マイクロトライボロジー

—ファイル記憶とのかかわりあい—

金子 礼 三[†]

薄膜磁気ヘッドの本体の重量はマイクロプログラムのオーダーである。マイクロマシンではさらに軽い部品が用いられる。このような軽量・軽荷重で接触摺動が起こる場合には、摩耗が起こらない条件が存在するかもしれない。そのような期待のもとに原子分子レベルの表面を評価することが始まっている。

表題の研究動向を話し合う2人の人物を登場させてみた。1人はトライボロジー屋Tで、夢みたくないことをいっている。もう1人は磁気記録装置開発の現場で悪戦苦闘している産業戦士Mである。対談は1992年正月早々に行われたのでアルコールもまわっている。手前味噌・妄言・暴言もあるかもしれぬが、おゆるし願いたい。

1. マイクロトライボロジーの概念

M: 近ごろ巷にはやるもの、「マイクロナノにバイオロジー」。マイクロトライボロジーも流行に浮かれおった命名か。近ごろ自動車のベアリングやエンジンだって寿命がぐんと延びている。そこでの摩耗はマイクロではないのか。小さな部品を扱うからマイクロだなんてのではかんべんできないぜ。

T: やれやれ。いま我々が使っている機械のほとんどの滑り面には大きな荷重がかかっている。滑り面は荷重を支える面だが、面には凹凸があって実際に接触している部分はほんの僅かだ。そしてそこには塑性変形や凝着を起こすのに十分な応力がかかっている。よって滑り面は必ず摩耗する。摩耗量が限度を超えたときが寿命だ。この寿命を長くすることがトライボロジーの大きな課題であった。定常的に摩耗していく過程を追跡し、膨大なエンジニアリングデータが蓄積されてきた。その成果から「故障しない自動車」に代表されるように、寿命と信頼性向上がなされたのだ。

ところで、この髪の毛とマイクロモータを並べた写真を見てくれ。このロータの直径は約100 μm 、ほぼ髪の毛の直径と同じ寸法だ。ロータの質量は1 μg をはるかに下回っている。

M: ふむ。これぐらい軽いと塑性変形も凝着も起こさなくなるといいたいのか。さぞかしこのモータは長寿命なんだろうね。

T: ところが、すぐ摩耗してしまう。

M: なんちゅうこっちゃ。

T: 大気中での種々の先端半径の触針と固体表面との吸着力が測られている^{1)~3)}。先端半径0.1 μm という極めて鋭い触針でも10 nNから1 μN 、すなわち1 μg から100 μg の吸着力を発生している。

M: さっきのロータの質量よりでかいぜ。

T: そのとおり。さっきのロータの滑り面の接触部がどれだけあるかはわからんが、先端半径0.1 μm の1点よりはるかに大面積だろう。だから、このモータのようなマイクロマシンでは「重量を支える滑り面」という常識は通用しない。重量の代わりに表面間の作用力が主体となるのだ。

M: この吸着力は固体原子間の作用力、たとえばファンデルワールス力みたいなものか。

T: それだけではない。空気中のたいていの固体表面には水などの液体吸着層が存在していて、その表面張力でも吸引力が発生する。

M: うん。この話はわかる。磁気テープや磁気ディスクと磁気ヘッドの吸着はまさにこの吸着力による。

ところで、摩耗のない固体間の滑りというものはあるのかね。

T: 固体表面の各原子の結合が強固で、それに対し固体表面間の相互作用力が小さければ、原理的には摩

[†] NTT 境界領域研究所

“Microtribology Related to File Memory” by Reizo Kaneko (NTT Interdisciplinary Research Laboratory, Tokyo)

耗ゼロがありうる。Eigler らは走査型トンネル顕微鏡の探針を用い、キセノン原子 1 個 1 個をニッケル表面の所定位置まで滑らせることに成功した⁴⁾。原子だから固体とはいえないがゼロ摩擦ではある。また平野らは原子レベルの摩擦発生機構について理論解析し、「超潤滑」すなわち摩擦力ゼロの条件が存在する可能性を示した⁵⁾。

M: しかし、それは清浄無欠陥な固体表面のはなしだろう。

T: そうだ。清浄な表面は超高真空中でしか存在しないし、無欠陥な表面は普通極めて狭い限られた領域でしか存在しない。

M: それじゃゼロ摩擦なんて絵に描いたモチではないか。

T: いま紹介した物理の純粋な系からのアプローチとともに、エンジニアリングの側からのアプローチもある。たとえば、宮本らは潤滑剤の塗布によって固体表面の欠陥が被覆されることを観察しているし²⁾、三宅らはカーボン膜を Si と F で表面改質して摩擦率を数十分の 1 に減少させている⁶⁾⁷⁾。

