

スケールの違いから摩擦を考える

福島県立テクノアカデミー郡山 高木 智士
中国職業能力開発大学校 高山 雅彦

1. はじめに

筆者らは高卒を対象とした学卒訓練に従事している。ものづくりにおいて物理学は重要な科目であるが、本稿は其中でも身近な物理現象の一つである「摩擦」についてとり上げてみる。

ものづくりにおいてねじは重要な機械要素である。ねじの締め付けの例を挙げるだけでなく摩擦は最も身近な物理現象の一つであり、我々の生活は摩擦により支配されている。例えば摩擦がなければ立つことも歩くこともできない。静電気や熱の発生など摩擦は非常に馴染み深く工学的に重要であり、実に多様な様相を示す複雑で興味深い現象であるといえる。

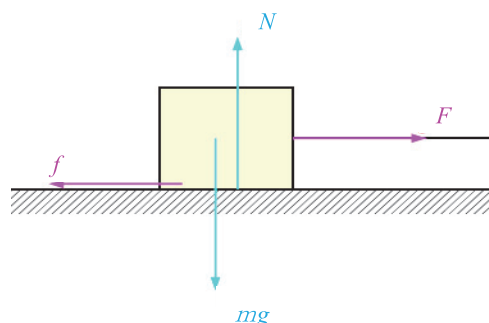
摩擦の歴史は古くピラミッドの古代から重い物体をいかに効率よく移動させるかという観点で研究されてきたが、現在でも未解決の基礎的問題も多い。また、摩擦のスケールは、我々の日常生活を基準にして考えれば、地滑り、氷河の運動という地球規模の大きなスケールから、金属や半導体表面のマイクロからサブナノスケールの界面に及ぶ。このように広い範囲で摩擦は現れるが、そこにはスケールによらない普遍的な現象がある。最大静摩擦力と、動きに伴うエネルギー散逸に起因する動摩擦力の存在がその典型例である。

滑りと固着を繰り返すスティック・スリップ運動や静摩擦力に現れる記憶効果、動摩擦力の速度依存性も、スケールによらず現れる^[1]。幅広い摩擦現象をできる限り統一的観点から概観してみよう。

まず典型的な以下の図1の問題をご覧頂きたい。

図1の問題は力学のテキストでよく目にする問題である。この問題の中に出てくる静止摩擦係数、動摩擦係数の本質がいったいどういうものなのだろうか。しかしこの本質を解説してくれる初等物理の教科書はほとんどない。なぜならば摩擦の問題は二つの物体間に働く力をマクロスケールでとらえて説明しているからである。もちろん実際の物理問題を解く場合、マクロ問題として扱うほうが簡単ということもある。一般的に物体はミクロな構成要素である原子が集積して形成されている。では摩擦力を原子のスケールまでさかのぼって考えるとどうだろうか。初等力学で扱う摩擦力はミクロな領域に立ち入ることなくマクロな領域での現象を整合的に説明するために現象論的問題のクーロンの摩擦法則として

あらい水平な面上に質量1kgの物体を置き、水平方向に加えた力 F を徐々に大きくしていった。静止摩擦係数を0.60、動摩擦係数を0.50とする。



- (1) F が10Nであるときの静止摩擦力の大きさ求めよ。
- (2) 物体が動き出したときの力 F を求めよ。
- (3) 物体が動いているときの動摩擦力の大きさを求めよ。

図1 典型的な摩擦の問題

体系化されてきた。ここではまず現象論的な力である摩擦の起源についてミクロスケールからマクロスケールまでを探っていくことにする。

2. スケールの違いからみた摩擦

2.1 原子レベルからみた静止摩擦力

固体表面を原子スケールで探索するのが走査型プローブ顕微鏡（SPM）である。SPMはテコと、その先に取り付けられた深針（カンチレバー）およびこれらの制御システムからなっている。その基本的な構造は図2に示すようなおもりを付けた単純なばねモデルで表すことができる。SPMのカンチレバーとして、現在では、先端が数原子からなる極微カンチレバーが作られている。周囲を超高真空中に保っており、おもりを固体表面から十分離しておけば、おもりにはばねの弾性力が作用する。先端原子が感じるばねの弾性力によるポテンシャルを $U_o(r)$ とすると式（1）のようにフックの法則で表わされ

$$U_o(r) = \frac{1}{2}kr^2 \quad (1)$$

となる。このとき k はカンチレバーのばね定数[N/m]、 r はカンチレバーの触れ幅[m]である。次にカンチレバーを固体表面に近づけていくと、先端原子と表面原子の距離が近づくとなんらかの原子間力が働く。この結果カンチレバーの針がたわむ。これがSPMの一種である原子間力顕微鏡（AFM）である。

