3. 鉱物の世界(I)

・その外観(形や色)の特徴
 結晶系と化学的性質

地球上には約 6,000 種類の鉱物が知られています。そのほとんどは地殻と呼ばれる、表面あるいは表面近くで産出します。その鉱物(Mineral)についての定義は「自然に産出した無機物でほぼ一定の化学組成と結晶構造をもつもの」です。そして、鉱物を科学するのが鉱物学(Mineralogy)です。また、岩石(Rock)は、鉱物が集まって出来ているものです。

化学組成は化学式で表され、結晶構造は下記に示すように七つの結晶系(Crystal System)に大別されます。結晶構造は、さらに原子が規則的に配列する組み合わせである 230種に細分化されます。この結晶(crystal)は、図3-1に示すように幾何学的な形態を示します。

原子が規則的に並ぶ結晶とは、無限大の周期性を持っている、ということになりますが、 最近では周期性が無限でなくても、ある程度の周期性が見られるものも結晶に含めるように なりました.このような結晶は、これまでの結晶と区別するために準結晶(quasicrystal) と呼ばれています.この準結晶の結晶面は、図3-1右端のように五角形になります.

なお、七つの結晶系とは、次のとおりです.

- 1) 立方(等軸) 晶系(Isometric or Cubic Crystal System)
- 2) 正方晶系(Tetragonal Crystal System)
- 3) 六方晶系(Hexaganal Crystal System)
- 4) 三方晶系(Trigonal Crystal System)
- 5) 直方(斜方) 晶系(Orthorhombic Crystal System)
- 6) 単斜晶系(Monoclinic Crystal System)
- 7) 三斜晶系(Triclinic Crystal System)

鉱物はこれらの結晶系のいずれかに属します. ただし, 例外としてオパール(蛋白石)の ような非晶質も鉱物に含まれます.

立方(等軸) 晶系はダイヤモンド,自然金や蛍石など,正方晶系はジルコンや燐灰石など, 六方晶系はベリル(緑色のエメラルド)など,三方晶系は石英やコランダムなど,斜方晶系 はトパーズやオリビンなど,単斜晶系はひすい(ジェイダイト)やトルコ石など,三斜晶系 は,ばら輝石(ロードナイト)や微斜長石(青緑色のアマゾナイト)などです.







等軸晶系の蛍石

六方晶系のベリル(中央部)

三斜晶系の微斜長石



準結晶のホルミウム・マグ ネシウム・亜鉛の合金) (ウィキペ ディアより 2019.8.26.)

図3-1 結晶系の代表的な鉱物と準結晶の形態

七つの結晶系



図3-2 結晶軸 (a, b, c) と軸角 (α, β, γ)

a, b, c 軸とそれらのなす角度 (α , β , γ) で考えます. それぞれを結晶軸, 軸角と呼び ます (図3-2).

- A) 立方(等軸) 晶系 $\alpha = \beta = \gamma = 90$ 度, $a_1 = b_1 = c_1$ 立方体の結晶が,この晶系になります.
- B) 正方晶系 $\alpha = \beta = \gamma = 90$ 度, $a_1 = b_1 \neq c_1$
- C) 直方(斜方) 晶系 $\alpha = \beta = \gamma = 90$ 度, $a_1 \neq b_1 \neq c_1$ 直方体の結晶が, この晶系になります.
- D)単斜晶系 $\alpha = \beta = 90$ 度, $\gamma \neq 90$ 度, $a_1 \neq b_1 \neq c_1$
- E)三斜晶系

 $\alpha \neq 90$ 度, $\beta \neq 90$ 度, $\gamma \neq 90$ 度, $a_1 \neq b_1 \neq c_1$

F) 三方晶系(六方晶系)



a₁ ∧ a₂ = a₂ ∧ a₃ = a₁ ∧ a₃ = 120 度, (a₁, a₂, a₃) ⊥ c, a₁ = a₂ = a₃
 一平面の3軸が120度ずつあり、それに垂直軸が一つ.
 正三角形が三方晶系、正六角形が六方晶系にそれぞれ分類されます。



Orthorhombic













図3-3 14のプラヴェ(Bravais)の空間格子と呼ばれる結晶構造(Strunz,2001)

結晶面の表わし方

鉱物は幾何学的な形態を持ち,結晶面と呼ばれる平面で囲まれています(図3-4).た だし,なかには自然水銀のように常温では液体なので球状のもの(図3-5)や,結晶が集 まり結晶面が見られないものもあります.また,電子顕微鏡を使ってその平面を観察すると 真っ平ではなく,段々の成長模様が見られます(図3-6).



図2-4 水晶の結晶面



図2-5 北海道イトム力産自然水銀(中央の銀箔色)



図2-6 石榴石の結晶表面(左)をさらに中央部の三角形を拡大すると並行な成長模様が見られる(右)

結晶面を数字で表す方法の一つにミラー指数というものがあります. これは, 次頁の図2 -7のように b-c 面に平行は(100), a-c 面に平行は(010), a-b 面に平行は(0 01)と表します.

この指数の導き方は, oa 方向, ob 方向, oc 方向の長さの逆数で表すというものです. 即ち, oa 方向にA, ob 方向にB, oc 方向Cという長さがあれば(1/A, 1/B, 1/C)とな り, これらA, B, Cという長さが結晶構造の最小単位であれば, 次のように表すことがで きます.

 $((1/A) \times A, (1/B) \times B, (1/C) \times C) = (111)$

一方, b-c 面に平行な場合は $((1/A)(1/\infty)(1/\infty)) = (100)$, a-c 面に平行な場合 は $((1/\infty)(1/A)(1/\infty)) = (010)$, a-b 面に平行な場合は $((1/\infty)(1/\infty)(1/A))$ = (001) と表示されます. ただし, A, B, Cという長さは結晶の最小単位とします.



図3-7 左下の形態の平面をミラー指数で表す

鉱物の形態とその成長メカニズム

鉱物は、時には数メートルにも及ぶ巨大な結晶になります(図3-8)。その形態は手の 上に乗る大きさのものと違いはありません、これはアユイの法則(Hauy's law)でも示さ れているとおり、結晶の形態は相似形ということになります。例えば、鉄礬石榴石の形態は 粒状として知られています(Dana,1915)。ところが小さいながらも六角柱状(幅 O.2mm×長さ 5mm 程度)の鉄礬石榴石が、茨城県山ノ尾のペグマタイト中から産出され ています(Hayashi et al,2019)。即ち、大きな柱状結晶が見付かる可能性があります。

ここでは、鉱物の成長メカニズムについて、前述の柱状の鉄礬石榴石の形態を例に挙げな がら考えてみることにします.

山ノ尾産の六角柱状鉄礬石榴石は単結晶であり、マンガン(Mn)が鉄(Fe)を置換して 含まれていて、満礬石榴石成分として44%です。この石榴石は、FeとMn、アルミニウム (Al)及び珪素(Si)と酸素が結合したもので、化学組成式は、(Fe,Mn)₂Al₃Si₃O₁₂と表さ れます。また、六角柱状は[111]方向に成長したものであり、そのメカニズムは次のように 考えられます。

- 1) 花崗岩質マグマから必要な元素が供給されます. その供給源からは液体が流れるような 動きがあったと思われます.
- 2)元素の中でも最初に AI が集まり結晶の前駆体(結晶となる直前のもの)を形づくります。その平面的な形態として三角形,菱形,六角形あるいは平行四辺形となるでしょう(図 2-9)。これは球状のものが集合する時に想定される形態です。
- 3)立体的には最密充填構造になるでしょう(図3-10).ここで元素の流れが一方向の 場合,平面的に伸びて成長するより上に積み重なる方が元素同士の距離が狭くエネルギ ーが少なく済むので、その形態は六角柱状になることでしょう。
- 4) Al の周囲に Si, Fe, Mn, そして酸素(O) が集まって化学結合すれば, 鉄礬石榴石-満礬石榴石のような結晶構造となります(図3-11).

