

# 鉱物の結晶構造を理解するためのインタラクティブ・ウェブアプリケーションの開発とその教材利用方法

澤口 隆\*

Interactive Web Application for Understanding of Mineral Structure  
and its Application to Geoscience Education.

Takashi SAWAGUCHI\*

## Abstract

An interactive web application demonstrating 3-D mineral structures has been developed in order to help a comprehension of the characteristics of mineral crystallographic structures for geoscience education. The users can infer crystal systems and chemical composition of the rock-forming minerals by rotating the 3-D models on the multi-touch screen. This paper describes details of the web application and its application to geoscience education.

**Keywords** : Geoscience Education, Mineral, Crystal Structure, Active Learning, Web Application

## 1. はじめに

私たちの住む地球表層を覆う“地殻”や、その下の“マントル”は岩石から構成されており、岩石はさまざまな鉱物の集合体である。鉱物はその結晶学的な特徴から、それぞれの鉱物特有の形状を持っていることが多い。鉱物は地球を形作る岩石の基本構成要素であり、鉱物を理解することは地球を理解する基礎となる。鉱物の結晶構造は、規則的な3次元の原子配列であるので、その形状や対称性を理解するには、空間的理解が必要となる。教科書などの学習教材ではこれらを2次元に投影したモデル図などで表現するしかなく、学習者の結晶構造の理解には困難が伴う。鉱物に限らず、化学分野での結晶構造の学習では、古

---

\*) 東洋大学自然科学研究室 112-8606 東京都文京区白山5-28-20  
Natural Science Laboratory, Toyo Univ., 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606

くから教育現場において結晶模型などが利用されてきた（佐藤・榊原, 1995；中釜, 2013、和田・大橋, 2015）。また、Webベースでの対話型3次元結晶構造教材も検討されている（山川, 2013）。

本論では、鉱物の化学組成と結晶構造の理解を深めるための学習用インタラクティブ・ウェブアプリケーションの開発とその教育活用方法について報告する。

## 2. 鉱物を理解するための教材

### 2.1 鉱物の定義

新版地学辞典（地学団体研究会, 1996）によると、鉱物は以下のように定義されている。

『自然の物質のうち、物理的・化学的にはほぼ均一で一定の性質を有する無機質の固体物質をいう。より厳密、狭義には「天然に産する無機質の均質物質で規則的原子配列をもち、ほぼ一定の化学組成をもつもの」として非晶質物質を除く。生体関連物質とその化石化したもの、地球の通常条件で不安定なもの、非晶質物質など、個々のケースについて紛らわしいものがあるが、これらについてはIMAの新鉱物名委員会による説明が与えられている（E. H. Nickel, 1995）。現在、4,000種近い鉱物種が知られている。（以下省略）』

すなわち、次の3つの要素を満たすものが鉱物として定義できる。

- 1) 化学組成が一定の化学式で表記できる
- 2) 結晶構造を持っている（構成する原子が規則正しく並んでいる）
- 3) 無機質（生物の関係しない自然過程によってできた物質）

学習者が鉱物の特徴を理解するためには、化学組成と結晶構造の関係を理解する必要がある。鉱物の種類は、新鉱物の発見と認定に伴って年々増加しており、4,000種とも5,000種とも言われるが、地殻やマントルを構成する主要造岩鉱物は、おおよそ40種類程度である。

### 2.2 結晶構造

鉱物は、原子が空間的に規則正しく並んでおり、これらの対称性から7つの結晶系（三斜晶系、単斜晶系、斜方晶系、正方晶系、立方晶系、六方晶系、三方（菱面体）晶系）に分類することができる（Fig. 1）。

### 2.3 教科書での記載

2014年に公開された国際地球科学シラバスでは、大項目「相互作用する地球システム」の「地圏：地球を構成する物質と特性」の中で、鉱物の定義および造岩鉱物として、「石英、長石、雲母、ざくろ石、方解石、岩塩、石膏、黄鉄鉱、ガレナ」を学ぶこととされている（International Geoscience Syllabus online: International\_Geoscience\_Syllabus\_Jan\_2014.doc; 澤口, 2015）。

日本の初等・中等教育課程において、鉱物が最初に取り上げられるのは、中学校理科第

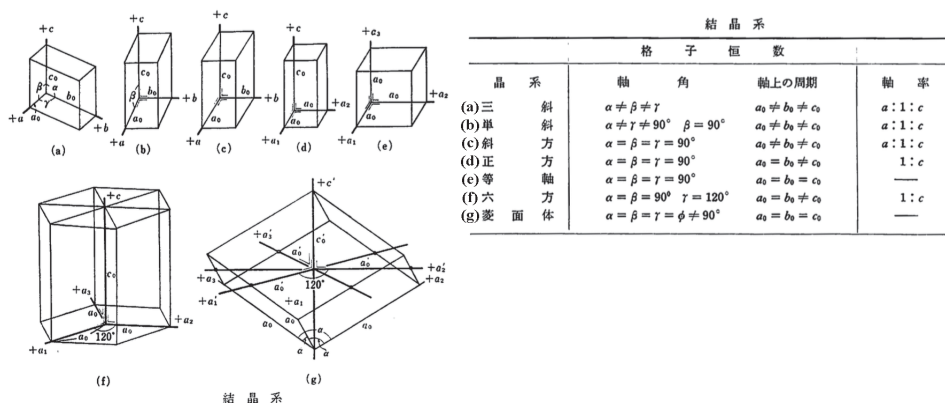


Fig. 1 : 鉱物の結晶系 (須藤, 1970)

