

特集記事・1

鉄鋼業を取り巻く独創的な発想に基づく
研究・技術開発

潤滑油はなぜ潤滑するのか

—バナナの皮が語る滑りの極意—

Why Does Lubricating Oil Lubricate?

—The Essential Mechanism Enlightened by a Slip on a Banana Peel—

馬渕清資 北里大学
名誉教授
Kiyoshi Mabuchi

1 滑りを良くする技術

滑りを良くするために、身の周りにあるヌルヌルする物を滑り面に塗布したのが、潤滑技術の起源である。古代エジプトでは、ピラミッドの石材を滑らせて運ぶときにオリーブ油を使ったことが知られている。現在の潤滑油も、原油のヌルヌルした感触から、動力機械の潤滑への利用が始まった。

近代になって、出光の創始者が不凍潤滑油を開発して、満州鉄道に売り込んだ逸話とか、潤滑油が使えない宇宙空間で想定外のトラブルが起きることなど、歴史的に重要な場面で、潤滑技術がしばしば登場してきた。ところが、潤滑学がトライボロジと進化した今でも、学術分野としての高い地位を得ているとは言い難い。その背景には、摩擦や摩耗を予測する基礎理論が形成できていないという事情がある。ヌルヌルする物質を塗ればよいという単純さにも関わらず、潤滑油がなぜ潤滑するのかという素朴な疑問に答えるのは、容易でない。

たとえば、「摩擦」は、身近な力学現象でありながら、摩擦力の発生源についての明確な答えは、得られていない。物質間の力の相互作用の本質に関わる問題なので、一筋縄では行かないからである。

摩擦力は、2つの固体の接触部分でのせん断力である。そのせん断力は、固体同士の接触の場合は、真実接触部分の破断に要する力であるから、その力は、真実接触面積と破断強さの積になる。ここまでは、単純明快である。しかし、界面というのは、実在する「物質」ではないので、材料力学を基に破断強さを推定することができない。その演繹理論が構築できないので、摩擦力の予測は、AIをもってしても不可能になっている。

摩擦力の力学解析ができないので、その削減を目指す潤滑技術についても、理論の構築が難しい。唯一の成功例である

レイノルズの流体潤滑理論にしても、その適用範囲は幾何学形状の滑り面に限定される¹⁾。

とはいえ、「滑る」というのは、身近でありふれた現象である。難しい議論はさておき、滑る現象を子細に見ていけば、滑りを極めるためのヒントが得られるかもしれない。

バナナの皮の滑り

私が、バナナの皮の滑りを調べてみようと思いついたきっかけは、誰もが知る滑りの権化が、「はたして本当に滑るのか」という素朴な疑問からである。バナナの皮で滑って転ぶ場面は、マンガやコメディでありふれたものであるにも関わらず、滑りの良さを正確に評価した報告がなかったことにも、後を押された。

まず、最も簡単な滑りの測定法として、滑り台の上にバナナの皮を置いて、滑り出す斜面の角度、すなわち摩擦角を求める方法を試みた。驚いたことに測定されたバナナの皮の摩擦角は、70°を越えてしまった(図1)。金属片など一般の材料の摩擦角は30°程度であるから、バナナの皮が滑るとは、とても言えない。しかし、ヒトが踏んだら滑るのは確かだよ

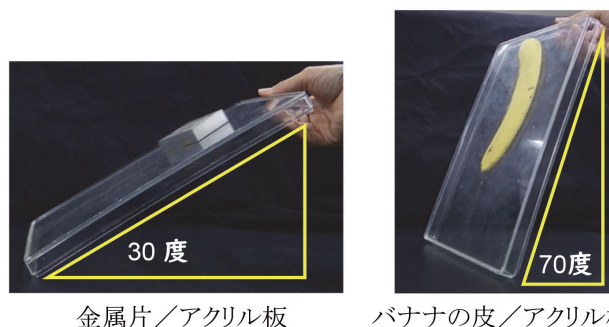


図1 摩擦角測定の結果

うである。どうやら「踏む」ことに、意味があると考えられた。

とは言え、バナナの皮を踏む瞬間の摩擦角を測定するのは、不可能である。そこで、バナナの皮を多軸力覚センサの上に置いて、足で踏んだ瞬間の垂直抗力と摩擦力を同時に測り、摩擦係数を求めた(図2)。