これらから、元素が単一の場合は三角形あるいは六角形になることが予想されます。また、 複数の元素でも一つの大きな原子団の集合([SiO₄]⁴⁻)と見ることができれば三角形の形態 になることでしょう(図3-12・13)。そこに一方向の駆動力があれば六角柱状になりま す。その例が山ノ尾産の柱状石榴石というわけです。

実際に単一の元素で出来ているダイヤモンドや自然金は六角柱状結晶ではなく,正八面体や六面体になるのは何故でしょう.これは一方向の駆動力がなかったためと考えられます. 八面体や六面体を斜め上から観察すると三角形が見えてくるでしょう.例えば、ダイヤモンドは、炭素が正四面体の中心と頂点に配置しています(図3-14),これが集合すると八面体や六面体を形づくるようになります(図3-15).八面体と六面体の形態の違いは. 成長の時に関わる触媒が異なるとされています(Sunagawa 1992).

もう一度,鉱物の成長メカニズムについて考えると、元素が集まるような駆動力の有無が 形態に影響するとみなすことができます.鉱物の成長する際に、元素が中心から外側に向か って均一に集合し、一方向に元素が並ぶような駆動力のない場合は、静的な環境で成長した ことを物語っています. 即ち, 柱状や針状などの形態は, 駆動力があることを示し, 粒状や八面体・六面体のよう な形態は, 駆動力が影響するような環境ではなかったと言うことができます.

アルミニウム(AI)と酸素(O)及び珪素(Si)を含む鉱物種を表3-1に示します.こ れらの鉱物の正規の方向(このような結晶図を表わす時によく使われる方向)や結晶軸 c 軸, b 軸あるいは[111]方向から見た結晶構造を VESTA(Momma and Izumi,2011)を用い て図3-16~31 に描きました.これらからアルミニウム(AI)が直線的に配列している方 向があることが分かります.



もし駆動力があれば、最初に AI の酸化物が生成し、その後に他の元素の Si や Na, Mg, K, Ca Fe, Mn などが結合すると、それらの鉱物は柱状になると考えられます.

図3-8 巨大なブラジル産石英 (山梨宝石博物館所蔵)







図3-9 三角形(左上),菱形(中上),六角形(右上),平行四辺形(右下)



図3-10 最密充填構造(最下部:黒,中間部:青,最上部:緑)



 図3-11 鉄礬石榴石-満礬石榴石の結晶構造(結晶軸:a,b,c 褐色:鉄あるいはマンガン,水色:アルミニウム, 青色:珪素,赤色:酸素) これは VESTA (Momma and Izumi, 2011)を用いて 描いた.



図 3-12 三角形で構成された結晶の例(その1) ヘルビンの結晶図 Helvine (Mn₈(Be₆(Si₆O₂₄)S₂,立方)(Dana,1915).



図 3-13 三角形で構成された結晶の例(その2) 福島県高倉鉱山産黄色珪蒼鉛石(Eulytite (<u>Bi₄(SiO₄)₃</u>,立方)



図3-14 ダイヤモンドの結晶構造:炭素原子(黄色:C)
 が正四面体の頂点と中心にある。
 青色の破線は単位格子(正六面体)を示す。
 VESTA (Momma and Izumi, 2011)を用いて表示.



図3-15 図 2-14 に六面体と八面体の形状を描いた図. 青色の線は六面体,黒色の線は八面体を示す.

表3-1. アルミニウムの化合物の鉱物

構成元素							化学組成	鉱物名		
Al					0		Al ₂ O ₃	三方	柱状	Corundum
Al				Si	0		Al2SiO5	直方	柱状	Andalusite
Al				Si	0		$Al_{4+2x}Si_{2-2x}O_{10-x}$ (x ≈ 0.4)	直方	柱状	Mullite
Al	Be			Si	0		Be ₃ (Al ₂ Si ₆ O ₁₈)	六方	柱状	Beryl
Al	Na			Si	0		$Na(A S _3O_8)$	三斜	柱状	Albite
Al	Na			Si	0		$Na(A1Si_2O_6)$	単斜	柱状	Jadeite
Al	Mg			Si	0		Mg2Al4Si5O18	直方	柱状	Cordierite
Al	Mg			Si	0		$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	立方	粒状	Pyrope
Al	К			Si	0		K(AlSi3O8)	単斜	柱状	Orthoclase
Al	К			Si	0		$K(A Si_2O_6)$	正方	粒状	Leucite
Al	Ca			Si	0		$Ca(Al_2Si_2O_8)$	三斜	柱状	Anorthite
Al	Ca			Si	0		$Ca_2AI(SiAI)O_7$	正方	柱状	Gehlenite
Al	Fe			Si	0		$Fe^{2+}_{3}Al_{2}(SiO_{4})_{3}$	立方	粒状	Almandine
Al	Fe			Si	0		Fe ²⁺ 2Al4Si5O18	直方	柱状	Sekaninaite
Al	Mn			Si	0		$Mn^{2} Al_2(SiO_4)_3$	立方	粒状	Spessartine
Al	Na	Са	К	Si	0	н	(Na2,Ca,K2)4(A18Si40O96) · 28H2O	直方	毛状	Mordenite



図3-16 コランダム(Corundum Al₂O₃)の正規の方向(上)とc軸方向(中)から見 た結晶構造. c軸方向から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (下).(Al:水色,O:赤色)



 図3-17 紅柱石 (Andalusite Al₂SiO₅)の正規の方向(上)とc軸方向(中)及びb軸 方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がa軸・c軸方向に直線的 に配列している.c軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下).(Al:水色,Si:青色,O:赤色)



 図3-18 ムル石(Mullite Al_{4+2x}Si_{2-2x}O_{10-x} (x ≈ 0.4))の正規の方向(上)とc軸方向 (中)及びb軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がa軸・c 軸方向に直線的に配列している.c 軸から少しずらして見ると原子の重なり方が よく分かる(右下).(Al:水色,Si:青色,O:赤色)



 図3-19 緑柱石(Beryl Be₃Al₂Si₆O₁₈)の正規の方向(上)とc軸方向(中)及びb軸 方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がc軸方向に直線的に配 列している.c軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下). (Be:緑色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



図3-20
曹長石(Albite (Na,K)AlSi₃O₈)の正規の方向(左上)とc軸方向(右上)及びb軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がb軸方向に直線的に配列している.b軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下).(Na:黄色,K:紫色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



 図3-21 ひすい輝石(Jadeite NaAlSi₂O₆)の正規の方向(上)とc軸方向(中)及び b軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)が b 軸方向に直線 的に配列している.b 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分か る(右下).(Na: 黄色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)



図3-22 董青石(Cordierite (Mg,Fe)₂Al₄Si₅O₁₈)の正規の方向(左上)とa軸方向(右上)及びc軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がa軸方向に直線的に配列している。a軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下)。(Mg:橙色,Fe:茶色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



図3-23 苦礬石榴石(Pyrope Mg₃Al₂(SiO₄)₃)の正規の方向(左上)とc軸方向(右上)及び[111]方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がa軸・b軸・c軸及び[111]方向に直線的に配列している.[111]方向から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下).(Mg: 橙色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)



図3-24 正長石(Orthoclase KAlSi₃O₈)の正規の方向(左上)とc軸方向(右上)及びb軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がb軸方向に直線的に配列している.b軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下).(K:紫色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



図3-25 リューサイト(Leucite K(AlSi₂O₆)の正規の方向(左上)とb軸方向(右上) 及びc軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がa軸・b軸・ c軸方向に直線的に配列している.c軸から少しずらして見ると原子の重なり 方がよく分かる(右下).(K:紫色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



