

長野県松本県ヶ丘高等学校／長野県

(業績分担者) 長野県松本深志高等学校

(業績分担者) 長野県松本深志高等学校

(業績分担者) 長野県松本蟻ヶ崎高等学校

西 牧 岳 哉*

上 口 翔太郎**

富 澤 祐 樹***

縣 晴 香****



目 的

高校化学での結晶構造模型を用いた実践報告は数多い。結晶模型では、原子やイオンを球の形状のまま組立てた(組立てる)方式のもの(以降「球状模型」と略す)と、単位格子や六角柱の形に切断したもの(以降「切断模型」と略す)がある。しかし既存の事例では全て片方のみにしか対応していない。球状模型は結晶の配列を俯瞰的にとらえることには向いているが、原子・イオン半径と立方格子一辺の長さの関係を考察したり、単位格子中の粒子数を数えたりするには不向きである。一方切断模型では、結晶の配列を俯瞰的にとらえにくいし、本作品の方法を除けば模型自体を組立てるのが難しく、時間がかかる。

本作品では「球状模型」にも「切断模型」にも対応し、更に生徒が簡単に組立て・分解することができる結晶模型の部品を作製し、通常授業で教育実践を行うことを目的とした。

概 要

粘土や発泡スチロール球で部品を作る従来の方法に代えて熱溶解積層方式の3Dプリンターでポリ乳酸(PLA)樹脂を用いて結晶構造模型の部品を作製した。そして通常授業の中で、生徒4人を1グループとして、模型の組立と結晶構造の考察を行った。

作製した模型の部品は、高等学校「化学」の主な教科書に記載されている体心立方格子、面心立方格子、六方最密構造、塩化ナトリウム型、塩化セシウム型、閃亜鉛鉱型、ダイヤモンド型の計7種類である。

教材・教具の製作方法

1. 支柱付き土台(図1)

結晶模型の土台を無色のPLA樹脂で作製した。土台からは原子やイオン球に差し込む直径5.6mmの支柱(円柱)を必要数、必要の高さで伸ばすように設計した。

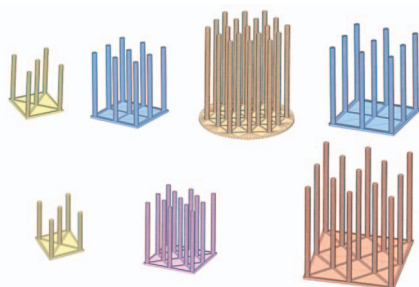


図1 上段左から 体心立方格子、面心立方格子、六方最密構造、塩化ナトリウム型
下段左から 塩化セシウム型、閃亜鉛鉱型、ダイヤモンド型用の支柱付き土台
(図を見やすくするために色彩を施したが、実物の部品の色とは異なる。以降の図も同様。)

II. 切断模型用半透明枠(図2)

切断模型をつくるには、部品を支える支柱だけでは不十分である。そこで無色のPLA樹脂で部品を支える枠を作製した。土台から伸びた支柱がはまる溝をつけ、枠の厚さは0.4mmで半透明な仕上がりになった。

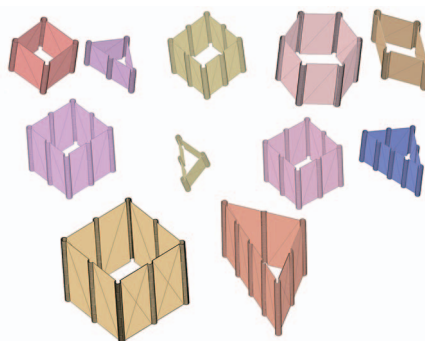


図2 上段左から 体心立方格子(四角・三角)、面心立方格子、六方最密構造(六角形・菱形)
中段左から 塩化ナトリウム型、塩化セシウム型、閃亜鉛鉱型(四角・三角)
下段 ダイヤモンド型(四角・三角)

