

現代のマイクロレベル研究と観察の理論負荷性の実際

——高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成を例に——

武 仲 能 子

はじめに

本稿は、「現代のマイクロレベル研究」と「観察の理論負荷性」について、現在コロイド研究領域で実際に行われている、高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成手法の開発研究を例にとり、現代のマイクロレベル研究がどのように行われているのか、また科学研究の中で観察の理論負荷性がどのようにに役立っているのかを検討するものである。

最初に、議論の中心となる高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成手法の開発研究の概要について述べる（第1章）。次に、この研究を例に、「現代のマイクロレベル研究」と「観察の理論負荷性」の実際について検討する（第2章、第3章）。

第1章 高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成手法の開発研究の概要

1.1 用語の説明

1.1.1 金ナノロッド

金ナノロッドとは、金でできたナノ粒子であり、その形状が一般的な球形でなく棒状の物のことを指す（図1）。ナノ粒子とは、そのサイズが、縦、横、高さのうち少なくとも一つが100 nm以下である物体とされている。金ナノロッドの場合、直径が100 nm以下であるため、ナノ粒子に分類される。長さも100 nm以下のものもあるが、本稿では長さが1 μ mを超えるものを対象とする。

1・1・2 高アスペクト比

アスペクト比とは、(ナノロッドの長さ) / (ナノロッドの直径) のことである。例えば、長さが80 nm、直径が20 nmのナノロッドでは、アスペクト比は4となる。一般にアスペクト比が20を超えるものは高アスペクト比金ナノロッドと呼ばれることが多い。本稿で扱うのは、アスペクト比が50程度の高アスペクト比金ナノロッドである。

1・1・3 双晶

結晶構造の種類

類の一種。一般的に合成される金ナノロッドは、

単結晶構造をもつものが多い。

単結晶とは、一つのナノ粒子が

単一の結晶からできているもの

で、ナノ粒子内部に結晶粒界

(異なる結晶構造、あるいは向

きの異なる結晶構造) がある境



図1 金ナノロッドの概念図。

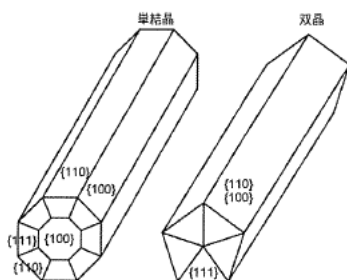


図2 単結晶構造及び双晶構造を持つ金ナノロッドの概略図。

1・1・4 結晶面

界のこと) は存在しない。つまり、すべての金原子が等しく全方位的に同じ配列をしている。一方で金ナノロッドには双晶構造をもつものがある。双晶構造では、ナノ粒子内部に五つの結晶粒界が存在し、この粒界を境に金原子の配列が変わる(1)。双晶と単結晶では、図2のように表面に出ている結晶面が異なる(2)。

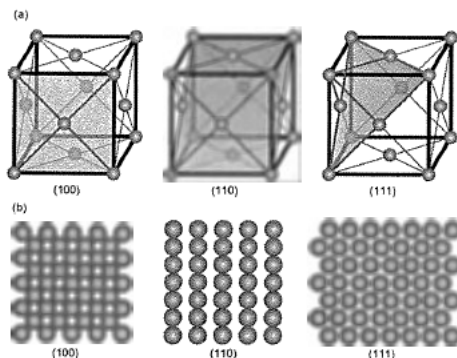


図3 面心立方格子の概略図。(a) 格子内の各面の位置を灰色面であらわしたものの。(b) 各面内での原子の並び方。

結晶構造をある方向から見たときの特定の面のこと。金は面心立方格子(Face Centered Cubic)の頭文字よりFCCと呼ばれる)をとることが知られている。ナノ粒子表面に現れるのは、このうち(111)面、(110)面、(100)面と呼ばれる面である。それぞれの

面は、 FCC 構造の金結晶の結晶格子を特定の面で切った断面を表している(図3a)。それぞれの断面における金結晶の並び方は図3bである。このように、異なる結晶面では金原子が異なる配列をしている。そのため結晶面によって表面エネルギーが異なり、外部の分子との相互作用も異なる。

