

ヤモリはフッ素樹脂加工のフライパン上で滑るか

東京学芸大学附属高等学校 川 角 博

目 次

1. はじめに	138
2. 仮説の設定	138
3. 実験の企画	139
3. 1. 滑り出す角度の測定	139
3. 2. 面との吸着力の測定	139
3. 3. 指の面積測定	140
4. 実験対象ヤモリの基礎データ	140
5. 測定結果	141
5. 1. 傾斜角の測定結果	141
5. 1. 1. フッ素樹脂コート上	141
5. 1. 2. 2 プラスチック板	141
5. 1. 3. 銅板	141
5. 1. 4. グラフ用紙	141
5. 2. 吸着力の直接測定	142
6. 実験結果の分析・考察	142
6. 1. 吸着力の測定結果から	142
6. 2. 滑り出し傾斜角からの吸着力の推定	142
7. 考察	143
7. 1. テフロンの摩擦力について	143
7. 2. 裏返して体重を支える力	143
7. 3. ヤモリとテフロンの静止摩擦力	143
8. おわりに	144
8. 1. ヤモリはどうやって歩くか	144
8. 2. 摩擦力とは何か	144

東京学芸大学附属学校 研究紀要 第 37 集

ヤモリはフッ素樹脂加工のフライパン上で滑るか

東京学芸大学附属高等学校 川 角 博

1. はじめに

ヤモリは壁面や天井を自由に歩くことができる。これは、ヤモリの指に無数に生えている毛（電子顕微鏡での写真で見られる）が壁との分子間力により、強く壁に吸着できるからである。ヤモリの足が壁にくっつく仕組みが、指に生えている極微の毛と壁との分子間力によることは、以前より知られていた（ハエやクモが鉛直なガラス面や天井に逆さに止まって歩く原理も同じ）。すると、平面度が良くて吸盤が吸着するような面でも、電気的な相互作用の小さな物質上では、ヤモリは滑ってしまうと考えられる。この具体的な面として、焦げ付きにくいフッ素樹脂加工のフライパン面が考えられる。したがって、このフライパン面上では、ヤモリが滑りやすいと考えられる。滑りやすさを調べる簡易な方法として、ヤモリが滑り出す斜面の角度を調べることにした。

2. 仮説の設定

これまで、ヤモリが鉛直なガラス面や天井を逆さに歩ける仕組みとして、吸盤やわずかなでこぼこの利用などが考えられてきた。2000年6月のネイチャーで、ルイス・アンド・クラーク大学のケラー・オータムは、ヤモリが壁にくっつく仕組みについて次のように説明した^{1) 2)}。ヤモリの足指には、片足で50万本もの毛が生えており、これがさらに100～1000本に枝分かれをし、その先に直径200nmほどのスパチュラ構造がある。このスパチュラは、指がくっつく壁の接触面に分子レベルでの接近ができ、これにより分子間力が働く。一本一本の分子間力は弱いですが1匹が接触点を10億個も持っており、壁にくっついて体重を支えるのには、全体の0.04%の接触で十分だといわれる。オータムの研究で使われているヤモリは、日本のヤモリとは違うので、同じことがニホンヤモリにも言えるとは限らないが、足裏の形態などが同じであることから、壁にくっつく仕組みは同じであろうと考えた（図1-1、1-2参照）。