*にしまき たけや

長野県松本県ヶ丘高等学校 教諭 〒390-8543 長野県松本市県 2-1-1

☎(0263) 32-1142 E-mail tnishi@m.nagano-c.ed.jp

**かみぐち しょうたろう 長野県松本深志高等学校 教諭

***とみざわ ゆうき 長野県松本深志高等学校 教諭

****あがた はるか 長野県松本蟻ヶ崎高等学校 教諭

Ⅲ. 原子球・イオン球およびその切断片（図3）

図3のように、球や半球の部品には土台の支柱が緩く（組立作業を容易にするため）刺さる穴を設けた。また、それ以外の部品の一部には土台の支柱に合わせた溝を設けた。

面心立方格子の球状模型をつくるだけでも14個の原子球が必要になる。六方最密構造やダイヤモンド型でも多くの原子球が必要になるから、直径4cmの緑色原子球をすべての結晶模型の共通部品として使い回すことにした。イオン結晶の模型では直径4cmの緑球を陰イオンとして使用し、陽イオンの球は直径4cmに実際の半径比（陽イオン／陰イオン）を掛けた大きさの球（黄・青・赤）を用いた。

塩化ナトリウム型では塩化物イオンとナトリウムイオンが単位格子の結晶軸方向に積み重なっている。イオン球には支柱用の穴が開いているため完全な球形ではなく、支柱と同じ方向の長さが4cmよりも短くなってしまふ。これを補正するため、ナトリウムイオン球に茶碗の高台のようなものをつけた（図3 m、n、o）。また、塩化ナトリウム型の球状模型では土台の上に塩化物イオン球とナトリウムイオン球を載せると、イオンの直径の差異により、両イオン球の中心の高さが異なってしまう。そこで両者中心の高さを一致させるための穴あき球片（図3 l）を作った。穴あき球片の上にナトリウムイオン球を載せることにより、中心の高さが塩化物イオン球と等しくなる。

熱溶解積層方式の3Dプリンターは印刷面に対して90°より大きい角度を造形するのが苦手である。そこで、図3のbはa二つをジクロロメタンで溶着して作製した。

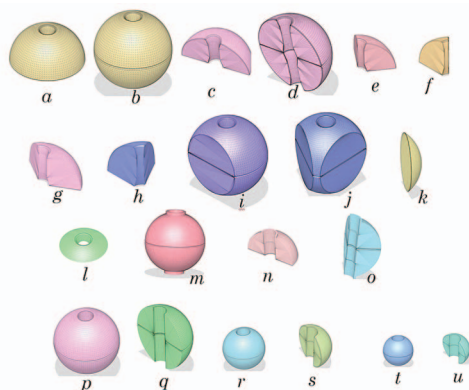


図3 a~k: 直径4 cm 球の一部または全部（a 2分の1面用、b 全球、c 4分の1、d 2分の1側面用、e 8分の1、f 16分の1、g 6分の1、h 12分の1、i~k 六方最密構造切断模型中間層用）

l: 塩化ナトリウム型球状模型高さ調整用

m~o: ナトリウムイオン（m 全球、n 4分の1横形、o 4分の1縦形）

p~s: 塩化セシウム型小イオン（p 限界半径比全球、q 限界半径比2分の1、r 不成立全球、s 不成立2分の1）

t、u: 亜鉛イオン（t 全球、u 2分の1）

同様に、図3のd、i、j、m、o、p、q、r、s、t、uも二つの部品をジクロロメタンで溶着して作製した。

塩化セシウム型模型では、大きいイオンを直径4cmとしたときに、大小のイオンの半径比がちょうど限界半径比となる小イオン球（p、q）と限界半径比よりも小さくなる小イオン球（r、s）を用意した。