2分野「(2) 大地の成り立ちと変化 — ア 火山と地震 — (ア) 火山活動と火成岩」である (文部科学省, 2008 ; 2009)。ここでは、「火山の形, 活動の様子及びその噴出物を調べ, それらを地下のマグマの性質と関連付けてとらえるとともに, 火山岩と深成岩の観察を行い, それらの組織の違いを成因と関連付けてとらえること。」とされており、附則として、『「火山」については, 粘性と関係付けながら代表的な火山を扱うこと。「マグマの性質」については, 粘性を扱うこと。「火山岩」及び「深成岩」については, 代表的な岩石を扱うこと。また, 代表的な造岩鉱物も扱うこと。』とされている。現在発行されている中学理科の教科書では, 火山灰や火成岩に含まれるおもな鉱物として、「石英、長石、黒雲母、角閃石、輝石、かんらん石、磁鉄鉱」などが解説されるほか、2010年に探査機「はやぶさ」が小惑星「イトカワ」から持ち帰った微粒子には、かんらん石や輝石、長石類などの鉱物が見つかったことなどがトピックとして取り上げられている (大日本図書, 2017 ; 啓林館, 2017)。

高等学校の地学基礎では、ケイ酸塩鉱物の基本構造であるSiO<sub>4</sub>四面体を取り扱われ、各種造岩鉱物を2次元で投影した図を用いて説明されている (Fig. 2)。

高等学校地学基礎の教科書は2017年現在、5社が出版しており、それぞれの教科書紙面上でどのように3次元構造を2次元に投影しているかをまとめる (Table 1)。

原子やイオンの中心を示す小さな球とそれをつなぐ棒を使った、棒-球型 (Stick and Ball Type) 結晶模型で結晶構造を表現しているか、または、このSiO<sub>4</sub>四面体の形状を正四面体と模して表現している教科書がある。また、3次元の形状を2次元に投影する投影法には、大きくわけて平行投影と透視投影がある。平行投影の図 (数研出版、啓林館) では、規則的な原子の繰り返しと並び方がよく理解できるが、視線方向の奥行きがイメージしにくい。一方、透視投影の図 (実教出版、第一学習社) では、3次元的な原子の配列は分かりやすいが、規則的な並び方や特に陽イオンの位置などが分かりにくい。

## 2.3 模型

教科書に記載された2次元投影図では、3次元的な結晶構造をイメージするのは難し

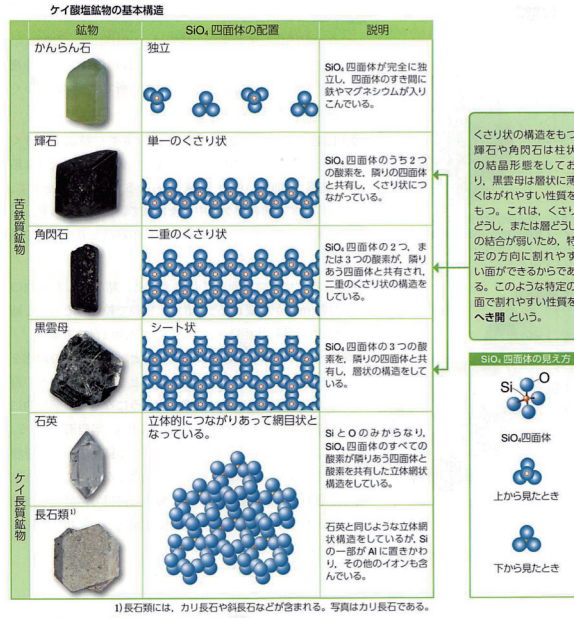
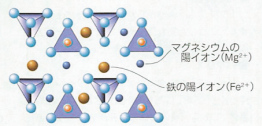
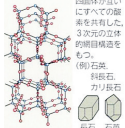
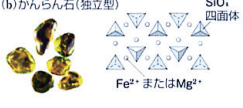
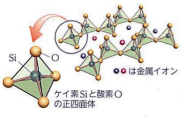
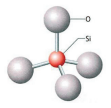


Fig. 2 : 高校地学基礎教科書（数研出版, 2017）ケイ酸塩鉱物の基本構造解説図

Table 1 : 地学基礎教科書における結晶構造の投影図

教科書会社	原子モデル	投影法	投影図形
数研出版	棒-球モデル	平行投影	 マグネシウムの陽イオン(Mg <sup>2+</sup> ) 鉄の陽イオン(Fe <sup>2+</sup> )
実教出版	棒-球モデル	透視投影	 四面体が互いにすべての酸素を共有した、3次元の立体的網目状構造をもつ。 (例) 石英、斜長石、カリ長石、灰石、石英
啓林館	正四面体モデル	平行投影	(b)かんらん石(独立型)  SiO <sub>4</sub> 四面体 Fe <sup>2+</sup> またはMg <sup>2+</sup>
第一学習社	棒-球モデル	透視投影	 ●●は変換イオン ケイ素Siと酸素Oの正四面体
東京書籍	棒-球モデル ※SiO <sub>4</sub> 四面体のみ記載	透視投影	

