

マイクロトライボロジーと表面測定技術

解説

金子 礼 三*

Microtribology and Its Measuring Techniques

Reizo KANEKO

本稿は表題についてのトライボ屋 T と物理屋 P が正月に会ったときの対話である。なにぶん兩名とも「駆け出し」の研究者であるし、いささかアルコールもまわっている。妄言、暴言もあるやもしれぬことをおゆるし願いたい。

1. トライボロジー

P: 近ごろあちこちでトライボロジーという言葉が聞かれますが、あれはなんじゃ。

T: ギリシャ語の Tribos (こする) を語源として、イギリスで 1966 年に作られた言葉だ。摩擦・摩耗・潤滑の工学を総合した科学技術分野を示している。

P: 日本語で「潤滑」という言葉がそれじゃないか。いまはやりのカタカナ文化にかぶれおったか。

T: たしかに広義の「潤滑」は潤滑だけでなく、摩擦・摩耗をも含む学術分野を示す言葉だった。摩擦・摩耗を潤滑油によって減少させることが摩擦・摩耗の産業上の中心課題であったころ、「潤にして滑する」はそれを表現する実にいい言葉だった。

ところが近年、「潤せずして滑する」技術が、宇宙機器、情報機器、電子機器などいろいろな分野で出現している。

P: 固体潤滑剤とか、セラミックスの滑り面などのことか。

T: それもある。さらに、磁気軸受などは全く接触しないしくみになっている。滑るという概念を超えているわけだ。「潤滑」という言葉ではカバーできない分野が広がりつつあるということだ。

P: トライボロジーの語源が「こする」と言ったな。さすれば、こすらないものを含めると「潤滑」と同じような矛盾が出るじゃないか。

T: 「こする」とどうなるか。「こすらせない」にはどうするか。これがトライボロジーであって矛盾はない。しかも、世界中でそのような意味でどんどん使われている。

P: いささか苦しい説明だが、巷でそのように使われているならこれ以上ケチをつけるのはやめよう。

2. マイクロトライボロジー

P: トライボロジーは許すとして、おまえらはマイクロトライボロジーなどと叫んでおる¹⁾。これぞキワ物臭い。マイクロなんかという名前がこの世の中に氾濫しておる。ネーミングだけで格好をつけるコピーライターもどきは気に入らん。

T: これを説明するには、磁気ディスク装置や磁気テープ装置などの磁気記録の話をしなければならない。

2.1 磁気記録のトライボロジー²⁾

T: 磁気記録で記録密度を上げるには、磁気ヘッドと記録媒体をできるだけ近づけなくてはならない。現在、磁気ディスク装置の浮動ヘッドの浮上すきまは 0.1 ミクロンに近づいている。図 1 に現在使われている薄膜磁気ディスクの膜構成を示す。アルミナ合金基板の上に Ni をめっきして硬い面を形成する。次に記録膜の磁気特性を改善する Cr 膜と記録膜 (Ni-Co など) を付ける。記録膜は摩耗と腐食に弱い。そのためスパッタでカーボンの保護膜を付けるが、これだけでは不十分で耐食性の強化のために Cr 中間層、耐摩耗性強化のためにはふっ化炭素系の潤滑剤を塗布することが多い。

P: 記録膜も保護膜もサブサブミクロンか。ずいぶん薄いな。ところで面精度はどのくらいなんだ。

T: 実はテクスチャと称して Ni めっき面にわざとキ

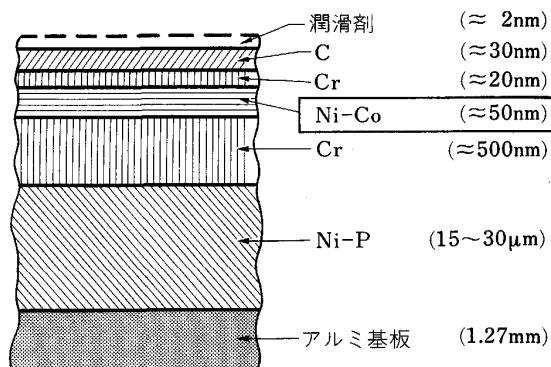


図 1 薄膜磁気ディスクの膜構成

平成 2 年 1 月 8 日受付 (Received Jan. 8, 1990) (依頼解説)

* NTT 電子応用研究所金子特別研究室長 工博 (Kaneko Lab., NTT Applied Electronics Lab., 3-9-11 Midori-cho Musashino, Tokyo 180)

Key words : tribology ; micro tribology ; magnetic recording ; STM ; AFM ; CPM ; FFM.