数十回の測定を繰り返し、靴と床材料の間の摩擦係数は、0.412で、それが、バナナの皮を挟むと0.066に低下することを明らかにした(図3)²⁾。つまり、バナナの皮を踏むと、約6倍ほど滑りやすくなる。この摩擦係数の値は、スキーやスケートよりわずかに大きい程度であり、確かにバナナの皮はよく滑ることがわかった(図4)。



図2 荷重センサを用いた摩擦測定の様子。踏むという条件を再現

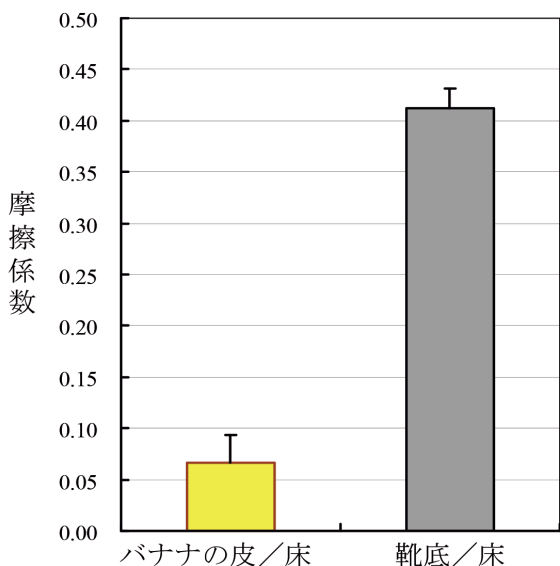


図3 バナナの皮と床材の間の摩擦係数

バナナの皮の摩擦測定は過去に例がなく、是非、公表したいと考えた。そこで、論文としてまとめるために必要な実験を追加した。

まず、バナナの皮を乾燥してみた。水分が失われると固くなって、全く滑らなくなった。それで、バナナの皮の滑りには水分が不可欠であることがわかった(図5)。また、バナナの皮を踏みつけてしばらくすると、次第に滑らなくなった。これは、バナナの皮の水分が、次第に押し出されて、滑り面から失われるためと推論できた。

水分の役割を調べるため、他の果物の皮と比較してみた。バナナの皮より水分の少ないミカンの皮は、確かに滑りが悪かった。ところが、バナナの皮より水分を多く含むリンゴの皮やキュウリは、バナナの皮ほど滑らなかった(図6)。つまり、水分の働きは不可欠だけど、それだけでは滑りの良さを説明できないということがわかった。

踏むことで、滑りが良さを考えるヒントになったのが、バナナの皮の表面の様子である。バナナの皮の内側は、むきたての新鮮な状態では、白く、さらさらしている。それが、踏みつけた後には、半透明の褐色に変色する。この変化を詳細に

