

3次元ナノ構造物評価用電子顕微鏡内原子間力顕微鏡の開発

Development of SEM-AFM for evaluation of 3D nanometric structures

福島公威*・佐谷大輔*・川勝英樹*

Kimitake FUKUSHIMA, Daisuke SAYA, and Hideki KAWAKATSU

1. はじめに

原子の凹凸まで測ることのできる接触型表面形状顕微鏡として1986年に誕生した原子間力顕微鏡(atomic force microscope: AFM)¹⁾は、現在までに多くの走査型力顕微鏡の亜種を生み出し、用途も表面形状測定のみにとどまらず表面の様々な特性の測定や微生物の観察にまで広がっている。最近ではAFMの探針として使われるカンチレバーがバネであることを利用して、局所的な力測定にも利用されている²⁾。だがAFMをMEMS(micro electro mechanical system)技術などにより作製された微小3次元構造物の測定に用いる場合や、試料上の特定の点を計測する場合においては、試料に対するAFM探針の位置決め精度が光学顕微鏡の分解能(1 μ m程度)に限定されることが問題となり用途が限られていた。

この問題の解決手段の一つとして走査型電子顕微鏡(scanning electron microscope: SEM)とAFMを組み合わせる方法があるが³⁾、既存のSEMとAFMの複合装置は真空装置内に設置されたAFMにSEM用電子銃をとりつけたものであるため、3次元構造物の測定のためにSEMの視線の自由度を確保することが困難であり、操作も複雑なため実用的ではなかった。そこで我々はより汎用性の高い電子顕微鏡内原子間力顕微鏡(SEM-AFM)を開発した⁴⁾。この装置により、図1に示すような広範囲から極微小領域までの連続的な可視化が可能となった。

2. 装置の構成

SEM-AFMはSEMの ϕ 100mmのステージ上に着脱可能なAFMモジュールを構成することにより実現した。SEMとしては市販のタングステン電子線源とするもの⁵⁾を用いた。AFMモジュールの基本的構成を図2に示す。

AFMのカンチレバーの変位測定には光てこ法を用いた⁶⁾。AFMモジュールのサイズはSEMの真空チャンバー内に収めるため100mm \times 100mmで、高さは36mmに抑えられている。試料取り付け部位から電子銃口までの距離はSEM像の分解能を高く維持するため5mm程度である。その結果、SEMの作動距離は6mm \sim 30mmとなっている。SEM像の試料に対する俯角は0度から10度であるが、試料台に専用のブロックを装着することで変更が可能である。試料から2次電子検出器までの経路は、よりよいSEM像を取得するため障害物がないよう設計されている。AFMモジュールからはさらにPD(フォトダイオード)、LD(レーザーダイオード)、試料台の各ユニットが分離可能となっている。

試料台には6つのせん断方向に変形する圧電素子と1つの5電極円筒型圧電素子が装着され、これらの圧電素子を慣性駆動用^{7)~12)}に用いることでナノメータの位置決め分解能の3次元位置決めが可能となっている。円筒の圧電素子はAFM用のスキャナとしても機能しており、素子自身の変形量も組み合わせることで10pmオーダの位置決め分解能が達成される。これらすべての素子は電子顕微鏡外部からリモートで操作される。LDとPDユニットにもそれぞれに1自由度のアクチュエータが取り付けられており、

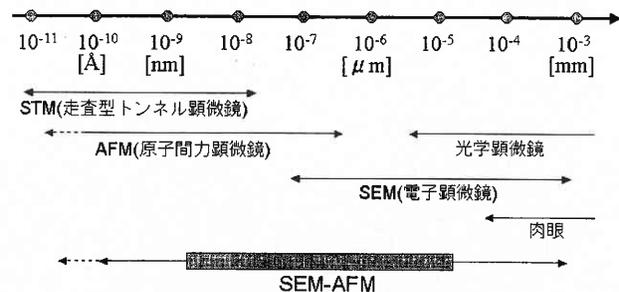


図1 各種顕微鏡の有効観察範囲

*東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

カンチレバーが大気圧から真空に引かれる段階で大きく撓たわんだ場合でも光てこを維持することができる。

SEM-AFM に使われるカンチレバーは、SEM の電子線による帯電を防ぐため、導体であるか全面を導体によりコーティングされたものでなくてはならない。図3に、片面のみをコーティングしたカンチレバーを試料に近づけたときの SEM 像を示すが、試料への接触と同時に周辺のごみを電気的に吸着してしまった。

SEM-AFM の使用手順は以下の通りである。まず試料を試料台に取り付け、その後光てこが機能するよう PD と LD の位置決めを行い、SEM ステージ上に AFM モジュールを取り付ける。次に SEM 内部を真空に引くが、このと