1・1・5 回折

回折とは、媒質中を波が伝わる時、障害物の背後などに回り込んで伝わっていく現象のことである。結晶物理学では、この現象を使って物質の原子レベルの構造(結晶構造)を観察する手法が開発されており、波源として何を使うかによって、電子線回折法、X線回折法、中性子線回折法などと呼ばれる。得られる情報の空間サイズは、用いる波の波長に依存している。本稿では電子線回折法を用いており、およそ $1\text{nm}\sim 2\text{nm}$ 程度の空間サイズの情報を得ることができる。

1・1・6 二次電子

二次電子とは、入射電子線によってエネルギーを与えられた対象サンプルの原子から放出された電子のことである。二次電子はエネルギーが低いため、対象サンプルの内部深くで発生した二次電子はすぐに対象サンプル自身に吸収されてしまい、サンプル外部には放出されない。そのため外部に放出されてくる二次電子は、対象サンプルの表面近傍で発生した二次電子であり、表面の情報を多く含んでいる。例えば、外部に放出される二次電子の強度は、対象サンプルの表面形状

(凹凸)に依存する。

1・2 用いた観察装置と原理

1・2・1 走査型電子顕微鏡 (SEM)

走査型電子顕微鏡 (SEM; Scanning Electron Microscope) は、電子線(電子の集まり)によって対象サンプル表面をスキャンすることで、対象サンプルの表面形状を観察する顕微鏡である。一般的な光学顕微鏡では、可視光を対象サンプルに照射し、対象サンプルと相互作用(反射、透過、屈折など)して返ってきた光を目で見ることで対象サンプルを観察する。一方で、電子顕微鏡では電子線を対象サンプルに照射し、対象サンプルと相互作用して返ってきた電子線を目で見ることで対象サンプルを観察する。

電子線を対象サンプルに入射すると、反射電子、X線、二

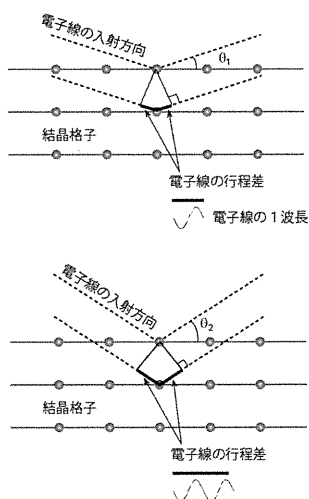


図4 入射角度による電子線干渉の概略図。

次電子が放出される。反射電子は、対象サンプルに入射された電子線が対象サンプルの内部で跳ね返って出てきた電子である。反射電子を検出すると、対象サンプルの内部のどこにどれくらい「ぶつかりやすいもの（原子）」があるかを反映した像が得られる。具体的には、原子数が大きな元素ほど電子を散乱しやすいので、対象サンプルを構成する元素やその構造に反映した像が得られる。対象サンプルに入射した電子のうちいくらかは、対象サンプルに吸収され代わりに特性X線が放出される。特性X線は、入射電子線によって励起状態（高いエネルギー状態）に持ち上げられた対象サンプル内の電子が、元の基底状態（低いエネルギー状態）に戻るとき、その差のエネルギーをX線として放出するものである。さらに二次電子も放出される。1・1・6で述べたように、二次電子の強度を検出器で検知すると、対象サンプルの表面状態（凹凸具合）が反映された像が得られる。

1・2・2 透過型電子顕微鏡 (TEM)

透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission electron microscope) は、電子線の波の回折を用いて、物質の原子レベルの構造を観察する顕微鏡である。図4にあるように、結晶面に対してある角度 θ_1 で電子線を入射し、対象サンプルで反射された電子線の回折像を検出器で検知することによって、対象サンプルの結晶構造を得ることができる。