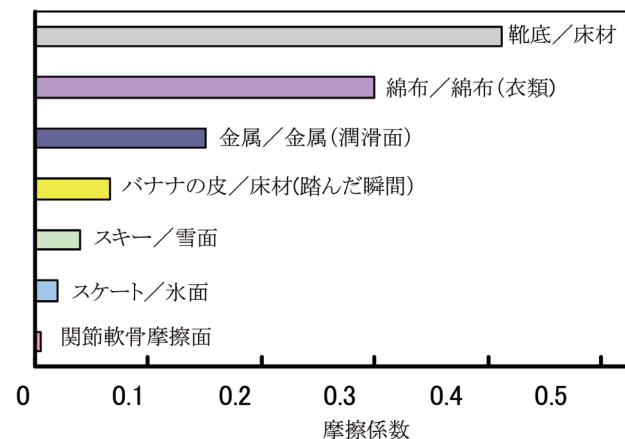


図4 いろいろな材料の摩擦係数

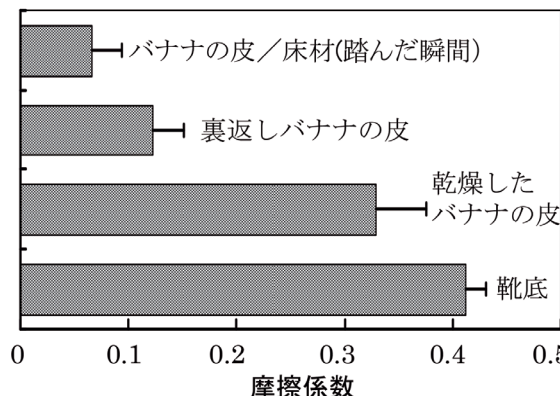


図5 いろいろな条件でのバナナの皮の摩擦係数(床材の上)

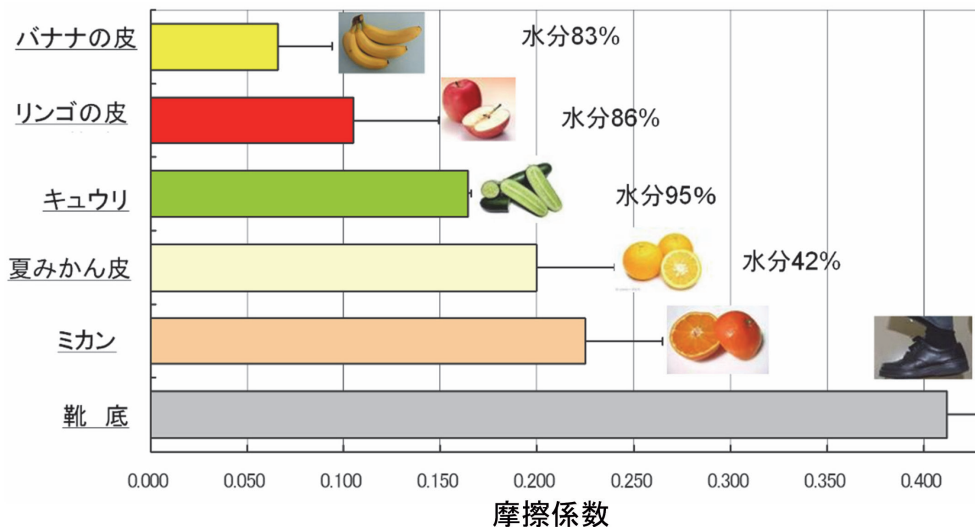


図6 いろいろな果物、野菜の摩擦係数。水分含有量だけでは滑りを説明できない

調べるために、実体顕微鏡で観察してみた(図7)。新鮮面では、白い小胞が観察された。それを押しつぶすとヌルヌルの粘液に変化していた。

バナナの皮に粘性をもたらす成分は、何か。乾燥すると硬く固化して滑りの良さが失われることから、バナナの皮の粘液の成分は、油脂ではなく水溶液である。放置しても異臭を発しないことからタンパク質由来ではない。水に溶けて粘性を形成する物質で、他に考えられるのは、糖類である。砂糖水でも蜂蜜でも、甘い液体には、例外なく粘性がある。甘い果物ほどヌルヌルするといった状況証拠もある。しかし、バナナの皮は、粘性の高さの割に甘みは薄い。分子量の高い成分を多く含むからである。植物の成分として、分子量の大きい糖類として一般的なのは、マンナンやフコイダンなどである。高分子の糖類という点で、動物の粘液成分として代表的なヒアルロン酸などと同じ多糖類に分類される成分と推論できた。

これらの結果から、バナナの皮の小さなつぶつぶが、踏みつけられると破裂して、高分子の多糖類を含む粘液が浸みだして、それが、潤滑膜を形成するという、小胞ゲル潤滑の仕組みを提案することができた(図8)。

