

ナノ立体形状の定量計測 —探針補正技術と高感度光干渉変位センサー—

Quantitative Measurement of 3D Nanostructure Devices
—Probe Deformation Correction Technique and Highly Sensitive Interferometric Displacement Sensor—

渡辺 正浩 中田 俊彦
Watanabe Masahiro Nakata Toshihiko

日立グループは、ナノ立体形状の定量計測を実現するため、高精度な原子間力顕微鏡の研究を進めてきた。微細で高アスペクト比な立体構造を正確に測定するため、先端径 10 nm 程度のカーボンナノチューブ探針（プローブ）に適した探針形状補正技術を開発した。さらに、探針の位置を正確に読み取るため、フォトニック結晶を用いることで、原子間力顕微鏡に組み込み可能な親指サイズで変位感度 40 pm の世界最小・最高感度の光干渉変位センサーを開発した。これらの技術により、ナノスケール先端デバイスの開発・製造に適用して信頼性や歩留まりの向上に寄与していくとともに、基礎研究分野にも応用していく。

1. はじめに

微細化が進む半導体素子やHDD（Hard Disk Drive）用磁気ヘッド素子などのナノスケール先端デバイスの性能向上・安定量産には、立体構造の寸法をサブナノメートルの精度で測定することが不可欠である。この要求に応えるため、微細な探針（プローブ）で探針と試料表面の原子間に働く力を一定に保ちながら試料表面をなぞることで立体形状を測定するAFM（Atomic Force Microscope：原子間力顕微鏡）に着目し、高精度AFM技術の研究・開発を進めてきた。

微細でアスペクト比の高い立体構造を安定に測定するためには、細くてかつ強度の高い探針が理想的である。従来のシリコン探針（ヤング率：0.072 TPa）に比べて強度が格段に高く（ヤング率：1 TPa）、耐摩耗性に優れ、AFMにとって最適な先端径 10 nm 程度のCNT（Carbon Nanotube：カーボンナノチューブ）を用いた探針に着目し、探針・試料間の原子間力によるCNTの変形と先端形状に起因する測定誤差を補正する、探針変形・形状補正技術を日立建機株式会社と開発した¹⁾。

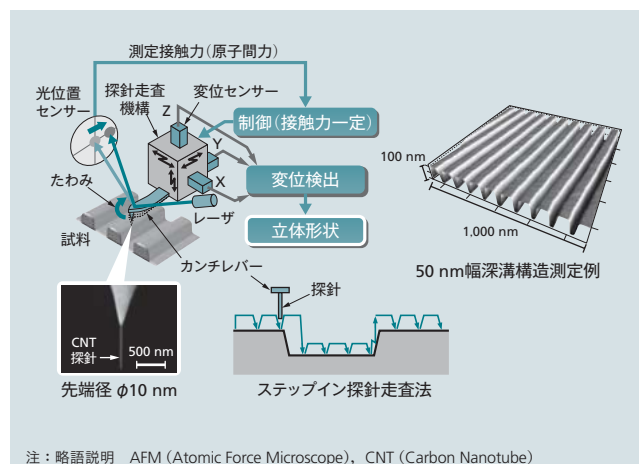
一方、さらなる測定精度の向上には、探針の位置制御の

精度向上が不可欠である。このため、探針の位置を読み取る変位センサーとして、従来の静電容量センサーに代えて、AFMの探針走査機構に組み込み可能な、親指サイズで変位感度 40 pm ($1\text{pm}=10^{-12}\text{m}$) の世界最小・最高感度の光干渉変位センサーを開発した²⁾。

ここでは、これら高精度AFM技術の原理、特徴、および性能評価結果について述べる。

2. AFMの原理

AFMの原理と測定例を図1に示す。まず、探針を取り付けたカンチレバーの背面にレーザ光を照射する。試料と探針の間の原子間力（接触力）によってカンチレバーがたわむと、背面で反射するレーザ光の方向が変わるので、これを光位置センサーで受光することで接触力を検出する。この接触力が一定になるように、探針走査機構によって探針をZ軸方向に調整しながら、XY軸方向に走査する。このときの走査機構のXYZ軸方向の変位量を変位センサー



注：略語説明 AFM (Atomic Force Microscope), CNT (Carbon Nanotube)

