

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560151

研究課題名（和文） マイクロ/ナノトライボロジーの超微細加工への応用

研究課題名（英文） Application of micro/nanotribology to micro fabrication

研究代表者

高木 誠 (MAKOTO TAKAGI)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40288428

研究成果の概要：将来様々な分野への応用が期待されるマイクロ/ナノシステムの実現に必要な Si 単結晶の微細加工技術として、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて微小荷重で引掻き摩擦による加工を試み、得られた加工形状や微構造変化を解明して、加工プロセスを推定した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

(1) 環境問題に起因する省エネルギー化や高齢化社会の到来といった時代背景のなかで、より高機能な機械システムや、それを実現するための高度な技術の開発が必要とされている。そうしたなかで特に、医療分野をはじめとする様々な分野で、マイクロマシン(マイクロシステム)やナノデバイスといった、これまでにない高精細な機器の開発が期待されている。それらの実現には、サイズダウンに伴って材料技術がますます重要になり、材料間に生じる微小荷重・微小面積下の摩擦・摩耗(マイクロ/ナノトライボロジー)や、ナノスケールの超微細加工技術などがキーテクノロジーになる。

(2) 「マイクロ/ナノトライボロジー」は新しい概念であり、従来のマクロなトライボロジーの概念では説明できないと言われている。そのため、国際的にも関心が高まり、近年の走査プローブ顕微鏡 (SPM) の発展とも相まって、マイクロ/ナノトライボロジーに関する研究が進められてきた。しかし、ナノスケールの摩擦摩耗現象に関して十分な解明がなされていないのが現状である。

一方、「超微細加工技術」については、ナノスケールの加工が可能な SPM や集束イオンビーム FIB を用いて研究が試みられているが、加工条件や加工形状を系統的に研究した例は数少ない。さらに、形成された微細加工部について、原子レベルの微細組織や諸物性値はほとんど未解明な状態である。

2. 研究の目的

(1) これまでに走査プローブ顕微鏡(SPM)を用いて研究を進めてきた、マイクロ/ナノトライボロジーに関する研究をさらに発展させて、ナノスケールの超微細加工技術を開発することを目的とする。すなわち、摩擦による機械的な超微細加工技術である。

(2) 学術面で重要な摩擦・摩耗現象の原理の解明につながる加工メカニズムの解明を、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて行う。

3. 研究の方法

(1) Si 単結晶等を試料として、SPM のAFM(原子間力顕微鏡)モードを利用して、探針に微小荷重を作用させて生じる摩擦により、試料表面にナノスケールの溝加工および面加工を試みた。その際に摩擦加工条件として、荷重、探針の走査速度・走査回数などを変化させて、それらの影響を調べた。

(2) 種々の摩擦加工条件で表面に形成した微小な加工溝および加工面について、形状はSPM 及び TEM を用いて、また原子レベルでの内部構造の変化は TEM を用いて調べた。このうち、TEM を用いた実験には、FIB を用いる試料作製により特定の微小領域の断面を観察することのできる、独自のナノ解析技術を駆使した。

これらの実験により、摩擦加工条件と加工形状や内部構造との相関関係を明らかにして、学術面からも重要な摩擦・摩耗現象の本質的な原理の解明を試みた。

4. 研究成果

(1) 面状の引掻き摩擦による加工深さは、荷重にかかわらず走査回数の増加に伴い増加した。走査回数 20 回までに比べて 40 回になると、荷重が大きい場合には、加工量の増大が顕著になり、荷重による差もはっきりと現れた。走査回数の少ない初期において加工深さが大きく変化しないのは、大気中での試験のために Si 単結晶表面に自然酸化膜や水蒸気などの吸着層が存在し、それらを削り取る必要があるためであると考えられる。