ズをつけ、最大 $0.1 \mu\text{m}$ 程度の凹凸を形成している。あまりに表面が平滑だと、浮動ヘッドと磁気ディスクがブロックゲージを重ねたときみたいにピッタリくっついてしまうからだ。

P: それじゃ、磁気ヘッドと記録媒体を離すことになるじゃないか。おまけに保護膜もそのマイナスの効果を持っている。

T: そこが問題なんだ。図 2 に示すように実際の磁気ディスクの表面はそれぞれの膜の厚み以上の凹凸をもっている。テクスチャと保護膜は現状の磁気ディスク技術では有効な手段だが、さらに磁気ヘッドと記録媒体を接近させようとするときには障害となる。

P: なんとかの厚化粧というわけか。

T: 近い将来、磁気ヘッドと記録媒体の実効すきまはサブサブミクロンのオーダーにしなければならない。そのモデルを図 3 に示す。保護膜の厚みは 10 nm 程度しかとれない。

P: こんな薄さの膜は穴だらけでとても均一とはいえないぜ。

T: そのとおり。おまけにここで扱うのは nm レベルの摩耗なんだ。

P: 数十原子層の摩耗か。これはバルクの特長と違いそうだ。

T: さらに、この表面は空気中にさらされているから表面には必ず汚染物質が付く。

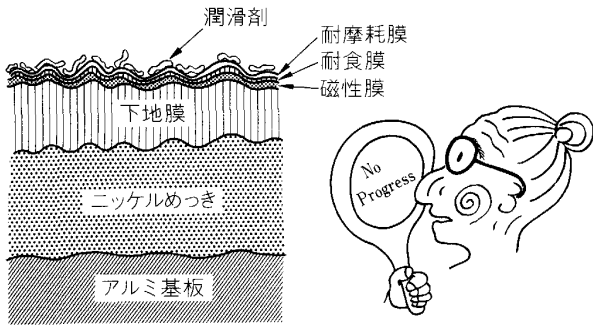


図 2 実際の磁気ディスク表面の形状

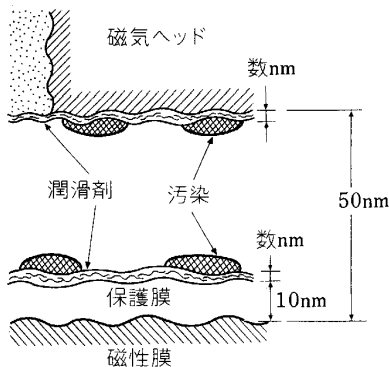


図 3 近い将来の磁気ヘッドと磁気ディスクのモデル

P: もういい。こんな複雑怪奇な表面には近寄りたくないよ。

T: しかし、現実の機械のなかで解決すべき問題としてクローズアップされている。ここで認識すべきなのは、磁気記録ではいかに磁気ヘッドと記録媒体とのすきまを摩耗なしに小さくできるかということが命題であって、従来の軸受のようにいかに荷重を支えるかという命題とはちがうということだ。

図 4 に示すように現在使われている浮動ヘッドは $3 \sim 5 \text{ mm}$ の大きさで、これが磁気ディスク表面にサブミクロンで浮上する。浮上力は浮動ヘッドスライダーと磁気ディスクとのすきまに磁気ディスクの走行によって押し込まれる空気が発生する圧力による。動圧空気軸受の原理だ。浮動ヘッドの大きさをジャンボジェット機の大きさに拡大したとき、飛行高度は数 mm となる。