例えば、対象サンプルに角度 θ_1 で入射し、最表面とその一つ内側の面で反射された電子線に着目する（図4）。この

二つの電子線の行程差がちょうど電子線波長の整数倍になると、この二つの電子線は強め合い、検出器に電子線が検知される。次に、対象サンプルに角度 θ_2 で入射し、最表面とその一つ内側の面で反射された電子線に着目する（図4）。この二つの電子線の行程差は、電子線波長の整数倍にならない。このとき、この二つの電子線は打ち消しあい、検出器には電子線が検知されない。これらの現象は、入射電子線に対して、対象サンプルの結晶面がどの角度かによって、検出器に電子線が検知されるかされないかが変わる、ということを意味している。つまり、検出器で検知された電子線を調べれば、対象サンプルの結晶面が入射電子線に対してどの角度になっているかが分かる。言い換えれば、対象サンプルの結晶構造を知ることができる。

1・3 研究の背景

1・3・1 高アスペクト比双晶金ナノロッドの重要性

金ナノロッドには、アスペクト比が10以下のものから、50以上のものまで種々ある。このうち、アスペクト比が20以上のものは高アスペクト比金ナノロッドと呼ばれ、電子回路や偏向素子、原子間力顕微鏡 (AFM) の探針などに応用が期待されている。金ナノロッドの結晶構造には単結晶構造と双晶構造の二種類があり、双晶構造をもつ高アスペクト比金ナノロッドは、図2で示すように側面と端面に出ている結晶面がそれぞれ $110\bar{1}$ 、 (111) と異なることから、単結晶構造を

もつ金ナノロッドとは異なる応用先が期待できる。例えば、側面と端面の結晶面の違いを利用して表面修飾の仕分けを行い、パターン化した基板上に並べたり、運動を取り出したりすることが期待できる。また、端面の結晶面が一種類に規定されているため、力を測定する AFM 探針として利用することも可能である。そのため、双晶構造をもつ高アスペクト比金ナノロッドの収率の良い合成法の開発が望まれていた。

これまで先行研究でも高アスペクト比の双晶金ナノロッドを合成する試みは行われていた。先行研究によれば、クエン酸で保護された金の結晶核を段階的に成長させることで、高アスペクト比の双晶金ナノロッドが成長するとされていた^(2,3)。だが、その長さはせいぜい 500 nm 以下にとどまっており⁽⁴⁾、より長い双晶金ナノロッドの合成のためには、ステップ数を増やすなどの煩雑な手順が必要であった^(5,6)。AFM 探針として用いることを考えるならば、操作性の良い 1 μm 以上の双晶金ナノロッドが望まれるため、われわれは、これまでに開発してきたゲル中成長法を用いて、長さ 1 μm を超える高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成を試みた。

1・3・2 ゲル中成長法

このゲル中成長法によって、われわれはこれまでに、アスペクト比が 50 を超える高アスペクト比金ナノロッドを 90 % 以上の高収率で得ることに成功している⁽⁷⁾。この方法は、従来界面活性剤水溶液中で行われてきた金ナノロッド成長を、界面活性剤のゲル中で行うものである。ここでいうゲルとは、

界面活性剤水溶液の流動性がなくなった状態のことであり、分子スケールでみると界面活性剤分子が集合体を作って凝集している状態である。

金ナノロッドは様々な方法で合成されるが、一般的によく用いられているシード法と呼ばれる方法では、以下の手順で金ナノロッドを合成する⁽⁸⁾。

- ① 界面活性剤水溶液中で金イオンを強い還元剤（水素化ホウ素ナトリウム）で還元し、金の結晶核を作製する。
- ② 界面活性剤水溶液と金イオンと弱い還元剤（アスコルビン酸）を混合し、成長溶液を作製する。
- ③ 成長溶液に結晶核を投入し静置すると、数分～数時間で金ナノロッドが成長する。

材料を一樣に混合する必要があるため、従来法では、いずれの手順も界面活性剤水溶液中で行われていた。それに対してゲル中成長法では、③で成長溶液に結晶核を投入して一樣に混合したのち、成長温度を低下させることで界面活性剤水溶液をゲル化させ、このゲルの中で結晶核を成長させる。成長メカニズムは十分には解明されていないが、この結果、アスペクト比が 50 を超える高アスペクト比金ナノロッドを 90 % 以上の高収率で得ることができる。