図1 | AFMの原理(左)と測定例(右)
微細なCNT探針と試料の間の接触力をレーザ光で検出しながら探針を走査することで、ナノ立体形状を測定する。

で読み取ることで、立体形状を測定する。アスペクト比の高い立体構造に対しては、探針をそのままX軸方向に走査すると、側壁に横から接触することで探針が曲がって測定精度が低下する。そこで、測定点ごとに探針を真上から降ろし、一定の接触力になった時点で探針の位置を検出し、その後探針を引き上げ、次の測定点に移動する方式（ステップイン探針走査法）を採用している。

3. 探針変形・形状補正技術

3.1 探針の変形による測定誤差

CNT探針によってアスペクト比の高い立体構造を測定する場合、探針が試料の側壁に吸引されることにより、CNTのたわみ変形が生じる。すなわち、探針が試料の側壁に沿って降りていくに従い、CNTが側壁から受けるファンデルワールス力が大きくなり、途中で探針がたわんで側壁に吸着される現象が起こる（図2参照）。このため、探針先端半径分に相当するAFM固有のオフセット誤差〔同図(a)参照〕に加えて、側壁形状の下部が膨らむという新たな測定誤差〔同図(b)参照〕が生じる。これらの誤差を実際の測定で見積もったところ、例えば深さ100 nmの溝の幅を直径27 nm、長さ265 nmのCNT探針で測定した場合、溝底での溝幅の測定値は11.6 nmも小さくなるという結果を得た。

3.2 補正原理

CNT探針が側壁に吸着されると、探針を搭載したカンチレバーがねじれる（図3参照）。このねじれは、探針に働く上下方向（Z軸方向）の接触力によるたわみとは直交する方向にレーザ光を移動させる。このレーザ光の上下・左右方向の動きを光位置センサー上で分離して検出することで、探針先端に働く上下方向の接触力と横方向の動きを同時に検出することが可能となる。

探針の吸着現象、ねじれと光位置センサー上のレーザ光スポット位置との関係を正確にモデル化することで、測定誤差を補正する方法を開発した¹⁾。

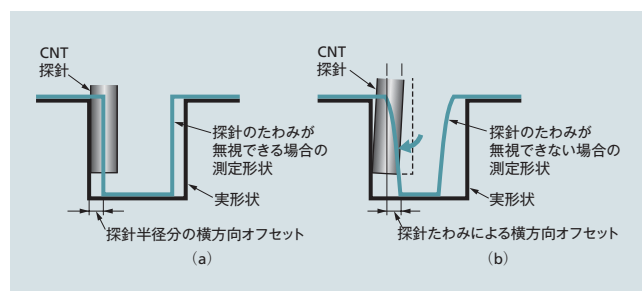


図2 | 探針変形による測定誤差の発生

探針の変形が無視できる場合(a)と、無視できない場合(b)の測定プロファイルを示す。

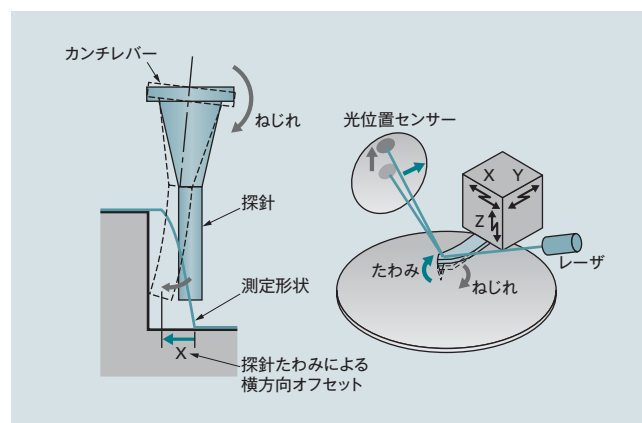


図3 | 探針変形の補正方式

探針が側壁に吸引されてたわむとカンチレバーがねじれる。これを光位置センサーで検出することで、探針たわみによるオフセットを推定して補正する。

3.3 補正の効果

以下に補正結果の例を示す。線幅基準用ラインサンプル（校正線幅： 25.4 ± 0.5 nm，側壁角 90° ）を用いて行った測定結果を図4に示す。同図(a)に示すように、補正を行わない場合、探針先端の太さと変形の影響でラインが台形状に太っていることがわかる。探針形状の補正のみでは同図(b)に示すように台形状の変形が残るが、提案方式で探針の変形と形状を共に補正すると、同図(c)に示すように 90° 側壁形状が正しく得られる。さらにTEM（Transmission Electron Microscope：透過電子顕微鏡）であらかじめ線幅を測定した5種類のラインパターンの幅を3本の異なる探針で測定した結果を図5に示す。この補正により、線幅の測定誤差 ± 1.7 nm以下、静的再現性 0.54 nm (3σ)を得た。