M: そんなことでゼロ摩擦が実現できるのかい。

T: 皆目わからん。摩擦が進行していく従来のトライボロジーの範ちゅうではバルクの材料特性が重要で、その知識はかなり蓄積されている。しかし、ゼロ摩擦を目指すマイクロトライボロジーでは「表面」の特性を知ることが重要なのだが、ほとんど未知の領域なのだ。

M: たよりないやっちゃ。

T: ゼロ摩擦が実用技術として簡単に実現できるとは考えていない。現実の滑り面は表面凹凸と多くの欠陥を持っており、かつ大気雰囲気中で汚染される。一見、真空のような宇宙ステーションの環境でさえブンブンオゾンが飛び回っているんだ。同じ表面でもその時々に応じてその様相は変化する。

M: まるで生き物みたいに複雑怪奇じゃな。

T: トライボロジーが「泥沼」といわれるゆえんさ。

M: ふん。そのトライボロジーの「泥沼」をあてにしたばかりに、媒体摩擦やヘッドクラッシュで苦しんでいる俺たち磁気記録屋の世界は、さしずめ「肥溜」だわさ。

T: とばっちりが飛んできた。その磁気記録との関わりを説明しよう。

2. 磁気記録とマイクロトライボロジー

M: その前にいっておきたいことがある。おまえはマイクロトライボロジーなどとたわ言をいっている

が、磁気記録のトライボロジーはだんだんあてにできなくなってきた。高密度記録化を別の手段で実現することが始まっている。たとえば、磁気ディスク装置では浮動ヘッドの浮上量を下げずに記録密度を上げるのに、PRML という信号処理方式が検討されている⁸⁾。**T:** ふむ。賢明だ。本当はもっと前にこのような検討を真面目にやるべきだった。磁気記録屋や装置屋が頭も金も使わないで高記録密度を実現しようとトライボ屋を責めたてただけでサボッていたからだろう。

M: なかなかきびしい。信号処理や誤り訂正を強化するには回路規模を大きくしなければならない。できれば避けたいところだ。

T: 信号処理や誤り訂正は建築みたいなものだ。使えるハード技術はわかっている。コストも計算できる。あとはいかにコストパフォーマンスを上げるかという設計のセンスになる。これに比べて磁気記録のトライボロジーは、山野に分け入って金を探す砂金採りのようなものだった。カルフォルニアのゴールドラッシュ時代のように、あちこちで金が採れる時代はよかったが、採り尽くしてしまうと同じやり方ではなかなか見つからなくなる。といって世の中に未発見の金がなくなったのではなからう。物理的基礎に立ち戻って合理的に金を探す方法を確認する、これもマイクロトライボロジーの役目だと思っている。

M: 手前味噌。

T: 不毛の荒野にトライボ屋を駆りたてた指導陣も指導陣だが、その命令に従うのみであったトライボ屋もトライボ屋だ。

M: いいたい放題。でもみんなそれなりにがんばったから、今があるんだぜ。

T: 今はいい。問題は明日だ。例を挙げよう。図 1 は磁気ディスク用の浮動ヘッドだ。この形式の浮動ヘッドは、1973 年 IBM 3340 に初めて搭載された。現在の磁気ディスク装置の技術の基本であるウインチェ

図 1 磁気ディスク用浮動ヘッド

図2 浮動ヘッドスライダと薄膜ヘッド

スターテクノロジーの核になる部品だ。ちなみにウインチェスターとはIBMの開発プロジェクト名だ。この形式の浮動ヘッドは20年近くたった今でも使われている。

M: それはこの浮動ヘッド構造が優れている証拠だろう。飛行機だって、主翼・尾翼・胴、基本構造は70年以上同じだぜ。

T: 飛行機は人間が操縦し人間を運ぶのが使命だ。人間の大きさは変わらない。浮動ヘッドは磁気ヘッドを磁気ディスク表面に対して微小な隙間で保持するのが使命だ。その磁気ヘッドの寸法は不変ではない。そこで図2を見て欲しい。

M: 薄膜ヘッド搭載の浮動ヘッドか。最近これが使われ始めた。

T: 薄膜ヘッド本体の寸法は縦横サブミリ、厚さ数十ミクロン、機械加工で作られる従来ヘッドに比べ格段に小さい。これが相変わらずミリメートルオーダの浮動ヘッドにのっかっている。よく浮動ヘッドはジャンボジェット機に例えられる。浮動ヘッドをジャンボジェット機の大きさに拡大したとき、その浮上量は数mmになる。だからハイテクというのが浮動ヘッド屋の素人だましの宣伝文句だ。だが薄膜ヘッド1個の大きさはジャンボの中の1人の客の大きさでしかない。磁気ディスク用の薄膜ヘッドは普通浮動ヘッドに2個形成され、そのうち1個を実際の記録再生に使っていて1個は使わない。だから浮動ヘッドというジャンボ機には2人の客しかも1人は死体を運んでいるにすぎないことになる。

