

シリコン単結晶のマイクロトライボロジーに及ぼす温度の影響

[研究代表者] 高木 誠 (工学部機械学科)

[共同研究者] 岩田博之 (工学部電気学科)、坂 公恭 (総合技術研究所)

研究成果の概要

マイクロシステム(MEMS)応用のための基礎データとして、また物質間の摩擦・摩耗現象に関する基礎的なモデルとして、高純度で極めて完全性の高い結晶構造を有するシリコン単結晶について微小荷重・微小面積下の摩擦・摩耗における温度の影響を調べた。具体的な実験方法としては、原子間力顕微鏡(AFM)を用いてシリコン単結晶探針によりシリコン単結晶ウエハ表面に引掻き摩擦を室温及び加熱下で行い、それに伴う微形状変化と微構造変化を調べた。その結果、473K以上の加熱下ではシリコン単結晶ウエハの摩耗量が増加し、摩耗面直下には小さな転位が多数発生した。温度 673K では、摩擦力が大きな規則的な変動を繰り返すようになり、探針とウエハの両方が激しく摩耗して、ウエハ摩耗面には表面の微細な転位とともに、深さ 400nm 付近に摩擦力の変動に対応した間隔で大きな転位が発生した。これは高温でスティックスリップが起こったことを示していると考えられる。

研究分野：材料工学、材料科学

キーワード：シリコン単結晶、原子間力顕微鏡、摩擦・摩耗、透過型電子顕微鏡、高温

1. 研究開始当初の背景

近年、医療や情報など様々な分野において、狭小空間で動作可能なマイクロシステム(微小機械 MEMS)の開発が期待される。これに関連して、微小荷重下の摩擦・摩耗、すなわちマイクロトライボロジーが注目されている。これは摩擦・摩耗現象を微視的な視点から捉えるもので、MEMS 応用だけでなく、摩擦・摩耗現象の原理の本質的な解明につながる基礎的な知見が得られる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、MEMS 材料にも使用され、高純度で完全性が高い Si 単結晶を試料として使用することで、マイクロトライボロジーで生じる微構造変化を詳細に調べ、摩擦・摩耗現象の解明を試みた。その際に温度の影響も調べるために、室温だけでなく加熱下でも実験を行った。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示すように、Si(100)単結晶ウエハを試料として、原子間力顕微鏡 AFM を用いて、Si 単結晶探針に荷重 800 μ N を作用させた状態で、10 μ m/s の速度で長さ 5 μ m 走査させる 1 ラインの引掻き摩擦を、少

しずつ位置をずらして重ね合わせながら、最終的に 512 ラインで 5 μ m \times 5 μ m の領域に引掻き摩擦を行った。摩擦現象に及ぼす温度の影響も調べるために、真空中でヒーターにより Si 単結晶試料を室温および 373K、473K、673K に加熱した状態で引掻き摩擦を行った。

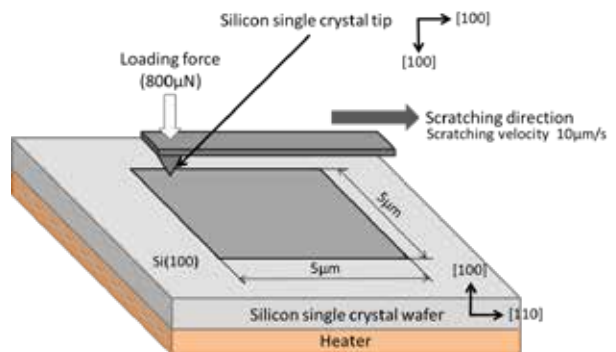


図 1 AFM を用いた摩擦・摩耗試験の模式図

引掻き摩擦試験後に、Si 単結晶試料表面の形状を AFM で、相手材である Si 単結晶探針の形状を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。さらに摩擦に伴う微構造変化は透過型電子顕微鏡(TEM)で調べた。また摩擦力は AFM を用いて測定した。

4. 研究成果

真空中で室温、373K、473K、673K の各温度で摩擦後の試料表面の形状を測定した AFM 像及びその断面図を図 2 に示す。温度 473K では、摩擦面は室温及び 373K と同様に平坦ではあるが、摩擦量は約 6nm と明らかに増加し Si 単結晶相が明らかに摩耗している。これは Si 単結晶の硬度が室温～373K ではほとんど変化しないが、473K になると低下したためと考えられる。温度 673K では、大きな摩耗が生じ断面形状が不規則になったが、これは Si 単結晶の硬度が著しく低下し、塑性変形したと考えられる。

