

## SPH 法によるメソスケール金属固体の摺動速度が摩耗に与える影響についての解析

Analysis of the influence of sliding speed of mesoscale metal solids on wear using SPH method

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\*, Hiroataka 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、ストライバ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広がり、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。本研究では具体的な実験との比較のため、固体上部をサファイア、固体下部を鉄 (Fe) と想定する条件下で摺動速度による摩擦挙動の変化について考察を行う。

## 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>。

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

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。

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

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

ここで  $\theta$  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。

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

$f$  は粒子間の相互作用力、 $\phi$  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。

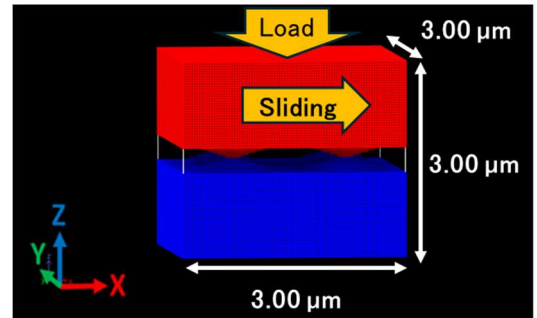


Fig. 1 Dimension of Analysis Model.

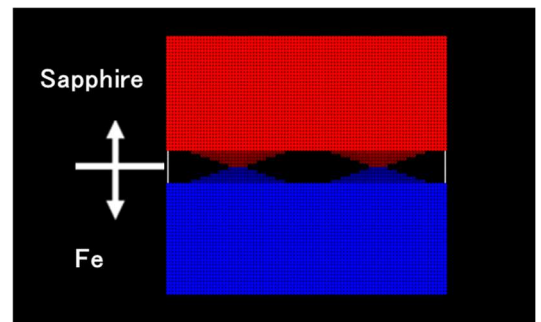


Fig. 2 Analysis Model.

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対し右側に動かすことで再現する．摺動速度は 20 m/s とし，固体最上面に荷重を与えている．粒子数は  $N=571,412$ ，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  $3\text{ }\mu\text{m}$ ，粒子サイズを  $0.033\text{ }\mu\text{m}$  とする．摺動面の突起は半径  $0.52\text{ }\mu\text{m}$ ，高さ  $0.17\text{ }\mu\text{m}$ ，スローブ部分の傾きを 0.33，突起間の間隔を  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  とする．Fig. 2 は本研究で扱うモデルの概要を示す．上部固体はサファイア，下部固体は Fe であり，中心部には真実接触面となる凹凸が存在している．並列化には Framework for Developing Particle Simulators (FDPS)<sup>5)</sup>を用いて大規模並列化を行った．計算は大阪大学 D3 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 4 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．最高温度，平均温度ともに摺動が進行することにより温度が増大する結果を示している．最高温度は 4 ns で大きく温度が増大する点があり，380 K 程度の急激な発熱がみられる (Fig. 3)．この急激な摩擦発熱が起点となることにより，摺動面全体の温度が上昇する．平均温度については最高温度の増大と比較して非常に小さな変化であるが，4 ns 付近で温度が増大しており，発生した摩擦熱が接触面に拡散していることを示す (Fig. 4)．平均温度は摺動面全体の温度上昇を示す指標であり，最高温度ほどの大きな増大がみられないことから，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 5 (a) は摺動速度が 20 m/s のときの Fe 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．また，主な熱の発生は接触面の中央となる部分からの発熱がより大きくなることが判る．Figure 5 (b) には摺動速度が 20 m/s のときの Fe の塑性変形についてのスナップショットを示し，青の領域は弾性領域，赤の領域は塑性領域を示す．摺動の進行に伴い塑性変形が発生していることを示し，塑性変形領域の広がりがみられる．また，主な塑性変形の発生は熱度同様に接触面の中央となる部分から大きい．摩擦熱の発生は実験において接触領域の中央からの発熱が頻繁に起こるとの報告があり<sup>2)</sup>，定性的に一致する結果と考えられる．詳細な考察については今後，報告を行う．

### 4. 今後の展望

本研究では，サファイアと Fe が接触するモデルの摺動による摩擦熱挙動を解析し，摩擦熱の発生と塑性変形の変化について示した．今後は，様々な材料での検証を行い，実験結果との詳細な比較に加え，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: J. Comput. Sci., 82, 102325 (2024).
- 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).

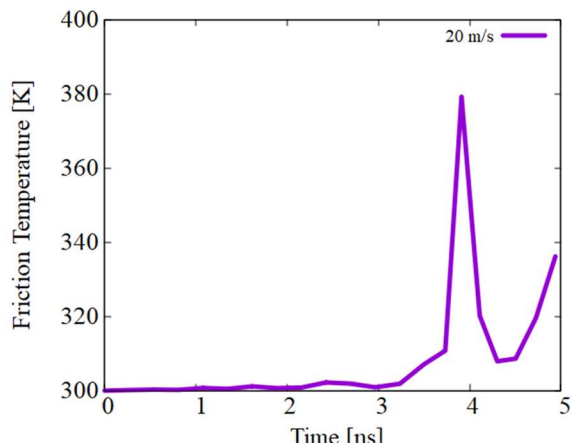


Fig. 3 Evolution of the maximum temperature of Fe.

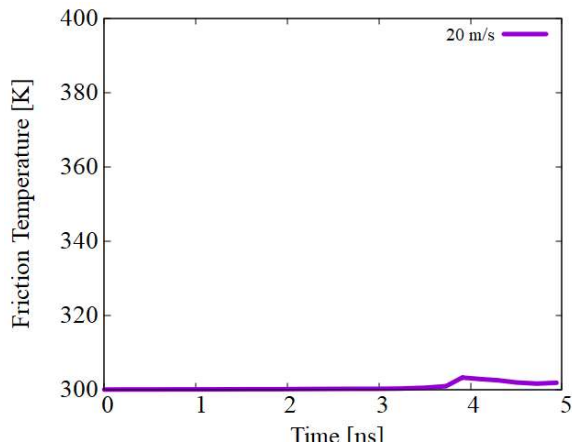


Fig. 4 Evolution of the average temperature of Fe.

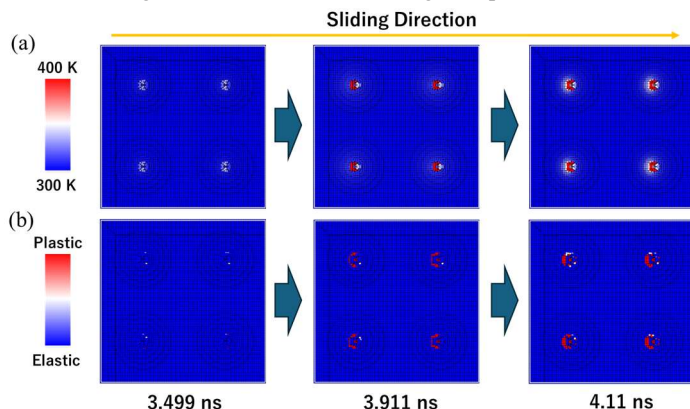


Fig. 5 Distribution of frictional surface of Fe; (a) Frictional heat, (b) Plastic Flow.