

## SPH 摩擦シミュレーションを用いた高分子材料の焼き付き過程解明

Elucidating the seizure process of polymer material  
using Smoothed Particle Hydrodynamics Friction Simulation

兵庫県立大・情報（院）\*藤田 晃徳 鹿児島高専・機械（学）石原 大嵩

鹿児島高専・機械（正）杉村 奈都子 兵庫県立大・情報（正）鷺津 仁志

Akinori Fujita\*, Hirotaka Ishihara\*\*, Natsuko Sugimura\*\*, Hitoshi Washizu\*

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

### 1. はじめに

近年、自動車のパワートレインや発電機においてシステムの高効率化・高機能化・省燃費化が求められており、ストライベック曲線の左側に示される潤滑状態がシビアな境界潤滑領域では摩擦・摩耗による焼き付きが課題と考えられている。焼き付きはフラッシュ温度と呼ばれる局所的かつ断続的な高温発熱が起点となり、熱が伝搬することで摺動面の雰囲気温度が増大することで促進される。実験による先行研究では、その場観察摩擦実験により摺動とともに接触面積が拡がり、断続的な摩擦熱の発生と塑性流動が確認された<sup>1,2)</sup>。以上のプロセスを可視化することは容易ではないため、我々は摩擦熱の伝播と大変形を扱えるシミュレーション手法として SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いるシミュレーション技術のトライボロジーへの適用を提案してきた<sup>3,4)</sup>。対象とするモデルはメソスケールの連続体モデルである。メソスケールに着目する理由としては、接触面は滑らかな表面ではなく、メソスケールの細かな凹凸が多く存在し、凹凸の先端部分が接触する部分が実際の真実接触面となることを考慮せねばならないからである。

SPH 法は連続体モデルを多数の粒子の集合体としてみなし、個々の粒子の発展方程式を解くことで連続体を表現する手法である。さらに、連続体の時間発展計算を Lagrange 的に行う解析手法であり、ミクロンスケールへの粗視化および大変形を扱いやすいという利点があるため、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。本研究では、数マイクロメートルの固体を数十万個の粒子の集合体として作成している。従来は、計算時間の問題により、摺動速度が高い条件で計算を行っていたが、コードの改良を行うことで実際の摺動速度に近い条件まで低下させた。本研究では、SPH シミュレータの高分子材料への適用を検討し、摺動による焼き付き挙動について金属材料との比較を行うことで議論する。

### 2. 計算手法

以下に本研究で扱う支配方程式について示す。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<sup>3,4,5)</sup>。

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

ここで、 $v$  は速度、 $t$  は時間、 $\sigma$  は応力、 $\rho$  は密度、 $m$  は質量、 $f_i^\alpha$  は  $i$  粒子に掛かる力、 $W_{ij}$  は重み関数（スカラー）、 $\Pi_{ij}$  は人工粘性係数である。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。

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

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

ここで  $\zeta'$  は熱交換率、 $\kappa$  が熱伝導率、 $c_v$  が熱容量である。粒子間の相互作用については Lennard-Jones 型のポテンシャルを用いており、以下に式を示す。

$$f_{ij}^\alpha = \frac{\varphi r_{ij}^\alpha}{r_{ij}^2} \left( \left( \frac{h_{ij}}{|r_{ij}|} \right)^{12} - \left( \frac{h_{ij}}{|r_{ij}|} \right)^6 \right) \quad (4)$$

$f$  は粒子間の相互作用力、 $\varphi$  はポテンシャル、 $r$  は粒子間距離、 $h$  は粒子の平均直径を示している。

Figure 1 に本研究で扱うモデルを示す。中心部に突起をもつ摺動面を構築している。摺動は Fig. 1 のモデルの上部を図に對し右側に動かすことで再現する。また、鉛直方向に初速度を与えており、粒子数は  $N=463,792$ 、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  $2.06 \mu\text{m}$ 、粒子サイズを  $0.033 \mu\text{m}$  とする。また、摺動面の突起は半径

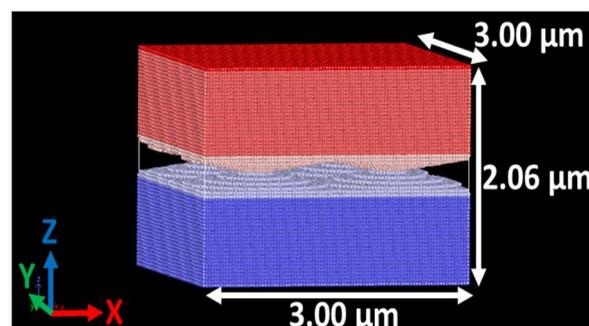


Fig. 1 Dimension of Analysis Model

0.97  $\mu\text{m}$  , 高さ 0.17  $\mu\text{m}$  , スロープ部分の傾きを 0.17 , 突起間の間隔を 1.5  $\mu\text{m}$  とする. 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)<sup>5)</sup>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一大規模並列計算システム SQUID 上で実施した.

### 3. 結果と考察

本研究で扱う材料としては POM (ポリアセタール) としている. Figure 2 に摺動速度による突起頂端部における最高温度の時間変化を示す. Figure 3 に摺動速度による突起全体の平均温度の時間変化を示す. 横軸は摺動時間 (ns), 縦軸は摩擦熱 (K) を示している. 摺動速度は 100 m/s, 50 m/s, 20 m/s とする. 最高温度, 平均温度ともに摺動速度が上昇することで摩擦熱が大きく発生している結果を示している. 最高温度は摺動速度の上昇により, 摺動初期での温度が急激に増大している (Fig. 2). 最高温度の急激な増大は焼き付きの起点となる熱が容易に発生していることを示すと考えられる. 平均温度についても摺動速度の上昇による温度の増大がみられているが, 最高温度の増大と比較して緩やかな変化である (Fig. 3). 平均温度は摺動面全体の温度上昇を示す指標であり, 最高温度ほど大きな増大がみられないことから, POM においては焼き付きの起点となる熱が発生した後の熱の拡散は小さいと考えられる.