い。そこで、学習者に直感的に理解してもらうための教材が各種製作・販売されている。もっとも古典的で基本的な教材は結晶模型であろう。丸善が販売する「HGS結晶模型組立セット（最密パッキング型、ダイヤモンド・石墨型）」は、合成樹脂で作られた原子の“タマ”とそれを結ぶ棒状の“ボンド”から構成されており、これらを組み合わせることで、石英、かんらん石、輝石、角閃石、黒雲母といった、主要造岩鉱物の結晶模型を組み立てることができる（Fig. 3）。

Kuo et al. (2004) では、有機化学分野において、学生が3次元的な結晶構造を理解する際に用いる教材による理解度の差を議論し、結晶模型>コンピュータモデル>3次元描画>2次元投影、の順に成績がよいとされた。

## 2.4 PCを用いた例

模型を使った学習は、生徒・学生が直接自分の手を動かしながら組み立て、結晶構造の理解を深めることができるが、人数分だけの模型を揃えるのは、予算的にも物理的保管スペース的にも難しい教育機関も多い。また、複雑な結晶構造になると、模型の組み立て自体の難易度も高くなり、教材としての利用に適さなくなる。そこで、コンピュータの画面上で結晶モデルを3次元的に表示することで、結晶構造を仮想的に再現するソフトウェアなどが開発されている。実際に、鉱物学や結晶学の専門家らは、Crystal Maker (online: index.html) やVESTA (online: index.html) といった専門ソフトウェアを研究でも利用している。これらのソフトウェアを用いることで、画面上で結晶モデルを表示・回転・拡大/縮小することができ、学習者は3次元的な結晶構造の配列や対称性、原子の分布やつながりを理解することができる（CrystalMakerの例；Fig. 4）。CrystalMakerは有償のソフトウェアであるが、Crystal Viewerという無料のビューワーも公開されている。

米国のNAGT (National Association of Geoscience Teachers) が公開している地球科学教育教材ポータル「Teach the Earth」では、「Teaching Mineralogy with Crystal Structure Databases and Visualization Software (online: index.html)」というオンライン教材を掲載し、1) CrystalMakerのデモバージョン、2) CrystalMakerの商用バージョン、3) XtalDraw、の3種類の環境での学習指導案を公開している。

結晶構造を3次元的に再現するウェブアプリケーションとしては、jmol mineral structures (online: index.shtml) や、jPOWD (online: index.php) などがある（Fig. 5）。共にJavaAppletを利用しているため、対応するJavaがインストールされていないパソコンやタブレット端末、学生・生徒が利用しているスマートフォン等では動作しない。

## 3. インタラクティブ・ウェブアプリケーションの開発

本研究では、生徒や学生が自分の持っているスマートフォン・タブレット端末で、特別なソフトやプラグインをインストールする必要がなく、いつでもどこでも学習が可能な、インタラクティブ・ウェブアプリケーションを目指して開発を行った。

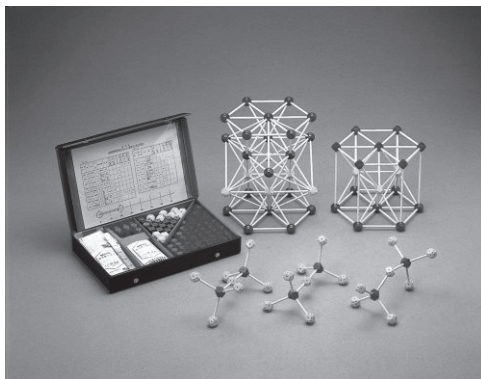


Fig. 3 : 丸善・HGS結晶模型組立セット (島津理化HPより)

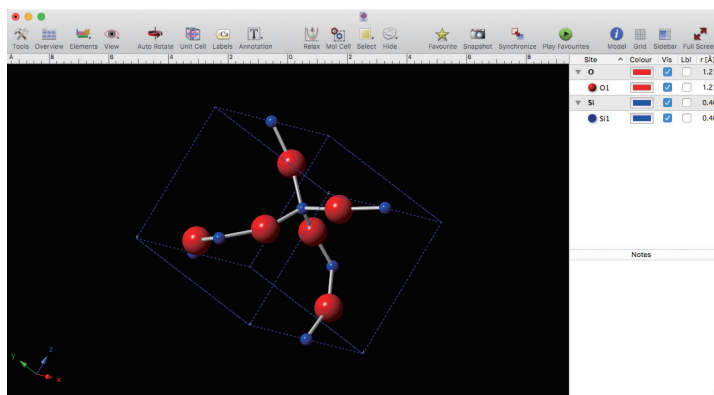


Fig. 4 : CrystalMakerを用いたCIF形式ファイルの3次元表示例

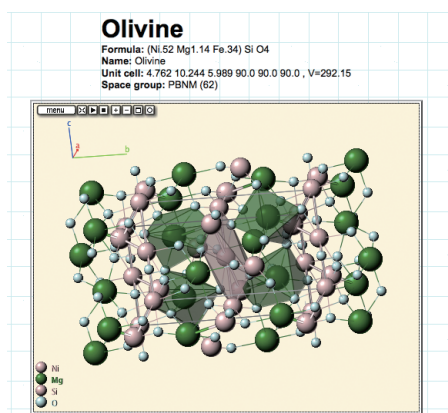


Fig. 5 : jPOWDの表示画面例 (かんらん石)