M: 今の浮動ヘッドは薄膜磁気ヘッドに比べて大きすぎるといいたいのか。

T: そのとおり。別の例えをすれば、いまの薄膜ヘッドを積んだ浮動ヘッドは、小さな石ころを2個つんだダンブカーが磁気ディスクという砂利道を走ってい

るようなものだ。

M: 道も壊れる。自転車の方がいいね。

T: ところが、自転車に相当する浮動ヘッドの試みがほとんどない。せいぜい米国のセンストアーというベンチャーが作った“マイクロフレックスヘッド”ぐらいだ⁸⁾。反面、ウインチェスター型のヘッドに関する研究は過去ゴマンと発表されている。現状を理解しただけですましているんじゃないブレークスルーは出てこない。最近、このたぐいの研究発表がやっと下火になってきたのでせいせいしているところだ。

M: 研削という機械加工にたよっている浮動ヘッドの生産ラインを一変するのは大変だ。浮動ヘッド屋にも情状酌量の余地はあるぜ。ところで、自転車、すなわちマイクロヘッドを作るにはどんな問題があるのかな。

T: 理論設計に関しては、福井らがボルツマン方程式から新しい潤滑方程式を導いている⁹⁾。これは従来の連続流体との仮定から出発した従来の潤滑方程式では厳密に扱えない領域、すなわち気体の分子平均自由行程を含む汎潤滑方程式だ。これもマイクロトライボロジーの研究分野のひとつだ。設計計算の複雑さを除くアルゴリズムも開発されている¹⁰⁾。この潤滑方程式は寸法がミリメートル以下、浮上量が $0.1\mu\text{m}$ 以下の浮動ヘッドで威力を発揮する。この領域では従来の潤滑方程式はまったく歯が立たないからだ。加工では切ったり張ったりの機械加工に代わって、フォトリソグラフィなどのマイクロマシン製造技術が期待できるが、まだまだ未完成だ。

M: 理論でいくら立派なものが設計できても、作れなければしょうがない。

T: マイクロエレクトロメカニクスと称して、先ほどのマイクロモータをはじめ、いろいろのマイクロメカを開発している研究者が増えてきた。この技術はマイクロヘッドを作る技術と共通基盤にある。ところが学会発表で見ると、当面何に使うかはっきりしないメカニクスが多く、焦眉の応用であるマイクロヘッドの発表は皆無に近い。即実用であるから、やってる連中が発表を控えているのかもしれない。そうであってほしい、さもなくばこれは浮動ヘッド屋の怠慢だ。

M: ノーコメント。それよりマイクロトライボロジー屋はどんな研究をやっているんだ。

3. 表面の評価

T: ミクロな表面の評価が始まっている。表面層の硬度測定¹¹⁾、原子レベルの摩擦力変動の測定¹²⁾、固体表面にはさまれた潤滑剤分子の吸着と摩擦の評価¹³⁾

などがある。1991年春の米国のMRSミーティングでは“モレキュラートライボロジー”と銘打ったシンポジウムが開催され、潤滑剤分子の挙動など多くのマイクロトライボロジーに関する発表が行われた¹⁴⁾。

M: MRSとは材料屋の学会だろ。

T: うん、トライボ屋ではない材料屋、物理屋、化学屋などがこの方面の研究に興味を持ちだしている。逆に元々のトライボ屋はまだ動きが鈍い。1991年のMRSと同時期にイギリスで開催された“フロンティアオプトライボロジー”というトライボ屋の会議では2~3の発表を除いて“フロンティア”に値する発表はなかった。しかし、今年(1992年)秋、日本でマイクロトライボロジーの国際ワークショップを開く予定だ。これがひとつのきっかけになればと願っている。

M: 薄学浅才のおまえがそんなに大見得を切って大丈夫かいな。

T: ごもつとも、ぼくがトライボに首をつつこんでまだ数年、チンピラだもんね。じつは、物理からトライボロジーをきちんと見ようという研究は1940~1960年代盛んに行われていた。Bowden and Taborの著書¹⁵⁾¹⁶⁾はいまだにトライボ屋のバイブルだ。日本でも桜井の著書¹⁷⁾などは参考になるところが多い。その後、経済成長とともにエンジニアリングデータを主体とした「実学トライボロジー」が主流になったような気がする。

