

なぜヤモリは壁に貼りついて歩けるのか？

東京大学 大学院総合文化研究科 教授 平岡 秀一

古代哲学者のアリストテレスは、紀元前4世紀に、木にいるヤモリを観察し「どんな体勢でも、たとえ頭を下に向けていても、木を駆け上ったり下りたりできる」と記述している。このように大昔からヤモリが自由に壁や木を動けることは不思議に思われていたが、この疑問に対する理解が図られたのは2000年に入ってからである。ヤモリの手と壁や木などの表面の間にはどのような力が働いているのだろうか？表面との接着力から、我々の身近にあるセロテープのような粘着が思い浮かぶが、ヤモリの手はさらさらしていて、粘着物はない（図1）。

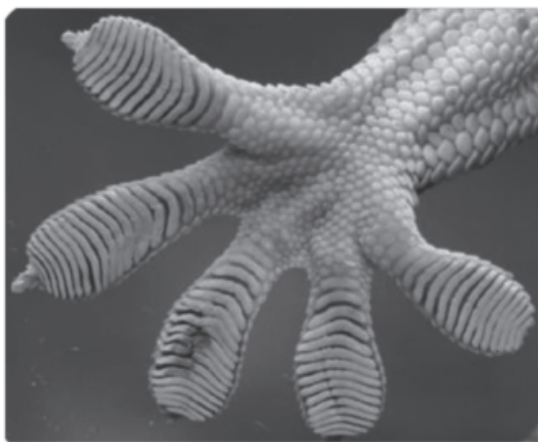


図1 ヤモリの手

確かに、ヤモリが窓ガラスや壁を歩いた後に、その跡（テープの剥がし跡）は残らない（最近の研究では、ヤモリの足跡から脂質分子が検出されたという報告もある）。ヤモリの他にも接着力を持つ昆虫や爬虫類、動物がいるが、さらさらと乾燥した手で自在に動く者は少ない。多くは表面と

自分の手の間に働く毛管力により接着を実現している。毛管力は表面間に水分子を介して働く力で、水を強く弾くような「疎水表面」では毛管力は弱い。長らく、ヤモリの手と表面間の接着も他の生き物と同じように毛管力に由来する可能性が示唆されていたが、2000年頃にファンデルワールス力であることが明らかにされた。

先に述べたように、毛管力は表面の疎水性・親水性に依存する。一方、ファンデルワールス力は疎水性・親水性との関わりはないが、表面の分極率と関係がある。ファンデルワールス力の多くは「分散力」と言われる力だと考えられている。原子や分子間に働く引力の多くは、静電気力により説明できる。例えばNaCl（塩）は Na^+ イオンと Cl^- イオン間に働く引力により結晶構造が作られている（イオン結合結晶）。静電気力による相互作用エネルギーは距離（ r ）の逆数の関係（ $1/r$ ）である。ところが、分散力はNaClに見られるように電荷を持たない原子や分子に働くため、不思議な力である。例えば2つの原子間に働く力を考えよう。2つの原子は電気的に中性なので、原子間に電荷はないため、静電気力的な引力は働かない。原子は正電荷を持つ原子核の周りを負電荷の電子が運動していると考えることができる。ある一瞬では、電子は原子核の周りで不均一に存在（分布）できるが、不均一な状態は刻々と変化し、時間平均をとると電子の分布は均一になってしまう。しかし、このように一瞬でも電荷の偏りが生じると、双極子が発生し、原子間の双極子の間に引力が生まれる。これが分散力である（図2）。分散力による相互作用エネルギー距離の6乗に反

イオン間の相互作用



分散力

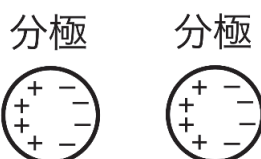


図2 イオン間の静電気力的な相互作用と2つの原子間に働く分散力の模式図。

比例する相互作用であり ($1/r^6$)、2つの原子が極めて近接しない限り有効な引力は働かない。一方、イオン間の相互作用エネルギーは距離に反比例するため、分散力に比べかなり遠方まで働く力である。分散力の発現の仕組みから考えると、電子が偏りやすい原子ほど分散力が大きくなると推察できる。この「電子の偏り易さ」は電場中に置かれた物質が電場に応答してどれだけ分極できる