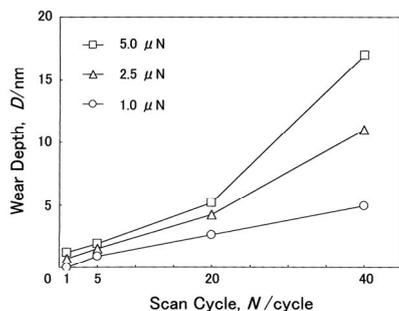


図1. 走査回数と加工(摩耗)深さの関係

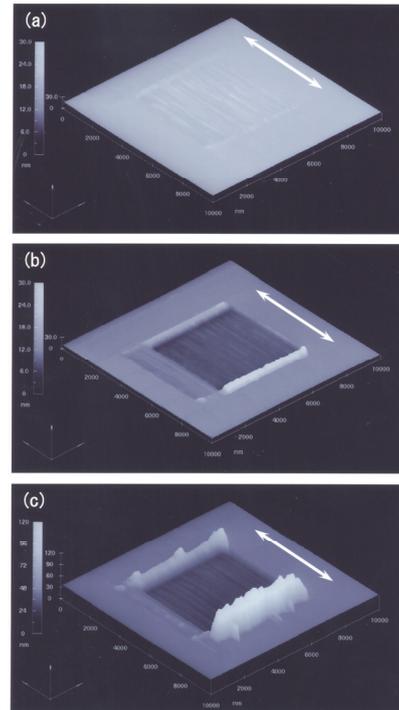


図2. 面加工部のAFM像
走査回数 (a)1回, (b)20回, (c)40回

(2) 荷重 $100 \mu\text{N}$ 、走査回数 1 回、走査方向 $\langle 110 \rangle$ の面状引掻き摩耗試験によって生じた微小な摩耗痕の断面 TEM 写真である。Si 単結晶に生じた摩耗痕の表面には、大きさ 40nm 以下の小さな転位ループを含む格子欠陥が発生しているのが観察された。

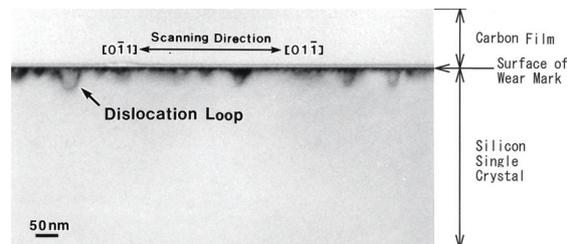


図3. 面加工部の断面のTEM像

(3) Si 単結晶表面に線状(1ライン)の引掻き摩擦で生じた極微小な加工溝の断面をTEM観察した結果、加工溝表面に小さな転位ループの発生を多数観察することができた。転位の発生は荷重 $5 \mu\text{N}$ 以上で観察され、荷重 $20 \mu\text{N}$ 以上では、転位だけではなくアモルファス相も観察された。このアモルファス相は、引掻き摩擦時に特に応力が集中した摩耗部分に現れる傾向が見られた。また、荷重 $1 \mu\text{N}$ 以下では転位もアモルファス相も観察されなかった。