こうして測定される分子間力のポテンシャルの様子を図3に示す。この曲線を上手くカーブフィットできる式としてレナード・ジョーンズポテンシャルがよく使用される。

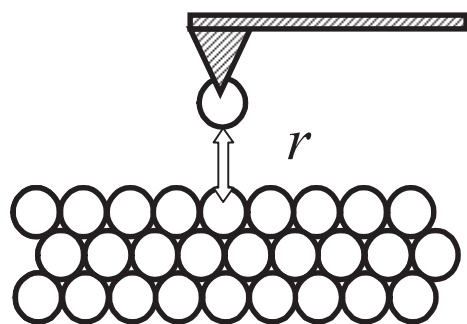


図2 SPMを説明した力学モデル

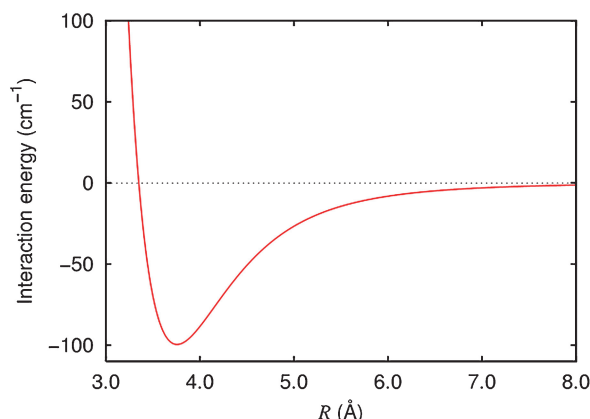


図3 レナード・ジョーンズポテンシャル曲線^[2]

これを式（2）に示す。

$$\phi(r) = 4\varepsilon \left\{ \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\} \quad (2)$$

式（2）中の ε と σ はそれぞれポテンシャルの最小値と最小値を与える原子間力の程度を表している。この曲線から原子間距離が近傍では大きな斥力が働くが、4nm程度の領域では引力が働いているのが分かる。これが静止摩擦力の起源である。では静止摩擦力の起源となる原子間力とは何だろうか。原子の構造は図4のように電子・陽子・中性子で別々の素粒子であって異なる質量と電荷をもっている。陽子と中性子からなる原子核のまわりを陽子と同数の電子が取り巻いている。

単体原子は陽子と電子の数が同じであるために電氣的に中性である。従って図4のような基本モデルの場合、電氣的な偏りがない。しかし電子の軌道は図5のような雲ようになっており、その重心は必ずしも原子核の中心と一致しない。このずれは双極子モーメントをつくる。その大きさと方向はランダ

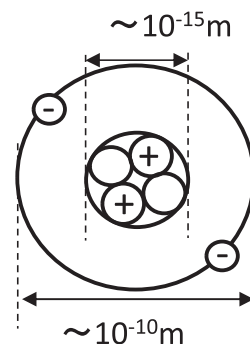


図4 原子の基本モデル

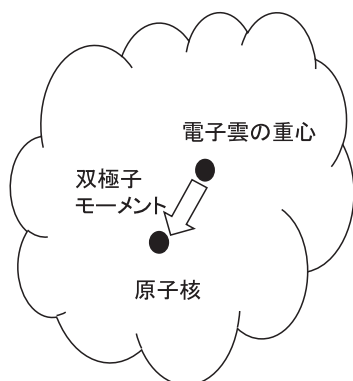


図5 双極子モーメント

ムであるが二つの原子が接近すると互いに引力となるように向きをそろえる。原子間力はこの他イオン結合もあるがいずれもクーロン斥力とクーロン引力が力の源となっている。

2.2 マクロから見た摩擦力

今度は視点をマクロへと広げてみる。マクロな固体表面間の摩擦力の初期研究は、レオナルドダビンチ (Leonardo da Vinci, 1452-1519) アモントン (G.Amonton, 1663-1705), クーロンによって実験と観察が積み重ねられた^[1]。これらの3人がたゆみない観察を積み上げてまとめたものがクーロン摩擦と呼ばれているアモントン・クーロンの法則である。その内容は、

1. 摩擦力は見かけの接触面積によらない
2. 摩擦力は垂直抗力に比例する
3. 動摩擦力は最大静止摩擦力よりも小さい
4. 動摩擦力の大きさはマクロな物体の質量中心速度によらない

というものである。ここで図6のように机の上に物体 (固体) を置いてみよう。

我々にはこの状況は物体が机の上の表面と接触していると認識する。しかし、接触面をみるスケールをどんどん小さくしていったらどうなるのだろうか？ クーロンはどんなになめらかな表面でもミクロなスケールにすれば凹凸があるはずだと考え、表面間の凹凸が引っかかることで摩擦が起これと考えた。確かに潤滑剤を界面に塗布すれば直接凹凸が接触しなくなって摩擦力が減る。ここで「引っかかる」という現象をマクロな現象をミクロ的にとらえてみ