 図3-26 灰長石(Anorthite (Ca,Na)Al(Al,Si)Si₂O₈)の正規の方向(左上)と c 軸方 向(右上)及び b 軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)が b 軸方向に直線的に配列している.b 軸から少しずらして見ると原子の重なり方 がよく分かる(下).(Ca:灰色,Na:黄色,Al:水色,Si:青色,O:赤 色)



図3-27 ゲーレン石(Gehlenite Ca₂(Al,Mg,Fe)₂SiO₇)の正規の方向(上)とb軸方向 (中)及びc軸方向(下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)がa軸・c軸 方向に直線的に配列している.c軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよ く分かる(下).(Ca:灰色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



図3-28 鉄礬石榴石 (Almandine Fe²⁺₃Al₂(SiO₄)₃)の正規の方向(左上)と c 軸方向 (右上)及び[111]方向(下)から見た結晶構造. アルミニウム(Al)が a 軸・b軸・c 軸及び[111]方向に直線的に配列している. [111]方向から少し ずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下). (Fe:褐色, Al:水色, Si:青色, O:赤色)



 図3-29 鉄董青石(Sekaninaite Fe²⁺₂Al₄Si₅O₁₈)の正規の方向(左上)と a 軸方向 (右上)及び c 軸方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)が a 軸 方向に直線的に配列している. a 軸から少しずらして見ると原子の重なり方が よく分かる(右下).(Fe:褐色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)



 図3-30 満礬石榴石(Spessartine Mn²⁺₃Al₂(SiO₄)₃)の正規の方向(左上)とc軸方向 (右下)及び[111]方向(左下)から見た結晶構造.アルミニウム(Al)が a 軸・b軸・c軸及び[111]方向に直線的に配列している.[111]方向から少し ずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下).(Mn:紫色,Al:水色, Si:青色,O:赤色)



 図3-31 モルデン沸石(Mordenite (Na₂,Ca,K₂)₄(Al₈Si₄₀O₉₆)·28H₂O)の正規の方向 (左上)とc軸方向(右上)及び[111]方向(左下)から見た結晶構造.アル ミニウム(Al)がc軸方向に直線的に配列している.c軸から少しずらして見 ると原子の重なり方がよく分かる(右下).(Na:黄色,Ca:薄青色,K: 紫色,Al:水色,Si:青色,O:赤色)

参考文献

- 1) Wyckoff R W G. (1963) Crystal Structures 1, 7-83, Second edition. Interscience Publishers, New York.
- 2) Gibbs G V, Smith J V. (1965) American Mineralogist 50, 2023-2039.
- 3) Prewitt C T, Burnham C W. (1966) American Mineralogist 51, 956-975.
- 4) Colville A A, Ribbe P H. (1968) American Mineralogist 53, 25-37.
- 5) Louisnathan S J. (1971) The Canadian Mineralogist 10, 822-837.
- 6) Novak G A, Gibbs G V. (1971) American Mineralogist 56, 791-825.
- 7) Mazzi F, Galli E, Gottardi G. (1976) American Mineralogist 61, 108-115.
- 8) Hochella M F, Brown G E, Ross F K, Gibbs G V. (1979) American Mineralogist 64, 337-351.
- 9) Winter J K, Ghose S. (1979) American Mineralogist 64, 573-586.
- 10) Wenk H R, Joswig W, Tagai T, Korekawa M, Smith B K. (1980) American Mineralogist 65, 81-95.
- 11) Harlow G E. (1982) American Mineralogist 67, 975-996.
- 12) Lewis J, Schwarzenbach D, Flack H D. (1982) Acta Crystallographica A38, 733-739.
- 13) Angel R J, Prewitt C T. (1986) American Mineralogist 71, 1476-1482.
- 14) Hazen R M, Au A Y, Finger L W. (1986) High-pressure crystal chemistry of beryl and euclase, American Mineralogist 71, 977-984
- 15) Dana (1901) System of Mineralogy, sixth edition, pp434 and 438.
- 16) 砂川一郎(1992) 天然・合成ダイヤモンド鑑別の基礎, 宝石学会誌, vol.17, No.1-4, pp3-9.
- 17) Momma, K. and Izumi, F. (2011) VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. Journal of Applied Crystallography, 44: 1272-1276.
- 18) Hayashi, M., Hayashi, F. Yamazaki, A., Yasui, M. and Matsubara, S. (2019) Hexagonal prismatic garnet from Yamanoo pegmatite, Ibaraki, Japan., Bull. Natl. Mus. Nat. Sci., Ser. C, 45, pp. 1–6.

鉱物の系統分類

鉱物は次のように大別されます。 1.元素鉱物(Native elements) 例:ダイヤモンド 2.硫化鉱物(Sulfides) 例:黄鉄鉱(パイライト) 3.酸化鉱物(Oxides) 例:金緑石(クリソベリル)、鋼玉(コランダム) 4.炭酸塩鉱物(Carbonates) 例:方解石(カルサイト),霰石(アラゴナイト) 5.硼酸塩鉱物(Borates) 例:小藤石 6.硫酸塩鉱物(Sulfates) 例:重晶石,石膏 7.タングステン酸塩鉱物(Tungstate) 例:灰重石 8.燐酸塩・砒酸塩・バナジン酸塩鉱物(Phosphates・Arsenates・Vanadates) 例:燐灰石(アパタイト) 9.珪酸塩(Silicates) 珪酸の結合の様子(図2-31)から下記のように分類されます. 1) ネソ珪酸塩(Nesosilicates (Orthosilicates)) 例:石榴石(ガーネット)(図3-31,①) 2) ソロ珪酸塩 (Sorosilicates) 例: 灰簾石 (ゾイサイト), 緑簾石 (エピドート) (図3-31, 2) 3) シクロ珪酸塩(Cyclosilicates) 例:電気石(トルマリン),緑柱石(ベリル)(図3-31,③) 4) イノ珪酸塩 (Inosilicates) 珪酸が鎖状に結合したもの、単鎖と複鎖という2つに細分化されます。 例:ひすい輝石(ジェイダイト)(図3-31,④),透緑閃石(図2-31,⑤) 5) フィロ珪酸塩 (Phyllosilicates) 例:白運母(マスコバイト)(図3-31,6) 6) テクト珪酸塩(Tectosilicates) 例:微斜長石(マイクロクライン),石英(クォーツ)(図3-31,⑦) 鉱物の定義を無機物としましたが、有機物の定義として炭素(C)を含む化合物とすれば、 千葉石(chibaite SiO₂ · n(CH₄,C₂H₆,C₃H₈,C₄H₁₀,立方晶系)にはメタン(CH₄)やエタ

ン(C₂H₆)などの有機物を含有します。かつて琥珀のような有機物(炭素を含む化合物) も鉱物名 succinite (~C78%, H10%, O11%, S ほか微量。非晶質)という名前が与 えられていました。



図3-31 珪酸塩を7つ(①~⑦)に分類 (Battey, 1981)

原子番号を利用した鉱物の分類

周期律表の軽い元素から重い元素へと配列した分類例を紹介します. これまでは元素鉱物の次に硫化鉱物が配列される(Graines(1997)¹⁾やStrunz(1978)²⁾及び Nickel(2001)³)があります. ここでは硫化鉱物を特徴づける硫黄の原子番号(16)より 酸化鉱物の酸素の原子番号(8)の方が軽いので,酸化鉱物を先に配列させます. さらに, 鉱物を構成している主要元素の原子番号と量比とを関連づけて数値化し,さらに多形や標本 番号なども加えた数字を使い,鉱物の分類と共に標本整理にも使えるようにしました. これ により,鉱物の化学組成が,国際鉱物学連合(the International Mineralogical Association (IMA))新鉱物・鉱物名委員会(the Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMNC))により公開された鉱物種のリスト (http://rruff.info/ima/)が分かれば、鉱物整理が可能となります.

