

## 青山学院大学理工学部松川宏教授らのグループが摩擦の新しい法則を実験的に証明

摩擦は最も身近な物理現象の一つです。私たちが歩くことができるのも靴の底と道路の間に摩擦があるからです。また摩擦は様々な舞台で現れる多様な現象です。地震も摩擦現象の一つです。現代では原子スケールの摩擦も活発に研究されています[1]。

この摩擦現象はピラミッドの昔から多くの研究がなされてきました。それらの研究によって得られた最も有名な法則が次のアモントンの法則です。

- i) 摩擦力は見かけの接触面積に依存しない。
- ii) 摩擦力は荷重に比例する。

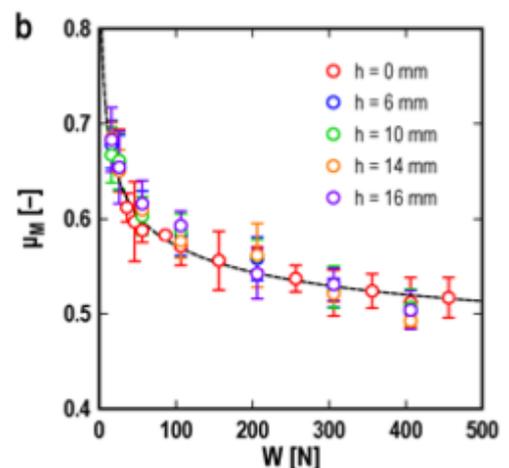
この法則を最初に発見したのはあのモナリザの微笑みの作者であるレオナルド・ダ・ヴィンチでした。下の図はダ・ヴィンチが行った摩擦の実験の彼自身によるスケッチです。



レオナルド・ダ・ヴィンチによる  
摩擦の実験のスケッチ

この法則は広い範囲で成り立つと考えられてきました。今日では高校の物理の教科書にも必ず登場します。摩擦力を荷重で割った量を摩擦係数と呼びますが、この法則によれば摩擦係数は定数となります。

では、このアモントンの法則はいつでも成り立つのでしょうか？この度、青山学院大学松川宏教授、大学院生の片野祐さん（現ネットワークシステムズ）、横浜国立大学中野健准教授、および島根大学大槻道夫講師のグループはアクリルガラス(PMMA)を用いた実験で最大静摩擦力を測定し、アモントンの法則が系統的に破れ、新しい摩擦法則が成り立つことを証明しました[1]。右の図は彼らが実験で求めたアクリルガラスの静摩擦係数（最大静摩擦力/荷重）の荷重依存性です。このように摩擦係数は荷重とともに減少します。また、物体の大きさが大きいほど減少します。これらの振る舞いはアモントンの法則が系統的に破れることを示しています。そしてアモントンの法



