

マイクロトライボロジー

金子 礼 三

和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科 ☎ 640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930

(1998 年 1 月 29 日受理)

Microtribology

Reizo KANEKO

930 Sakaedani, Wakayama, Wakayama 640-8510

(Received January 29, 1998)

Use of very lightweight sliding parts that require almost zero wear rates has begun recently in magnetic recording devices and micromechanical systems. The ultimate goal of microtribology is to create practical zero-wear devices with very small mass and very light load. Friction involves wear, but do not if only the surface forces interact. There are two types of microwear processes: one involves only depression, and the other process forms upheavals on a surface as the pre-stage of wear. Microtribology is an important technology for the development of new microdevices, and is also an important science for understanding the origin of friction and wear. Close cooperation between scientists and engineers is needed.

1. マイクロトライボロジーの生い立ちと概念

1970 年代にハードディスク装置の浮動ヘッドに「コンタクトスタートストップ方式」が採用されるようになった。この方式では磁気ディスクが停止しているときには浮動ヘッドはディスク面に接触しているが、ディスクの回転が増すにつれて浮動ヘッドが浮上する。それまでの方式は「ランディングオンオフ方式」であった。この方式ではディスクが定常回転に達するまでは浮動ヘッドをディスク面から引き離しておき、定常回転に達してから面に接近させ浮上させるため接触摺動がない。しかしランディングオンオフ方式では接近動作中に浮動ヘッドが高速回転しているディスク面に衝突する危険が問題になった。接近動作をさせないコンタクトスタートストップ方式ではこの問題が解消され、しかもランディングオンオフ機構を省略できる。一石二鳥の効果ではあるが、今度はディスクの低速回転時に浮動ヘッドは接触摺動するから摩擦がおこる。摩擦量を実用上差し支えない程度に抑えるために、浮動ヘッドの荷重を 10 グラム以下と従来の数十分の 1 に小さくするとともにディスク表面に薄く液体潤滑剤が塗布された。

1980 年代になると記録密度を向上させるために、それまで用いられてきた酸化鉄磁性粒子を高分子バインダーで固めた塗布型記録媒体に代えて、ニッケル・コバルトなどの磁性合金薄膜が用いられるようになった。合金薄膜は塗布型に比べてきわめて耐摩耗性に劣る。そこで合金薄膜の表面にはカーボンなどの耐摩耗性の高い薄膜をコートした。この時点でハードディスクの開発技術者はトライボロジーの未知の領域に入った。従来のトライボロジーにくらべて許容摩耗量は極端に小さくほとんど「ゼロ摩耗」が要求される。しかも滑り面はほとんど技術蓄積のなかった高脆材料の薄膜である。荷重はグラムオーダーと小さく、荷重とは関わりのないスライダと媒体の表面同士の吸着も現実の大きな問題となっている。

ハードディスク装置だけでなく磁気テープ装置、フロッピーディスク装置でも同様の課題があるし、「マイクロマシン」ではさらに表面の問題が顕著となる。

極表面層の摩擦・摩耗でいったいなにが起こっているのか？ 単なるエンジニアリングデータの蓄積だけでなく科学的な原子・分子レベルのメカニズムの解明が必要となった。この頃から「マイクロトライボロジー」とか「ナノトライボロジー」という言葉が出現している。そ

してトライボロジストだけでなく表面科学の基礎研究者たちもこの領域の問題に興味を持ち研究に参加してきたのである。

マイクロトライボロジーは基礎物理からデバイスの開発まで広範な領域を包含した境界領域の科学技術である。この領域の「概念」は以下のように要約できよう。

- 1) マイクロトライボロジーの技術的目的は「ゼロ摩耗」の機械を実現することにある。
- 2) マイクロトライボロジーではきわめて軽い荷重条件のすべりを用いることができる。
- 3) 表面の性質を解明することが重要であり、エンジニアリングデータだけでなく表面科学の新しい知識が必要である。

2. 表面をしらべる手段

摩耗の起源は表面のミクロな破壊である。では破壊の起源はなにか。基本的には破壊力学の教えるとおりの転位論に帰着できる。乱暴ではあるが摩耗を火事に例えたと、今までの「摩耗データ」は大火事のあとの被害調査であった。木造家屋の密集地帯の被害は大きい、コンクリートの建物があると延焼は阻止される、道路や樹木などの防火帯は延焼阻止に有効である、…などなど。

