

氏 名	横 畑 徹
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	マイクロトライボロジーの基礎研究
指 導 教 官	東北大学教授 加藤 康司
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 加藤 康司      東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 江刺 正憲      東北大学教授 清野 慧

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

時期記録やマイクロマシンの分野で、サブマイクロメートル・ナノメートル規模の接触点まわりの現象解明への要求が高まってきている。その要求に答えるべく、微小接触点まわりにトライボロジー現象に取り組む研究者の数は年々増加している。しかしながら、マイクロトライボロジーという言葉の明確な概念は未だ定義されているわけではない。本研究では、サブマイクロメートルからナノメートル規模の微小接触点、マイクロニュートン以下の微小接触荷重下の接触点の科学技術が、マイクロトライボロジーと呼ばれるべき新しい学問・技術領域として分類されることを明らかにするために、そのような微小荷重下、微小サイズの接触点における、表面粗さ、接触点の変形挙動、摩擦、摩耗などのさまざまなトライボロジー現象が、従来のトライボロジーの諸知識では必ずしも扱うことの出来ない特異性をもつことを、実験的に明らかにした。

### 第 2 章 圧電アクチュエーター素子の変位感度の決定法の開発

サブマイクロメートル・ナノメートルという微小サイズの接触点を実験的に実現する方法として、走査プローブ顕微鏡法 (Scanning Probe Microscopy; SPM) を用いた実験を数多く行った。SPM では試料面を走査し、また同時に縦方向に制御しながら駆動するのに圧電素子を用いている。高精度な SPM 測定には、圧電祖との変位角度の正確な把握が不可欠である。本章では SPM の駆動素子である円筒型圧電素子の、高精度でかつ簡易な、縦方向の変位角度の決定法を開発した。

65nm の一定変位に対し 0.1nm の精度を持つ複合共鳴型レーザー変位センサ (CCL センサ) と、SPM に既設の微小変位センサを組み合わせ用いた。まず CCL センサを用いて、SPM の微小変位センサの感度と線形性を決定し、次に SPM の微小変位センサを用いて、SPM の円筒型圧電素子の、種々の印可電圧条件下の変位を測定した。測定された変位と印可電圧との関係より種々の印可電圧条件下の圧電素子の変位感度を決定した。圧電素子の非線形性に起因すると考えられる、変位感度のばらつきが観測された。また本方法は、CCP センサが 2 mm 程度の代表寸法と比較的小型なため、他のセンサを用いた方法と比べ簡易に遂行でき、圧電素子の変位感度を定期的に検定する場合などに特に有効である。

### 第 3 章 金の加工面の微視的粗さの値と粗さの波長の関係

金の機械加工面を例とし、測定長さが 10nm から 2 nm までの粗さ測定における粗さの値と粗さの波長の関係を調べ、微視的粗さから一般的な粗さまで成り立つ連続的な関係を明らかにした。

ダイヤモンドカッティングとポリシングによる 4 種の金鏡面を用意し、走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope; STM) と触針式粗さ計により断面曲線を測定した。粗さは最大高さ粗さ ( $R_{max}$ ) と中心線平均粗さ ( $R_a$ ) を JIS の定義を援用して求めた。粗さを測定長さ ( $L$ ) に対してプロットした結果は、ある長さ以下と以上とで粗さと測定長さの関係に違いがあることが分かった。次に、各測定長さにおいて観測される代表的な粗さの波長 ( $\lambda W$ ) を自己相関係数を使って抽出し、粗さと粗さの波長の関係をプロットした結果、触針式粗さ計によるデータも含め全データが次の実験式に従った。

$$R_{max} = A \lambda W^D, \quad R_a = B \lambda W^D, \quad (D \simeq 0.6, A \simeq 0.23, B \simeq 0.034) \quad (1)$$

### 第 4 章 微小押し込みにおける金表面の変形挙動

金表面とダイヤモンド圧子間の接触における金表面のナノスケールの変形挙動を調べ、弾性・弾塑性・塑性変形状態間の遷移条件を明らかにした。

炎中溶融法でつくった金球表面に STM のダイヤモンド探針を圧子として繰り返して押し込み、押し込み前後の STM 像より圧痕の深さを正確に求めた。接触荷重を広範囲に振らせるために、圧子の根元における押し込み変位を制御して押し込みを行った。実験後、装置の剛性を考慮して、各々の押し込みにおける接触荷重の推定値を求めた。

