

ナノ分子「フラーレン」で摩擦ゼロ

愛知教育大学 物理領域教授 三浦 浩治

ナノマシンやマイクロマシンは、次世代産業創生の起爆剤になると期待されている。かの有名なファインマンは、分子ベ어링は摩擦のない分子機械の基本要素になることから、ナノマシンとマイクロマシンの実用化に多に役立つだろうと予言した。しかし、これまでのマイクロマシンの現状は、実用化には程遠いものであった。半導体微細加工技術を用いた微小電気機械システムの開発が進んでいるが、微小になればなるほど^{しょうどう}摺動機構（滑り機構）が問題になる。たとえば微小な歯車を作って噛み合わせたとしても、弱い結合力（ファンデルワールス力）や化学結合などが顕在化し歯車同士がくっつきあって回転できないことが起こりうる。このため、ミクロの世界の機構部品では、こうした結合力に影響を受けない新しい潤滑システムの構築が必要不可欠になっている。

分子スケールのマシンを作るとき、研究者は日常の巨視的なギア、ホイール、ピストン、バルブやベ어링等のアナロジーより分子スケールのマシンの要素を構築するだろう。フラーレン発見当初、球状のフラーレン C_{60} 分子はベ어링としての用途にとって理想的と思われたが、2体表面間に C_{60} 分子を含んだ実験は、あまりよい結果を与えてこなかった。つまり、2体表面間の多層膜は弾性的に歪み、大きな摩擦を引き起こすのである。しかしながら、最近、報告された結果によると、グラファイト表面に挟まれた単層 C_{60} 膜は、ナノマシン、マイクロマシンの実用化にとって朗報となる摩擦のないベ어링システムを構築することが明らかになった。

ナノギアと C_{60} 分子ベ어링

グラファイトの上に C_{60} 分子は^{ちやうみつ}稠密な単層膜の形で成長が可能である。このことは、図1に示すように、グラファイトの上に整合な単層膜を形成することを意味し、 C_{60} の炭素6員環とグラファイトの炭素6員環がAB積層関係（グラファイトの積層関

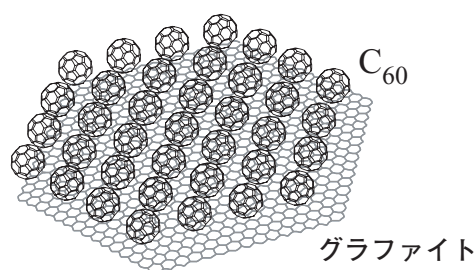


図1

係）を維持するように C_{60} 分子が積みあがることを意味する。さらにグラファイト基板が C_{60} 単層膜の上に載ると、それはグラファイトの上に C_{60} 分子が載ったのと同じように載ることが予想される。このようにして形成されたグラファイトに挟まれた C_{60} 単層膜の系は、 C_{60} 分子の上下に炭素6員環のナノギア（AB積層関係）を形成する。上下2枚のグラファイトに挟まれた C_{60} 分子はちょうどエネルギー的に安定になるようにそれぞれ6員環同士が少しず

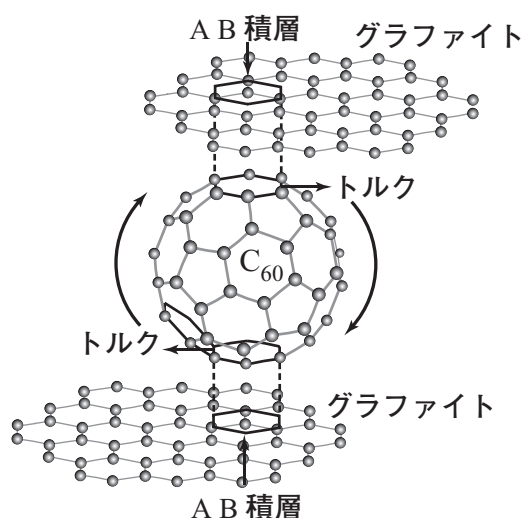


図2

れた形（AB 積層構造）で載る。このとき、小さなトルクがこの系に働くと、6 員環のエッジが回転軸になるように C_{60} 分子が転がる（図 2 参照）。これはちょうど、手のひらを平行に反対方向へと動かして、手の間にあるボールを転がらせるようなものである。しかし、 C_{60} 分子には 5 員環も存在するので、 C_{60} 分子は、6 員環がグラファイトシート AB 積層関係を維持するように瞬間にステップ回転する。こうした動作を繰り返しながら、室温ではこのベアリングは連続したステックスリップ機構により動くことになる。温度がさらに上がるとステックはもっとスムーズになり、このベアリングはよりなめらかになるだろう。