1・4 合成戦略と実験方法

以上のことから、次のような合成戦略を立てた。先行研究

より、双晶金ナノロッドは、クエン酸で保護された金の結晶核を段階的に成長させることで合成されていた。一方で、ゲル中成長法では、界面活性剤水溶液中で作製した金の結晶核（界面活性剤で保護された金の結晶核）を界面活性剤のゲル中で成長させることで、高アスペクト比金ナノロッドを得た。そこで、双晶を与えるとしてクエン酸で保護された金の結晶核を、ゲル化した界面活性剤水溶液中で成長させることで、高アスペクト比双晶金ナノロッドの高収率合成を試みた。

1・5 合成の結果

1・5・1 SEM観察

合成した金ナノロッドのSEM像を図5に示す。得られた像を解析したところ、成長した金ナノロッドの平均長は 1752 ± 460 nm、収率は60%と比較的高いことが分かった(9)。この結果は、クエン酸で保護された結晶核から、平均長が1752 nmを超える高アスペクト比金ナノロッドが成長することを示しているが、

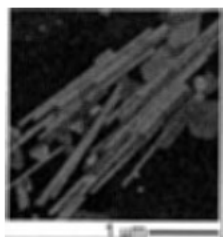


図5 合成した金ナノロッドのSEM像。

確認した。

1・5・2 TEM観察

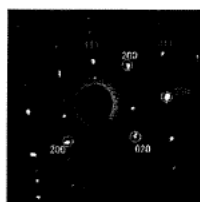


図6 合成した金ナノロッドから得られたTEM像。

TEMを用いると、電子線回折法を使って、金ナノロッドの内部の原子レベルの構造を観察することができる。実際に、TEM観察で得られた像を図6に示す。この回折スポットを解析したところ、得られたスポットは先行研究で報告されていた短い双晶金ナノロッドから得られた回折像と一致したことから(1)、今回の回折スポットを与える金ナノロッドも双晶構造を持つことが示された。観察画面中にある複数の金ナノロッドからの回折像を検討し、いずれの金ナノロッドからも双晶構造を示す回折スポットが得られることを確認し、再現性も確認した。

1・6 高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成手法開発研究のまとめ

クエン酸で保護された金の結晶核を界面活性剤水溶液のゲル中で成長させると、高アスペクト比双晶金ナノロッドが成長するということが分かった。得られた金ナノロッドの平均長は 1752 ± 460 nm、収率は60%と比較的高いことが分かった。

第2章 現代のマイクロレベル研究の実際

この章では、現代科学の礎として一七世紀に復活した原子論に着目し、その起源となった「古代原子論」と「現代におけるマイクロレベルの研究」とに見られる共通点について論じる。

2・1 古代ギリシャ哲学に見られる二重構造

古代ギリシャにおいて、タレスは初めてこの世界の「ものもの（アルケー）」は水だと考えた。この世界のすべては水でできているという考え方である。その後、アナクシマン・ドロスがこの世界を構成するものとして、水ではなく無限なものを唱え、アナクシメネスはこの世界を構成するものは空気であるとした。その後、レウキッポスやデモクリトスが登場し、この世界を構成するものとして原子というものの存在を提唱した。原子とは非常に小さく、よって目で見ることができず、またそれ以上に分割不可能な世界の最小単位とされた。

古代ギリシャで、この世界を構成するものとされた、水、無限なもの、空気、原子は、（例外的な事例を除いて）いずれも直接観察することができない。にもかかわらず、実際には目に見えないこれらの根源的な構成要素がこの世界には存在し、そ

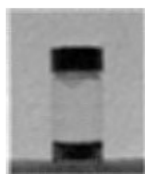


図7 金ナノロッドの分散液。

れらによってこの世界が構築されていると考えるやり方自体に特徴がある。こうした、見えないものを用いて見える世界を説明しようとする二重構造が、古代ギリシャ哲学の一つの特徴だと考えられる。

