

ゴム・ガラス界面の滑り摩擦と摩擦界面その場観察

Sliding Friction of Rubber/Glass interface and its *in situ* Observation

○ 新田高洋 (岐阜大)

吉田裕介 (岐阜大)

正 平野元久 (岐阜大)

西尾憲佑 (岐阜大)

杉浦潤一 (岐阜大)

Takahiro NITTA, Kazuyuki NISHIO, Yusuke YOSHIDA, Jun-ichi SUGIURA and Motohisa HIRANO
Dept. of Mathematical and Design Engineering, Gifu University, Yanagido 1-1, Gifu city, Gifu

Keywords: Dry Friction. in situ Observation. Steady sliding. Stick-slip motion

1. 序論

巨視的な固体同士を接触させた際の摩擦力の振る舞いは、固体同士の接触構造とその接触構造の動力学によって理解される。1950年代にBowdenとTaborは、固体同士を接触させた場合、固体同士は表面全面で接触するのではなく、微細な突起同士でのみ接触していることを示し、摩擦力とはこの突起同士の凝着を引き離すのに必要な力であると考えた。これにより、摩擦力が垂直荷重に比例すること；摩擦力が見かけの接触面積には依存しないこと、を示した。すなわち、古くから知られている経験則である、アモントン・クーロンの法則を説明した。¹また、この接触点の動力学が、低滑り速度領域において様々な固体摩擦に普遍的に見られる振る舞いに対して重要であることが、BaumbergerやCaroliらの研究により、指摘されている。²

しかし、これらの接触点の動力学を研究するには、以下の困難がある：1) 固体同士の接触構造が複雑であること；2) 摩擦界面で起っている現象を直接観察することが困難であること、である。固体同士の接触に関しては、GreenwoodとWilliamsonの研究³をはじめ、古くから多くの研究がなされている。しかし、GreenwoodとWilliamsonの研究においても見直しが行われ⁴、また新たな理論が発表される⁵など、現在なお進行中の研究分野である。

そこで上記の困難を回避するため、本研究では、接触構造が単純で、かつ滑り運動中における各接触点の運動を観察できる、モデル系を構築した。この系の摩擦挙動と接触点の振る舞いを観察した。

2. 実験方法

2-1. 摩擦試料の作製

硬化前のpolydimethylsiloxane (PDMS) を半球形のくぼみをもつ金属基板上に流し、硬化させた。これにより、表面に半径1mmの半球形の突起が5mm間隔で正方格子状に並んだ、PDMS試料を作製した。作製したPDMS試料の大きさは長さ100mm、横20mm、厚さ2mmとした。

2-2. 装置

PDMS試料を板に張り付け、その板と移動ステージを巻きバネを介して接続した。移動ステージの移動速度は、1 μ m/sから1mm/sである。移動ステージを一定速度で移動させ、そのときの摩擦界面に加わるせん断力をロードセルを用いて測定した。

PDMS試料を、長さ300mmの直角プリズム上で滑らせた。直角プリズムを用いることで、接触顕微鏡の概念を用いることに

より、接触点の直接観察を行った。⁶すなわち、入射光を全反射させ、その反射光をCCDカメラで観察する。PDMS試料とプリズムが接触している領域では全反射の条件を満たさなくなるため、入射光が一部透過する。このため、接触点を暗い領域として観察することが出来る。この暗い領域の合計面積や各領域の重心位置の時間変化を観察することにより、真実接触面積や各接触点の運動を知ることができる。観察は30フレーム毎秒で行った。

3. 結果と考察

3-1. 滑り運動

図1に、試料が定常滑りする際のせん断力の時間発展を示す。PDMS試料が停止している状態から移動ステージを駆動すると、摩擦界面で滑りが起るまでせん断力は時間に比例して増加する。滑りが起った時点でせん断力が低下し、その後一定値に落ち着く。せん断力のピーク値を静止摩擦力とし、一定値に落ち着いたときのせん断力を定常滑りの動摩擦力とした。

一方、試料がスティック・スリップ運動する場合は、PDMS試料が滑りと停止を周期的に繰り返した。このため、せん断力はノコギリ波状の時間発展を示した。

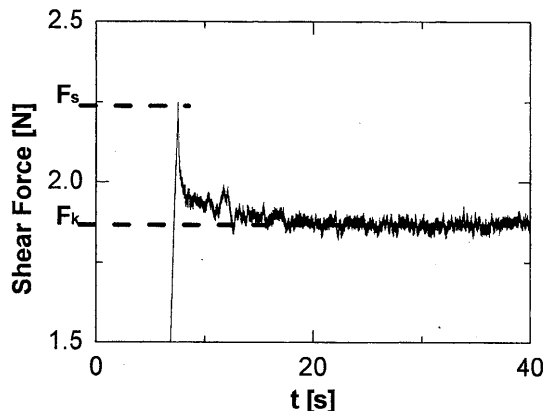


Fig.1. A representative time evolution of shear force loading a PDMS sample showing steady sliding motion.