最近の分類で、水酸基(OH)とフッ素(F)が置換するものは、それぞれの端成分を別 種扱いとします。しかし、原子番号を利用する場合、水酸基(OH)は酸素(8)と水素 (1)を合計した"9"となり、フッ素の原子番号の9と同じ数字になります。そこで、水 酸基(OH)とフッ素(F)を除いた数字をメイン・ナンバー(Main number)とし、それ にサブ・ナンバー(Sub number)として水酸基(OH)は0、フッ素(F)は1と付与す るようにします。

なお、鉱物の分類単位の名称については、日本産鉱物分類別一覧(加藤昭、2008)⁴⁾を 基にしました。

原子番号の数値化

分類の単位を数値化すために原子番号に関連した整数(有効数字15桁)で表すことにします. 最初の数字は分類の単位を代表する原子番号で,鉱物の化学組成に関連したものを用います. その次には鉱物種を構成する金属元素(陽イオンなど)との比率とそれらの原子番号,多形の有無,最後に個体識別番号という順で表すことにします.

なお、ここでは系統分類のそれぞれの単位を表す原子団(分子)の場合、下記のように原 子番号の合計数を使うこととする.

水酸基(OH⁻)	\rightarrow	9		•	••	• •	•	•••	•	••	•	• •	•	•	•••	•	•	•	• ①
水(H2O)	\rightarrow	10		•	••	• •	•	••	•	••	•	• •	•	•	••	•	•	•	• 2
アンモニウム(N	↓H₄⁺)	$) \rightarrow$	11	•	••	•	••	• •	•	• •	•	••	•	•	•••	•	•	•	• ③
硼酸(BO ₃ ³⁻)	→ 2	29		•	••	• •	• •	• •	•	••	•	••	•	•	•••	•	•	•	• ④
炭酸(CO ₃ ²⁻)	\rightarrow	30		••	• •	•	••	•	••	• •	•	••	•	•	•••	•	•	•	• (5)
燐酸(PO4 ²⁻)	\rightarrow	47		••	••	•	••	• •	••	•••	•	••	•	•	•••	•	•	•	• 6
硫酸(SO4 ²⁻)	\rightarrow	48		•	•••	• •	••	• •	•	•••	•	••	•	•	••	•	•	•	• 7
ヴァナジン酸(V	′O4 ³⁻)	$) \rightarrow$	55		••	•	••	• •	•	••	•	••	•	•	•••	•	•	•	• (8)
砒酸(AsO4 ³⁻)	\rightarrow	65		• •	••	•	•••	• •	• •	••	•	••	•	•	•••	•	•	•	• 9
モリブデン酸(N	1004 ²	⁻) →	74	1	••	•	••	• •	•	•••	•	••	•	•	•••	•	•	•	• 10

ネソ珪酸 (SiO₄⁴⁻) → O46 ⇒ 14O46 ···········(2) ソロ珪酸 (Si₂O₇) → O84 (=2×14+7×8) ⇒ 14O84 ···(3) シクロ珪酸 (SiO₃)₆¹²⁻ → 228 (=6×(14+3×8)) ⇒ 14228 ··(4) 単鎖イノ珪酸 (SiO₃)_n²ⁿ⁻ → Si₃O₉⁶⁻(n=3) → 114 ⇒ 14114 ··(5) 複鎖イノ珪酸 (Si₄O₁₁)_n⁶ⁿ⁻→ Si₈O₂₂¹²⁻ 288 (n=2) ⇒ 14288 ···(6) フィロ珪酸 (Si₂O₅)_n²ⁿ⁻) → Si₁₀O₂₅¹⁰⁻ (n=5) → 340 ⇒ 14340 ··(7) テクト珪酸(Al_xSi_{4-x}O₈)_n^{xn-} → AlSi₃O₈⁴⁻ (x,n=2) 236 ⇒ 14236 ···(8) 珪酸 が他の陰イオンと組み合わされた場合,次のように表示できる. SiO₄ + Si₂O₇ → 130 ⇒ 14130 ······(9)

SiO₄ + Si₂O₇ + OH⁻ → 139 ⇒ 14139 ・・・・・・20 SiO₄ + Si₂O₇ + OH⁻ + O²⁻ → 147 ⇒ 14147 ・・・・・20 以下,さまざまな鉱物種を数字で示す方法について記す. ただし,長石グループの曹灰長 石のように習慣的に使われる鉱物については別途示す(珪酸塩鉱物の項目参照).



個体識別番号

I. 元素鉱物類

ほぼ単一の元素だけで構成されている鉱物で、原子番号が最も少ない鉱物種は、6番目の 炭素(C)のダイヤモンドです.以下のように炭素を非金属元素鉱物、砒素は半金属元素鉱 物、鉄は金属元素鉱物というように細分化していましたが、ここでは以下のように記号(数 値)で表すだけとします.

A. 非金属元素鉱物

非金属元素で原子番号が最も少ないのは炭素の6で、鉱物種はダイヤモンドです。小 数点以下には多形があるものを想定して2桁の数字01(他の多形は02,03とす る)、そして個体番号001(最大で同一種999個)を付与することで下記のよう に表示されます。

6.0000001001~ ダイヤモンド Diamond C 立方晶系

ダイヤモンドの多形の石墨は、小数点以下にO2として表示.小数点以下にOが並ぶのは有効数字を揃えるためです.

6.000002001~ 石墨 Graphite C 六方晶系

6.000003001~ 石墨 Graphite C 三方晶系

B 半金属元素鉱物

半金属元素の場合は砒素の元素番号33で、鉱物種の自然砒素です。小数点以下には多形を表す01と個体番号001が続く.

33.000001001~ 自然砒素 Arsenic As

C 金属元素鉱物

金属元素は鉄の26が最初である.鉱物種の自然鉄で、小数点以下には多形を表す 01と個体番号001が続く.

26.0000001001~ 自然鉄 Iron Fe

以上のように数値化したもので分類した場合,非金属・半金属・金属元素鉱物という名称 は特に用いません.ただし,大きな分類項目として次のような名称は残すようにしました.

Ⅱ.酸化鉱物類

酸素(O)と金属元素(M)が結合したもので、以下、A~Eのように分類できます。その記号化の詳細は次のとおりです。

酸素の原子番号8を800として数値化させます.3桁にしたのは、元素鉱物類がほとん ど2桁なので、数字を小さな順から並び替えた場合、元素鉱物の次に化合物である酸化鉱物 が配列されるようにするためです.

小数点以下の数値は,酸素(O)と金属元素(M)との比率を計算した値を最初に表示さ せます。例えば,赤銅鉱(Cuprite Cu₂O)は,Cu:O=2:1なので1/2=0.50 となり050を使います。その次に金属元素の原子番号(Cuの29)と多形があるものを 想定して01,そして個体番号001を付与することで下記のように表示します。

A. 金属過剰酸化物・単酸化物 (M:O>1:1)

800.0502901001~ 赤銅鉱 Cuprite Cu 20

- B. 四三酸化物 (M:O=3:4)
 800.1312131001~ 苦土尖晶石 Spinel MgA1204
- C. 三二酸化物 (M:O=2:3)
 800.1502601001~ 赤鉄鉱 Hematite F e₂O₃
- D. 二酸化物および近似物 (M:O=1:2)
- 800.2001401001~ 石英 Quartz SiO2
- E. 水酸化物

900.1001301001~ ブルース石 Brucite Mg(OH)2

フッ素Fや塩素CIのようなハロゲン化鉱物もここに含めます

Ⅲ. 硫化鉱物類

硫黄(S)と金属元素(M)が結合したもの、以下、A~Fのように分類できます。その 記号化の詳細は次のとおりです。

硫黄の原子番号16と00で1600とする。4桁表示にすることで酸化物と同様に、数

字を小さな順から並び替えると元素鉱物の次に化合物の酸化鉱物,その次に硫化鉱物という ように配列されます.