### 3.1 開発・動作環境

コンピュータを用いてモニタ上に仮想的な3Dグラフィックスを表示させるには、いくつかの方法がある(澤口, 2014)。今回の開発では、プラットフォームやブラウザに依存しないよう、HTML5 + CANVAS + JavaScript + WebGLを用いて開発を行った。また、クロスブラウザ対応が可能なWebGLのラッパーとしてthree.jsライブラリ(three.js online: index.html)を用いた。WebGLは、ウェブブラウザで3次元グラフィックスを表示させるための標準規格で、Windows、Macintosh上でのブラウザで動作する。モバイル端末に関しては、AndroidやiOS上のブラウザで動作するが、iOSに関しては、iOS5~7ではSafariブラウザでは動作せずにiAdなどの広告のみに利用が限定されていた。しかし、2014年に公開されたiOS8からは、SafariブラウザでWebGLが動作するように仕様が変更された。これによって、PC/モバイルの違いを考えずに、すべてのプラットフォームでWebGLによる3Dグラフィックスの表示が可能となった。

URLは、<http://www.igeoscience.com/> で公開されている。

### 3.2. 結晶構造データ

結晶構造データは、American Mineralogist Crystal Structure Database (online: amcsd.php; Downs and Hall-Wallace, 2003) が公開しているCIF形式を利用した。CIF形式とは、Crystallographic Information Frameworkの略で、Hallほか(1991)によって定義され、世界共通のフォーマットとして利用されている。CIF形式は、そのままではブラウザ上での表示はできないことから、COLLADA形式に変換をした。COLLADA形式は、3次元コンピュータグラフィックスアプリケーション間での交換用ファイルフォーマットのことで、XML形式で記録がされ、拡張子としては.daeが用いられる。COLLADA形式への書き出しには、CrystalMakerを利用した。

### 3.3 操作方法と画面イメージ

iPhoneのSafariブラウザでの表示例を、Fig. 6に示す。

トップ画面には、鉱物のリストが並んでいる。それぞれの鉱物名をクリック(タップ)すると、画面上に3次元モデルが表示される。画面右上には、鉱物名、化学式、元素の種類(色別)が記載されている。iPhoneやandroidなどのマルチタッチデバイス上では、スワイプ動作でモデルの回転、ピンチ動作で拡大・縮小ができる。

## 4. 教育実践例

### 4.1 多形(グラファイトとダイヤモンド)

高等学校の地学基礎では、鉱物の多形について扱いがあり、ほとんどの教科書において、炭素の多形であるダイヤモンドとグラファイト(石墨)の例が挙げられている(Fig. 7)。