P: 数 mm の高度で飛行か。超精密な世界だな。

T: ところが最近普及してきた薄膜磁気ヘッドは、数百 μm の大きさで厚みは数十 μm しかない。浮動ヘッド全体の重量が数十 mg であるのに対して、実際に記録再生する磁気ヘッド部分はわずかに μg なのだ。これが浮動ヘッドに二つ付く。だからジャンボに乘客は 2 人というたとえになる。

P: 浮動ヘッドが磁気ヘッドにくらべ大きすぎるというのか。

T: そうだ。もっと小さな浮動ヘッドにすれば、荷重も質量も小さくなり、ヘッドと磁気ディスクが接触したときの損傷が少なくなることが期待できる。

P: そんな浮動ヘッドができるのかね。さらにサブサブミクロンの浮上量とすると、空気の分子平均自由行程と同じオーダーだ。連続流体の力学から出発した潤滑方程式では扱えない領域じゃないか。

T: 最近、ボルツマン方程式から新しい気体潤滑方程式が導出された³⁾。数値計算法も確立されたので浮動ヘッドの設計は可能だ⁴⁾。問題は mm 以下の寸法の加工と組立だ。ほとんど目にもみえない大きさだからね。

P: おまえは老眼だから特に問題だな。

T: なにをぬかす、ど近眼め。

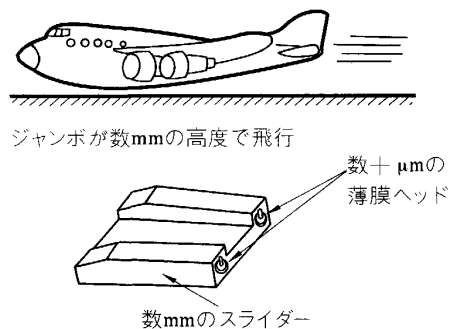


図 4 浮動ヘッドのジャンボ機へのアナロジー

将来的にはフォトリソグラフィと選択エッチングの技術が多用されるだろう。

P: 数十 μm の大きさのモーターなどのマイクロマシンの製作技術と同じだな。

T: これまでの話は磁気ディスク装置についてだが、接触を前提とする磁気テープ装置やフロッピー装置でもヘッドの接触状況と微小な摩擦が問題なのだ。

2.2 無摩擦条件

T: ここで話題を変えよう。君は二つの固体表面を摩擦なし、もしくは摩擦なしにこすることができると思うかね。

P: 直感的だが、表面間に各固体を破壊する力が働かない。たとえばお互いが完全な結晶で欠陥がなく、しかも各表面間に結合が生じない、すなわちファンデルヴァールス力しか働かない系なら、互いにすべっても破壊がないといえるだろう。また最近、全く欠陥の無い原子レベルで平坦な結晶の表面を接触させたときの摩擦力を解析する研究が行われている⁵⁾。この研究によれば、理論的には摩擦の無い(超潤滑)接触摺動系が存在する。

T: どちらも完全にきれいな結晶面の話だからあまり現実的じゃないな。しかし摩擦と摩擦の起源を明らかにするという意味で必要な研究だ。

P: 必要じゃなくて重要といえ。

T: 固体表面が純粋に表面であり得るのは、超高真空の中だけだ。実際には表面に汚染が起こる。汚染をいちがいに害とはいえない。潤滑として有効な場合もある。さらに単分子もしくは数分子の潤滑膜を積極的に固体表面につけることも摩擦・摩擦の防止に効果がある。磁気ディスクの表面がそうだ。

P: またまた複雑怪奇な表面にもどってしまった。

T: ここで無摩擦条件の関係を図5のように整理してみよう。従来のトライボロジーでは、固体摩擦は表面の破壊の結果として現れるとした。摩擦あるところ摩擦ありだ。そこでは摩擦が大きく進行するからバルクの材料の特性が重要となる。また荷重も質量も摩擦を進行させるに十分大きい値であった。磁気記録やマイクロマシンなどで今後扱わなければならないような微小な摩擦では表面の特性が重要だ。そして、きわめて軽い荷重と質量で表面をこす。このとき無摩擦条件が現実問題として