小数点以下は、硫黄(S)と金属元素(M)との比率を計算した値を最初に表示。例えば、 輝銅鉱(Chalcocite Cu₂S)は、Cu:S=2:1なので1/2=0.50となり050 を使い、その次に金属元素の原子番号(Cuの29)と多形があるものを想定して01、そ して個体番号001を付与することで下記のように表示します。

A. 金属過剰硫化物 (M:S>1:1)

1600.0502901001~ 輝銅鉱 chalcocite Cu2S

- B. 等比硫化物・同誘導物 (M:S=1:1)
 1600.1003001001~ 閃亜鉛鉱 Sphalerite ZnS
- C. 四三硫化物・三二硫化物 (M:S=3:4, M:S=2:3) 1600.1551001001~ 輝安鉱 Stibnite Sb₂S₃
- D. 二硫化物 (M:S=1:2) 1600.2026001001~ 黄鉄鉱 Pyrite F eS₂
- E. 三硫化物 (M:S=1:3)

砒素(As)の化合物は、砒素の原子番号が33なので、例えば方砒コバルト鉱は次のように記号化される.

3300.2527001001~ 方砒コバルト鉱 Skutterudite CoAs_{3-x}

F. 硫塩鉱物

硫化物で金属元素が2つ以上で構成されている場合は,特徴づける2つの原子番号を 使う. この場合は多形を表す数値を1桁で表示. 例えば安四面銅鉱 (Cu₁₀(Fe,Zn)₂Sb₄S₁₃)の場合の小数点以下は,(Cu+(Fe,Zn)+Sb):S=1 6:13から比率として0.8とし,鉄(Fe)と銅(Cu)の原子番号の26と2 9を使うと次のように表示します.

1600.0826291001~ 安四面銅鉱 Tetrahedrite Cu10(Fe,Zn)2Sb4S13

Ⅳ. 硼酸塩鉱物

硼酸(BO₃³⁻)と金属元素(M)で構成されているもの.硼酸は硼素1つと酸素3つが結合しているので,29(④参照)という数値を使います.他の化合物と同様に4桁で表すため,2900とします.

小藤石は、Mgと(BO₃)の割合が3:2なので比率は0.67となる。そこで金属元素のMgの原子番号12を使って次のように表示します。

2900.0671201001~ 小藤石 Kooite Mg3(BO3)2

V. 炭酸塩鉱物

炭酸(CO₃²⁻)と金属元素(M)で構成されているもの.炭酸は炭素1つと酸素3つが 結合しているので、30(⑤参照) という数値を使います.他の化合物と同様に4桁で 表すため、3000とします.

A. 無水純炭酸塩 水を含まないもの

菱苦土鉱は、Mgと(CO₃²⁻)の割合が1:1なので比率は1.0となります。そ

こで金属元素のMgの原子番号12を使って次のように表示します.

3000.1001201001~ 菱苦土鉱 Magnesite Mg[CO3]

B. 無水複陰イオン炭酸塩 水を含まず、陰イオン(OH⁻)などを含むもの OH⁻の9 (①参照) を加えて39として表示します. 藍銅鉱は, Cuと (OH+CO₃)の割会が3:2なので比率は0.67となり、銅の原子番号29を使っ て、次のように表示します。

3900.0672901001~ 藍銅鉱 Azurite Cu₃[OH CO₃]₂

C. 含水複陰イオン炭酸塩 水(H₂O)と陰イオン(OH⁻)などを含むもの

H₂Oの 10 (②参照) を加えて40として表示.水苦土鉱は, Mg と (OH+CO₃) の割会が5:6なので比率は1.20となり、マグネシウムの原子番号12を使って、 次のように表示します.

4000.1201201001~ 水苦土石 Hydromagnesite Mg₅[(OH)₂|(CO₃)₄]·4H₂O Ⅵ. 燐酸塩・ヴァナジン酸塩・砒酸塩鉱物

燐酸(PO_4^{2-}), ヴァナジン酸((VO_4^{3-})あるいは砒酸(AsO_4^{3-})を含むもの. それぞ れ燐酸は47(⑥参照)、ヴァナジン酸は55(⑧参照)、砒酸は65(⑨参照)を使いま す.

A. 無水純燐酸塩・砒酸塩 水を含まないもの

燐酸塩鉱物のモナズ石(CePO₄)は、燐酸が47、セレン(Ce)と燐酸(PO₄)の 割会が1:1なので比率は1.0となり、Ceの原子番号58を使って、次のように 表示します.

4700.1005801001~ モナズ石 Monazite CePO₄

B. 無水複陰イオン燐酸・砒酸塩 水を含まず、陰イオン(OH)) などを含むもの 燐酸に陰イオンのOH-が加わると56(=47+9)となります. 弗素燐灰石(Ca₅[(F,OH)|(PO₄)₃])は、カルシウム(Ca)と陰イオン(OH⁻)+ 燐酸(PO₄)の割合が5:4なので比率は0.80となり、Caの原子番号20を使 って、次のように表示します。

5600.0802001001~ 弗素燐灰石 Fluorapatite Ca₅[(F,OH)|(PO₄)₃]

C. 含水燐酸塩・ヴァナジン酸塩・砒酸塩鉱物 水を含むもの 砒酸に水が加わると75(=65+10)となる.スコロド石は、Feと(AsO₄+ H₂O)の割合が1:3なので比率が3.0となり、鉄の原子番号26を使って、次のよ うに表示します.

7,500,3002601001~ スコロド石 Scorodite Fe[AsO4]・2H20

D. 含水複陰イオン燐酸塩・砒酸塩 水と陰イオン(OH⁻) などを含むもの 燐酸に水と陰イオン(OH)が加わると66(=47+10+9)となります. 銀星 石は、Alと(PO₄+H₂O+OH)の割合いが3:10なので比率が3.3となり、 アルミニウムの原子番号13を使って、次のように表示します. 6,600.3301301001~ 銀星石 Wavellite Al₃(PO₄)₂(OH,F)₃•5H₂O

Ⅲ. 硫酸塩鉱物

- 硫酸(SO₄²⁻)を含むもの.硫酸(SO₄:16(S)+8(O)×4=48)は48を使います.
 A. 無水純硫酸塩 水を含まないもの テナルド石は、NaとSO₄の割合いが2:1なので比率が0.5となり、ナトリウムの 原子番号11を使って、次のように表示します.
 4,800,0501101001~ テナルド石 Thenardite Na₂[SO₄]
- B. 無水複陰イオン硫酸塩 水を含まず,陰イオン(OH⁻)などを含むもの
 硫酸に陰イオンのOH⁻が加わると57(=48+9)となる.
 鉄明礬石は,(K+Fe)と(SO₄+OH)の割合いが4:8なので比率が2.0となり,KとFeの2つの原子番号19と26を使って,次のように表示します.ただし多形は1桁で表示させます.

5,700.2019261001~ 鉄明礬石 Jarosite KF e³⁺3[(OH)₃|SO₄]₂ B. 含水純硫酸塩 水(H₂O)を含むもの.

硫酸に水(H2O)が加わると58(=48+10)となる. 石膏は、Caと(SO4+H2O)の割合いが1:3なので比率が3となり、Caの原子 番号20を使って、次のように表示します.

5,800.3002001001~ 石膏 Gypsum Ca[SO4]・2H2O

C. 含水複陰イオン硫酸塩 水と陰イオン(OH⁻) などを含むもの 硫酸に水(H₂O)と陰イオン(OH⁻)が加わると67(=48+10+9)となり ます.

青針銅鉱は、(Cu+A1)と(SO₄+H₂O+OH⁻)の割合いが6:15なので比率 が2.5となり、AlとCuの原子番号13と29を使って、次のように表示します。 多形は1桁で表示させます。

6,700.2513291001~ 青針銅鉱 cyanottrichite Cu₄Al₂SO₄(OH)₁₂・2H₂O **1**. モリブデン酸塩・タングステン酸塩鉱物

モリブデン酸 (MoO_4^{2-}) やタングステン酸 (WO_4^{2-}) を含むもの. モリブデン酸は74 (⑩参照), タングステン酸は106 (⑪参照) を使います.