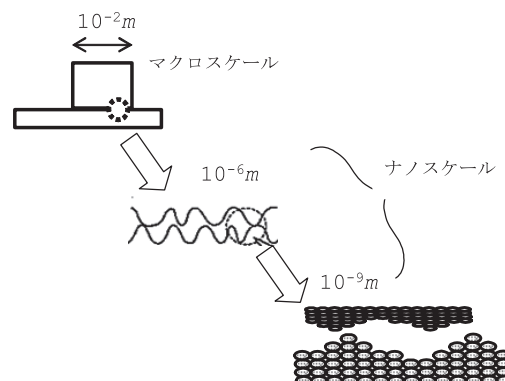


図6 スケールの違いから見た机の上の物体

よう。一般的に物体は原子間力が引力になるほど表面原子間に近づいて接触している。この領域を真実接触領域と呼ぶ。この真実接触領域はみかけの接触面積に比べてはるかに小さく、またモデルを簡単にするため大気中の不純物など介在は除外しておく。その真実接触面積を A , n 番目の領域に作用している斥力を $\vec{M}n$ とする。これらをすべて真実接触領域について足し合わせ、これを真実接触面積で割ると圧力を示す式 (3) となる。

$$P = \frac{\sum \vec{M}n}{A} \quad (3)$$

この圧力 P は、表面間斥力の単位面積あたりの平均値 (表面間の接触圧力) を示している。斥力一つ一つは界面の状態によって任意の方向に作用するがすべてを合成した斥力は接触面に垂直方向となる。そしてこの圧力 p に真実接触面積 A を掛けたものがマクロ的な垂直抗力 N と呼ばれているものになる。これを式 (4) で表す。

$$N = P \cdot A \quad (4)$$

ここで垂直抗力は真実接触領域に作用する斥力の統計的な平均値を扱っていることになる。

さて今、机の上で物体を引きずることにする。図7に示すように真実接触領域どうしが引きはがされるときに表面分子間の距離が広がって原子間力によって凝着が起きる。表面間に横すべりを起こそうとすると、その凝着が横すべりを邪魔しようとする。

これがマクロ的に「引っかかる」と解釈されており静止摩擦と考えられている。さて、無数にある真実接触領域での凝着力が重ね合わさった結果両者の間に引きずり現象が起こる。この表面に沿う方向に

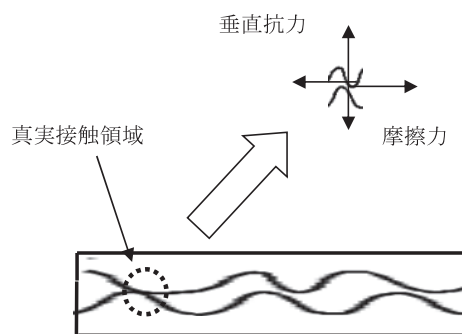


図7 静止摩擦の凝着説

引きずる力はせん断力と呼ばれ、単位面積あたりのせん断力を s とすると

$$F = A \cdot s \quad (5)$$

とあらわされる。この力 F が凝着を断ち切って表面間にすべり運動を引き起こすのに要する最小の力ということになる。これが最大静止摩擦力と呼ばれるものである。最大静止摩擦力 F と垂直効力の比は式(6)となる。

$$\mu_0 = \frac{F}{N} = \frac{A \cdot s}{A \cdot P} = \frac{s}{P} \quad (6)$$

このときの μ_0 を静止摩擦係数と呼んでいる。ここで式(6)をよくみると μ_0 が真実接触面積 A によらないということが分かる。接触面をナノスケールで観測した場合、凹凸部の分布により真実接触領域が変わるので同じ組み合わせの物体でも静止摩擦係数の値は大きく変わってしまうことになる。しかし実験的にはこのようなことは起こらない。ただし、ここで説明した摩擦の吸着説は確立したものとはいえない。この説を検証するためには接触圧力が垂直抗力によらず一定であることを確かめる必要がある。もしこれが一定でないとすると接触圧力に単純に真実接触面積をかければ垂直効力となるという単純な議論が破綻するからである。

ここまでは平らな平面を考えていたが、物質の形状が平でなく丸い場合はころがり摩擦、ころがり抵抗などの議論が必要になる。また、表面状態がぬれているか乾いているかあるいは表面間に潤滑剤が介在しているかどうかなどによっても摩擦は変化する。

また静止摩擦を中心に述べてきたが動摩擦についてこの稿では深く述べていない。

3. まとめ

ここではミクロな原子・分子の世界とマクロな日常の世界の境目であるナノスケールの領域で見えてくる抗力と摩擦力の特徴について述べた。その中でも垂直抗力、摩擦力も起源はクーロン力であることを説明した。物体全体としては電氣的に中性であっても、ミクロな構成要素どうしが押したり引いたりしあう結果、クーロン力は複雑で多彩な様相を遂げる。ゆえに摩擦の複雑さの起源はここにあるといえる。最後にミクロスケールとマクロスケールの中間(メゾスコピック)領域からこの問題について研究されることを期待している。

4. おわりに

本稿は身近な力学現象として摩擦を取り上げ、自分なりに取りまとめたものであります。執筆にあたり中国職業能力開発大学校生産電子情報システム技術科の高山雅彦先生の温かい指導と助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

<引用文献>

- [1] 松川宏(2002) 摩擦の物理 岩波書店
- [2] R. A. Aziz, J. Chem. Phys., vol. 99, 4518 (1993)

<参考資料>

「摩擦の物理」松川 宏 日本表面科学会誌「表面科学」2003年6月号