こうして、Frictional coefficient under banana skinと題した論文が完成した³⁾。バナナの皮という世界共通の笑いの種を研究対象としたということで、論文がアクセプトされたときには、イグノーベル賞の受賞を確信した。

2 粘液による潤滑

イグノーベル賞は、怪しいところがあるけれど、一応世界に名が知れているということで、受賞後に多くのメディアの

無傷の表面

踏んだ後の表面

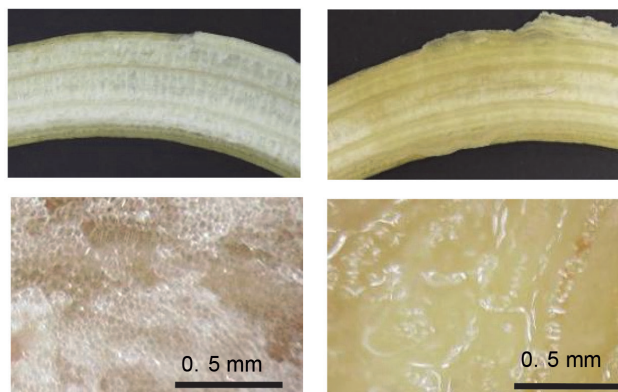


図7 バナナの皮の表面。下図は実体顕微鏡像

取材を受けた。その中で、バナナの皮は、踏んだときにしみ出す粘液によって滑るという説明を繰り返した。

「滑りやすいヌルヌル」と「粘液」は、ほぼ同じ意味であるから、この説明に違和感はなく、一般に受け入れられた。流体潤滑理論によっても、粘度が高いほど潤滑効果は高いので、粘度の高い粘液は、文字通り滑りがよいことは明らかだった。

ただし、粘性は流動抵抗であるから、荷重が軽いと、相対的に粘性抵抗の比率が増して、摩擦係数が増大する。バナナの皮を斜面に置いた条件では、滑らなかったのはそのためである。踏むと、荷重が増すので、粘性抵抗の比率が低下して、滑りが良くなると考えるのは、合理的だった。

このことを検証するため、力が加わった時間に依存した摩擦の変化を調べる実験を追加した⁴⁾。その結果、力を加えてから時間が経過すると、次第に摩擦が上昇することがわかっ

た(図9)。滑り面の粘液が、スクイズ膜を形成して、潤滑効果を示すと推論できた。

この実験において、摩擦の増大は、静止した状態から動き出す、いわゆる静摩擦の中で起きた。粘液の成分である高分子の繊維は、流動を止めている状態では、繊維の軸方向に力を支えることで流れを妨げていて、滑りを開始すると繊維の腹の部分で滑るので、スムーズな流動を助ける。この現象は、粘液の成分である高分子の繊維が、静止状態から運動状態に移行する際、繊維が、流れの方向に配向して生じると、推定された(図10)。