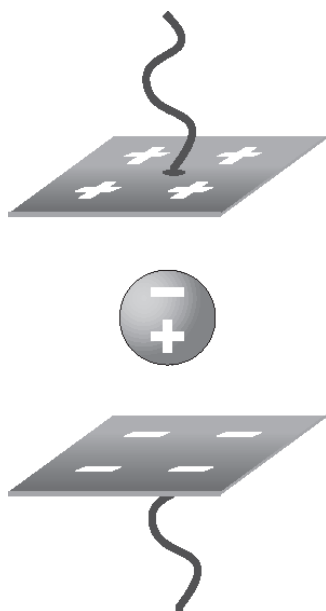


図3 分極率は外部電場に対する応答のしやすさに相当する。

かという、分極率により評価される (図3)。すなわち分極率の大きな原子、分子、物質ほど分散力が大きくなる。原子にある電子は核からの引力を受けている。核の電荷の影響が小さい電子は外部の電場の影響を受けやすいため、分極率が大きくなる。核からの影響を受けにくい電子とは、核からより離れた軌道に存在する電子に相当し、周期表でより下にある原子がこのような電子を最外殻にもち、分極率が高くなる。また、分子であれば、自由に電子が動ける方がよく、例えば芳香族のベンゼンは他の炭化水素に比べ分極率が大きい。

ヤモリの手の話に戻ろう。毛管力は表面が親水的なほど強く、一方、分散力は表面の分極率が高いほど強いという性質をもつことから、ヤモリの手の引力がどちらに由来するかを調べるには、親水性と分極率の異なる表面でその力を調べればよい。GaAs (ガリウム砒素) は疎水性が高く、分極率が高い。一方、 SiO_2 は親水性が高く、分極率が高い。したがって、ヤモリの手と表面の間の接着に毛管力が効いているなら、 SiO_2 表面との間でより強い引力が観測され、2つの表面におけるヤモリの手との引力に大きな差が出るはずである。逆に分散力が効いているなら、両表面とも大きな引力が働くはずである。実際に、これらの表面を用いて実験を行ったところ、2つの表面とも大きな引力が観測され、表面の親水・疎水性と関係がないことが明らかとなった。また、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) という、疎水性が高く、分極率の低い表面を利用すると、接着力が低下することが確認され、ヤモリの手と表面間には分散力が働いていることが示された。

上で示した PTFE を用いた実験のように、分極率がとても低い表面では分散力は劇的に低下するが、このような物質は稀で、他の物質ではある程度の引力が働き、分散力は表面の材質の大きな影響を受けない。一方、分散力は距離の6乗に反比例する引力であることから、ヤモリの手の表面と物質の表面がとても近接していなければ十分な引力は得られない。一見平滑に見える表面も、分子レベルで見ると、かなり凸凹している。分散力

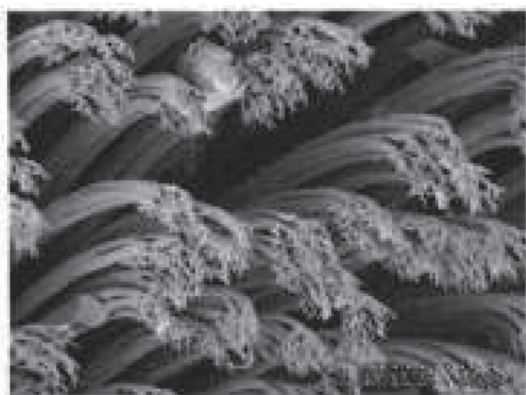


図4 ヤモリの手の表面の電子顕微鏡写真。

は分子レベルで表面が綺麗に噛み合った時に大きな力が働くため、ヤモリの手はいろいろな形（粗さ）の表面に対してピッタリと合わせているはずである。ヤモリの手を電子顕微鏡で観測すると、指にはとても細い毛が1平方メートルあたり10万から100万本も生えており、その先端はさらに直径100ナノメートル程のナノメートルサイズの細い毛に枝分かれしている（図4）。

従って先端は1平方メートルあたり、10億本もの毛がびっしりと詰まっている。このため、ヤモリの手の先端の毛は、様々な表面形状にピッタリと合い、自分の体を支えるほどの大きな分散力を得ている。

分散力が素材の影響を受けないことは、人工的に物質を開発する上では、いろいろな元素や分子を使って同様の材料を開発できるという大きな利点がある。生体が使っている仕組みに学び、同等の機能を持つ物質を人工的に作る試みは「バイオミメティクス」として高い関心を集めている。ヤ