1. 5 回の繰り返し押し込みによってもなお、圧痕深さが測定されない押し込み量が存在した。
2. ある押し込み量以下では、それ以上と異なり、接触荷重の推定値は圧痕深さの 2 乗に比例しなくなった。

上記 1. の押し込み量が弾性・弾塑性の、2. の押し込み量が弾塑性・塑性の遷移条件を与えるものとして、各々の接触荷重の推定値に基づき「降伏応力」を試算した。材料のり理論強度、パイエルス応力、および他の研究者による金表面の微小押し込み硬さの実測値と比較して図 1 に示す。

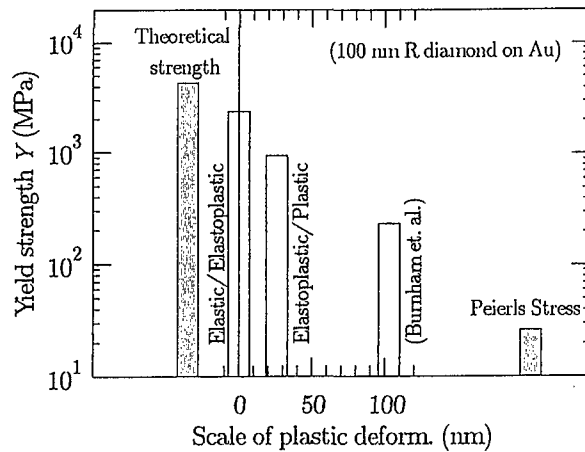


図 1

## 第 5 章 固体表面層の動的硬さ測定のための振動押し込み法の開発

固体表面層のナノスケールの強度を調べるための、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope; AFM) を用いた振動押し込み法を開発した。

AFM のカンチレバーを 2 次共振周波数で加振し、カンチレバー先端の探針に試料表面をゆっくりと近づけて接触させる。接触による衝撃で、カンチレバーには 1 次共振に近い周波数の振動も励起される。2 つの振動の位相差がランダムであることにより、やがて探針は 2 次共振周波数の運動エネルギーで試料表面に激突する。このときの衝撃エネルギーが表面の変形に使われるとした簡単な力学モデルを用いて、試料表面の動的硬さを実験条件と実験結果から求める式を導出した。ポリカーボネートの動的硬さは別に求めた静的硬さの値と一致した。一方シリコン表面の動的硬さは静的硬さの値の約  $\frac{1}{4}$  となった。脆性材のナノスケールにおける動的変形挙動はまだ明らかではなく、本方法を用いて調べることが可能であると考えられる。一方延性材に対しては、本方法は衝撃荷重により簡単に、比較的大きな荷重を与えて押し込み硬さを測定する方法を提供する。

## 第 6 章 微小荷重条件下における摩擦係数の接触荷重依存性

表面間に働く引力が無視できない微小荷重条件下における、摩擦係数の接触荷重依存性を明らかにした。

2 種の酸化シリコン表面を用意して、ダイヤモンド探針を用いた摩擦力顕微鏡 (Frictional Force Microscope; FFM) により大気中における摩擦力を測定した。測定の前後に凝着力の値も測り、これと表面間に働く van der Waals type の引力を考慮した弾性接触力学を用いて、接触下の表面間力を見積もった。接触荷重  $W$  は外力  $P$  と表面間力  $W_1$  の和として、次式により計算した。

$$W = P + W_1 \quad (2)$$

外力が負の値であっても摩擦力  $F$  が測定されるケースが存在した。摩擦係数  $\mu$  として摩擦力  $F$  を式の接触荷重  $W$  で除した値を接触荷重  $W$  に対してプロットした結果を図 2 に示す。