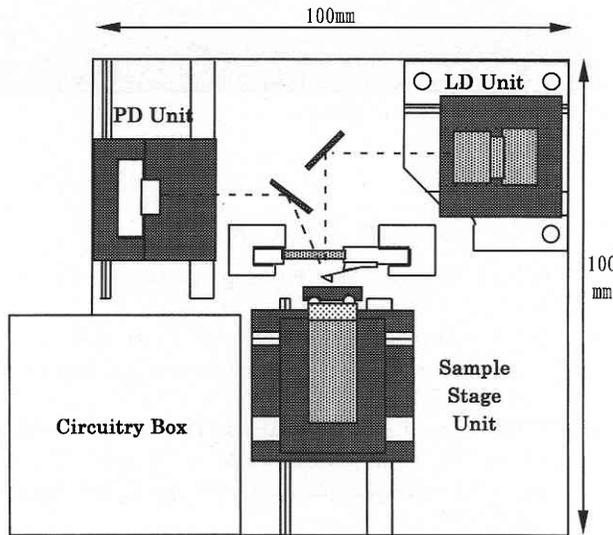


図2 AFM モジュールの構成

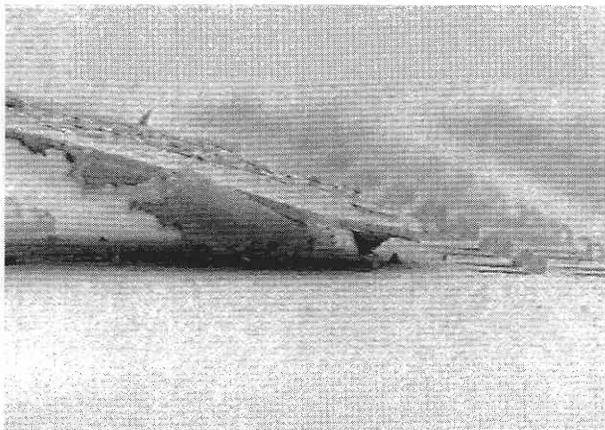


図3 片面のみコーティングされたカンチレバーに吸着したゴミの SEM 像

きに AFM のカンチレバーが大きく変形するので真空が安定した後に再度光てこの調整を行う。

3. SEM-AFM による実験

カンチレバーを試料にアプローチさせた時の SEM 像を図4に示す。カンチレバー直下に影が見えているが、これはカンチレバーが影の部分からの2次電子をブロックしあたたかも影のように見せているためである。一般的に電子顕微鏡像から奥行き感を得ることはできないが、この現象を利用することにより試料に対して3次元的な位置決めを容易に行うことができる。

図5に我々の作成したナノメータオーダ振動子の強度測定実験時に取得された像を示す。押し曲げに用いた市販のシリコン製カンチレバーの変形量からカンチレバー先端の接触点に加わる力を算出し、強度の測定を行った。

SEM-AFM の探針の形状は、電子線を一点に照射しつづけ、真空チャンバー内の炭化水素不純物を堆積させることで変更できる¹³⁾。電子線の照射位置を徐々に任意の方向に動かすことで、一例としては微小構造物を引っ掛けるための鉤形状も作成できる。この鉤で行った微小3次元構造物の引っ張り強度試験の様子を図6に示す。

図7には、SEM-AFM の純粋な AFM としての性能を測るために、シリコン表面に蒸着した金の凹凸を測定した像を示す。スキャナの較正ができていないため具体的な測定寸法を示すことはできないが、SEM 像では観察できない領域の形状を AFM が観察していることは確かだ。SEM 観察を AFM 観察と同時に行った場合でも、明確な画像の悪化は認められなかった。ただ、原子スケールの分解能を求めた場合には、電子線による真空チャンバー内の不純物の堆積が問題になると考えられる。