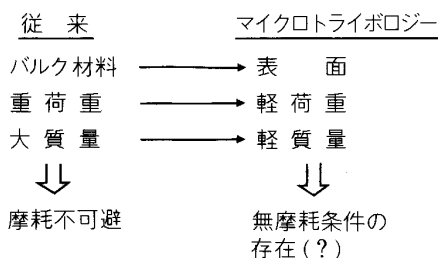


図5 マイクロトライボロジーと無摩擦条件

実現できるか?これがマイクロトライボロジーの課題だ。もちろん、無摩擦条件の中には君の示した物理的に完全な条件と、現実に摩擦は起こっても無視できるという条件と両者を含む。これには機械工学や潤滑工学に物理学と物理化学を持ち込む必要がある。

P: ありがたき幸せだが、表面物性はまだ始まったばかりだ。純粋な表面でさえまだ分からないことがいっぱいある。夜明け前に応用までうんぬんするのは早計だ。

T: 科学的解明が終わったあとで応用が始まるというものではない。おまけにマイクロトライボロジーは磁気記録やマイクロマシンなど現実の工学の問題として焦眉の課題なのだ。登山でも深夜にテントを出発することがある。

P: ふん。遭難して死んじまえ。おれはまともな道を行く。

3. 表面の測定

P: マイクロトライボロジーの概念は一応わかったとして、どうやって研究を進めるのだ。

T: これまでの経験的な摩擦摩擦試験では、もつ、もたないが重視されていたが、摩擦・摩擦の過程でなにが起こっているかを原子レベルで見たいかねばならない。すなわち、表面のトライボロジー的特性を調べる必要がある。新しい観測手段として走査型トンネル顕微鏡(STM)とその関連技術が使えそうだ。

3.1 走査型トンネル顕微鏡 (STM)

P: STMはたしかに原子レベルの分解能をもつ優れた顕微鏡だ。図6のように鋭い探針と導体表面の間のトンネル電流を検出することにより、探針を導体表面からオングストロームオーダーの間隔に保持して表面を走査し表面形状や表面の電子分光ができる。しかし、STMで測れるのは導体表面だけだろう。おまえの扱っている汚い表面じゃなにを測っているかわからん。

T: そのとおり。しかし原子レベルの分解能で簡便に測れる点に捨て難いものがある。また、単分子膜程度の非伝導膜なら測定できることが分かってきた。液晶、DNA、有機膜などの測定例が報告されている。われわれも磁気ディスクに使うふっ化炭素系潤滑剤のグラファ