古代ギリシャの原子論は、提唱されたのち十数世紀にわたって忘れられていたが、一七世紀に復活し、現在ではこれこそが現代科学の考え方の礎になっているといわれている。そこで、古代ギリシャ哲学の大きな特徴の一つである二重構造の考え方と現代科学の考え方は同じなのか異なるのか、二重構造の考え方に着目して現代のマイクロレベル研究の実際を見ていく。

2・2 現代科学に見られる二重構造

前章で説明した高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成手法の開発研究を例にとり、現代科学に見られる二重構造について二つの観点から論じる。

2・2・1 SEM 観察

第1章の最初で、金ナノロッドとは金でできたナノ粒子であり、そのうち、長さが1μm程度、アスペクト比が50程度の高アスペクト比金ナノロッドを研究で扱うと紹介した。何気ない文章だが、実際には私は金ナノロッドの長さを直接この手で測ったり、形を直接目で見ただけではない。図7に示すように、今回の合成法で合成された金ナノロッドは一般的に水中に分散しており、肉眼には色のついた、ただの液体に見

える。この液体は水のようにサラサラで、液中にナノ粒子が分散しているなどということは肉眼では観察できない。ではどうやって金ナノロッドの形状を知ったのか？

金ナノロッドの形状はSEMによって観察された。金ナノロッドのSEM観察に当たっては、次のように観察対象のサンプルを用意した。作製した金ナノロッドは水中に分散しているため、少量の分散液をシリコン基板上に滴下し、余計な水分を取り除いて完全に蒸発させた。

分散液中に含まれていると考えられるのは、金ナノロッドと、金ナノロッドの安定分散に寄与しているといわれている少量の界面活性剤分子、および水のみである。そのため水分蒸発後の観察対象サンプルは、図8のように、平坦なシリコン基板上に界面活性剤分子で覆われた金ナノロッドが吸着している状態にあると考えられる。

以上を考察の上で、SEM観察を行う。すると画面上に得られるのは、 $10\text{ nm} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の白くなった領域がいくつも並んでいる絵である(図5)。これまでの考察から、この細長い領域は、われわれが合成した金ナノロッドを表して



図8 シリコン基板上に吸着していると考えられる金ナノロッドの状態予想図。表面と界面活性剤の薄い膜で覆われているが、とても薄い膜のため露出している部分は描きしていない。

いるのだろうと予想される。いいかえれば、この細長い領域を、われわれが合成した金ナノロッドから得られた二次電子の信号だと考えれば、以下に示すような多くのことのつじつまが合う。すなわち、

- ・ 先行研究によると、本合成方法では金ナノロッドができる可能性が高い。
- ・ 合成後の液体には、形状は不明ではあるものの金ナノ粒子、界面活性剤分子、水のみが含まれているはずである。
- ・ このうち、二次電子をよく放出するのは金ナノ粒子である。
- ・ SEMの像は、観察対象のサンプルから放出された二次電子の場所による強度分布を示している。
- ・ SEM画像中の黒い部分と白い部分は、表面の高さが異なる。

などである。これらのことから、われわれはSEM画像の中の $10\text{ nm} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ 程度の白くなった領域が、合成した金ナノロッドだと考える。その結果、実際には自分の手で触ったり、直接目で観察したわけではなくても、自分たちが合成した「金ナノロッド」が、直径 10 nm ×長さ $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度のサイズをしていることを「知る」ことができるのである。

2.2.2 TEM観察

1.1.3で、双晶構造とは、単結晶構造とは異なり、ナノ粒子中に結晶配列が変化する粒界を持っていることを述べ

た。しかし金ナノロッドが双晶構造をとっていることは、形状の確認と同様に、実際に目で見て構造を確認したわけではない。また、解像度のよい顕微鏡を使って原子一つ一つの並び方を観察して、双晶構造だと判断したわけでもない。では、どのようにして合成した金ナノロッドが双晶構造を持っていると分かったのか？

