

1. はじめに

摩擦・摩耗・潤滑はほぼ全ての機械に普遍的に生ずる現象である。しかし、これらは表面の状態、環境などの条件により大きく影響を受けるため、同じ条件のときに、常に同じ結果が得られる訳ではない。すなわち、摩擦・摩耗・潤滑は多くの因子が絡み合った複雑な現象であり、関連する分野も多岐に渡るため、十分に理解が進んでいるとは言えない。本講演では、摩擦・摩耗・潤滑（トライボロジー）の基礎を説明するとともに、各種材料の摩擦・摩耗特性についても解説する。

2. 摩擦の法則

摩擦に関して、下記の実験的法則が広く成立することが知られているが、絶対的な法則ではない。

- ① 摩擦力は接触する二面間に作用する垂直荷重に比例する。
- ② 摩擦力は見かけの接触面積に依存しない。
- ③ 動摩擦はすべり速度に依存しない。

3. 摩擦の起因

摩擦の起因は、凝着摩擦、掘り起し摩擦、弾性ヒステリシス損失による摩擦、の三つに大別される。凝着摩擦は、固体の二面が接触すると表面の凸部同士が結合（凝着）し、二面の一方に外力を加えたときにこの凝着部をせん断する力のことである。二面が真実接触面積（見かけの面積ではない） A_r で接触し、凝着部のせん断強さが s であるとき、凝着摩擦はその積($A_r \cdot s$)で表される。凝着摩擦では、接触が塑性的であるか弾性的であるかにより、荷重や見かけの接触面積が及ぼす影響が異なる。掘り起こしによる摩擦では、一般の機械加工面などでは考慮する必要はないが、研摩紙や円錐状の相手面との接触では影響が大きい。弾性ヒステリシス損失による摩擦は通常ゴムやプラスチック材料などの粘弾性材料で影響を及ぼす。金属など硬質の材料では通常は無視してよいほど小さい。表 1 に摩擦の起因と各種条件を示す。

表 1 摩擦の起因と各種条件

	接触状態	接触形状	真実接触面積	摩擦力	摩擦係数	摩擦力と荷重	摩擦力と見かけの接触面積	備考
凝着摩擦	塑性接触	-	$\frac{W}{P_0} = \frac{W}{H}$	$\frac{W}{P_0} s = \frac{W}{H} s$	$\frac{s}{P_0} = \frac{s}{H}$	比例する	依存しない	s:せん断強さ P ₀ :塑性流動圧力 H:ビッカース硬さ
	弾性接触	球	$\propto W^{\frac{2}{3}} R^{\frac{2}{3}}$	$\propto W^{\frac{2}{3}} R^{\frac{2}{3}} s$	$\propto W^{-\frac{1}{3}} R^{\frac{2}{3}} s$	比例しない 摩擦係数は荷重の増加で減少する	依存する { $R^{\frac{2}{3}}$ に比例}	s:せん断強さ R:接触球半径
掘り起し摩擦	塑性接触	円錐	$\frac{\pi}{2} a^2$	$\frac{2}{\pi \tan \theta} W$	$\frac{2}{\pi \tan \theta}$	比例する	依存しない	θ:円錐の半頂角 a:接触円半径
		球	$\frac{\pi}{2} a^2$	$\frac{3}{2\pi} \left(\frac{a}{R}\right) W$	$\frac{3}{2\pi} \left(\frac{a}{R}\right)$	比例する	依存する { $\left(\frac{a}{R}\right)$ に比例}	(普通には考慮しなくてよい)
弾性ヒステリシス損失による摩擦	弾性接触	球	$\propto W^{\frac{2}{3}} R^{\frac{2}{3}}$	$\frac{3\alpha}{16} \left(\frac{a}{R}\right) W$ or $\left[\frac{9\pi}{64} \left(\frac{1-v^2}{E} \right) \right] \alpha \bar{p} W$	$\frac{3\alpha}{16} \left(\frac{a}{R}\right)$ or $\left[\frac{9\pi}{64} \left(\frac{1-v^2}{E} \right) \right] \alpha \bar{p}$	比例する	依存する { $\left(\frac{a}{R}\right)$ に比例}	a:接触円半径 R:接触球半径 α:損失比 p̄:平均接触圧力 v:ポアソン比 E:ヤング率