学習指導方法

Ⅰ. 体心立方格子模型の組立と考察（写真1）

ア 支柱付き土台に直径4cm 原子球をはめ込み、球状模型（写真1a）を組立てさせた。同時に配位数を考えさせた。

イ 支柱付き土台に半透明四角枠をはめ、切断模型（写真1b）を組立てさせた。同時に単位格子1個中に含まれる原子数を求めさせた。

ウ 支柱付き土台に半透明三角枠をはめ、切断模型（写真1c）を組立てさせた。また、単位格子一辺の長さ、原子半径の関係式を導き出すよう指示し、一部の高校では充填率も求めさせた。

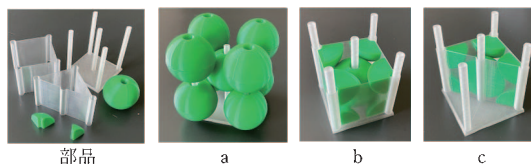


写真1

Ⅱ. 面心立方格子模型の組立と考察（写真2）

ア 支柱付き土台に直径4cm 原子球をはめ込み、球状模型（写真2a）を組立てさせた。

イ 支柱付き土台に半透明四角枠をはめ、切断模型（写真2b）を組立てさせた。同時に単位格子1個中に含まれる原子数を求め、単位格子一辺の長さ、原子半径の関係式を導き出すよう指示し、一部の高校では充填率も求めさせた。

ウ イの模型の上面真ん中の原子球だけ異なる色の球に替えさせ（写真2c）、その上にもう一つ単位格子を積み重ねる（写真2d）ことにより異なる色の球に接している球の数（配位数）を求めさせた。

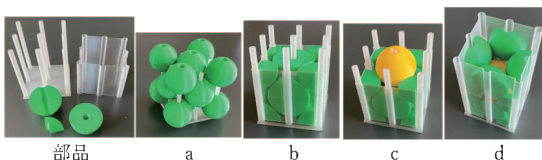


写真2

Ⅲ. 六方最密構造と面心立方格子との比較（写真3）

ア 支柱付き土台に直径4cm 原子球をはめ込み、六方最密構造の球状模型（写真3a）を組立てさせ、更に配位数を求めさせた。

イ 支柱付き土台に半透明六角形枠をはめ、六方最密構造切断模型（写真3b）を組立てさせた。さらに支柱付き土台に半透明菱形枠をはめて切断模型（写真

3c)を組立てさせ、単位格子1個に含まれる原子数を求めさせた。なお、これらの切断模型は枠の中に部品を入れるのが少し難しいため、割り箸に skinix社の「エアウォールふわり」という皮膚保護テープを滑り止めとして巻き(写真3d)、組立作業を行いやすく工夫した(写真3e)。

ウ 支柱付き土台に直径4cm原子球をはめ込み、球状模型(写真3f)を組立てさせた。この構造はABCABC…と最密に並べられた原子層の繰り返しであること、またABAB…という繰り返しの六方最密構造とは別の最密構造であることを説明した。次にこの模型の一番上層の原子球を真ん中の一つだけにすると、面心立方格子の正方形の面が観察できる(写真3g)ことを確認させ、この構造が面心立方格子であることを理解させた。

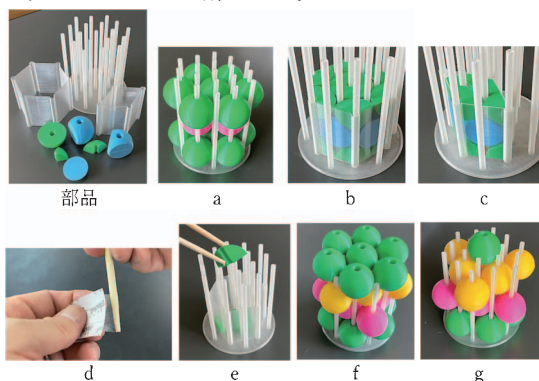


写真3

IV. 塩化ナトリウム型結晶構造模型の組立(写真4)

ア 支柱付き土台に球状模型高さ調整用部品を必要量載せておき(写真4a)、その上にナトリウムイオン球(黄)を、そうでないところには直径4cm塩化物イオン球(緑)をはめ、その後は交互に黄と緑のイオン球を支柱にはめるよう(写真4b、4c)指示した。岩塩の劈開実験を同時に行った高校では、二つの球状模型を合体させて、劈開しやすい性質を予測させた(写真4d)。