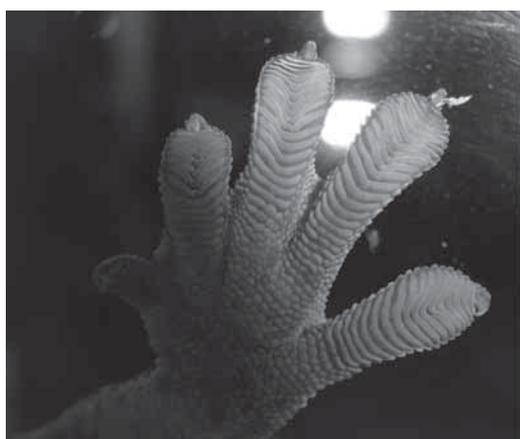


図1-1 オウカンミカドヤモリの指裏

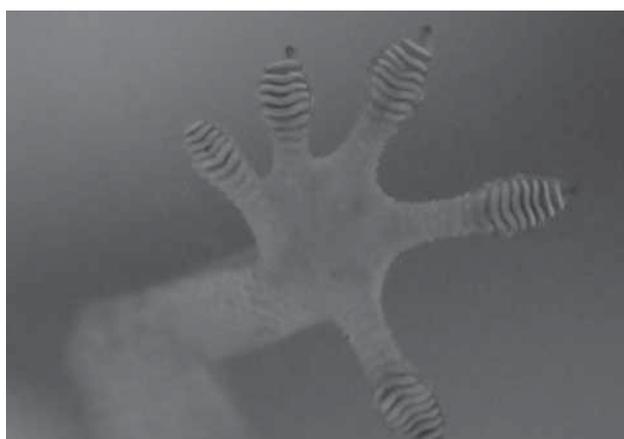


図1-2 ニホンヤモリの指裏

ヤモリが分子間力により壁にくっつくとするなら、分子間力が強くはたらくにくい物質に対しては、ヤモリはうまく歩けず滑るのではないかと考えられる。身近でそのような物質としては、フライパンの表面に使われているフッ素樹脂加工に思い当たった。フッ素樹脂は、低摩擦性、低粘着性に優れており³⁾、これを実現しているのはフッ素樹脂表面での分子間力の弱さ（表面での自由エネルギーが小さい）が原因である。これがヤモリにも当てはまるのかどうかは定かではないが、ヤモリが吸盤によりくっついていないのではないことも含め、

次のような仮説を立てた。

仮説：ヤモリの体重を支えるのに十分な大気圧が加わっていても、フッ素樹脂加工面上でヤモリは滑る。

3. 実験の企画

3. 1. 滑り出す角度の測定

ヤモリと斜面との分子間力が充分でなければ、ヤモリは斜面にとどまることができず、滑るであろう。そこで、ヤモリを様々な材質の斜面上に載せ、滑り出すときに斜面が水平となす角度を測定することとした。この実験に利用した斜面の材質を次に示す。

面の材質：紙（方眼紙）、プラスチック（アクリル）、金属（銅）、フッ素樹脂加工フライパン

【傾斜角の測定方法】

ヤモリを平板上に自由に動ける状態に置き、ヤモリを載せた板を水平に対して極めてゆっくりと傾けていった。傾斜角は、ヤモリを載せた板の上に傾斜計を固定して5回測定し、その平均を取った。ヤモリの向きは、体長方向が斜面の最大傾斜に向く場合（図2-1 頭は上）とこれと垂直（図2-3 最大傾斜に対して、体が横を向く。右側が下）方向（以下、横方向と表す）で行った。