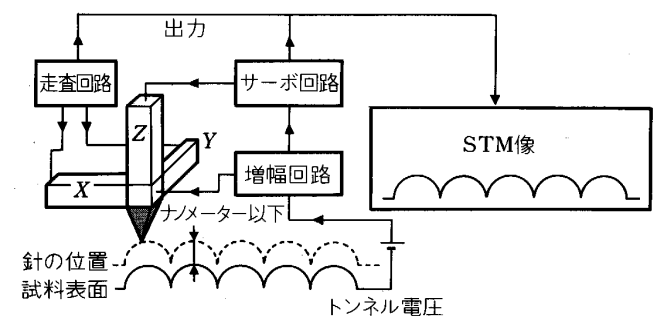


図6 STMの原理

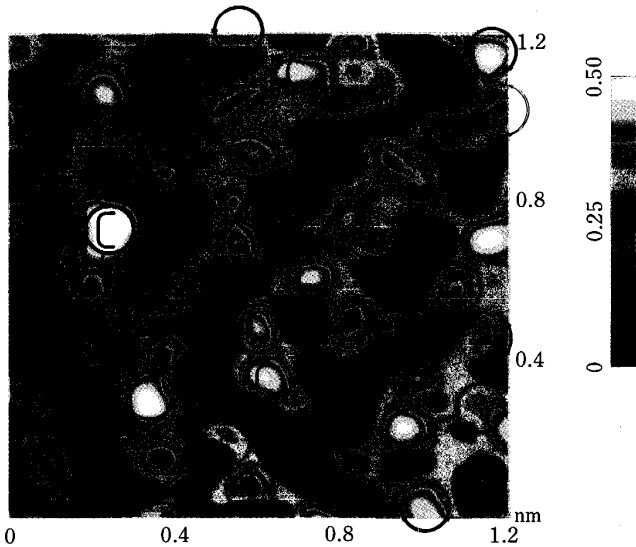


写真 1 ふっ化炭素系潤滑剤の分子レベルの STM 像

イト表面への付着状況を STM で観測している⁶⁾。写真 1 はその例で $-C-C-O-$ の分子鎖が見えている。

P: すぐ見えた見えたというが、非伝導体を通してなぜトンネル電流が流れるかという基本的なところがまだはっきりしていない。たまたま出てきた STM 像を見せられてもそれだけでは信用せんぞ。だいたい、分子構造が分かっているものが STM で見えたといってもなんの意味があるんだ。

T: なかなか手厳しい。われわれの目的は分子を見るだけでなく、潤滑剤がどのように固体表面に付着しているかを調べるために測定している。これについては、近々報告するから少し待ってくれ。

3.2 超軽荷重触針式表面測定機 (CPM)^{7,8)}

P: 非導体表面を測定できる原子間力顕微鏡 (AFM) はどうなんだ⁹⁾。

T: AFM の概念は探針と試料表面の間に働く力を検出しようというものだ¹⁰⁾。ファンデル・ヴァールス力は触針がある程度離れていると吸引力、接近すると反発力として作用する。吸引力領域で AFM を動作させるのはかなり困難だから、大抵の AFM は反発力が働く領域で動作させている。

P: 反発力が働く領域というのは接触しているということじゃないか。

T: 接触の定義が原子レベルの表面でははっきりしていないが、すくなくともある荷重で表面を押す状況は接触とっていいだろう。われわれの装置はその観点から超軽荷重触針式表面測定機 (Contact Profile Meter: CPM) と呼ぶことにした。

P: CPM などとまた新しい名前を付ける。おまえの悪いくせじゃ。

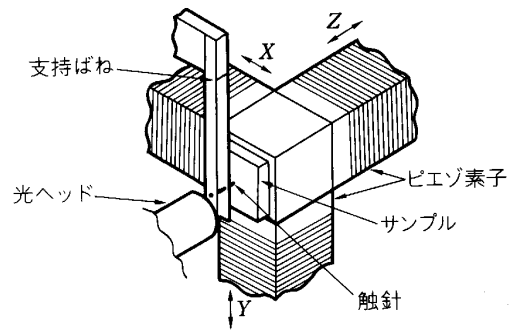


図 7 CPM の構造

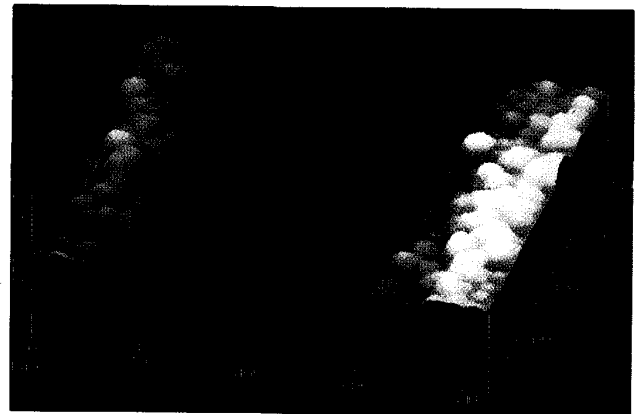


写真 2 CPM で測定した磁気ディスクの表面

T: 図 7 に CPM の構造を示す。柔らかい板ばねで支持した $0.1 \mu\text{m}$ の先端半径のダイヤモンド触針を μg から数十 μg の荷重で試料表面に接触させる。ばねのたわみは光ヘッドで検出する。ピエゾ素子は試料を移動させるために用いるが、ばねのたわみ方向に試料を動かし、凹凸にかかわらず荷重を一定になるよう制御するためにも用いる。写真 2 は CPM で測定した磁気ディスクの表面だ。さきに述べたテクスチャ痕が見えている。