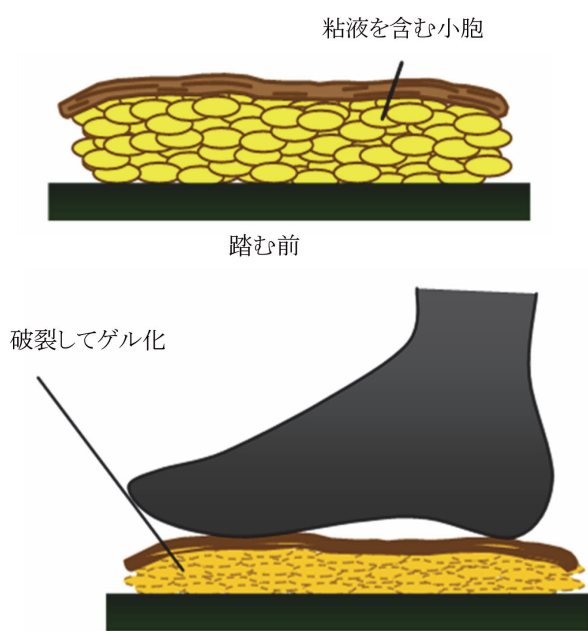


図8 小胞ゲル潤滑。模式図

3 有機高分子の潤滑効果

歩いていて、何かぐにゃっとした物を踏んで、ズルッと滑った時、どう思うか。おそらく、濡れ落ち葉や動物の排泄物など、生物由来の何かを踏んだと、直感するだろう(図11)。踏めば滑るのは、バナナの皮だけが特殊なのではなく、生物の構造をなす有機物は、すべて、踏めば滑る。

長野のJR小海線は、8年に1度、ヤスデが大発生して線路を埋め尽くし、電車が滑って運行が中止することが知られている⁵⁾。その名もキシヤヤスデ。四国の高徳線では、2015年5月に、同様の理由で毛虫が運行を止めた⁶⁾。

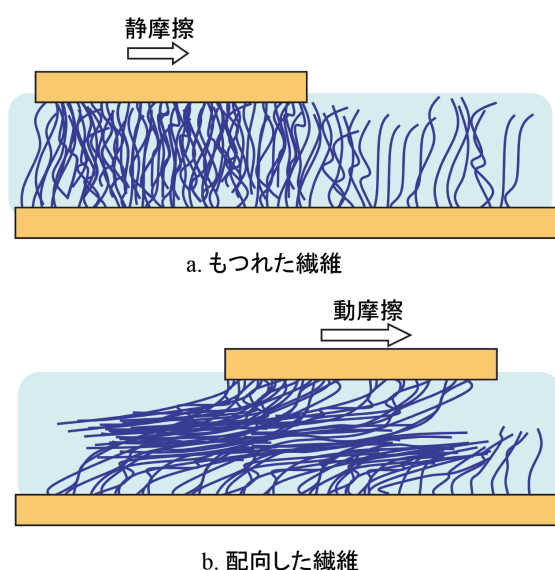


図10 高分子繊維の配向による静摩擦と動摩擦の発生。粘液の成分である高分子の繊維は、流動を止めている状態では、繊維の軸方向に力を支えることで流れを妨げている。滑りを開始すると、繊維の腹の部分で滑ることで、スムーズな流動を助ける。それが、滑りをよくする効果を生む