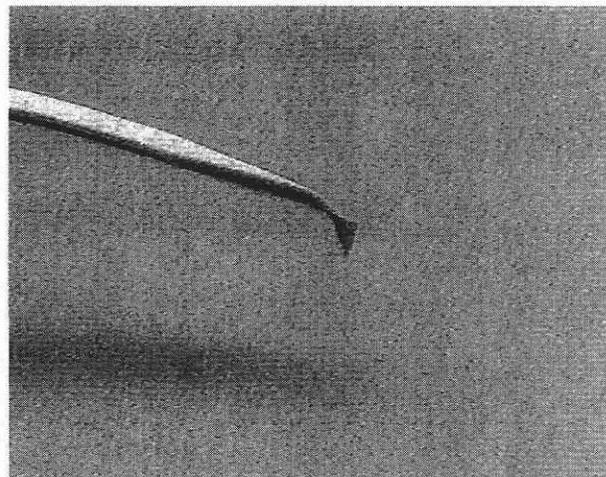


図4 カンチレバーにより試料上に生じる影の SEM 像

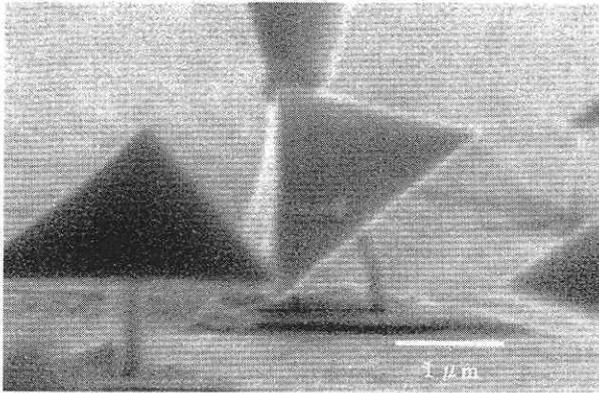


図5 SEM-AFMによるナノ3次元構造物測定

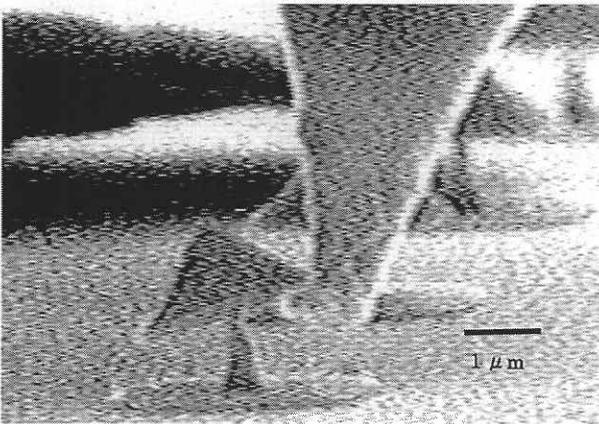


図6 ナノ鉤を使った引っ張り実験

SEM-AFMは探針を交換することで、AFM以外の用途にも応用できる。SEM-STM (scanning tunneling microscope) やSEM-SNOM (scanning nearfield optical microscope) は勿論のこと、加工具と交換することでナノメータ加工現象の可視化なども可能である。

4. ま と め

電子顕微鏡内で動作する原子間力顕微鏡 (SEM-AFM) の開発に成功した。この装置により、今まで前例のなかった3次元ナノ構造物の強度試験を実行することができた。また今後、電子顕微鏡の広い視野と原子間力顕微鏡の解像力を併せ持つ装置としてさまざまな場面での応用が期待される。

(2000年7月3日受理)

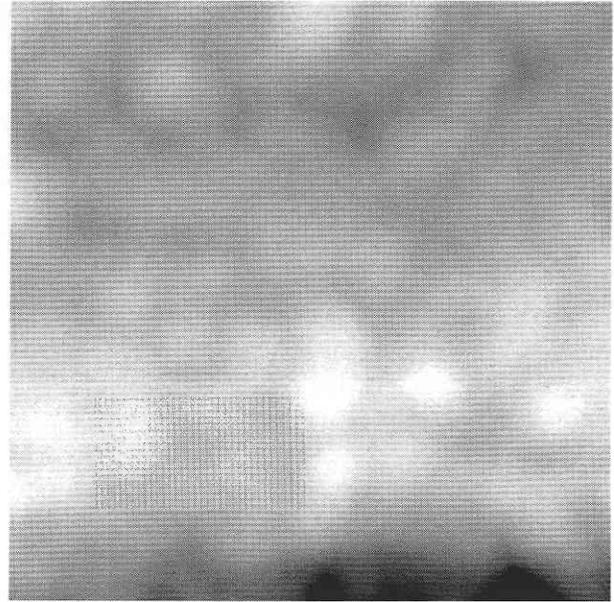


図7 SEM-AFMにより観察されたシリコン上に蒸着された金の表面形状

参 考 文 献

- 1) G. Binnig, C. Gerber and C. F. Quate: Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 930.
- 2) B. T. Comella, M.R. Scanlon: J. Materials Sci. 35 (2000) 567.
- 3) A. V. Ermakov and E. L. Garfunkel: Rev. Sci. Instrum. 65 (1994) 2853.
- 4) K. Fukushima, D. Saya, H. Kawakatsu: (Development of versatile Atomic Force Microscope within a Scanning Electron Microscope, to be published from JJAP.) Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 3747.
- 5) JSM-5600 LV, JEOL, Tokyo, Japan.
- 6) G. Meyer and N. M. Amer: Appl. Phys. Lett. 53 (1998) 1045.
- 7) H. Kawakatsu and T. Higuchi: J. Vac. Sci. & Technol. A8 (1990) 319.
- 8) D. W. Pohl: Rev. Sci. Instrum. 58 (1987) 54.
- 9) B. W. Corb, M. Ringger, and H. -J. Güntherodt: J. Appl. Phys. 58 (1985) 3947.
- 10) Ph. Niedermann, R. Emch, and P. Descouts: Rev. Sci. Instrum. 59 (1988) 368.
- 11) G. W. Stupian and M. S. Leung: J. Vac. Sci. & Technol. A7 (1989) 2895.
- 12) M. Anders, M. Thaeer and C. Heiden: Surf. Sci. 181 (1987) 176.
- 13) D. A. Walters, D. Hampton, B. Drake, H. G. Hansma, and P. K. Hansma: Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 787.