M: その「実学」が産業界を支えてきた。

T: そのとおり。しかし、それだけでは通用しない分野が出てきた。その典型的な例が磁気記録のトライボロジーだ。といってマイクロトライボロジーはまだ確固たる学問的基礎と展望を持っているわけではない。散発的な研究があちこちで始まった程度だ。これをここで網羅的に紹介するのは困難だ。我々の研究の一端を紹介するにとどめよう。

3.1 潤滑剤分子の固体表面への吸着

T: 単分子から数分子という薄い潤滑膜を固体表面に塗布すると、摩擦や摩耗が減少することは数十年も前から知られていた。これを応用したのが磁気ディスクや蒸着テープ表面の潤滑膜であるし、塗布型の磁気テープやフロッピーの磁性層に練り込まれた潤滑剤だ。このような潤滑剤に必要な性能はなにかと思うかね。

M: それぐらいおれだって勉強している。まず潤滑剤分子の中に不活性な長鎖があって固体表面に対してよく滑ること、ただし滑ってどこかへ行ってしまうのは潤滑効果がなくなるから、固体表面にしっかりと吸着する基を潤滑剤分子が持っていること。教科書によ

れば、吸着する基がびっしりと固体表面に並んでいて不活性な長鎖が上に伸びている、いわば厚いカーペットのような状態が理想である¹⁸⁾。

T: そんなにうまく潤滑剤分子を植え込むことができるかね。

M: くつつき易い基はどんどん固体表面にくつつくから、最終的にはこうなるんじゃないの。

T: ラングミュアプロジェクト膜の形成手段のように、強制的に潤滑剤分子を整理させてから固体表面に付ければこうなるかも知れない。しかし、工業的にはスピコート法やディップ法で潤滑膜を付けている。このような方法では潤滑剤分子は塗った当初は固体表面に「寝ている」と考えたほうが自然だ。そして吸着する基が「寝た子」を起こして吸着するほど強力かどうか。そんな疑問からわれわれは固体表面の潤滑剤分子の走査型トンネル顕微鏡(STM)による観測を行った¹⁹⁾。潤滑剤としてはベンゼン環を持つフッ化炭素系のもの4種を試料とした。ベンゼン環は π 電子を持っていてトンネル電流が流れやすくSTM像の中からベンゼン環を見つけやすいからだ。潤滑剤分子と固体表面をはっきりと区別するために、基板としては原子レベルで平坦なへき開したグラファイトと二硫化モリブデンを用いた。STM観測を繰り返して行うことによって潤滑剤分子の基板上の動きを捕らえることができる。結果をまとめると、

① 基板に横たわっている潤滑剤分子が観測された。

② 図3に示すようにフッ化炭素の不活性な長鎖は基板表面を滑っており、グラファイト表面に平行に接しているベンゼン環は吸着効果が強くそこに留まっている(アンカー効果がある)。しかし、グラファイト表面に対して傾いているベンゼン環にはアンカー効果はなかった。グラファイト表面の炭素原子の配列とベンゼン環の炭素原子の配列がほぼ一致しているため、互いに平行になったときは強い相互作用が働くものと思われる。

③ いなかなる姿勢のベンゼン環も二硫化モリブデン表面に対してアンカー効果はない。その反面、ベンゼン環をつなぐスルフォンの硫黄原子に二硫化モリブデンへのアンカー効果が認められた。二硫化モリブデン表面の硫黄原子との強い相互作用によるものと思われる。

M: 基板によってくつつくものが違うのか。

T: そのとおり。さらに安藤らは、グラファイト表面の潤滑剤分子のクラスタが安定でなく刻々その形状を変えているのを観測している²⁰⁾。グラファイトや二硫化モリブデンのような無欠陥で不活性な表面での潤

図3 グラファイト表面のベンゼン環をもつ潤滑剤分子の動き

滑剤の吸着力は弱く、安定に留まっていはいないようだ。

M: それでは、磁気ディスクの保護膜として使われているスパッタカーボン膜なんかではどうなんだ。

T: 最近、安藤らがスパッタカーボン表面の潤滑剤分子の STM 観測に成功した²¹⁾。このスパッタカーボンはアモルファスである。ベンゼン環にはアンカー効果は認められなかった。一方、ベンゼン環をつなぐ酸素原子にアンカー効果は認められた。この酸素原子はアモルファスカーボンと水分子を介して水素結合している可能性がある。確認を行っている最中だ。