金ナノロッドの構造は、1・2・2で述べた電子線回折法によって確認された。この方法は、電子線のもつ波としての性質を用いるもので、金ナノロッドに電子線を入射し、内部で散乱され回折された電子線どうしの干渉を観察することで、金ナノロッド内部の結晶構造を知ることができる。なお1・2・1で説明したSTEMでも対象サンプルに電子線を入射するが、電子線回折に使われる電子線（加速電圧80~200kV）に比べると入射電子線の強度がそもそも弱い（加速電圧1~80kV程度）。そのため電子線自体がサンプル内部にあまり入りこまないことに加え、二次電子に関しては、サンプル内部で発生したものは外部に放出されないことから、STEM観察は対象サンプルの表面形状に敏感であった。一方で、電子線回折法では電子線強度が高いので、対象サンプルの内部まで電子線が入り込むことができ、サンプル内部の情報を得ることができる。また、単に散乱した電子を検知しているのではなく、それらが回折し互いに干渉することで結んだ像を検知している点特徴である。この特徴こそが、対象サンプルが双晶構造だと判断するのに役立っている。1・2・2で述べたように、電子線回折法では、入射電子線に対して対象

サンプル内部の結晶面がどのような角度に存在しているかを判断することができる。この方法によって、合成した金ナノロッドが双晶構造だと予想することができた。つまり合成した金ナノロッドが双晶だと考えると、電子線回折によって得られた像を理解するときに、次に示すような多くのことのつじつまが合う。例えば、

- ・金ナノロッドは金原子できていて、面心立方格子(FCC)を形成している。
- ・結晶構造の中に電子線を散乱する結晶面が定義できる。
- ・電子線は波の性質を持つ。
- ・電子線どうしの経路差が電子線の波長の整数倍になったときに、回折像が現れる。

などである。これらのことから、われわれは得られた回折像が金の結晶核で散乱された電子線による干渉によって現れたものであり、対象としている金ナノロッドは双晶であるということを「知る」ことができたのである。

2・3 古代原子論と現代のマイクロレベル研究との共通点

以上、見てきたように、現代科学でマイクロサイズの空間を扱う科学においても、見えないけれども本当のところはそうなっている、という二重構造が頻繁に使われていることがわかる。つまり、2・2・1においては、合成した金ナノロッド

ドをわれわれは直接手で触ったり目で見たわけではないが、観察に用いたSEMの原理や合成した金ナノロッドについての背景知識などを考慮すると、合成した色水中には金ナノロッドが分散していて、サイズはおおよそ直径数十nm×長さ1μm程度だと考えられることを示した。また $2 \cdot 2 \cdot 2$ においても同様に、われわれは直接金ナノロッド内の原子配列を確認したわけではないが、観察に用いたTEMの原理や回折像に関する背景知識などを考慮することで、金ナノロッドの構造は双晶であることを示した。

第3章 観察の理論負荷性の実験

この章では、N・R・ハンソンが提唱した「観察の理論負荷性」が、実際の研究現場においてどのように使われているのかを考える。第1章で紹介した高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成開発研究を例にとり、観察がどのように理論を負荷された形で行われるか、研究現場での実際を論じる。

3・1 観察の理論負荷性

観察とは理論とは独立して世界のありのままを切り取る作業ではなく、これまで観察者が積み重ねてきた理論を通して行われている、という考え方が観察の理論負荷性の考え方であり、ハンソンによって提唱された。ハンソンが例としてウサギ・アヒル図を出していることからわかるように、ここでの観察とは、科学研究における観察に限定されない、広い意味での観察である。たとえば、「これはリングだ」とい

う発言の裏には、赤い、甘い匂いがする、一定の重さがある、よく見るリングの形をしている、木になっている、等の多くの情報があり、これらを総合して「これはリングだ」という発言が生まれる。仮にリングというものがどういふものかを全く知らない場合、「これはリングだ」という発言は生まれないはずだからである。

では、この観察の理論負荷性という考え方は、研究現場ではどのような形で使われているのだろうか。

3・2 観察の理論負荷性の実験

高アスペクト比双晶金ナノロッドの合成開発研究において、観察の理論負荷性がわかりやすい形で表れていると思われる代表的な箇所2点について議論する。一つは、金ナノロッドのSEMでの観察、もう一つは金ナノロッドのTEMでの観察についてである。

