

固体地球の多面的な学習 —結晶構造の幾何学的な理解を通して—

自然科学系サブプログラム (理科)

三浦 脩

【指導教員】 岡本 和明 日比野 拓 松岡 圭介

【キーワード】 鉱物 結晶構造 対称性 立体図形

1. はじめに

理科の地学分野では地球を取り巻く様々な現象を取り扱う。高校地学の教科書は大きく、①固体地球②地球史③大気・海洋④宇宙の4つに分類されている。その中でも地殻・マントル・核からなる固体地球、つまり私たちが住む大地そのものは足元から地球の中心約 6400 km までと非常に奥が深い世界である。また、その中は液体である外核を除き全て固体で構成されている。しかしながらその固体物質を多面的に学習する機会は高校まででほとんどなく、多くの場合自然現象に即した学習に限定される。固体そのものをより深く学習するためには、様々な視点から理解すべきである。また、実験を通じた固体学習の機会も少ない。中学校の理科実験では、反応時間が短い液体や気体の実験が多い。

実際に液体や気体も我々にとって身近なものである。液体であれば水、気体であれば空気(窒素その他を含む混合気体)など、身近で代表的な物質が存在する。しかし、固体に関しては身の回りの物質も種類が多く、代表的な物質もない。物質が固体かどうかの判断は少し難しく、紙やビニール袋などを判断するには少なからず迷いが生じる。それは、固体が固いものであるという認識が存在しているからである。ただ、地球内部のマントルでは、マントル対流と呼ばれる固体の流動が起こっている。人間の生活スケールでしか見ていないと、固体は固くて形が変形しないものでしかない。私たちが地球を理解しようとすることは、固体を理解することとつながっている。液体や気体だけでなく、固体に関する確かな理解は地球人にとって必要不可欠である。

固体が液体や気体と大きく異なる点は、結晶構造を持っていることである(アモルファスなどを除く)。結晶構造は原子や分子などが三次元的な規則正しい周期配列をなしている。結晶構造に関しては地学ではなく化学分野で扱われており、高等学校学習指導要領解説理科編(平成30年告示)¹⁾ 化学分野「物質の状態と平衡」では、固体の構造について、結晶格子の概念及び結晶の構造を理解することが示されている。高校化学では、この結晶構造の理解のために単位格子や結晶格子のパッキング構造における原子の配列や配位数を扱っている。その他の結晶の特徴としては、対称性を持っていることである。よって、結晶構造を理解する際には幾何学的な観点からも考察することが可能である。対称性に関しては算数・数学科で扱われているので、つながりを持たせる

こともできる。

結晶構造を学習するには三次元空間で捉える必要があるが、学校教育では空間図形を扱う機会は平面図形に比べて圧倒的に少ない。また、空間図形を扱うにしても多くの場合平面に記述した状態である²⁾。つまり、児童・生徒は空間図形を空間図形として学習する機会に恵まれていないのである。その結果、空間を認識する能力が十分に育たないまま教育課程を修了してしまう可能性がある。固体を学習するにあたっては単位格子のパラメーターだけを理解するのではなく、結晶における対称性の理解を立体図形に触れることを通して深めていくことが重要である。

日常生活で扱う固体は多くの場合非晶質か、もしくは結晶であっても整形されているものである。料理で使う塩やミョウバンなどは結晶であるが、結晶の形を肉眼で見られるほど大きくはない。結晶の外形を肉眼で観察できるもので比較的簡単に導入できるのは鉱物である。鉱物は岩石を構成する無機質の固体結晶であり、結晶の外形が鮮明であるものもある。中学校学習指導要領解説理科編(平成29年告示)³⁾によれば、第二分野「大地の成り立ちと変化」の内容の取扱いにおいても、代表的な造岩鉱物を扱うことが示されている。ただ、結晶の形を観察するのに適している鉱物は造岩鉱物以外にも多く存在するため、学習指導要領の枠を超えて様々な形の鉱物を観察するのもよい。鉱物を特徴づける要素は化学組成、色、硬度、比重、形など様々だが、最も観察しやすいのは色と形である。教科書に載っている造岩鉱物は火成岩の色に影響を与えるという点でよく扱われているが、形(外形)に着目した学習は少ない。固体の構造と関連付けて鉱物を学ぶためには、鉱物の幾何学的な形に着目すべきである。ただ天然の鉱物の結晶は、個々で発達度合いが異なり、理想的な形になっていることはほとんどない。実物とモデルを比較してみるのが結晶構造の理解には必要である。

