

摺動面上のミクロスケールアスペリティにおける 固体摩擦・摩耗に関する SPH シミュレーション

SPH simulation of solid friction and wear at micro-scale asperities on sliding surfaces

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）鷲津 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、境界潤滑領域における摩擦・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。焼き付きは主軸受などの機械部品において重大な破損を引き起こすため、焼き付きの発生について予測することが非常に重要であると考えられる。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大し、断続的な摩擦熱の発生と塑性流動が確認された^{1,2)}。以上のプロセスの可視化は容易でないと考えられるため、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^{3,4)}。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ことに加え、結晶粒径を考慮してもメソスケールが適切と考えられるからである。

SPH 法は連続体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の扱いが容易という利点があり、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。本研究では、メソスケールの固体を数十万個の粒子の集合体とみなす。これまでは Fe 同士、アルミニウム (Al) 同士、チタニウム (Ti) 同士などの同一材料同士の摺動に加え、上部固体を Al、下部固体を Ti とし、異種材料同士の摩擦特性の変化を摺動速度を変化させ解析を行ってきた。これらの解析結果から、各材料の物性値に沿った解析が行えることを検証し、摩擦温度・塑性流動の摺動速度による依存性を確認した。本研究では更なる具体的な実験結果との比較のため、固体上部をサファイア (Sapphire)、固体下部を鉄 (Fe) と想定する条件下で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^{3,4,5)}。

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

ここで、 v は速度、 t は時間、 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。

$$\frac{dD_i}{dt} \sim \frac{2\kappa}{\rho_i} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{T_i - T_j}{|(x_i - x_j)|^2} (x_i^\alpha - x_j^\alpha) \left(\frac{\partial}{\partial x_i^\beta} W_{ij} \right)$$

$$+ \theta \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{1}{2} \Pi_{ij} \right) (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \left(\frac{\partial}{\partial x_i^\beta} W_{ij} \right) + \frac{1}{m_i} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f_j^\alpha v_j^\alpha W_{ij} \quad (2)$$

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

ここで θ は熱交換率、 κ 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。

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

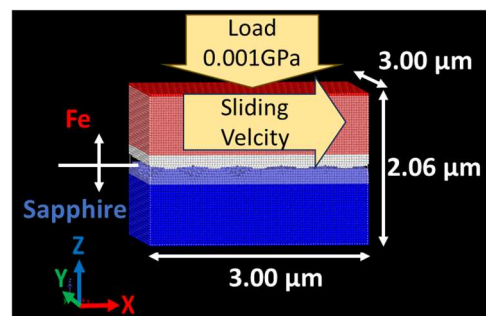


Fig. 1 Dimension of Analysis Model

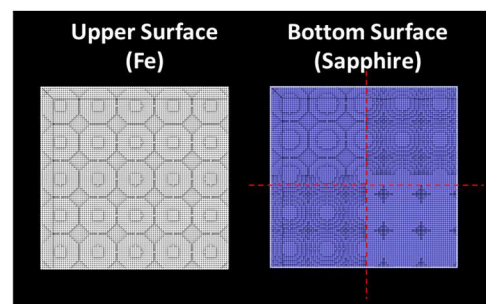


Fig. 2 Surface Condition of Analysis Model

ϕ 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 $N = 482,394$, 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. Figure 2 は扱うモデルの上面と下面を示している. 上面は均一な接触面であるのに対し, 下面は 4 象限で異なる接触面を持つ面とした. 上部固体は純鉄 (Fe), 下部固体はサファイア (Sapphire) 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)⁵⁾を用いた. 計算は名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ「不老」上で実施した.

3. 結果と考察

Figure 3 に各摺動速度による上部固体突起先端部 (Fe) のフラッシュ温度の時間変化を示す. Figure 4 には同じく各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. フラッシュ温度 (Fig. 3) と平均温度 (Fig. 4) は摺動により増大する結果が得られているが, 摺動速度の高い 50 m/s において激しい変化がみられ, フラッシュ温度により発生する熱が突起周辺に拡散することで平均温度を増大させていると考えられる. しかしながら, 50 m/s においてフラッシュ温度が 325 K に到達しているのに対して, 平均温度は 301 K 程度であることから, Fe は大きな摩擦熱を発生させるが, 熱拡散は大きくないと考えられる. 20 m/s ではフラッシュ温度が大きくないため, 平均温度も小さい値を示している.