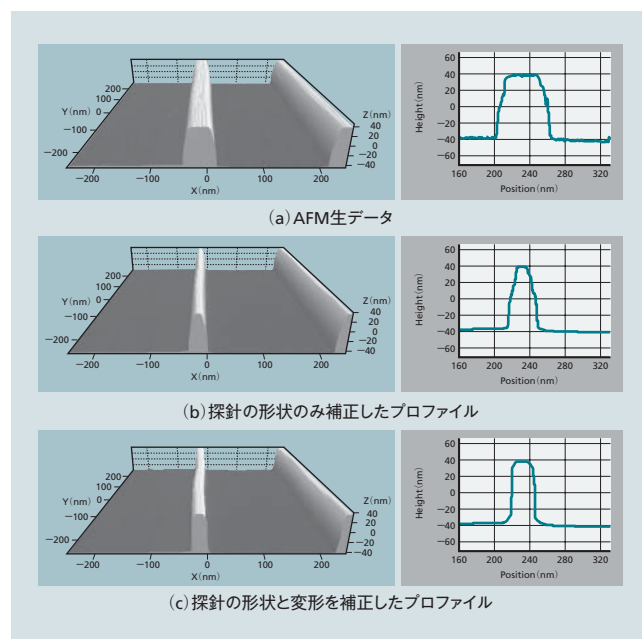
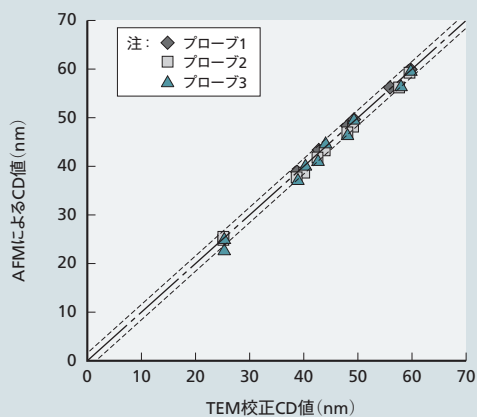


図4 | 線幅基準用ラインサンプルのAFM測定形状のひずみと補正の効果

測定結果の鳥観図を左に、ライン部断面を右に示す。ラインの側壁は 90° で 25.4 ± 0.5 nmの幅が保障されたサンプルである。



注：略語説明 TEM (Transmission Electron Microscope), CD (Critical Dimension)

図5 | TEM校正値に対する補正後の線幅測定の精度

測定誤差は ± 1.7 nm以下である。

4. 超小型・超高感度干渉変位センサー

AFMの測定精度は、探針を搭載したXYZ走査機構の位置精度で決定される(図1参照)。従来用いられてきた静電容量センサーの変位感度は1 nm程度であり、ナノスケール先端デバイスの立体形状をサブナノメートルの精度で測定するには変位感度が不足していた。光干渉計が原理的に適用可能であるが、組み込みに数百mm以上のスペースを要し、また外乱の影響で測定精度が低下するという課題があった。そこで、参照ミラーと位相シフタにフォトニック結晶を用いることで上記課題を解決し、世界最小・最高感度の光干渉変位センサーを実現した。

4.1 原理

光干渉計は、レーザ光を二つに分け、一方を参照光として参照ミラーに照射し、他方を測定光として測定対象面に照射した後、両者の反射光を合成することによって干渉光を得る。測定対象の移動によって測定光に生じた位相変化を干渉強度の変化として検出する[図6(a)参照]。光の波