M: やれやれ、またくつつくものが違うのか。おまけに水まで出てくるのでは混乱するばかりだ。

T: 同じく安藤らが固体表面への空気中の水分子の吸着過程を STM で調べている²²⁾。しかし、表面の性質や存在する欠陥の影響はまだ定かではない。表面に存在する欠陥と吸着とは大きなかわりがありそうだ。事実、さきほどのアモルファスカーボン上の潤滑剤の STM 観測結果によれば、潤滑剤分子の長鎖の動きはグラファイト表面の場合に比べてにぶい。エリブソメトリーで塗布した潤滑剤の膜厚の経時変化を見ても、グラファイトや二硫化モリブデンのような不活性な表面では膜厚が刻々と変化するのに対して、アモルファスカーボン表面では安定であった。表面欠陥と汚染物質が潤滑剤分子をトラップする働きをしているのかもしれない。

M: 無欠陥で清浄な表面と欠陥のある汚染された表面とでは、潤滑剤の吸着メカニズムが違う。

T: その可能性が強い。

M: とすれば、グラファイトや二硫化モリブデンのへき開面で潤滑剤分子の吸着や動きを調べてみても、

ものの役には立たない。

T: 逆に欠陥とか汚染とか、わけのわからない表面で潤滑剤を評価してみても、せいぜい相性が良かった、悪かった程度のことしかわからない。飲んでみないけりゃ毒だか薬だかわからん、というのは科学的とはいえないね。回り道かもしれないが、科学的な評価とメカニズムの解明が必要と思う。

M: ところで、試験した潤滑剤は電気絶縁体だろう。なんでトンネル電流が流れるんだ。

T: 数 nm 程度の厚さまでなら、絶縁体にもトンネル電流が流れる。この現象を使って、有機物バイオ物質の観測が行われている。ただし、なぜ流れるか、そのメカニズムについてはまだ定説はない。

M: おまえの「科学的」もあまりアテにはならん。

T: トンネル電流でケチをつけられたから、トンネル電流を使わない測定を紹介しよう。

3.2 AFM による表面の評価

T: STM と同様の鋭い探針をやわらかい板ばねに付けて固体表面に近づけると、ファンデル・ヴァールス力に代表される原子間力が作用し、ばねがたわむ。このたわみを検出すれば固体表面の原子間力分布が得られる。これを原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) という。

M: 待った。冒頭におまえは吸着力の話をして「空気中のたいていの固体表面には水などの液体吸着層が存在していて、その表面張力でも吸引力が発生する」とぬかしおった。とすれば空気中では固体表面の原子間力など測れるわけがない。

T: ご賢察、恐れ入谷の鬼子母神。空気中で固体間の吸引力を測ることはほとんどの場合不可能だから、空気中での AFM 測定は探針を固体間に反発力が発生するまで押し付けて行のが普通だ。

M: まわりくどいことをいっているけど、つまるところ「針を固体表面に触らせてなぞる」ことなんだろう。それじゃ、昔からある触針式表面形状測定器と同じじゃないか。

T: またまた御賢察。だから空気中の AFM を「P. CM: Point Contact Microscope」と名づけた人がいて、ばくもそれに賛成したのだが、「AFM」が一般に流布されてしまったあとだったので PCM は死語と化してしまった。ここでは、「名は体を表していない」けど AFM と呼ぶこととする。

AFM がこれまでの触針式表面形状測定器と違うところは、触針先端半径が $0.1 \mu\text{m}$ 以下で従来の触針の数十分の 1 と鋭い触針で、表面を破壊しないように測定荷重を数〜数十 nN と数千分の 1 以下にしたところ

にある。縦分解能はオングストローム、面分解能は測定表面によっては原子間隔に達する。

表面形状測定の例を写真1に示す。フロピディディスクの表面だ。

M: これくらい電子顕微鏡で見えるだろう。

T: ごく低電圧で工夫すれば見えるだろう。しかし、一般的に言えば、高分子は電子線で破壊されやすく、直接その表面を見るのは難しい。

M: 普通は金などの膜を付ける。

T: 膜を付けるとその膜の粒塊も含めて見えてしまう。精密な面の測定には向かない。おまけに磁気テープやフロピディなどの塗布媒体には液体潤滑剤が練り込んである。まるで漢方薬の塗り薬みたいなものだ。中の物質がガスとして出てきて、膜が「天ぶらのコロモ」になってしまうこともある。さらにAFMのいいところは高さが正確に測れることだ。最近では光学顕微鏡を組み込んだAFMも市販されるようになってきたから、薄膜ヘッドや光ファイバコネクタの評価にも使われるようになった²³⁾。