本研究ではこれまであまり重要視されてこなかった固体に関する多面的な学習方法を提供する。その際に扱うのは三次元空間であり、できるだけ平面図形に落とし込まないような学習を考える。固体、ひいては鉱物の結晶構造を多面的に学習する以下の4つの方法を示す。

- ①ペーパークラフトを用いた対称性の学習
- ②ピンポン玉を用いたパッキング構造の学習
- ③結晶構造可視化ソフトを用いた構造理解の学習

④光を用いた結晶の学習

これらの学習を通して固体をこれまでと違った視点で捉えなおすことができるようになることを目的としている。

2. 単位格子と結晶系

固体は結晶質のものと非結晶質のものがあるが、本研究では結晶質の固体に着目する。結晶は原子やイオンが規則正しく三次元で周期的に配列している物質であり、その周期的配列の最小単位の平行六面体を単位格子という⁴⁾。結晶構造は単位格子の構造を考えることで、その繰り返しが広がっているものとみなす。そのため高校化学での結晶構造の学習では単位格子に焦点を当てている。それぞれの単位格子の軸の長さを a, b, c , とし、 bc のなす角を α , ac のなす角を β , ab のなす角を γ とする (図1)。これらを格子定数と呼ぶ。また、結晶は6つの結晶系に分類することができる (表1) が、それらは単位格子の対称性によって分類される。それによって格子定数に制限が生まれる。また、単位格子の頂点以外にも格子点が含まれる場合があり、それらを含めた分類はブラベー格子と呼ばれる。高校化学で学習する面心立方格子や体心立方格子はブラベー格子の一つである。鉱物もそれぞれ結晶系を持っているが、天然のものは成長環境によって外形が大きく異なるため結晶系の判断は難しい。

図2に各結晶系の鉱物を示している。①や⑥は比較的大

きな結晶で、①は正八面体、⑥は六角柱と普段扱うような立体図形として捉えることができる。しかし、鉱物によって柱状であったり、針状であったりと結晶の形は様々で、単位格子の形から想像できるものではない。また、同じ結晶系でも形は異なる。実際の鉱物を生徒に見せることで自然界の固体は多様に形成されていることを理解してもらうことができる。

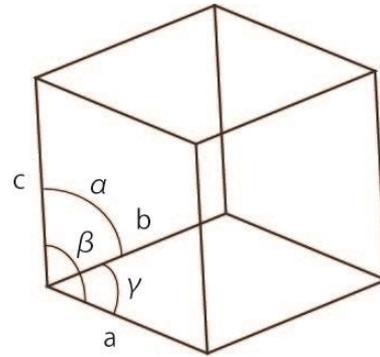


図1：単位格子と格子定数



図2：6つの結晶系に該当する鉱物 ①蛍石 (等軸晶系) ②ジルコン (正方晶系) ③重晶石 (直方晶系) ④緑簾石 (単斜晶系) ⑤藍晶石 (三斜晶系) ⑥石英 (六方晶系)

表1：6つの結晶系と格子定数

結晶系	格子定数
等軸晶系	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
正方晶系	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
直方晶系	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
単斜晶系	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
三斜晶系	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
六方晶系	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$