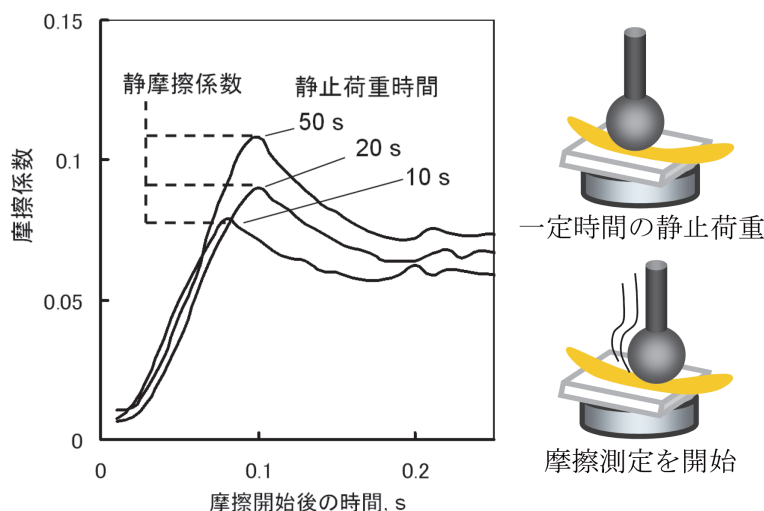


図9 バナナの皮とプラスチック平板間の摩擦係数。力を加えて静止状態を保ち、その後で摩擦を測定

一方、生物に由来しない物質、無機物質ではズルッと滑ることはない。高い粘性を発生させる有機物は、生命にしか合成できない。

余談だが、ここから、生物の定義が導かれそうである。

「生物とはズルッと滑る物である。」

この定義は、間違いなく生命の本質を突いている。

ところで、粘液の潤滑作用は、生物体の動きを支える上で重要な機能である。粘性抵抗が滑り速度に比例して増すので、心臓や眼瞼のように、高速滑りの摩擦部分では、粘液の粘性を低くする必要がある(図13)。そのため、関節液の粘性が水の一万倍あるのに対して、涙液は水の十倍程度、心臓の周囲の粘液である心嚢液は、水の数倍の粘性になっている⁷⁻¹¹⁾。また、子宮頸管粘液は、排卵時に精子の侵入を歓迎す

るために低粘度となり、月経時やさらに受精後には、排卵時の100倍の高粘度になる¹²⁾。それにより外部からの異物の侵入を防ぐ機能を発揮する。目的に即した粘性を有する粘液を、体内の各組織に配置していることは、生命の高い能力の一端である。

こうした力学的な滑り条件に依存した粘性の管理の原理は、工業部品においては、ストライバック曲線で表現されている。しかし、この曲線には、具体的な数値が示されていないので、実際の現場では、経験的な方法によって、デザインするしかないのが、実情である。生物体は、それを具現化している。

3.1 繊維構造の潤滑効果

粘液の内部の高分子繊維の異方性による潤滑効果は、繊維の側鎖同士の電気的な反発による斥力によって発生する。この仕組みは、水溶液の中の繊維でなくても、成立する。その仕組みが、重要な役割をなすのが、動物の筋肉組織の滑りである。

筋肉の構造は、図12のように、アクチンとミオシンという



図11 ズルッときたら、それは生き物

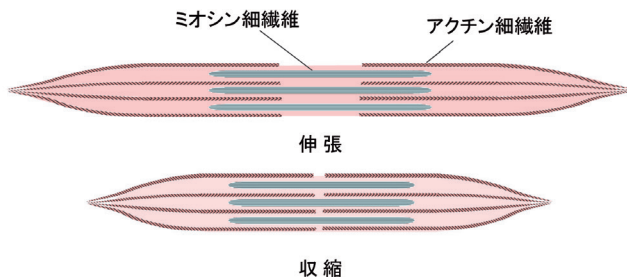


図12 筋肉の内部。繊維間の滑り。繊維の側面では、摩擦がゼロ

- (1) 血液
Wells RE, et al. 1962
- (2) 心嚢液
Honda A, et al. 1986
- (3) 涙液
Tiffany JM 1991
- (4) 胃液
Castro-Combs J, et al. 2014
- (5) 子宮頸管粘液(排卵時)
Clift AF, et al. 1953
- (5) 子宮頸管粘液(月経時)
Clift AF, et al. 1953
- (6) 関節液
Sasada T, et al. 1988