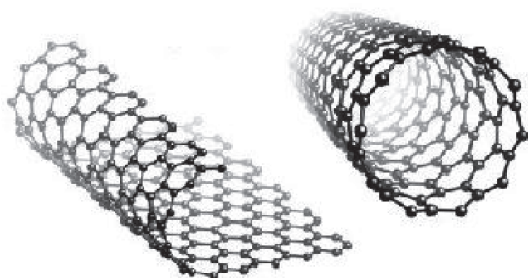


図5 カーボンナノチューブはグラフェンを巻いて円筒形にした分子。

モリの手の接着が分散力であることが報告されてから、ヤモリと同じように分散力で接着する材料の開発が進められている。ヤモリの手の強い接着力の仕組みは、様々な粗さの表面に対して手の表面の毛を分子レベルで合わせるために、ナノサイズの毛をびっしりと生やしていることであった。人工系でこれを模倣するために、シリコン基板上に鉄とアルミニウムをマイクロメートル四方でパターン修飾し、これにエチレンと水素を加え加熱することで、金属パターン上にカーボンナノチューブを成長させ、ヤモリの手のように接着力を示すか調べられている。

カーボンナノチューブは炭素の同素体の一つで、炭素の同素体としては、他にダイヤモンド、シート状のグラファイト、フラーレンと呼ばれる球状の炭素分子も存在する。

カーボンナノチューブはグラファイトの1枚のシート（グラフェン）を巻いて作られた円筒状の分子で、近年様々な材料への応用が期待されている（図5）。カーボンナノチューブは軽量で、高い強度を持つことから、テニスラケットの材料などに使われ、すでに実用化されているが、これ以外にも興味深い特性がある。グラフェンは蜂の巣のように六角形からなる構造である。これを巻くときにはいろいろな巻き方が可能で、巻き方の違いでカーボンナノチューブは半導体にも金属にもなる。また、半導体の特性は、カーボンナノチューブの構造とその直径で決まり、構造と物性に関する理解は理論的に明らかにされている。しかし、残念なことに、ある一種類のカーボンナノチューブだけを選択的に合成する、もしくは、いろいろ

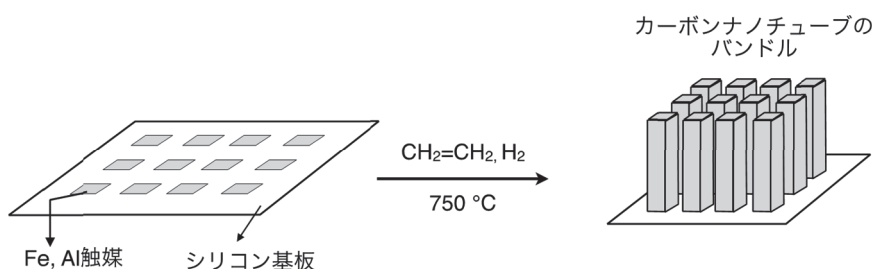


図6 ヤモリの手の表面を模倣した材料の作成の模式図。

と混ざったカーボンナノチューブの中から、ある1種類だけを綺麗に分離する技術は今のところ無く、単品のカーボンナノチューブが持つ本来の力を発揮させた応用に手が届かないというのが現状である。このため、現在、カーボンナノチューブの合成、もしくは分離精製の技術のさらなる開発が精力的に行われている。

シリコン基板上にカーボンナノチューブを生やした物質では、ヤモリの手と同程度の接着力を実現できることが明らかになった。また、はじめに金属をパターン化する段階で、1つのパターン部分の大きさをコントロールできる。すなわち、この1つのパターンはヤモリの手の1本の毛に相当するため、1本の毛の太さを変化させることができる訳である。また、カーボンナノチューブの成長もコントロールできるため、毛の長さも変化させられる(図6)。このように、長さや太さの異なる様々な材料を作成し、その接着力を調べると、なんとヤモリの手よりも2倍から3倍も強い引力を持つ表面を作成できることも示された。このように、予想通りヤモリの手の毛のパターンを模倣した構造を作成すれば、材質が変わっても同等の接着力を示すことが証明された。