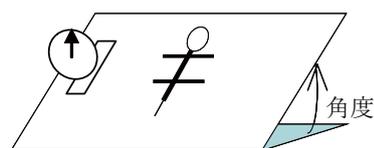


図2-1

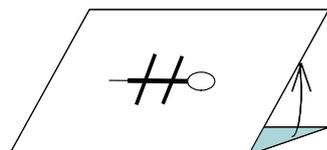


図2-2

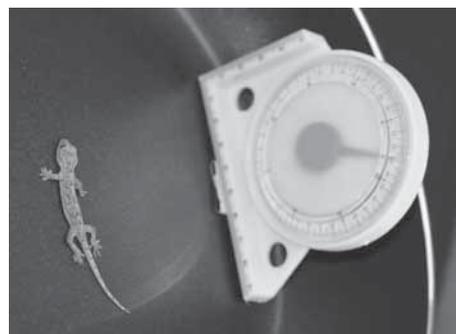


図2-3 傾けたフライパン上のヤモリと傾斜計

3. 2. 面との吸着力の測定

水平、鉛直などに固定した板にヤモリをつかまらせ、この板と垂直方向にヤモリを引き、引きはがされる最大値を測定する。

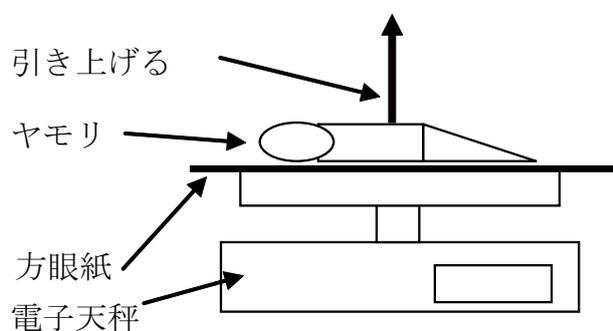


図3-1 吸着力の測定

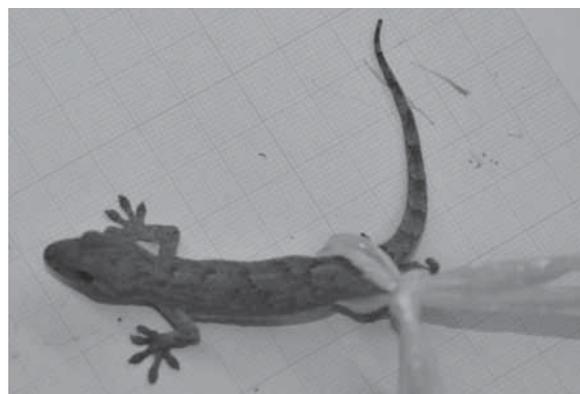


図3-2 ヤモリにひもをつけ、方眼紙からはがれるまで引き上げる

3. 3. 指の面積測定

指の接地面積は測ってはいない。グラフ上においたヤモリを写真撮影し、そこから概算した。



図4 グラフ用紙上のヤモリ（一番狭い線の間隔が1 mm）



図5 冬眠していたヤモリA

4. 実験対象ヤモリの基礎データ

【ヤモリ A】

実験日時 2009年2月10日 16時45分

実験場所 物理研究室

室温 17℃ 体重 0.31g 体長 45mm

指の総面積 方眼紙の目盛りから一本平均1 mm² くらい、全部の指20本でおよそ20mm² と見積もった。

ヤモリの状況 寒いいためか、突っつくと少しは動くが、ほとんどじっとしている。

対象ヤモリの写真 図5に示す。

【ヤモリ B】

実験日時 2009年5月29日

実験場所 生物研究室

室温 23℃ 体重 3.61g 体長 120mm

指の総面積 およそ30mm²

ヤモリの様子 捕まえようとするとう極めて活発に動き、元気。

【ヤモリ C】

実験日時 2009年6月17日

実験場所 物理実験室

室温 26℃ 体重 0.83g 体長 75mm

指の総面積 およそ20mm²

ヤモリの様子 しばらくえさを食べていないが、これまでで最も活発に動き、元気。

【ヤモリ D】

実験日時 2009年9月13日 22時

実験場所 自宅（捕獲場所は、学校内）

室温 29℃ 体重 3.4g 体長 尾が切れていて、元の大きさは不明

指の総面積 およそ30mm²

ヤモリの様子 極めて活発だが、えさを食べず空腹と思える。

5. 測定結果

5. 1. 傾斜角の測定結果

【ヤモリ A の場合】

5. 1. 1. フッ素樹脂コート上

フッ素樹脂コートの我が家で使用していたフライパン（長期間使い込んであり、テフロンが部分的に劣化している）

- (1) 体長方向：水平から50度くらいで滑る。滑り出すとすると簡単に滑り止まらない。
- (2) 横方向：30度くらいで滑る。滑り出すとすると簡単に滑り止まらない。

5. 1. 2. 2 プラスチック板

（材質：ポリスチレンスチール、315×225×2.5mm、新たに封を切ったもので、傷の無い平面）

体長方向でも、横方向でも90度（鉛直）でも落ちず、裏返してもくっついていてた。

5. 1. 3. 銅板

- (1) 体長方向：90度でも落ちない。
- (2) 横方向：45度くらいで転がった。滑ると言うより、踏ん張れずに転がった感じ。完全に裏返しになってしまう。

寒いので指の毛と板との分子間力はそれなりにあっても、足腰がついて行かないのかもしれない。

5. 1. 4. グラフ用紙

グラフ用紙上で体の面積など測定するために乗せた。

体長方向でも、横方向でも90度（鉛直）でも落ちず、裏返してもくっついていてた。

以下、ヤモリ B、C、Dについても同様に行い、プラスチック板、銅板、グラフ用紙ではいずれも逆さにしても落ちなかった。このため、以下のデータは、フッ素樹脂加工フライパン上での測定だけ示す。ただし、ヤモリ B と ヤモリ C は、テフロンプラチナ表面加工という新品のフライパン上で測定、ヤモリ D はヤモリ A と同じ我が家で使用していたフライパンで測定した。

