

鉱物の世界

The world of minerals
地球からの贈り物への誘い

早稲田大学 教育・総合科学学術院
林 政彦

2024

序

かつて、自然界のものを動物・植物・鉱物という3つに分類して、それぞれを研究対象として自然科学が進歩してきました。現在の生活をより快適なものにするためには、自然科学の研究は欠かすことのできないものです。その研究対象については、現在あまりにも人工的に造られたものによって環境づくりが行われているために、自然界の鉱物の存在が意識されません。

例えば、窓ガラスに使われているガラスは自然界に産出する鉱物である石英を溶かしたものであり、石英の小さな切片はクォーツ時計やコンピュータの中で時を刻むために使われています。その他にも銅や鉄などは様々に加工されて使われているのは周知の事です。

ここでは、かけがえのない地球からの贈り物としての鉱物について、その生い立ち（成因）や特徴について学びます。地下からの手紙とも言われる鉱物について詳しく知ることで、鉱物の世界を読み解き、地球の環境についての理解もより深まることを願っています。

目 次

序	1
1. わが国で観察できる鉱物	4
・ 鉱物の産出状態	
2. 鉱物について	16
・ 鉱物とは	
3. 鉱物の世界（Ⅰ）	24
・ 外観（形や色）の特徴	
4. 鉱物の世界（Ⅱ）	72
・ さまざまな外観の鉱物	
5. 鉱物の同定（Ⅰ）	81
・ 野外での観察	
6. 鉱物の同定（Ⅱ）	90
・ X線を使った機器分析	
7. 鉱物の同定（Ⅲ）	95
・ 電子線を使った機器分析	
8. 鉱物の産状（Ⅰ）	102
・ 地球からの贈り物である鉱物	
9. 鉱物の産状（Ⅱ）	103
・ 鉱物と人工物の違い	
10. 鉱物の産状（Ⅲ）	108
・ 未知鉱物との遭遇	
11. 鉱物と岩石（Ⅰ）	116
・ 鉱物の集合である岩石を偏光顕微鏡で観察	

1 2. 鉱物と岩石 (Ⅱ)	1 2 2
・人工的につくられたコンクリート	
1 3. 鉱物の鑑定	1 2 6
・鉱物の記載	
1 4. 鉱物の見方	1 2 9
・まとめ	

参考資料

1 5. 鉱物各論	1 3 0
赤色～ピンク色鉱物 (物質) の性質表	1 9 8
青色鉱物 (物質) の性質表	1 9 9
緑色鉱物 (物質) の性質表	2 0 0
1 6. 鉱物の研磨	2 0 1
・鉱物や岩石の研磨	
・宝石の研磨	
・岩石や鉱物の薄片・研磨片づくりの方法	
1 7. 貴金属製品	2 2 3
1 8. 野外巡検	2 2 5
鉱物観察会 案内書	2 2 6
国立科学博物館の見学 案内書	2 2 9
参考文献	2 3 0
あとがき	2 3 1

1. わが国で観察できる鉱物

・ 鉱物の産出状態

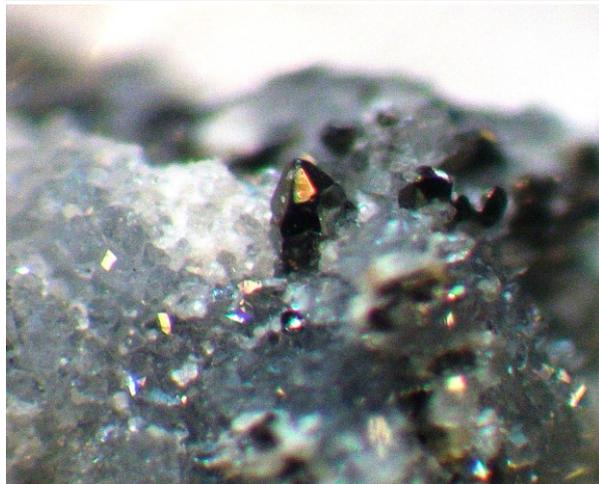
わが国では様々な鉱物を産出し、世界に産出する鉱物の 1/4 が報告されています。ここでは、その一例を図（写真）と共に紹介します。

この順序は、単純な化学組成や結晶構造から複雑なものへと並びかえ、さらに周期表の軽い元素を先としています。



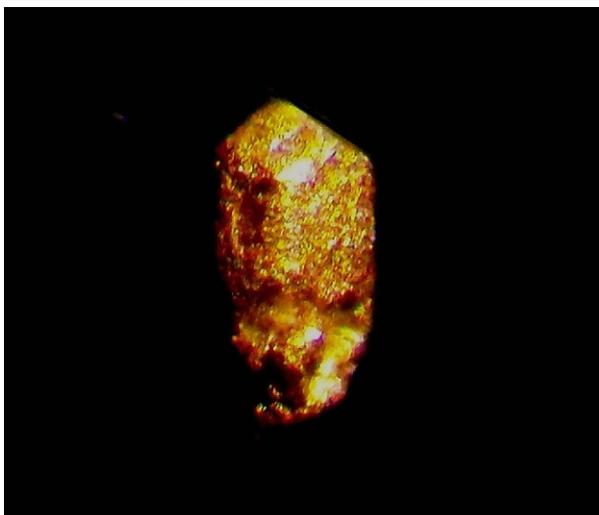
秋田県仙北郡田沢湖町渋黒温泉は、秋田焼山（1,366m）の西麓にあり、その噴気孔には自然硫黄が見られます（図-1、横幅 1mm）。この山は、熊沢山あるいは硫黄山とも呼ばれ、その山頂の火口や山麓には、この他にもいくつかの温泉があります。このような硫黄を含む温泉では、硫化水素や二酸化硫黄のような刺激臭がありますが、硫黄には臭いはありません。

図- 1 自然硫黄 Sulphur S 直方晶系



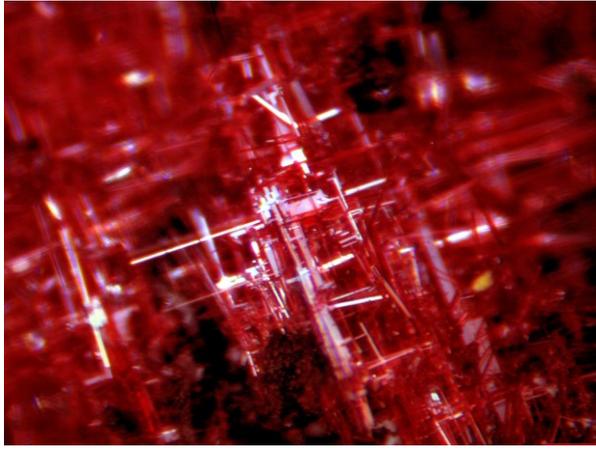
静岡県河津鉱山は、熱水性と呼ばれる温泉水のようなものから生成した鉱床です。鉱床とは、私達にとって有用なものが集まった場所を指します。このような熱水から生成した脈状の石英の空隙に六角柱状で光沢の強い金属鉱物として自然テルルが見られます（図-2、横幅 2mm）。

図- 2 自然テルル Tellurium Te 三方晶系



北海道紋別市八十土（やそし）砂金沢で産出した自然金で、明治38(1905)年 12 月 20 日に発見された。その後、百年以上も経った今でも採集ができる。図のように結晶面の見えるものも多い（図-3、横幅 1mm）。

図- 3 自然金 Au 立方晶系



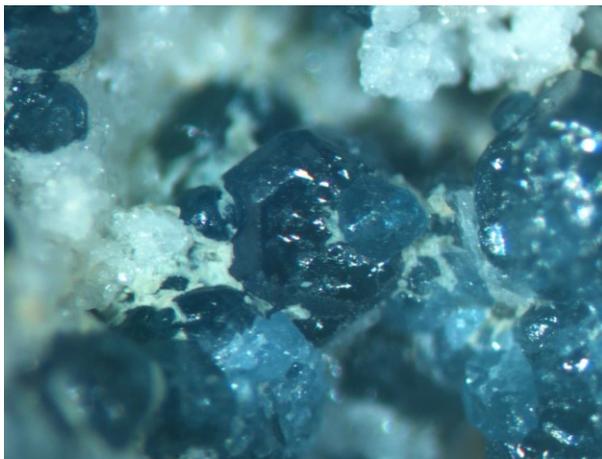
秋田県仙北郡角館町日三市鉱山で産出した赤銅鉱で、その形状から針銅鉱とも呼ばれた（図-5、横幅 2mm）。針状赤色金属光沢であり、「日本鉱物誌 第三版 上巻」（和田維四郎・伊藤貞市・櫻井欽一、昭和 22(1947)年）で当地のものが記載されている。同様なものは「日本鉱物誌」（和田維四郎、明治 37(1904)年）では毛状赤銅鉱として紹介されている。

図- 4 赤銅鉱(針銅鉱) Cuprite(Chalcotrichite)
 Cu^+_2O 立方晶系



山梨県塩山市竹森には、堆積岩中の石英脈の空隙に水晶が見られます。その表面には、黒色不透明金剛光沢で鋭錘石も見られます（図-6、横幅 20mm）。この産地では、苦土電気石が水晶に含まれ、“草入り水晶”とも呼ばれます。

図- 5 鋭錘石 Anatase TiO_2 正方晶系



埼玉県秩父市秩父鉱山石灰沢には石英と灰礬石榴石と共に、それらの空隙中に綺麗な青色粒状のスピネルが産出します。それらの中には自形結晶を示すものも見られます（図-7、横幅 1 mm）。

図-6 スピネル(尖晶石) Spinel
 MgAl_2O_4 立方晶系



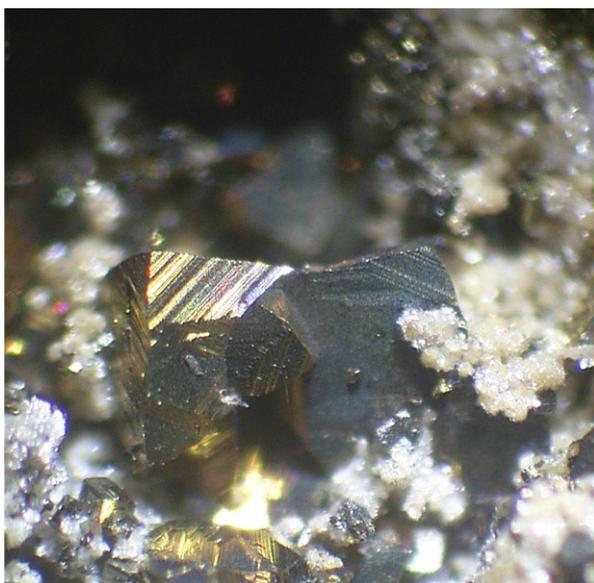
岐阜県中津川市蛭川の花崗岩質ペグマタイトの空隙に自形結晶で見られる蛍石（図-4，横幅 10mm）。この標本は，淡い緑色，正八面体の自形で，褐色のチタン石(楔石)と共に産す。同じ蛭川産で，他の標本では，紫色の外観の蛍石もある。

図-7 蛍石 Fluorite CaF_2 立方晶系



栃木県日光市(旧塩谷郡栗山村)西沢鉱山では，江戸時代末より銀や鉛を採掘し，途中一時休止しましたが，昭和 14（1939）年まで操業が続けられました。流紋岩質凝灰岩あるいは石英斑岩中にある鉱床から，暗赤色金剛光沢で皮膜状として産出する濃紅銀鉱が多いが，稀に石英脈の空隙に図のような自形結晶として見られます（図-8，横幅 5mm）。

図- 8 濃紅銀鉱 Pyrrargyrite Ag_3SbS_3 六方晶系



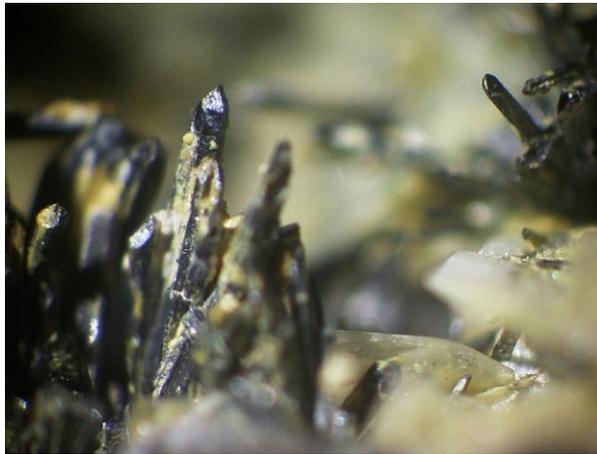
秋田県大館市比内町大巻鉱山では，黒鉱鉱床中に，図のような四角形，黄銅色で金属光沢の黄銅鉱を産出しました（図-9，横幅 10mm）。

図- 9 黄銅鉱 Chalcocite CuFeS_2 正方晶系



埼玉県秩父郡大滝村秩父鉱山大黒鉱床中に閃亜鉛鉱，黄銅鉱，方鉛鉱，黄鉄鉱，硫砒鉄鉱，安四銅鉱等と共に鋼灰色，金属光沢，短柱状にて産出する車骨鉱です（図-10，横幅2mm）。

図-10 車骨鉱 Bournonite CuPbSbS_3 直方晶系



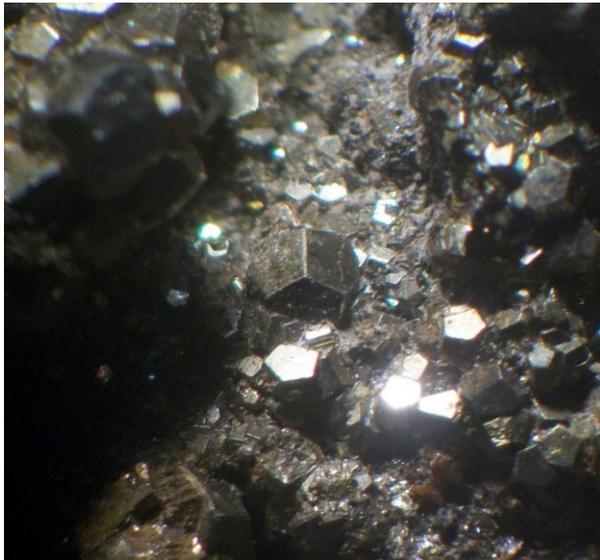
群馬県甘楽郡下仁田町中丸鉱山は，熱水性鉱床であり，その鉱山から鉛灰色細柱状金属光沢にて輝安鉱を産出しました（図-11，横幅1mm）。これらの輝安鉱の集合体の隙間を埋めるように白色～無色板状の重晶石も産出しています。

図- 11 輝安鉱 Stibnite Sb_2S_3 斜方晶系



埼玉県秩父郡大滝村秩父鉱山大黒鉱床中に，閃亜鉛鉱・方鉛鉱・黄鉄鉱と共存し，鉛灰色金属光沢で，板状あるいは放射状の集合として見られるセムセイ鉱です（図-12，横幅6mm）。

図-12 セムセイ鉱 Semseyite
 $\text{Pb}_9\text{Sb}_8\text{S}_{21}$ 単斜晶系



埼玉県秩父市秩父鉱山から、塊状の黄鉄鉱の空隙に写真のような五角十二面体の集合体が見られます（図-13、横幅10mm）。

図-13 黄鉄鉱 Pyrite FeS_2 立方晶系



岡山県川上郡備中町布賀からは、ゲーレン石やスパー石などを含む珍しい硼酸塩鉱物が産出しています。青色ガラス光沢の逸見石（図-14、横幅10mm）もその一つで、2019年には新鉱物の千代子石 Chiyokoite $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)[\text{B}(\text{OH})_4]\text{O}(\text{OH})_5 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ も発見されています。

図-14 逸見石 Henmilitite
 $\text{Ca}_2\text{Cu}[\text{B}(\text{OH})_4]_2(\text{OH})_4$ 三斜晶系



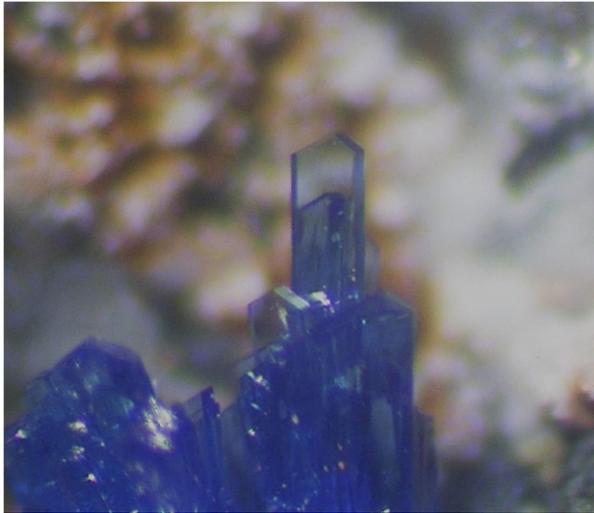
岩手県下閉伊郡田野畑村田野畑鉱山に見られる変成層状マンガン鉱床の鉱石中に脈状ピンク色ガラス光沢で産出する菱マンガン鉱です。その空隙には、図のような菱面体の自形結晶で見られることがあります（図-15、横幅5mm）。