この CPM の特徴は、これまでの触針式表面形状測定装置の数十分の 1 の先端半径の触針と 3 桁以上の軽荷重で、表面を破壊することなく高い分解能で測定できることだ。

CPM で表面形状だけでなく、表面のいろいろな機械特性を測定できる。触針を試料に接触させたあと、試料を後退させると触針との吸着力だけばねはたわみ、その後触針は表面からはなれる。このばねのたわみから表面の吸着力がわかる。図 8 は SiO_2 の磁気ディスク保護膜の吸着力分布だが場所により大きく変動している¹¹⁾。一般的に固体膜表面の吸着力はかなりばらつく。

P: これは空気中の測定だろう。吸着力は固体膜表面のものか、表面の汚染物質のものか、わからんではないか。

T: そのとおり。その分離はできていない。

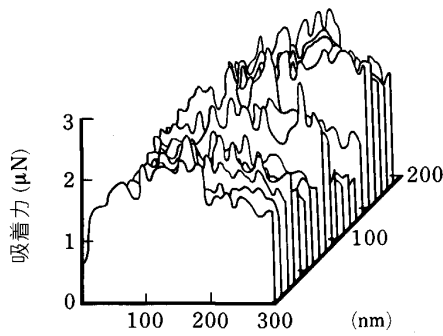


図 8 SiO₂ 表面の吸着力分布

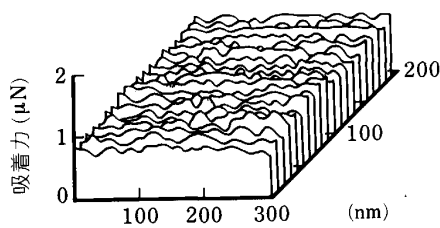


図 9 SiO₂ 表面に潤滑剤を塗布したときの吸着力分布

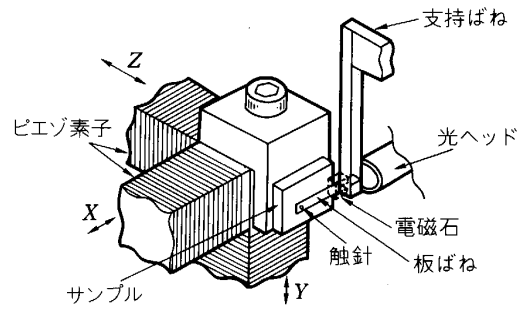


図 10 FFM の構造

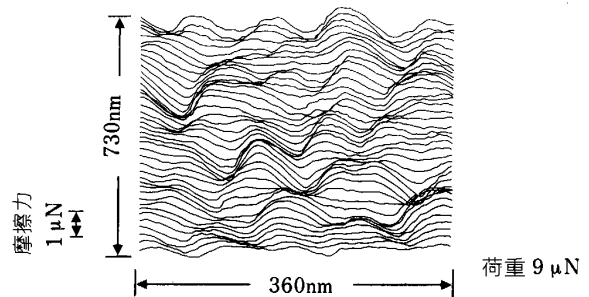


図 11 磁気ディスクの摩擦力分布



写真 3 Si 基板の引っかき痕

P: なんとという非科学的.

T: この表面に 20 Å 程度、潤滑剤を塗布すると図 9 のように吸着力のばらつきはかなり抑制される.

P: 不活性な潤滑剤が固体表面の欠陥を覆いかくす、ざらざらのお肌も化粧すればつるつるというわけか.