ところが「ゼロ摩耗」の命題は「ボヤ」も起こしてはならないということである。表面における「摩耗の火元」となるものをきちんと認識しなくてはならない。

表面分析の手段は20世紀後半に大きな発達をし、精度やデータ処理も飛躍的に向上した。しかしたいの分析機器は原子・分子レベルの情報を得られるにしても、広い範囲(バルク材料としては十分狭いのであるが)の平均的・統計的処理によるデータである。本当に原子レベルの局所的観測を行えるのは結晶表面の観察で「フィールドイオン顕微鏡(FIM)」、極表面層で「透過型電子顕微鏡(TEM)」くらいであった。

1981年、IBMのBinnig, Rohrer, Gerberから発表された「走査型トンネル顕微鏡(STM)」は表面科学者に大きなインパクトを与えた。FIMでの針状の試料先端というごく限られた領域での観測、TEMでの試料作成の煩雑さ、を解消した汎用的な原子分解能の顕微鏡であったからである。ただし、単原子の先端を持つ探針と試料表面とに流れるトンネル電流を検出するのであるから、試料は導電体表面に限られていた。しかしシリコンの7×7構造の解明を始め、表面物理の種々の課題が解決されていった。

BinnigとGerberはその後スタンフォード大学に行き、Quate教授とともに「原子間力顕微鏡(AFM)」を開発する。これは探針と表面の相互作用力を検出するもので

試料表面が導電体である必要はない。ただし探針と試料の間隔に対して指数関数的にトンネル電流が変化するSTMにくらべ、相互作用力(ファンデルワールス力)が代表的であるが、他にも種々の相互作用力がある)は間隔に対して鈍感なため、原子分解能を得るのはSTMにくらべると難しい。

もともとAFMは探針と試料がオングストロームオーダーで離れている状況での測定であったが、探針と試料を接触させても測定はできる。接触状態の場合、AFMは従来の「触針型表面形状測定器」と同様の動作となる。しかし、触針先端半径が数十ナノメートルと鋭く、荷重はナニュートンオーダーときわめて軽荷重で使用できる。すなわち、表面を破壊することなくきわめて高い面分解能で表面を観測できる。意識的に高荷重にして原子レベルで表面を破壊したり、水平表面間力(すなわち摩擦)を測定したりもできる。かくしてマイクロトライボロジーの研究にAFMは新しい強力な手段を提供してくれることになった。

3. マイクロ摩擦

17世紀にAmontonsは摩擦の基本的な2つの法則を見いだした。

- 1) 摩擦力は荷重に比例する。
- 2) 摩擦力は接触面積とは無関係である。

この法則は18世紀にCoulombによって実証され「アモントン・クーロンの法則」と呼ばれる。

「アモントン・クーロンの法則」は経験則でしかない。理論的には表面の凹凸のかみ合いに基づく「凹凸説」と、表面間で凝着が起こりそれが引きちぎられる「凝着説」の2説が提案された。しかし、「凹凸説」では摩擦によるエネルギー消費を定量的に説明できず、「凝着説」では摩擦力は接触面積に比例するから経験則に矛盾する。

この矛盾は、1940年代にBowden, Taborらの研究で解決された。2面が接触するとき面には粗さがあるのでほんとうに接触しているのは凸部であってその接触点の数は多いが、真実接触面積は見かけの接触面積のほんの一部でしかない。真実接触面では塑性変形が起こっておりその総面積は荷重に比例する。かくして凝着説は固体摩擦理論の主流となった。

凝着が摩擦の起源であるならば、摩擦によって表面は破壊される。いいかえれば表面破壊(摩耗)の結果として摩擦力は発生する。ところが、荷重をどんどん小さくして塑性変形も破壊も起こらない条件では摩擦はどうなるか? 1929年、Tomlinsonはこのような条件では、接触表面で相互作用力で引き合っている原子同士の結合がすべりによって引きちぎられるときの原子の非連続的な

運動が熱に変化するとした(原子の非断熱運動)。

しかし1990年, 平野らはこの非断熱運動が現実の系で起こるかどうかを調べた結果, 現実のほとんどの系で個々の原子の非断熱運動は起こり得ないと結論した。では摩擦の本当の起源はどこにあるのか? 平野らによれば, 固体のすべり速度が原子の振動速度にくらべ非常に遅い現実のすべりにおいては, 固体を構成する各原子はそれぞれの平衡位置をとって運動する。この場合の静摩擦力はすべりによる固体の全エネルギーの変化率で求められる。動摩擦では摩擦によって固体のすべりによる運動が不安定になり, 運動エネルギーが固体内部の原子の振動エネルギーとして消費される。この理論は個々の原子の非断熱運動の代わりに連成する固体原子の運動の総和で摩擦を説明したものである。