定常滑りとスティック・スリップ運動のどちらの運動が起るかは、移動ステージの駆動速度に依存し、PDMS試料と移動ステージをつなぐ巻きバネのバネ定数にはほとんど依存しなかった。移動ステージの駆動速度が15 μ m/s以下では定常滑りが起り、

駆動速度が $100\mu\text{m/s}$ から $330\mu\text{m/s}$ では、スティック・スリップ運動が起った。駆動速度が $33\mu\text{m/s}$ と $1\mu\text{m/s}$ の場合は、定常滑りとスティック・スリップ運動の共存する場合が見られた。紙・紙の摩擦系など多くの固体の乾燥摩擦では、低滑り速度で、小さなバネ定数の場合にスティック・スリップ運動が観察される。⁷これに対して、本系では、高滑り速度の領域でスティック・スリップ運動が観察された。

3-2. 摩擦力の垂直荷重依存性

図2に静止摩擦力和動摩擦力の垂直荷重依存性を示す。静止摩擦力ならびに動摩擦力は垂直荷重とともに増加した。静止摩擦力ならびに動摩擦力と垂直荷重との間には $F \propto W^{0.6}$ の関係があった。このときの真実接触面積の垂直荷重依存性を摩擦界面直接観察により求めた。真実接触面積 (A_r) と垂直荷重 (W) との間には $A_r = \alpha + \beta W$ の関係があった。 α と β の値は、静止摩擦と動摩擦ではほぼ等しく、それぞれ $3[\text{mm}^2]$ と $5[\text{mm}^2/\text{N}]$ であった。

摩擦力ならびに真実接触面積の垂直荷重依存性から、摩擦力と真実接触面積の間には、比例関係が成り立たないことがわかった。

他の固体摩擦と比較するため、垂直荷重0から 1.5N までの領域を線形近似して求めた摩擦係数は 2.5 であった。固体同士の乾燥摩擦においては、多くの場合摩擦係数は 0.5 程度の値である。本研究に使用した系は通常の系に比べて非常に大きな摩擦係数であった。

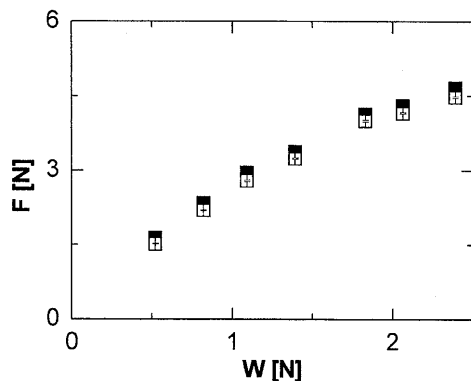


Fig. 2. Normal load dependence of static and kinetic friction of the PDMS/glass system. ■, static friction; □, kinetic friction.

3-3. 動摩擦力の滑り速度依存性

定常滑りにおける動摩擦力の滑り速度依存性については、滑り速度を $1\mu\text{m/s}$ から 1mm/s の範囲で変化させたが、動摩擦力は滑り速度に依存せず、一定であった。これは多くの固体摩擦において成り立つ、アモントン・クーロンの法則が本研究で使用した系についても成り立っていることがわかった。

3-4. 接触点の運動

PDMS試料が定常滑りおよびスティック・スリップ運動する際の各接触点の運動を観察した。図3に、PDMS試料が定常滑りしている際の各接触点の移動距離の時間変化を示す。各接触点は定常的な滑り運動を行っており、接触点のスティック・スリップ運動などは見られなかった。

図4にPDMS試料がスティック・スリップ運動している際の各接触点の移動距離の時間変化を示す。PDMS試料が滑り出す際には、各接触点がほぼ同期した運動を行っていることがわかる。

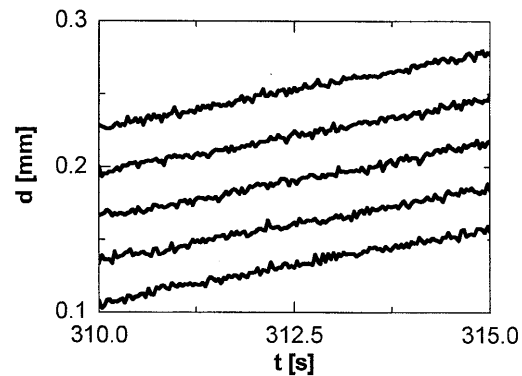


Fig. 3. Motions of 5 representative contact points when the PDMS sample slid steadily. For visibility, lines were shifted vertically.

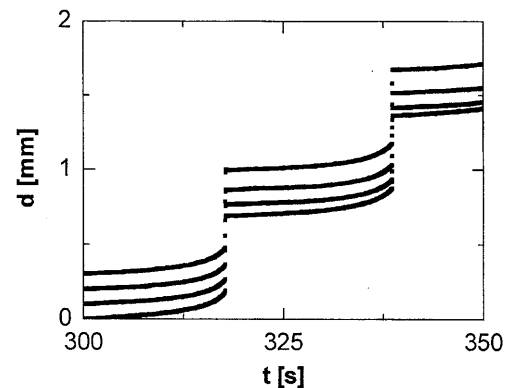


Fig. 3. Motions of 4 representative contact points when the PDMS sample slid. For visibility, plots were shifted vertically.

4. まとめ

巨視的な固体間滑り摩擦研究における困難を回避するために、接触構造が単純で、かつ摩擦界面の直接観察が可能なモデル系の構築を行った。この系における、滑り運動特性ならびに摩擦力の振る舞いを明らかにした。また、このときの各接触点の運動を明らかにした。すなわち、PDMS試料が定常滑り運動を行う際の接触点の運動は定常的に滑り運動をしていた。一方、PDMS試料がスティック・スリップ運動をする場合は、各接触点が同期した運動を行っていた。

5. 参考文献

- 1 F. P. Bowden and D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids* (Oxford University Press, New York, 2001).
- 2 T. Baumberger and C. Caroli, *Advances in Physics* **55**, 279 (2006).
- 3 J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* (1934-1990) **295**, 300 (1966).
- 4 J. A. Greenwood and J. J. Wu, *Meccanica* **36**, 617 (2001).
- 5 B. N. J. Persson, *The Journal of Chemical Physics* **115**, 3840 (2001).
- 6 河野彰夫, *日本物理學會誌* **43**, 579 (1988).
- 7 F. Heslot, T. Baumberger, B. Perrin, et al., *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics* **49**, 4973 (1994).