イ 支柱付き土台に半透明四角枠をはめ、切断模型(写真4e)を組立てさせた。同時に単位格子1個中に含まれる各イオン数を求め、単位格子一辺の長さ、イオン半径の関係式の導出を指示した。

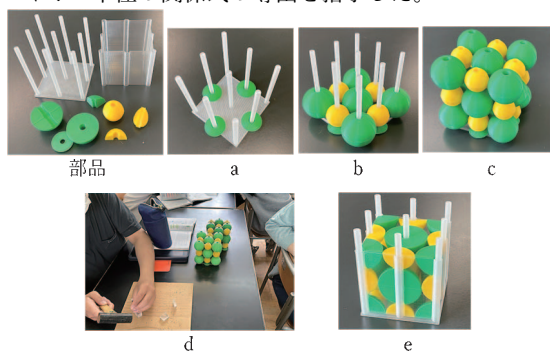


写真4

V. 塩化セシウム型模型で限界半径比を考察(写真5)

ア 支柱付き土台に直径4cmイオン球と限界半径比の組み合わせになる大きさの陽イオン球をはめ込み、球状模型(写真5a)を組立てさせた。また、同時に配位数を求めさせた。

イ 支柱付き土台に半透明三角枠をはめ、切断模型(限界半径比)(写真5b)を組立てさせた。また、限界半径比では単位格子一辺の長さが大きいイオンの直径に等しくなることを示し、限界半径比(r/R : r は小さいイオンの半径、 R は大きいイオンの半径)を求めさせた。

ウ 次に r/R が限界半径比より小さい組み合わせで球状模型と切断模型(写真5c)の組立てに取り組み、安定した結晶構造にならないことを体験させた。

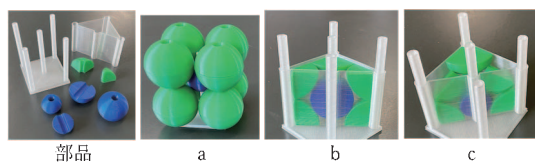


写真5

VI. 閃亜鉛鉱型結晶構造模型の組立(写真6)

ア 支柱付き土台に直径4cm硫化物イオン球と直径が0.4倍の亜鉛イオン球をはめて球状模型(写真6b)を組立てさせた。面心立方格子と同じ位置に硫化物イオンが配置され、その隙間8ヶ所のうち4ヶ所に亜鉛イオンが配置される構造であることを示し、亜鉛イオンが配置されない隙間には無色の球を配置し(写真6a)、その上部のイオン球を支えるように工夫した。

