

## 発泡スチロール球を使った結晶模型の作成

長谷川 能三<sup>\*1</sup>，岩永 諒人<sup>\*2</sup>，植田 希<sup>\*2</sup>，  
魚住 敏治<sup>\*2</sup>，大橋 誠一<sup>\*2</sup>，柿葉 隆雄<sup>\*2</sup>，紀平 裕美<sup>\*2</sup>，  
熊谷 光久<sup>\*2</sup>，大道 安代<sup>\*2</sup>，田中 明美<sup>\*2</sup>，  
田中 寛子<sup>\*2</sup>，成瀬 恭子<sup>\*2</sup>，成瀬 晴隆<sup>\*2</sup>，縄田 百江<sup>\*2</sup>，  
長谷川 佳永子<sup>\*2</sup>，林 康子<sup>\*2</sup>，福井 直美<sup>\*2</sup>，  
藤井 正一<sup>\*2</sup>，松岡 伊里<sup>\*2</sup>，松岡 凜<sup>\*2</sup>，向井 由美<sup>\*2</sup>

### 概要

2014年は世界結晶年に制定され、大阪市立科学館でも企画展「THE 結晶展～これが結晶、これぞ結晶～」を実施した。そこで、学芸員と大阪市立科学館友の会会員有志の共同で、企画展で使うことのできる結晶模型を作成した。実際に結晶模型を作成することで結晶についての理解が深まった部分もあった。ここでは、発泡スチロール球を使った結晶模型の作成について報告する。

### 1. はじめに

結晶模型は、発泡スチロール球などを使った自作品の他、既製品を組み立てたものも多く見られる。しかし、分子模型と違い、原子が規則正しく並んでいることがよくわかる結晶模型にしようとする、少なくとも原子数十個分の大きさが必要であり、大きな結晶模型となると原子数が数百個のものもある。

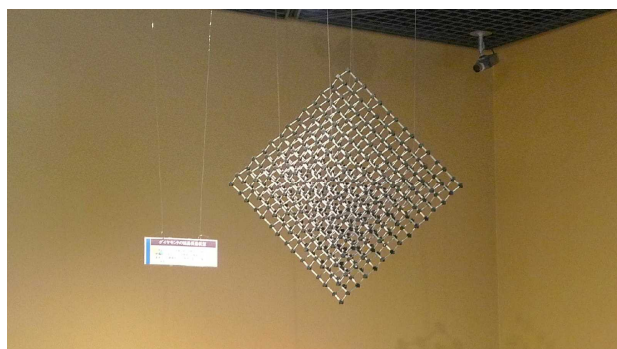


写真1. 展示場3階のダイヤモンドの結晶模型  
この大きさの結晶模型で、炭素原子624個分  
(飯山学芸員作成)

今回の結晶模型の作成の目的は、企画展「THE 結晶展～これが結晶、これぞ結晶～」で資料とともに展示ケースの中で展示することである。そのため、結晶模型のサイズはあまり大きくはないが、それでも原子数は100個前後となってしまう、いくつかの種類の結晶模型を作成することを考えると、原子数は合計数百個となってしまう。また、結晶模型や分子模型を作る既製品のセットでは格子定数や結晶構造の自由度がある程度限られてしまう。そこで今回の結晶模型作成にあたっては、既製品のセットは使わず、発泡スチロール球を使って作成することとした。

また、分子や結晶の模型は主に2つのタイプがあり、原子を小さく表わし、原子と原子のつながりを棒で表わすタイプ(写真1)と、原子を大きく表わし、原子と原子が接しているように作るタイプ(写真3)がある。前者の場合、原子と原子とのつながりはわかりやすいが、原子と原子の間が大きく空いているような誤解が生じることもある。また、原子を小さく表わしていることや原子と原子の間を棒でつないでいるため、自作する場合には形が崩れやすいという欠点もある。このため、今回の企画展用の結晶模型は後者のタイプで作成することとした。