モリブデン鉛鉱は、PbとMoO4の割合いが1:1なので比率が1となり、Pbの原子番号82を使って、次のように表示します.

7,400.1008201001~ モリブデン鉛鉱 Wulfenite Pb[MoO4]

IX. 珪酸塩鉱物

珪酸を構成する珪素Siの原子番号14を最初の数字とし、次の有効数字3桁について、 それぞれの結晶構造を示す数字で表示します。例えば、珪酸(SiO₄⁴⁻, Si₂O₇⁶⁻, (SiO₃) $_{6}^{12}$

⁻, $(SiO_3)_n^{2n-}$, $(Si_4O_{11})_n^{6n-}$, $(SiO_3)_6^{12-}$, $(Si_2O_5)_n^{2n-}$) および $(Al_xSi_{4-x}O_8)_n^{xn-}$) を含むもの ($@\sim@$ 参照). さらにこれらと他の陰イオンとの組み合わせを使用します ($@\sim@$ 参照).

これらを使って以下の珪酸塩を表示します。

A. 純ネソ珪酸塩 珪酸(SiO4⁴⁻)を含むもの

12より、14046を使います.

テフロ石は、Mnと SiO4⁴⁻の割合が2:1なので比率がO.5となり、Mnの原子

番号25を使って、次のように表示します.

14,046.0502501001~ テフロ石 Tephroite Mn₂ [SiO₄]
B. 複陰イオンネソ珪酸塩 珪酸(SiO₄⁴⁻)と陰イオン(OH)などを含むもの 上記Aに陰イオン(OH⁻)の9を加えると55となる.また,酸素(O²⁻)の場合 は8を加えて54とする.⑬より、14054あるいは14055を使います. 藍晶石は、A1と(O+SiO₄⁴⁻)の割合が2:2なので比率が1となり、A1の原子 番号13を使います.さらに多形の紅柱石と珪線石の次としての03を使って、次の ように表示します.

14,054.1001303001~ 藍晶石 Kyanite Al₂[0|SiO₄]

- C. 純ソロ珪酸塩 珪酸(Si₂O₇⁶⁻)を含むもの
 ③より、14084 を使います.
 ゲーレン石は、Caと Si₂O₇の割合が2:1なので比率が0.5となり、Caの原子
 番号20を使って、次のように表示します.
 14,084.0502001001~ゲーレン石 Gehlenite Ca₂Al[AlSiO₇]
- D. 複陰イオンソロ珪酸塩 珪酸(Si₂O₇⁶⁻)と陰イオン(OH)などを含むもの 上記Cと陰イオン(OH⁻)の9を加えると93となる.よって、14093 を使います. 異極鉱は、Zn と(Si₂O₇+OH+H₂O)の割合が1:1なので比率が1となり、Zn の原子番号30を使って、次のように表示します.
 14,093,1003001001~ 異極鉱 Hemimorphite Zn₄[(OH)₂|S₁₂O₇]·H₂O

E. 複陰イオンシクロ珪酸塩 珪酸((SiO₃)₆¹²⁻)と陰イオン(OH)などを含むもの (4)より、14228を使う.
電気石はスーパーグループと呼ばれ、多くの鉱物種が含まれます.そこで金属元素との比率を表す数値を一桁少なくし、さらに多形を表す記号を割愛します.
苦土電気石は、Na、Mg、Alと前述の珪酸((SiO₃)₆¹²⁻)及び陰イオンとの割合がO.
8で、Mg、Al及び Mg の原子番号11、12、13を使って、次のように表示します.

14,228.8111213001 苦土電気石 Dravite NaMg₃Al₆(BO₃)₃Si₆O₁₈(OH)₃(OH) また、サブ番号には OH の端成分なので0とする.

F. 単鎖イノ珪酸塩 珪酸((SiO₃)_n²ⁿ⁻)を含むもの

n=3の時,15の14114を使う.

透輝石は、Mg 及びCaと珪酸(Si₂O₆)⁴⁻ (n=2)の割合が2:1なので比率が0.5 となり、MgとCaの原子番号12と20を使って、次のように表示します.

14,114.0512201001~ 透輝石 Diopside CaMg[Si₂O₆]

G. 複鎖イノ珪酸塩 珪酸((Si₄O₁₁)_n⁶ⁿ⁻)を含むもの

n=2の時, 16の14288を使う.

角閃石はスーパーグループと呼ばれ、多くの鉱物種が含まれる.ここでも電気石と同様に金属元素との比率を表す数値を一桁少なくし、さらに多形を表す記号を割愛します.

リヒター閃石は、Na、Ca及びMgと珪酸((Si₈O₂₂)¹²⁻)+(OH)の割合が7:3なので比率が0.4となり、Na、Mg及びCaの原子番号11、12及び20を使って、次のように表示します.

14,288.4111220001~リヒター閃石 richiterite Na(Ca,Na) (Mg,Fe)₅[Si₈O₂₂] (OH)₂ H. 鎖状一層状移化型フィロ珪酸塩

葡萄石(Prehnite Ca₂Al₂Si₃O₁₀(OH)₂は, Al₂Si₃O₁₀ と (OH)₂の元素番号の合計 166, Ca と珪酸(Al₂Si₃O₁₀) + (OH)₂の割合が2:3なので比率が1.5となり, Caの元素番号20を使って,次のように表示します.最初は珪酸 Siの 14 を付与し ます.

14,166.1502001001~ 葡萄石 Prehnite Ca₂Al₂Si₃O₁₀(OH)₂ I.フィロ珪酸塩 珪酸((Si₂O₅)²ⁿ⁻)を含むもの

n =5 の時, ①の 14340 を使います.

弗素魚眼石は, K及びCaと珪酸(Si₄O10⁴⁻)+(OH)+H2Oの割合が5:11なので 比率が2.2となり, Kと Caの原子番号19及び20を使って, 次のように表示し ます.ただし多形は1桁表示です.

14,340.2219201001~ 弗素魚眼石 Fluorapophyllite KCa₄[(F,OH)|(Si₄O₁₀)₂]・8H₂O J. テクト珪酸塩 珪酸((Al_xSi_{4-x}O₈)_n^{xn-})を含むもの

a. 沸石グループ以外の鉱物

これまで通りの方法で, x 及び n が 2 の時, 18の 14236 を使います. 正長石は, Kと AlSi₃O₈-の割合が1:1なので比率が1となり, Kの原子番号19 を使って, 次のように表示します.

14,236.101901001~ 正長石 Orthoclase KAISi3O8

なお、これまでの鉱物の記号化は、IMAの鉱物の命名法に従い、端成分の鉱物の 化学素組成をもとにしているが、長石グループの鉱物名には、中間組成のものがふ るくから使われています。例えば、灰曹長石 oligoclase は、NaAlSi₃O₈ 成分が9 O~70%、CaAl₂Si₂O₈ 成分が10~30%の鉱物名です。このような鉱物には、 Naの元素番号11と、NaAlSi₃O₈の成分の平均値80%(0.6)を使用し、次 のように表示します。.

14,236.1011801001~灰曹長石 oligoclase[(NaAlSi₃O₈)₃₀₋₇₀(CaAl₂Si₂O₈)₁₀₋₃₀] さらに,斜長石 (plagioclase (Na,Ca)(Si,Al)₄O₈)のような系列名もNaとCa の元素番号11と20を使い,次のように表示します.