3. ペーパークラフトを用いた対称性の学習

自然界に存在する結晶の一つに、雪の結晶がある。

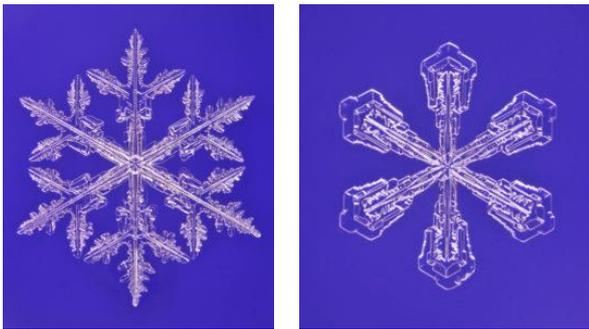


図3：雪の結晶 (油川英明 著)
日本雪氷学会 HP⁵⁾ より引用

雪の結晶の形は図3で示したものの以外にも多様であるが、対称性を持っているという点では同じである。さらにいえば全て六角形になっている。この雪の結晶のように、自然界の結晶は基本的に対称性を持っている。当然、鉱物にも対称性は存在する。

物体にある操作を与えた後に操作前と同じ状態になっている場合、その物体は対称を持っているという。また、ある操作のことを対象操作という。小学校第6学年算数科、中学校第1学年数学科においては図形の対称性を学習する。その中で扱う回転移動や対称移動は固体結晶を理解する際に重要な役割を果たす。固体の対称性には向きを変えない並進移動を含めたものが存在するが、少し複雑になるので本研究ではその場で回転させる回転対称を取り扱う。

図4の各頂点に番号が振られた正三角形を例に対象操作を考えてみる。まず、正三角形の中心を通り紙面に対して垂直な軸をとる。正三角形をその軸で時計回りに 120° ($1/3$) 回転させると元々1があった頂点に2が来る。さらに 120° 回転させると同じ頂点には3が来る。3回目の 120° 回転で1が戻ってくる。数字は目安なので、形さえそろえばよい。この正三角形は一回転の間に対称操作を行う前を含めて3回形が一致するため、このような物質は紙面に垂直な方向に3回回転軸を持っているという。一般的に一周 (360度) 回転させる間に n 回形が一致する対称軸を n 回回転軸と呼ぶ。

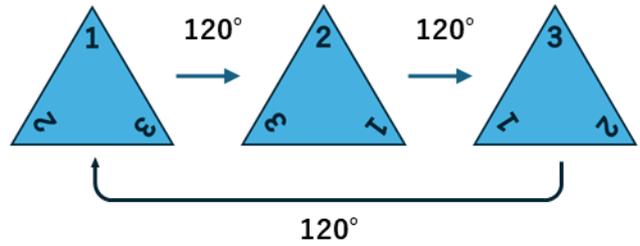


図4：三回回転軸を持つ正三角形の対象操作

結晶に現れる回転軸は1, 2, 3, 4, 6回回転軸であり、5回および7回以上の回転軸は存在しない。図4では平面図形を例に回転軸を考えたが、実際の結晶は三次元であるので結晶軸は様々な方向に存在する可能性がある。

6つの結晶系は回転対称軸の種類と本数で決定できる。それぞれの結晶系が持つ回転対称軸を表2に示す。三斜晶系の1回回転軸というのは、1回転させると形が一致することなので対称性がないことと同じ意味である。

表2：結晶系と回転対称軸

結晶系	持っている対称性
等軸晶系	3回回転軸 × 4
正方晶系	4回回転軸 × 1
直方晶系	3回回転軸 × 1
単斜晶系	2回回転軸 × 1
三斜晶系	1回回転軸
六方晶系	6回回転軸 × 1