<sup>\*1</sup>大阪市立科学館 学芸員  
E-mail: hasegawa@sci-museum.jp

<sup>\*2</sup>大阪市立科学館友の会 会員

## 2. 結晶模型の作成

今回結晶模型の作成に使用した発泡スチロール球は、手芸用品店などでもいろいろな大きさのものが手に入る。今回結晶模型作成用に入手しておいたものでも、直径が8mm、10mm、13mm、15mm、17mm、20mm、25mm、30mm、35mmと種類が豊富である。そこで、作成する結晶模型の大きさを、実際の結晶格子の約1億倍と決め、この倍率に合わせて使用する発泡スチロール球の直径を選んだ。

次に、結晶構造と格子定数から、何個の発泡スチロール球を使用するかを決め、色づけを行なった。まず発泡スチロール球に竹串を突き刺し、水性のペンキにそのまま浸け、発泡スチロールなどの大きな板に竹串を突き刺して乾かした。しかし、ペンキが乾くまでには時間がかかるため、一旦ここまでの作業で終了し、次の作業日に組み立てを行なうというようにした。



写真2. 塗装を乾燥中の発泡スチロール球

組み立てには、主にホットボンド(ホットメルト接着剤、グルーガンなどとも呼ばれる)を用いた。ホットボンドはグルースティックと呼ばれるものを熱で融かし、これが冷えて硬化することで接着する。このため、硬化が非常に速く、次々と発泡スチロール球を接着していかなければならない結晶模型の作成では、大幅な時間短縮を図ることができる。また、接着剤によっては発泡スチロールを溶かしてしまうものも多いが、ホットボンドは発泡スチロールを溶かすこともない。ただ、ホットボンドはあまり接着力が強くないが、接着する個数や方向などを間違えた場合でも簡単に外すことができる。ところが、結晶模型が組み上がった状態では発泡スチロール球が前後左右上下につながっているため、ホットボンド程度の接着力でも、ほぼ十分な強度であった。さらに、グルースティックにはさまざまな色のものもあるが、標準的な半透明のものを使えば接着剤があまり目立たない。このように、発泡スチロール球を用いた結晶模型の作成には、ホットボンドが適している。<sup>[1]</sup>

なお、原子を図や模型にして色をつける場合、一般的に酸素は赤、水素は白、炭素は黒、窒素は青といった色に塗られる。しかし、これ以外の多くの元素ではほとんど一般的に使われる色は決まっておらず、学術的にも決められていない。そこで、今回の結晶模型の作成では、その元素のイメージなどから任意に決めた。

### 2-1. アルミニウムの結晶模型

最初に作成したのは、アルミニウムの結晶模型である。今回の企画展「THE 結晶展～これが結晶、これぞ結晶～」では、結晶粒が非常に大きく、結晶粒界がよくわかるアルミニウム板等も展示予定であった。また、アルミニウムの結晶構造は面心立方格子であり、結晶模型が作りやすいという点でも、最初に作成するのに向いていた。

面心立方格子という結晶構造は、図1のとおり立方格子の各面の中央に原子がある構造である。このため「面心立方格子」という名前であり、その結晶模型は全体の形が立方体になるように作成されることが多い。しかし、この構造を立方格子の一種とするのは、結晶構造を分類するにあたって、立方格子を一番単純な晶系とし、なるべく単純な晶系に分類していくというルールのためである。

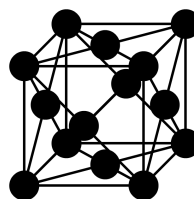


図1. 面心立方格子の結晶構造

この面心立方格子が、六方最密格子と似た構造であり、最密構造でもあることは割と知られている。しかし、立方体型の結晶模型を見ても、なかなかこのことを理解するのは難しい。そこで、今回、アルミニウムの結晶模型を作成するにあたっては、三角格子を組む面が上面に現われるような形の結晶模型とした。

表1. アルミニウムの結晶と模型のデータ

アルミニウムの結晶	
結晶構造	面心立方格子 (fcc)
格子定数	0. 405nm
最近接距離	0. 286nm
作成したアルミニウムの結晶模型	
球の直径	30mm
模型倍率	$1. 05 \times 10^8$ 倍
使用球数	76個
球の色	ライトグレー