図-15 菱マンガン鉱 Rhodochrosite
 MnCO_3 三方晶系



秋田県仙北郡協和町日三市鉱山に見られる銅・亜鉛鉱床の酸化帯に産出するベゼリ石です。結晶形は擬八面体であるが、写真からも二つのピラミッドの底面を合わせたような形態がよくわかります。かつて“荒川石”と呼ばれていたものです（図-16，横幅20mm）。

図-16 ベゼリ石 Veszeleyite
 $(\text{Cu,Zn})_3(\text{PO}_4)(\text{OH})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 単斜晶系



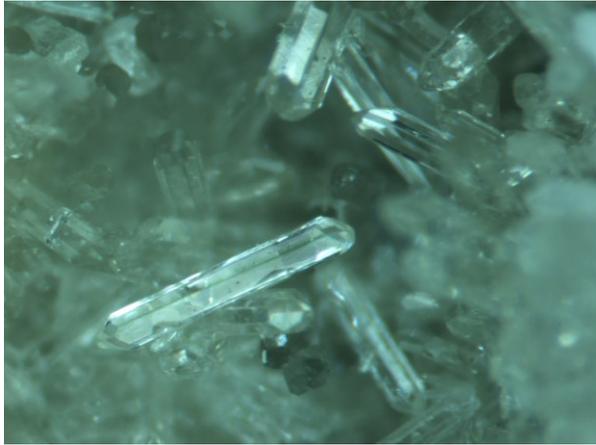
秋田県亀山盛鉱山は、江戸時代から亀山森銅山、鉛山、大倉沢鉛山、そして沢古鉛山という名称で稼行されていました。その鉱山の熱水銅・亜鉛・鉛鉱床の酸化帯に産出し、坑口の周辺のズリ（品位が低く鉱石にならないもの）から、美しい青色の青鉛鉱などが見られました（図-17，横幅2mm）。

図-17 青鉛鉱 Linarite $\text{CuPb}(\text{SO}_4)(\text{OH})_2$ 単斜晶系



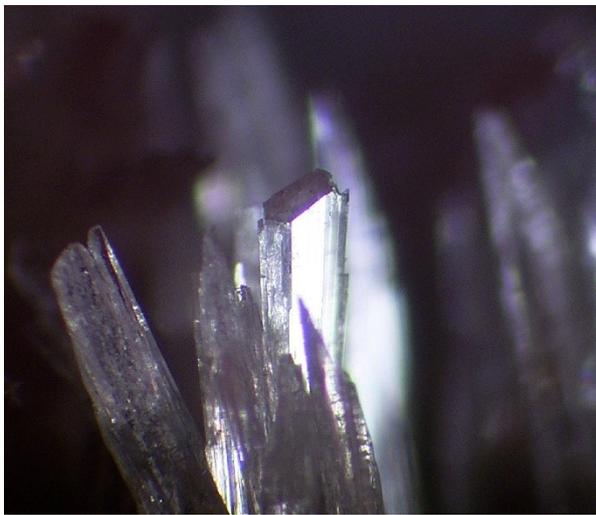
鹿児島県霧島市(旧始良郡)隼人町のデイサイトあるいは流紋岩の空隙に白色の鱗珪石などと共に産出する大隅石は、六角短柱状で産出します（図-18，横幅4mm）。この標本の大隅石は、透明感のある濃い青色を呈しています。その外観から、最初は堇青石と思われていました。

図-18 大隅石 Osumilite
 $(\text{K,Na})(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_2(\text{Al,Fe}^{3+})_3(\text{Si,Al})_{12}\text{O}_{30}$
 六方晶系



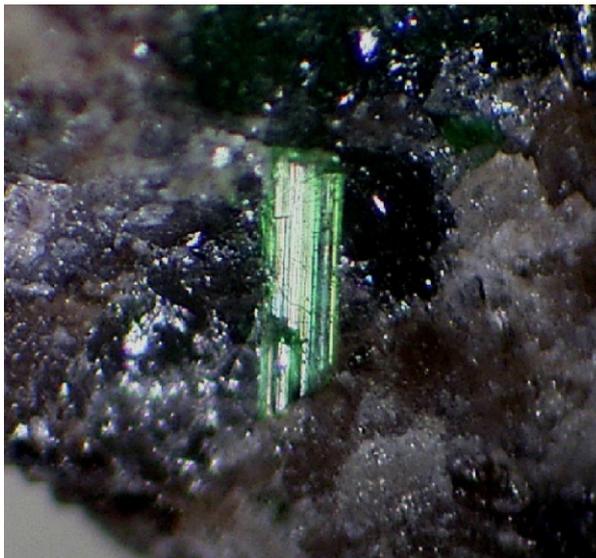
北海道沙流郡日高町沙流川からは、大きさが10cmほどの転石で、ほとんどが白色の透輝石で構成されている岩石がありました。部分的には“日高ひすい”と呼べるような緑色を呈するところもあります。その空隙には無色透明の自形結晶が見られます（図-19、横幅15mm）。

図-19 透輝石 Diopside
 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 単斜晶系



熱水性鉱床中の石英脈の空隙にピンク色透明結晶ガラス光沢の針状～柱状集合体で産出します。その先端はほとんど尖っていますが、稀にこの写真のような結晶面（完全な平面ではなく凹凸がある）を持つものが見られます（図-20、横幅2mm）

図-20 イネス石 Inesite
 $\text{Ca}_2\text{Mn}_7\text{Si}_{10}\text{O}_{28}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 三斜晶



群馬県桐生市上菱茂倉沢鉱山の変成層状マンガニ鉱床中のばら輝石と石英に伴い、鮮緑色ガラス光沢、板状～針状にて産出します。その表面は図のように条線が顕著に見られます（図-21、横幅2mm）。

図-21 鈴木石 Suzukiite
 $\text{Ba}_2\text{V}^{4+}_2\text{O}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$ 直方晶系



鹿児島県垂水市早崎戸柱鼻早咲大橋の橋脚の脇にあった流紋岩の転石の空隙中にガラス光沢黒褐色透明板状結晶で産出します（図-22，横幅 3mm）。同じ空隙には大隈石も見られました。

図-22 鉄橄欖石 Fayalite
 Fe_2SiO_4 直方晶系



奈良県吉野郡天川村の接触交代鉱床中に褐色ガラス光沢で斜方十二面体にて産出します（図-23，横幅 20mm）。稀に表面に綺麗な虹色が見られます。その虹色の原因は、内部の構造（100～300nm 幅の平行なラメラ構造）により、可視光線が干渉するためと考えられています。

図-23 灰鉄石榴石 Andradite
 $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ 立方晶系



長野県小県郡和田村東餅屋和田峠に見られる白色の流紋岩中に透明感のある赤褐色あるいはオレンジ褐色にて満鑿石榴石が産出します（図-24，横幅 2mm）。その流紋岩の風化により、含まれていた満鑿石榴石が抜け、沢に落ちているものを探すとよく見つかりました。現在は採集禁止の看板が立てられています。

図-24 満鑿石榴石 Spessartine
 $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ 立方晶系



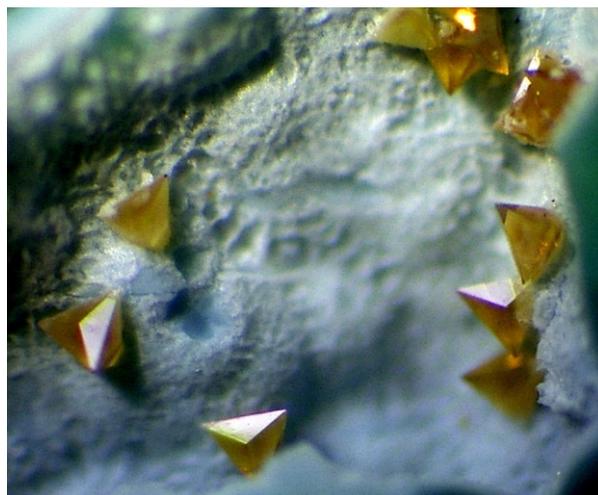
茨城県桜川市真壁町山ノ尾では、かつて数多くの花崗岩の石切場がありました。そこには緑柱石や鉄礬石榴石・長石類などの綺麗な自形結晶が見られました。また、図のような六角柱状オレンジ色の鉄礬石榴石56%、満礬石榴石44%の単結晶が産出しました。柱状の石榴石は極めて希な形態です（図-25、結晶の大きさ0.2mm）。

図-25 鉄礬石榴石—満礬石榴石 Almandine-Spessartine $(\text{Fe}_{0.56}\text{Mn}_{0.44})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ 立方晶系



山梨県南都留郡富士河口湖町長浜に見られる玄武岩質の変質凝灰岩中に貫入する石英安山岩の岩脈中に赤褐色ガラス光沢粒状で鉄礬石榴石が産出します。希に美しい偏菱二十四面体として見られます（図-26、横幅10mm）。

図-26 鉄礬石榴石 Almandine $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ 立方晶系



福島県相馬郡飯館村高倉鉱山の鉱床中に自然銅、輝銅鉱、斑銅鉱、黄銅鉱、赤銅鉱、磁鉄鉱、針鉄鉱、孔雀石、珪孔雀石、灰鉄石榴石、緑簾石などが見られ、珪蒼鉛石は、孔雀石、珪孔雀石の割れ目に黄色透明微細結晶で産出します（図-27、横幅2mm）。

図-27 珪蒼鉛石 Eulytite $\text{Bi}_4(\text{SiO}_4)_3$ 立方晶系



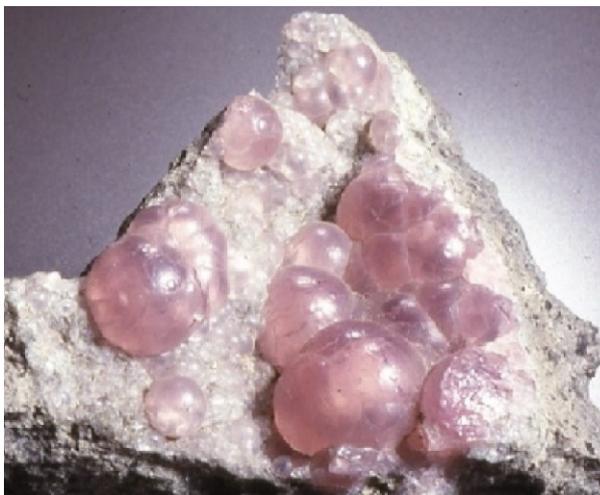
茨城県東茨城郡城里町高取鉱山は、八溝層群（ペルム紀～白亜紀）の砂岩・チャート・頁岩中に胚胎した熱水の鉱脈から、タングステン・錫・銅などを採掘していました。トパーズは、脈石鉱物である石英の脈の中から、螢石や白雲母などに伴って産出します。柱状の縦の方向に見られる条線が特徴です（図-28、横幅2mm）。

図-28 トパーズ Topaz
 $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$ 直方晶系



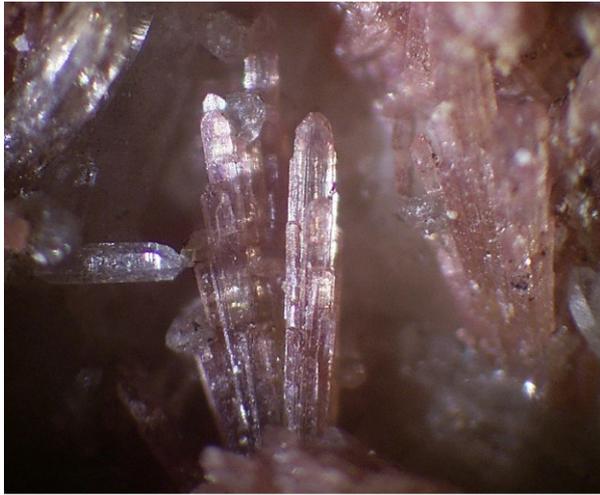
山梨県南巨摩郡早川町に見られる長石類の表面に緑泥石・濁沸石・石英などと共に黄色透明楔状の樹脂光沢で産出します（図-29、横幅2mm）。

図-29 チタン石 Titanite
 CaTiSiO_5 単斜晶系



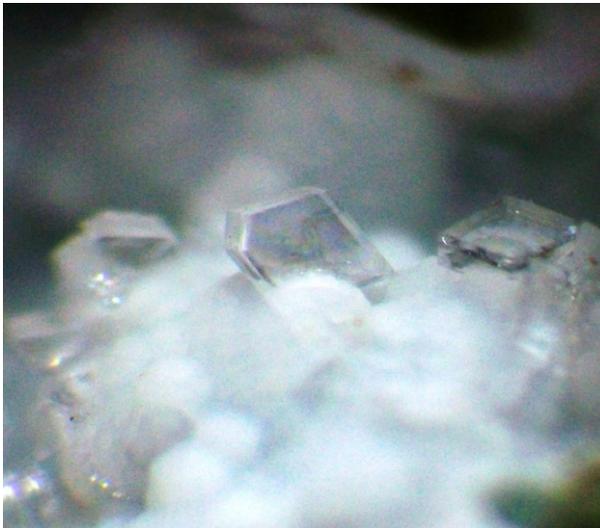
愛媛県浮穴郡久万町槇野川に見られる安山岩の空隙中に淡紫色透明結晶ガラス光沢の集合体にて産出します。球がいくつも集合した形態、いわゆる葡萄状で、別名をボトリオ石 (Botryolite) と呼ばれます。板状に見える無色～白色の共生鉱物は輝沸石です（図-30、横幅10cm）。

図-30 ダトー石 Datolite
 $\text{CaBSiO}_4(\text{OH})$ 単斜晶系



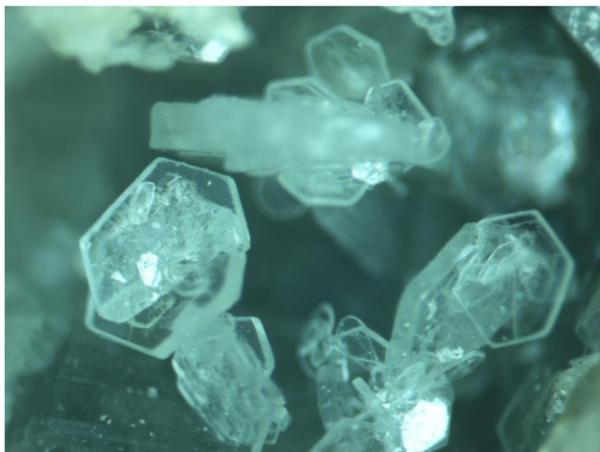
長野県小県郡真田町入軽井沢から、空隙中に柱状でピンク色の色調を呈し、“桃簾石”とも呼ばれているものを産出します（図-31，横幅6mm）。信濃鑛物誌（八木貞助著，大正12年刊）に「黝簾石 Zoisite は，緑簾石と共に流紋岩中に含有せらるるものにして，かつて紅簾石と称せられしものなり」と記されています。

図-31 単斜灰簾石 Clinozoisite
 $\text{Ca}_2\text{AlAl}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$ 単斜晶系



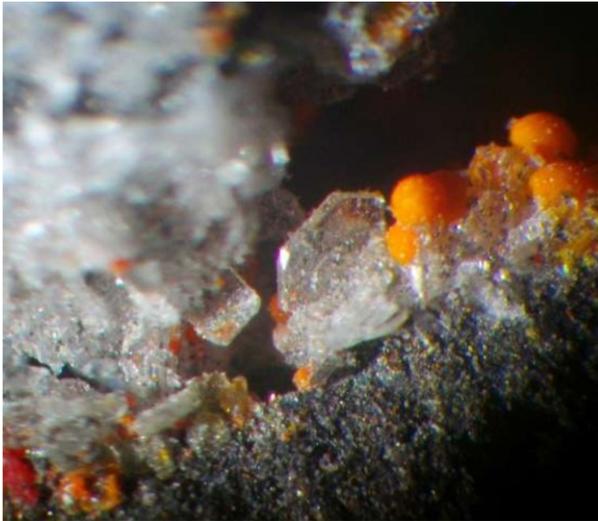
静岡県賀茂郡河津町菖蒲沢海岸から，変質した安山岩に青緑色のセラドン石に覆われた空隙中に白色の沸石類，方解石，魚眼石などが見られます。その空隙の一つには，透明板状ガラス光沢で灰輝沸石が観察できます（図-32，横幅6mm）。

図-32 灰輝沸石 Heulandite-Ca
 $(\text{Ca}_{0.5}\text{Na,K})_9[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}] \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
単斜晶系