3・2・1 SEM観察と観察の理論負荷性

金ナノロッドの観察において、われわれはSEMを用いた。得られた像からわれわれは金ナノロッドの直径や長さといったサイズを計測し、期待通り、高アスペクト比を持つ金ナノロッドが合成できたことを確認した。

SEMは、試料に電子線を当て、そこから出てくる二次電子を検出し、その強度分布によって試料の表面状態（凹凸具合）を観る装置である。つまりSEMを使う際、われわれは観察した時に見える像が、試料に電子線を当ててそこから出て

くる二次電子の空間的な強度分布を像にしたものである、ということを知っている。また、その二次電子の空間的な強度分布は、試料の表面状態（凹凸具合）に依存する、言い換えれば、二次電子の空間的な強度分布がわかれば、観察しようとしている試料の表面形状がわかる、ということを知っている。これに加え、扱っている試料に電子線を当てると二次電子が出るということや、金属に電子線を当てて得られる像はコントラストがはっきりしているということも知っている。

知っていることは装置の原理や、電子線とサンプルとの相互作用だけに限定されない。例えば、今見ている試料について、合成過程で用いたものは金イオンと還元剤と界面活性剤であるから、何かしら金に関係があるものができているはずだということをわれわれは容易に推察できる。つまり、材料が突然消えてなくなったり湧き出したりしないということや、質量保存の法則が成り立つということ、また行った合成条件では核融合や核分裂は起こらないということ、そのため金は銀や銅にはならず金のままであるということ等、多くのことを知っているのである。さらに実験事実だけではなく、先行研究を鑑みると、行った実験条件では細長い金粒子ができているということも推測できるのである。これらの背景知識は、すべてが同じくらいのもっともらしいわけではなく、それぞれにもっともらしさは異なる。しかし、一例として上記に挙げただけでもかなり多くの背景知識を通して、われわれはSEMで観察した像を見、その結果、合成によって得られたものが細長い形状をした金微粒子であること、またその

サイズがおおよそ直径数十nm×長さ1μm程度である、ということを知るのである。

3・2・2 TEM観察と観察の理論負荷性

双晶であることを確認するために、われわれは「TEM」を用いた。得られた像からわれわれは入射電子線に対する金ナノロッドの結晶面の向きを計算し、期待通り、合成した高アスペクト比金ナノロッドが双晶構造を持つことを確認した。

「TEM」は、試料に強い電子線を当て、試料を透過した電子線が回折してつくる干渉像によって試料の結晶構造を観る装置である。つまり「TEM」を使う際、われわれは観察したときに見える像が、試料に電子線を当てて試料を透過した電子線が回折してつくる干渉像である、ということを知っている。またその空間パターンは、試料の結晶構造に依存する、言い換えれば、試料を透過した電子線が回折してつくる電子強度の空間パターンがわかれば、観察しようとしている試料の結晶構造がわかる、ということを知っている。これに加え、非常に薄い試料であれば電子線が透過できて回折像が得られるということや、「TEM」で使用する電子線の強度では金が融解しないということも知っている。

3・2・1と同じく、知っていることは装置の原理にとどまらない。たとえば、「TEM」観察に用いた金微粒子とSEM観察に用いた金微粒子は同じ分散液から採取したのだから、同じ試料と考えてよいことをわれわれは知っている。また金が面心立方格子（FCC）構造を取るということも知っている。

そして、その結晶格子の特徴的な長さも知っている。さらに金ナノロッドは、先行研究から、単結晶構造か双晶構造のいずれかを取っているであろうことも知っている^(1,2)。また双晶構造の場合、基板上への配置の仕方によって2種類の回折像がみられるということも知っている⁽¹⁾。上記は知っていることの一例であるが、以上のような多くの背景知識を通して、われわれは「TEM」で観察した像を見、その結果、合成によって得られた高アスペクト比金ナノロッドが双晶構造である、ということを知るのである。