分散力を使うことで、いろいろな面に対して強い接着力を示し、ヤモリはこれを巧みに利用し壁に張り着くことができることが明らかとなったが、1つの疑問が残る。ヤモリは壁に張り着いたまま動かないわけではなく、素早く動きまわることができる。通常、接着力が強ければ、剥がすためには強い力が必要で、接着力が強いほど剥がしにくくなるはずである。この一見矛盾する事実は何の

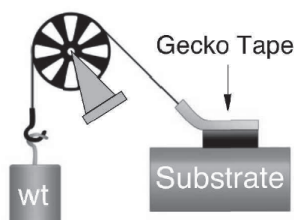


図7 ヤモリの手の表面を模倣した材料を剥がすために必要な力の測定の模式図。

ように解釈すればよいのであろうか? 先程紹介した人工的に作成されたカーボンナノチューブをパターン化した材料を使い、材料の一端を掴んで、いろいろな角度から引っ張り、剥がすために必要な力が計測された(図7)。

その結果、このテープは平面方向に引っ張ってもなかなか剥がすことができないかわりに、斜め方向へ引っ張ると剥がすために必要な力が劇的に低下することが明らかになった。すなわち、このテープはズリにはとても強い一方、斜め方向へ引っ張る限りは簡単に剥がすことができ、ヤモリはこの分散力により接着した面の持つ特性を巧みに利用していることになる。

分散力で接着する面は、これまでの接着とは全く異なる原理で2つの平面をくっつけていることから、実用化の試みが行われている。スタンフォード大学のロボット工学の研究者は、ヤモリの手の表面を模倣した表面をつけた、ヤモリ型のロボットの開発を行っている(図8)。このロボットを使えば、これまで他のロボットでは行けなかった所へ行き、垂直の壁にも長時間留まることもできる。また、国内では、2012年に日東電工が「ヤモリテープ」を開発している(図9)。先ほど紹



図8 ヤモリを模倣したロボット。

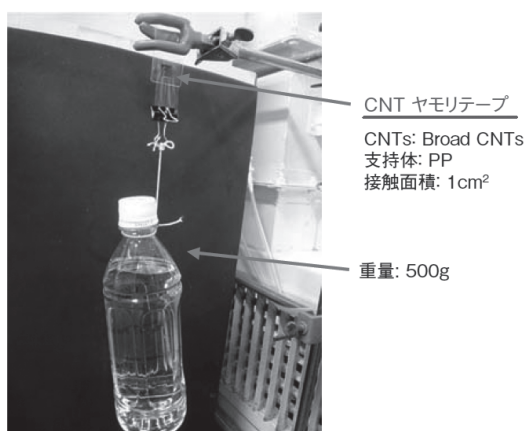


図9 ヤモリテープ。

介したように、この場合もカーボンナノチューブを毛として使っており、基板上でカーボンナノチューブを成長させた後に、溶融状態のポリプロピレン基板に埋め込むことでテープ状にしている。テープの接着力はヤモリの手の表面の8割程度を実現している。カーボンナノチューブを利用することから、従来のテープの替わりになるには、生産上解決すべき問題があるが、このテープの持つ、剥がし跡が全く残らず、繰り返し利用も可能であるという特徴を生かした利用がいろいろな分野から生まれそうだ。

分散力は原子・分子間に働く力の中で、最も弱い相互作用で、さらにあらゆる物質間に普遍的に働く相互作用である。忘れられがちな力がヤモリの体を支え、さらに素早く動くために必要不可欠な力であるというのはなんとも興味深い。紀元前にアリストテレスの抱いた身近な事柄に対する疑問が、先端のナノ科学に結びつくことを考えると、まだまだ、いろいろな謎が我々の住む自然界に潜んでいるかもしれない。

出典

図1：

<http://www.asminternational.org/documents/10192/19735983/amp17207p11.pdf/7c73171a-6e8b-4e2a-ad6c-b0cad7e3620a>

図3：

Ken. A. Dill, Sarina Bromberg, *Molecular Driving Forces 2nd Edition*.

図4：

http://www.nikkei.com/article/DGXNASDD2705O_X20C12A4000000/

図5：

<http://blog.goo.ne.jp/marumasamaru2010/e/2a4aca32fd34f02a5522e5de62d9946e>

図7：

L. Ge, S. Sethi, L. Ci, P. M. Ajayan, A. Dhinojwala, "Carbon Nanotube-Based Synthetic Gecko Tapes" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2007, 104, 10792-10795.

図8：

<http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBot>

図9：

『日東電工技報』90号, 2009年