

## 2成分からなる物質表面のみかけの摩擦係数

### Apparent friction coefficient of a two-component material surface

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

摩擦, 摩耗, 潤滑に関する科学技術であるトライボロジーは, 機械工学, 材料科学, 化学工学など, さまざまな分野で重要な役割を果たしている. 経済と環境の両方の観点から, 効率的なエネルギー利用と機械寿命の延長がますます重要になっており, 摩擦と摩耗は, エンジニアリング材料の性能と機器の動作寿命に大きな影響を与える. 複合材料やコーティングは, トライボロジー特性の向上のために, 工学の分野で使用されている. ポリマー複合コーティングは, 機械部品の摩擦と摩耗を低減するために広く使用されている. また, 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. このように, 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, 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の予測式を開発し, シミュレーションを行っている. 予測式は接触面での法線力を評価することで求めている. また, シミュレーションは, Smoothed Particle Hydrodynamics 法(SPH 法)を用いて開発している. シミュレーションでは基板上を一定速度で滑る剛体の見かけの摩擦係数を計算している. このモデルを使用して, 2つの成分の混合による摩擦係数の変化を評価するために, 表面に2成分が現れる物資のみかけの摩擦の低減を調べた. この研究より, 少量の添加剤を加えることで複合材料の摩擦を制御でき, 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. 予測式

Figure 1 のように, 赤色の a 成分, 青色の b 成分からなるモデルを考える. a 成分と b 成分がそれぞれ基板上に面積比にして  $p_a, p_b$  で接触しているとす. ただし  $p_a + p_b = 1$  である. それぞれのヤング率, 基板との摩擦係数を  $E_a, E_b, \mu_a, \mu_b$  とすると弾性体全体が受ける垂直方向の力は, 弾性体が垂直変位  $x$  を受けるとすると  $F^n = p_a E_a x + p_b E_b x$  となり, 接線方向の摩擦力は,  $F^t = p_a \mu_a E_a x + p_b \mu_b E_b x$  と見積もることができる. これらより, 本研究では, 2成分からなる表面のみかけの摩擦係数を

$$\mu = \frac{F^t}{F^n} = \frac{p_a \mu_a E_a + p_b \mu_b E_b}{p_a E_a + p_b E_b} \quad (1)$$

と見積もる. これを予測式 1 とする. また, 比較のために, 面積比を重みとして 2 成分の摩擦係数が平均される

$$\mu = p_a \mu_a + p_b \mu_b \quad (2)$$

を予測式 2 とする.

#### 3. シミュレーション方法

弾性体の摩擦シミュレーションは, SPH 法を用いて計算を行う. SPH 法は弾性体を多数の粒子の集まりとしてモデル化し, それぞれの粒子が物理量 (位置, 速度, 密度, 応力) を持つ. これらの粒子は滑らかなカーネル関数を用いて相互作用し, 物理的な法則 (運動方程式や応力-歪み関係など) を満たすように運動する. シミュレーションの実装は文献<sup>1)</sup>を参考にした. 以下の結果では, Fig. 2 のように周りを成分 a として, 中心部分を成分 b とする. おのおのの成分 a, b には, ずり弾性率  $G_a, G_b$ , 体積弾性率  $K_a, K_b$ , 基板との摩擦係数  $\mu_a, \mu_b$  を与える. 本稿では, Table 1 に示した Type1 から 4 の 4 種類を調べた. 音速  $c = \sqrt{K_a/\rho}$ , 密度  $\rho$ , 粒子の直径 (初期の粒子間隔)  $\Delta p$  を単位とするパラメータで無次元化した値で比較した. 本研究では  $G/K$  の値は物質の硬さを表すと考える. 基板との相互作用は, 粒子が基板に入り込まないように弾性斥力を与え, その力と摩擦係数の積で摩擦力を与える. 速度  $v/c = 0.001$  を弾性体上部の粒子に与え, 弾性体に重力  $g\Delta p^2/c = 0.001$  を与え, 垂直な力  $F^n$  とし移動方向に平行な力を足し合わせて接線方向の力  $F^t$  とした. これらより, シミュレーションによる 2 成分の物質を持つ表面のみかけの摩擦係数  $\mu = F^t/F^n$  を計算する. ここで,  $G, K, E$  およびポアソン比  $\nu$  の間には,  $G = E/\{2(1+\nu)\}$ ,  $K = E/\{3(1-$

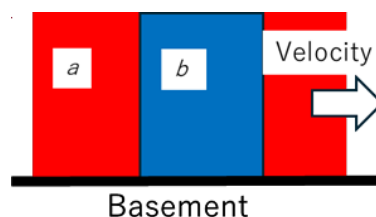


Fig. 1 Two-component elastic body which consists of a red component a and a blue component b.