さすればすべりに伴って固体の全エネルギーが変化しない系では静摩擦が現れず, 動摩擦によるエネルギー消費もない。接触する2つの結晶の格子間隔の比が無理数のときそのような系になる。なぜならそれぞれの原子の作用力と方向がばらばらで各原子のすべりによる作用力の総和はゼロになるからである。この場合には「摩擦ゼロ」のすべりが発生する。これが平野・新上の「超潤滑理論」である¹⁾。「摩擦ゼロ」はいささか現実離れの感を持たれるかもしれないが, 平野らや他研究機関で“ほとんど摩擦ゼロ”の実験結果が報告されている。

摩擦の根本に戻ってみると表面間力で生じる摩擦力には, Fig. 1に示すように「摩擦の帰結としての摩擦」と「摩擦を伴わない摩擦」の, メカニズムの異なる2種の摩擦が存在する。後者は従来, 技術の分野での応用がなくなおざりにされていたにすぎない。しかし現在では,

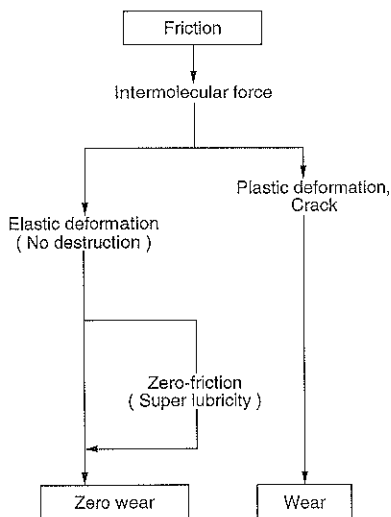


Fig. 1 Friction process.

摩擦を伴わない摩擦力の測定は表面のキャラクタライゼーションの有力な手段となっているし, ファイル記憶装置やマイクロマシンなど工業製品でゼロ摩擦実現は重要な研究開発課題となっている。

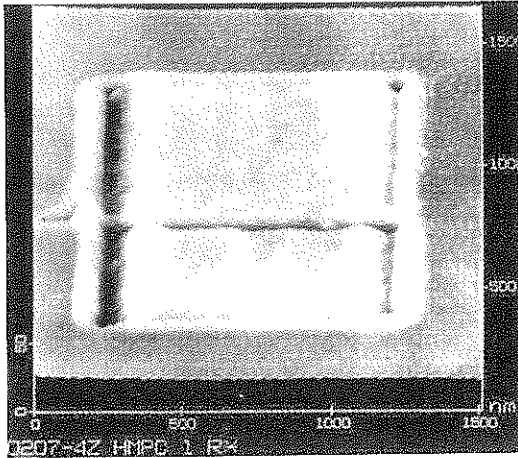
摩擦係数(=摩擦力/荷重)は必要動力計算などの機械設計にきわめて有用なパラメータであった。しかし超軽荷重の条件下ではすべり面に作用する表面間の相互作用力が顕著となる。荷重(外部からの付加荷重や重力による荷重)がゼロであっても表面の相互作用力は存在する。この場合には摩擦係数は無限大となる。一部の研究者は摩擦力-荷重曲線の接線勾配で摩擦係数を定義している。これなら摩擦係数は無限大になることはない。しかしこの摩擦係数から実際に作用している摩擦力を算定できない。表面の相互作用力は簡単には推定できないからである。なお表面の相互作用力は周囲環境によって大きく変化する。マイクロトライボロジーの領域での機械設計には発生する摩擦力の本質を見極める必要があるが, それは容易なことではない。

