

原子の室温元素識別・操作・組立

森田 清三

大阪大学・大学院工学研究科



夢を持とう。ライフワークを探そう。私の場合は、「原子間力顕微鏡 (AFM) で原子を見る」が夢の始まりで、1995年に実現した。同じ年に出版された PSI 社にいた FJ. Giessibl や JEOL 社の北村・岩槻よりも半年遅れで有ったが、彼らが Si(111)7×7を見たのに対して、我々は InP(110)へき開面の原子欠陥の

移動の室温観察に成功した (Science 1995)。測定方法には、テコ先端原子と試料表面原子との非接触 (非破壊) 領域で弱い原子間引力 (化学結合力) を検出するために、テコを機械的に大振幅 (数 nm から数十 nm) で共振させて、その共振周波数の変化を測定した。この非接触 AFM では、大振幅で共振しているテコが、試料表面からサブ nm の非接触領域で非破壊に短時間相互作用する。

次の夢は、「AFM で原子操作する」であったが、数 nm から数十 nm で共振しながらサブ nm の領域でのみ短時間相互作用しているテコで、試料表面の原子を制御して動かすことは出来ないと当時は考えられていた。しかしながら、やってみると、原子を垂直 (原子の除去と付与) に動かしたり (Phys. Rev. Lett. 2003)、水平に動かしたり (Nanotechnology 2005) できることが判った。水平原子操作では、9.3 nm の大振幅でも、6 pm の垂直距離変化で Ge 原子を動かしたり止めたり自由にできることが判明した。実験はやってみないと判らないという一例である。これらの実験は、最初は液体ヘリウム温度、次は液体窒素温度で行った。これは、走査型トンネル顕微鏡 (STM) による極低温での原子操作の先行研究を参考にしたためである。しかしながら、元素識別を目指して混在表面で行っていた室温実験で、混在した Ge 原子と Sn 原子が水平に交換する現象 (交換型水平原子操作) を偶然発見した (Nature Materials 2005)。これは、非破壊の非接触領域での観察だけでなく、テコを試料にさらに近づけて原子レベルの接触が起こる疑似接触領域で観察した結果の発見で有り、非接触領域を越えてパラメータを精密制御しながら変えることの重要性が明らかとなった。

三番目の夢は、「AFM で原子文字を描く」ことであった。前述の交換型水平原子操作は、室温でも非常に安定で再現性が良いが、さらに、一方通行で方向性の有る原子操作が可能なる工夫をすることにより、室温で Ge 原子中に埋め込んだ Sn

原子で、スズの元素記号 “Sn” を埋め込んだ「室温原子埋め込み文字」の構築に成功した (Nature Materials 2005)。これは、AFM 原子操作で原子文字を描いただけでなく、夢にも思っていなかった、世界で最初の室温で異種原子を埋め込んで描いた室温原子埋め込み文字となった。この原子埋め込み文字は、多種類の元素を混在させた複素ナノ構造体を室温原子操作で組み立てる第一歩となるものである。

四番目の夢は、「AFM による元素識別」であった。最初は、原子の大きさ、すなわち、AFM 凹凸で元素識別ができるはずだと考えて、Si 原子と Sn 原子の混在表面で凹凸を室温測定してみた。その結果、AFM 原子凹凸が周辺の異種原子の数に依存して変化する周辺原子種効果 (化学配位効果) を見出した。これは、異種原子間で起こる電荷移動が原因であることが後で判明した。そこで、凹凸では元素識別は困難と判断して、テコ先端の探針原子と試料表面原子との原子間力の距離依存性 (フォースカーブ) を室温で熱ドリフトを補償して精密測定してみた。その結果、非常に綺麗で再現性の良いフォースカーブが得られたが、探針原子に強く依存する問題点が残った。この探針原子依存性は、試料表面の複数の原子との最大原子間引力 (化学結合力) の比を比較することにより除去できた。結果として、夢を越える、(1) 凹凸に依存しない、(2) 探針に依存しない、(3) 周辺原子との化学結合効果に影響されない、(4) 原子分解能を有する、(5) 非破壊な、新しい元素識別法が確立された (Nature 2007)。

最近、番外の夢であった「原子ペン」も実現した。具体的には、室温で Si 原子と Sn 原子の混在表面で実験中に、探針先端原子と試料表面原子が室温で垂直に交換する現象 (交換型垂直原子操作) を発見した。この現象を利用して、室温で Sn 原子の中に埋め込んだ Si 原子で、シリコンの元素記号 “Si” を埋め込んだ「室温原子埋め込み文字」の構築にも成功した (Science 2008)。これは、夢にも見なかった室温交換型の原子ペンである。

走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の進歩は急速で、最先端の研究分野である。SPM 物性計測の最先端には数多くの夢が有る。夢は実現する。夢は果てしなく。ライフワークを SPM で探し求めて、そして、実現して欲しい。

森田清三 (Seizo Morita)

- 1975年 大阪大学理学研究科博士課程物理学専攻修了 (理博)
- 同年 東北大学電気通信研究所助手
- 1987年 助教授
- 1988年 岩手大学工学部電子工学科教授
- 1989年 広島大学理学部物理学教授
- 1996年 大阪大学工学部電子工学科教授
- 1997年-2007年 日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会委員長
- 2005年 大阪大学工学研究科電気電子情報工学専攻教授
- 2011年 社団法人日本表面科学会会長