

異なる弾性率をもつ 2 成分材料の摩擦挙動に対する数値解析手法の検討

Numerical Analysis Methods for Frictional Behavior
in Bi-Component Materials with Dissimilar Elastic Moduli

RIST (正) *牧野 真人 GSI クレオス (非) 柳澤 隆 RIST (正) 城野 亮太

Masato Makino*, Takashi Yanagisawa**, Ryota Jono*

*RIST, **GSI Creos

1. はじめに

トライボロジーは、機械、材料および化学工学などのさまざまな分野で重要となっている。経済的な面と環境的な面の両面から、効率的なエネルギー利用と機械寿命の延長が必要となっている。摩擦と摩耗は、材料の性能と機器の動作寿命に大きな影響を与えるが、複合材料やコーティングは、性能、寿命を改良することができる。複合材料の例として、カーボンナノチューブやグラフェンなどのカーボンナノ材料がある。これらカーボンナノ材料の出現により、低摩擦材料としての新たな可能性がもたらされ、トライボロジーの分野が進歩する可能性がある。複合材料は、靱性や摺動性能を向上させるためによく使用されるが、母材に導入する添加剤による摩擦の変化は不明である。そこで、我々は、2つの表面成分を持つ材料の摩擦係数がどのように振舞うのか、シミュレーションを用い検討している。シミュレーションは、平滑化粒子流体力学法(Smoothed Particle Hydrodynamics method, SPH)、有限要素法(Finite Element Method, FEM)を用いて開発している。これらシミュレーションでは、2つの成分の混合による摩擦係数を扱うことができるように開発している。SPH では、Total Lagrangian SPH(TLSPH)という方法で、動的な計算を行うことで、摩擦係数を求めた。FEM では、上部から力を加えた場合の基板での力の分布を調べることで摩擦を計算する静的な方法を用いた。また、2つの成分の混合による摩擦係数の変化を評価の評価式を検討した。この研究より、硬くて滑りやすい材料を添加すると摩擦係数を低減できることを予測できた。

2. 対象とする系

Fig 1 は、バルクである成分 1(図では描画していない)に、円筒の成分 2 が分散している系を模倣的に作成してある。成分 1, 2 は、それぞれヤング率 E_1, E_2 、ポアソン比 ν_1, ν_2 、摩擦係数 μ_1, μ_2 を持つ。下面は剛体の基板で、上面から力を与えた場合のみかけの摩擦係数 μ を評価することが目的である。円柱の数、あるいは、円筒の高さを変えて、接触面積比 p とみかけの摩擦係数 μ の関係を考える。ただし本稿では円筒の高さはバルクの高さと等しくしてある。

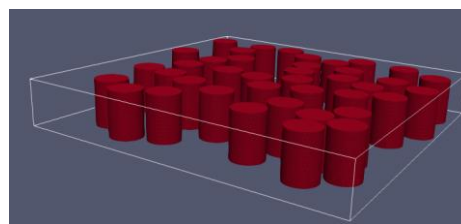


Fig. 1 Simulation systems to calculate the apparent friction coefficient. Component 2

3. シミュレーション方法

3.1 SPH

SPH では動的な計算から摩擦係数を見積もる。SPH は流体力学の問題の解法として開発され、弾性体の解法としても知られている。SPH の中でも Total Lagrangian SPH(TLSPH)と呼ばれる方法を本研究では用い、独自に実装した。物性 (ヤング率 E_1, E_2 、ポアソン比 ν_1, ν_2 、摩擦係数 μ_1, μ_2) の異なる 2 種類の材料を Fig.2(a)のように配置して、物体の上面に力を与えるとともに、水平方向を固定し、基板を一定の速度で移動させることで、垂直に働く力 F_\perp と水平に働く力 F_\parallel からみかけの摩擦係数 $\mu = F_\parallel / F_\perp$ を計算する (Fig. 2(b))。

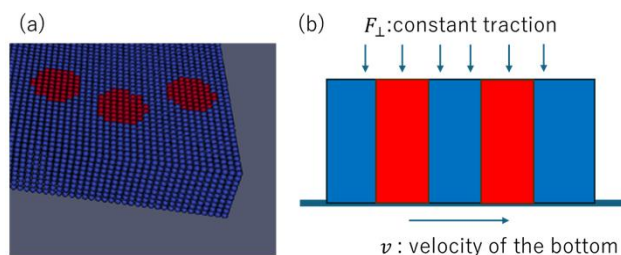


Fig. 2 (a)TLSPH particles, (b)Simulation overview.

3.2 FEM

FEMでは静的な計算から摩擦係数を見積もる.1次要素で計算を行う弾性体の有限要素法プログラムを独自に実装した.SPHと同様に異なる材料を配置する.物体の上面に力 F_{\perp} になるように一様に与えたとして,下面にトラクション $f(\mathbf{r})$ が分布すると,見かけの摩擦係数は $\mu = \frac{\iint_S \mu(\mathbf{r})f(\mathbf{r})dS}{F_{\perp}}$ と見積もられる.積分は,下面に渡って積分を行う(fig. 3).