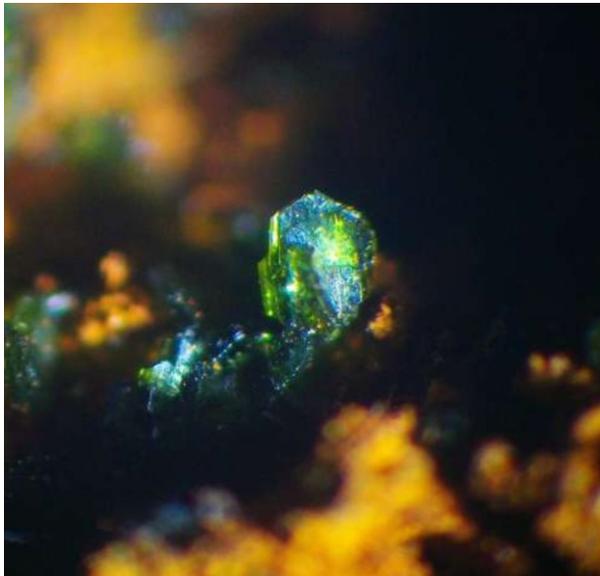
埼玉県秩父市中津川秩父鉱山から，灰鉄石榴石の空隙中に薄青色六角板状でクリントン雲母が見られます（図-33，横幅4mm）。前述のように同様な産状にて青色のスピネルも産出されます。

図-33 クリントン雲母 Clintonite
 $\text{CaMg}_2\text{Al}(\text{Al}_3\text{Si})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 単斜晶系



沖縄県粟国島沖には，熱水により変質した岩石中に脈状で重晶石が見られます．図のように空隙には無色透明な重晶石の板状結晶が，同じ空隙には赤色の鶏冠石や黄色の雄黄などのような砒素を含む鉱物が見られます（図-34，横幅5mm）．

図-34 重晶石 Barite BaSO_4 直方晶系



山口県美祢郡美東町喜多平鉱山の鉱床中の酸化帯に見られるオリーブ銅鉱は，茶色の粉末状，いわゆる褐鉄鉱の空隙に黄緑色ガラス光沢で板状結晶にて産出します（図-35，横幅3mm）．

図-35 オリーブ銅鉱 Olivenite
 $\text{Cu}_2\text{AsO}_4(\text{OH})$ 単斜晶系



千葉県南房総市荒川から，約1,800万年前の保田層群（泥岩，凝灰岩，砂岩，礫岩などで構成されている）の砂岩中の石英脈や方解石脈の空隙に，ほとんどのものは双晶のため六角板状で透明結晶として産出します（図-36，横幅4mm）．結晶構造中に，有機物のメタン，エタン，プロパン，ブタンを含みません．

図-36 千葉石 Chibaite
 $\text{SiO}_2 \cdot n(\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10})$ ($n < 3/17$)
立方晶系

2. 鉱物について

・ 鉱物とは

地球の誕生と鉱物

今から137億年前にビッグバンと呼ばれる、大きな出来事があり、45億6700万年前（約46億年前）に地球を含む太陽系が誕生しました。その地球には、さまざまな鉱物が見られ、それら鉱物を構成している元素は、次のように生成したと考えられています。

最初に、炭素（C）、酸素（O）、窒素（N）、リン（P）、硫黄（S）、マグネシウム（Mg）、珪素（Si）、鉄（Fe）、アルミニウム（Al）及びカルシウム（Ca）などのような元素が生まれ、鉱物としてはダイヤモンド（diamond）・石墨（graphite）・コランダム（corundum）・橄欖石（カンラン石：olivine）、モアッサナイト（moissanite）などが生成しました。コンドライト（chondrite：コンドリュール（chondrule）と呼ばれる球状の粒子（球粒）を含んだもの）やエイコンドライト（achondrite：球粒を含まないもの）と呼ばれる隕石も同時期に生成しました。

月については、アメリカのアポロ計画によって持ち帰った岩石を調べてみると、地球とほぼ同じ年代に生成したことがわかりました。そこで、45億年前に別な天体が地球に衝突し、地球の一部がめくり上がり、宇宙空間にまで到達した結果、月が誕生したと考えられています。最初の月は2万4千 Km の距離にあり、現在では38万 Km の距離まで遠ざかりました。そして、今でも1年に3.8cmずつ離れています。

私たちの住んでいる地球は、当初、数種類の鉱物しか見られませんでした。地球の質量の98%が、酸素（O）、珪素（Si）、アルミニウム（Al）、鉄（Fe）、マグネシウム（Mg）及びカルシウム（Ca）で構成されていました。最古の岩石は、カンラン岩であり、その構成鉱物はカンラン石（ $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ ）です。この岩石は、地表から80Km以内で生成され上昇してきたものであり、わが国でも北海道様似町の幌満周辺など数カ所で見つかっています。地球の内部は、表面の地殻から下をマントルと呼び、さらにその下（中心）が核です。核は内核と外核に分かれています。それらの主成分は鉄（Fe）です。

44億年前の冥王代と呼ばれる時代になると隕石が降り、砕けた岩石やマグマが地表を覆っていました。最初に生成したカンラン岩の一部が溶けて玄武岩が生成し、その薄い層が表面をおおうようになります。岩石に含まれるジルコンを調べると10回以上もリサイクルされていることが分かっています。一度生成した鉱物が溶融して、その後再び成長して別な岩石に取り込まれるということが、何回もあったということです。

40億年前になると地球は水（ H_2O ）で青かったと考えられています。大陸は、玄武岩（basalt）が溶けて花崗岩（granite）となり、全体的には灰色に見えたかも知れません。当然ながら植物は生えていません。地球の磁場も変化しています。大西洋の海嶺の拡大と大陸移動、マントル内の上昇流（プルーム）が生じ、ホットスポットと沈み込み帯が発生します。大気中に酸素は未だありませんでした。

35億年前にようやく生命が誕生します。初期の生命体は、岩石の化学エネルギーに頼り、太陽光を利用した光合成が行われていたことでしょう。酸素を生成する光合成も生じ、緑藻

類が進化して酸素が増えてきます。

30億年前にはブラック・チャート (black chert) や炭素の多い黒色頁岩 (black shale), ストロマトライト (stromatolite) が見られるようになり, 超大陸サイクルと呼ばれるように大陸が移動して沈み込み, 再び上昇して陸地化することを繰り返して起こるようになります。

25億~5億4千2百万年前の原生代には, 最初の約5億年で光合成を行う藻類が繁茂し, 酸素が増えることで, 3,000種の鉱物が生成したとみられています。

生物が元素を集め, それによって新しい鉱物も生成したと思われます。スノーボールと呼ばれる, 地表が氷で覆われたこともあったと考えられています。さらに陸上には生物圏が出現してきます。

巨大生物の代表例だった恐竜は, 直径が約10Kmの小惑星(隕石)がユカタン半島に落下し, 気候変動が起こり, さらに大規模な噴火などの地殻変動により絶滅したと見られています。その後, 哺乳動物が進化し, ヒトの誕生によって現在に至ります。

地球上では, 5,829種(2022年9月27日, 現在)の鉱物が知られています。地球からの贈り物である鉱物は, 宝石のように研磨・加工したのから, 鉱山で鉱石として採掘し, 精錬して鉄や金などが活用されることで私たちの生活が豊かになりました。今後も鉱物を利用することは間違いないでしょう。ただし, かつての鉱山のように, 自然破壊を大きく伴う採掘は避けねばなりません。自然になるべく負荷をかけず, 環境に十分配慮した鉱物の採掘や利用が望まれます。

鉱物との関わり

自然界のもの(物)を, 動物・植物・鉱物と分類することがありますが, その鉱物については, 中国の「本草綱目」(1590)や, わが国の「和漢三才図会」(1713)などから分るように, かつて金石と呼ばれていました。明治期の小学校の教科書でも鉱物という表現は見られず, 金石と書かれています。

鉱物は, 1867(慶応3)年に出版された日本最初の和英辞典とされる「和英語林集成」



図2-1 「和英語林集成」
(明治学院大学図書館蔵)

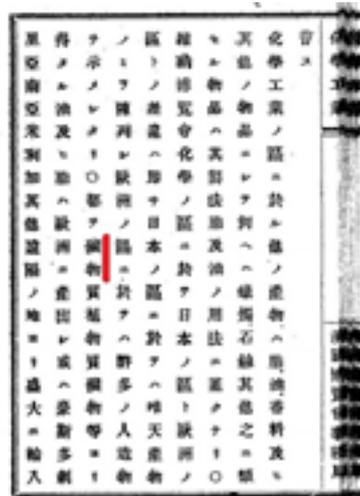


図2-2 「奥国博覧会報告書」
(国立国会図書館蔵)

(通称ヘボン辞書)では, Mineralの訳が, 礦物となっています(図2-1)。また, 1873(明治6)年に開催されたウィーン万国博覧会に派遣された富田淳久が, 1875年に著した「奥国博覧会報告書」にも, Mineralの訳としても礦物が使われています(図2-2)。これらから, 江戸時代末期に, 礦物が使われていたことが分かります。

また, 現在の鉱物学 (Mineralogy) という名称は, 前出の通称ヘボン辞典の再版(1822)に礦物学と紹介されて

います。当時、礦物と鑛物は同じように使われていたようです。

明治17(1884)年に著した教科書「金石學一名鑛物学」(小藤文次郎著)とあるように、当初は金石学という名称で教えていたことが分かります。この本には鉱物という単語が頻繁に出てきます。その内容は明らかに鉱物学でしたが、金石学としていたのは、当時は金石という名の方がよく使われていたからでしょう。この1年後に「鉱物学初歩」という本が出版されていることから、正式に鉱物学として教えたのは、明治18(1885)年以降でしょう。

金石は、金や銅・鉄などの有用な金属を含んだ鉱物の総称であり、鉱物の一部とみなすことができます。鉱山から採掘された鉱物は、砕いて製錬して目的の金・銅・鉄などを効率的に取り出すことになり、その鉱物名はあまり意識されません。明治時代の近代化にとって必要だった鉱物は、別な用途もあります。それは美しい鉱物に人は神秘的な超自然の畏敬の念を感じ、崇拜物や護身符として使われてきたのです。鉱物を粉末にしたものを身体に塗り、古代バビロニア、ペルシャ、アッシリアなどでは鉱物を加工して印章などにも使用されました。その後、中世からルネッサンスの頃には、神の偶像や王位や貴族のような特権階級の持ち物や富の象徴としても用いられ、近代になると宝飾品(以下、宝石)として一般大衆にも広まりました。

宝(寶)石という表現は、前出の「本草綱目」にも登場しています。さらに「和漢三才図会」では玉石類の中でも紹介されていますが、津軽(青森)地方の石に使われていました(図2-3)。この石は、現在では石英の微小結晶の集合体である瑪瑙^{めのう}と思われます。これが現在のような意味として使われるようになるのは、「地學雑誌」(1889)で、和田維四郎氏が、美しい鉱物である Gem の訳を、寶(宝)石として紹介したことから始まります。



図2-3 「和漢三才図会」
(国立国会図書館蔵)

さて、玉については、三種の神器(鏡, 玉, 剣)の一つとされていて、鏡を“太陽”, 玉を“月”, 剣を“武”とし、それぞれ天照大神(あまてらすおおかみ), 月読命(つくよみのみこと), 須佐之男命(すさのおのみこと)になぞらえています。また、鏡は“知”, 玉は“仁”, 剣は“勇”を意味しているとも言われています。この玉は、かつて諸外国との贈り物として、ふるくは魏志倭人伝(「三国志」(280年頃?)では、青玉として記載されています(図2-4, 青線部参照)。この青玉とは、現在の新潟県糸魚川産の翡翠(ヒスイ)と考えられています。

鉱物以外にも生物起源の珊瑚や真珠も宝石として使われています。前出の「三国志」にも真珠が書かれています(図2-4, 赤線部参照)。

このような宝石は、傷つけることなく調べる必要があったため、その研究手法はかなり限られたものでした。しかし、最近の分析機器の発達のお陰で、非破壊によって調べることができるようになっ



図2-4 「三国志」
(国立国会図書館蔵)

てきました。宝石に傷をつけることなく、その特徴を調べることを“宝石鑑別”と呼び、透明な鉱物の場合は、主としてルーペや実体顕微鏡などが使われます。暗視野照明と呼ばれる下からライト・アップして宝石内部を照らすようになっている専用の顕微鏡もあります。このような顕微鏡で観察すると、屈折率の異なる気泡（bubble）と固体（結晶：crystal）の見え方が異なります（図2-5）。屈折率が低い気泡は、中心部が明るく、周囲が暗く見えることとなります。自然界に産出する宝石に気泡が見えるということは、ほとんどないため、気泡が含まれると人工的につくられた合成物やガラスの疑いがあります。

一方、自然に生成する宝石（鉱物）は地下からの熱水あるいはマグマから成長するため、水や他の結晶などを取り込むことはあっても気泡が単独には含まれることはないと考えられます。例えば、コロンビア産の緑色のベリル（宝石名はエメラルド）には塩水や岩塩などが含まれています。

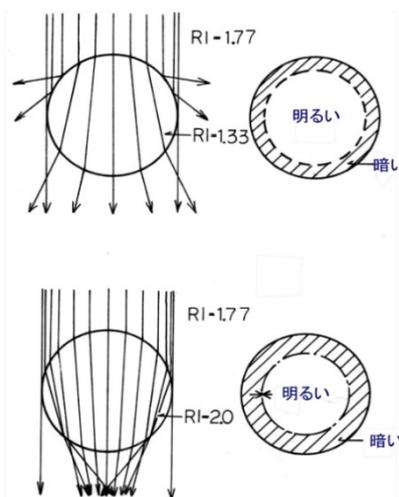


図2-5 結晶内部の屈折率(RI)の違いによる見え方のモデル

間違えられていた宝石

・ルビーが実はスピネル 英国のエリザベスⅡ世が議会開会式に着用する冠の中心部にある”黒太子のルビー（Black Prince’s Ruby）”と呼ばれる赤い宝石が、実はルビーではなくスピネルであったという有名な話があります。現在では、ルビーはサファイアと同じコランダム（Corundum）と呼ばれる鉱物で、和名をコウギョク（鋼玉）と言って、化学的にはアルミニウムと酸素が2対3の割合に結びついています。スピネル（Spinel）はマグネシウムが含まれていてコランダムとは明らかに異なる鉱物です。しかし、コランダムの屈折率は1.77～1.76、スピネルは1.72と近いため、肉眼的には極めてよく似ています。

・展示されていたトパーズ（黄玉）はシトリン（黄水晶） 著名な画家（芸術家）”ダリ”が、宝石を使用した作品を制作し、展示されていたことがありました。その作品にはトパーズを使用していると説明されていましたが、よく見ると、トパーズ（Topaz：黄玉）ではなく、シトリン（Citrine：黄水晶）の原石（磨いてないもの）を輪切りにしたものでした。トパーズとシトリンは、ともに黄褐色の宝石でよく似ています。しかし、トパーズとシトリンの原石は、肉眼鑑定力のある方なら、すぐに区別がつくでしょう。即ち、原石表面の結晶面（柱面）に条線と呼ばれる筋が縦にあるのがトパーズで、横に見られるのはシトリンです。

誕生石について

宝石は鉱物のなかでも綺麗な外観を示す特殊例と言うべきものですが、わが国では、誕生石（表2-1）として身近なものになっています。この誕生石は1912年にアメリカの宝石業者の団体が定めたもの（1952年に修正）が基となって決められています。また、2021年12月20日には、誕生石の改訂が行われ種類が増えました。

鉱物の硬さ

鉱物の硬さはモースの硬度 (Mohs's scale of hardness) という数字 1 ~ 10 で表されます。モース (Mohs) が最初に提唱したものは、普通に産する層状の滑石 (Talc) が 1, 結晶面が見られない岩塩または石膏 (Gypsum) が 2, 透明な方解石 (Calcite) が 3, 結晶面が見られる蛍石 (Fluorite) が 4, 透明な燐灰石 (Apatite) が 5, 白色で割れやすい長石 (Feldspar) が 6, 透明な石英 (Quartz) が 7, 透明なトパーズ (Topaz) が 8, コランダム (Corundum) が 9, そして最も硬度が高いダイヤモンド (Diamond) が 10 としました。後に 1840 年頃, ブライトハウプト (Breithaupt) が, 2.5 に葉片状の雲母, 5.5 に結晶面のある柱石を加えました。現在のように硬度 2 が石膏だけになったのは 1870 年頃以降になります。岩塩は潮解性があり, 取り扱いしにくいからです。

