



原子間力顕微鏡を用いた新規なナノ計測技術

菅原 康弘*

New Nano-scale Measurement Technique Using Atomic Force Microscope
 Key words : Atomic Force Microscope, Atomic Scale, Silicon, Hydrogen, Identification

1. はじめに

我が国が21世紀においても引き続き国際的な技術競争力を維持するためには、世界最高水準の科学技術に立脚した国家的戦略が必要不可欠である。そのために、総合科学技術会議は、我が国が中核とすべき技術分野として、情報通信、環境、バイオテクノロジー、ナノテクノロジー・材料の4つを挙げている。特にナノテクノロジー・材料の分野においては、ナノメートルレベルでの新規材料創製技術とナノレベル評価解析が基盤技術として位置づけられている。材料創製技術と融合したナノ計測技術は、世界的にみても未開拓の分野であり、欧米先進国に先駆けてこの分野の中心要素技術を確立することはナノテクノロジー戦略において重要なキーテクノロジーを保有する事になり、圧倒的に有利な立場に立つことが出来る。また、今後とも国際競争力を維持するためにはさらに付加価値の高いナノ計測技術を確立・整備する事が重要な課題となる。本稿では、探針-試料間に働く相互作用力によって試料表面を原子分解能で観察できる新しい計測技術とその測定例を紹介する。

2. 非接触原子間力顕微鏡の動作原理

原子間力顕微鏡(AFM)^[1]は、図1に示すように、探針先端と試料表面との間に働く原子間力をカンチレバー(微小な板ばね)の変位から測定し、探針を表

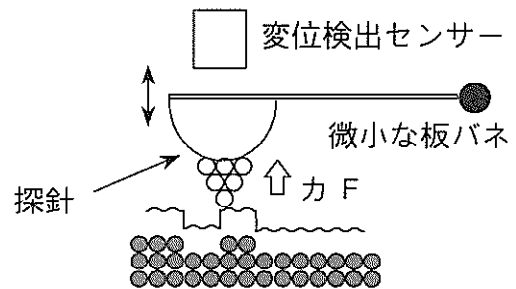
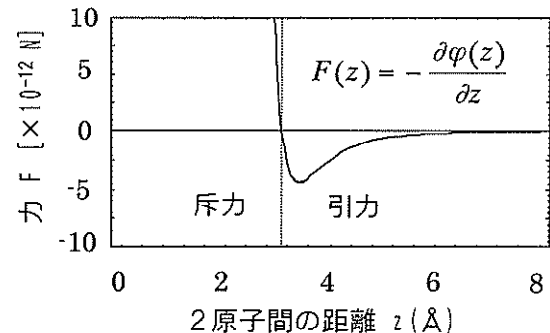
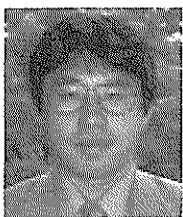


図1 原子間力顕微鏡(AFM)の測定原理

面に沿って走査することで表面の像を形成する顕微鏡である。一般に近接する2つの物体間には必ず力が作用するため、原子間力顕微鏡には試料に対する制約が原理的に存在しない。このため、原子間力顕微鏡は走査型トンネル顕微鏡(STM)では観察できない絶縁体表面の構造も超高分解に観察できる装置として発展してきた。

その動作方式としては、大別すると、(1)探針を試料表面に接触させ、カンチレバーの変位から表面形状を測定する接触方式^[1]、(2)探針を試料表面に周期的に接触させ、カンチレバーの振動振幅の変化から表面形状を測定するタッピング(或いは、周期的接触)方式^[2]、(3)探針を試料表面に接触させずに、カンチレバーの振動周波数(或いは振動振幅)の変化から表面形状を測定する非接触方式^[3,4]の3つ



* Yasuhiro SUGAWARA
 1961年2月生
 昭和63年東北大学大学院・工学研究科・博士課程電気及通信工学専攻修了
 現在、大阪大学・大学院工学研究科・応用物理学専攻、教授、工学博士、ナノ工学
 TEL 06-6879-7853
 FAX 06-6879-7856
 E-Mail sugawara@ap.eng.osaka-u.ac.jp

の方式がある。(3)の周波数変調(FM)方式^[3]は、探針先端と試料表面とが接触せずに、微弱な原子間引力を超高感度に検出でき、探針先端や試料表面の破壊を防ぐことができるので、試料表面の原子構造や原子欠陥を明瞭に画像化できることが判明している^[5]。

3. シリコン表面の水素原子の画像化^[6]