イ 支柱付き土台に半透明四角枠をはめ、切断模型(写真6c)を組立てさせた。同時に単位格子1個中に含まれる各イオン数を求めさせた。

ウ 支柱付き土台に半透明三角枠をはめ、切断模型(写真6d)を組立てさせた。

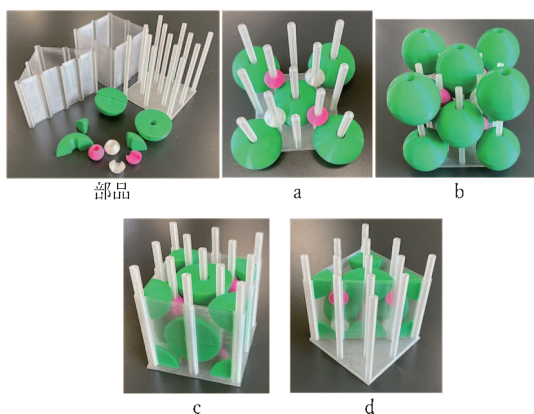


写真6

VII. ダイヤモンド型結晶構造とアボガドロ定数(写真7)

ア 支柱付き土台に直径4cm原子球をはめて球状模型(写真7b)を組立てさせた。面心立方格子と同じ位置に原子が配置され、更にその隙間8ヶ所のうち

4ヶ所に原子が入ることを示し、原子が配置されない隙間には無色の球を配置させ（写真 7a）、上部の球を支えるように工夫した。

イ 支柱付き土台に半透明四角枠をはめ、切断模型（写真 7c）を組立てさせた。同時に単位格子 1 個中に含まれる原子数を求めさせた。また、ケイ素の結晶における単位格子一辺の長さ・モル質量そして密度を提示し、計算によりアボガドロ定数の概数値を求めさせた。

ウ 支柱付き土台に半透明三角枠をはめ、切断模型（写真 7d）を組立てさせ、単位格子一辺の長さと原子半径の関係式を求めさせた。

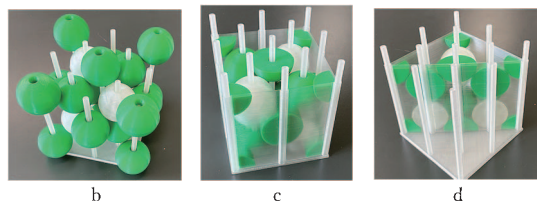
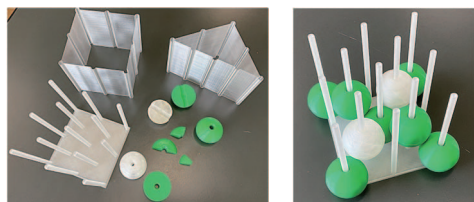


写真 7

前回の復習や問題演習などに取り組むことができた。

1 グループ 4 人に一つの模型セットが与えられ、グループごとに話し合いながら組立てることができた。配位数や原子・イオン半径と単位格子一辺の長さの関係などを互いに教えあいながら求めることができ、協同的な学びにはちょうど良い環境であった。そして、メンバーと話し合えて理解できたことに満足感を得た生徒が多かったようである。



写真 8 実習の様子

その他補遺事項

材料費（PLA樹脂代）は 1g 当たり約 2～3 円であり、7 種類の結晶模型の部品を作製するのに必要な費用は、3D プリンター本体費用と電気代を除けば約 3,600 円。これを 1 クラス 10 グループで実践する場合には合計 36,000 円程度で済む。模型部品の 3D データ（STL ファイル形式）は筆者に電子メールを頂ければ提供可能である。これを機に理科教育に 3D プリンターを活用していただければ光栄である。

実践効果

令和 5 年 3 月～4 月に長野県松本深志高等学校で学習指導方法 I～V、VII を 4 時限かけて実施。同年 6 月に長野県松本蟻ヶ崎高等学校で I～V を 4 時限実施。同年 6 月～7 月に長野県松本県ヶ丘高等学校で IV のアを岩塩の劈開実験と一緒に 1 時限実施。同年 8 月に長野県松本深志高等学校で「イオン結晶の総復習」という形で IV～VI を 1 時限実施。いずれも 1 クラスの標準的な人数は 40 人、また 4 人で 1 グループとし、最大 10 グループでの実習および問題演習とした（写真 8）。

結晶構造の図は教科書や資料集に掲載されている。しかし「紙面で見るとより模型を組み立てた方が断然わかりやすかった」という感想が多かった。また、切断模型については「難しかった」という感想も多かったが、適度に（パズルのように）難しかったが故に楽しい感覚と達成感が得られ、強く印象に残ったようである。生徒の感想の中には「うれしかった」、「楽しかった」あるいは「感動」という言葉が散見され、通常の授業では容易に得られない体験ができたと推測される。

多くの生徒実験では実験をするだけで 1 時限が終わってしまい、考察は後日になってしまうことが多い。しかし本実践では一つの結晶模型につき、数十秒から長くても 10 分ほどの短時間で組立が可能であるし、分解には 10 秒もかからない。故に組立て前後の時間に