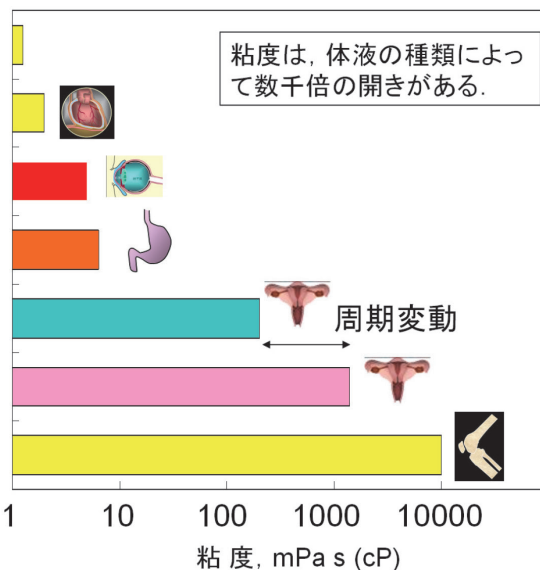


図13 人体内の粘液の粘度

細繊維が折り重なって束になっている。二種の繊維の相互作用で筋肉が収縮する。その収縮の際、繊維の側面が滑る。これらの細繊維は、直径が数ナノメートル程度なので、上腕の筋肉の場合、断面辺りの本数は、兆の桁になる。その表面積は、全体で1万平方メートルを越える。筋肉の収縮速度は、秒速数センチメートルであるから、ここに、粘性係数1mPa sの水が存在した場合、上腕（二の腕）の筋肉で発生する摩擦力は、概算で10 MNにもなる。つまり、筋肉の内部での繊維を液体で潤滑することはできない。

実際には、筋肉が動作する際に抵抗は感じられない。筋肉の繊維の滑り面は、自己潤滑状態で摩擦ゼロという、理想の潤滑状態にあることを意味する。これは、繊維の層状構造が、高い潤滑性能を示す例となっている。

3.2 膜構造の潤滑効果

心臓や肺などの表面は、周囲の組織との摩擦を日夜絶え間なく続けている。特に、日夜激しい摩擦を続けている心筋と心囊の関係は、あたかも、軸と軸受けの関係になっている（図14）。こうした臓器の表面の滑りは、生命にとって重要であり、その動作に摩擦抵抗があってはならない。その優れた潤滑状態を支えているのは、細胞の表面を覆っている膜である。

細胞を覆っている膜は、電気的な極性のある分子が配向することで、形成されている。そのため、表面同士は、電気的な斥力が発生して、接触を防いでいる（図15）。それによって、

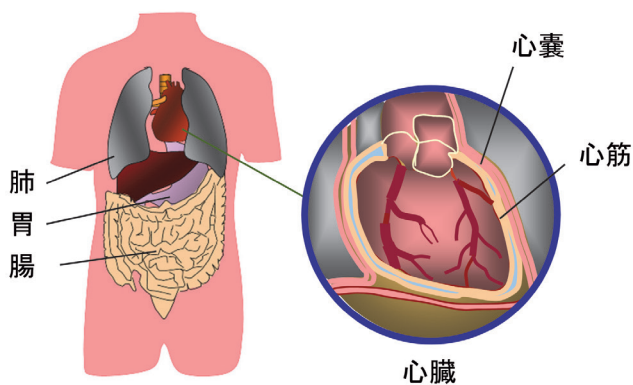


図14 臓器表面の滑り。
心筋と心囊は、軸と軸受けの関係となって、極めて良好な潤滑がされている。その他の臓器も動くときに、周囲組織との間で滑っている

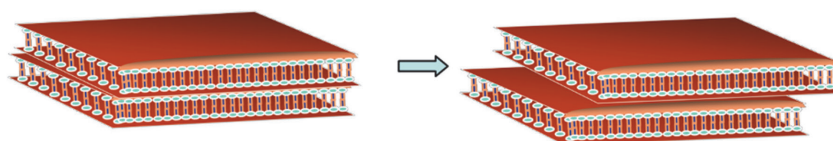


図15 生物組織表面の膜の滑り。
極性基を有する分子で構成された膜同士は電気的に反発するので、滑りがよい

体内の臓器や器官が、癒着することはない。この膜の間の斥力が、滑りの良さを支える潤滑効果を生んでいる。

4 潤滑油は有機物

繊維や膜構造を形成する高分子は、すべて有機物であるから、滑りを良くする物質は、すべて有機物である。科学技術には、有機物を生成する能力がないので、潤滑技術は、すべて、生物の生み出す有機物を潤滑剤として利用する方法に依存している。一般の機械において用いられている工業用潤滑油も例外ではない。その原料となる石油は、生物体の化石が変化した有機物であって、そこから加工されて作られた潤滑油は、有機材料である。工業用潤滑油に必要な粘性と境界潤滑性能としての界面活性は、いずれの有機物としての物性であり、それは、生物の機能と深く関わっている（表1）。

