

# マイクロマシンとマイクロトライボロジー

大阪大学工学部精密工学科第4講座  
助教授 大前伸夫

トライボロジーとは耳慣れない言葉かと思う。摩擦・摩耗・潤滑などという古くからある科学技術のことを総称しているが、“油をさしておけば大丈夫”という認識の段階から現在は、“いかに表面を設計・創成して表面損傷を防ぐか、あるいは制御するか”ということが議論される分野である。“むき出しの原子”が接触し合うようなマイクロマシン表面では当然のことながら“マイクロトライボロジー”が重要な役割を担っており、マイクロマシンの高精度かつ高信頼性のオペレーションのキーテクノロジーの1つと言っても過言ではないであろう。

## マイクロトライボロジー

ハードディスクドライブ（HDD）においては、ヘッド／メディア間のトライボロジーをどう克服するかという課題が最後まで残された。結局、数分子層以下の極薄潤滑剤を磁気媒体表面に塗布することによってこの問題を解決したわけであるが、走査プローブ顕微鏡（SPM）やX線光電子分光法（XPS）などそれぞれあらゆる先端的表面分析法を総動員しての成果である。このようなトライボロジーをマイクロに探る研究はここ数年急速な進歩を遂げており、筆者らも電界イオン顕微鏡（FIM）等を用いてアトミックスケールのトライボロジー解析を行ってきた。HDDにも増してその解決策が急務となっているのがマイクロマシンのトライボロジーであろう。言うまでもなく、体積力より表面間の相互作用力の影響が多であることから、くっつきにくい表面、すなわち相性の良くない原子を両表面に配列させるとか、化学的にすこぶる安定な表面を作るとかを考えなくてはいけない。このように、マイクロマシンのトライボロジーに関してはいかに表面モディフィケーションを行うか、そしてその表面の極微の世界をいかにキャラクタライズするかが大きな焦点となっている。

## マイクロマシン表面への水分子吸着

マイクロマシンを大気中で作動させる場合、い

くら表面のモディフィケーションを行っていても吸着する水分子は最も厄介な障害であろう。相対湿度50%の雰囲気では4～5分子層の水吸着が生ずると言われている。水分子が形成する小さなメニスカスがスティクションを生じさせ、この大きな抵抗のためマイクロマシンが作動しない事態が十分に想定される。このような考えから筆者らはLIGAプロセスで用いられているニッケル膜を対象として水分子吸着挙動の解析とそのトライボロジー特性に及ぼす影響について研究を行っている。水晶振動子（QCM）上にニッケル膜を電着し、その表面に吸着する水分子を単分子層から多分子層に至るまで解析する手法を確立するとともに、各吸着段階におけるニッケルチップとの表面間相互作用力を測定している。その結果、固体表面近傍においては吸着した水分子はあたかも固体のような振る舞いをし、非常に高い粘性を持つであろうことが示唆された。図1は固体表面に吸着する水分子のモデルで、表面近くには遠距離秩序をもった隣接水構造が存在し、無秩序領域を経て表面から離れるに従って近距離秩序をもったバ