アルミニウム結晶の最近接距離(一番近い隣の原子との中心間距離)が0.286nmであることから、アルミニウム結晶のモデルは直径0.286nmの球が並んだものとした。そこで、これを約1億倍し、直径30mmの発泡スチロール球を使用して結晶模型を作成した。面心立方格子は作成しやすく、発泡スチロール球を三角格子に並べて接着した一層だけの結晶を4つ作り、これを面心立方格子になるように重ねていった。

実際に結晶模型を作成してみると、三角格子に並んだ層の重ね方によって、面心立方格子と六方最密格子に構造が変わることがよくわかった。

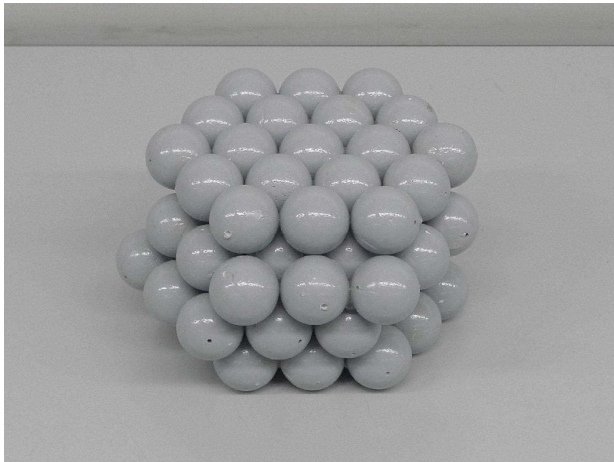


写真3. アルミニウムの結晶模型

## 2-2. 塩化ナトリウムの結晶模型

塩化ナトリウムは、ナトリウムイオンと塩化物イオンが交互並んだもので、一方のイオンのみの配置は面心立方格子となっている。隣り合うイオンの中心間距離は格子定数の半分であるが、ナトリウムイオンと塩化物イオンの大きさは同じではない。そもそも原子やイオンに決まった明確な直径があるわけではないが、ナトリウムイオンと塩化物イオンの直径の比は0.97:1.81程度<sup>[2]</sup>と考えるのが妥当である。そこで、ナトリウムイオンを直径18mm、塩化物イオンを35mmの発泡スチロール球とした。

表2. 塩化ナトリウムの結晶と模型のデータ

塩化ナトリウムの結晶	
結晶構造	NaCl構造
格子定数	0.563nm
最近接距離	0.281nm (Na-Cl間)
塩化ナトリウムの結晶模型	
球の直径	18mm (Na), 35mm (Cl)
模型倍率	$0.94 \times 10^8$ 倍
使用球数	63個 (Na), 62個 (Cl)
球の色	ピンク (Na), 薄緑 (Cl)

塩化ナトリウムの結晶模型の場合、ナトリウムイオンか塩化物イオンを区別しなければ、単純な立方格子である。しかし、前述のとおりナトリウムイオンと塩化物イオンの直径が異なるため、中心を揃えて接着することが難しい。そこで、大小の発泡スチロール球を交互に竹串に刺したもの(写真4)を作り、これを接着することで結晶模型を完成させた(写真5)。



写真4. 串刺しにしたナトリウムイオンと塩化物イオン

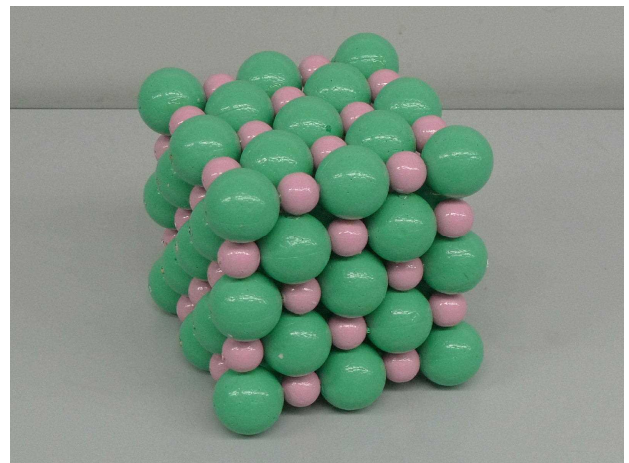


写真5. 完成した塩化ナトリウムの結晶模型

## 2-3. 鉄( $\alpha$ -Fe)の結晶模型

金属の結晶構造では、最密構造である面心立方格子か六方最密格子のものが多い。ところが、最も身近な金属といってもよい通常の鉄( $\alpha$ -Fe)は、体心立方格子である。

