

ソフト&ウェットマターの界面運動から探る生体運動の秘密

(北大院理) 龔 劍萍・加々田剛・黒川孝幸・長田 義仁

関節の滑り摩擦係数は何と (0.001~0.03) しかない。これは、潤滑剤の助けを借りても固体の摩擦係数は 0.1 前後でしか得られないことと比べると、如何に小さいかは分かる。関節に限ったことでなく、組織と組織の間が実に滑らかに動くことは、生物運動の大きな特徴のひとつである。例えば、眼球を動かしても少しの抵抗も感じない。魚の遊泳は船などの人工物に比べて格段に効率が良い。数 μm という極めて細い毛細血管は血液を詰まらせることなくスムーズに流しており、飲み込んだ食物はいつのまにか食道から胃、そして腸へと下っていく。これらの生体界面現象は摩擦の観点から見た場合、実に不思議であり、40 億年の生命進化がもたらした成果であろう。

では、生物のどこにその秘密が隠されているのであろうか。その答えは生物組織がゲル状態にあることに帰結される。上述の生体間の小さい摩擦はそれぞれ眼球とまぶた、食物と内臓表面、魚の体皮と水、血液と血管といったソフト&ウェットな組織界面や生物表面で起こっている。筆者らは高分子ゲルの表面摩擦をこの 10 年近く系統的に研究してきた。その結果、ゲルの摩擦挙動は固体とまったく異なり、以下の特徴を示すことがわかった。

第一の特徴は、ゲルの摩擦力 F が固体と比較して圧倒的に小さく、しかも摩擦力は荷重 W に単純に比例しなく、冪則 $F \propto W^\alpha$ ($0 \leq \alpha \leq 1$) に従う。

第二の特徴は、ゲルの摩擦力は見かけの接触面積 A に依存することである。固体表面の場合、摩擦力は $F \propto W^1 A^0$ で表され接触面積には依存しない。ところがゲルの場合は、摩擦力を $F \propto W^\alpha A^\beta$ と表現すると、 $\alpha + \beta \cong 1$ の関係にあるようである。ここで、単位面積あたりの摩擦力を f とすると、

$$F \propto W^\alpha A^\beta (\alpha + \beta \cong 1) \Leftrightarrow f \propto P^\alpha$$

となる ($P = W / A$ は圧力)。すなわち、単位面積あたりでみたときの摩擦力は圧力の α 乗に比例する。固体摩擦が従うアモン・クーロン則は $\alpha = 1$ の場合に相当することが分かる。

第三の特徴は、摩擦力が滑り速度に依存することである。速度に対する摩擦力の依存の仕方は、接触界面における相互作用の仕方や滑り速度と高分子網目の緩和時間との大小関係によって大きく異なる。

ゲルが示す摩擦力は、相手の基板の性質やゲルの表面構造によって大きく変化する。たとえば、互いに異なる電荷を保持した組合せでは、ゲルが破壊してしまうほど大きな摩擦力が発生することに、同じ符号の電荷をもつ高分子ゲルどうしの組合せでは、摩擦力が極めて小さく、0.001 という小さい摩擦係数が実現できる。後者の場合、ゲル表面に高分子ブラシ構造を導入すると、摩擦力がさらにその 1/10 まで減少する。

本講演では、「ゲル」というソフト&ウェットマターの摩擦の特異性を紹介するとともに、生体物質の超低摩擦の秘密を探る。ゲルは医学的、生物学的材料として重要であるだけでなく、近い将来、ゲルを低摩擦素材として応用することができるようになれば、ベアリングを使わず、それでいて生体のようにしなやかに動く機械や、今まで摩擦の問題があつて作ることが出来なかったマイクロマシンの作成など工業的見地からも役立ち、次世代の超低摩擦新素材の 1 つになりうると確信している。

参考文献

- 1) J. P. Gong, M. Higa, Y. Iwasaki, Y. Katsuyama, Y. Osada: *J. Phys. Chem. B* 101, 5487(1997).
- 2) J. P. Gong, Y. Osada: *J. Chem. Phys.* 109, 8062(1998).
- 3) J. P. Gong, Y. Iwasaki, Y. Osada, K. Kurihara, Y. Hamai: *J. Phys. Chem. B* 103, 6001(1999).
- 4) J. P. Gong, G. Kagata, Y. Osada: *J. Phys. Chem. B* 103 (1999) 6007.
- 5) J. P. Gong, Y. Iwasaki, Y. Osada: *J. Phys. Chem. B* 104 (2000) 3423.
- 6) J. P. Gong, T. Kurokawa, T. Narita, G. Kagata, Y. Osada, G. Nishimura, M. Kinjo, *J. Am. Chem. Soc.* 123, 5582(2001).
- 7) G. Kagata, Y. Iwasaki, J. P. Gong, Y. Osada, *J. Phys. Chem. B*, 106, 4596 (2002).
- 8) G. Kagata, J. P. Gong, Y. Osada, *J. Phys. Chem. B*, submitted.