4. マイクロ摩擦

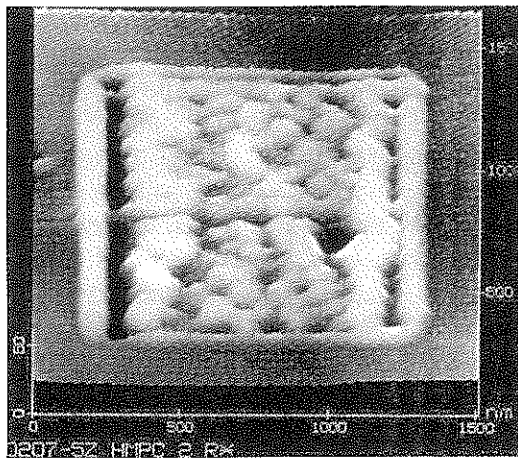
摩擦による表面破壊が摩擦である。ある条件下では「摩擦量は荷重に比例する」, 「摩擦量は摺動距離に比例する」などの経験則が成立する。また「硬度が高いと摩擦しにくい」, 逆に「柔らかく延性のある材料を表面にコーティングすれば真実接触面積が増加し摩擦しにくい」などのテクニックが実際の機械に応用されている。しかし摩擦現象は単なる表面の機械的破壊現象ではない。高速高荷重では表面は溶融する。そこまで高温にならなくても酸化などのトライボケミカル現象が表面の破壊に伴って発生する。

AFMを用いた超軽荷重でかつ低速の摺動実験はこのような熱や化学反応が起こりにくい条件下にあるといえる。

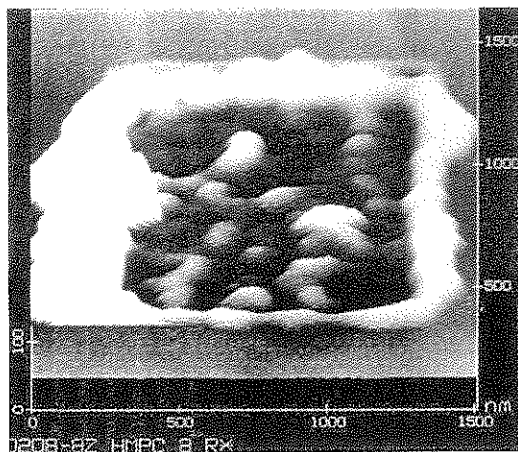
Fig. 2に示すように, 浜田らは鋭いダイヤモンド触針でポリカーボネート表面の微小領域を繰り返し引っかくと, 引っかき面が当初数ナノメートル隆起したのち, 摩擦粉発生を伴った通常の摩擦に移行することを観測している²⁾。最初にかかる隆起は表面の塑性変形によるものであって摩擦の前段階といえる。さらに安藤らはAFMを用いきわめて軽い荷重でシリコン単結晶の表面を空气中で引っかいたあとと放置しておく, 数分間の間に引っかき面がオングストロームオーダーで次第に隆起していくことを観測した³⁾。そして周囲雰囲気制御した追加実験によって, シリコン表面に吸着している水と雰囲気中の酸素が隆起の原因であることを明らかにした。この実験の場合では, 引っかきによって活性化されたシリコン



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Microwear process of a polycarbonate. (a) upheave, (b) projections, (c) wear.

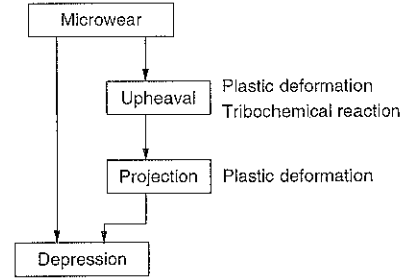


Fig. 3 Microwear process.

表面に緩慢なトライボケミカル反応が起こっているのである。

ポリカーボネートは大きな延性を持っておりマイクロ摩耗過程で塑性変形が顕著にでたもので、またシリコン新生面は活性が高いため化学反応が顕著であった。このような特性が摩耗の初期に「隆起」を引き起こすのである。なお、多くの材料のマイクロ摩耗試験では引っかき面にこのような隆起現象が見られず、単に摩耗してくぼんでいく。これらのマイクロ摩耗形態を Fig. 3 に示す。

摩耗でくぼんだ体積を通常、摩耗量とする。しかし、ごく微小の摩耗を対象としそして「ゼロ摩耗」をめざすマイクロトライボロジーではこの摩耗量の定義があやしくなる。発生した摩耗粉の活性が高いとそれが表面に再凝着する現象はよく見られる。この場合には、摩耗によるくぼみの深さの測定値は実際に破壊された深さより浅いことになる。再凝着が起こらない場合でも摩耗による塑性変形やクラックの発生は表面の内部で起こっている。なおこのような破壊層がもとの状態より弱いとはいちがいにはいえない。加工硬化のような再結晶効果や周囲物質とのトライボケミカルな反応で強固な生成物が表面層にできる場合もあるからである。