表3. 鉄( $\alpha$ -Fe)の結晶と模型のデータ

鉄( $\alpha$ -Fe)の結晶	
結晶構造	体心立方格子 (bcc)
格子定数	0.287nm
最近接距離	0.249nm
鉄( $\alpha$ -Fe)の結晶模型	
球の直径	25mm
模型倍率	$1.00 \times 10^8$ 倍
使用球数	91個
球の色	茶

結晶構造の名称や構造図としては「体心立方格子」と「面心立方格子」は似ているように思うが、結晶模型の作成してみると全く異なることがわかる。面心立方格子の場合、近接する4つの原子は正四面体構造になっており、互いに最近接の関係にある。このため結晶模型を作成する場合に、発泡スチロール球の互いに位置が一意的に決まり、安定して接着することができる。ところが体心立方格子の場合、ある原子の最近接原子は8個あるが、この8個で互いに最近接の関係にあるものはない。発泡スチロール球の位置は一意的に決まらず、安定して固定することもできない。このため、なかなか結晶模型を作成することができなかった。

そこで、発泡スチロール球の位置を決めるために、写真6のような台を作成した。この上に発泡スチロール球を並べることで、最下層の発泡スチロール球の位置が決まる。そしてその上に2層目を接着しながら積み上げた。ただ、このまま積み上げていくと四角錐の形になってしまうので、このまわりに厚紙で立方体の枠を立て、3層目、4層目、5層目を接着しながら積み上げていった。こうして写真7のような結晶模型が完成したが、接着剤の厚みや押さえ具合により、縦・横・高さのサイズが少し異なり、結晶模型全体の形が直方体になってしまった。