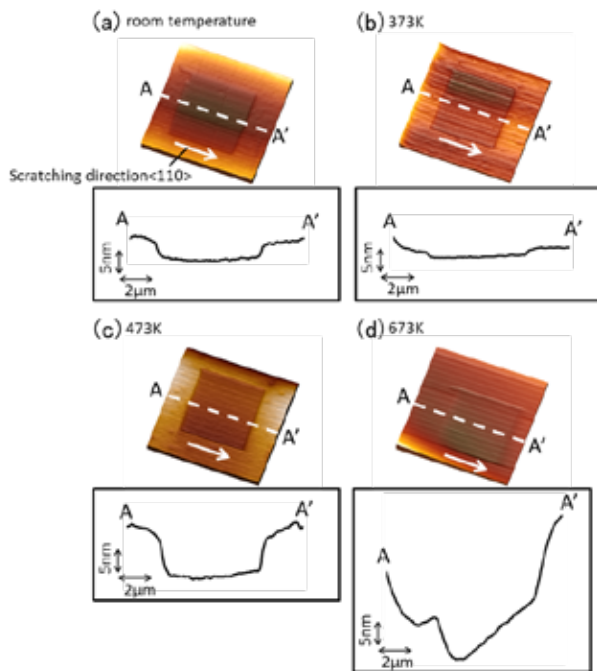


図 2 種々の温度で生じた摩耗面の AFM 像及びその断面図

図 3 は真空中で各温度で引掻き摩擦試験を行った後の Si 単結晶探針の SEM 像である。室温、373K、473K では Si 単結晶探針はわずかに摩耗しただけであるが、673K では探針も大きく摩耗した。これは加熱により Si 単結晶の硬度が著しく低下し、軟化して接合した Si 単結晶間に摩擦力が作用し、探針及び試料ともに激しく摩耗したものと考えられる。

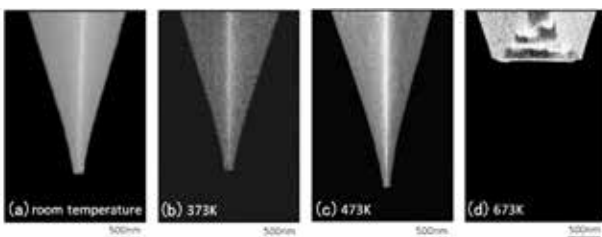


図 3 種々の温度で摩擦後の探針の SEM 像

図 4 は、種々の温度で測定した、Si 単結晶探針-Si 単結晶試料間の引掻き摩擦力である。室温、373K、473K において摩擦力は走査距離に関わらずそれぞれ安定した値となった。室温に比べて 373K、473K では摩擦力が少し増加したが、これは加熱に伴い水分等の吸着層が減少し潤滑効果が低下したためであると考えられる。それらとは異なり、673K では摩擦力は大きく変動した。

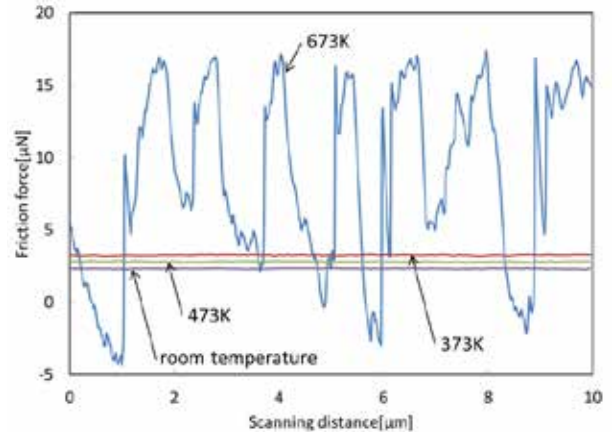


図 4 種々の温度で測定した探針-試料間の摩擦力

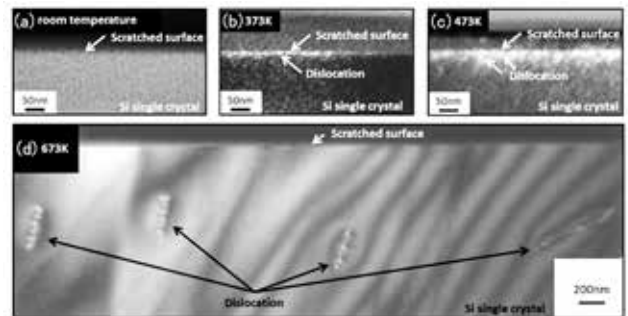


図 5 種々の温度で生じた摩耗面の断面の TEM 像

図 5 は各温度で引掻き摩擦した摩擦部の断面 TEM 像である。室温では転位は見られなかったが、373K では試料表面に小さな転位が発生し、473K では 373K よりも大きな転位が表面に入り、表面付近で塑性変形が起こっている。673K では 373K や 473K と同様に摩耗面表面に小さな転位が発生するだけでなく、試料の摩擦表面から 500nm 程の深さにはほぼ規則的な間隔で大きな転位が発生した。転位の間隔は図 4 の摩擦力のピーク間隔とおおよそ一致していた。これらの結果から、673K になると Si 単結晶は著しく軟化して探針と試料が接合と剥離を繰り返すスティックスリップが起こるようになるため、摩擦力に大きな変動が繰り返し生じ、接合時に摩擦力により塑性変形が起こり、剥離面から深さ約 500nm 程度の深さに転位が発生したと考えられる。