静摩擦係数の荷重依存性[2]。

則に代わって成り立つ新しい摩擦法則は

$$\text{静摩擦係数} = \text{ある定数} + \text{別の定数} \times \text{荷重}^{-1/3}$$

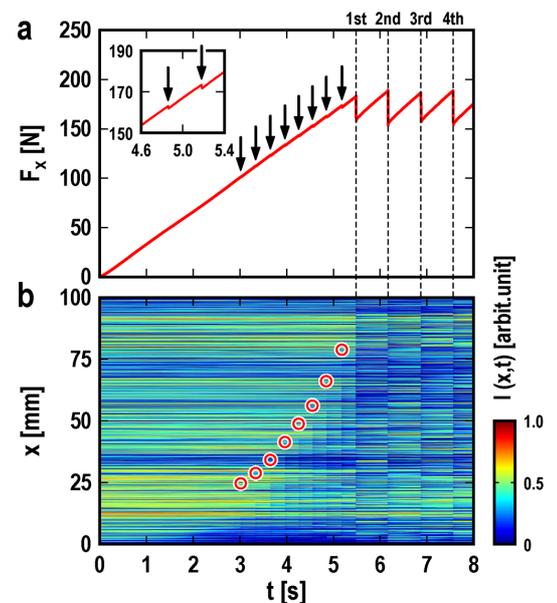
という形で表されます。

どのような時にアモントンの法則は成り立ち、どのようなとき成り立たなくなるのでしょうか。この研究からは、一般にはアモントンの法則は成り立たない、しかし荷重や物体の大きさが十分小さい、または大きいときには近似的に成り立つ、と考えられます。このような振る舞いが起こる原因は摩擦の働く物体の底面で起こる局所的な前駆滑りにあります。普通は、物を動かすには最大静摩擦力以上の外力を加えねばならない、それ以下の外力では物は全く動かない、と考えられています。しかし最近の研究によって、最大静摩擦力以上の外力のもとで起こる物体全体の滑り運動の前駆現象として、最大静摩擦力以下の外力のもとでも局所的な滑りが起こっていることが明らかになりました。実験結果を右の図に示します。下のパネルの横軸は時間、縦軸は試料の位置で図の下端が試料後端、上端が前端となります。カラーで示しているのは試料の各場所での各瞬間の滑り量です。上のパネルは試料を後ろから押している力です。この実験では一定速度で動く棒で試料を後ろから押しています。最初、試料は止まっているので押す力は時間とともに増大していきます。そして5.5秒ほど経過したところで押す力は急激に減少します。これは試料全体が滑ったためです。しかし、上のパネルの中の小さな拡大図で示されるようにそれまでも小さな力の減少の連なりが現れます。一つ一つの小さな力の減少は下のパネルで示されるように局所的な前駆滑りが試料後端から赤丸で示される位置まで起こったことによって引き起こされます。

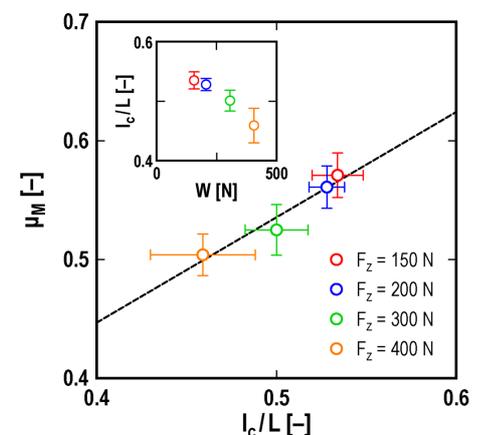
この前駆滑りの先端はある長さまではゆっくりと増加していきます。しかし、ある臨界的な長さに達すると急激に増加します。そしてその臨界長さが最大静摩擦力を決定します。右図に試料全体の静摩擦係数を臨界長さ/試料の長さに対して示します。このように最大静摩擦力は臨界長さによって決まります。そして中の小さな図に示されるように臨界長さは荷重が大きくなるほど短くなるので、試料全体の静摩擦係数も荷重とともに減少します。

実はこのような振る舞いは数値計算と理論計算により大槻と松川によって予言されていました[3, 4]。今回の実験によって新しい摩擦の法則を含む理論的・数値的予測が実験的に証明されたこととなります。

摩擦は運動を妨げるので通常は小さい方が好ましいと考えられがちですが、例えば自動車のタイヤと道路の間では摩擦は大きい方が効率的に駆動力が働き自動車の燃費が向上します。摩擦力の大きさを制御することが省エネルギーなどのためには重要です。摩擦の制御は多くの場合、滑り面の間に潤滑剤を入れたることにより行われています。ここで得られた結果は、滑り面の面積を変えたり形状を変えたりすることにより、摩擦係数が変わり摩擦が制御できることを示しています。省エネルギーにつながる全く新たな摩擦制御技術をもたらずと期待されます。



試料を押す力と局所的前駆滑りの時間変化[2]。



試料全体の静摩擦係数と局所的前駆滑りの臨界長さ/試料長さの関係。中の図は後者の荷重依存性[2]。

## 参考文献

- 1, ” 摩擦の物理” 、岩波講座 物理の世界、松川宏、岩波書店 (2012).
- 2, Y. Katano, K. Nakano, M. Otsuki & H. Matsukawa: "Novel Friction Law for the Static Friction Force based on Local Precursor Slipping", *Scientific Reports* **4**, 6324 (2014).
- 3, M. Otsuki & H. Matsukawa: "Systematic Breakdown of Amontons' Law of Friction for an Elastic Object Locally Obeying Amontons' Law", *Scientific Reports* **3** 1586, 2013 .
- 4, ” 摩擦界面での局所前駆すべりとアモンソン則の破れ” 、大槻道夫、松川宏、トライボロジスト Vol. 58 No. 2 p. 57 (2013).