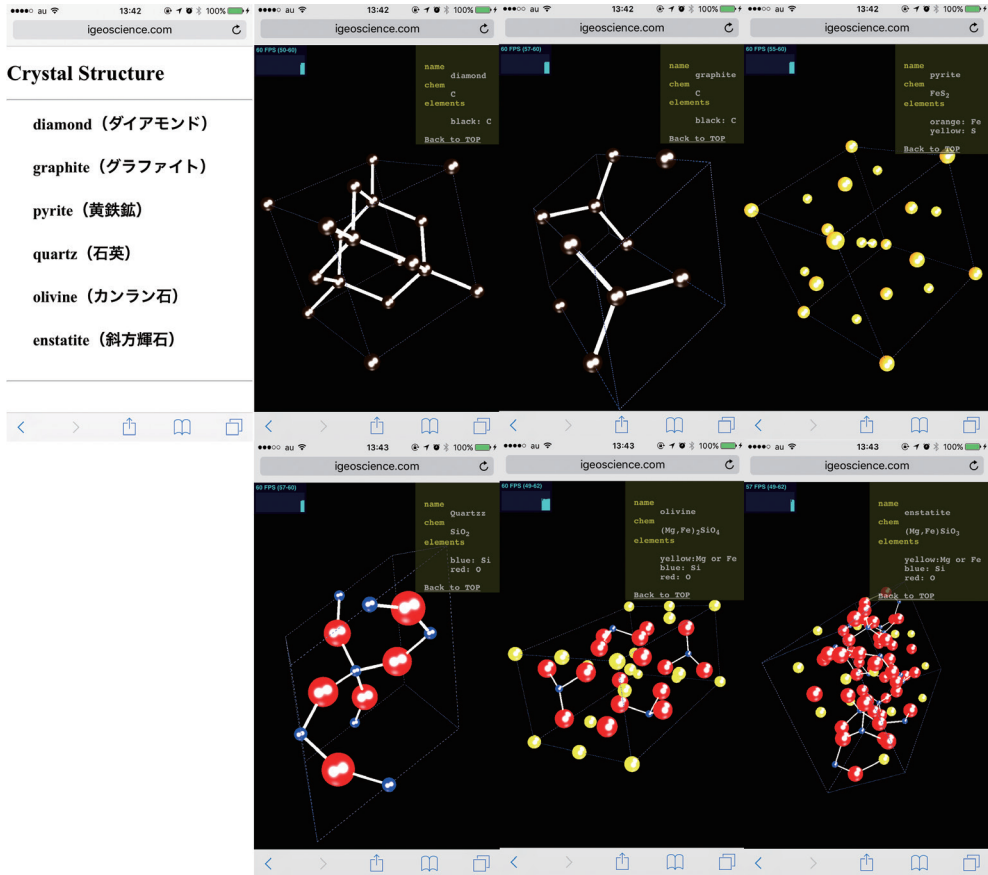


Fig. 6 : iPhone上のブラウザ (Safari) での表示画面例

高等学校では、結晶系までの学習は行わないため、それぞれの結晶についての結晶系の記述はないが、ダイヤモンドは“立方晶系”、グラファイトは“六方晶系”に属する。Fig. 8に、ダイヤモンド(立方晶系)とグラファイト(六方晶系)を表示させた例を示す。ここでは、炭素(C)原子が黒で示されている。学習者は、結晶モデルを自由に回転させることで、それぞれの炭素原子の配置を確認し、多形の理解を深めることができる。単位格子は青い細線で示されており、この形状を確認することで、結晶系を導き出すことができる。

#### 4.2 黄鉄鉱 (硫化鉄物)

黄鉄鉱(pyrite)は、硫化鉄物の1種で、化学組成は $\text{FeS}_2$ で表される。立方晶系に属し、きれいな正六面体で産出することが多い(Fig. 9)。

Fig. 10に、黄鉄鉱の3次元モデルをブラウザで表示した例を示す。オレンジが鉄(Fe)原子、黄色が硫黄(S)原子を示している。単位格子は青い線で示されており、その形状から、立方晶系に属することが理解できる。

単位格子の中にそれぞれ何個分の原子が含まれているかを考えることで、学習者が自分



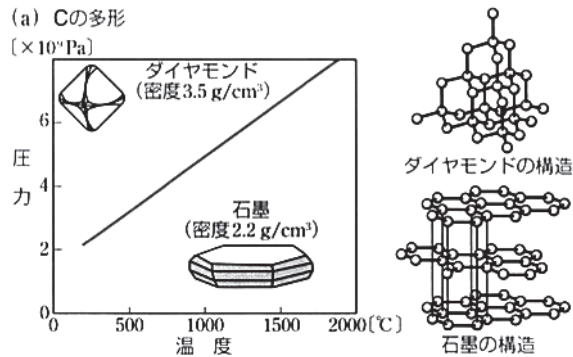


Fig. 7: 高校・地学基礎 (啓林館, 2016) に記載された多形の説明図

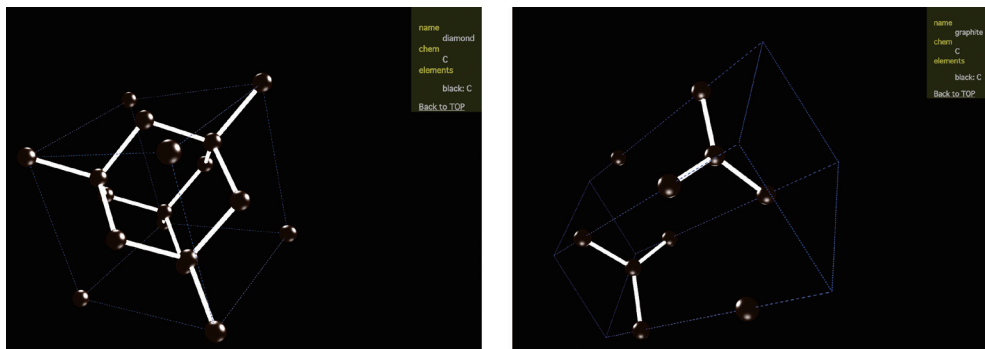


Fig. 8: ダイヤモンド (立方晶系) とグラファイト (六方晶系)

自身で化学組成を導き出すことができる。ここで、オレンジ色の鉄 (Fe) 原子は、単位格子の各頂点および、単位格子面の各中心に位置している。頂点の原子は周りの合計 8 つの単位格子と共有をしているので、1 点あたり (1/8) 個に相当する。つまり、頂点の数  $8 \times (1/8) = 1$  個の鉄原子が含まれる。また、単位格子面の中央に位置する原子は、2 つの単位格子と共有をしているので、1 点あたり (1/2) 個に相当する。立方格子には全部で 6 面が存在するので、 $6 \times (1/2) = 3$  個の鉄原子がふくまれる。すなわち、頂点 1 個 + 単位格子面中心 3 個 = 4 個の鉄原子がこの単位格子の中に含まれていることになる (Table. 2)。また、硫黄 (S) 原子は、この単位格子中に 8 個存在する。よって、黄鉄鉱の 3 次元結晶モデルから確認できる単位格子中の鉄 (Fe) 原子と硫黄 (S) 原子の比率は、 $4 : 8 = 1 : 2$  となり、化学組成が“FeS<sub>2</sub>”となることが理解できる。著者が東洋大学の一般教養科目として開講している「地球科学実験講義」では、Table 2 の項目を空欄にしたワークシートを配布し、学生自身が持っている iPhone 等のスマートフォンを利用した演習を行っている。