3・3 まとめ

観察の理論負荷性が、実際の研究現場に現れるやり方を、2つの観察結果に基づいて検討した。合成した金ナノロッドの形状の確認の際に使われるSEMでは、SEMの原理や合成過程での手続き、また先行研究に関する知識が、「理論」という形で観察をする際に役立てられ、結果として金ナノロッドの形状を確認することができた。また双晶構造であることを確認する「TEM」観察でも同様に、「TEMの原理や金の結晶構造に関する知識、先行研究から得られる知見が「理論」という形で観察する際に役立てられ、結果として合成で得られた高アスペクト比金ナノロッドが双晶構造である」ということを確認することができた。

結言

第2章と第3章で、現代のマイクロレベル研究に見られる

二重構造が現れるやり方と、観察の理論負荷性が現れるやり方を、実際の研究内容を通してみてきた。観察の理論負荷性が現れる箇所は、第2章で概観した現代のマイクロレベル研究に見られる二重構造が現れるやり方と、非常に強く関係しているように思われ、興味深い。実際には目に見えない根源的なものによって世界ができていると考える二重構造の考え方を取るとき、目には見えないが根源的なものが存在する根拠として、それが存在すると多くのことが説明できるという状態が必要だと考えられる。一方で、観察の理論負荷性が現れる際には、直接的に見たもの（つまりなんらかの色の広がり、といつてよいもの。たとえば回折像であれば白黒の空間的なパターン）が双晶構造を示す金ナノロッドからのシグナルであると考ええる理由として、「今日で見ている白黒の空間的なパターンを、双晶構造を持つ金ナノロッドからのシグナルだと考えると、これまでの知識とつじつまが合う、という状況が生じることが挙げられる。

科学の体系は、多くの現象や理論が絡み合った複雑なネットワークのようなものだと考えられるが、このネットワークを「より美しく、つじつまの合うやり方で」説明するために導入する二重構造の考え方と、このネットワークと「つじつまの合うやり方で」新しい現象を理解するやり方は、現状の知識とつじつまがあうことを重視している点で共通している。

科学とはどういうものなのか？どうやって科学の体系ができていて、どうやって新しい知識が増えていくのかを、研究現場での立場で研究内容に照らし合わせて考えるのは興味深

る。

注

- (一) C. J. Johnson, E. Dujardin, S. A. Davis, C. J. Murphy and S. Mann, *J. Mater. Chem.*, 2002, 12, 1765; P. L. Gai and M. A. Harner, *Nano Lett.*, 2002, 2, 771.
- (二) D. K. Smith, N. R. Miller and B. A. Korgel, *Langmuir*, 2009, 25, 9518.
- (三) N. R. Jana, L. Gearheart and C. J. Murphy, *Adv. Mater.*, 2001, 13, 1389.
- (四) H.-Y. Wu, H.-C. Chu, T.-J. Kuo, C.-L. Kuo and M. H. Huang, *Chem. Mater.*, 2005, 17, 6447.
- (五) H. M. Chen, H.-C. Peng, R.-S. Liu, K. Asakura, C. L. Lee, J. F. Lee and S.-F. Hu, *J. Phys. Chem. B*, 2005, 109, 19553.
- (六) K. Critchley, B. P. Khanal, M. L. Gorzyn, L. Vigderman, S. D. Evans, E. R. Zubarev and N. A. Kotov, *Adv. Mater.*, 2010, 22, 2338.
- (七) Y. Takenaka and H. Kishihata, *Chem. Phys. Lett.*, 2009, 467, 327.
- (八) T. K. Sau and C. J. Murphy, *Langmuir*, 2004, 20, 6414.
- (九) Y. Takenaka, *RSC Advances*, 2015, 5, 34690.

謝辞

本稿は2016年度に2度に渡って行われた京都大学での講義内容をもとに書き下ろしたものです。講義の機会を与えてくださった富田恭彦教授（京都大学）に感謝致します。図5、

© 2015 Royal Society of Chemistry の許可を得て Y. Takenaka, *RSC Advances*, 2015, 5, 34690 から転載しました。