

## SPH 法による金属の摺動および摩擦熱の解析

Sliding Friction and Friction Heat of Coarse-Grained Metal by SPH

兵県大・情報（院）\*新田 啓人 兵県大（非）Le Van Sang 兵県大（正）杉村 奈都子

兵県大（正）鷺津 仁志

Keito Nitta\*, L. V. Sang\*, Natsuko Sugimura\*, Hitoshi Washizu\*

\* University of Hyogo

### 1. はじめに

2つの物体が摺動するとき、その接触面では摩擦によって摩擦熱が生じる。一般に摩擦は接触面の滑らかさ、乾式・潤滑式、潤滑剤、摺動速度、温度、雰囲気などの様々な影響が複雑に依存しているため、摩擦係数を測定する上ではこういった条件を明確にする必要がある。その中で摩擦熱が酸化、摩耗、摩擦係数に大きくかかわることは広く知られており、摩擦を研究する上で摩擦熱を考慮することは非常に重要である。しかし、摺動中の物体の表面温度を直接測定することは難しく、さらに熱伝導によって物体全体の温度を上昇させるためその状態を実験的に把握することは非常に困難である<sup>1)</sup>。

そこで我々は SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法による粒子シミュレーションを用いたアプローチによる摩擦係数と摩擦熱の測定を試みた。SPH 法は連続体を粒子の集合とみなし、粒子の運動をラングランジュ的に計算することで連続体の運動を表す粒子法の1つである。SPH 法は流体の大変形問題の解析などに適用されてきたが、現在では固体問題、熱伝導問題などへの応用が広がり様々な分野で利用されている<sup>2)</sup>。本研究では先行研究<sup>3,4)</sup>の粗視化モデルを改良し、様々な種類のマイクロスケールの金属の摺動をシミュレーションした。ここでは、作成したモデルを摺動させ、発生する摩擦と摩擦熱について解析した結果を報告する。

### 2. シミュレーション手法

SPH 法にてシミュレーションを行うにあたり 21,800 粒子からなる粗視化モデルを作成する。基板は  $75.240 \times 16.245 \times 7.695 (\mu\text{m}^3)$ 、スライダーは  $16.425 \times 16.245 \times 7.695 (\mu\text{m}^3)$  のマイクロスケールのモデルとなっている。また、熱伝導の様子を温度変化に特徴のある領域ごとに分けて考えるために基板とスライダーは Fig. 1 のように 6 つのレイヤーにラベリングする。

SPH 法の基礎方程式は  $i$  番目の粒子の密度、速度、内部エネルギーが式(1)～(3)のような離散化された一階微分方程式で表され、それぞれ連続の式、運動量、エネルギーの方程式となっている。式(4)は  $i$  番目の粒子の温度変化を表す。

$F_{i,ext}^\alpha$  は粒子に作用する荷重、散逸力、摩擦力の和であり、摩擦力は Prandtl-Tomlinson モデルによって計算されるバネ力と、基板とスライダーで接触する粒子の界面相互作用から計算されるバネ力の和で表現する。

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \vec{\nabla}_i W(\vec{r}_{ij}, h_{ij}) \quad (1)$$

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i^\beta W(\vec{r}_{ij}, h_{ij}) + \frac{F_{i,ext}^\alpha}{m_i} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \nabla_i^\beta W(\vec{r}_{ij}, h_{ij}) \\ &\quad + \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \frac{4\kappa_i \kappa_j}{\kappa_i + \kappa_j} (T_i - T_j) \frac{\vec{r}_{ij} \vec{\nabla}_i W(\vec{r}_{ij}, h_{ij})}{r_{ij}^2 + \epsilon h_{ij}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{u_i + u_{fri,i}}{c_i^P} \quad (4)$$

$m$  質量

$v$  速度

$\rho$  密度

$\alpha, \beta \equiv x, y, z$

$\vec{r}_{ij}$  粒子  $i, j$  の相対位置ベクトル

$\kappa$  熱伝導率

$W$  カーネル関数

$T$  温度

$h_{ij}$  平滑化距離

$\sigma^{\alpha\beta}$  応力

$\Pi_{ij}$  人工粘性

$\epsilon$  ひずみ

$T_i$  温度

$u_{fri,i}$  摩擦エネルギー

$c_i^P$  热容量

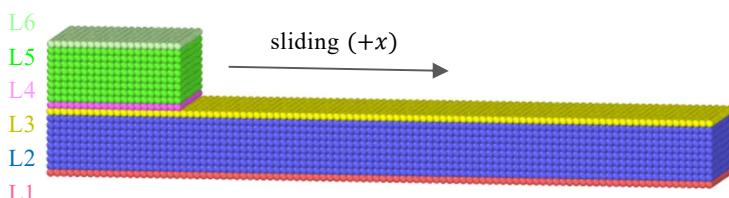


Fig. 1 The coarse-grained microscale copper system of 21,800 particles.