一般的にはモース硬度 7 以上が硬いものということになります。

鉱物はどの位の時間で成長する？

私たちが観察している鉱物は, 実際に成長している姿を見ることはできません。しかし, 噴火している火山から流れ出た溶岩が冷えた岩石は, 私たちは観察することができます。溶岩が冷えて固まった岩石を観察すると, その中には数種類の鉱物 (輝石類・長石類・石英など) が含まれていることが分ります。そのような溶岩が冷えて鉱物が成長した時間は, どの位の時間でしょうか？

直接, 溶けている岩石を調べればよいのですが, 試料を採取するのは大変危険であり, 溶けた状態では分析機器が使いません。そこで, 岩石を構成している鉱物の生成条件 (温度や圧力) を調べるため, 適当な化学薬品を使って人工的に鉱物と同じものをつくる実験が行われています。このような実験から, 自然界の鉱物も同じように生成したと考えるわけです。現在まで, 様々な鉱物が何度位で生成するのか, かなりわかっていますが, これらは実験室内において容器の中で薬品を使って行うので, 自然界とは異なる環境ということを念頭に置く必要があります。また, 鉱物を生成する時間も, 私たちが確認できるような数時間~数日程度で出来れば問題ありませんが, 1 年後とか, あるいはそれ以上の時間がかかるとなると, 学生が実験している場合は卒業してしまうこともあるでしょう。

さて, 自然界では溶岩が火口から噴火して飛び出して急激に冷えると, 細長い形状 (“ペレーの涙” と呼ばれています) のガラス (主成分 SiO_2) になります。石英 (SiO_2) のような鉱物が生成するには, ある程度の時間がかかるようです。石英は, 水 (H_2O) を使ってオートクレーブ (autoclave) と呼ばれる圧力釜のような装置で造っています。最近の研究では, 水の存在が鉱物の生成に大きく関わっていることがわかっています。

溶岩は数日から 1 ヶ月位かけて固まります。その固まった岩石にみられる鉱物 (輝石類・長石類など) は, その程度の時間で成長するのでしょうか? いくつかの鉱物は, 既に地下のマグマ (magma) の中で生成していたとみられています。そのマグマは大きな塊として存在し, 地下数 Km のところから地表まで上昇し, 数十万年かけて固まるとされています。そのマグマの中心部では, 比較的大きく, 周縁部はより小さい鉱物が生成しているとみられます。これは, 地層に貫いたマグマが冷えた岩脈 (dike) を観察すると, 周縁部 (地層との

境目)には急冷周縁相(chilled margin)と呼ばれる,中心部より細粒な(小さい)鉱物がみられることから,温度が下がりやすい周縁は小さくなることがわかります。

また,鉱物が生成するのは,構成している元素が集まって結合するための濃度と共に温度や圧力が必要です。温度については,1,200°C位まで熱すると岩石は溶けてマグマとなります。地下1kmごとに約30°Cずつ温度が高くなるとすれば地下40kmに相当する温度です。一方,圧力については,石墨に約6万気圧(地下百数十km)を加えるとダイヤモンドに変わりますが,この場合でも約2,000度という温度が必要です。地下のマントル(mantle)を構成している鉱物のカンラン石($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$)の場合は,原料のマグネシウム(Mg),鉄(Fe),珪素(Si)及び酸素(O)を混ぜて圧力を加えると,マグネシウム,鉄及び珪素は金属(固体)として存在していますので,気体の酸素と結びついて酸化物(MgO , Fe_2O_3 及び SiO_2)が出来そうです。実際にカンラン石を造る場合,マグネシウム,鉄,珪素及び酸素の四元素が結びつくには高温(約1,900度)が必要です。一度生成した鉱物(固体)は,多少の圧力では変化しません。ただし,結晶構造が変わることがあります。これを相転移と呼びますが,石墨がダイヤモンドに変わるのは,その例です。宇宙空間で生成した元素が集まって新たに鉱物ができる場合,前述のように様々な条件(圧力と温度)が必要です。

地表に噴出する時は,溶岩が流れて鉱物が揃って縞状となってみられることを流理構造(flow structure)と呼びますが,これは火山岩(volcanic rocks)の特徴です。地表に流れ出ず,地下で冷えて固まると比較的大きな鉱物が集まります。これを深成岩と呼び,花崗岩がその例です。また,一度できた岩石が,雨風の影響(風化)で崩れて細かくなって川や海などに流れて集まり,1,000~2,000万年かけて固まったものが,恐竜の化石などが含まれる堆積岩です。各種の岩石が,後からの圧力や熱(マグマ)により変質したものを変成岩と呼びます。この変質は何回も行われることがあります。ジルコンという鉱物の成長の履歴を調べると10回もリサイクルされていることが知られています。この成長履歴は,含まれる同位体を利用して調べられます。

同位体を使った年代測定

種々の同位体を使った年代(絶対年代)測定があります。これは,同位体が,時間の経過と共に元とは異なる元素に変わるという特性を利用します。

例えば,数千万年より古い時代を調べるためには,ルビジウム(Rb),カリウム(K),サマリウム(Sm),ウラン(U)が,ストロンチウム(Sr),アルゴン(Ar),ネオジウム(Nd),鉛(Pb)に変わる比率から時間(年代)を求めます。

このような元素が含まれていないと利用できませんが,ウラン(U)が含まれているジルコン(zircon)という鉱物には,ウラン-鉛(U-Pb)法と呼ばれる年代測定が行われます。ウランの同位体に ^{238}U (ウラン238:半減期約45億年)と ^{235}U (ウラン235:半減期約7億年)の二種類があります。これらが,時間の経過と共に,それぞれ ^{206}Pb (鉛206)と ^{207}Pb (鉛207)になります。これらの比率から求めた年代は同じはずなので,それらの結果を比較すれば精度も向上します。

表 2-1 誕生石として使われる宝石の一例

月	日本	象徴とされる例	アメリカ	イギリス	オーストラリア
1月	ガーネット	貞操・真実・友愛	ガーネット	ガーネット	ガーネット
2月	アメシスト, クリソベリル・キャッツアイ	誠実・心の平和	アメシスト	アメシスト	アメシスト
3月	アクアマリン, 珊瑚, ブラッド・ストーン, アイオライト	沈着・勇敢・聡明	アクアマリン, ブラッド・ストーン	アクアマリン, ブラッド・ストーン	アクアマリン, ブラッド・ストーン
4月	ダイヤモンド, モルガナイト	清浄無垢	ダイヤモンド	ダイヤモンド 水晶	ダイヤモンド, ジルコン
5月	エメラルド, ひすい	幸福・幸運	エメラルド	エメラルド, クリソプレーズ	エメラルド, グリーン・トルマリン
6月	真珠, ムーンストーン, アレキサンドライト	健康・長寿・富	真珠, ムーンストーン	真珠, ムーンストーン	真珠
7月	ルビー, スフェーン	情熱・仁愛・威厳	ルビー	ルビー, カーネリアン	ルビー, カーネリアン
8月	サードオニキス, ペリドット, スピネル	夫婦の幸福・和合	ペリドット, サードオニキス	ペリドット, サードオニキス	ペリドット, サードオニキス
9月	サファイア, クンツァイト	慈悲・誠実・徳望	サファイア	サファイア, カース・ラズリ	サファイア, カース・ラズリ
10月	オパール, ピンク・トルマリン	安楽・希望・忍耐	オパール, ピンク・トルマリン	オパール	オパール
11月	トパーズ, シトリン	友情・潔白・幸福	トパーズ, シトリン	トパーズ	トパーズ
12月	トルコ石, ラピス・ラズリ, タンザナイト, ジルコン	成功・繁栄・不屈	トルコ石, ジルコン	トルコ石	トルコ石

結婚記念に使われる宝石の一例

1年	紙
5年	木
10年	錫
12年	瑪瑙
15年	水晶
20年	陶器
25年	銀
30年	真珠
40年	ルビー
45年	アレキサンドライト
50年	金
75年	ダイヤモンド

星座別の守護石とされる宝石の一例

牡羊座 (3/21~4/20)	ブラッド・ストーン
牡牛座 (4/21~5/21)	サファイア
双子座 (5/22~6/21)	アゲート (瑪瑙)
蟹座 (6/22~7/23)	エメラルド
獅子座 (7/24~8/23)	オニキス
乙女座 (8/24~9/23)	カーネリアン
天秤座 (9/24~10/23)	ペリドット
蠍座 (10/24~11/22)	アクアマリン
射手座 (11/23~12/22)	トパーズ
山羊座 (12/23~1/20)	ルビー
水瓶座 (1/21~2/19)	ガーネット
魚座 (2/20~3/20)	アメシスト

2章のまとめ：

次の鉱物を観察し、その特徴を挙げなさい。

- トパーズ（ ）,
- 石英（水晶）（ ）,
- オパール（ ）,
- 正長石（ ）,
- 斜長石（ ）,
- 蛍石（ ）,
- 方解石（ ）,
- 霏石（ ）,
- 重晶石（ ）,
- 石膏（ ）,
- 滑石（ ）,
- 黄銅鉱（ ）,
- 黄鉄鉱（ ）,
- 班銅鉱（ ）,
- 赤銅鉱（ ）,
- 赤鉄鉱（ ）,
- 自然銅（ ）,
- 自然金（ ）,
- 硫黄（ ）,
- 石墨（ ）,
- 方鉛鉱（ ）,
- 閃亜鉛鉱（ ）,
- 磁鉄鉱（ ）,
- 鉄礬石榴石（ ）,
- 苦土カンラン石（ ）,
- 普通輝石（ ）,
- 苦土普通角閃石（ ）,
- 孔雀石（ ）,
- 藍銅鉱（ ）,
- 鉄電気石（ ）,
- 黒雲母（ ）,
- 濁沸石（ ）,
- 菱沸石（ ）,
- バラ輝石（ ）,

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（Hexagonal 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、自然金や螢石など、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。

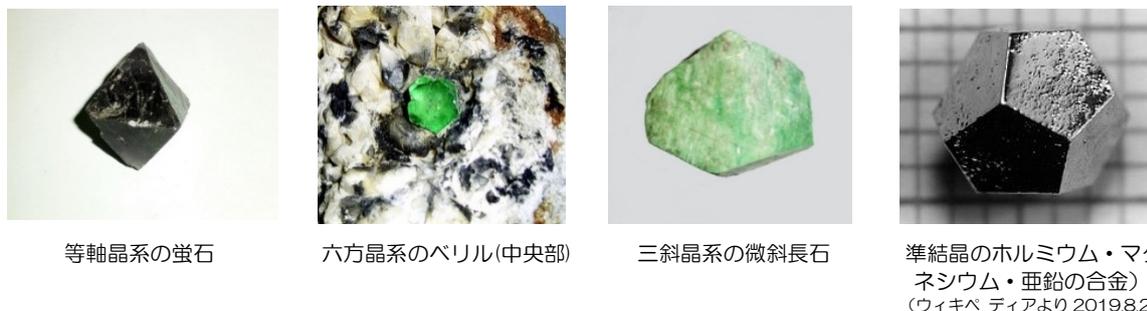


図 3-1 結晶系の代表的な鉱物と準結晶の形態

七つの結晶系

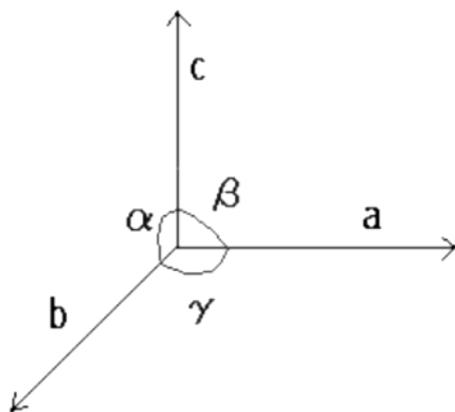


図3-2 結晶軸 (a, b, c) と軸角 (α , β , γ)

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

$$\alpha = \beta = \gamma = 90 \text{ 度}, \quad a_1 = b_1 = c_1$$

立方体の結晶が，この晶系になります。

B) 正方晶系

$$\alpha = \beta = \gamma = 90 \text{ 度}, \quad a_1 = b_1 \neq c_1$$

C) 直方 (斜方) 晶系

$$\alpha = \beta = \gamma = 90 \text{ 度}, \quad a_1 \neq b_1 \neq c_1$$

直方体の結晶が，この晶系になります。

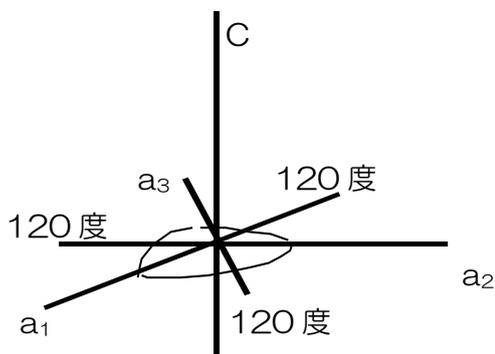
D) 単斜晶系

$$\alpha = \beta = 90 \text{ 度}, \quad \gamma \neq 90 \text{ 度}, \quad a_1 \neq b_1 \neq c_1$$

E) 三斜晶系

$$\alpha \neq 90 \text{ 度}, \quad \beta \neq 90 \text{ 度}, \quad \gamma \neq 90 \text{ 度}, \quad a_1 \neq b_1 \neq c_1$$

F) 三方晶系 (六方晶系)



$a_1 \wedge a_2 = a_2 \wedge a_3 = a_1 \wedge a_3 = 120 \text{ 度}$, $(a_1, a_2, a_3) \perp c$, $a_1 = a_2 = a_3$
 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。

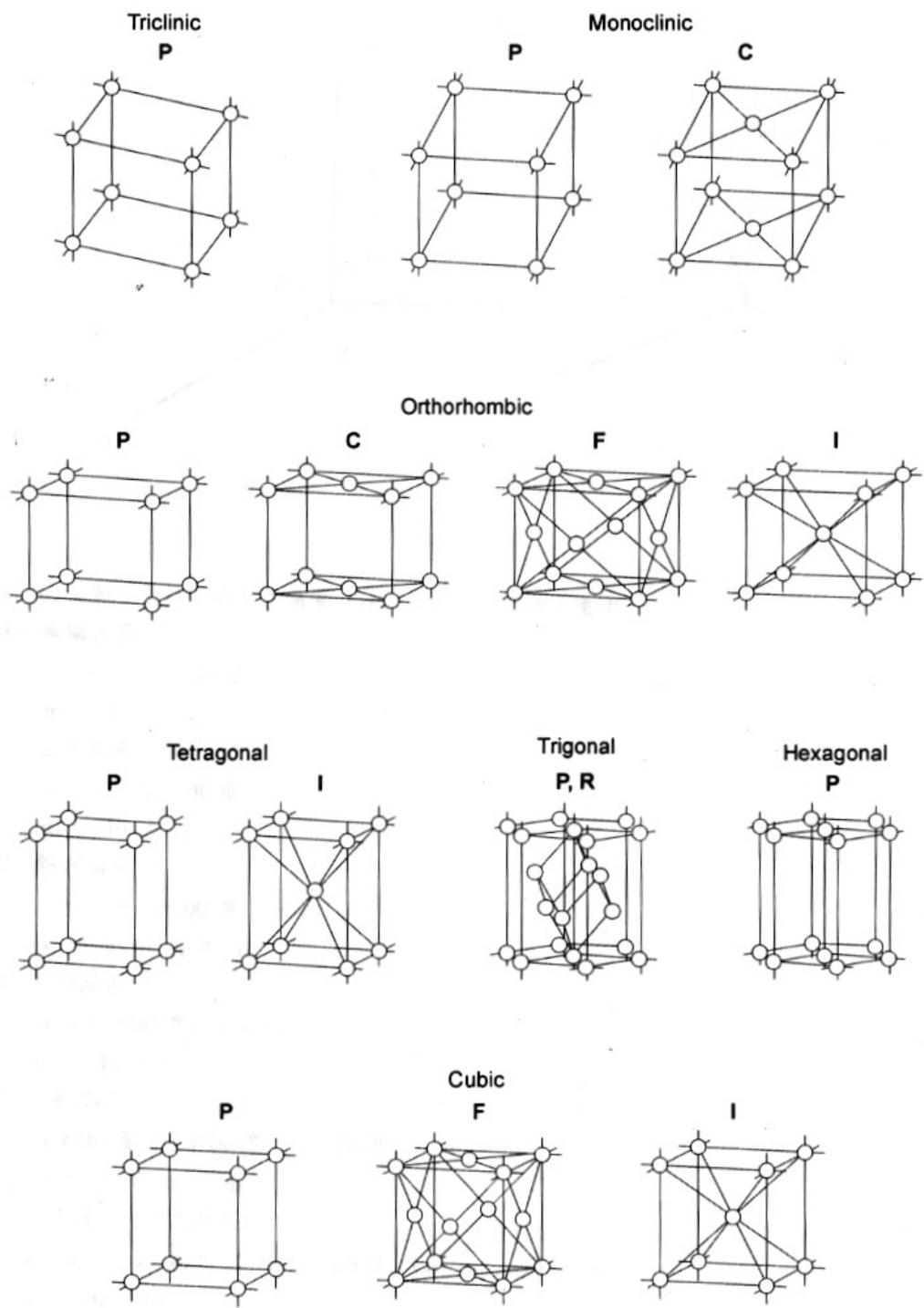


図3-3 14のブラヴェ (Bravais) の空間格子と呼ばれる結晶構造 (Strunz,2001)