### 4.3 石英 (ケイ酸塩鉱物)

地殻中に最も多い元素は酸素、2 番目に多い元素はケイ素であり、これら 2 つの元素が

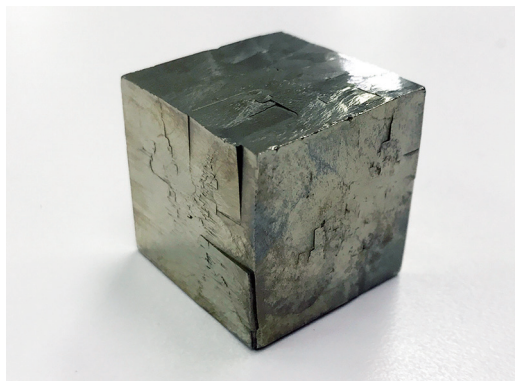


Fig. 9 : 黄鉄鉱

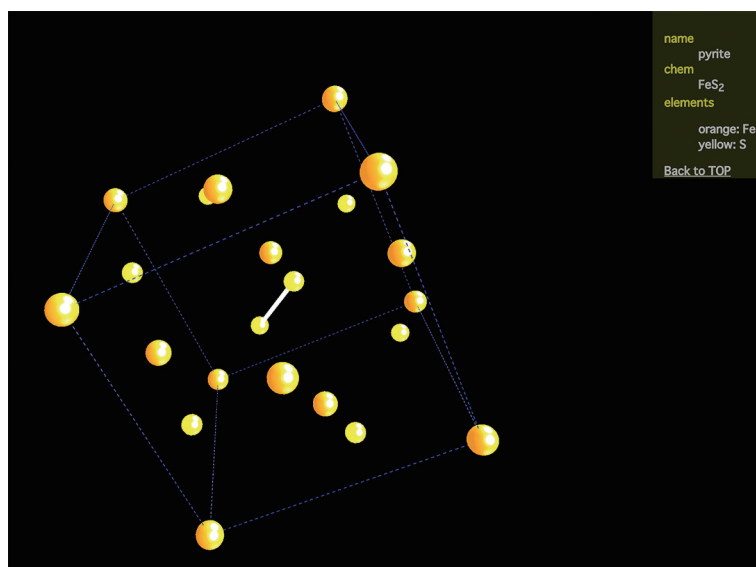


Fig. 10 : 黄鉄鉱 (立方晶系)

らなる $\text{SiO}_4$ 四面体を基本構造に持つ鉱物は、ケイ酸塩鉱物と呼ばれる。石英 ( $\text{SiO}_2$ ) は、ほぼ純粋な $\text{SiO}_2$ 組成を持ち、低温型 ( $\alpha$ ) と高温型 ( $\beta$ ) の結晶構造をとる。低温型 ( $\alpha$ ) 石英の自形結晶は、柱面の発達した六角柱状をしている (Fig. 11)。

石英は、 $\text{SiO}_4$ 四面体が互いにすべての酸素を共有した、3次元網目構造を持つため、投影図ではその立体構造を理解することは難しい。Fig. 12に、石英の3次元モデルをブラウザで表示した例を示す。青色がケイ素 (Si) 原子、赤色が酸素 (O) 原子を示している。単位格子は青い線で示されており、その形状から、六方晶系に属することが理解できる。

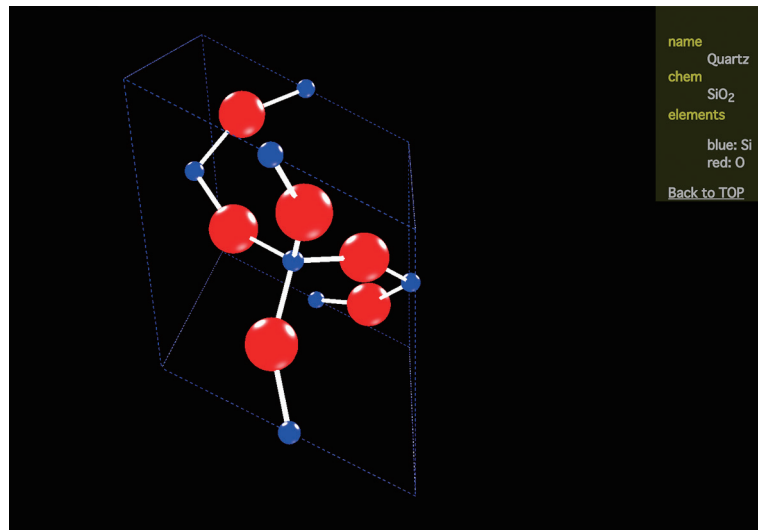
青色のケイ素 (Si) 原子は、単位格子中の配置位置としては、1) 単位格子の内側、2) 単位格子面の中心、3) 単位格子の辺上、の3種類が存在する。2) 単位格子面の中央の原子は、2つの単位格子と共有をしているので、1点あたり (1/2) 個に相当する。つまり、

