

大学院工学研究科電気電子情報工学専攻

—原子分子操作組立領域—



研究室紹介

森 田 清 三*

Atom Manipulation Group, Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering

Key Words : Atom Manipulation, Bottom Up Nanostructuring, Chemical Identification, Atomic Force Microscopy, Atomic Force Spectroscopy

1. 力学に基づいた原子分子操作組立

1996年に広島大学理学部から大阪大学工学部に移ってから10年が経過した。大阪大学に移ったときの目標は、1995年に広島大学で開発した絶縁体も扱える原子分解能の自家製超高真空原子間力顕微鏡(AFM)で、図1のように、原子を見るだけでなく、元素(原子種)を識別して、特定の原子を選択的に操作して、多元素からなるナノ素材やナノデバイスなどの複素ナノ構造体を組み立てる究極のボトムアップ技術の開発であった。1995年にAFMで真の原子分解能が達成された直後の1996年当時は、ナノ構造体の組み

立てどころか原子操作すらAFMでは無理ではないか? その前に元素(原子種)識別も本当に出来るのか? と言うような時代であり、まさに「夢のゴール」であった。10年が経過した現在、我々のグループは世界に先駆けて、絶縁体も扱えるAFMで、元素を識別して、特定の原子を選択的に操作して、多元素からなるナノ素材やナノデバイスなどの複素ナノ構造体を組み立てる究極のボトムアップ技術の開発に成功した。現時点での我々の自家製超高真空AFMは、垂直分解能2 pm, 水平分解能10 pmのピコメータ空間分解能を有する。ここでは、我々が開発してきた絶縁体も扱える「力学に基づいた原子操作組立技術」を紹介する。

2. AFMによる力学的元素識別

AFMによる力学的元素識別は、初期は、図2(a)中の挿入図のように、Sn/Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 完全相のような異種元素混在表面での原子分解能のAFM像で、凹凸の差(挿入図中の原子のコントラスト差)としてSn原子(明るい原子)とSi原子(暗い原子)のような異種元素が区別されることで実現した。しかしながら、AFMテコ先端の探針と試料の間の距離を小さくしていくと凹凸差が小さくなることを見出された。また、輝度が異なる原子のどちらが異種元素混在表面のどの元素に対応しているかは、元素混在の相対濃度を変えないと決定できない問題も見出された。そこで、我々は、AFM用のアトムトラッキング法を開発して熱ドリフトを原子レベルで完全に補償し、低温環境と同じ熱ドリフトフリーの測定環境を室温で実現した。この熱ドリフトフリーの実現を利用して同じ原子位置で、テコ先端と試料表面の間に働く相互作用により起こるテコの機械的共振周波数の変化(周波数

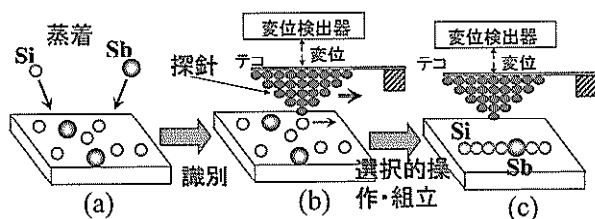


図1 個々の原子を力学的に見て、識別して、動かして、組み立てる原子間力顕微鏡(AFM)のモデル図。



* Seizo MORITA

1948年1月生

1975年大阪大学・大学院理学研究科・物理学専攻博士課程修了

現在、大阪大学大学院工学研究科・電気電子情報工学専攻・原子分子操作組立領域、教授、理学博士、原子間力顕微鏡

TEL 06-6879-7761

FAX 06-6879-7764

E-mail : smorita@ele.eng.osaka-u.ac.jp

シフト)の探針-試料(表面)間距離依存性(周波数シフトカーブ)の測定を数多く繰り返し加算平均することにより、図2(a)のような低雑音で超高精度な周波数シフトカーブの測定に成功した。図2(a)には挿入図に矢印で示された選択した特定のSn原子とSi原子の周波数シフトカーブが示されている。探針-試料間距離が7Å強以上では、2種類の原子の周波数シフトカーブが完全に一致して、原子分解能は得られない。この遠距離領域では、ファンデルワールス力で近似できる長距離力が働いている。他方7Å強以下では2種類の原子の周波数シフトカーブに明瞭な差が見られ、周波数シフト一定での探針-試料間距離の差がAFM像の凹凸差となる。この近距離領域では、共有結合力と呼ばれる短距離力が働いている。つぎに、図2(a)の周波数シフトカーブを原子間力の探針-試料間距離依存性(フォースカーブ)に変換して、長距離力を差し引くことにより、図2(b)の短距離(相互作用)力のフォースカーブを得た。短距離力のフォースカーブから、直接的に、短距離引力(共有結合力)の最大値が大きいほうがSi原子で小さいほうがSn原子だと判断出来るので、個々の原子の短距離力のフォースカーブのほうが、AFMによる力学的元素識別AFM像よりも直接的な元素識別法となる。