冒頭に紹介したハードディスクの場合、表面にコートするカーボンの耐摩耗膜の厚さは10ナノメートル程度でありその下には磁性膜がある。摺動を繰り返したとき、表面にカーボン膜が残存していたとしても磁性膜の変質にまで摺動の影響が及んだとすれば「問題なし」で済ますわけにはいかない。マイクロトライボロジーでは単に「摩耗量」で議論するのではなく、摩耗と変質という複雑な現象の本質を捉えて、対象デバイスに与える影響を見極める必要がある。

表面層の破壊現象を分子動力学を用いてコンピュータシミュレーションすることが盛んになってきた。実験では観測が不可能な個々の原子の挙動を表現できるという利点があり、今後のコンピュータの急速な発展から摩耗の本質的理解に有力なツールとなるであろう。

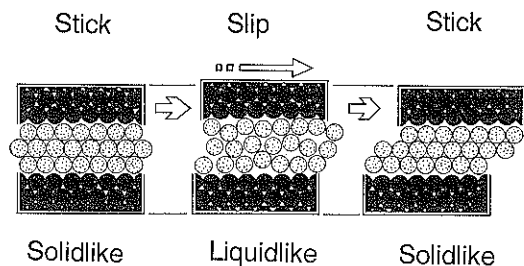


Fig. 4 Slip model of lubricant molecules.

5. 極薄膜流体層による潤滑

固体表面にごく薄い油膜を塗布して摩擦と摩耗を低減することは古くから行われている。塗布した油はその表面で小さな摩擦力でよく滑ってくれないと困るが、逆に固体表面からは滑ってなくなってしまうとこれも困る。よってよく滑るための不活性な長鎖に固体表面に吸着する官能基を付加した油分子が用いられる。

固体表面に吸着した油分子（第1層目）は場所を固定（アンカー）されているから動けない。そして不活性な長鎖は厚いカーペットの毛のように表面を覆っている。その覆われた表面の上の油分子（第2層以上）は油分子間の弱い相互作用でエネルギー的に安定な位置を占めているがせん断力で動きやすい。Thompson と Robbins はこの状態を一種の結晶状態であるとし、Fig. 4 に示すように、せん断力がかかったときには結晶状態が壊れ液体状態となり、つぎのずれた状態で再び安定な結晶状態になるというモデルを考えた⁴⁾。極薄膜流体層は分子レベルのスティック・スリッスを繰り返しながら滑るということになる。

Israelachvili らは、雲母の原子レベルで平坦な表面間の薄流体層を観察する装置（SFA: Surface Force Apparatus）を開発して油分子の作用力の精密測定を進め、Thompson と Robbins のスティック・スリッモデルは球状分子で起こりやすく鎖状分子では起こりにくいこと、また荷重、温度、湿度、滑り速度など種々の条件によりスティック・スリッ現象が影響されることを明らかにした⁵⁾。

滑りによって排除された油分子は徐々に排除部分に戻ってきて安定な状態の油膜を形成することがハードディスクの磁気ヘッドスライダの実験などで観察されている。また、固体接触を伴う激しい揺動条件の場合には油分子が分解され蒸発することも観察されており薄流体層が常に安定な状態で固体表面に存在しつづけるわけではない。

油分子の運動をコンピュータシミュレーションで追跡

することも始まっているが、分子動力学を基礎とするかぎり今のコンピュータの能力からしてきわめて短時間での挙動しかシミュレートできない。

ハードディスクの一般的な磁気ヘッドスライダはディスク面上に数十ナノメートル間隔で浮上させている。これはディスク回転に伴う空気流を利用した動圧空気軸受である。常温常圧での空気の平均分子自由行程は約64ナノメートルであるから、連続流体との仮定から導かれた潤滑方程式（レイノルズ方程式）は成立しない。現在使われているのは分子運動を統計的に扱ったボルツマン方程式から導出された分子気体潤滑方程式である⁶⁾。さらに個々の分子を扱うモンテカルロシミュレーションによる解析も始まっている。

6. 現実の表面

前節まででマイクロトライボロジー領域の摩擦・摩耗・潤滑に対する科学的なアプローチを紹介した。一方、デバイスの開発など技術の立場から実用表面を見ると科学と技術のギャップはまだ大きい。