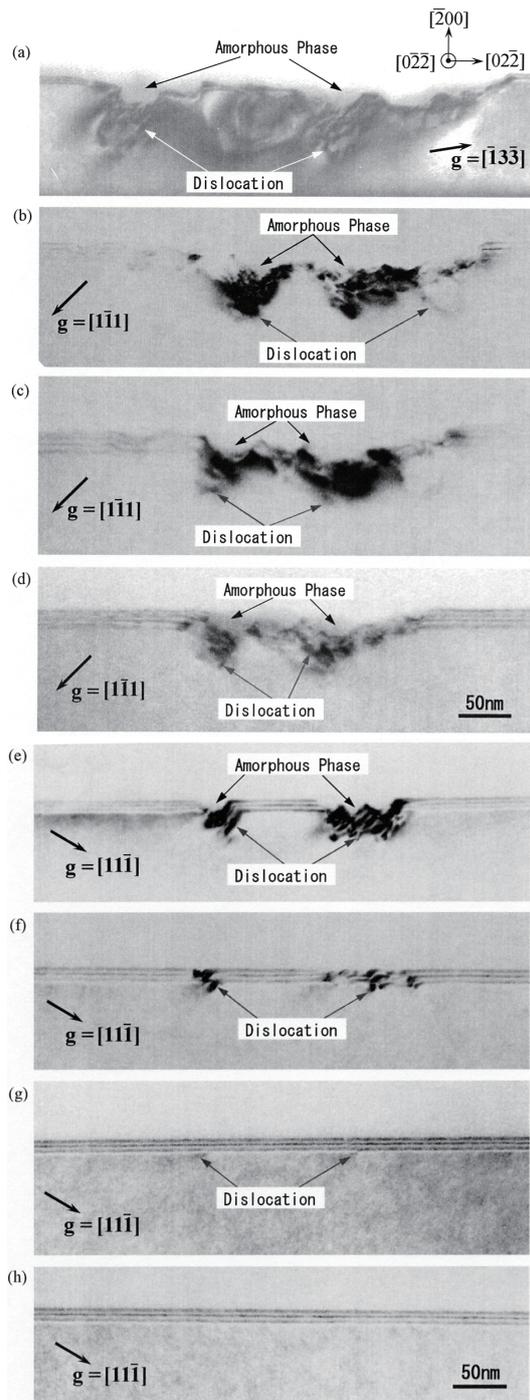


図3. 加工溝断面のTEM像
引掻き荷重 (a) $70 \mu\text{N}$, (b) $50 \mu\text{N}$, (c) $40 \mu\text{N}$,
(d) $30 \mu\text{N}$, (e) $20 \mu\text{N}$, (f) $10 \mu\text{N}$, (g) $5 \mu\text{N}$,
(h) $1 \mu\text{N}$

なお、アモルファス相の発生量は荷重 $50 \mu\text{N}$ までは増加した後、飽和する傾向がみられた。また、転位が発生する領域の深さも荷重の増加に伴って増加した。

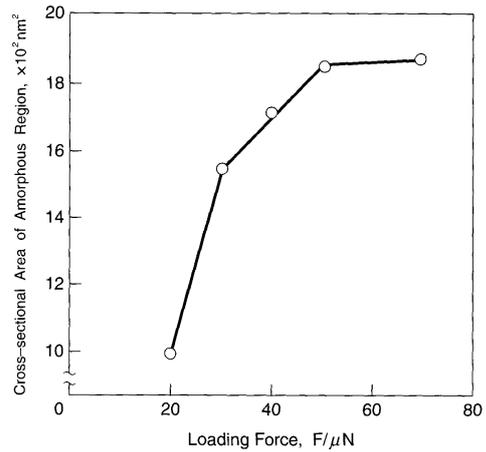


図4. アモルファス相の量と荷重の関係

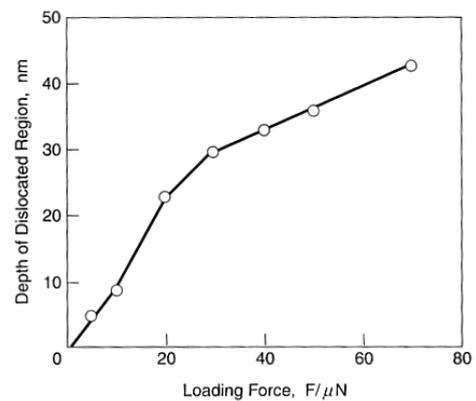


図5. 転位が発生する深さと荷重の関係

(4) Si 結晶における微小荷重下のナノスケールの摩擦現象としては、主に容易すべり面上での転位の発生と、高応力域に現れる傾向のあるアモルファス相の形成が生じることができるといえる。転位ループが $\{111\}$ 容易すべり面上に存在することを解明し、バーガース・ベクトルも決定した。このような転位の発生から、脆性材料と言われる Si 単結晶においても、微小荷重の引掻き摩擦に伴い塑性変形が起こっていることを明らかにした。