T: 触針を高い荷重で表面に押し込んだり、表面を引っかいたりして、あと軽い荷重で表面形状を測定すると極表面層の機械強度がわかる. 写真 3 は Si 基板表面を引っかいた痕だ.

P: ふむ、高脆材料の Si もこの程度の引っかき痕では金属のように盛り上がりができていな.

T: Si ではないが、引っかくとへこみができず、逆に引っかいたところが盛り上がるという実験結果もあ

る¹²⁾. 表面近傍の特性は表面の形成条件でいろいろ変化することは予測されるがまだほとんどわかっていない.

3.3 摩擦力顕微鏡 (FFM)¹³⁾

T: 図 10 に示すように測定面に沿う方向にもばねをたわみやすくすると摩擦力が測れる. これを摩擦力顕微鏡 (Frictional Force Microscope : FFM) と呼ぶ. ばねのたわみを零にするように電磁石で摩擦力に応じた力をばねに加えてやると、安定に動摩擦力の分布が測定できる. 図 11 は磁気ディスク表面の摩擦力分布の例だ. この場合は膜形成の際に生じた凹凸形状に関連した摩擦力変動が見られる.

P: 凹凸に応じてアブレシブ摩耗が起きているんじゃないか.

T: くりかえし測定しても摩擦力分布は変化しなかった. その点では激しいアブレシブ摩耗が起きているとはいえないが、本当のところはようわからん.

P: いいかげんな奴じゃ.

3.4 先駆的研究と研究の現状

P: 君の宣伝はもういい. 世の中ではどうなんだ.

T: 吸着力の測定はかなり前からやられている. TABOR らのマイカ表面の吸着力測定は、実に巧妙で今でも参考になる¹⁴⁾. 河野らは光てこを使っていろいろの材料の吸着力を測定している¹⁵⁾. これらはマイクロトライボロジーなどという言葉のでる前の先駆的研究だ.

柳沢らは電子天秤を利用した押込み試験機や振子式スクラッチ試験機を開発し、薄膜の機械特性を測定してい

- 無 摩 耗 → マイクロトライボロジー
 均一摩耗 → 原子レベルの加工
 部分加工 → モディフィケーション
 切断・接続
 パターン形成
 情報記憶

図 12 マイクロトライボロジーの拡張概念

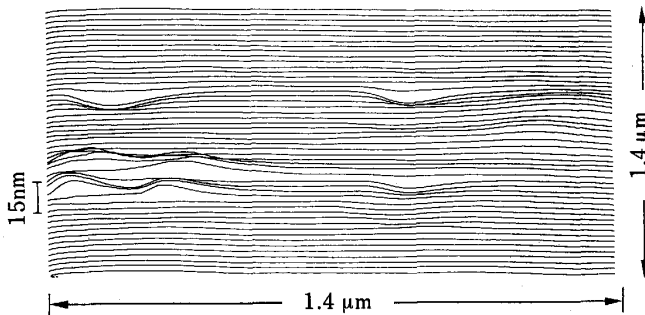


図 13 絶縁破壊による有機薄膜へのピット記録

る¹⁶⁾。また、IBM アルマデン研究所の研究者たちは原子レベルの摩擦力変動を捉えることに成功している¹⁷⁾、分子レベルの厚みの流体膜でへだてられた面の吸着力や摩擦力の測定を行っている¹⁸⁾。ほかにも多くの研究があるが、系統的に文献調査してないので数例だけ示すことでかんべんしてくれ。

3.5 マイクロトライボロジーの拡張概念

P: マイクロトライボロジーの究極目的が無摩耗条件だとして、実験はこすったり削ったりしておく。あたりまえといえばあたりまえだが、なんとなく妙な気がする。

T: 図 12 に示すように無摩耗条件を裏返せば摩耗条件になる。原子レベルで均一に摩耗させるならば、これは加工の究極だ。森らの EEM 加工¹⁹⁾ と共通の立場がそこにある。また、部分的に表面を破壊、変質、他物質の付着などで微細加工 (モディフィケーション) するとパターンニングや情報記録などになる。これらは同じ物理的基礎を持つマイクロトライボロジーの拡張概念といえる。