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 北海道イトムカ産自然水銀（中央の銀箔色）

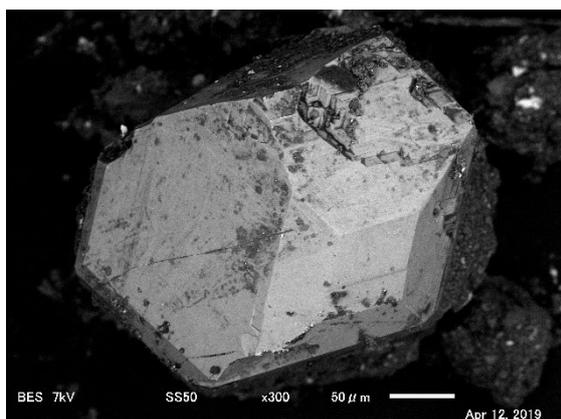


図2-6 石榴石の結晶表面（左）をさらに中央部の三角形を拡大すると並行な成長模様が見られる（右）

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(001)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/∞)(1/∞)) = (100)、a-c面に平行な場合は((1/∞)(1/A)(1/∞)) = (010)、a-b面に平行な場合は((1/∞)(1/∞)(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。

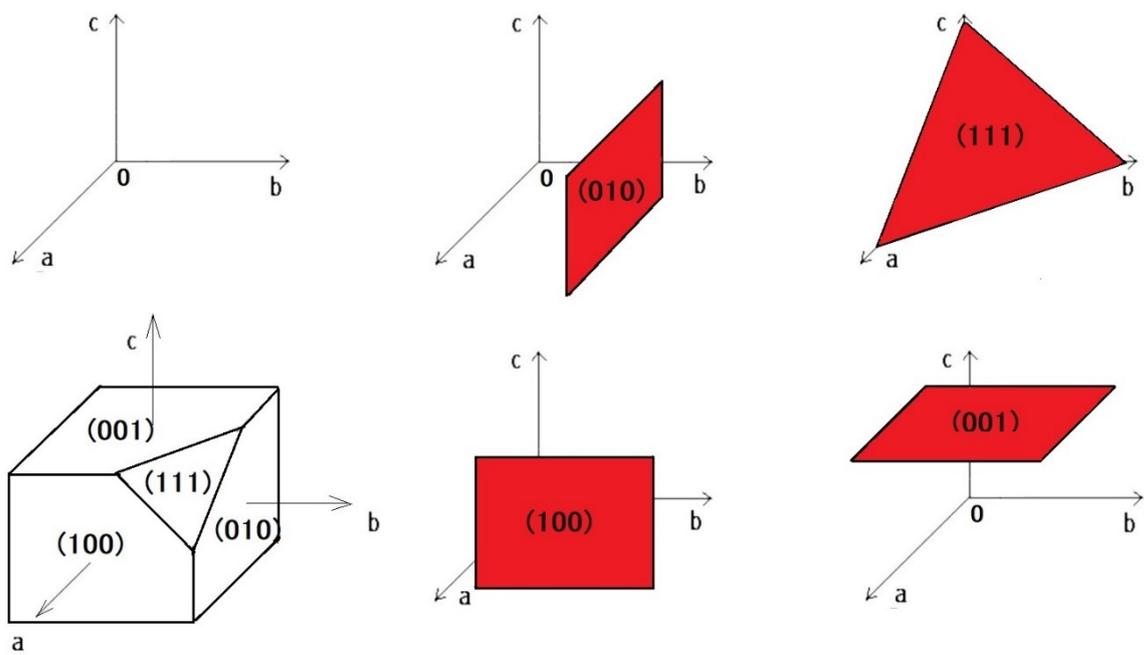


図3-7 左下の形態の平面をミラー指数で表す

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0.2mm×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つ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、 $(\text{Fe,Mn})_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 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 Al 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（ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ）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することができます。

アルミニウム (Al) 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 (Al) 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 Al 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)

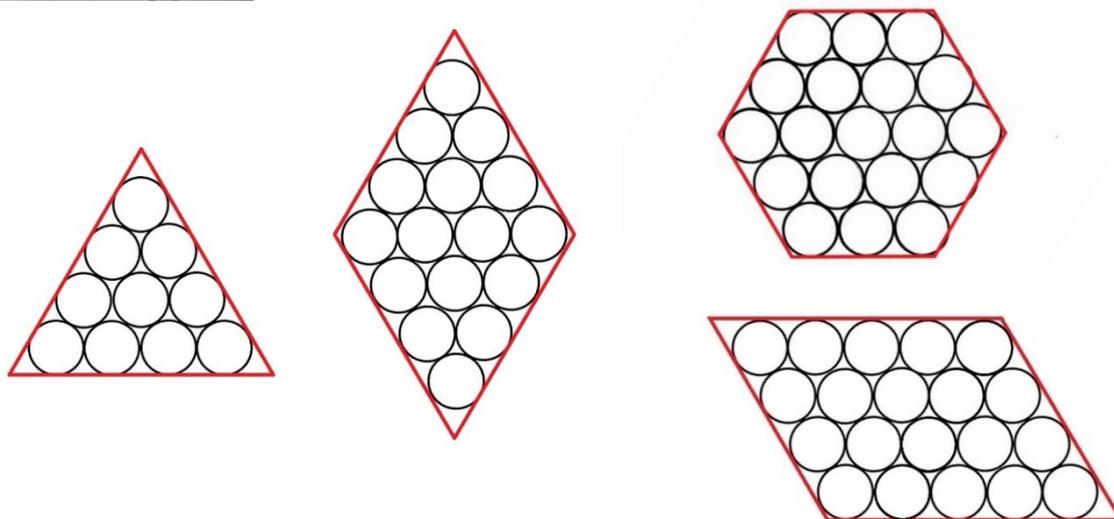


図3-9 三角形 (左上), 菱形 (中上), 六角形 (右上), 平行四辺形 (右下)

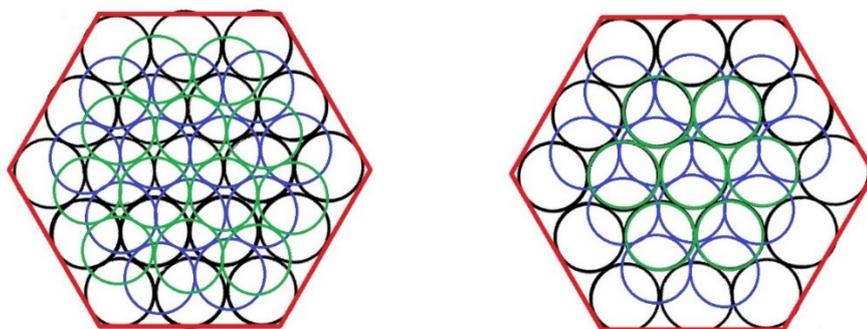


図3-10 最密充填構造 (最下部: 黒, 中間部: 青, 最上部: 緑)

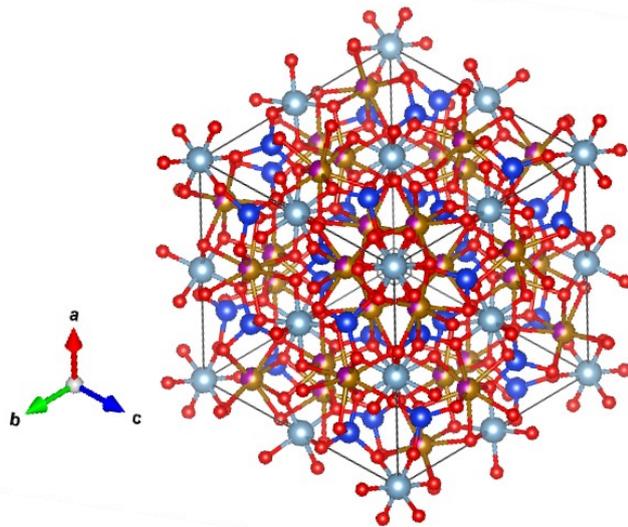


図3-11 鉄礬石榴石-錳礬石榴石の結晶構造（結晶軸：a,b,c
 褐色：鉄あるいはマンガン，水色：アルミニウム，
 青色：珪素，赤色：酸素）
 これは VESTA (Momma and Izumi, 2011) を用いて
 描いた。

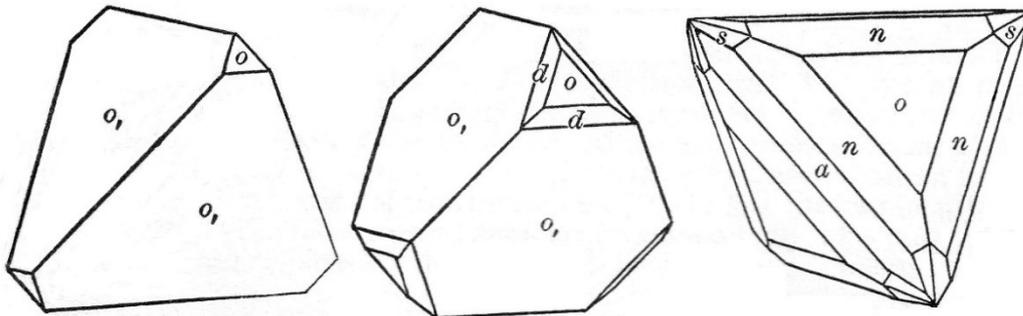


図3-12 三角形で構成された結晶の例（その1）
 ヘルビンの結晶図 Helvine ($Mn_8(Be_6(Si_6O_{24})S_2$,立方) (Dana,1915).

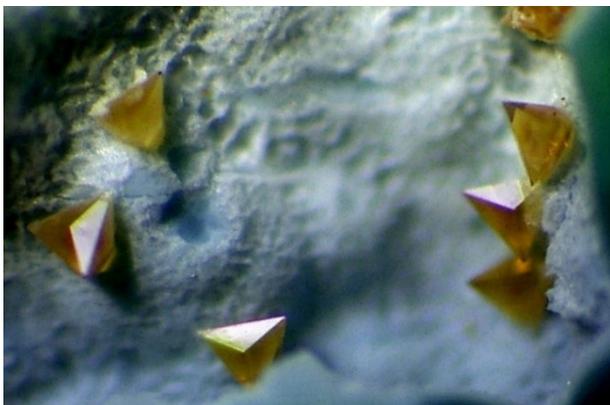


図3-13 三角形で構成された結晶の例（その2）
 福島県高倉鉱山産黄色珪蒼鉛石 (Eulytite ($Bi_4(SiO_4)_3$,立方)

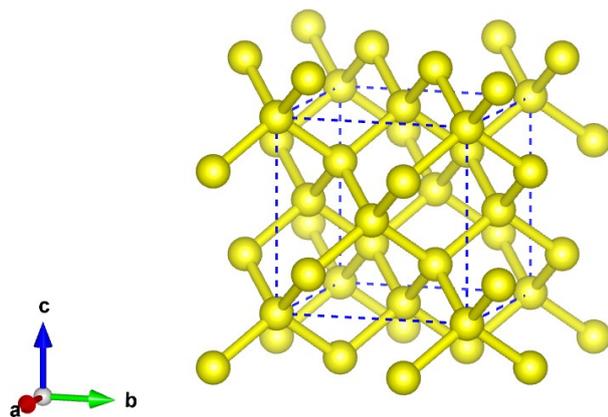


図3-14 ダイヤモンドの結晶構造：炭素原子（黄色：C）が正四面体の頂点と中心にある。青色の破線は単位格子（正六面体）を示す。VESTA (Momma and Izumi, 2011)を用いて表示。

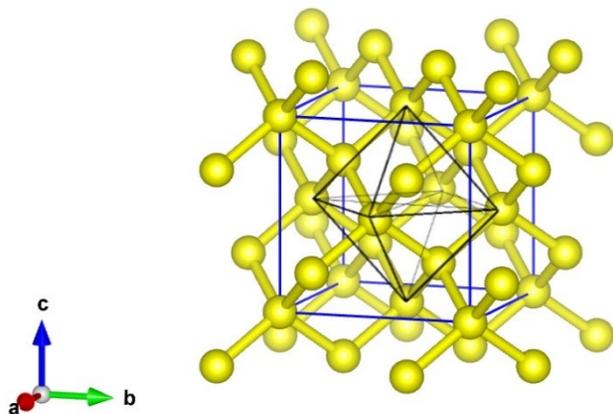


図3-15 図2-14に六面体と八面体の形状を描いた図。青色の線は六面体，黒色の線は八面体を示す。

表3-1. アルミニウムの化合物の鉱物

構成元素						化学組成	晶系	主な形態	鉱物名	
Al					O	Al_2O_3	三方	柱状	Corundum	
Al				Si	O	Al_2SiO_5	直方	柱状	Andalusite	
Al				Si	O	$Al_{4+2x}Si_{2-2x}O_{10-x}$ ($x \approx 0.4$)	直方	柱状	Mullite	
Al	Be			Si	O	$Be_3(Al_2Si_6O_{18})$	六方	柱状	Beryl	
Al	Na			Si	O	$Na(AlSi_3O_8)$	三斜	柱状	Albite	
Al	Na			Si	O	$Na(AlSi_2O_6)$	単斜	柱状	Jadeite	
Al	Mg			Si	O	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	直方	柱状	Cordierite	
Al	Mg			Si	O	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	立方	粒状	Pyrope	
Al	K			Si	O	$K(AlSi_3O_8)$	単斜	柱状	Orthoclase	
Al	K			Si	O	$K(AlSi_2O_6)$	正方	粒状	Leucite	
Al	Ca			Si	O	$Ca(Al_2Si_2O_8)$	三斜	柱状	Anorthite	
Al	Ca			Si	O	$Ca_2Al(SiAl)O_7$	正方	柱状	Gehlenite	
Al	Fe			Si	O	$Fe^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3$	立方	粒状	Almandine	
Al	Fe			Si	O	$Fe^{2+}_2Al_4Si_5O_{18}$	直方	柱状	Sekaninaite	
Al	Mn			Si	O	$Mn^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3$	立方	粒状	Spessartine	
Al	Na	Ca	K	Si	O	H	$(Na_2, Ca, K)_4(Al_8Si_{14}O_{96}) \cdot 28H_2O$	直方	毛状	Mordenite

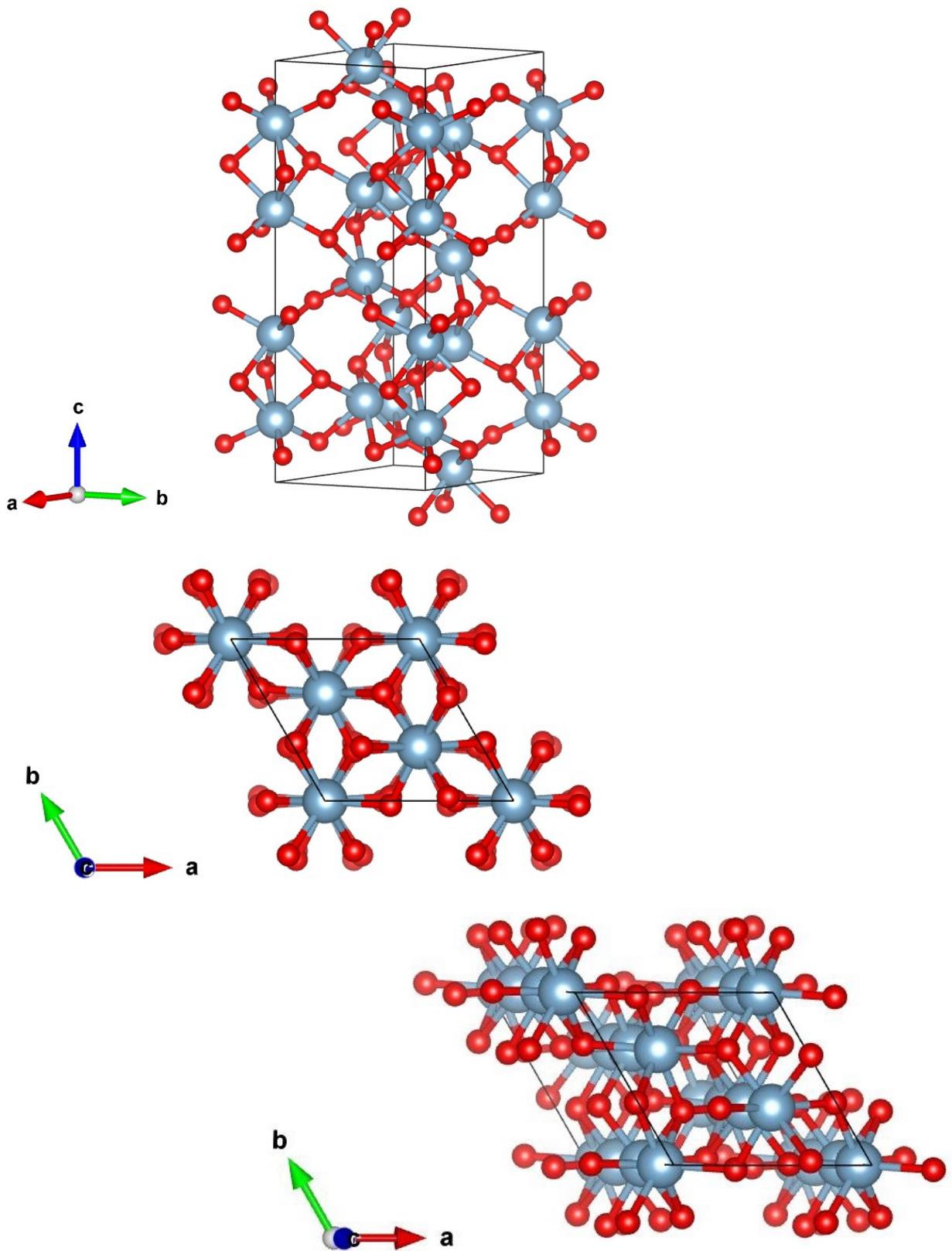


図3-16 コランダム (Corundum Al_2O_3) の正規の方向 (上) と c 軸方向 (中) から見た結晶構造. c 軸方向から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (下). (Al: 水色, O: 赤色)