【ヤモリ B の場合】

- ① 5月のヤモリは、行動的でじっとしていない。そこで、冷蔵庫で約1時間半冷やし、表面温度7.4℃で測定。しかし、すぐに活動的になってしまう。
 - (1) 体長方向：平均55°で滑り始める。じっとしていると80°でも滑らないこともあるが、逃げようとして動くとき45°でも滑ってしまう。
 - (2) 横方向：80°程度で滑る。
- ② 活動的なままでは測定が難しかったので、エーテルを少々嗅がせ、動きを若干押さえた測定結果は、上記とほとんど変わらない。じっとしていた方が滑りにくい感じである。

【ヤモリ C】

動きがあまりにも活発なのでエーテルを嗅がせた。しかし、エーテルが効きすぎて、まったく動かなくなってしまった。しかし、プラスチック、銅、方眼紙上ではまったく滑らない。一方、フッ素樹脂加工フライパン上では以下のように滑った。

- (1) 体長方向：水平から50°で滑る。前足1本で支えている。
- (2) 横方向：40°で滑る。前足1本で支えている。

【ヤモリ D】

体長方向：滑る角度44°

ヤモリ D については、滑る様子のビデオ撮影にも成功した(図 6)。なお、オウカンミカドヤモリがフッ素樹脂加工フライパン上で滑っている様子は、2009 年度 NHK 高校講座物理「いろいろな力」でも放映されている⁴⁾。



図6 フライパン上で滑るヤモリ

5. 2. 吸着力の直接測定

ヤモリの足指の吸着力を測った。水平な電子天秤上に貼り付けたグラフ用紙にヤモリ B をつかまらせ、鉛直方向にヤモリを引き上げ、引きはがされる最大値を測定した。引き上げる前の電子天秤を 0 表示にし、ゆっくり引くと、 -80 g ではがれた。このとき前足 1 本でくっついていた。ヤモリに付けた紐 0.6 g も考慮すると、足 1 本の吸着力は、 $80 - 36 - 0.6 = 38$ つまり、足 4 本で $38\text{ g} \times 4 = 15.2\text{ g}$ をつるすことが出来る ($15.2\text{ gw} = 0.15\text{ N}$)。

6. 実験結果の分析・考察

6. 1. 吸着力の測定結果から

ヤモリ B の指に加わる大気圧による力は、指の面積 $3.0 \times 10^{-6}\text{ m}^2$ と大気圧 $1.0 \times 10^5\text{ Pa}$ から、次のように見積もられる。

$$f = p_0 \times S = 1.0 \times 10^5 \times 3.0 \times 10^{-6} = 3.0\text{ N}$$

一方体重は、 $mg = 3.6 \times 10^{-3} \times 9.8 = 3.5 \times 10^{-2}\text{ N}$ であり、大気圧は体重を支えるのに十分に大きく、指が吸盤のようになっていれば、これを支えることは容易である。しかし、十分に平面なテフロン製のフライパンにヤモリは裏返しに付くことは出来なかった。つまり、吸盤方式で壁に付いているのではないことが分かる。

5. 2 で得た吸着力 0.15 N は体重よりもはるかに大きく、このために裏返したグラフ用紙にも十分にくっつけることができるのである。このため、吸盤である必要性は無い。しかし、テフロンとの吸着力が小さいので、逆にしたテフロンフライパンにくっついてはできなかった。

6. 2. 滑り出し傾斜角からの吸着力の推定

テフロンフライパン上での吸着力は、吸着力が弱すぎて、引き上げたときの変化を測定できなかった。そこで、3 の実験結果から推定する。

フッ素樹脂加工フライパン以外では、いずれも板を裏返しにしてもヤモリはくっついていた。このことから、ヤモリとプラスチック、銅、紙との吸着力は、ヤモリの体重以上であることは間違いない。ヤモリの体重 N を以下に示す。