Figure 5 (a) はそれぞれの摺動速度における摩擦係数を示している. 摩擦係数は大きく変化する結果となっているが, その中でも摩擦係数が低くなっている領域では 50 m/s でより高い摩擦係数を示し, 20 m/s がより低い摩擦係数を示している. このことから, 摩擦係数についての速度依存性が示されていると考えられる. 平均の摩擦係数は 50 m/s で 6.08, 20 m/s で 2.41 となっている. また, 20 m/s においては 3 ns 以降で摩擦係数が 1.0 以下である領域がみられ, 摺動開始直後では非常に高い摩擦係数が徐々に低下することが示されていると考えられる. 算出した摩擦係数は非常に高くなっていたため, 詳細な考察についてはより長い時間でのシミュレーションにより検証を行い, 今後, 報告を行う予定である.

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擦熱挙動を解析し, 摩擦熱の発生と摩擦係数の変化について示し, それぞれについて摺動速度による依存性を確認をした. 今後は, 接触面積の違いの検証に加え, 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う.

文献

- 1) Y. Matsuzaki, K. Yagi, J. Sugimura: Wear, 386-387 (2017). 165-172.
- 2) Y. Matsuzaki, K. Yagi, J. Sugimura: Wear, 66, 4 (2018). 142.
- 3) N. Sugimura, Le Van Sang, Y. Mihara, H. Washizu: J. Comput. Sci., 82 (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 (2016). 54-1 - 54-22.

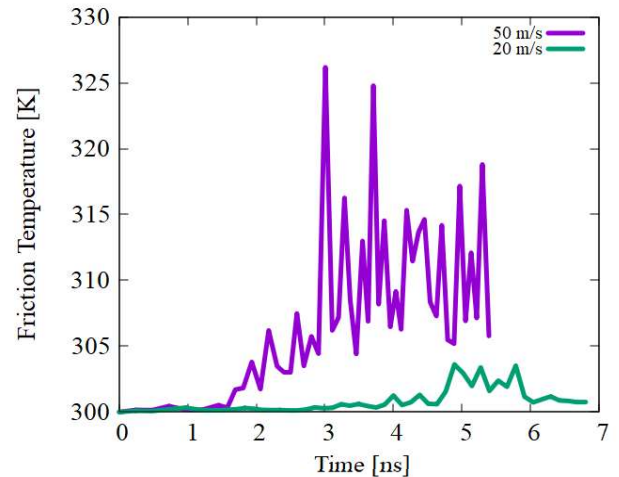


Fig. 3 Evolution of the Flash temperature of Fe

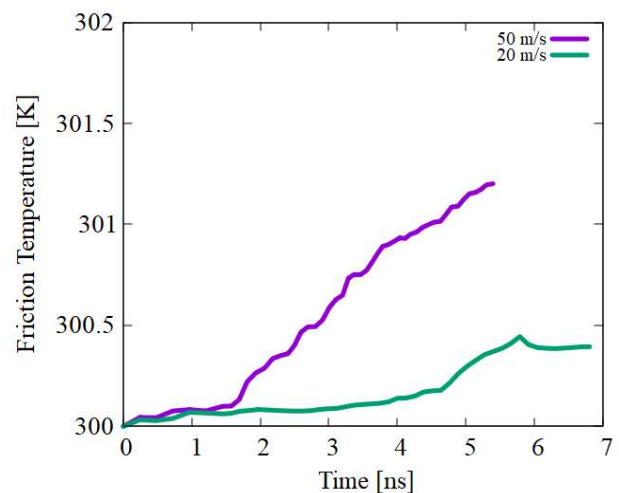


Fig. 4 Evolution of the average temperature of Fe

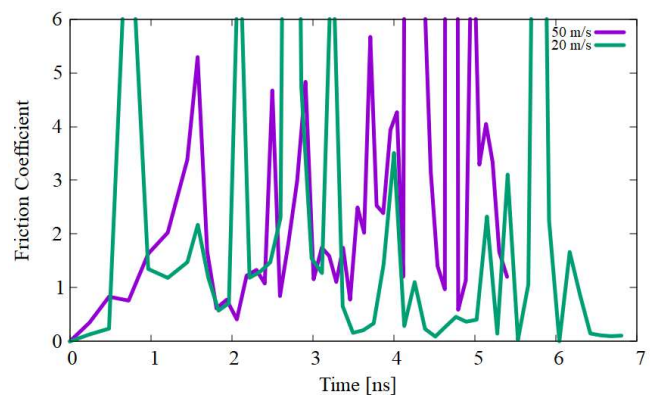


Fig. 5 Frictional Coefficient via various Sliding Velocity