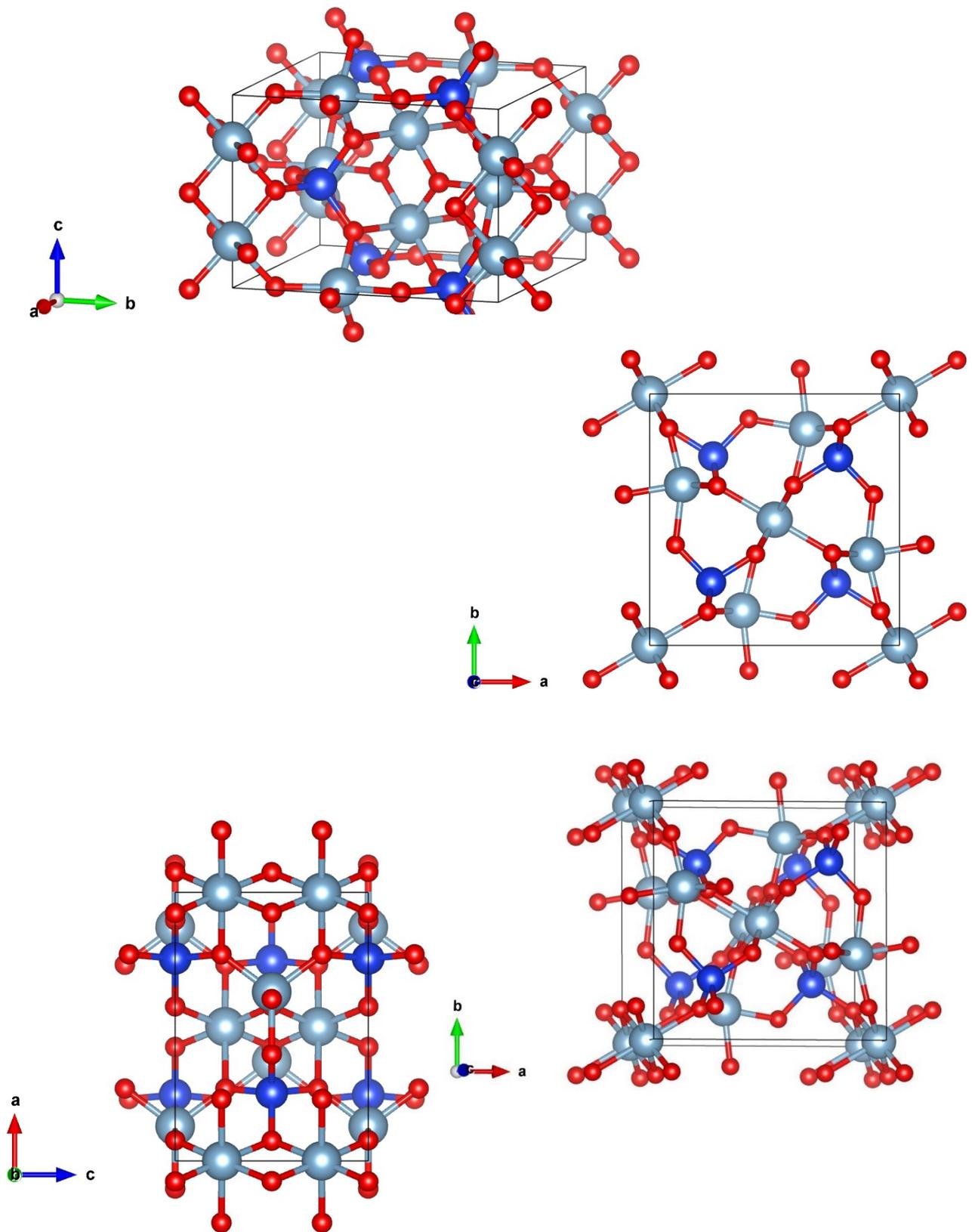


図3-17 紅柱石 (Andalusite Al_2SiO_5) の正規の方向 (上) と c 軸方向 (中) 及び b 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が a 軸・ c 軸方向に直線的に配列している. c 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

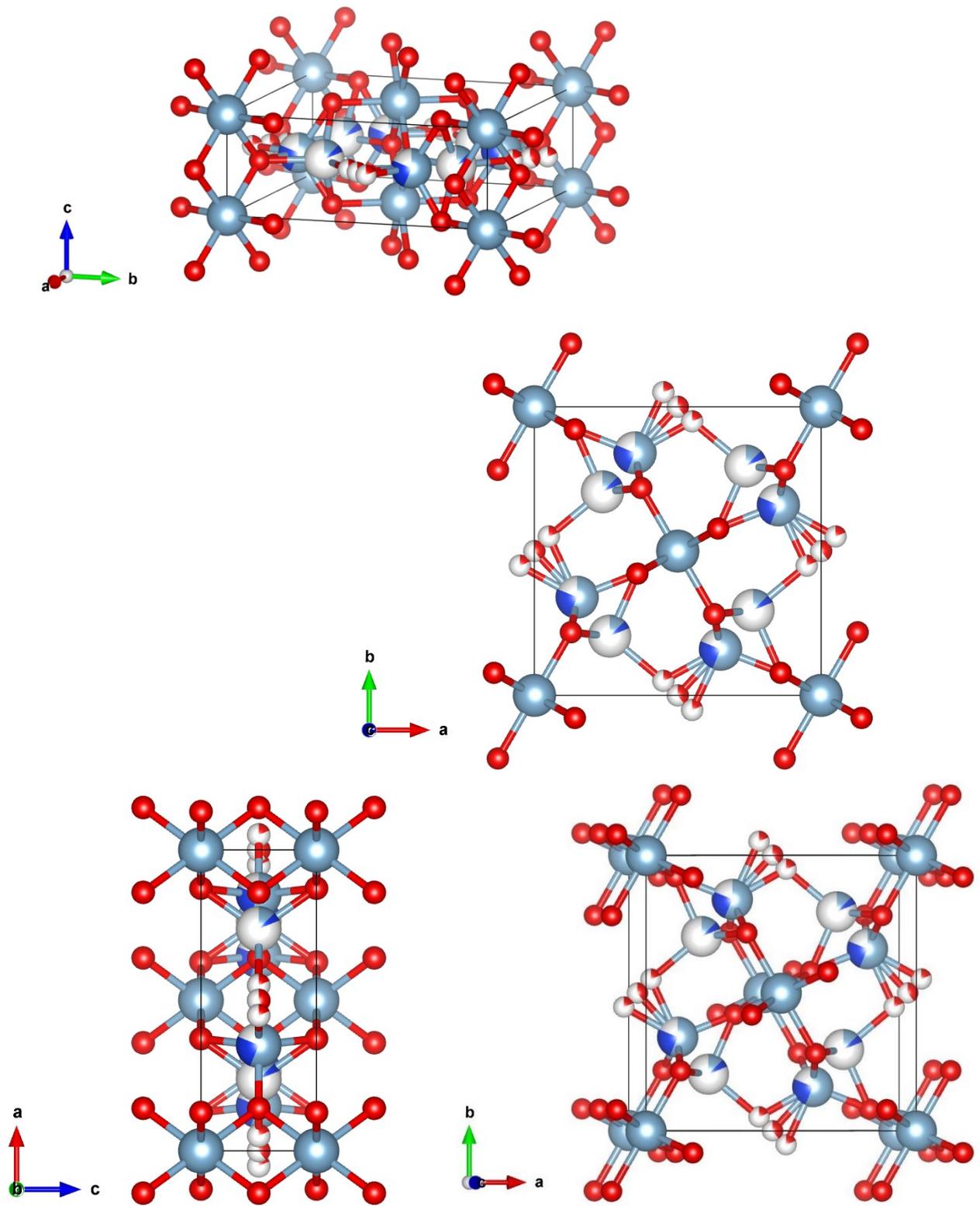


図3-18 ムル石 (Mullite $\text{Al}_{4+2x}\text{Si}_{2-2x}\text{O}_{10-x}$ ($x \approx 0.4$)) の正規の方向 (上) と c 軸方向 (中) 及び b 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が a 軸・c 軸方向に直線的に配列している. c 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

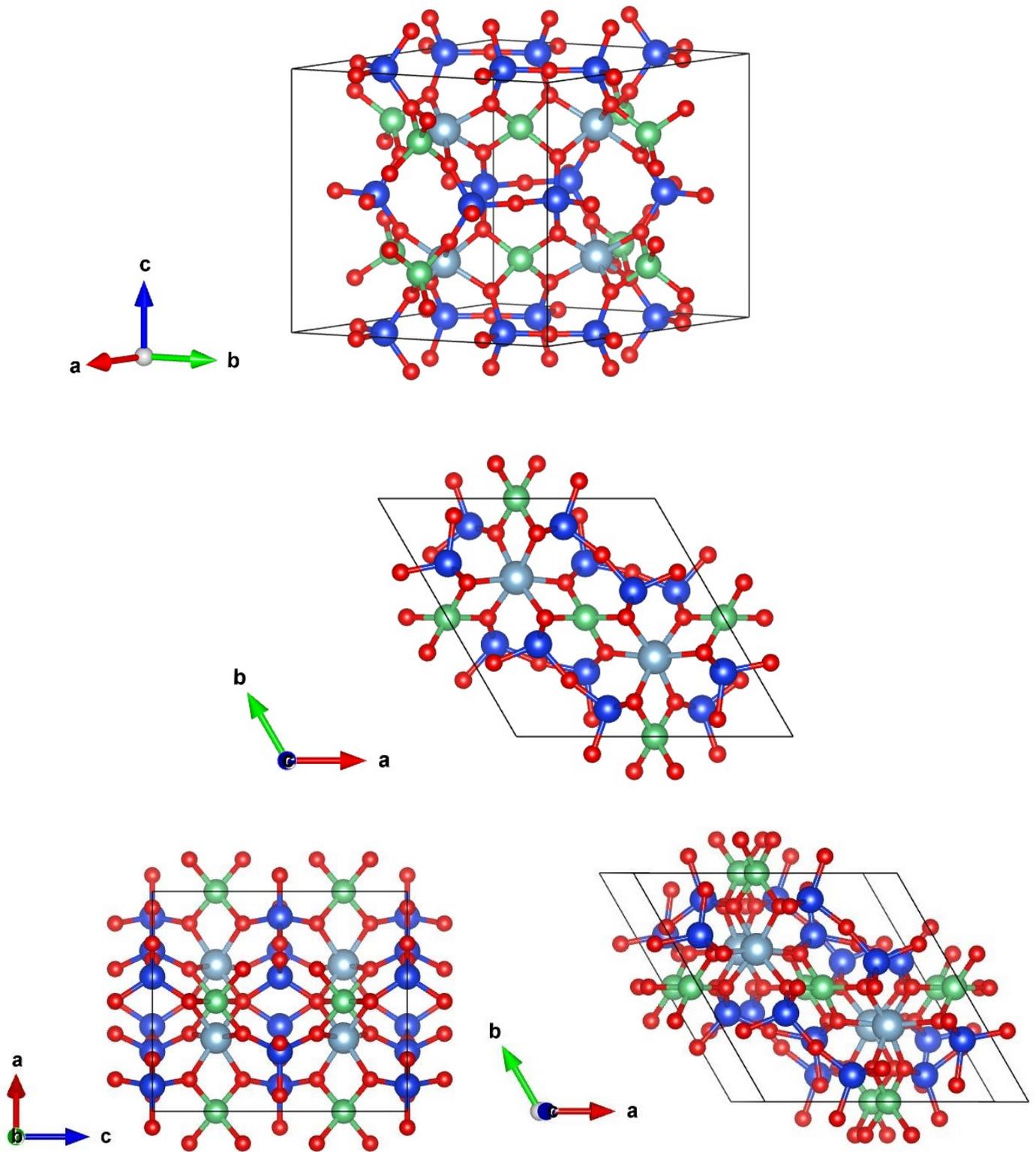


図3-19 緑柱石 (Beryl $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) の正規の方向 (上) と *c* 軸方向 (中) 及び *b* 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が *c* 軸方向に直線的に配列している. *c* 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (Be: 緑色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

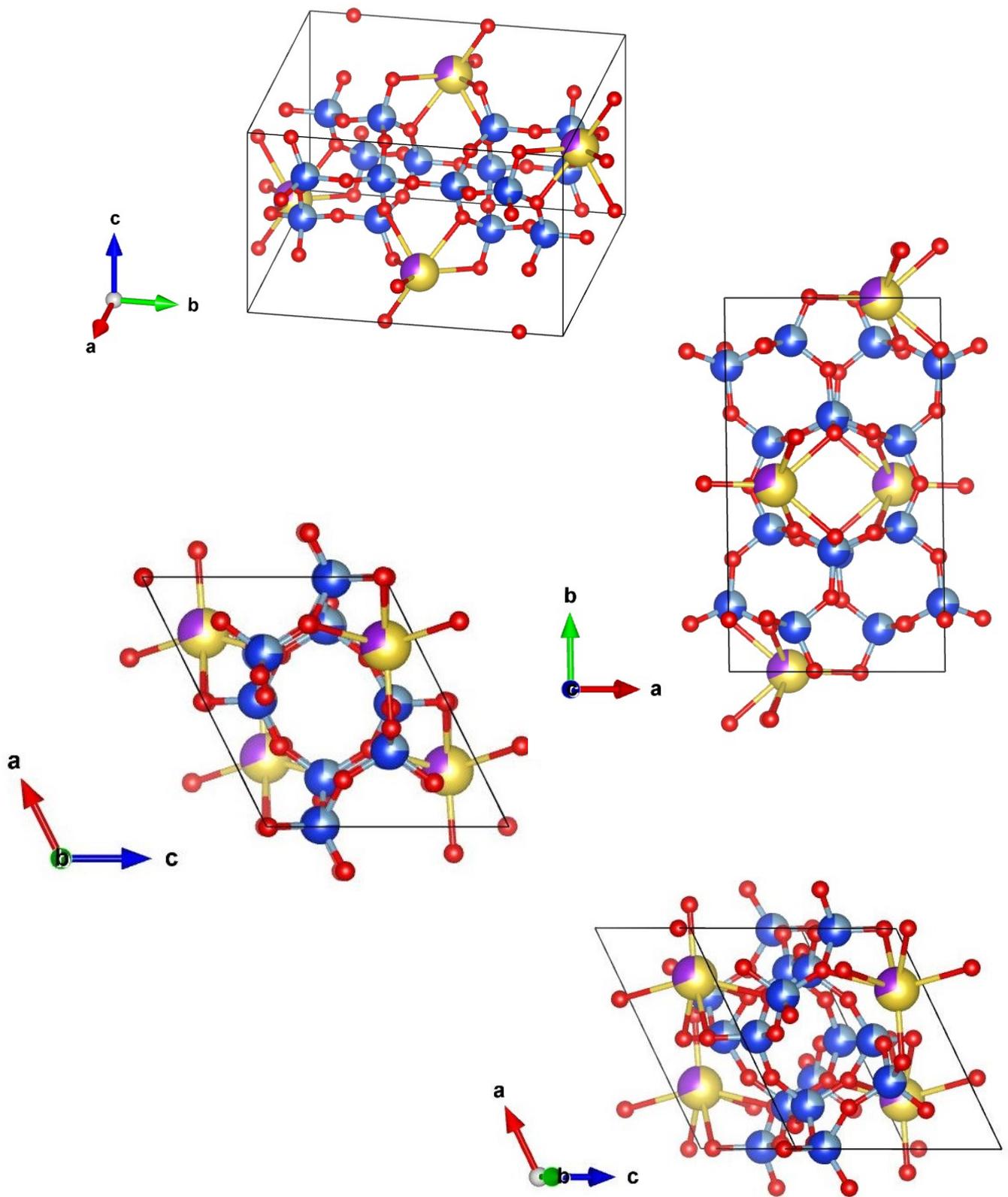


図3-20 曹長石 (Albite $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右上) 及び b 軸方向 (左下) から見た結晶構造。アルミニウム (Al) が b 軸方向に直線的に配列している。 b 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下)。 (Na : 黄色, K : 紫色, Al : 水色, Si : 青色, O : 赤色)