ヤモリ	A	B	C	D
体重 [$\times 10^{-3}\text{ N}$]	3.0	3.5	8.1	33

フッ素樹脂加工フライパン上で滑り出す角度 θ から、この面とヤモリとの吸着力 $= mg \sin \theta$ として、以下の値が得られる。

ヤモリ	A	B	C	D
吸着力 [$\times 10^{-3} \text{N}$]	2.3	29	6.2	23

もちろんこの吸着力では、自分の体重は支えることはできない。一番大きなヤモリ B の場合、テフロンとの吸着力 $2.9 \times 10^{-2} \text{N}$ と方眼紙との吸着力 $1.5 \times 10^{-1} \text{N}$ を比べると、テフロンとの吸着力は、紙との 5 分の 1 以下と見積もることができる。

7. 考察

7. 1. テフロンの摩擦係数について

テフロンの摩擦係数は、以下に示すように極めて小さい。

テフロンの摩擦係数は非常に小さく、氷以上である。また、動摩擦係数よりも静摩擦係数の方が小さく、高荷重、低速ではグラファイト、二硫化モリブデン等の他のいかなる固体潤滑剤よりも小さい摩擦係数（銅をテフロン上で滑らすと、動摩擦係数は 0.1 程度、プラスチックを滑らすと 0.04 程度とある。Bowers & Zisman による）を示す⁵⁾。

ポリスチレンスチール同士の動摩擦係数は、0.3 ~ 0.5 くらい⁶⁾（三井・デュポンフロロケミカル株式会社 Web ページより http://www.md-fluoro.co.jp/html/s_teimasatu.html）であるから、テフロンの摩擦係数の小ささが分かる。摩擦力は、物体の界面を構成する原子・分子との電気力による相互作用である。この力が分子間力そのものの正体であるから、もちろん相手次第ではあるが、テフロンでは他の物質との分子間力が小さいと推定される。

7. 2. 裏返して体重を支える力

ヤモリ A がポリスチレンボードなどに裏返してくっついていて必要、吸着力は、

$$F > mg = 3.1 \times 10^{-4} \text{kg} \times 9.8 \text{m/s}^2 = 3.04 \times 10^{-3} \text{N}$$

この値は、5.2 で示す吸着力 0.15N よりも、1 桁以上小さな値であり、十分に体重を支えられることが分かる。

7. 3. ヤモリとテフロンの静摩擦係数

体長方向では、しっぽも含めて体全体を使って面にくっつき、支えているので、主に指に関わるであろう横方向の静摩擦係数を求めてみる。

$$\mu = \tan 30^\circ = 0.58$$

ヤモリが滑ったとはいえ、テフロンとの間のこの値は驚異的に大きい。他の物質との静摩擦係数とで一桁大きい。分子間力のきわめて弱いフッ素樹脂加工面といえども、ヤモリにはかなりの分子間力で吸着できるのである。

7. 4. 吸盤で着いているわけではないこと

ヤモリの指に加わる大気圧による力はいくらくらいであろうか。

$$f = p_0 \times S = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa} \times 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 2.0 \text{ N}$$

これは、体重の1500倍ほど有り、指が吸盤のようになっていても、これを支えることは容易であることがわかる。しかし、十分に平面なテフロンフライパンにヤモリは裏返しに付くことは出来ない。つまり、吸盤方式で壁に付いているのではないといえる。したがって、原理的には真空でも（むしろ真空の方が）くっつけることになる。

8. おわりに

8. 1. ヤモリはどうやって歩くか

ヤモリが斜面上を歩くと、斜面を構成する分子との引力でその体を滑らないように支えている。斜面上に立つ人の足は、面を構成する分子との斥力により支えられる。平面上を歩く人の足は、面を構成する分子との斥力により力を受ける。これらの静止摩擦力は、反発力なので、次の一步を踏み出すときに進行を妨げる力にはならない。ところがヤモリの場合は、指と面とが引き合っているため、指を面からはがすのに力が必要になる。しかも、かなり強い力で引き合っているはずである。ヤモリは指と面とで強い引力を伴いながら歩いている。一体、どうやって指を面から引き剥がしているのであろうか。

