

閉じこめられた系のナノ摩擦：

C_{60} 単分子層をグラファイトで挟んだ系

愛知教育大学物理領域 三浦浩治

1、はじめに

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。ファインマン (R. Feynman) が最初に予言したように、分子ベアリング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いに期待されてきた[1]。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。半導体微細加工技術を用いた MEMS(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)や化学結合力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。

グラファイトの上に C_{60} 分子が稠密な単層膜の形で成長することはいままでの研究により知られてきている。このことは、グラファイトの上にコメンシュレート(整合)な単層膜を形成することを意味する。この事実は、実験的には我々によって発見され[2,3]、理論的にはグラビル(P. A. Gravil)らによって示されていた[4]。つまり、 C_{60} 分子の炭素 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 (図 1)。

2、実験結果[5]

図 2 は、グラファイト/ C_{60} 単層膜/グラファイトの荷重に対する摩擦力像を示している。像は荷重に対し図 2 のようにチェーン状に変化する。9nN の荷重で摩擦力像は x 方向(走査方向)に 1nm の周期と y 方向に 2.6nm の周期をもっている。これは、図 2 に示すように C_{60} 分子

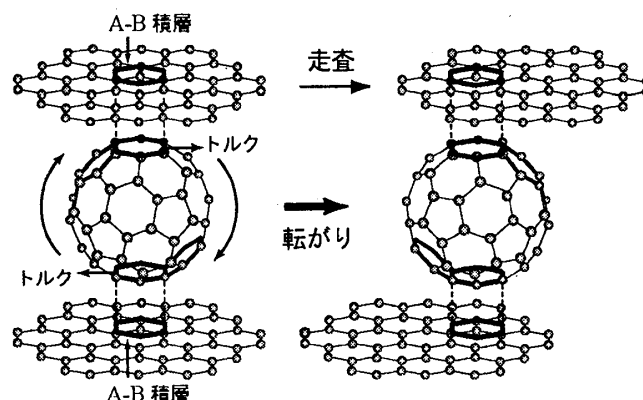


図1 グラファイトに挟まれた C_{60} 単層膜の系。 C_{60} 分子はトルクが働くことによって転がる。それは C_{60} 分子と上下のグラファイトの間に形成される6員環のナノギアによって引き起こされる。

のパッキングを反映しているが、 y 方向の2.6nmの超周期の構造が現れる理由は、説明がついていない。しかしながら、この超周期構造には、単一 C_{60} 分子とグラファイト表面間の相関だけでは説明できない C_{60} 単層膜内の C_{60} 分子間の相関が関係していることが予想される。

ここで、図2の矢印 a で示されたラインプロファイルから得られる摩擦力は往復の摩擦力(実線と破線のノコギリ波形)において履歴を持たない。これは、平均摩擦力がゼロでエネルギー散逸をもたないことを意味する。しかしながら、矢印 b ではグラファイトフレークの2次元ジグザグ運動が起こっているため、摩擦力は履歴をもち、散逸が存在する。更に図2より、高荷重になるにつれて摩擦力像のユニットセルが y 方向に伸びていることが分かる。これは、静止摩擦力は有限であるが、矢印 a で示す平均摩擦力ゼロの領域が広がることを意味している。この実験での最大摩擦力は1nN以下であり、これはグラファイトの上にある C_{60} 単分子を動かす力(0.4nN)に匹敵する。

3、まとめ

この実験では、グラファイトに加える力が1ナノ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(これをスティ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、動摩擦力ゼロを示す。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)、スティックスリッププロセス一周ではエネルギーが保存されることを意味する。従って、

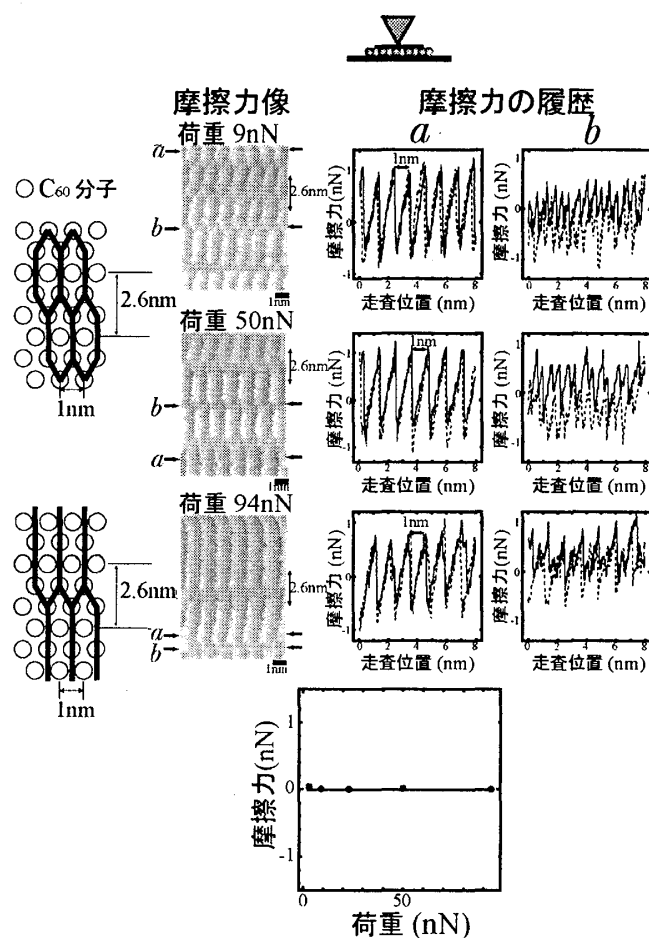


図2 グラファイト/ C_{60} 単層膜/グラファイトの荷重に対する摩擦力像と摩擦力の履歴。摩擦力の履歴の実線、破線はそれぞれ行きと帰りの加える力を示す。荷重に対する動摩擦力（平均摩擦力）が下図に示されている。

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ことになる。 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。本研究結果はフラーレンを用いる人工ナノマシンとしては世界初の提案であり、まさに世界最小のベアリングである。

参考文献

- [1] R. Feynman: Eng.Sci. 23 (1960) 22.
- [2] S. Okita, M. Ishikawa and K. Miura: Surf. Sci. 442 (1999) L959.
- [3] S. Okita, K. Miura: Nano Letters 1 (2001) 101.
- [4] P.A. Gravil *et al.*: Phys. Rev. B53 (1996) 1622.
- [5] K. Miura, S. Kamiya and N. Sasaki: Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 055509.