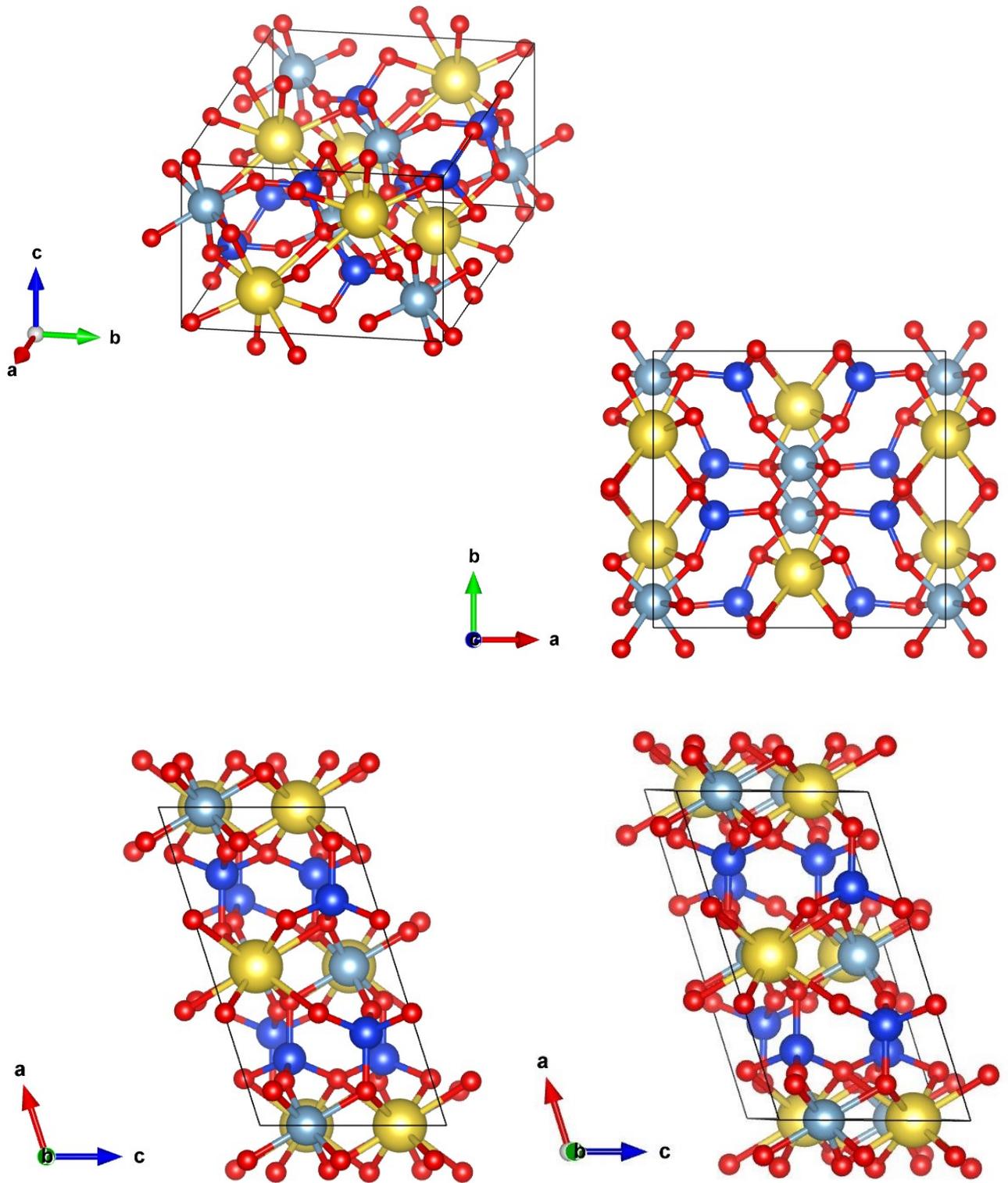


図3-21 ひすい輝石 (Jadeite $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$)の正規の方向(上)とc軸方向(中)及びb軸方向(左下)から見た結晶構造。アルミニウム(Al)がb軸方向に直線的に配列している。b軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下)。(Na:黄色, Al:水色, Si:青色, O:赤色)

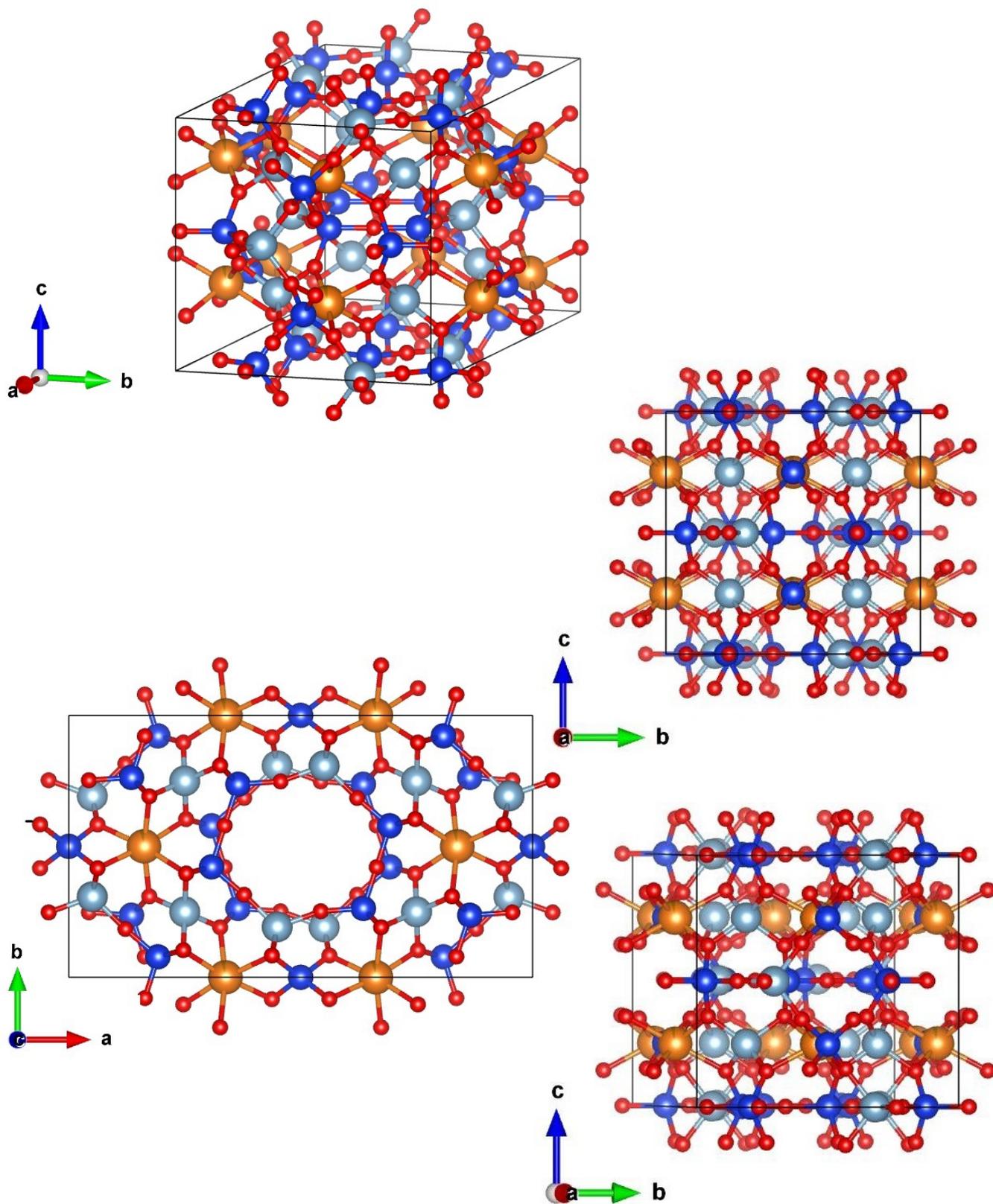


図3-22 堇青石 (Cordierite $(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$)の正規の方向(左上)とa軸方向(右上)及びc軸方向(左下)から見た結晶構造. アルミニウム(Al)がa軸方向に直線的に配列している. a軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる(右下). (Mg: 橙色, Fe: 茶色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

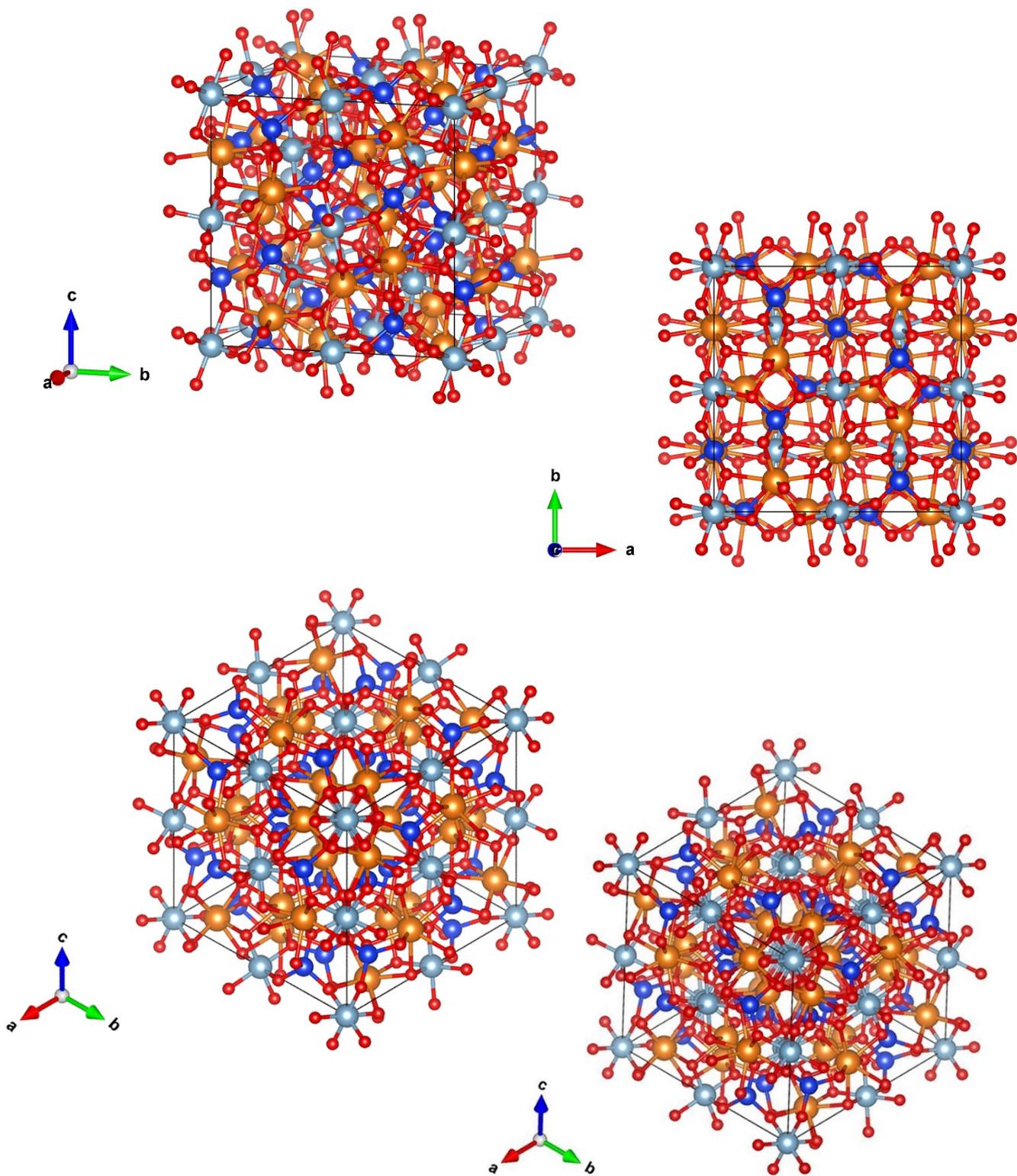


図3-23 苦礬石榴石 (Pyrope $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右上) 及び [111] 方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が a 軸・b 軸・c 軸及び [111] 方向に直線的に配列している. [111] 方向から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (Mg: 橙色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

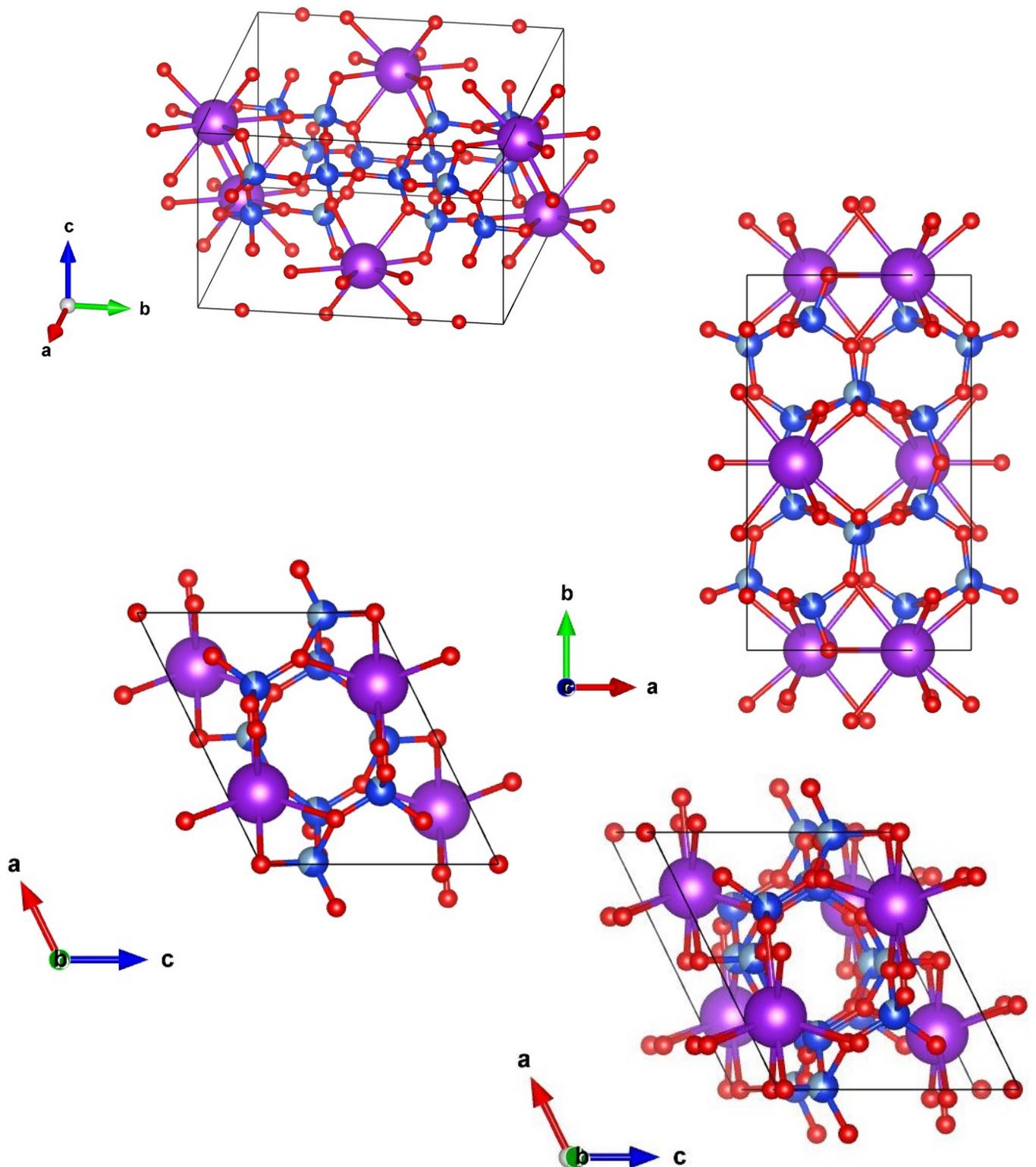


図3-24 正長石 (Orthoclase KAlSi_3O_8) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右上) 及び b 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が b 軸方向に直線的に配列している. b 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (K: 紫色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

