

0.001nmの世界を正確に操る AFM装置の熱ゆらぎ対策が肝心

物質を細かく分解してゆくと「原子」にたどり着く。寸法は、わずかpm(ピコ・メートル、 10^{-12})オーダーである。このpmオーダーの原子を、まるで米粒をなぞって転がすように移動させる——大阪大学はそんな技術を開発した。ある原子で構成する試料に微小なプローブ(針)を近づけて、試料表面の原子の位置を正確に同定したり、例えばSn(スズ)原子と共有結合したSi(ケイ素)を空欠陥に動かして「Si」という文字を形成したりといったことが可能である(図1)。

開発した技術の特徴はいくつかある。まず、2つの原子の間に働く数nN(ナノ・ニュートン)の結合力を、数pNの精度で測定可能である。空間分解能は、垂直方向が図1の原子間隔700pmの1/350に相当する2pm以下、水平方向が10pm以下である。さらに、300K(ケルビン)の室温状況下で安定して、狙った原子の位置を把握したり動かしたりできることが、大きな技術革新だ。

これまでは、原子を操作するには、4Kの極低温にまで試料と測定プローブの温度を下げる必要があった。原子の同定・操作には、非接触型の原子間力顕微鏡(AFM)を使う。室温状況下では、この装置そのものが熱で伸縮して寸法がわずかに変化してしまうのである。そこで今回、後述する「フィードバック制御」や「フィードフォワード制御」といった信号処理を活用することで、熱に起因した課題を解決した。

この装置を使えば、「計算機シミュレーションで何カ月も要する研究作業を、実際の実験で確かめることが可能だ」(大阪

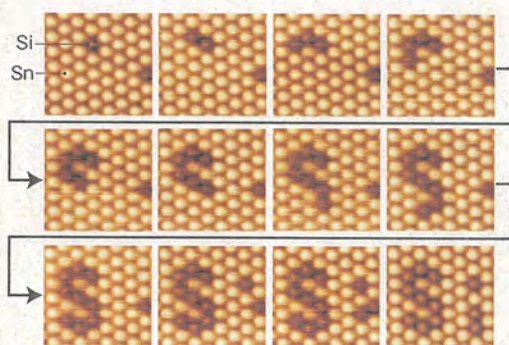


図1 室温状況下で原子を動かす

測定プローブで、スズ(Sn)原子と結合したケイ素(Si)原子を非接触で動かして「Si」という文字を形成した。図中の黒い粒はSi原子、白く見える粒はSn原子である。1枚の画像の寸法は4nm×4nm、原子間隔は700pmである。「Si」の文字を描くのに要する時間は約1時間半で、画像の処理・取得時間がそのほとんどを占める。Si原子は、Sn原子が作るポテンシャルの波に閉じこめられている。このとき、測定プローブを試料にうまく近づけて動かすと、ポテンシャルの波の山が下がってSi粒子が空欠陥に移動する。出典：大阪大学大学院工学研究科 森田研究室

大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻で准教授を務める阿部真之氏)という。原子を操作して配置を変えたときに、どのように特性が変わるのか、どのような機能が得られるのかといった研究を進めることで、材料の新たな特性・機能の発見につながる。

相対位置を維持

AFMでは、測定プローブを試料表面に近づけたときの相互作用力を検出することで、試料表面の原子構造を画像化したり、原子間力を測定したりする。もちろん、AFMには振動対策が施してある。例えば、装置外部から伝わる振動や音響振動が装置に伝わっても、試料やプローブが動かないように特殊な構造を採る。しかし、「熱による装置のわずかな伸縮『熱ドリフト』は、AFM構造の工夫だけではどうにもならない」(阿部氏)。これでは、研究の「再

現性」が得られない。

そこで、熱ドリフトで装置がゆらいだとしても、測定プローブが狙った原子を捕捉し続けるように「アトム・トラッキング」と呼ぶ手法を導入した。「熱拡散で動き回る原子を測定プローブで追跡する手法として、昔の論文で紹介されていた。これを熱ドリフトによる位置変化の補償に使えるか考えた」(同氏)。この手法では、狙った原子上で測定プローブの先端を平らな試料に向かって水平面内(XY平面)で円を描くようにわずかに回転させる。そうすると、狙った原子と測定プローブの相対位置に応じて、測定プローブが縦方向(Z方向)に変位する。原子と測定プローブが正対しているときの、Z方向の変位(δZ)はゼロで

ある。この δZ の値を利用して、 $\delta Z=0$ となるように測定プローブをフィードバック制御することで、測定プローブを狙った原子を正対させられる。

ただし、これだけでは熱ドリフトの影響を完全に取り除くのは難しい。例えば、測定プローブを試料上で動かしながらデータを取得するときには、アトム・トラッキングのフィードバック制御を一時中断しなければならない。この一時中断時にも熱ドリフトが悪影響を及ぼしてしまう。この課題に対しては、アトム・トラッキングにフィードフォワード制御を組み合わせることで解決した。具体的には、「10分というような周期で見ると、熱ドリフトによる装置の水平面内の移動速度は、直線的に変化する」(同氏)。そこで、既知の情報である熱ドリフトによる移動量に合わせて、測定プローブを動かす仕組みを盛り込んだ。(前川慎光)