分子間力をもたらす1本の毛に働く力は、きわめて小さい。毛の数が極めて多いので、強力な力を生み出しているのである。したがって、いっぺんに面からはがさず、端からばらばらとはがしていく歩き方をすればよいのである。透明な壁を歩いている最中に、足の裏側から見てみるとその様子がよく分かる。ヤモリは歩くと、指の先から自分の側に丸め込むように指をそらせている。図7を見ると、右前足の指が反り返っていることが分かる。右後ろ足の指は、ぴたりと壁にくっついていて、今から右前足を一步前に出そうとしているのである。



図7 指をそらせて面から指をはがす

8. 2. 摩擦力とは何か

高校物理の教科書に出てくる摩擦力と垂直抗力を別々の2つの力だと勘違いしている生徒が少なからずいる（実は教師にもかなり見受けられる）。2物体が押し合うとき、接近した原子間で反発力が働き、これが抗力 R となる。この抗力の面に平行な成分（摩擦力）と垂直な成分（垂直抗力）と理解していないと、摩擦力と垂直抗力の作用点を一致させないでばらばらに描いていることすらある。この誤解を含めて、摩擦力とは何かについて、ヤモリが面に及ぼす“摩擦力”を通して再度考えたい。

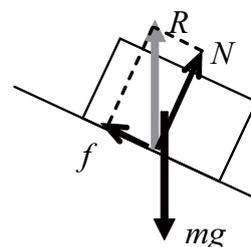


図8

滑り出す傾斜角度の実験では、最大摩擦力（あるいは摩擦角）を測っているように思えるがそうではない。摩擦力を広い意味で、「接触面に平行にずれようとする運動に抗う力」と定義すれば、ヤモリの分子間力による吸着力も摩擦力の原因の一つと言ってよい。しかし、高校物理で扱う静止摩擦力と動摩擦力では、垂直抗力との関係で抗う力をとらえている。高校物理で扱う摩擦力は、相手の面から押し返される抗力 R の面に平行な成分となっている（抗力の面に垂直な成分を垂直抗力と呼んでいる）。このとき、 $f = \mu N$ と表されるとき、摩擦係数 μ が示す意味は、抗力が接触面となす角度にある限界値があるということ

である。一方、ヤモリの吸着力には、垂直抗力が現れる必要性がない。鉛直な壁や逆さにくっつく天井では、面から押し返される垂直抗力自体が存在しない。

ヤモリの場合、斜面上で斜面方向につりあう力は垂直抗力の大小とは無関係である。そういう意味では、ヤモリを斜面上で滑らないで静止させている力は、高校物理の教科書で扱う静止摩擦力とは性質が異なる。ヤモリが鉛直な壁を押すことも無く歩くことを考えると、垂直抗力が無くては表れない高校物理の摩擦力との異質さがよく分かる。ヤモリが斜面を分子間力で垂直抗力とは関係なく滑らずに歩くことから、垂直抗力との密接な関係を持つものとして扱う高校物理の摩擦力、面からの抗力の成分としての摩擦力と垂直抗力の意味などについて、考える必要があることを痛感する。ヤモリが壁を歩き、フライパンで滑ることを通じて、摩擦について深く考える機会が生れる。

参考文献

- 1) “Adhesive force of a single gecko foot hair” Nature, 8 June 2000, pp.681-4
- 2) THE GECKO’S FOOT (Peter Forbes, HarperCollins Publishers Ltd., 2005)
- 3) http://www.md-fluoro.co.jp/html/t_seisitu.html 三井・デュポンフロロケミカル株式会社
- 4) NHK 高校講座物理「いろいろな力」: 2009年度第28回 講師 川角博
- 5) http://www.packing.co.jp/PTFE/ptfe_tokusei1.htm (株式会社パッキングランドホームページ)
- 6) http://www.md-fluoro.co.jp/html/s_teimasatu.html (三井・デュポンフロロケミカル株式会社Webページ)
- 7) 「ヤモリはフライパン上ですべるか」日本物理教育学会 2009年度研究大会 川角 博 原著講演論文