表面形状だけでなく、大きい荷重で触針を表面に押し込んだり引っかかりたりしたあと、その痕跡を荷重を小さくした同じ触針で走査することにより、表面硬度や表面強度を調べることができる。宮本らは磁気ディスクに用いられるアモルファスカーボンの評価を進めているし²⁴⁾、浜田らは光ディスク基板であるポリカーボネートの評価を進めている²⁵⁾²⁶⁾。写真2はアモルファスカーボン膜への引っかかり痕だ。

M: 普通のマイクロビッカース試験やピンオンディスク摩耗試験とどこがちがう。

T: 従来の試験がミクロンオーダであったのに対して、ナノメートルオーダの試験ができる。よって薄膜や極表面層の評価が可能になった。三宅らはカーボン

膜の改質やc-BN膜の形成の研究を行っている。これらの膜の評価にも活躍している⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾。

通常のAFMの触針のばね支持を走査方向にもたわみやすくすると摩擦力も測れる。これをFFM(Frictional Force Microscope)と呼ぶ。我々は摩擦力によるばねのたわみを力フィードバックによってゼロにする制御型のFFMを開発した²⁹⁾。この制御によりテクスチャをかけた磁気ディスク表面のように粗い表面でも、スティックスリップを起こさず連続的な摩擦力分布が測れるようになった。宮本らは、磁気ディスクや磁気ヘッドのミクロン領域の摩擦力分布の測定を行っている³⁰⁾³¹⁾。写真3は磁気ディスクヘッドスライダに使われているアルミナとチタンカーバイドの混晶表面の摩擦力分布である。表面は10 nm p-p程度の均一な面粗さを持っているが、摩擦力分布では摩擦係数の大きいチタンカーバイドの粒塊に対応した高摩擦力の部分が認められる。

M: ナノメートルレベルのいろんな測定が行われているのはわかったが、これがどう磁気記憶装置の開発に役立っているのかね。

T: マイクロトライボロジーの研究は始まったばかり

写真2 アモルファスカーボン膜への引っかかり痕

写真1 フロピディディスクの表面

写真3 アルミナチタンカーバイド混晶表面の摩擦力分布

写真4 表面の微細加工

りだ。おまけに磁気記録で実際に使われてる滑り面は複雑だ。まずミクロな表面の性質を理解する。理解して対策を立てる。そこでマイクロトライボロジーが実際の機器に役立つ。即座に効く特效薬ではない。

M: ふん、役に立たない研究をやっている連中がよくいうセリフだ。

T: せっかちなことばかり要求していると、磁気記録の「現状の限界」と心中することになるぜ。表面を子細に見るマイクロトライボロジーは、さらに広い応用がある。

4. マイクロトライボロジーの拡張概念

T: マイクロトライボロジーの究極の目的は、超軽荷重下でのゼロ摩擦条件を見いだすことだ。これを裏返すと摩擦条件になる。原子レベルで均一に摩擦を進行させると究極の加工条件になる。森のEEM加工³²⁾と共通の立場がそこにある。写真4は、三宅らが作ったフッ素処理をしたカーボンの耐摩耗膜の1 μm 領域を引っかきによって彫りくぼめた例だ。1回の引っかきでほぼ1原子層が削られている²⁷⁾。

M: こんなコチョコチョした加工なんて量産には向かないぜ。

T: それはそうだ。STMを使った描画で、これぞ超LSIの基本技術と宣伝するてあいもいるが、そんなものでパターンを描くには数十年はかかってしまうから役には立たない。この種の微細加工の特徴は極表面層部しか加工の影響が及ばないところにある。通常の切削や研削がブルドーザでザックリと削るのに対して、摩擦力を使って鋤で耕すように表層をそと取ってやる。堀切川の摩耗形態の分類に従えば、最も軽い摩耗形態、Ploughingに属する³³⁾。この加工法をMPP(Micro-Ploughing Process)と名づけた。量産には向かないが、種々のデバイスの基礎特性をきちんと見るためには有効な手段だ。

M: 珍名を付けるのはおまえの勝手だが、また死語

Linear Density : 100bit/ μm

Track Density : 100track/ μm

Track Capacity : 2×10^5 Byte

Track Number : 1×10^5

Drive Capacity : 20GB(Total) 10GB(Effective)

Data Rate at 6000rpm:10MB/s(Effective)

図4 21世紀のファイルメモリー

になるんじゃないかな。

T: 機械的な加工だけでなく、電気・光・化学反応などの手段で鋭い針先で表面を破壊・変質させたり他物質を付着させたりすると、微細構造の切断や接続、パターンの形成、情報記録ができる。Eiglerらはキセノン原子を1個ずつニッケルの表面で動かし、彼らの属する会社のロゴ「IBM」の文字を描いた⁴⁾。原子1個が情報単位とすると、記録密度は現在の光記録や磁気記録の100万倍となる。

