

静摩擦が動摩擦より高い機構の解明

Mechanism of Static Friction Higher than Dynamic Friction

佐賀大・工（正）*張 波

Bo Zhang*

*Saga University

1. はじめに

静摩擦が動摩擦より高いことはトライボロジーの原理として知られているが、その機構はまだ解明されていない。摩擦の凝着理論は静止接触時間が凝着を成長させるため摩擦が静止接触時間の増加に伴い増加することを説明できるが、静摩擦と動摩擦との差は必ずしも接触時間に直結しないので、更なる究明が求められる。本研究は非同期接触せん断理論を提案し、静摩擦が動摩擦より高い機構を解明した。

2. 非同期接触せん断理論

Fig.1に固体表面の接触状態を図式的に示す。固体表面接触は全面に均一に起こることなく固体表面に有する粗さ突起の先端の局所に限定する。実際の粗さ突起の形状が複雑で、高さもばらばらで、個々の接触圧力も異なる。摩擦の凝着理論では個々の接触点で凝着が発生し、凝着した接触点をせん断する接線力が摩擦力になる。今まででは凝着理論を区別せずに静・動摩擦に適用するため、静・動摩擦の違いが謎になっている。しかし、摩擦過程をさらに詳しく考察すると、静摩擦でそれぞれの接触点で同期にせん断が起こるのに対して、動摩擦ではそれぞれの接線点の凝着・せん断が不規則に繰り返されることが判明される。従って、静摩擦が同期せん断であるが、動摩擦は非同期せん断である。同期せん断と非同期せん断によって生じる摩擦の差は、Fig.1に示すせん断力とせん断変位の関係図で説明できる。静摩擦の場合、各々の接触点が最大せん断力に達したときに同時に始動するため、摩擦力は各接線点の最大せん断力の和になる。一方、動摩擦の場合、同じ時刻で各接線点のせん断変位が異なるため、せん断力が最大せん断力より低い接線点も混在する。よって、動摩擦は一般的に静摩擦より低くなる。

完全弾性接触の場合、ヘルツ接触理論より、接線面の接線力が接線圧力に比例し、比例常数を摩擦係数（静摩擦係数に相当する）とすると、接線面の接線応力は次式になる¹⁾。

$$\tau_i = \mu_s p = \mu_s p_{i0} \left[1 - \left(\frac{r}{a_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 a_c は接線円半径である。

両接線面の最大相対せん断変位は次式になる。

$$u_i = \frac{\pi(2-v)a_c\mu_s p_{i0}}{8G} \quad (2)$$

ここで、 G は横弾性係数、 v はポアソン比である。鉄の横弾性率 $G=79$ GPa、ポアソン比 $v=0.3$ 、最大ヘルツ接線圧力 $p_{i0}=1$ GPa、静摩擦係数 $\mu_s=0.5$ と仮定すると、 $u_i/a_c=0.004$ であり、最大せん断変位は約接線半径の数千分の一であることが分かる。

また、最大せん断力は

$$F_i = \frac{2}{3}\pi a_c^2 \tau_i \quad (3)$$

であるため、せん断応力式（1）と合わせて、次の最大せん断変位と最大せん断力との関係式が得られる。

$$u_i = \frac{16G a_c}{3(2-v)} F_i \quad (4)$$

ヘルツ接線の場合、最大せん断変位は最大せん断力に比例する。最大せん断力に達する前のせん断変位 u とせん断力 F との関係式はMindlin²⁾より次式になる。

$$u = u_i \left[1 - \left(1 - \frac{F}{F_i} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (5)$$

摩擦が個々の接線点のせん断力の和になるので、接線せん断突起の数がせん断力に対して一様に分布している場合、動摩擦係数は個々の接線せん断突起のせん断係数の算術平均になり、次式が得られる。

$$\mu_k = 0.5\mu_s \quad (6)$$

接線せん断突起の数がせん断変位に対して一様に分布している場合、動摩擦係数は次式で静摩擦係数に関係付けられ

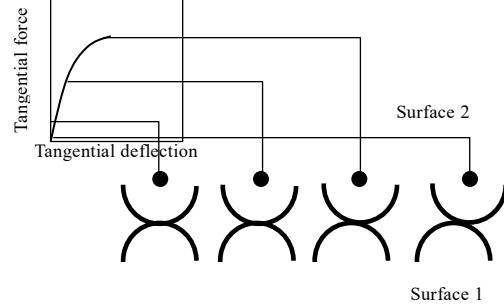


Fig. 1 Schematic of tangential deflection distribution of adhesive contact asperities in sliding

る。

$$\mu_k = \frac{2\Gamma(2)\Gamma(2/3)}{3\Gamma(2+2/3)}\mu_s = 0.6\mu_s \quad (7)$$

ここで, Γ はガンマ関数を表す. 実際の接触せん断突起の分布が単純ではないので, 動摩擦係数は静摩擦係数の半分以上, 6割以下になると考えられる.

同期接触せん断が静摩擦の時だけに起こるのに対して, 動摩擦時には非同期接触せん断しか起こらない. 凝着摩擦である限り, 静摩擦と動摩擦との差は必ず発生する. 一つの接触表面が平滑な表面であれば, 凝着接触点がせん断することなく滑ることができるように見えるが, このような理想状態を持続的に実現することは不可能である. 静摩擦と動摩擦との差を解消するには, 凝着摩擦を解消するしかない.

3. おわりに

静摩擦が動摩擦より高いことを静摩擦時の同期接触せん断と動摩擦時の非同期接触せん断との差で解明し, 動摩擦係数が静摩擦係数の半分以上, 7割以下にあることを予測した.

文献

- 1) K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University press, 1996, p. 74
- 2) R. D. Mindlin, Compliance of elastic bodies in contact, ASME J. Appl. Mech., 16, pp. 259-267, 1949.