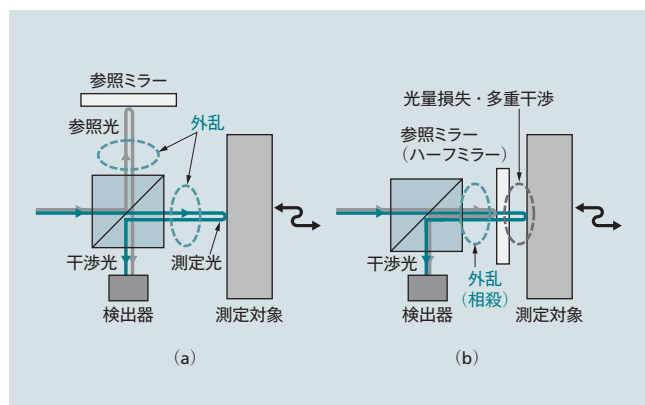


図6 | 干渉計の原理

分離光路干渉計を(a)に、共通光路干渉計を(b)に示す。

長の1,000分の1というサブnmオーダーの感度を有する一方、二つの光が別々の光路を通り、またその距離も長いいため、機械振動や空気の擾(じょう)乱といった外乱の影響を受けやすいため、通常は数nm程度の分解能にとどまっていた。

これを解決する手段としては、測定光路中に挿入したハーフミラーからの反射光を参照光とする、共通光路干渉計が知られている[図6(b)参照]。参照光路と測定光路が重なっているため、外乱は両光路に同じように作用し、その影響は相殺される。しかし、ハーフミラーでの光量損失や、ハーフミラー・測定対象間での多重干渉による測定誤差が、構成上避けられない新たな課題となっていた。

これに対して、フォトニック結晶を参照ミラーに用いた新しい共通光路干渉技術を開発した。フォトニック結晶は、石英基板にサブ波長周期の格子を形成し、その上に屈折率の異なる2種類の薄膜(例えば Nb_2O_3 と SiO_2)を交互に積層して形成される(図7参照)。フォトニック結晶は、格子に垂直入射した光のうち、格子と並行なS偏光成分は完全に反射し、格子に垂直なP偏光成分は完全に透過する偏光子としての性質を持つ。開発した共通光路干渉技術では、反射したS偏光成分を参照光とし、透過したP偏光成分を測定光とする。また、透過側に $\frac{1}{4}$ 波長板を配置することにより、透過したP偏光成分は、測定対象面とフォトニック結晶の間をP偏光、右回り円偏光、S偏光、左回り円偏光、P偏光と、偏光変換されつつ2往復する。すなわち、測定対象の変位量を2倍の位相差に拡大することで、測定感度が2倍に向上する。2往復した測定光は参照光と合成され、 45° 方向の偏光子を透過することで干渉する。

参照光と測定光が同一の光軸上に存在し、かつ二つの偏光方向が互いに直交しているため、両者を高い消光比で偏光分離できる。これにより、従来のハーフミラーで生じていた光量損失や多重干渉の課題を解消した理想的な共通二重光路干渉計が実現できた。また、位相シフタに用いた

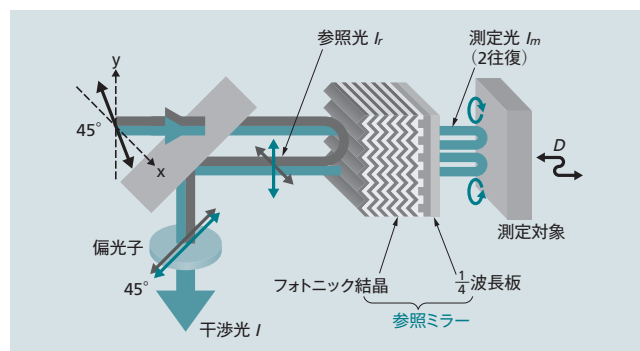


図7 | フォトニック結晶を参照ミラーに用いた共通二重光路干渉計

レーザ光はフォトニック結晶からなる参照ミラーで反射する参照光と、透過する測定光に分かれる。測定光は参照ミラーと測定対象との間を2往復した後、参照光と合流して干渉信号を生じる。

