変えて実施し、幅広い材料の摩擦形態を解析したいと考えている。

文献

- 1) N.Sugimura, Le Van Sang, Y. Mihara, H. Washizu, Proc. 6th Asia International Conference on Tribology (ASIATrib2018), Hilton-Kuching, Sarawak, Malaysia (2018). 09. 19).
- 2) 矢川元基, 酒井謙: 粒子法: 基礎と応用, 岩波書店 (2016).
- 3) Le Van Sang, A.Yano, A.Isohashi, N.Sugimura, H.Washizu: ASME.J.Tribol, 142(9): 091702 (2020).
- 4) M. Iwasawa, A. Tanikawa, N. Hosono, K. Nitadori, T. Muranushi, J. Makino, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, pp54-1 - 54-22 (2016).

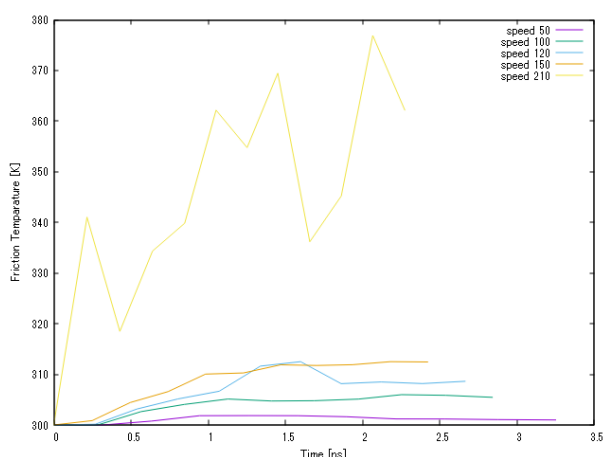


Fig. 3 Evolution of friction temperature via sliding time ($N=463,792$).

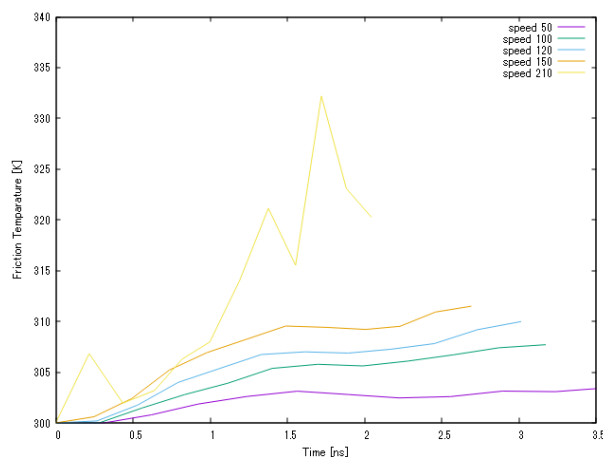
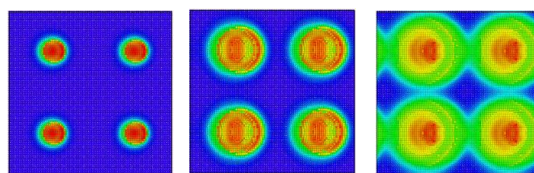


Fig. 4 Evolution of friction temperature via sliding time ($N=424,240$).

$N=463,792$



$N=424,240$

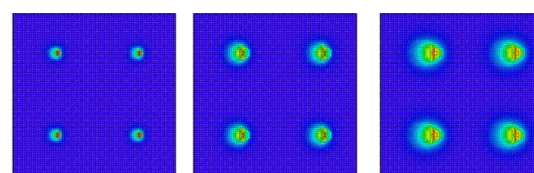


Fig. 5 Distribution of friction heat (150 m/s).