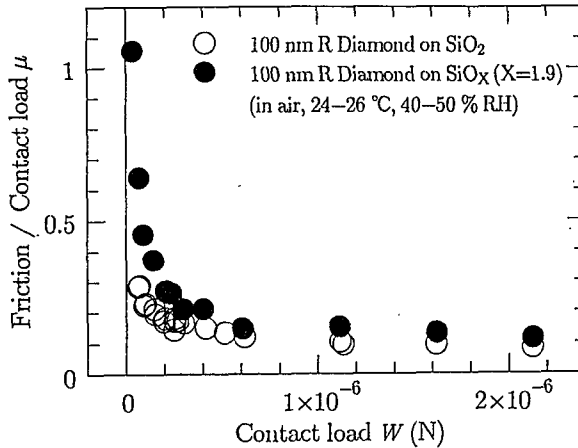


図 2

## 第 7 章 弾性接触条件下のすべり摩擦によるシリコン表面の損傷形態

弾性接触条件下のマイクロ摩耗試験により、大気中シリコン表面の損傷形態を調べ、表面の酸化によると思われる盛り上がりの形成や原子層単位の摩耗を観察した。

単結晶 Si (100) 表面を AFM のダイヤモンド探針で摩擦し、表面損傷形態を調べた。摩耗試験は弾性限内の接触圧力で一辺 1  $\mu\text{m}$  の正方形内を摩擦し、その前後に  $1/3$  程度の接触圧力で一辺 3  $\mu\text{m}$  の正方形内の AFM 観察を行った。AFM 観察の接触条件では観測される程の摩耗は生じないことを予め確認した。最大接触圧力が Si の弾性限と同程度の接触条件下で盛り上がりの形成が観測された。この盛り上がりを観測荷重を変えて AFM 観察したところ、周囲の表面に比べて弾性変形量が大きいことが分かった。縦弾性係数を試算すると酸化シリコンに近い値になった。また 6  $\text{\AA}$  / 150 cycle の原子層単位の摩耗も観測された。このときの比摩耗量は  $15^{-5} \text{ m}^3/\text{Nm}$  のオーダーだった。

## 第 8 章 結 論

第 8 章は結論であり、前章までの結果を総括した。

## 審査結果の要旨

見かけの接触面積の大きさが mm オーダー以上であり、荷重が 0.01N 以上であるような一般的接触条件下の接触面におけるトライボロジー特性は基本的に明かにされている。

しかし nm オーダーの微細加工や  $\mu$  オーダーの力を問題にするマイクロマシーンにおいて、これまでの経験に基づくマクロなトライボロジーの経験則がどこまで有効であるかは明確にされていない。著者はトンネル顕微鏡 (STM)、原子間力顕微鏡 (AFM) 及び摩擦力顕微鏡 (FFM) を用いて nm オーダーの接触点の大きさ及び  $\mu$ N オーダーの荷重領域におけるトライボロジーの諸特性を詳細に調べ、マイクロトライボロジーとして現象を整理すべき新しい学問領域の在ることを明らかにしている。本論文はその内容をまとめたもので全編 8 章よりなる。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では、チューブ型圧電素子の縦方向の変位感度を高精度でかつ簡便に決定する方法を開発している。

第 3 章では、金の切削による鏡面の粗さの微視形態の特長を nm から mm の測定長の範囲において明かにしている。

第 4 章では、 $0.1 \mu\text{N}$  から  $100 \mu\text{N}$  の荷重範囲における金の硬さ実験を STM を用いて、マクロな硬さ試験によっては得られない大きな硬さ値が測定されることを示している。

第 5 章では、固体表面層の動的硬さを nm オーダの申し込み量で測定するために、AFM 用いた振動押し込み法を開発し、それによってシリコンとポリカーボネートの動的硬さを測定し、静的硬さ値とは異なることを明かにしている。

第 6 章では、FFM により表面間力及び摩擦力を  $0.1 \mu\text{N}$  のオーダーで測定し、この荷重領域における摩擦係数の荷重依存性の特異性を明かにし、表面間力を導入した接触モデルに基づいてその結果を理論的に説明している。

第 7 章では、 $1 \mu\text{N}$  オーダーの荷重下の繰り返しすべり摩擦によるシリコン単結晶の摩擦試験を AFM を用いて行い、見かけ上、正の摩耗と負の摩耗が存在することを明かにし、原子層単位の摩耗率を求めている。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、nm オーダーの接触点の大きさ及び  $\mu\text{N}$  オーダーの荷重領域において、マイクロトライボロジーとして分類されるべき特異なトライボロジー特性が観察されることを多面的に明らかにしたものであり、機械工学及びトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。