結晶は三次元なので対称性も三次元で考える必要があるが、基礎的な理解のためには二次元で考えることが効果的である。算数科では一つの図形を対象として図形の対称性を考えるが、固体の結晶構造は周期的な配列なので、同じ形が繰り返された模様で対称性を理解するとよい。その際に使えるのが平面の正則分割で有名な版画家エッシャーの絵である⁶⁾。図5には赤、青、黄色の生物が規則的に描かれているが、回転対称に着目してみると3回回転軸が赤、青、黄色の顔が集まる部分にそれぞれ存在していることがわかる。また、回転対称以外では、折りたたんだときに模様が一致する線対称も存在する。単位格子は3回回転軸の場所を結んだ平行四辺形である。平面図形の場合は対称軸も少なく、比較的簡単に見つけることができるので導入には最適である。このように図の中から対称性を見つける作業は良いトレーニングになる。

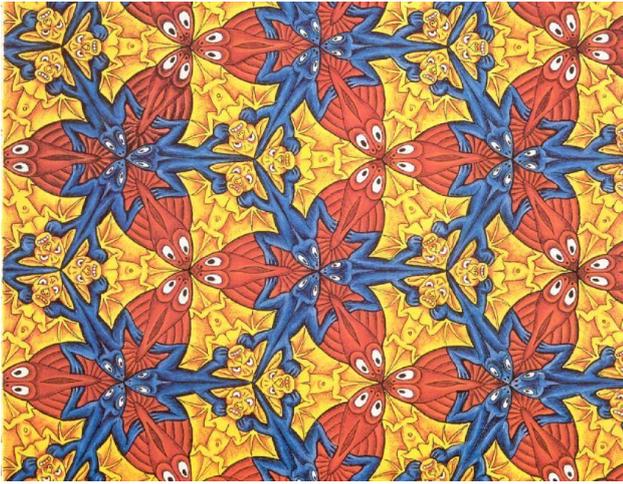


図5：エッシャーの図形

対称性のある図形を自作したい場合には「Kali (<https://www.geometrygames.org>)」というソフトが便利である。Kali では好みの対称性で図形を作成できる。教員が図を作成し、学生に対称性を考えさせることや、学生自身が図を作成することにも使える。作成した図形ではどんな種類の対称がどこに存在するかが分かる。図6では正六角形が規則的に並んでいる。正六角形の中心に6回回転軸、正六角形が3つ集まる場所に3回回転軸、2つの正六角形の間に2回回転軸が存在する。



図6：Kali で作成した図形

結晶は三次元なので、立体図形の対称性も考える必要がある。立体図形はペーパークラフトで作成し、それらがどのような対称を持っているか観察する。模型を買うよりも費用を節約できるうえに手先のトレーニングにもなる。この実践は埼玉大学教育学部自然科学講座で開講している「地学実験」にて行った。

<実験の流れ>

① 固体の多くが規則性を持った原子や分子などの配列である結晶であることを確認（例外である非晶質について

ても言及)

- ② 資料(鉱物の図鑑)を用いて結晶が単位格子の種類によって6つの結晶系に分類できることを確認する。その際、一つ一つの結晶系については細かく説明しない。
- ③ 6つの結晶系に該当する鉱物を学生に提示し、それぞれがどの結晶系に該当するかを考えさせる。学生は鉱物の外形から結晶系を同定することが困難であることを知る。
- ④ 学生を4~5人のグループに分け、表3にある立体図形を1人1種類ペーパークラフトで多面体を作成する。
- ⑤ 図形の対称操作(主に回転操作)の説明を行う。
- ⑥ グループ内で作った多面体にどんな回転対称軸が何本あるのかを調べさせる。
- ⑦ 回転対称軸の種類と本数からそれぞれの多面体の結晶系を決める。

表3：作成した立体図形

<立方体> ・4回回転軸×3 ・3回回転軸×4 ・2回回転軸×6	
<正八面体> ・4回回転軸×3 ・3回回転軸×4 ・2回回転軸×6	
<正四面体> ・3回回転軸×4 ・2回回転軸×3	
<直方体> ・2回回転軸×3	
<正六角柱> ・6回回転軸×1 ・2回回転軸×6	
<菱面体> ・3回回転軸×1	

