

論文の要旨の内容

論文題目: 固体潤滑の機構解明を目指すナノせん断破壊の実時間 TEM 観測

氏名: 佐藤 隆昭

MEMS(Micro Electro Mechanical System)とは、半導体微細加工技術を応用してシリコンウェハ上にマイクロ寸法の機械を集積する技術であり、近年では携帯電話や TV ゲームの人体動作検出センサー、デジタルカメラの手ぶれ補正用のジャイロセンサーなどで応用されている。MEMS の働く微小領域においては、長さの 3 乗に比例する体積の効果(慣性力や重力)は大きく減少し、応答速度や駆動速度などの性能が顕著に向上する。一方、長さの 2 乗に比例する面積の効果、例えば摩擦の効果が支配的になる。MEMS やナノマシンでは可動部と固定部の接点を必要とするため、そこでの摩擦や摩耗の低減が重要課題である。すなわち、低摩擦でエネルギー損失が小さく信頼性の高い MEMS 開発には、ナノサイズの潤滑機構の解明や、潤滑材の特性向上が急務である。

摩擦とは二つの物体の界面で実際に接触している真実接触面のせん断破壊の総和である。摩擦現象をより深く理解するためにはこの微小なせん断変形を観察する必要がある。しかし、広く用いられている原子間力顕微鏡(AFM)によるナノ摩擦の研究では、接触界面の変形をリアルタイムで観察できない。このため、転位論や量子力学といった材料科学の観点から摩擦の現象に直接解釈を与えられない問題があった。そこで本研究では、(a)サブ nm の精度で駆動できるマイクロマシン(MEMS)と(b)原子レベルの変形を観察できる透過型電子顕微鏡(TEM)を組み合わせ、変形と摩擦力の変化の関係を直接観測できる実験系を構築した。

原子レベルの変形をリアルタイムで観察し、同時にせん断力をサブ nN の精度で観測できた。せん断駆動に伴って、原子由来の不連続な変形の観察に成功し、この際にかかる力の変化を計測した。サブ nm 精度でせん断変形の観察に成功し、摩擦のメカニズムの解明に向けて必要な実験系を構築した。

Ag と Si のせん断破壊を比較することで Ag 潤滑の効果を確認した。Ag 接合のせん断方向の伸びは Si より 1/4 であり、Ag をせん断破壊させることに必要な力は Si より 1/30 であった。結果 Ag は Si とし比較して 1/120 のエネルギーでせん断破壊できることを確認した。

作製した MEMS を用い、Ag の細い接合(接触直後の直径 2.4nm)と太い接合(接触直後の直径 13.1 nm)を作製し、せん断変形の降伏応力をそれぞれ比較した。2.4 nm の場合の降伏応力は 2 GPa、13.1 nm の場合の降伏応力は 0.5 GPa の瞬間に破断した。このように接触直後の接合の直径の変化に伴って、降伏応力が異なった。

ナノ・マイクロスケールの摩擦の考察からよりマクロスケールの摩擦・潤滑の法則にも貢献が期待できる。本研究はナノ構造の効果を微視的レベルで直接観察するアプローチによって、ナノサイエンスおよびナノトライボロジー技術に新たな知見を与えるだけでなく、実用的課題に対して有用な情報を提供することで、潤滑材の特性の向上につながる設計指針として多大な貢献を期待できる。