

## SPH 法を用いた金属固体における摺動速度による摩擦温度の解析

Analysis of frictional temperature in metal as various sliding velocities using  
Smoothed Particle Hydrodynamics method

兵庫県立大・情報（院）\*藤田 晃徳      兵庫県立大・情報（院）江良 瑞樹      鹿児島高専・機械（正）杉村 奈都子

兵庫県立大・情報（正）鷲津 仁志

Akinori Fujita\*, Mizuki Era\*, 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などにおいて更なる高効率化・高機能化・長寿命化が求められており、潤滑状態がシビアである境界潤滑領域の利用がより高まると考えられる。しかし、固体摩擦による摩耗・焼き付きについては未だ明らかでない課題が多くある。この焼き付きの解明には、一般的な金属材料において固体摩擦により雰囲気温度が上昇し、塑性流動が発生することで焼き付くプロセスを扱うシミュレーション技術が必要である。焼き付きの起点はフラッシュ温度と呼ばれる表面の突起における発熱であり、熱および状態変化が周囲に伝搬することにより異常が発生する。そこで我々は、メソスケールの表面粗さを表現し、かつ発熱・熱輸送や大変形を扱えるシミュレーション手法として SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法のトライボロジーへの応用を提案してきた<sup>1)</sup>。

SPH 法は連続体のモデルを多数の粒子の集合体とみなし、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金属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。さらに、従来はモデル上部と下部で同じ材料が接触する計算を行ってきたが、改良により、異なる材料が接触するモデルとなるように設定した。

本研究では、焼き付きには摺動部の摩擦面温度の影響があるという報告<sup>2)</sup>を踏まえ、摩擦熱に着目した。中心部で突起を持つモデルを作成し、摺動部の摩擦熱の変化について SPH 法により調査した。

### 2. 計算手法

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)</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<sup>4)</sup>。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  $\zeta'$  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。

$$f_{ij}^\alpha = \frac{\varphi r_{ij}^\alpha}{r_{ij}^2} \left( \left( \frac{h_{ij}}{|r_{ij}|} \right)^{12} - \left( \frac{h_{ij}}{|r_{ij}|} \right)^6 \right) \quad (3)$$

$f$  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

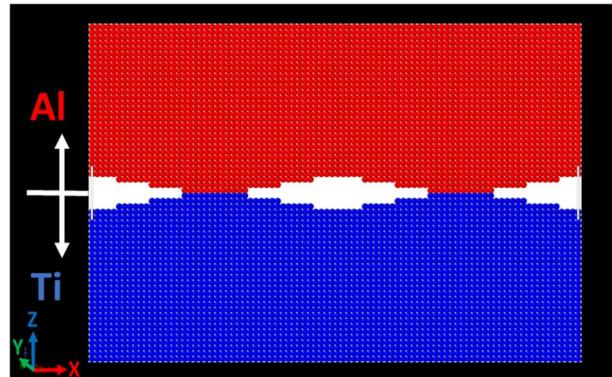


Fig. 1 Analysis Model

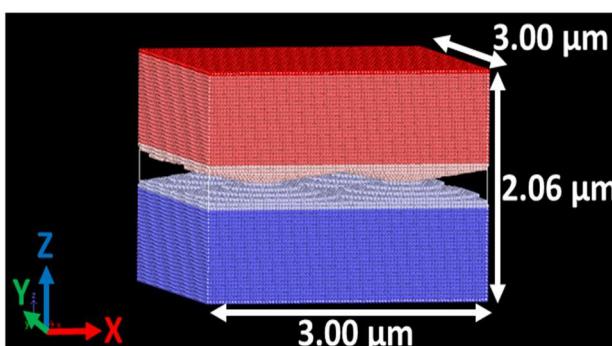


Fig. 2 Dimension of Analysis Model

離,  $h$  は粒子の平均直径を示している。

Figure 1, Fig. 2 に本研究で扱うモデルを示す。中心部に突起を設け、上部をアルミニウム (Al), 下部をチタニウム (Ti)とする。摺動は Fig. 1 のモデルの上部を図に対し右側に動かすこと再現する。また、鉛直方向に初速度を与えている。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  $0.97 \mu\text{m}$ , 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大規模並列計算システム SQUID 上で実施した。

### 3. 結果と考察

Figure 3 に  $50 (\text{m/s})$  における Al, Ti それぞれの突起頂端部における最高温度の時間変化を示す。Figure 4 に  $50 (\text{m/s})$  における Al, Ti それぞれの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。Ti は Al と比較し最高温度が高くなる傾向を示す (Fig. 3)。このことは Ti の粒子が Al と比べ昇温しやすいことを示している。Al と Ti の平均温度はほとんど同じような傾向を示す (Fig. 4)。Al は最高温度が低い結果となったことから、熱が広い範囲で拡散していると考えられ、摺動部全体の温度上昇につながり、平均温度が増大したと考えられる。これらの結果に関しては、Al と Ti の比熱、熱伝導係数が異なっていることが大きく関係していると考えられる。