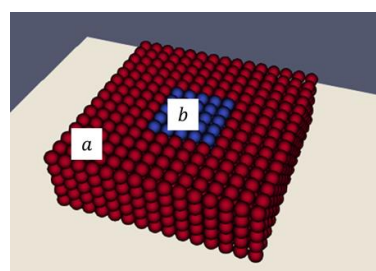


Fig. 2 SPH model of two-component elastic body

2v)}の関係がある。

#### 4. 結果

Figure 3 に、Table 1 にある Type1 から 4 の時間 $\tau$ に対するみかけの摩擦係数 $\mu$ を示した。青色の線が SPH 法によるシミュレーション結果で、橙色が式(1)による値、緑色の破線が式(2)による値である。シミュレーションの青色は、高さ方向が定常になると一定値をとる。おおよそ、摩擦係数のシミュレーションの定常値は、式(1)の値より若干高い値をとっており、式(1)の利用は、この場合妥当である。しかし、Type3 および 4 の場合は、式(2)は一致しない。今回提案する式(1)は、今回の場合、妥当と言える。

また、 $G/K$ の値は成分 a, b の硬さを表しており、Type2, 3 に見るように硬い成分で摩擦係数が小さいほど、みかけの摩擦係数が小さくなることが分かる。

#### 5. まとめ

2 成分からなる摩擦係数の異なる材料を組み合わせた弾性体の場合、その弾性体のみかけの摩擦係数は式(1)が SPH 法からも妥当と言える。一般に硬くて摩擦の小さい添加剤を加えることで、みかけの摩擦係数を小さくすることができると考えられる。ただし、今回の計算では、Fig. 2 に示すように、成分 a が周りにあり、成分 b が中心にある場合を検討したのみである。今後、さまざまな配置で比較して、式(1)の妥当性、あるいは、適応限界を調査していきたい。

本研究結果は防衛装備庁「安全保障技術研究推進制度」で採択された「実験・計算科学の融合による革新的塗膜創生と機序解明の基礎研究」に基づく業務の成果として発表する。

Table 1  $G/K$  and  $\mu$  of elastic body types

Type	$G_a/K_a$	$G_b/K_b$	$\mu_a$	$\mu_b$
1	0.45	0.01	0.3	0.1
2	0.45	0.01	0.1	0.3
3	0.01	0.45	0.3	0.1
4	0.01	0.45	0.1	0.3

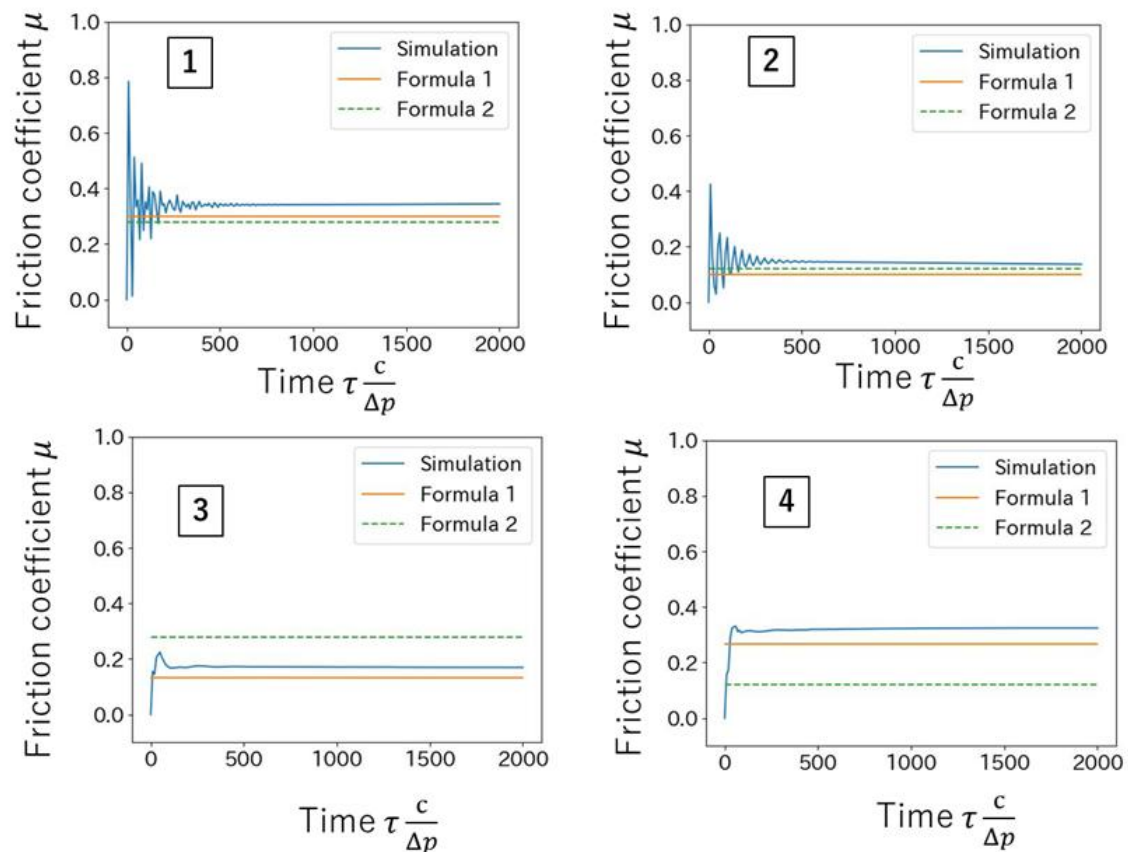


Fig. 3 Friction coefficients as a function of time. Number in square in each graph shows the type in table 1.

#### 文献

- 1) S. Monhseni-Mofidi & C. Bierwisch: Application of hourglass control to Eulerian smoothed particle hydrodynamics, Comput. Part. Mech, 8 (2021) 51.