M: 夢みたいなことをいうな。Eiglerたちは「IBM」を描くのには20数時間かかったそうだけ。

T: たしかに転送速度は問題だ³⁴⁾。しかし、我々はナノ秒で絶縁破壊による記録に成功している³⁵⁾。大久保らは、サブミクロン径の磁気記録を行った³⁶⁾。Barrettらは100nmの大きさの静電記録をやっている³⁷⁾。回路素子の進歩と並列処理方式の進歩を考えれば、今手段がないといってこれらの革新研究を抹殺することはあるまい。100万ビット/ mm^2 のオーダが現在のファイル記録の技術の延長線上の1990年代の目標とすれば、1億ビット/ mm^2 以上を狙う研究のゴールは21世紀なのだ。図4に21世紀に期待できるディスクタイプのファイルのモデルを示す。100nm領域に1ビットが入れば10ギガバイトのチップサイズのファイルができる。

M: 21世紀となると大言壮語しておるおまえなどは墓の中だ。もっともインチキがばれる時には死んでいた方がよからう。ナムアマダブツ。

(1992年1月10日受付)

〔参考文献〕

- 1) A. Kohno and S. Hyodo : "The Effect of Surface Energy on the Microadhesion between Hard Solids", J. Phys. D : Appl. Phys., **7**, pp. 1243-1246 (1974)
- 2) T. Miyamoto, R. Kaneko and Y. Ando : "Interaction Force between Thin Film Disk Media and Elastic Solids Investigated by Atomic Force Microscope", Trans. ASME, J. Tribol., **122**, pp. 567-572 (July. 1990)
- 3) R. Kaneko : "Microtribology Related to MEMS", Proc. of IEEE MEMS 1991, pp. 1-8 (Jan. 1991)
- 4) D. M. Eigler and E. K. Schweizer : "Positioning Single Atoms with a Scanning Tunneling Microscope", Nature, **344**, pp. 524-526 (Apr. 1990)
- 5) M. Hirano and K. Shinjo : "Atomistic Locking and Friction", Phys. Rev. B, **41**, pp. 11837-11851 (June 1990)
- 6) S. Miyake, R. Kaneko, Y. Kikuya and I. Sugimoto : "Micro-tribological Studies on Fluorinated Carbon Films", Trans. ASME, J. Tribol., **113**, pp. 384-389 (Apr. 1991)
- 7) T. Miyamoto, R. Kaneko and S. Miyake : "Tribological Characteristics of Amorphous Carbon Films Investigated by Point Contact Microscope", J. Vac. Sci. Technol., **9**, pp. 1336-1339 (Mar./Apr. 1991)
- 8) 多田, 今井, 横田 : "小型 HDD, 記録密度「G ビット時代」へばく進", 日経エレクトロニクス, **537**, pp. 77-95 (Sep. 1991)
- 9) S. Fukui and R. Kaneko : "Analysis of Ultra-thin Gas Film Lubrication Based on Linearized Boltzmann Equation : First report", Trans. ASME, J. Tribol., **110**, pp. 253-262 (Apr. 1988)
- 10) S. Fukui and R. Kaneko : "A Data Base for Interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems", Trans. ASME, J. Tribol., **112**, pp. 78-83 (Jan. 1990)
- 11) H. Yamaguchi, Y. Tsukamoto and M. Yanagisawa : "Mechanical Properties and Durability of Sputtered Carbon Protective Overcoats for Rigid Magnetic Disks", STLE Special Publication, SP-25, pp. 82-86 (Oct. 1988)
- 12) C. M. Mate, G. M. McClelland, R. Erlandsson and S. Chiang : "Atomic-scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface", Phys. Rev. Lett., **59**, 2, pp. 1942-1945 (Oct. 1987)
- 13) A. M. Homola, J. N. Israelachvili, M. L. Gee and P. M. McGuiggan : "Measurements of and Relation between the Adhesion and Friction of Two Surfaces Separated by Molecularly Thin Liquid Films", Trans. ASME, J. of Tribol., **111**, pp. 675-682 (1989)
- 14) MRS 1991 Spring Meeting, Final Program and Abstracts, pp. 285-290 (Apr. 1991)
- 15) F. P. Bouden and D. Tabor : "The Friction and Lubrication of Solids", Clarendon Press, Oxford (1950)
- 16) F. P. Bouden and D. Tabor : "The Friction and Lubrication of Solids, Part II", Clarendon Press, Oxford (1964)
- 17) 桜井俊男 : "潤滑の物理化学", 幸書房 (1988)
- 18) E. Rabinowicz : "Friction and Wear of Materials", p. 214, Jhon Wiley and Sons, New York (1965)