Al, Ti 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 Fig. 5 に示す。発熱は突起の中央に近い部分より起こっており、周辺部に熱が拡散していることが判る。また、Ti と Al では、熱の拡散の様子に違いがあり、Al は摺動部全体に熱が拡散している一方、Ti の面については、Al と比べ発熱が大きな部分がみられる。Al 面全体に熱が伝わったことが、Al の平均温度が Ti と同じ程度にまで上昇したことにつながっているといえる。Ti と Al の接触部においては、熱伝導が起きていると考えられ、Ti で発生した熱の Al 側に移動した可能性についても解析結果を示す予定である。

### 4. 今後の展望

本研究では、突起をもつ異なる金属材料が接触するモデルを摺動させることで、実際の摺動に近い条件でシミュレーションを行い、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。実際のシステムを想定すると、酸化膜、結晶粒、合金などの条件を考慮する必要がある。今後は、様々な材料での検証を行い、実験結果と比較することに加え、より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) N.Sugimura, Le Van Sang, Y. Mihara, H. Washizu, Proc. 6th Asia International Conference on Tribology (ASIA TRIB2018), Hilton-Kuching, Sarawak, Malaysia (2018).
- 2) Y. Matsuzaki, K. Yagi, J. Sugimura: Wear, 386-387 (2017). 165.
- 3) 矢川元基, 酒井謙: 粒子法:基礎と応用, 岩波書店 (2016).
- 4) Le Van Sang, A.O k Yano, A.Isohashi, N.Sugimura, H.Washizu: ASME.J.Tribol, 142(9), 091702 (2020).
- 5) 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).

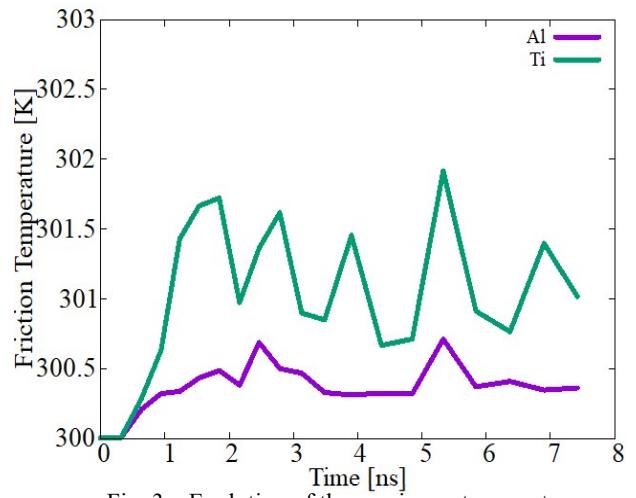


Fig. 3 Evolution of the maximum temperature

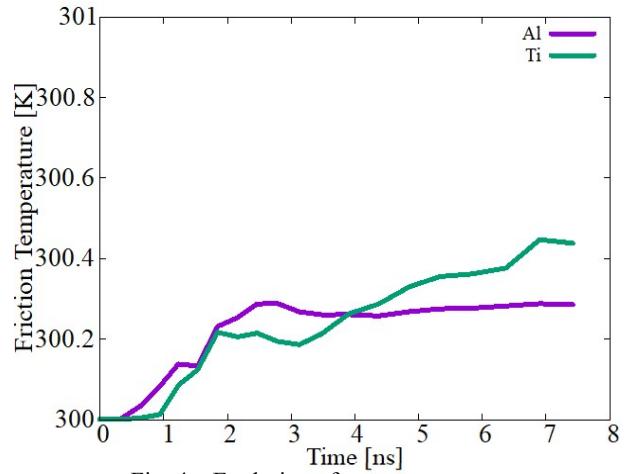


Fig. 4 Evolution of average temperature

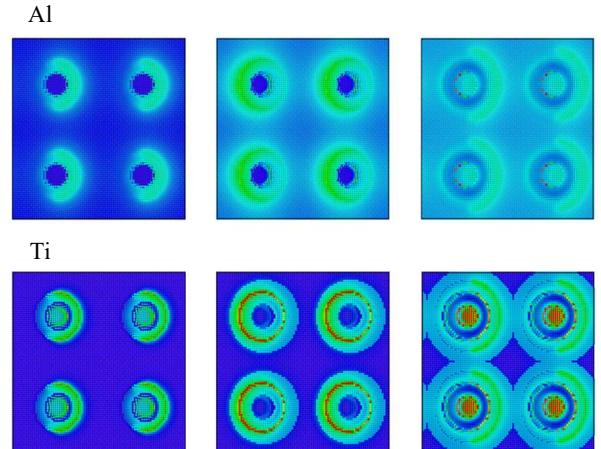


Fig. 5 Distribution of friction heat ( $50 \text{ m/s}$ )