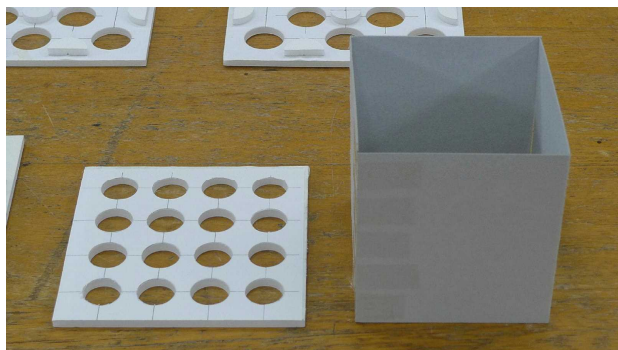


写真6. 体心立方格子用の台と枠

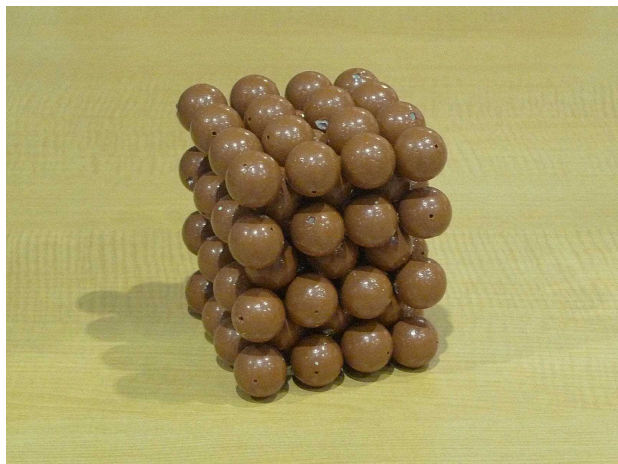


写真7. 完成した鉄(α-Fe)の結晶模型  
全体の形が、やや縦長の直方体になってしまった

今回、このような方法で結晶模型を作成したが、完成後に飯山学芸員と話していたところ、発泡スチロール球を竹串に刺したものを、斜めに並べてみてはどうかというアイデアをいただいた。体心立方格子の場合、立方体の対角線方向には最近接距離で原子が一直線に並んでいる。今回の大きさの模型であれば、7個の発泡スチロール球を串刺しにしたものが対角線上にあり、そのまわりに5個串刺しにしたものが6本つくことになる。この6本を固定する位置を決めるのが難しいかもしれないが、形の整った結晶模型を作り易いかもしれない。ただ、今回は既に結晶模型が完成しており、企画展までの時間もなかったため、この方法では作成しなかった。

#### 2-4. 鉄(γ-Fe)の結晶模型

今回の企画展では、同じ元素でも結晶構造が異なる「多形」についても展示を行なったため、これにあわせて鉄の結晶構造のひとつである面心立方格子の結晶模型も作成した。鉄の結晶構造が面心立方格子となるのは911~1392℃と高温の場合であって、γ鉄(γ-Fe)とも呼ばれる。

表3. 鉄(γ-Fe)の結晶と模型のデータ

鉄(γ-Fe)の結晶	
結晶構造	面心立方格子(fcc)
格子定数	0.363nm(約1000K)
最近接距離	0.257nm
鉄(γ-Fe)の結晶模型	
球の直径	25mm
模型倍率	0.97×10 <sup>8</sup> 倍
使用球数	172個
球の色	茶



写真8. 鉄(γ-Fe)の結晶模型  
面心立方格子の場合は、きれいな立方体にしやすい

また、ステンレスは、元素の混合比によって結晶構造が体心立方格子の場合と面心立方格子の場合があり、体心立方格子の場合は強磁性になるが、面心立方格子の場合は常磁性になるということである。

面心立方格子の結晶構造はアルミニウムと同じであるが、こちらの鉄の結晶模型は全体の形が立方体となるように作成した。これは、体心立方格子の鉄の結晶模型と並べて展示し、構造の違いを見てもらいやすくするためである。

### 3. 結晶模型の展示

作成した結晶模型は、企画展「THE 結晶展～これが結晶、これぞ結晶～」の中で展示した。

アルミニウムの結晶模型と塩化ナトリウムの結晶模型は、それぞれ結晶粒界が大きなアルミニウムの資料、塩の結晶とともに展示した。



写真9. 展示したアルミニウムの結晶模型



写真10. 展示した塩化ナトリウムの結晶模型



写真11. 展示した鉄の結晶模型

また、2種類の鉄の結晶模型は、写真11のように多形の展示の中で並べて展示した。隣には2本のステンレス製のスプーンがあるが、一方は磁石につき、他方は磁石につかない。

### 4. 考察

今回、結晶模型の作成を始める前には、もっと多くの種類の結晶模型を作成したいと考えていた。しかし実際に作成してみると、体心立方格子でも作成が難しく、時間がかかってしまった。このため、結局作成した

結晶模型は比較的単純な結晶構造の4種類にとどまった。

しかし、実際に立体の結晶模型を作成することにより、結晶構造の理解には大きくつながった。特に面心立方格子が最密構造であることや、面心立方格子と六方最密格子の関係は、二次元に描かれた図や完成した模型を見るだけでは理解しにくい。

また、面心立方格子が最密構造であるのに対し、体心立方格子は隙間が多いことも、作成することによって実感することができた。しかし、鉄について2種類の結晶模型を作成したのであるから、同じ個数の発泡スチロール球で作成し、結晶模型のサイズが違うことがわかるようにすればよかった。実際に鉄は、911℃で体積が小さくなるそうである。

#### 【参考文献】

[1] Charles Kittel 「固体物理学入門 上 (第6版)」p82(1988)

[2] 長谷川能三「科学教育実践セミナー「結晶と結晶模型の作成」および夏休み自由研究「結晶ってなんだろう」実施報告」大阪市立科学館研究報告第23号, p125(2013)