③の作業において、学生は単位格子の形と鉱物の形を照らし合わせていたが、全ての鉱物において単位格子の形と外形が一致していることはないので外見だけでの判断は不可能であるとの認識を持った。正八面体には4回回転軸と3回回転軸が存在するが、これらの回転軸がいくつあるかを数える際に少し工夫することができる。多くの学生は回転軸が通る頂点や面を抑えながら一つずつ数えていたが、一部の学生は4回回転軸が対角線上の頂点を通ることに着目し、頂点の個数を数えていた。また3回回転軸は各面に対して垂直な方向にあるので、面の個数を数えれば十分である。このように図形の特徴をつかむことができれば、より少ない労力で対称性を理解することができる。また、回転対称軸がイメージしにくい学生に対しては軸の方向に竹串を刺すことで対称性を理解するサポートができる。また、このような規則性を探すトレーニングは前提知識をほとんど必要としないので、小学校で図形の性質を学習する際に取り入れることもできる。立体図形を自分で動かして様々な角度から平面を捉えることは空間認識の能力育成につながる。



図7：正八面体の頂点方向（左）と面方向（右）

5. 結晶の形

ペーパークラフトで理想的な立体図形を観察することは対称性を理解するための効果的な方法ではあるが、天然に産する結晶の形は複雑であり、ペーパークラフトで作成したような図形のように単純ではないということも理解しておくべきである。

中学1年の物質領域で結晶や再結晶作用を学習する際には塩化ナトリウムや硝酸カリウムなどの結晶が取り上げられる。実際に再結晶の実験を通して様々な形の結晶を観察できれば、同じ物質の結晶でも外形は多様であることが理解できる。しかしながら、肉眼での結晶の観察は難しいため、実体顕微鏡が必要である。実体顕微鏡の数が十分でない学校では生徒が教科書や資料集の図だけを見て、結晶の形は全て等しく規則正しいものであると思ってしまう可能性もある。規則正しいのはあくまでも原子や分子の配置であって、結晶の形そのものが規則正しく見えるとは限らない。特に、「塩化ナトリウム＝四角形」などと実物を通さず理想的な形だけで理解するのは危険である。高校入試では結晶

のイラストから物質名を答えさせるような問題が出題されるため、入試のための勉強になるとどうしても暗記だけになってしまう。

塩化ナトリウムと硝酸カリウムは再結晶の実験を通して析出させることがあるが、代表的な鉱物もこれと同じように再結晶によって産出する。しかしながらかかる時間がはるかに長いので実験で確認することはできない。重要なのは造岩鉱物も塩化ナトリウムや硝酸カリウムの結晶と同様に再結晶作用によって生成された結晶であるという理解をすることである。また、結晶の形は同じ物質でもばらばらであるということを鉱物のサンプル観察を通して学ぶこともできる。

変成岩などに産するザクロ石は等軸晶系だが、その中でも菱形12面体や珩型24面体など複数の形がある。これらの結晶は写真や平面図で理解することが難しく、実物での理解が必要になる。同じ鉱物における結晶の形の違いは結晶成長によるものであるため、どの面が発達しているのかを結晶から判断することもできる。12面体は菱形で構成されているが、それぞれの辺が面になると24面体になる。

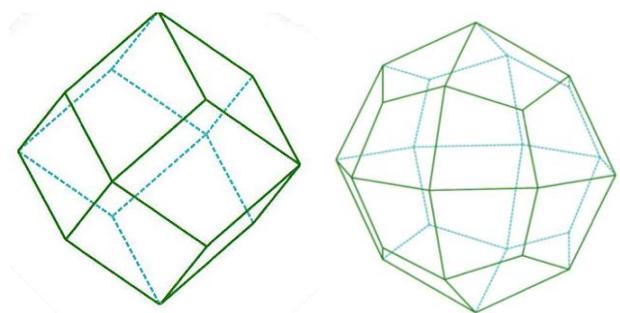


図8：ざくろ石12面体結晶（左上）
ざくろ石24面体結晶（右上）
平面図形で示した12面体（左下）
平面図形で示した24面体（右下）
※平面図形は鉱物結晶図鑑⁷⁾より