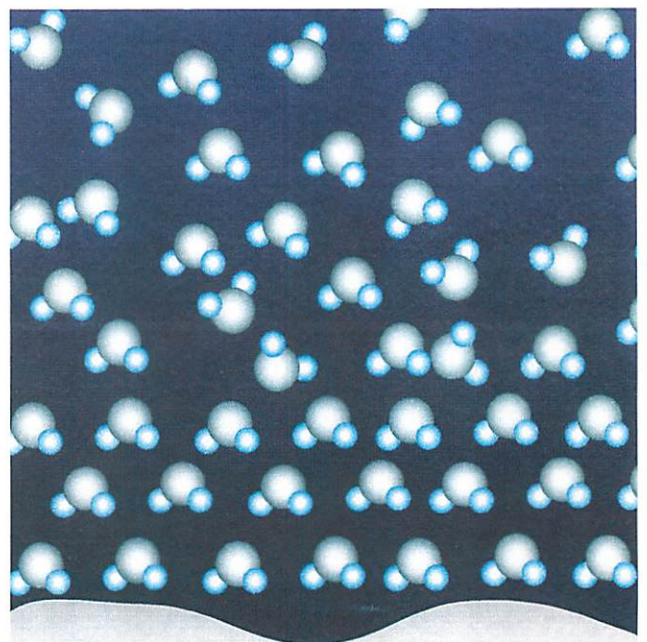


図1 水分子吸着のモデル

ルク水構造となることが判った。スティクションによる摩擦抵抗の増大はこのような水構造に依存するところが大きい。また、ここで示した10数原子層程度の薄い水分子の場合より、マイクロマシンにとっては格段に過酷な状態、すなわち原子力発電プラントの配管の中、人体中の体液などと言う環境が大きな問題である。こういった意味からも水分子吸着とトライボロジー特性の基礎的研究はマイクロマシンににとって有用な知見を与えるものと考えられる。

## C<sub>60</sub>

マイクロマシン表面の潤滑剤に有望なものの1つとしてバックミンスターフラレンC<sub>60</sub>が考えられている。何せ形状がサッカーボールに似ていて、しかも直径が7 Å程度であるので、非常に小さいボールベアリングとして働くかもしれないというのがその根拠である。しかしC<sub>60</sub>が本当にそんな構造をしているのか実空間で確かめた例は今までない。図2はFIMを用いてC<sub>60</sub>の分子構造をとらえたものである。白い点が炭素原子であるが、サッカーボールの上半分が撮し出されているのがご覧いただけると思う。フッ素やシリコンなどをC<sub>60</sub>表面に結合させる技術の確立が必要であるが、C<sub>60</sub>によるマイクロマシン表面の修飾は大いに期待される場所である。

## エキソ電子で故障予知

マイクロマシンの故障や破壊をどうやって検出するかということも大きな課題である。壊れてしまったら次のマシンを送り込むという人海戦術もいいであろうが、できれば機能状態をモニタし、さらに故障を予知することができればと思う。固体表面に欠陥が入ったり、そこに気体等が吸着するとエキソ電子放射が生ずる。筆者らはマイクロポイントチップ表面から放射されるエキソ電子を検出し、そのサイトをアトミックスケールで解析

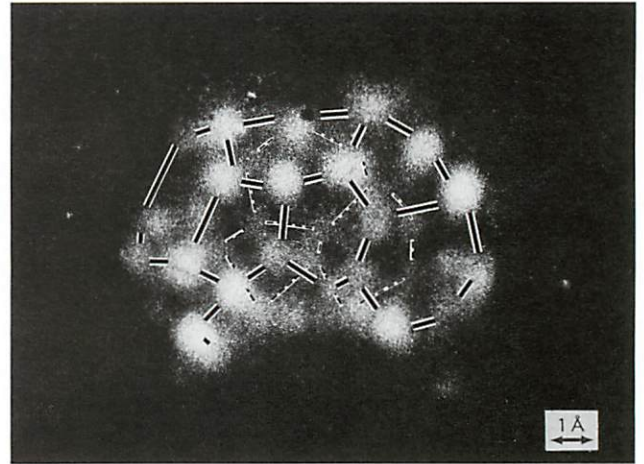


図2 C<sub>60</sub>のサッカーボール構造

している。こういった知見もマイクロマシンの故障予知に活用できればと期待を膨らませている。

## スペースステーションのマイクロマシン

宇宙、特にスペースステーションにおけるマイクロマシンに関しても構想が進んでいる。低地球軌道では水の吸着の影響はないかわりに、宇宙線、熱サイクル、そして原子状酸素が問題となる。このうち原子状酸素は猛烈な酸化を引き起こすので、マイクロマシン表面がボロボロになる危険性が高い。筆者らは2基の原子状酸素発生装置を開発し、原子状酸素照射下のスペーストライボロジーのみならず、材料表面と原子状酸素の反応の素過程について研究を続けており、近い将来スペースマイクロマシンにも対応しようと努力している。

## “マイクロマシンは機械のルネッサンスである”

これは貴マイクロマシンセンターの平野隆之専務理事のお言葉である。トライボロジーの父もルネッサンスの巨人、レオナルド・ダ・ヴィンチである。マイクロマシン、マイクロトライボロジー、そしてルネッサンス、単なる偶然で片づけられない因縁を感じさせる。