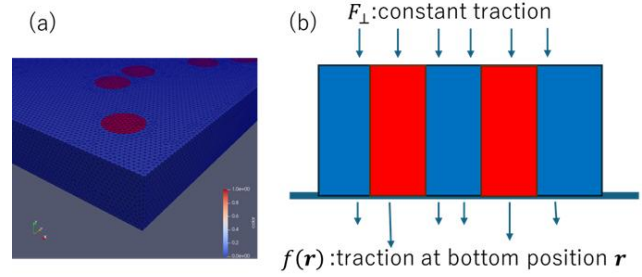


Fig. 3 (a)FEM mesh, (b)Simulation overview.

4. 結果

ここでは,成分1をバルクにして成分2を円柱のドメインとしてランダムに配置した例を述べる.底面積 S で半径 a の円柱 N 個の場合の接触面積比を $p = N\pi a^2/S$ とする. p の関数として見かけの摩擦係数 μ を見積もる. $E_1 = 0.1, \mu_1 = 0.2, \mu_2 = 0.3$ としてシミュレーションを行った.Fig. 4は, p の関数として,見かけの摩擦係数をヤング率 E_2 を変えてTLSPH (Fig. 4 (a)) とFEM (Fig. 4(b)) で調べた.硬い材料(E_2 が大きい材料)を添加すると見かけの摩擦係数が低下することが分かる.図の曲線は

$$\mu = \frac{\mu_1(1-p)E_1^{*r} + \mu_2 p E_2^{*r}}{(1-p)E_1^{*r} + p E_2^{*r}} \quad (1)$$

として, r をパラメータとしてフィッティングした.ただし $E^* = E/(1-\nu^2)$ である.また, $\mu_1 > \mu_2$ および $E_1^{*r} < E_2^{*r}$ のとき,すなわち,硬くて滑りやすいものを添加した場合,式(1)は $\frac{\partial^2 \mu}{\partial p^2} < 0$ となり,下に凸となり見かけの摩擦係数は低下しやすいことを示している.Fig. 4はこの傾向を示している. Fig. 5はポアソン比の依存性を見た.ポアソン比の見かけの摩擦係数の依存性は低いようである.さらに,円柱の高さによる影響は当日に発表予定である.

5. おわりに

硬くて,滑りやすい添加物を入れた材料は,バルクの影響を受けて,みかけの摩擦係数が低下することを TLSPH, FEMで示した.今後,バルクに分散している材料に応じて,どのように摩擦係数が変化するか調べたい.

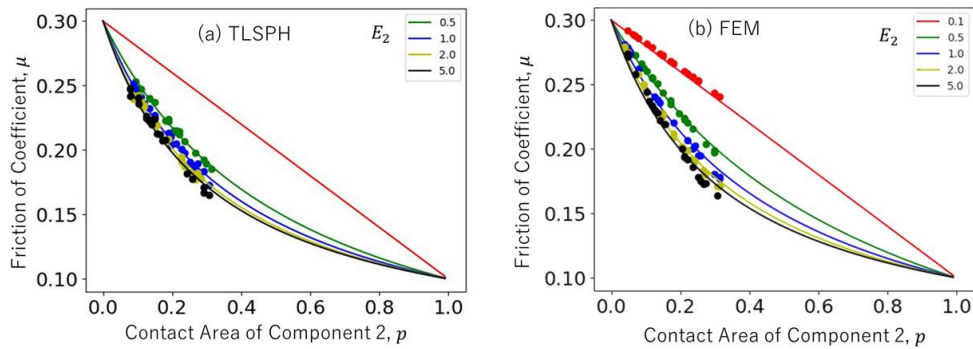


Fig. 4 μ as a function of p in the various E_2 . Results of TLSPH(a) and FEM(b).

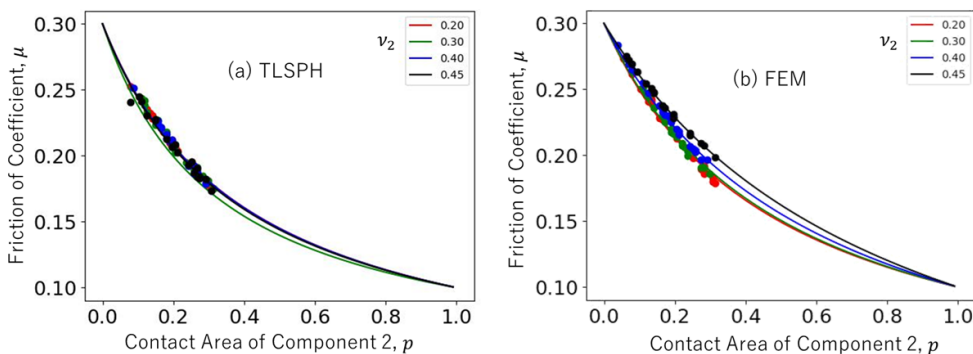


Fig. 5 μ as a function of p in the various ν_2 . Results of TLSPH(a) and FEM(b).