表面の水素原子を非接触AFMで観察できたという報告はこれまでなく、水素原子のような小さい原子を非接触AFMで画像化できるかもどうか非常に興味深い。そこで、Si(100)表面を水素で終端したSi(100)2×1:H表面を取り上げ、この表面が非接触AFMでどのように画像化されるかを検討した。

図2にSi(100)2×1:H表面の構造モデルと電子状態を示す。図2(a),(b)に示したように、小さな白丸で示した水素原子は、ダイマーを形成しているシリコン原子の持つダングリングボンドをそれぞれ終端している。その構造は対称な構造を取り、ダイマーを形成しているシリコン原子の間隔は2.51Åで、水素原子の間隔は3.52Åである。また、図2(c)に示したように、表面の電荷はシリコンダイマーの間からバックボンドとSi-Hボンドへ移動している。

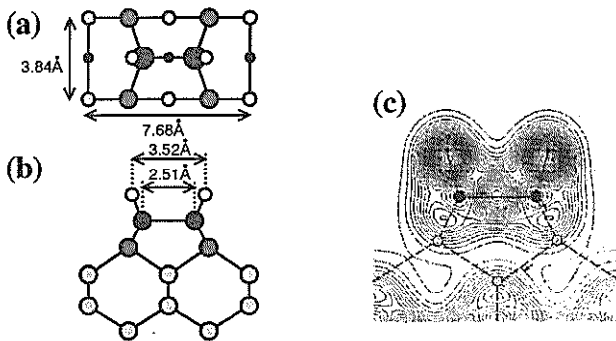


図2 Si(100)2×1:H表面の構造モデル
(a)上面図(b)側面図と(c)全電荷密度分布の等高線図。

Si(100)2×1:H表面の非接触AFM像を図3(a)に示す。走査範囲は69Å×46Åである。対になった輝点が列状に並んだ2×1の対称性を持ったパターンが得られた。矢印で示したように、輝点の欠陥は対で抜けるものだけでなく、単独で抜けているものや列方向に隣り合わせの輝点が抜けているものも観察された。図において、対になった輝点間の距離は3.5±0.1Åであった。これらのダイマー構造を構成して

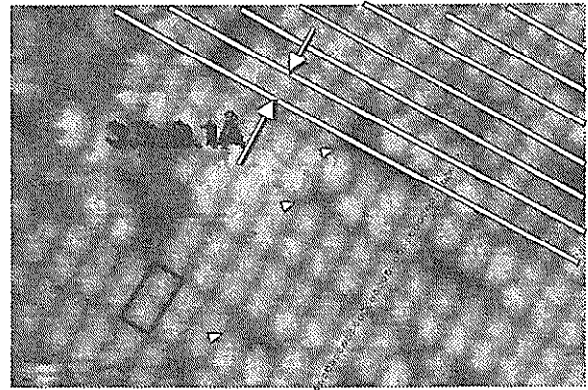


図3 (a) Si(001)2×1:H表面の非接触AFM像。
走査範囲: 69Å×46Å。

いる輝点は、Si(100)2×1:H表面の水素原子位置に位置していると考えられる。なぜなら、これらの輝点間距離 $3.5\pm 0.1\text{Å}$ は、表面の水素原子間距離3.52Åと誤差の範囲内で一致しているからである。なお、非接触AFMを用いて表面の水素原子位置を実空間で観察することに成功したのは、本研究が初めてである。

Si(100)2×1:H表面では、水素原子がシリコン表面のダングリングボンドを終端しているので、表面第一層の水素原子はシリコン原子のダングリングボンドのように反応性の強い手を持たない。一方、シリコン探針は反応性の強いダングリングボンドを持っている。従って、非接触AFMの画像化に最も強く寄与する探針・試料間相互作用としては、ファンデルワールス相互作用と軌道の重なり合いによるような化学的相互作用の2つの可能性が考えられる。前者としては、シリコン探針のダングリングボンドによって、表面に双極子モーメントが誘起され、ダ