14,236.1011201001~ 斜長石 plagioclase (Na,Ca)(Si,Al)₄O₈)

b. **沸石グループ**

沸石グループZeolitegroupは、構成している分子式 NaAlO₂・ KAlO₂・CaAl₂O₄・SiO₂・H₂Oのそれぞれの原子番号の総数は2O6で、その倍の412と珪酸の14を使って14412と表示します。なお、数値を倍にしたのは珪酸塩鉱物の最後に配置するためです。 NaAlO₂
NaAlO₂
KAlO₂
48
CaAl₂O₄
78
SiO₂
30
H₂O
10
小数点以下は、鉱物種を構成している化学式を使って表示します.
例えば、トムソン沸石Thomsonite Ca₂Na[Al₅Si₅O₂₀]・6H₂O=2CaAl₂O
4・NaAlO₂・5SiO₂
の原子番号の数である406を使って表示します.

14,412.040600001~ トムソン沸石 Thomsonite Ca₂Na[Al₅Si₅O₂₀]・6H₂O

X. 有機鉱物

有機酸塩鉱物

かつて succinite と呼ばれていた amber などが有機鉱物に含まれていますが、現在 の CNMNC のリストには記載がないため、ここでは除外しています. ただし、日本海 海底で発見されている、ウエッデル石が日本産として知られているので、ここでとりあ げます.

ウエッデル石 Ca[C₂O₄]・2H₂O の C₂O₄が44,2H₂Oは20なので,64を使う.CaとC₂O₄及び2H₂Oとの割合が1:1なので比率は1となり,Caの原子番号20を使って,次のように表示します.

64000.1020001001~ Weddellite Ca[C₂O₄] • 2H₂O

このように鉱物を構成する元素とその割合等を利用し、数値化した分類では、主として化 学組成を基にしたものではあるが、構造が未決定なものでも、今回のルールに基づいて配置 すると類似する他の鉱物との関係が分かるようになります。博物館の標本整理には十分役立 つと思われる.

参考文献

- 1) Gaines, R. V., Skinner, H. C. W., Foord, E. E., Mason, B., and Rosenzweig, A.(1997) : Dana's New Mineralogy, Eighth Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 2) Strunz, H. (1978) : Mineralogische Tabellen, Akademishe Verlagsgesellschaft Geest&Portig K.G.
- 3) Strunz, H. and Nickel, E., H. (2001) : Strunz Mineralogical Tables, Schweizerbart, Stuttgart.
- 4)加藤 昭(2008):日本産鉱物分類別一覧,無名会創立75周年記念.

鉱物の色の原因

鉱物やその他の物質の着色原因は、大きく4つ、さらに細分化すると11種類です(表3-2).その中でも着色メカニズムは、光と電子との相互作用によるものがほとんどです。 即ち、鉱物を構成する原子あるいは原子団が、電磁波である可視光線の一部あるいはすべて を吸収することにより着色されるのです。

着色原因		鉱物(物質)例
結晶場着色	1) 遷移金属化合物	トルコ石
	2)遷移金属不純物	コランダム(ルビー)
	3)着色中心	スモーキー・クォーツ
分子軌道間の遷移	4)電荷移動	コランダム(ブルー・サファイア)
	5) 共役結合	珊瑚,黒真珠,有機染料の発色原因
エネルギー・バンドを持つ物質内の遷移	6) 金属	金
	7)半導体	ブルー・ダイヤモンド
物理的現象	8)屈折	宝石のファイヤー
	9)散乱	ムーンストーン、コランダム(スター・サファイア)
	10)干渉	花珠真珠のピンク色
	11)回折	オパール

鉱物においてはその化学組成と結晶構造によって種類が決定されるため、外観の色とは無 関係ですが、鉱物の特徴を知る上では重要な要素です.

ふるくから色についてはニュートンをはじめ様々な物理学者によって研究がなされていま すが、現在では物理学というより、生物学の一分野である生理学の研究分野としてとらえら れています.それは、人の五感の一つとしての視覚の働きによって色が認識されるからです. 次に、その視覚の働きから、鉱物の色についての説明をします.

視覚は "ヤング・ヘルムホルツ説"

色は視神経細胞で感知し、そこから脳に伝えられて、具体的な色を思い浮かべることにな ります。その視神経細胞は、明るさを感じる桿体(かんたい)と色を感じる錘体と呼ばれる ものに分けられ、錘体はさらに赤と緑及び青色を敏感に知覚する3種類あるとされています。 即ち、赤と緑及び青色を感じる細胞の組み合わせによって、様々な色調を感知するものと考 えられています。この赤・緑・青色は、色の三原色とも呼ばれています(図3-32)。例え ば、赤と緑色が同じ強さで刺激を受けて感じることによって、黄色を知覚するというもので す。これを"ヤング・ヘルムホルツ説"と呼びます。このようにして色を感知するというメ カニズムから、色を3つの数字で表す試みが、CIE(国際照明委員会)で行われ、JIS (日本産業規格)でも、採用されています.

色として感知されるということは、光によって視神経細胞を刺激するに他なりません。しかし、人の視覚はナトリウムの炎色反応によって得られる 589 nm の黄色と赤と緑色の混色である黄色との区別はできないのです。



- ・赤色:ルビー
- ・青色:ブルー・サファイア
- ・緑色:エメラルド
- ・無色:ダイヤモンド

図3-32 色の三原色

色の原因について考える

鉱物の観察では、その色が一体何を意味しているのかを考えることは大切です。例えば、 緑色はクロムをはじめ鉄やニッケルのような遷移元素を含んだ鉱物を示唆しているのではな いか、というように予想できます。さらに、黄色は鉄やマンガン、あるいは特殊なものでは ウランなどを含む鉱物ではないかと考えることができます。このように外観を特徴づける色 が鉱物の同定において重要となっています。

ただし、前述のように鉱物の色は、光と電子との相互作用によって見られるもので、その 原因は主に遷移元素(チタン(Ti)、バナジウム(V)、クロム(Cr)、マンガン(Mn)、 鉄(Fe)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)など)以外に、結 晶構造中の空隙によって着色する場合があります。これを、カラーセンター(着色中心)と 呼びます。例えば放射線によって、原子(電子)が移動することで空隙が生じ、そこに可視 光線の一部が吸収され、残った可視光線(補色)が見られることになります。放射線で着色 された代表例の薄青色(水色)のブルー・トパーズは、水色の補色の黄色を吸収しているこ とになります。

鉱物の色の表示方法について

色は、加色混合と呼ばれる光の三原色(Red, Green, Blue)のそれぞれの強度により、 その他の様々な色調を作り出すことができます(図3-33).例えば、カラー・テレビは、 この原理に基づいて作られています.一方、減色混合と呼ばれる色の三原色(Cyan, Magenta, Yellow)は、カラー印刷のインクの色に相当しますが、似たような三原色を使 用しています(図3-34).



図3-33 加色混合





図3-35 色をグラフ上で表示するxy色度図 色彩学貴重書図説(2006)より



この光の三原色(RGB)は xy 色度図というグ ラフ(図3-35)によって表示することができ ます.この図の中央は白色,周囲が可視光線の スペクトル(380~780nm)を表しています. この馬蹄形の内部で,すべての色を表現するこ とができます.これは,色を数字で表すことが できる,ということを示しています.

現在のカラー・テレビやデジタル・カメラは, この馬蹄形にほぼ近づいた色が再現できるよう になってきました.よりリアルになってきたと いうことです.

鉱物の色を、数字で表すことができる、ということですが、一般に広く使われているのは、 各波長の透過率を測定してグラフにすることです。代表的な色について、それぞれのグラフ を図 2-36~2-38 に示します。この赤色、緑色、青色の分光特性を合わせると、加色混合 の中心の無色に相当します。赤色コランダム(以下、ルビー)、緑色ベリル(以下、エメラ ルド)、青色コランダム(以下、ブルー・サファイア)は様々な色を持ちながら、各色の フィルムが同様な分光特性を示していることが分かります。

ルビーの場合で、694.3nm の位置に下向きの吸収ピークが見られます(図 2-36b). ル ビーに紫外線などのようなエネルギーが強い光を照射させると、このピークが反転して発光 する、ルビー・レーザーと呼ばれる可視光線を発します. また、赤色フィルムのような幅広 い分光特性ではなく、694.3nm という一本の波長の光によっても赤色に見えます(図 3-36c). 同じ赤色でも、ルビー・レーザーと赤色フィルムとは異なる分光特性にもかかわら ず、これらの違いを人の視覚では区別することができないのです。





鉱物の色の理論的説明

ルビーの赤色の原因は、僅かに含まれる3価のクロム(Cr³⁺)ですが、Cr³⁺以外の遷移金属 である Fe³⁺、V³⁺、Ni²⁺によっても着色します。この着色理由を説明するために結晶場理論 が用いられています。

この結晶場理論は 1929 年 Betheによる理論から始まり、Crはもとより Sc, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cuという遷移元素の特性をうまく説明しています.