Figure 4 は摺動速度が 50 m/s のときの POM の摺動面における熱の拡散についてのスナップショットを示す. 発熱は突起の中央に近い部分より起こっており, 摺動により周辺部に熱が拡散していることが判る. しかしながら, 拡散の大きく発生しておらず, 突起の中心部で発生した熱がこもるような結果となっている. これらの結果は POM の比熱, 热伝導度などの物性値が大きく寄与していると考えられる. Figure 5 には摺動速度が 50 m/s のときの Al (アルミニウム) 単体の熱の拡散についてのスナップショットを示す. POM の摺動面と比較し, 局所的な発熱はみられていないが, 突起中心で発生した摩擦熱が, 広い範囲に拡散している結果である. 異常の結果から, 高分子材料と金属材料では摩擦熱の発生に大きな違いがあることが考えられ, 今後解析を行う予定である.

### 4. 今後の展望

本研究では, 高分子材料モデルの摺動摩による擦熱挙動を金属材料と比較しつつ解析した. また, 金属材料と同様に高分子材料もフラッシュ温度の発生および熱輸送について議論可能であることを示した. 今後は, 様々な材料での検証を行い, 実験結果との比較に加え, 表面粗さなど現実に近いシミュレーション条件での解析を行いたい.

### 文献

- 1) Y. Matsuzaki, K. Yagi, J. Sugimura: Wear, 386-387 (2017). 165.
- 2) Y. Matsuzaki, K. Yagi, J. Sugimura: Wear, 142 (2018). 66.
- 3) N. Sugimura, Le Van Sang, Y. Mihara, H. Washizu: "Mesoscale Smoothed Particle Hydrodynamics simulation of seizure and flash temperature for dry friction between elastoplastic solids with asperities in a newly developed model", J. Comput. Sci., <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102325>.
- 4) Le Van Sang, A. Yano, A. Isohashi, N. Sugimura, H. Washizu: ASME J. Tribol, 142(9), 091702 (2020).
- 5) N. Sugimura, Le Van Sang, Y. Mihara, H. Washizu, Proc. 6th Asia International Conference on Tribology (ASIATRIB2018), Hilton-Kuching, Sarawak, Malaysia (2018).
- 6) 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).

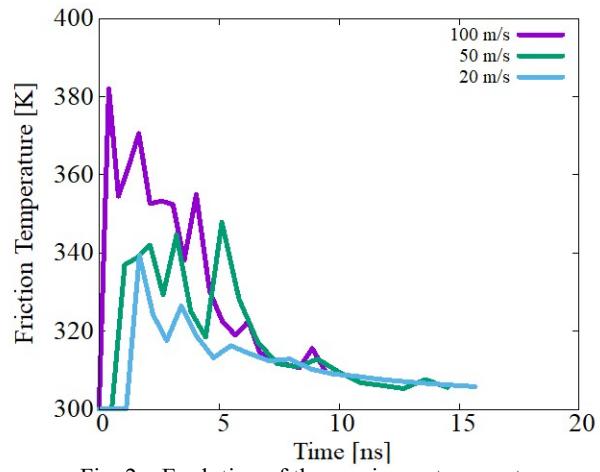


Fig. 2 Evolution of the maximum temperature

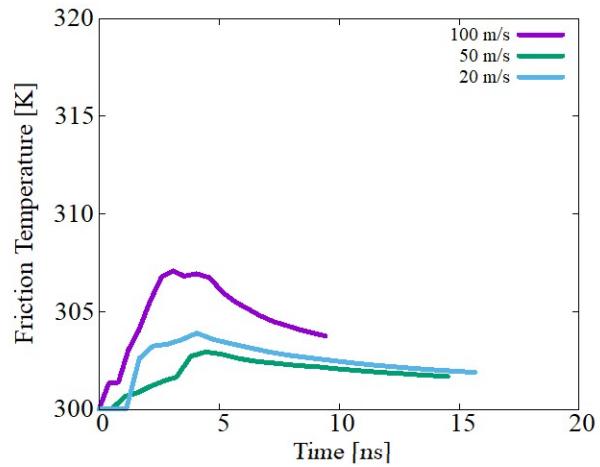
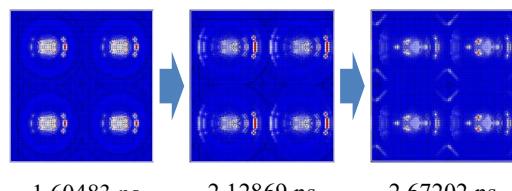
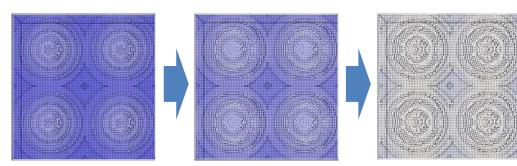


Fig. 3 Evolution of the average temperature



1.60483 ns      2.12869 ns      2.67202 ns

Fig. 4 Distribution of friction heat  
in a single piece of POM (50 m/s)



1.24501 ns      1.55896 ns      1.87041 ns

Fig. 5 Distribution of frictional heat  
in a single piece of Al (50 m/s)