シミュレーションには粒子系について、大規模並列化を行う並列シミュレーションコードの開発支援フレームワー

クとして理化学研究所牧野グループによって作成された FDPS(Framework for Developing Particle Simulator)を用いた。

### 3. 結果

基板とスライダー間の初期距離は SPH 粒子の格子定数として、固定された基板の上を  $x$  軸正の方向にスライダーを摺動させる。初期温度はスライダーが 300K、基板が 302K とし、摺動速度は 50m/s とする。ただし L1 は 300K で固定している。

Fig. 2 はこのときの温度分布を示している。

接触部分で発熱が起こりそれが伝導している様子が分かる。これをレイヤーごとにプロットしたのが Fig. 3 である。温度は各レイヤーの全粒子で平均した。スライダーの接触部分である L4 の温度は摺動開始直後に急激に温度が上昇しすぐに安定する。これはスライダーの運動エネルギーを急激に上昇させたため、摩擦力も急激に増加したものと考えられる。L5, 6 も摩擦熱の伝導によって上昇したのちすぐに安定する。また L2 も同様の理由から温度が上昇し、接触部分近傍での温度は L5, L6 と近い値となる。プロットされていない 110ns 以降は変化が見られなかったので省略した。

Fig. 4 は摩擦係数の時間変化である。摩擦係数は周期的に振動しておりその周期はこのモデルにおける粒子間距離に相当する。本モデルは鉄を想定して各パラメータを与えているが、シミュレーションの結果、摩擦係数はおよそ 0.3 となっており、実験値である 0.15~0.40<sup>4)</sup>と概ね一致している。

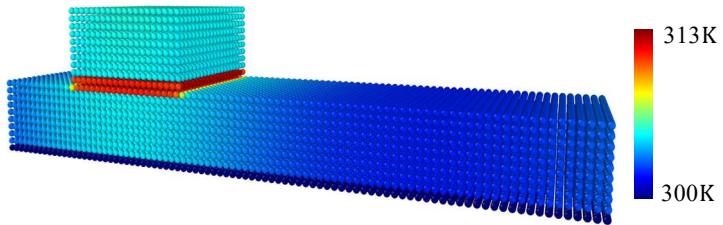


Fig. 2 Friction heat and heat conduction in CG-model.

Temperature of L1 is fixed at 300K.

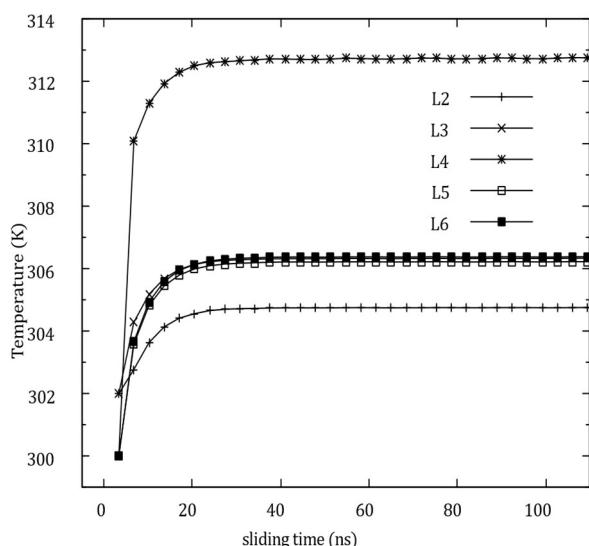


Fig. 3 Evolution of temperature of the layers versus sliding time.

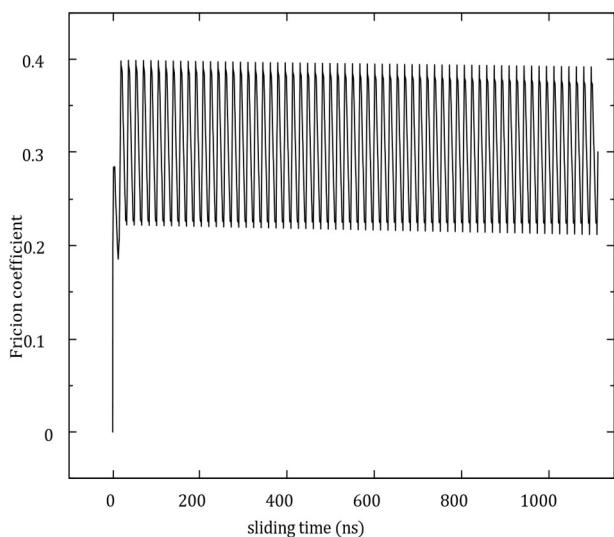


Fig. 4 Evolution of friction coefficient versus sliding time.

### 4. 今後の展望

本研究は SPH 法を用いたマイクロスケール粗視化モデルの金属の摺動により摩擦と摩擦熱を解析した。本モデルでは鉄を想定していたが今後はより熱伝導率の高い銅など対象に物性値を変えた比較と、式(3)では考慮されていない摩擦による散逸エネルギー項についての検討を行いたい。

### 文献

- 1) Kalin, M: Influence of Flash Temperatures on the Tribological Behaviour in Low-Speed Sliding, A Review, Mater. Sci. Eng. A, 374(1–2), pp. 390–397 (2004).
- 2) Genki Yagawa, Yuzuru Sakai: 粒子法 第一版, 岩波書店 September (2016).
- 3) L.V.Sang, A.Yano, S.Fujii, N.Sugimura, H.Washizu: Coarse-Grained Model for Spring Friction Study of Micron-Scale Iron by Smoothed Particle Hydrodynamics, EPL, 122(2), pp. 26004–26008 (2018).
- 4) L.V.Sang, A.Yano, A.Isohashi, N.Sugimura, H.Washizu: Friction and Friction Heat of Micronscale Iron, J. Tribol., 142(9), 091702 (2020).
- 5) Kuznetsov, V. D: Metal transfer and build-up in friction and cutting. (1966).