- 19) R. Kaneko, S. Oguchi, Y. Andoh, I. Sugimoto, T. Dekura : "Direct Observation of the Configuration, Adsorption, and Mobility of Lubricants by Scanning Tunneling Microscopy", ASME Adv. Info. Storage Syst., **2**, pp. 23-34 (1991)
- 20) Y. Andoh, S. Oguchi, R. Kaneko and T. Miyamoto : "Evaluation of very Thin Lubricant Films", J. Phys. D : Appl. Phys., **25**, pp. A71-75 (1992)
- 21) 安藤, 小口, 金子 : "磁気ディスク表面上のフッ化炭素系潤滑剤の STM 観測", 日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集, (福岡 1991-10), pp. 251-254 (Oct. 1991)
- 22) 安藤, 小口, 金子 : "固体表面に付着した水分子の STM 観測", 日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集, (東京 1991-5), pp. 439-442 (May 1991)
- 23) R. Kaneko, S. Oguchi, S. Hara, R. Matsuda, T. Okada, H. Ogawa and Y. Nakamura : "Atomic Force Microscope Coupled with an Optical Microscope", Ultramicroscopy, to be Published
- 24) T. Miyamoto, R. Kaneko and S. Miyake : "Tribological Characteristics of Amorphous Carbon Films Investigated by Point Contact Microscopy", J. Vac. Sci. Technol., **B9**, pp. 1336-1339 (Mar./Apr. 1991)
- 25) E. Hamada and R. Kaneko : "Microdistortion of Polymer Surfaces by Friction", J. Phys. D : Appl. Phys., **25**, pp. A53-56 (1992)
- 26) E. Hamada and R. Kaneko : "Micro-tribological Evaluations of Polymer Surface by Atomic Force Microscope", Ultramicroscopy, to be published
- 27) S. Miyake and R. Kaneko : "Micro-tribological Properties and Applications of Super-hard and Lubrication Coatings", Proc. of ADC'91, pp. 691-696 (Aug. 1991)
- 28) S. Miyake, S. Watanabe, M. Murakawa, R. Kaneko and T. Miyamoto : "A tribological Study on Cubic Boron Nitride Film", Proc. of ADC'91, pp. 669-674 (Aug. 1991)
- 29) R. Kaneko, T. Miyamoto and E. Hamada : "Development of a Controlled Frictional Force Microscope and Imaging of Recording Disk Surfaces", ASME Adv. Info. Storage Syst., **1**, pp. 267-277 (1991)
- 30) T. Miyamoto, R. Kaneko and Y. Andoh : "Microscopic Adhesion and Friction between a Sharp Tip and Al₂O₃-TiC", ASME Adv. Info. Storage Syst., **2**, pp. 11-20 (1991)
- 31) T. Miyamoto, R. Kaneko and Y. Andoh : "Microscopic Friction on Silicon Oxide and Amorphous Carbon Films Investigated by Point Contact Microscopy and Frictional Force Microscopy", ASME adv. Info. Storage Syst., **3**, pp. 137-146 (1991)
- 32) 森 : "原子単位の破壊による超精密加工", メカライフ, **7**, pp. 24-29 (Mar. 1987)
- 33) K. Hokkirigawa and K. Kato : "An Experimental and Theoretical Investigation of Ploughing, Cutting and Wedge Formation during Abrasive Wear", Tribology International, **21**, 1, pp. 51-56 (Feb. 1988)
- 34) C. F. Quate : "Swich to Atom Control", Nature, **352**, p. 571 (Aug. 1991)
- 35) R. Kaneko and E. Hamada : "Local Modification of Organic Dye Materials by Dielectric Breakdown", J. Vac. Sci. Technol., **A8**, pp. 577-580 (Jan./Feb. 1990)
- 36) T. Ohkubo, J. Kishigami, K. Yanagisawa and R. Kaneko : "Submicron Magnetizing and Its Detection Based on the Point Magnetic Recording Concept", IEEE Trans. on Mag., to be published
- 37) R. C. Barrett and C. F. Quate : "Large-scale Charge Storage by Scanning Capacitance Microscopy", Ultramicroscopy, to be published

かねこ れいぞう
金子 礼三 昭和 39 年, 京都大学大学院修士課程修了。同年, NTT 電気通信研究所に入所。20 年間ファイル記憶装置の研究開発に従事。現在, NTT 境界領域研究所金子特別研究室長。マイクロトライボロジーとその応用の研究を進めている。研究があまりにミクロなので空を飛ぶのが趣味。工学博士。