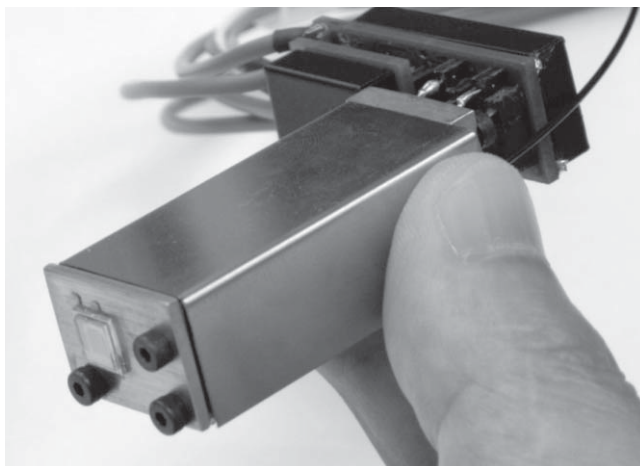


図8 | 超小型・超高感度光干渉変位センサー

開発した干渉変位センサーの外観を示す。左端に見える窓がフォトニック結晶製の参照ミラーである。

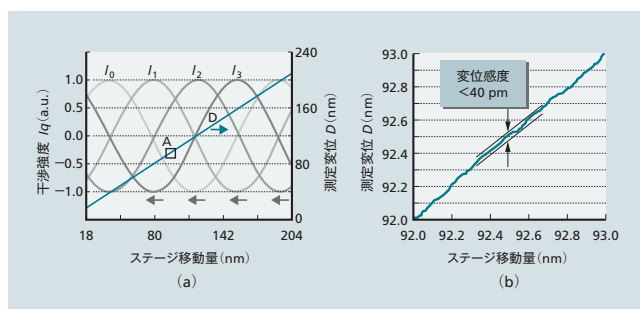


図9 | 変位感度の評価結果

ステージ移動量に対する四つの位相シフト干渉信号とこれから得られた変位量を (a) に、(a) のA部分を拡大したステージ移動量と測定変位量の関係を (b) に示す。

フォトニック結晶も含め、光学部品を高集積化することで、AFMに組み込み可能な親指サイズの光干渉変位センサーに仕上げることに成功した。

4.2 性能評価結果

完成した光干渉変位センサーを図8に示す。20 mm (横) × 50 mm (縦) × 14 mm (高さ) と親指大のサイズを実現し、AFMへの搭載を可能とした。

変位感度の評価結果を図9に示す。圧電素子ステージを200 nmの範囲で走査して得た四つの位相シフト干渉信号と、干渉信号から得た変位量を同図 (a) に示す。また、1 nmの走査範囲 (A部分) における変位信号の拡大図を同図 (b) に示す。直線性を考慮して変位感度は40 pm (p-p) 以下であることが確認された。

5. おわりに

ここでは、ナノスケール先端デバイスの立体構造の寸法をサブナノメートルの精度で測定する高精度AFM技術の原理、特徴、および性能評価結果について述べた。

前半では、今後のナノスケール先端デバイスで広く使われるCNT探針に着目し、CNTの変形や先端形状に起因

する測定誤差を補正する探針変形・形状補正技術を紹介した。後半では、AFMの測定精度をさらに向上させるために開発した世界最小・最高感度の光干渉変位センサーについて述べた。このセンサーはそのサイズのとおり、通称「親指センサー」と呼ばれ、走査プローブ顕微鏡や半導体製造装置、超精密加工機に組み込むことにより、次世代ナノスケール先端デバイスの開発と量産への貢献が期待される。

なお最近では、立体形状計測だけでなく、ナノ領域の光学特性を測定するための、超高分解能近接場光学顕微鏡の開発にも取り組んでおり、5 nmを切る空間分解能の実現のめどを得ている³⁾。

親指センサーは、2009年と2011年に米国のR&Dマガジン社主催「R&D 100 Awards」を、2009年に日本光学会 (応用物理学会)「第12回光設計優秀賞」を受賞した。ご支援いただいた多くの方々に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) M. Watanabe, et al. : Atomic force microscope method for sidewall measurement through carbon nanotube probe deformation correction, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, 11 (1), to be published (2012)
- 2) T. Nakata, et al. : Ultracompact and highly sensitive common-path phase-shifting interferometer using photonic crystal polarizers as a reference mirror and a phase shifter, Applied Optics, Vol 48 (7), pp. 1322-1327 (2009)
- 3) T. Nakata, et al. : Nanometer-resolution optical probe using a metallic-nanoparticle-intercalated carbon nanotubes, Journal of Applied Physics, 109 (1), pp. 013110-1-013110-5 (2011)

執筆者紹介



渡辺 正浩

1988年、日立製作所入社、横浜研究所 検査システム研究部 所属
現在、光学・プローブ応用検査・計測技術の開発に従事
工学博士 (計数工学)
日本精密工学会会員、米国SPIE会員



中田 俊彦

1982年、日立製作所入社、横浜研究所 検査システム研究部 所属
現在、近接場光学顕微鏡の開発に従事
工学博士 (光学)
応用物理学会会員、日本光学会会員、米国OSA会員