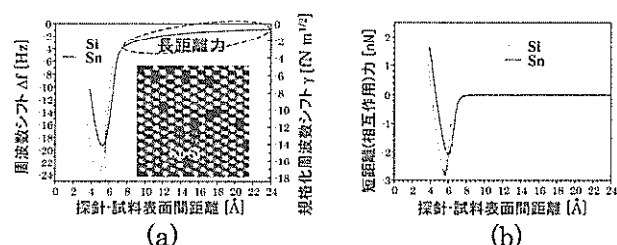


図2 Sn/Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 完全相の選択された特定のSi原子とSn原子[(a)の挿入図中に矢印で示す](a)周波数シフトカーブと(b)短距離原子間力のフォースカーブ. バネ定数 $k=30.5\text{N/m}$, テコの振動振幅 $A=25.9\text{nm}$.

3. AFMによる力学的原子操作とナノ構造体組立

力学的元素識別と並行して、低温での力学的垂直原子操作や力学的水平原子操作の研究を行っていたが、力学的元素識別AFM像の測定中に隣接した異種の元素が入れ替わる異種元素交換型水平原子操作の現象を室温で見出した。発見した新現象を利用して、ついには、図3A~Iに示すように室温で120回以上の異種元素交換型水平原子操作により9時間かかっ

て、走査型トンネル顕微鏡(STM)でも実現できなかった埋め込んだ異種の原子で原子文字を描いた「原子埋め込み文字」“Sn”の創成に成功した。その結果、2種類以上の元素を原子操作して、多元素系の複素・複合化ナノ構造体の組立に世界で初めて成功した。

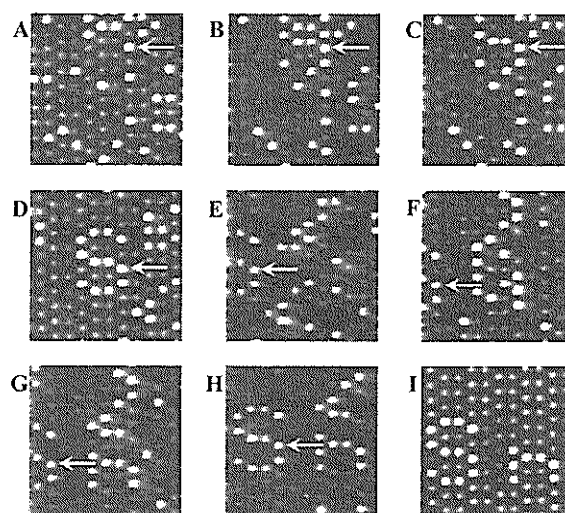


図3 A~I:「原子埋め込み文字」作製中のSn/Ge(111)-c(2×8)混在表面の非接触AFM像の変化。白い矢印は同じSn原子を示す。8×8 nm²。周波数シフト $\Delta f=-4.6\text{Hz}$, $A=16\text{nm}$, $k=27.7\text{N/m}$.

4. 複素ナノ構造体組立が拓く新たな夢

交換型水平原子操作の手法は、室温で、絶縁体も含む2種類以上の原子からなるナノ材料やナノデバイスのような複素ナノ構造体の組立に応用できる。

(1)半導体LSIへの応用の場合、本手法でドーパント原子の分布を原子レベルで自由に変えてトランジスタ特性の変化を調べる(トランジスタのマイクロ化により電流が流れるチャネル領域にあるドーパント原子の数は既に100個を割っておりドーパント原子の分布に依存した不均一な散乱がトランジスタ特性の不均一の原因となってきた)。また、(2)マイクロ化がもっと進んでバリスティックな電流が流れる状態では電極部での電子波の反射が問題となるが、電極部の構造を原子レベルで自由に変えてトランジスタ特性の変化を調べるなどがある。そのほか、(3)シリコン固体量子コンピュータの開発、(4)シミュレーションによりデザインされた新ナノ構造体の試作と評価、(5)応力、歪、欠陥、分布、析出などの原子レベルの試作・制御と応用、(6)個々の原子の熱揺らぎや原子

分布(エントロピー)の制御と理解と利用方法開発, 数多くの夢のような可能性を秘めている.
(7) アンカリング力と活性度の原子レベル制御など,

この記事をお読みにになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。

事務局で著者と日程を調整して、お知らせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2ヵ月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6944-0604 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前、ご所属、希望日時(選択の幅をもたせてください)、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に添えない場合もありますので、予めご了承ください。