動摩擦ゼロの超潤滑

このとき、 C_{60} 単分子層に乗っているグラファイトは、次のように感じるだろう。グラファイトに加える力が 1 ナニュートン程度に増加するとグラファイトは急激に滑りだし、加える力はゼロからマイナス（引っ張られる）に転じる。加える力は以後この状態を繰り返す（これをステックスリップと呼ぶ）。グラファイトに加える力の往復は通常は履歴を持つが、この系は履歴をもたない。つまり、動摩擦ゼロを示す。これは、最初、分子 1 個を引き離す程度の微小な力を加えることで滑り始め（静止摩擦力は有限）、その後の動摩擦力はゼロとなり滑りつづけることを意味する。従って、最初に与えられたエネルギーは運動エネルギーにすべて変換し摩擦熱は発生しない。 C_{60} 単層膜をグラファイト基板で挟んだときのみ超潤滑が起こり、そこでは、 C_{60} 分子とグラファイトの間の炭素 6 員環のナノギアが大きな役割を果たしていることになる。

このシステムは重量、荷重に依存せず、動摩擦ゼロの究極のマシン実現の可能性を与える。摩擦すきま（接触する 2 面間の距離）もナノメートルのオーダーで、可動したい物体もナノからマイクロメートルまで、サイズ、重量制限もない。面白いことは、実用的で有効な特性が、ナノギアによる分子の回転の性質に直接起因して起こっている。まさに世界最小のベアリングである。

今後の研究課題と将来

しかしながら、この分野の研究は、あまり国内では行われていない。この事情は、この分野が「摩擦」や「潤滑」といった従来からよく知られているがなかなか科学になり得ない分野に属し、本格的に研究する研究者が少ないことや本気で解明しようとすると総合的学際的知識が要求されることによる。特に、この研究分野には、物理分野と機械分野の強い融合が必要と思われるが、この間の交流は日本ではあまり進んでいない。そのような中、この分野の推進は、ここ 2、3 年のうち、ナノマシンやマイクロマシンの推進に関わって必要不可欠となり、また、世界的にも激しい研究、開発が予想される。

ここで示された超潤滑システムのナノマシン、マイクロマシンへの応用は、夢のナノマシンやマイクロマシンの実現を可能にし、次世代産業創出においてブレークスルーになる可能性を持っている。具体的には、このナノギアの効果に注目した C_{60} 分子ベアリングとナノチューブベアリングに加え、フラーレン型 2 硫化モリブデンベアリング等、分子ベアリングによる超潤滑システムが期待されるであろう。この研究の延長には、さらに、ナノスケールの動力源（ナノエンジン）に向けたより本質的かつ応用性の高い研究につながる可能性をもっている。例えばナノレベルのトラックとしてさまざまなナノ構造物を運搬することが可能となったらどうだろう（図 3 参照）。その場合特定の分子を運搬する複数のナノトラックを制御できれば、特定のサイトでまさに分子レベルの化学反応を引き起こす事ができ、ナノスケールの化学工場ができる。まだまだ夢の段階ではあるが、本系を搬送システムとして用いるとこのような応用も考えられる。

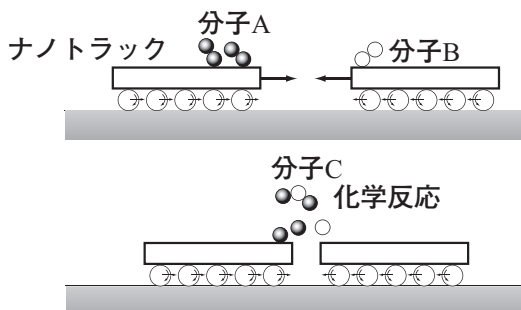


図 3