鉱物の着色に関わっている電子の動きについて、この理論では量子数と呼ばれる次のよう な4つのパラメータを使っています.

(1)主量子数(n):原子核から電子までの平均距離と関係がある.

(2) 副量子数(1): 軌道上にある電子の形態と関係がある.

1=O(s), 1(p), 2(d), 3(f), 4(g)・・・・, n-1
 (3)磁気量子数(m₁):ある特定方向に広がる電子雲のおおよそを示す.

(4)スピン量子数(m_s):自転する電子の向きを示す.時計方向か逆時計方向のいずれかに なる.

遷移元素とは d 殻または f 殻がある程度満たされた元素であり、それらの電子配置を示す と表3-4 のとおりです.さらに、遷移金属イオンの d 軌道の配置とその状態については表 3-5 のとおり.これらの遷移元素がイオン(遷移金属イオン)として結晶内に含まれると、そ の結晶を構成する元素の配置(配位)によって電子軌道が変化(分裂)します.この結晶場分裂 と呼ばれる現象については、結晶場理論で説明することができます(バーンズ、1972).

表3-4 遷移元素の電子配置									
遷移 金属	電子配置								
Ca	1s ²	2s²	- 4	s ²					
Sc	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d1	4s²		
Ti	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ²	4s²		
\vee	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ³	4s²		
Cr	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d⁵	4s¹		
Mn	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d⁵	4s²		
Fe	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ⁶	4s²		
Со	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ⁷	4s²		
Ni	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ⁸	4s²		
Cu	1s ²	2s²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ¹⁰	4s ¹		
Zn	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s²	3p ⁶	3d ¹⁰	4s ²		

表3-5遷移金属イオンの dⁿ 配置とその状態

イオン	位置	状態
Ti³⁺	\mathbf{d}^1	² D
V ³⁺	ď	³ F, ³ P, ¹ G, ¹ D, ¹ S
Cr³⁺	d³	⁴ F, ⁴ P, ² H, ² G, ² F, ² D(2重), ² P(2重)
Cr ²⁺ , Mn ³⁺	d⁴	[°] D, [°] H, [°] G, [°] F(2重), [°] D, [°] P(2重), ¹ I, ¹ G(2重), ¹ F, ¹ D(2重), ¹ S(2重)
Mn ²⁺ , Fe ³⁺	d⁵	⁶ S, ⁴ G, ⁴ F, ⁴ D, ⁴ P, ² I, ² H, ² G (2重), ² F(2重), ² D(3重), ² P, ² S
Fe ²⁺ , Co ³⁺	d6	⁵ D, ³ H, ³ G, ³ F(2重), ³ D, ³ P(2重), ¹ I, ¹ G(2重), ¹ F, ¹ D(2重), ¹ S(2重)
Co ²⁺ , Ni ³⁺	ď	⁴ F, ⁴ P, ² H, ² G, ² F, ² D(2重), ² P(2重)
Ni ²⁺	d ⁸	³ F, ³ P, ¹ G, ¹ D, ¹ S
Cu ²⁺	d٩	² D

ルビーの着色原因について

ルビーに含まれる遷移元素のクロムイオンによる着色原因について、この結晶場理論を用いて説明すると次のようになります.

ルビーは、コランダム (Al₂O₃) 中のアルミニウムイオン (Al³⁺) を僅かにクロムイオ ン (Cr³⁺) で置換したものです. このCr³⁺は、電子を3つ失っているため、表2-5のCrの 電子配置において、**4s**¹ 軌道の電子1個と **3d**⁵ の軌道から2個の合計で3個の電子が奪われ、 **3d**³ という軌道になっています. Cr³⁺はAl³⁺の半径より大きいため、6 個の酸素イオンが つくる8面体の構造が歪んでしまいます. この歪みによって生じた結晶場分裂により、特有 の色が生じます. 即ち、八面体中で生じた結晶場分裂が、ルビー特有の吸収や発散に関与す ることになります. それらのエネルギー準位は⁴T₁、⁴T₂、²E、⁴A₂なので、⁴A₂→⁴T₁、 ⁴A₂→⁴T₂という励起に起因する吸収が見られることになります(図3-39). 特に、⁴A₂ と²Eの遷移に起因してルビー特有の蛍光が見られます.

この図は結晶内の電場を表したものであり、田辺一菅野ダイヤグラム(Tanabe-Sugano diagrams,1954)です。Nassau(1980・1983)らはこの図を用いて着色の理由を説明しています。



図3-39 d³の電場(左)とルビーの吸収スペクトル(右)

○緑色宝石の着色原因について

エメラルドや緑色ヒスイ(ジェダイト)の着色原因についてもルビーと同様に、微量に含 まれる Cr³⁺によって、同様なメカニズムによって吸収と発光現象を生じます。ルビーとの違 いはクロムイオンのエネルギー準位を決める結晶場の違いによります。即ち、珪酸塩のエメ ラルドやヒスイ(ジェダイト)は、ルビーよりイオン性が数%小さいために⁴T₁と⁴T₂がよ り少ないエネルギー準位になります。その結果、可視光線の青と緑色をより透過するように なり "緑色"を呈します(図3-40参照)。



図3-40 d³の電場(左)と緑色ジェダイの吸収スペクトル(右)

従って、Cr³*を含む鉱物では一般に緑色を呈するようになります. ただし、他の遷移金属 などの影響を受けない状態である場合に限ります.

また, Fe³⁺については, 450nm 付近に見られる吸収が特徴です. 緑色アンドラダイト であるデマントイド・ガーネットについて, Marfunin(1979)が示しています(図3-41).

以上から,緑色鉱物を分光器によって検査し,650nm 付近に3本の吸収が確認できた場合には,Cr³⁺で着色された鉱物であり,450nm 付近に吸収が認められる場合には Fe³⁺によって着色された鉱物とみなすことができます.

さらに、遷移金属の V³⁺と Ni²⁺についても Tanabe-Sugano diagrams(1954)より、図 3-42 と図3-43 が示されます。これらは、それぞれタンデュール産クリソベリルとオー ストラリア産クリソプレーズの吸収に相当します。



図3-41 d²の電場(左)とデマンドイド・ガーネットの吸収スペクトル(右)



図3-42 d²の電場(左)とタンデュール産クリソベリルの吸収スペクトル(右)



図3-43 d⁸の電場(左)とクリソプレーズの吸収スペクトル(右)

以上のように緑色鉱物については、Cr³⁺,Fe³⁺,V³⁺,Ni²⁺という遷移金属が大きく関わっています.

3章のまとめ:

(1) :

I. 鉱物について説明しなさい(鉱物の定義とは)

 Ⅱ. 鉱物の結晶構造は、元素や分子が規則的に並ぶことによって成り 立っています. その集合体の形状は、(①)角形や四角形あるい は六角形であり、(②)角形はありえないと考えられていました.
 ところが、X線回折により五回対称性(五角形)を持つ物質が発見され、 準結晶(quasicrystal)と呼ばれる物質の存在が認められるようになり ました. この研究に大きな貢献をしたダニエル・シェヒトマン (Daniel Shechtman)に2011年のノーベル化学賞が与えられました.
 上記の①と②に入る語句を下記に書きなさい.

(2):