まず第1に実用材料は均質ではないことである。結晶には欠陥がありしかも多くの実用材料は多結晶である。アモルファスの場合もあるが、全域にわたって原子が完全にランダムに配列しているわけではなく、いくつかの結晶構造とランダムな配列構造が混在し平均的にアモルファスと見なしている場合も多い。2節で、ゼロ摩耗の実現には「ボヤ」も起こしてはならず「火元」を認識しなければならないと述べた。ミクロな現象である「火元」をなくすにはミクロな検討が必要なのであるが実用材料は複雑で「火元」を探し出すのは容易なことではない。

第2に現実のデバイスの摩擦・摩耗が複雑な環境で起こっており、単純な系でないことである。たとえば空気中では固体表面に水蒸気、酸素、炭水化物などが吸着する。安藤らはグラファイトや二硫化モリブデン表面への水分子の吸着をSTMなどで調べ、表面欠陥に強固に吸着する分子と表面を容易に移動する分子があることを観察している⁷⁾。さらに安藤らはこの吸着水が油分子の固体表面への吸着に寄与することも観察している⁸⁾。空気中には多くの物質が含まれており、これらの物質の効果を今後調べて行かねばならない。

第3に摩耗過程で高速な反応と低速な反応が複合して起こっていることである。摩耗に伴う破壊過程でトライボエミッション（電子放射）が起こっていることが指摘されているし、トライボケミカルな反応が起ることも指摘されている。エミッションにより瞬時に反応が起こったり、緩慢な化学反応による化合物が生成したりする。

2節で紹介したAFMはミクロに摩擦・摩耗現象を観

察するのに強力な手段であるが、その摺動速度はせいぜい数 mm/s であり、加える荷重も通常 1 mN 以下である。実際の機械（ファイル記憶装置ではもちろんのことマイクロマシンであっても）でははるかに高速で高荷重の動作条件を想定しなければならない。一方、高速高荷重の従来のトライボテスター類では満足な測定精度はとうてい得られない。AFM と従来のテスターのギャップを埋める高精度で高速摺動できる新しいマイクロトライボテスターの開発が望まれている。このようなテスターでは、雰囲気制御した試験環境を用意する必要がある。現実起こっている複雑な現象を理解していくには、それぞれの要因を把握することが必要であるからである。

7. マイクロトライボロジーの将来

STM の開発によってノーベル賞を受賞した IBM の Rohrer 博士の概念に「ミニチュアライゼーション」というのがある。デバイスが小さくなればなるほど、機械的電子的動作速度は速くなる。さらに動作に必要なエネルギーは少なくてすむ。「小さいことはいいことだ」であるが課題は、1) 小さなデバイスを作る技術、2) デバイス素子の動作に関わる原子の数が「有限」の領域での物性の解明、である。前者では「マイクロマシン技術」が期待できる。後者では「原子、クラスターレベルの科学」が期待できる。

マイクロトライボロジーはこの「ミニチュアライゼーション」の一翼を担っている。さらに「摩擦」が「表面」

のミクロなモディフィケーションの一種とすれば、超精密加工技術、超高密度記録技術などと共通の基盤に立っていることになる。「表面」は 21 世紀への重要な科学技術であると筆者は思っており、広範な分野の科学者や技術者と手を携えて進みたいと願っている。

文 献

- 1) M. Hirano and K. Shinjo: Phys. Rev. B **47**, 11837 (1990).
 - 2) R. Kaneko and E. Hamada: Wear **162**, 370 (1993).
 - 3) Y. Andoh and R. Kaneko: J.J.A.P. **34**, 3380 (1995).
 - 4) P.A. Thompson and M. Robbins: Science **25**, 792 (1990).
 - 5) H. Yoshizawa and J.N. Israelachvili: J. Phys. Chem. **97**, 11300 (1993).
 - 6) S. Fukui and R. Kaneko: Trans. ASME J. Tribol. **110**, 253 (1988).
 - 7) 安藤康子, 金子礼三, 小口重光, 杉本岩雄: トライボロジスト **38**, 825 (1993).
 - 8) 安藤康子, 金子礼三, 小口重光: トライボロジスト **39**, 137 (1994).
- マイクロトライボロジーに関する一般的な参考書をも以下に紹介しておく。
1. B. Bhushan (Ed.): "Handbook of Micro/Nanotribology" (CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995). (最近の研究を集成した初の専門書)
 2. 金子礼三: "ゼロ摩擦への挑戦" (オーム社, 1995). (平易な入門書)
 3. 榎本祐嗣, 三宅正二郎: "薄膜のトライボロジー" (東大出版会, 1994). (マイクロトライボロジーの理解に役立つトライボロジーの基礎と応用が示されている)