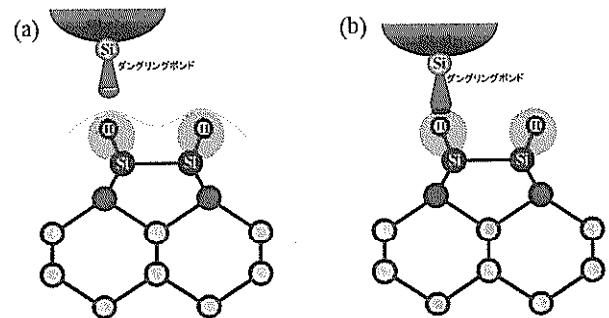


図4 Si(100)2×1:H表面とシリコン探針に働く相互作用のモデル図。
(a)ファンデルワールス相互作用。
(b)軌道間相互作用。

ングリングボンドと双極子の間でファンデルワールス相互作用が働いていると考えられる(図4(a)). その結果として, 最表面原子である水素原子位置が輝点として得られる. 後者としては, ダングリングボンドを持つシリコン探針を水素終端シリコン表面に近づけたとき, シリコン探針のダングリングボンドとシリコン表面と共有結合している水素原子の軌道との間で, 化学的な相互作用が働くと考えられる(図4(b)). その結果として, 水素原子位置が輝点として得られる. しかし, これまで, 非接触AFMのように探針先端の1個から数個の原子を強制的に表面に近づけるような系での力学的相互作用に関する知見はほとんど解明されていない. 水素終端表面のように結合手を持たない表面にシリコン探針のようにダングリングボンドを持つ探針を近づけた場合の相互作用を解明するためには, 理論シミュレーションなどの理論的検討も必要である.

4. Si/Ge 混在 Si(111)7×7 表面の原子識別

次に, 同じIV族に属するSi原子とGe原子を非接触AFMで識別できるかどうかを検討した. Si原子ならびにGe原子の正四面体結合にある時の原子半径は, それぞれ, 1.17 Åならびに1.22 Åであり, Si原子の原子半径に比較してGe原子の原子半径は4%だけ大きくなるだけである. 従って, Si原子とGe原子が混在した表面は, 非接触AFMで原子の識別が可能かどうかを調べるのには理想的な表面であると言える. 試料表面としてSi(111)表面を取り上げた場合には, Si原子のダングリングボンドは $3sp^3$ 軌道に関係し, Ge原子のダングリングボンドは $4sp^3$ 軌道に関係する. 従って, Si探針を用いた非接触AFMでSi原子とGe原子が混在した表面を識別できるかどうかという問題は, $3sp^3$ 軌道(Si探針)– $3sp^3$ 軌道(Si原子)間の化学的相互作用と $3sp^3$ 軌道(Si探針)– $4sp^3$ 軌道(Ge原子)間の化学的相互作用の区別が非接触AFMでできるかどうかという問題に帰着する.

図5はSi原子とGe原子が混在している表面の非接触AFM像である. 画像を見て分かるように, 明るさの異なる2種類の輝点が見えている. Ge原子の蒸着量を増やすと, 暗い輝点が増えることから, 暗い輝点がGe原子であり, 明るい輝点がSi原子で

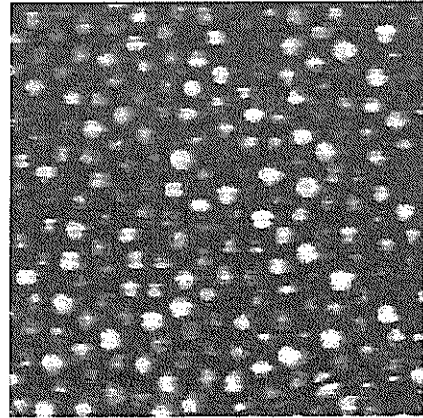


図5 Si-Ge 混在Si(111)7×7表面の非接触AFM像(明るい輝点がSi原子). 走査範囲: 101 Å × 101 Å.

であると結論できた. このように非接触AFMには, 表面の原子種を同定できる機能があることが判明した.

5. おわりに

非接触AFMにおいては, 探針先端の電子軌道と試料表面の電子軌道との間の力学的相互作用が画像化機構に重要な役割を果たしている. 非接触AFMを用いれば, 表面の水素原子を実空間観察することが可能であり, また, 表面の原子種を同定できる可能性があることが判明した.

参考文献

- [1] G.Binnig, C.F.Quate and Ch.Gerber: Phys. Rev. Lett., 56(1986)930.
- [2] Q.Zhong et al., Surf. Sci. Lett., 290(1994) L688.
- [3] P.K.Hansma et al., Appl. Phys. Lett., 64(13)(1994)1738.
- [4] Y.Marti, C.C.Williams and H.K.Wickramasinghe, J. Appl. Phys., 61(10)(1987)4723.
- [5] T.R.Albrecht et al., J. Appl. Phys., 69(2)(1991)668.
- [6] Y.Sugawara et al., Science, 270(1995)1646.
- [7] K.Yokoyama et al., Jpn. J. Appl. Phys., 39(2000) L113.