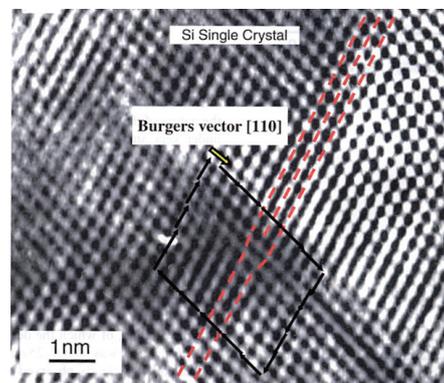


図6. 加工溝断面の高分解能TEM像

以上のように、結晶材料における微小荷重下のナノスケールの摩擦現象としては、主に容易すべり面上での転位の発生と、高応力域に現れる傾向のあるアモルファス相の形成が生じるということが出来る。

(5) SiC 単結晶を試料として同様に AFM を用いて微小荷重で引掻き加工を行い、その加工形状や微構造変化を解明し、Si 単結晶の場合と比較した。その結果、Si 単結晶と同様に、SiC 単結晶でも AFM 加工の進展に伴い加工深さが増大するが、加工深さは Si 単結晶よりも浅い。これは SiC 単結晶の高硬度に起因するものと考えられる。

ダイヤモンド構造を持つ Si 単結晶では転位は(111)容易すべり面に生じるが、最密六方構造を持つ SiC 単結晶では(0001)容易すべり面に観察されるだけではなく、その他の結晶面にも見られ、複雑な変形過程となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Makoto Takagi, Kenji Onodera, Akihito Matsumuro, Hiroyuki Iwata, Katsuhiko Sasaki and Hiroyasu Saka, “TEM and HRTEM Observations of Microstructural Change of Silicon Single Crystal Scratched under Very Small Loading Forces by AFM”, Materials Transactions, **49** – 6, pp1298 – 1302 (2008) 査読有り.

2. 吉田浩也, 松室昭仁, 岩田博之, 高木誠, 「SPM を用いた Si 単結晶のナノ加工と表面の構造変化」精密工学会誌, Vol. 73, No. 10, pp. 1149–1153 (2007) 査読有り.

[学会発表] (計 7 件)

1. 川本竜也, 高木誠, 松室昭仁, 「生体適合材料の AFM によるマイクロトライボロジーと構造変化」精密工学会秋季大会学術講演会論文集 **162** (2008).

2. 松本達, 高木誠, 松室昭仁, 岩田博之, 「SPM 加工現象の TEM 内その場観察」精密工学会秋季大会学術講演会論文集 **164** (2008).

3. 中山浩征, 高木誠, 松室昭仁, 「FIB-
CVD によるマイクロ構造体の作製と機械的性質」精密工学会秋季大会学術講演

会論文集 **146** (2008).

4. 粕谷健太, 高木誠, 松室昭仁, 「スパッタリング TiC 薄膜のマイクロスケールにおける機械的特性」精密工学会秋季大会学術講演会論文集 **163** (2008).

5. 新井裕之, 松室昭仁, 高木誠, 「ナノチューブ探針を用いた STM 加工による微小構造体の作製」, 2007 年度精密工学会秋季大会論文集, p. 707-708 (2007)

6. 岡田猛, 高木誠, 松室昭仁, 岩田博之, 坂公恭, 「AFM を用いた引掻き加工に伴う Si 単結晶の微構造変化」, 2007 年度精密工学会秋季大会論文集, pp. 839-840 (2007)

7. 岡田猛, 高木誠, 松室昭仁, 岩田博之, 坂公恭, 「AFM による引掻き加工に伴う Si 単結晶のアモルファス化とその挙動」日本金属学会講演概要 2007 年秋期大会 p. 419 (2007).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 誠 (TAKAGI MAKOTO)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40288428

(2) 研究分担者

松室 昭仁 (MATSUMURO AKIHITO)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：80173889