

(阪大院工) 森田清三、杉本宜昭、阿部真之

走査型トンネル顕微鏡(STM)は、個々の原子を見るだけでなく、フェルミ面近傍の電子状態密度のような電子物性測定や、原子操作によるナノ構造体組立、非弾性トンネル測定による振動分光測定、振動励起による分子操作など、数多くの夢の技術を確立してきた。このように、STM は、個々の原子・分子の観察、物性計測、操作・組立が出来る第1世代の原子・分子工具となり、その結果、多くの画期的研究成果が報告されている。

小さなテコの突起先端と試料表面の原子間に働く力を測定する原子間力顕微鏡(AFM)は、電流を測定する STM では測定できない絶縁体でも原子分解能が得られる。また、AFM には、電子物性を測定する STM では測定できない原子間力やポテンシャルを測定できる利点がある[1]。我々は、このような AFM の利点に着目して、図1に示すように、室温で、AFM で原子を見るだけでなく、個々の原子を元素識別して、さらに選んだ特定の原子をデザインした場所に原子操作して、設計通りの多元素から出来た複雑なナノ構造体を組み立てる技術とその評価方法の開発を行ってきた [2]。

ここでは、我々の研究の中心課題となった、室温での元素識別[3]、原子操作[4][5]、原子埋め込み文字組立[4][5]、原子レベルの物性評価と、室温で問題となる熱揺らぎ・熱ドリフト・熱拡散対策や、室温の熱を利用した原子操作・組立のために行った熱エネルギーの制御方法・利用方法について紹介する。

STM による原子操作・組立は、熱揺らぎ・熱ドリフト・熱拡散などが起こらない極低温で、電流が流れる金属基板上で、基板と弱く結合した分子や金属原子などで行う実験が大半である。例えば、金属基板テラス上に吸着した金属原子は室温では表面を動き回る。また、Xe 原子は表面から脱離する。したがって、室温での原子・操作組立には、熱揺らぎ・熱ドリフト・熱拡散などの対策が必要となる。

そこで、図2のアトムトラッキングを用いて、フィード・バック[6]とフィード・フォワード[7]により、熱ドリフトを 20 pm 以内に補償した。これにより、個々の原子の化学結合力を精度よく測定可能になり、化学結合力の大きさによる元素識別が可能となった[3]。もちろん、室温での精密な原子操作・組立にも熱ドリフト対策は必須である。次に、室温の熱拡散や熱揺らぎは、原子を表面に埋め込むことにより、周辺原子による化学配位効果で原子を閉じ込めて抑え込んだ。このような、結晶構造中に原子を埋め込んだ場合は、空孔が無いので原子操作は出来ないと考えられて来たが、我々は、室温で、交換型水平原子操作[4]や交換型垂直原子操作[5]のような新原子操作現象を発見して、埋め込んだ原子の原子操作・組立を可能にした。また、原子操作は、図3に示すように、探針先端原子と試料表面原子との相互作用で、交換型原子操作のバリア高さを低くして、室温の熱エネルギーを利用する異種原子の交換を実現した。

さらに、ランダムな熱効果を用いた原子操作に、一方通行でしかも方向性を持たせるため、図4に示すような、特殊なベクトル走査を用いた。具体的には、原子操作したい方向にだけ Nearcontact で走査して、戻りの走査は原子操作が起こらない Noncontact で走査した。熱効果が働かない極低温では、結合力の強い共有結合を切る時に働く強い力で探針先端や試料表面が壊れる。他方、室温では少し遠方でも、熱による原子移動が確率的に起こり、特殊なベクトル走査を繰り返せば原子操作が安定に再現性良く起こせる。このように、我々は熱を制御して利用する原子操作・組立方法を開発した。

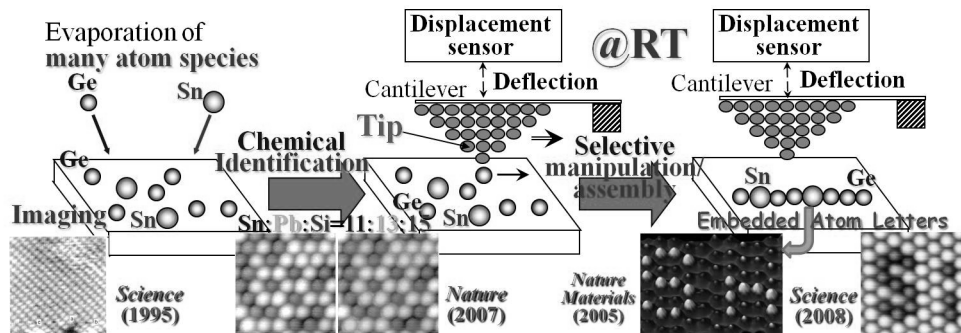


図 1. AFM による原子観察、元素識別[3]、原子操作・原子埋め込み文字組立[4][5]

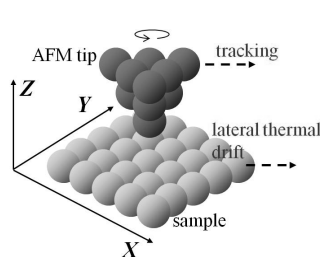


図 2. アトムトラッキングのモデル[6][7]。フィード・バック[6]とフィード・フォワード[7]により、熱ドリフトを 20 pm 以内に補償

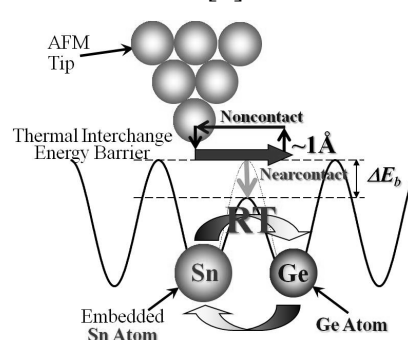


図 3. 探針先端原子と試料表面原子との相互作用で、交換型原子操作のバリア高さを低くして、室温の熱エネルギーを利用する異種原子の交換[4]

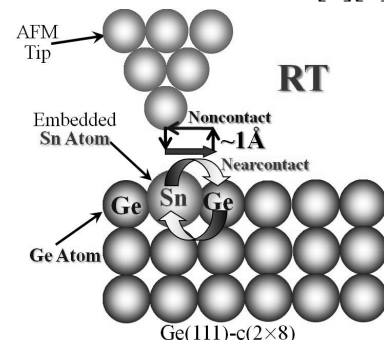


図 4. 原子操作したい方向にだけ Nearcontact で走査して、戻りの走査は原子操作が起こらない Noncontact で走査する新ベクトル走査法

## 参考文献

- [1] S. Morita, R. Wiesendanger, and E. Meyer (eds.); “Noncontact Atomic Force Microscopy”, Springer, NanoScience and Technology, 2002, ISBN 3-540-43117-9.
- [2] S. Morita, F. J. Giessibl, and R. Wiesendanger (eds.); “Noncontact Atomic Force Microscopy”, Vol.2, Springer, NanoScience and Technology, 2009, ISBN 978-3-642-01494-9.
- [3] Y. Sugimoto et al., Nature, **446**, 64 (2007).
- [4] Y. Sugimoto et al., Nature Materials, **4**, 156 (2005).
- [5] Y. Sugimoto et al., Science, **322**, 413 (2008).
- [6] M. Abe et al., Applied Physics Letters, **87**, 173503 (2005).
- [7] M. Abe et al., Applied Physics Letters, **90**, 203103 (2007).