図 13 は CPM をつかって 10 nm 厚の有機薄膜を絶縁破壊した例だが、2 ns という短いパルスでサブミクロンのピットが形成されている²⁰⁾。このような試みはいろいろな研究機関で始まっている。

4. 生きている表面

P: むしかえすようだが君達の扱っている表面はきれいなものじゃない。吸着力でも摩擦力でも表面にながっているかわかっていない。学問としてそんな研究が

成り立つとは思えないね。

T: トライボロジーが泥沼だといわれるゆえんはそこにある。しかもマイクロトライボロジーはやっと若干の測定ツールが用意された段階でなにもわかっていないというのが正直なところだ。だからこそ、これからの研究の発展が望まれる。

膜を形成したあと空气中に放置しておくとも水や有機物質が表面に付着していく。それをこするとまた表面の状況は変わる。表面は生きているんだ。トライボロジーがエンジニアリングであるかぎりこの生きた表面を扱わざるを得ない。超高真空でのきれいな表面というのは、生体から切り出した死んだ表面だといえればいいすぎになるかな。もちろん、きれいな表面の科学がトライボロジーに重要な知識を与えることはいうまでもない。

P: おれは解剖学者で君は臨床医というわけか。もっともおまえのなでている表面が美女の背中であるという保証はない。ワニの背中かもしれないぜ。

T: ひどいことをいう。せいせい喰い殺されないよう気を付けよう。

文 献

- 1) R. KANEKO: ASLE Special Publication, SP-21 (1986), p. 8
- 2) R. KANEKO: Proc. Euro Trib. '89 (1989), p. 210
- 3) 福井茂寿, 金子礼三: 機論, **53** (1987), p. 829
- 4) S. HUKUI and R. KANEKO: Trans. ASME J. Tribol., **112** (1990), p. 78
- 5) M. HIRANO and K. SHINJO: Phys. Rev., **B41** (1990), p. 11837
- 6) 小口重光, 金子礼三: 潤滑学会全国大会講演前刷集 (1989), p. 349
- 7) R. KANEKO, K. NONAKA and K. YASUDA: J. Vac. Sci. Technol., **A6** (1988), p. 291
- 8) 小口重光, 金子礼三: 精密工学会秋期講演論文集 (1989), p. 541
- 9) B. DRAKE, C. B. PRATER, A. L. WEISENHORN, S. A. C. GOULD, T. R. ALBRECHT, C. F. QUATE, D. S. CANNEL, H. G. HANSMA and P. K. HANSMA: Science, **243** (1989), p. 1586
- 10) G. BINNIG, C. F. QUATE and Ch. GERBER: Phys. Rev. Lett., **56** (1986), p. 930
- 11) T. MIYAMOTO, R. KANEKO and Y. ANDO: Trans. ASME J. Tribol., **112** (1990), p. 567
- 12) 浜田恵美子: 私信 (1989)
- 13) R. KANEKO: J. of Microscopy, **152** (1988), p. 363
- 14) D. TABOR and R. H. S. WINTERTON: Proc. R. Soc. (London) **A. 312** (1969), p. 435
- 15) A. KOHNO and S. HYODO: J. Phys., **D7** (1974), p. 1243
- 16) 柳沢雅弘: 日経メカニカル, **271** (1988), p. 95
- 17) C. M. MATE, G. M. MCCLELLAND, R. ERLANDSSON and S. CHIANG: Phys. Rev. Lett., **59** (1987), p. 1942
- 18) A. M. HOMOLA, J. N. ISRAELACHVILI, M. L. GEE and P. M. MCGUIGGAN: Trans. ASME J. Tribol., **111** (1989), p. 675
- 19) 森 勇蔵, 奥田 徹, 杉山和久, 山内和人: 精密機械, **49** (1985), p. 1033
- 20) R. KANEKO and E. HAMADA: J. Vac. Sci. Technol., **A8** (1990), p. 577