6. ピンポン玉を用いたパッキング構造の学習

イオン性結晶では陽イオンが比較的小さい場合、それよりも大きい陰イオンにとって骨組みがなされ、その隙間に陽イオンが配置する⁴⁾。この陰イオンのパッキング構造は原子が密に詰まっているほど安定する。そのような構造は最密パッキングと呼ばれる。

高校化学では原子のパッキング構造を学習する際によく図9のような結晶模型が用いられる。この模型は面心立方格子である。立方体の頂点に原子が配置し、単体格子の中にはその1/8が含まれている。また各面の中央にも原子が配置しているため、単体格子の中にはその1/2が含まれる。この模型は単体格子に原子が何個分含まれているのかを計算させる際には便利である。しかしながら単体格子のみを切り出しているため結晶が周期的に配列する物質であることをイメージしにくく、分解して中の構造を観察するのにも向かない。また、模型は高価であり用意ができない教育現場も存在する。学習する側にとっては既に完成されている模型を眺めるよりも、実際に自分自身で模型を作成し、原子の配置を理解する方が効果的である。

パッキング構造学習の実践として、埼玉大学教育学部自然科学講座理科分野で開講している地学実験にて固体のパッキング構造モデルを作成する実験を行った。実際の講義ではピンポン玉やアメなど身近な球体を使った。これには身近な球体を扱うことにより学生の意欲を向上させる狙いがある。飴玉に関してはくっつきやすい点で模型作成には向いているが、サイズが小さく観察にはあまり向いていなかった。ピンポン玉のサイズは適切だが、固定する手段が難しい。実際の講義ではテープで固定したが、学生はかなり苦戦していた。単体格子の作成であれば粘着性のものでもピンポン玉どうしを固定する必要があるが、単体格子にかかわらずパッキングの積み重なりを理解するのであればピンポン玉を敷き詰めて並べるだけでよい。本研究では、固定せず積み重ねるだけで最密構造の原子配置や配位数が理解できる実践を構築した。

まず適当なトレーに砂を敷き詰め、その上にピンポン玉を隙間なく並べる。ピンポン玉がぴったり収まるケースがあればいいのだが、それを見つけるのは難しいため、砂を敷き詰めて一層目のピンポン玉を固定しやすいようにした。次に2層目のピンポン玉を並べるのだが、色を変えることによって真上から見たときに1層目が見やすくなるようにする。陽イオンが入る隙間には4つの原子に囲まれる4配位と6つの原子に囲まれる6配位がある。それぞれ1層目と2層目の間に存在し、4配位は2層目にくるピンポン玉の位置であり四面体の中心である。6配位は図11のBに位置し、八面体の中心となる。画像だけを見ていると難しいが、実際にピンポン玉を積み重ねる際にその場所を確認することができる。また、図11の状態から3層目を並べる際に六方最密充填構造と立方最密充填構造の違いを理解することができる。