4.1 潤滑油の粘性

流体潤滑性能は、一般的な稼働条件下では、潤滑油の粘性に依存して向上する。その粘性は、油を構成する分子が繊維構造をなすことで、形成される。

有機材料の中でも、分子量の小さいベンゼンやアルコールは、粘度が低いので、潤滑油の原料にはならない。しかし、繊維の炭素鎖を長くしていくことで、分子量の大きい化合物を生成することが可能である。

壁面に拘束された繊維が、流動に伴うせん断変形を受けると、繊維がもつれて、エントロピー変化に由来する抵抗力が発生する。それが、粘性抵抗になる。繊維が長いほど抵抗が増すので、分子量が大きくて繊維のサイズが大きいほど、粘性が高くなる。こうした繊維成分による粘性の形成は、生物由来の粘液に特有の仕組みである。

高分子物質の粘度の変動の幅は大きく、1 mPasから、高分

表1 生物と機械、潤滑メカニズムの対応関係

	流体潤滑を支える粘性	境界潤滑を支える分子膜
生物	繊維高分子の水溶液	臓器、器官の細胞膜
機械	潤滑油（鎖状炭化水素）	金属表面の分子膜

子物質の数万Pasまで、広く分布する。バナナの皮の成分などの多糖類の水溶液も粘度は高い。しかし、水溶液は、水分が蒸発すると固化するので、空中で長時間の潤滑性能の維持ができない。それに対して、油は、分子量が十分に大きければ揮発性は乏しく、潤滑性が失われることはない。

4.2 潤滑油の境界潤滑性能

流体潤滑が成立しない条件下でも潤滑効果を示すように、潤滑油には、境界潤滑性能を発揮する界面活性剤などの添加物が加えられている。電気極性のある分子を配向させて形成した分子の膜によって、摩擦面に電気的な斥力を発生させることで境界潤滑効果を得る。この膜の形成の仕組みは、内臓などの生物組織の表面の膜構造と同じである。

5 生物由来の有機物に依存した潤滑技術

機械の摩擦部分の潤滑に用いられるエンジンオイルなどの潤滑油は、すべて、生物が紡ぎ出した有機物である。その潤滑は、高分子の紡ぐ繊維や膜の側面の滑りが、支えている。科学技術は、生命に依存せずに高分子物質を作ることのできないので、潤滑技術は、すべて、生物に依存している。

潤滑油が、潤滑するのは、生命の生み出した有機材料だからである。

参考文献

- 1) O.Reynolds : Phil. Trans. Roy. Soc., 177 (1886), 157.
- 2) F.P.Bowden and D.Tabor. : The Friction and Lubrication of Solids, Oxford University Press, New York, (1954), 322.
- 3) K.Mabuchi, K.Tanaka, D.Uchijima and R.Sakai : Tribol. Online, 7 (2012), 147.
- 4) 馬淵清資, 酒井利奈 : トライボロジー会議2015, (2015) 抄録 E37.
- 5) 森林総合研究所 : 研究の森から, 5 (1996), 2. <http://www.affrc.go.jp/pubs/mori/documents/mori-52.pdf>
- 6) 毎日新聞 : JR四国高德線毛虫大量発生で車輪空転運休, 5/3 (2015) .
- 7) 笹田直, 塚本行男, 馬淵清資 : バイオトライボロジー, 産業図書, (1988), 42.
- 8) R.E.Wells and E.W.Merrill : J Clin. Invest., 41 (1962), 1591.
- 9) A.Honda, Y.Ohashi and Y.Mori : Chem. Pharm. Bull., 34 (1986), 4844.
- 10) J.M.Tiffany : Int. Ophthal., 15 (1991), 371.
- 11) J.Castro-Combs, C.J.Garcia, M.Majewski, G.Wallner and J.Sarosiek : Dig. Dis. Scie., 59 (2014), 2730.
- 12) A.F.Clift and J.Hart : J Physiol., 122 (1953), 358.

(2021年9月27日受付)