4. 摩耗の起因

現象からの分類では、凝着摩耗、アブレシブ摩耗、腐食摩耗、疲れ摩耗の4つに大別される。凝着摩耗は最も一般的な摩耗形態であり、二面の凝着部がせん断により材料が分離される現象である。アブレシブ摩耗は硬い材料の突起や硬質微粒子による掘り起し（切削）作用による摩耗現象である。腐食摩耗は雰囲気や周囲の液体が滑り面と化学反応して生じた生成物質のために固体表面が摩耗する減少である。疲労摩耗は表面が繰り返し応力を受けることで表面層が疲労破壊を生じて起こる摩耗である。

表2 凝着摩耗とアブレシブ摩耗

	摩耗式		摩耗体積
凝着摩耗	$V = K \frac{W}{H} L$	W:垂直荷重 H:ビッカース硬さ L:摩擦距離	・荷重に比例 ・軟らかい方の材料のビッカース硬度に逆比例 ・摩擦距離に比例
アブレシブ摩耗	$V = \frac{2WL}{\pi H \tan \theta} = K \frac{W}{H} L \cot \theta$	W:垂直荷重 H:ビッカース硬さ L:摩擦距離 θ :突起の半頂角	・荷重に比例 ・軟らかい方の材料のビッカース硬度に逆比例 ・摩擦距離に比例 ・突起の鋭さに比例

5. 潤滑とストライベック曲線

固体同士の接触による凝着結合が摩擦と摩耗の主たる要因となっている。二面間に油や水などの流体又はグラファイトなどを挟み、凝着を生じさせないようにすることを潤滑という。流体を用いた潤滑では、摩擦係数に及ぼす滑り速度、接触面圧および流体の粘度の影響がストライベック曲線として示されている(図1)。流体潤滑では二面間に十分な厚さの流体膜が存在するため凝着が生じておらず、純粋に流体膜のせん断による抵抗が摩擦となるため、摩擦係数はかなり小さく、また、速度および粘度が高いと大きくなる。一方、滑り速度や流体の粘度の減少又は荷重の増加により(図1横軸の減少方向)流体膜の膜厚が薄くなるため凝着が生じ始め、摩擦係数が大きくなっていく。

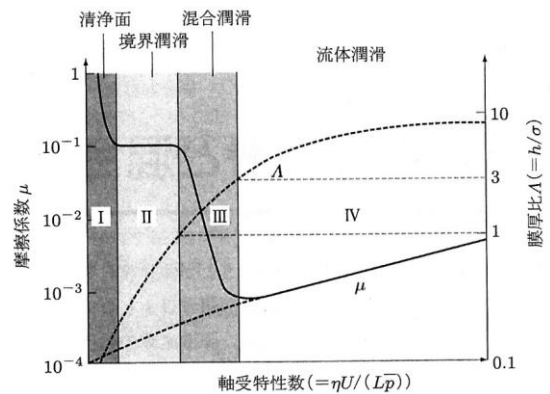


図1 ストライベック曲線¹⁾

6. 摩擦振動

相対的に滑っている面ではしばしば摩擦力が振動的に変動し「鳴き」を生じる。このとき、二面間でスティックスリップ現象が生じている。振動の原因は、「静摩擦が動摩擦より小さい」、「動摩擦係数が滑り速度とともに小さくなる」である。一般には潤滑油を塗布することで振動を抑えられるが、食品用機械のため油を使えない、材料を換えることが困難、などの場合には、滑り速度を大きくする、摩擦に関連する部分のばね定数を大きくすることが振動の抑制に有効である(図2)

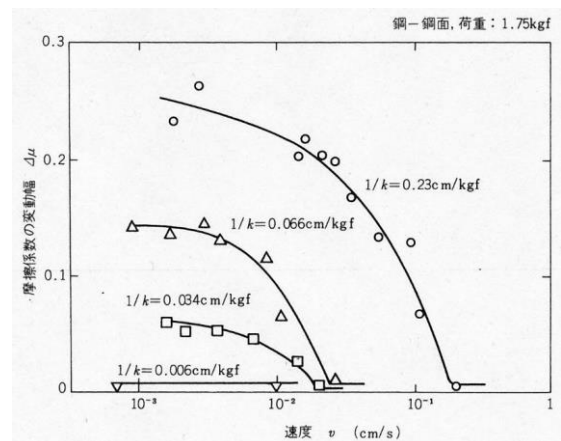


図2 摩擦振動振幅と速度およびばね定数²⁾

1) 橋本 巨, 基礎から学ぶトライボロジー 森北出版

2) 田中久一郎, 摩擦のおはなし 日本規格協会