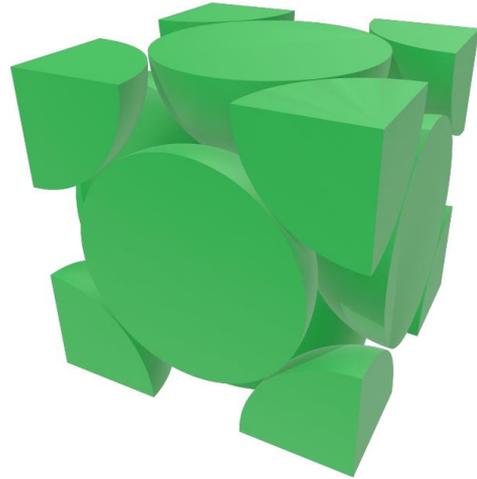


図9：面心立方格子の模型



図10：ピンポン玉1層目

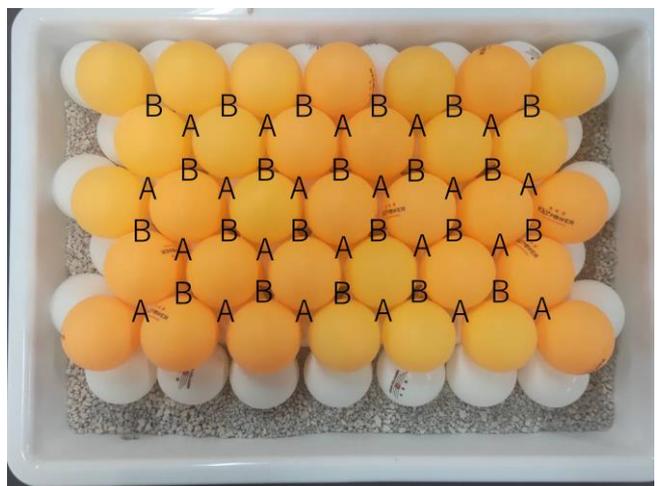


図11：ピンポン玉2層目



図1 2 : 地学実験の講義にて学生がピンポン玉で作成した六方最密構造

3段目の置き方は図1 1のAの位置とBの位置に置く置き方で2通り存在する。Aの位置は1段目のピンポン玉の真上で、Bの位置は1段目のピンポン玉の隙間である。立方最密構造の場合、図1 1のBの位置に3層目が並び、4層目は再び1層目と同じAの位置に戻る。六方最密パッキングの場合は3層目でAに置く。2層目に置いた場所をCとすると、そのあとはA,C,A,C,...と繰り返していく。どちらも配位数が12で単位格子の74%ほどを占める最も密な構造になっている。主な造岩鉱物のかんらん石、輝石、角閃石、雲母の一部はこのような密なパッキング構造をとっている

この方法の欠点は、ピンポン玉を固定していないため上の層に行くにつれてピンポン玉が減ってしまうことと、崩れやすいことである。単位格子だけを抜き出したい場合には図1 2のようにテープなどで固定する必要がある。

7. 結晶構造可視化フリーソフトの活用

指定した対称性を再現するには結晶構造可視化フリーソフトの「VESTA」 (<https://jp-minerals.org/vesta/jp>) が活用できる。このソフトでは、任意の結晶格子定数（結晶構造のパラメータ）を入力することによってその結晶を表示することができる。また、表示した単位格子は自由に向きを変えることができる。また、単位格子だけでなく、その周辺の原子配置も表示できるので周期的な繰り返しが理解しやすい。ただ、方向は自由に変えられるものの結晶構造を2次元で捉えていることに変わりはないので、このソフトで全てを理解できるわけではない。教育現場では使う機能を絞れば学習に刺激を与えることができる。

ここでは白雲母の例を紹介する。白雲母の構造を表示さ

せてみると、 SiO_4 四面体が層状に重なっていることが良くわかる（図1 3）。実際、白雲母の結晶は薄い層状になっており、手ではがせるほどである（図1 4）。このように、モデルによる理解と、実物による理解をリンクさせることによって学習効果はさらに高まっていく。そのため、VESTAで扱う物質はできるだけ実物を用意できるものの方がよい。