**Table 2** : 黄鉄鉱 (FeS<sub>2</sub>) の単位格子中の原子数

鉄 (Fe)			硫黄 (S)		
単位格子中の割合と配置	個数	原子数	単位格子中の割合と配置	個数	原子数
1/2 単位格子面の中心に配置	6 個	$(1/2) \times 6 = 3$	1/1 単位格子の内側に配置	8 個	$(1/1) \times 8 = 8$
1/8 単位格子の頂点に配置	8 個	$(1/8) \times 8 = 1$			
合計		$3 + 1 = 4$			8



**Fig. 11** : 石英結晶



**Fig. 12** : 石英 (六方晶系)

単位格子面の中心に位置する原子の数を数えると 2 個存在するので、 $2 \times (1/2) = 1$  個のケイ素原子が含まれる。3) 単位格子の辺上の原子は、4 つの単位格子と共有をしているので、1 点あたり  $(1/4)$  個に相当する。ここで、単位格子の辺上の原子数  $4 \times (1/4) = 1$  個のケイ素原子が含まれる。すなわち、内側 1 個 + 単位格子面中心 1 個 + 単位格子辺上 1 個 = 3 個のケイ素原子がこの単位格子の中に含まれていることになる (Table. 3)。赤色

Table 3 : 石英 (SiO<sub>2</sub>) の単位格子中の原子数

ケイ素 (Si)			酸素 (O)		
単位格子中の割合と配置	個数	原子数	単位格子中の割合と配置	個数	原子数
1/1 単位格子面の内側に配置	1 個	$(1/1) \times 1 = 1$	1/1 単位格子の内側に配置	6 個	$(1/1) \times 6 = 6$
1/2 単位格子面の中心に配置	2 個	$(1/2) \times 2 = 1$			
1/4 単位格子の辺上に配置	4 個	$(1/4) \times 4 = 1$			
合計		1 + 1 + 1 = 3			6

の酸素 (O) 原子は、単位格子の内側に全て含まれており、全部で 6 個存在する。よって、石英の 3 次元結晶モデルから確認できる単位格子中のケイ素 (Si) 原子と酸素 (O) 原子の比率は、 $3 : 6 = 1 : 2$  となり、化学組成が“SiO<sub>2</sub>”となることが理解できる。

#### 4.4 かんらん石 (固溶体)

かんらん石は、(Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>の化学組成を持ち、上部マントルを構成する主要鉱物である。SiO<sub>4</sub>四面体が完全に独立して配置し、この四面体のすき間にマグネシウム (Mg) や鉄 (Fe) が並んでいる。Fig. 13に、かんらん石の 3 次元モデルをブラウザで表示した例を示す。青色がケイ素 (Si) 原子、赤色が酸素 (O) 原子、黄色マグネシウム (Mg) または鉄 (Fe) 原子を示している。単位格子は青い線で示されており、その形状から、斜方晶系に属することが理解できる。

単位格子中の原子数を数えるのは、黄鉄鉱や石英などと比較してやや難しいが、画面上で 3 次元モデルを回転させることで、独立した SiO<sub>4</sub>四面体の配置構造と Mg, Fe 原子の関係が読み取れる。黄色のマグネシウムまたは鉄原子は単位格子のそれぞれ内側、面上、辺上、および頂点に位置している。これらはそれぞれ、4 個、4 個、4 個、8 個ずつ存在するので (Table. 4)、この単位格子中に存在するマグネシウムまたは鉄原子は、 $(1/1) \times 4 + (1/2) \times 4 + (1/4) \times 4 + (1/8) \times 8 = 4 + 2 + 1 + 1 = 8$  個に相当する。青色のケイ素 (Si) 原子は単位格子の内側に 4 個、赤色の酸素 (O) 原子は単位格子の内側に 16 個、それぞれ存在する。よって、かんらん石の 3 次元結晶モデルから確認できる単位格子中のマグネシウムまたは鉄原子、ケイ素 (Si) 原子、および酸素 (O) 原子の比率は、 $8 : 4 : 16 = 2 : 1 : 4$  となり、化学組成が“(Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>”となることが理解できる。

## 5. まとめ

大学全入時代を迎えて、高等教育機関でのアクティブラーニングが注目されるように

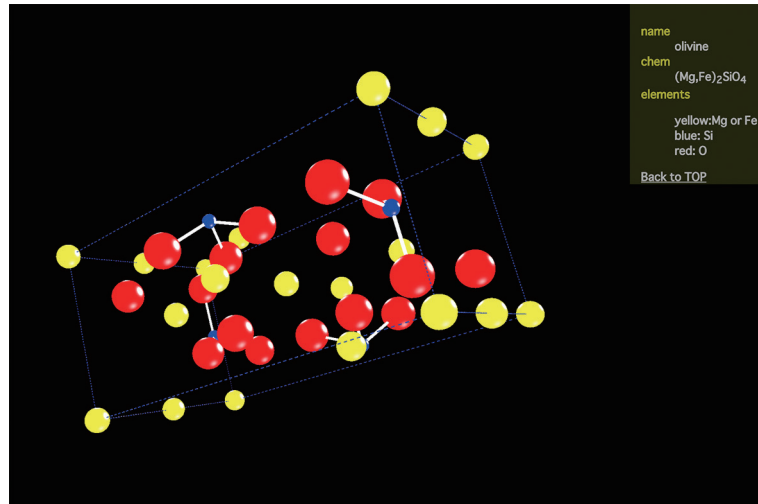


Fig. 13 : かんらん石 (斜方晶系)

