

実験ナノメカニクスの最前線

— AFM/MEMS 技術を利用したナノ材料評価 —

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の構成要素をナノメートル寸法にスケールダウンした NEMS (Nano Electro Mechanical Systems) は、デバイスの高集積化と低消費電力化を可能とするだけでなく、デバイスを構成するナノ材料の特異な物理特性を積極的に利用できることから、新規な機能を持ったデバイスの創出が期待されている⁽¹⁾。しかしながら、デバイス要素が幅、厚さともに数 10~数 100 ナノメートルという極微小寸法であることから、その機械的性質を実験的に定量評価することは極めて困難である。このため、デバイス開発において、コンピュータシミュレーションの際に必要なとなるナノ寸法下での材料物性値をバルク材のそれに置き換えざるを得ないのがほとんどである。

本稿では、これまで困難とされてきたナノスケール材料の機械的特性を実験的に解明するために開発された、実験ナノメカニクス技術について紹介する。

2. AFM を用いた準静的曲げ試験

ナノスケール材料に対して力学試験を実施するには、いかに高精度な超微小荷重計測および変位計測を実現するかが鍵となる。AFM (Atomic Force Microscope; 原子間力顕微鏡) は試料表面の凹凸を計測する装置であるが、その優れた変位分解能と荷重計測機能を用いて、ナノスケール材料に対する曲げ試験機として用いることができる。図 1 に示す幅 200nm、厚さ 250nm、長さ 6mm の単結晶シリコンナノワイヤに対して、常温~300°C の範囲で AFM 内準静的曲げ試験を実施し、シリコンナノワイヤの非弾性変形挙動の寸法効果が解明された⁽²⁾。ここでは、ナノスケールのシリコンが 100°C という常温に近い温度領域で非弾性変形すること、また、試料寸法の低下に伴って非弾性ひずみ範囲が増加することが明らかになっている。ミリメートル寸法のシリコンでは、約 500°C 以上で非弾性変形が観察されていることから、AFM 曲げ試験で得られた変形挙動はナノ領域特有のものといえる。さらに、非弾性変形挙動の寸法効果が、シリコンナノワイヤに蓄え

られたひずみエネルギーと外部からの熱エネルギーとの相互作用に起因することを、刃状転位モデルと同ナノワイヤに対する簡易クリープ試験によって実証された。以上のことは、NEMS の設計、開発および使用上、極めて重要な事柄を示している。すなわち、温度やひずみ速度を考慮した設計が、高い信頼性を持つデバイス開発にとって重要であることを示唆している。

3. MEMS デバイスによるナノ材料引張り試験

曲げ試験では試料内に応力勾配が生じるため、一様応力下での破壊強度を直接評価できない。そこで、引張り駆動用アクチュエータ、超微小変位計測機構、ならびにナノスケール試料が約 10mm 角のシリコンチップ上に集積された、静電駆動型 MEMS アクチュエータを搭載したナノ材料引張り試験デバイスが開発された (図 2⁽³⁾)。試験片には、FIB-CVD 法で作製された直径 85nm、長さ 5mm のカーボンナノワイヤ (CNW) が、また、アクチュエータには 1 000~5 000 組の櫛歯型静電アクチュエータが組込まれている。いっぽう、変位計測機構としては、試料の引張り変位を 91 倍に増幅することができる変位拡大用カンチレバーが組込まれ、同機構と画像処理計測とを併用することで、理論上ピコメートル・オーダの変位計測を実現している。ナノ材料引張り試験デバイスを用いた CNW の単軸引張り試験から、ヤング率は約 60GPa、破断強度は約 4.5GPa を示し、同ナノ材料が NEMS 用構造材料として利用可能な高強度性を有していることが明らかになった。さらに、単軸応力下での電気抵抗計測によって、弾性変形に伴う CNW の抵抗変化率が金属材料のそれと同程度であることが確認され、ナノセンサ材料への適用も期待できることがわかった。

4. おわりに

ナノスケール材料に対する高精度な機械的、電気的特性評価は、高い信頼性を持つ NEMS の開発に直接結びつくものであり、その重要性は今後ますます高まるものと考えられる。また、機械的、電気的特性に限らず、磁氣的、熱力学的特性といったさまざまな物理

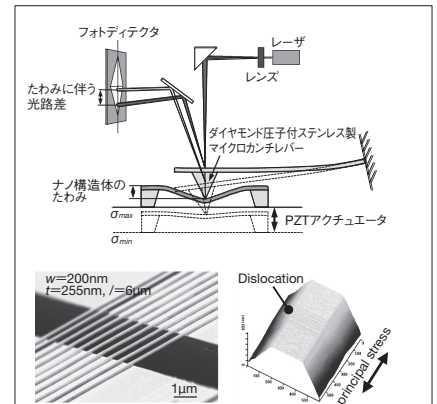


図 1 AFM 内準静的曲げ試験の模式図とシリコンナノワイヤ試験片

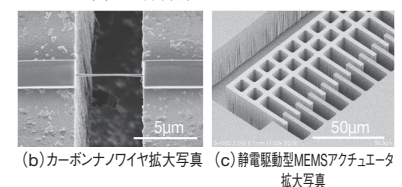
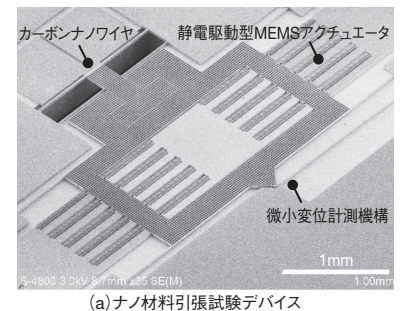


図 2 静電駆動型 MEMS アクチュエータ搭載ナノ材料引張り試験デバイスとカーボンナノワイヤ試験片

特性を定量的に評価することも新規 NEMS の創出に繋がるものである。この観点からも、実験ナノメカニクス技術をはじめとするメゾスコピック領域での物性評価技術の発展が望まれる。

(原稿受付 2007 年 2 月 1 日)

[磯野吉正 立命館大学]

●文献

- (1) Cleland, A. N. and Roukes, M. L., A Nano-Meter-Scale Mechanical Electrometer, *Nature*, 392 (1998).
- (2) Namazu, T., Isono, Y. and Tanaka, T., Plastic Deformation of Nanometric Single Crystal Silicon Wire in AFM Bending Test at Intermediate Temperatures, *Journal of Micro Electro Mechanical Systems, IEEE/ASME*, 11-2 (2002), 125-135.
- (3) Kiuchi, M., Matsui, S. and Isono, Y., Development of Electrostatic Actuated Nano Tensile Testing Device for Mechanical and Electrical Characteristics of FIB Deposited Carbon Nanowire, *2006 MRS Spring Meeting Proceedings CD-ROM*, (2006-4).