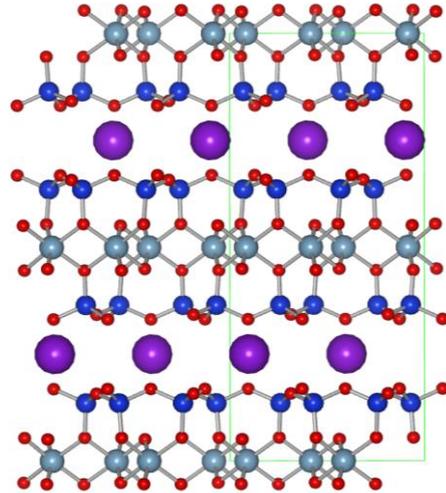


図1 3 : VESTA でa軸方向から表示した白雲母⁸⁾



図1 4 : 白雲母

8. 光を用いた結晶の学習

結晶と非結晶の違いは規則的な配列があるかどうかだが、原子配列などを肉眼で直接確かめるのは不可能である。人間の感覚で観測できる結晶の特徴的な現象のひとつに複屈折がある。複屈折とは、等軸晶系以外の結晶に光が入射した際に速さが異なる二つに分かれることである。窓などに使われるガラスは非晶質である。窓ガラスは一般的に光を透過させるため、その先の景色を鮮明に見ることができる。一方、結晶である方解石は複屈折を示すので、図1 5においては、ガラスを通してははっきり見える愛の文字が方解石を通すと二重に見えてしまう。この複屈折は結晶物質に特徴

的な現象ではあるが、複屈折の程度によっては肉眼で観察できないものもある。また、セロハン紙のように結晶ではない物質においても観測されるため、全ての物質の結晶性を判断できるわけではない⁹⁾。また、透明な鉱物でないとガラスとの比較はできない。しかしながら、直感的に結晶と非晶質の違いを理解する上では有効な方法である。



図15：ガラスを通して見た「愛」（左）と複屈折を示す方解石を通して見た「愛」（右）

9. まとめ

本研究では主に手を使った活動を示した。これは、学校現場における視覚優位の学習を補完する役割もある。近年では理科だけでなく、他の教科においてもスクリーンに資料を映して授業を進めることが多くなってきた。それによって文字を書く機会が減ってきている。その際に懸念されるのは手を動かさないということである。ペーパークラフト作成やピンポン玉を重ねるような作業を通して、手先の感覚を用いて学習することで学習者に対しては刺激を与えることができる。また、立体図形を紙に書いて考えるような試験のための学習ではなく、空間を把握するための思考を増やした。三次元の物質を三次元で理解することはとても重要である。

自然界の物質は固体に限らず多種多様である。本研究で扱った対称性で結晶を分類することはできるが、個々の結晶の形は周りの環境に依存している。鉱物を見ていると、むしろ共通点などは見つけることが難しいと感じることもある。教科書で学習する公式や理論だけでなく、実際に自然に触れ、自分自身の感覚で自然を捉える機会を子どもたちには与えるべきである。また、今回の固体の結晶構造の分野に限らず、理科教育のさまざまな場面で多面的な理解ができる教育実践が求められる。

参考文献

- 1) 文部科学省 (2019) 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説理科編理数編
- 2) 渡辺信, 青木孝子. “生涯学習を目指した数学学習の在り方 空間認識重視の数学教育の必要性.” 日本科学教育学会研究会研究報告 35.1 (2020): 25-28

- 3) 文部科学省 (2019) 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説理科編
- 4) 森本信男・砂川一郎・都城秋穂 (1975) 『鉱物学』岩波書店
- 5) 日本雪氷学会 「雪と氷の画像素材集」
(<https://www.seppyo.org/activity/cryosphere/material/snow-crystals/>) 2024年2月2日
- 6) 中井泉・泉富士夫 (2012) 『粉末X線解析の実際』朝倉書店
- 7) 野呂輝雄 (2013) 『鉱物結晶図鑑』東海大学出版会
- 8) Momma, Koichi, and Fujio Izumi. “VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data.” *Journal of applied crystallography* 44.6 (2011): 1272-1276.
- 9) 平山令明 (2012) 『結晶とはなにか』ブルーバックス