Table 4 : かんらん石 (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)

マグネシウム (Mg)			ケイ素 (Si)			酸素 (O)		
単位格子中の割合と配置	個数	原子数	単位格子中の割合と配置	個数	原子数	単位格子中の割合と配置	個数	原子数
1/1 単位格子面の内側に配置	4個	$(1/1) \times 4 = 4$	1/1 単位格子の内側に配置	4個	$(1/1) \times 4 = 4$	1/1 単位格子の内側に配置	16個	$(1/1) \times 16 = 16$
1/2 単位格子面の中心に配置	4個	$(1/2) \times 4 = 2$						
1/4 単位格子の辺上に配置	4個	$(1/4) \times 4 = 1$						
1/8 単位格子の頂点に配置	8個	$(1/8) \times 8 = 1$						
合計		$4 + 2 + 1 + 1 = 8$	合計		4			16

なって久しい (溝上, 2011)。また、近年のスマートフォンやタブレット端末の爆発的な普及によって、教育現場におけるBYOD (Bring Your Own Devices) という概念も広く浸透してきた。学習者が授業・講義を聴講し、ただ一方的に情報を受け取ることで“受身的”に知識を得るのではなく、学習者自らがシミュレーションや3次元モデルなど操作

し、能動的かつ対話的に試行錯誤することで、自ら知識を構築するアクティブラーニングは、今後も教育現場で広まっていくであろう。ここで開発したアプリケーションが、地球科学教育の現場で広く活用されることを望む。

## 引用文献

- Downs, T. R. and Hall-Wallace, M. (2003) American Mineralogist Crystal Structure Database. *Am. Mineral.*, 88: 247-250.
- Hall, S. R., Allen, F. H. and Brown, I. D. (1991) The Crystallographic Information File (CIF) A New Standard Archive File for Crystallography. *Acta Cryst.*, A47: 655-685.
- Kuo, M. et al. (2004) The Relationship of Molecular Representations, Complexity, and Orientation to the Difficulty of Stereochemistry Problems. *Chemical Educator*, 9: 321-327.
- 啓林館 (2016) 『地学基礎 改訂版』. 啓林館: 1-239.
- 啓林館 (2017) 『中学理科・未来へひろがるサイエンス1』. 啓林館: 1-260.
- 佐藤直子・榊原郁子 (1995) 結晶模型組み立てセットSolid-State Model Kitの紹介. *化学と教育*, 43: 537-539.
- 澤口隆 (2014) 震源可視化アプリケーションHypoViewerの開発. *東洋大学紀要自然科学篇*, 58: 13-32.
- 澤口隆 (2015) International Geoscience Syllabusと文部科学省学習指導要領の比較. *東洋大学紀要自然科学篇*, 59: 15-26.
- 実教出版 (2017) 『地学基礎 新訂版』. 実教出版: 1-207.
- 数研出版 (2017) 『新編 地学基礎』. 数研出版: 1-208.
- 須藤俊男 (1970) 『鉱物学入門』. 朝倉書店: 1-255.
- 第一学習社 (2017) 『改訂 地学基礎』. 第一学習社: 1-192.
- 大日本図書 (2017) 『中学・理科の世界1』. 大日本図書: 1-285.
- 地学団体研究会 (1996) 『新版地学辞典』. 平凡社: 1-1443.
- 東京書籍 (2017) 『改訂 地学基礎』. 東京書籍: 1-199.
- 中釜達朗 (2013) 結晶構造学習のための携帯用体験型教材の試作と実践. *工業教育*, 61: 62-67.
- 溝上慎一 (2011) 『アクティブラーニングでなぜ学生が成長するのか—経済系・工学系の全国大学調査からみえてきたこと』河合塾 (編). 東信堂: 1-320.
- 文部科学省 (2008) 中学校学習指導要領. 東山書房: 1-108.
- 文部科学省 (2009) 高等学校学習指導要領. 東山書房: 1-296.
- 山川純次 (2013) 理科教育におけるWebベースの対話型3次元結晶構造教材. *岡山大学教師教育開発センター紀要*, 3: 27-31.
- 和田敬行・大橋淳史 (2015) 学習の理解を容易にする結晶構造モデル教材の開発. *愛媛大学教育学部紀要*, 62: 147-154.



**オンライン文献（全て、2017年10月25日アクセス）**

American Mineralogist Crystal Structure Database, <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>

Crystal Maker, <http://www.crystalmaker.com/index.html>

International Geoscience Syllabus, [http://iugscoge.com/doc\\_files/International\\_Geoscience\\_Syllabus\\_Jan\\_2014.doc](http://iugscoge.com/doc_files/International_Geoscience_Syllabus_Jan_2014.doc)

jmol mineral structures, <http://webmineral.com/jmol/index.shtm>

jPOWD, <http://webmineral.com/jpowd/index.php>

Teaching Mineralogy with Crystal Structure Databases and Visualization Software, [https://serc.carleton.edu/research\\_education/crystallography/index.html](https://serc.carleton.edu/research_education/crystallography/index.html)

three.js, <http://threejs.org/index.html>

VESTA, <http://jp-minerals.org/vesta/jp/index.html>