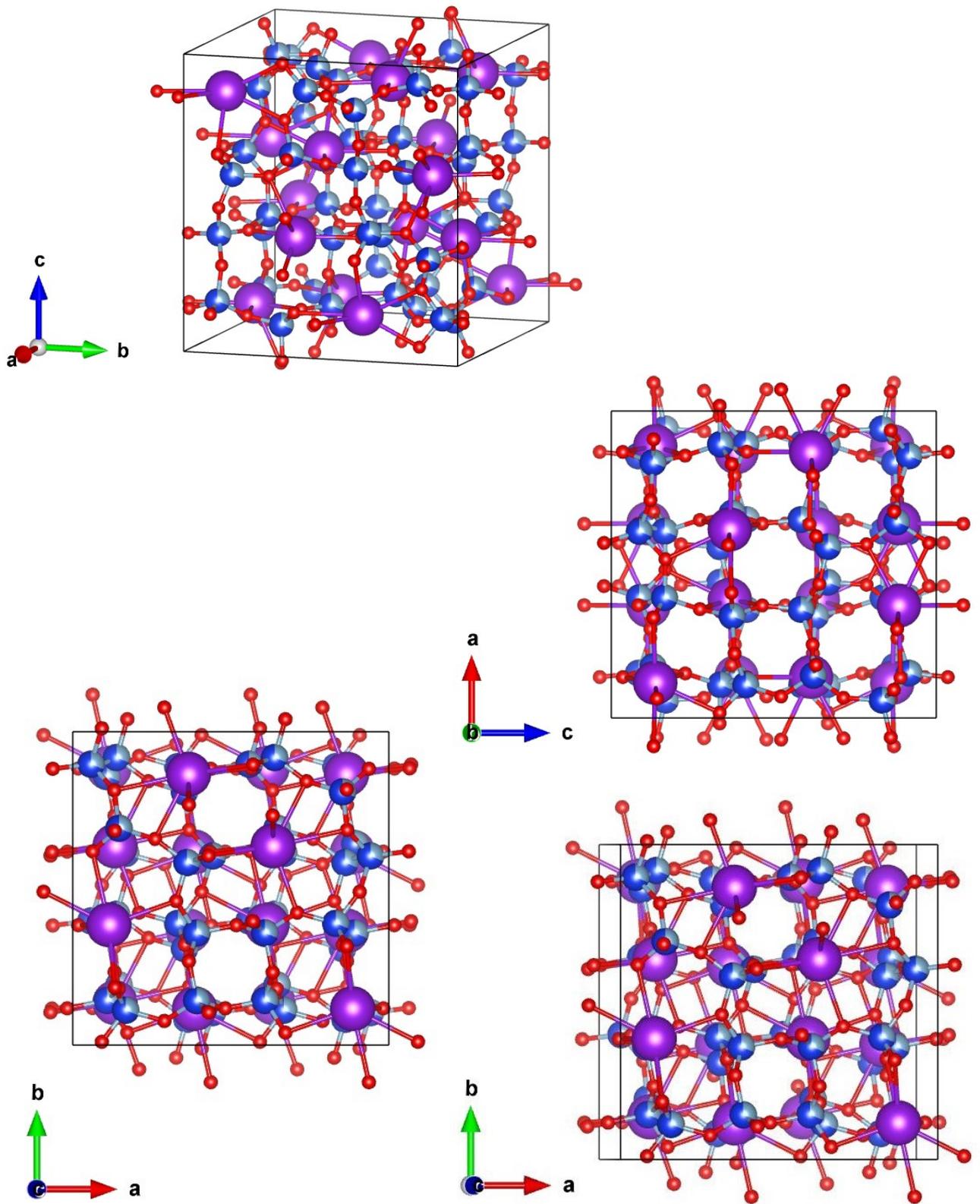


図3-25 リューサイト (Leucite $K(AlSi_2O_6)$) の正規の方向 (左上) と b 軸方向 (右上) 及び c 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が a 軸・ b 軸・ c 軸方向に直線的に配列している. c 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (K: 紫色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

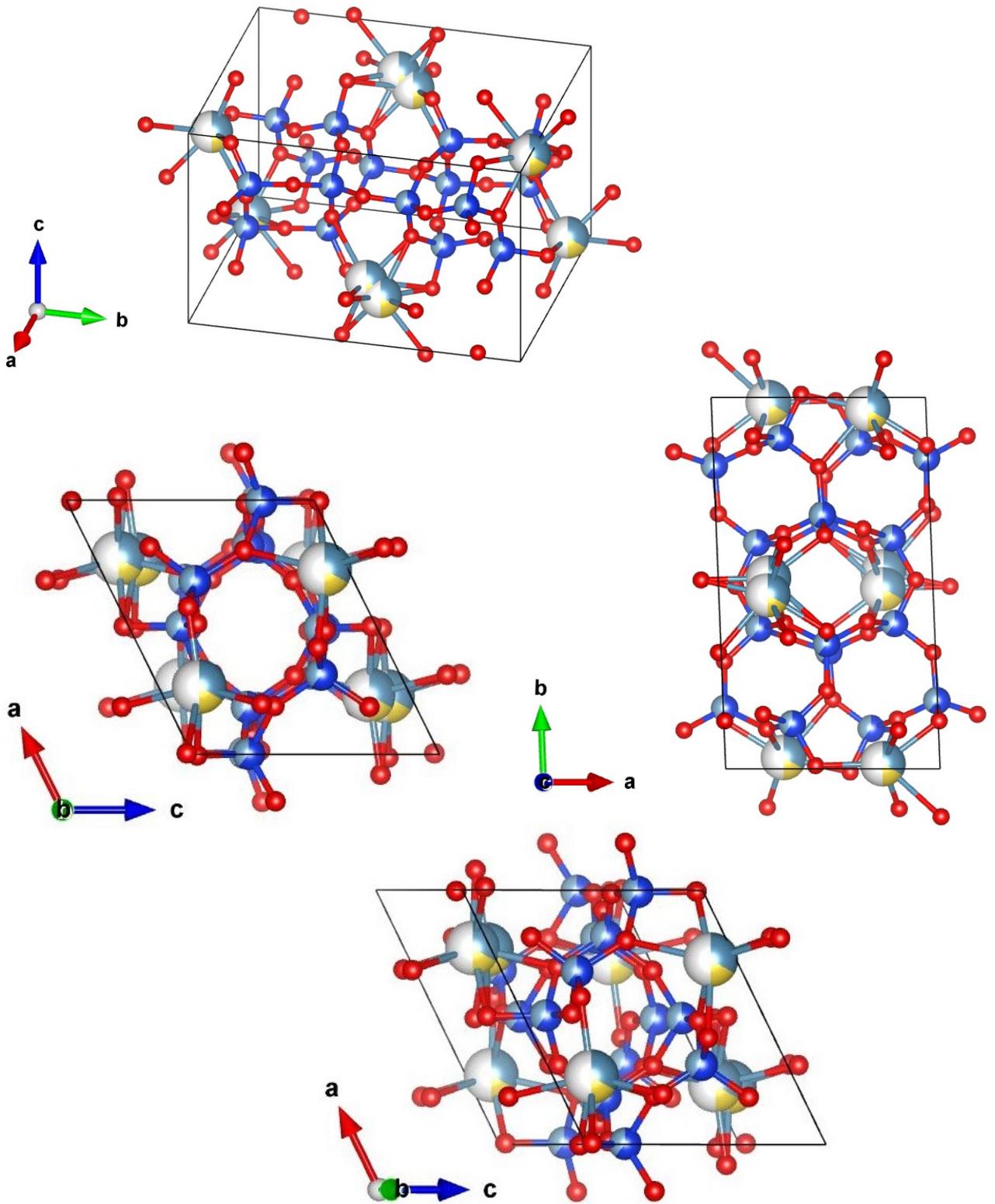


図3-26 灰長石 (Anorthite $(\text{Ca,Na})\text{Al}(\text{Al,Si})\text{Si}_2\text{O}_8$) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右上) 及び b 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が b 軸方向に直線的に配列している. b 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (下). (Ca : 灰色, Na : 黄色, Al : 水色, Si : 青色, O : 赤色)

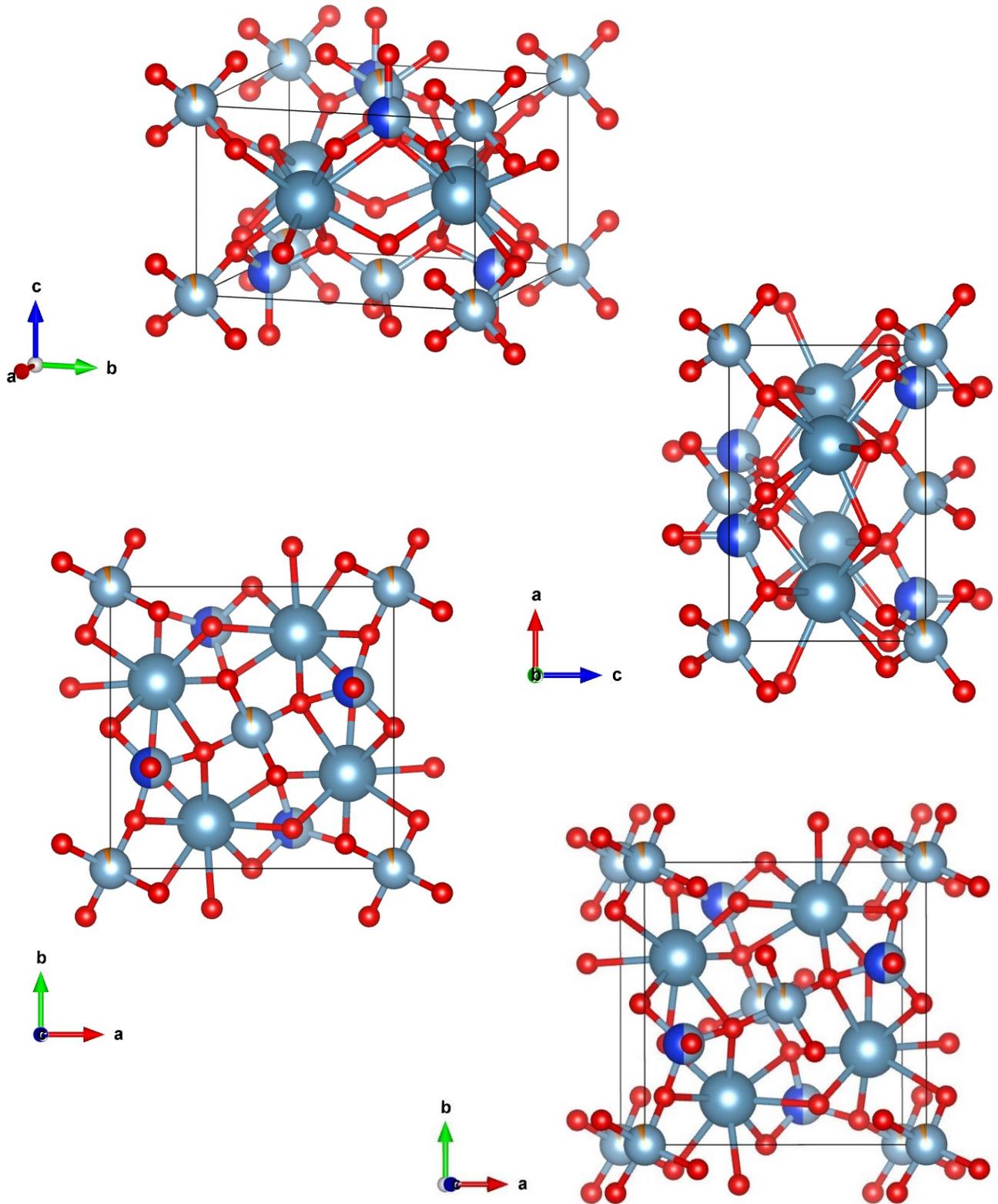


図3-27 ゲーレン石 (Gehlenite $\text{Ca}_2(\text{Al,Mg,Fe})_2\text{SiO}_7$) の正規の方向 (上) と b 軸方向 (中) 及び c 軸方向 (下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が a 軸・c 軸方向に直線的に配列している. c 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (下). (Ca : 灰色, Al : 水色, Si : 青色, O : 赤色)

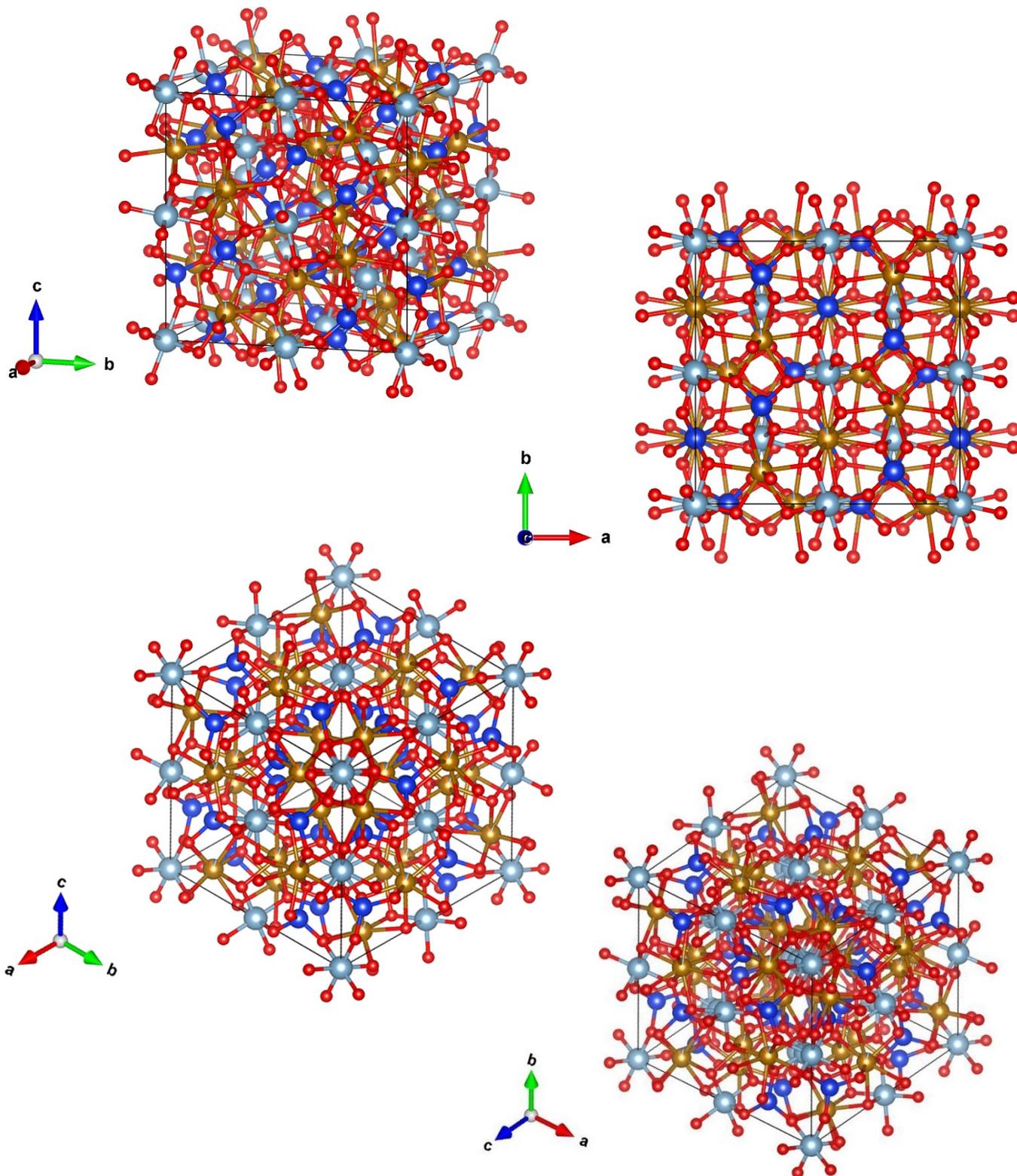


図3-28 鉄礬石榴石 (Almandine $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右上) 及び $[111]$ 方向 (下) から見た結晶構造。アルミニウム (Al) が a 軸・ b 軸・ c 軸及び $[111]$ 方向に直線的に配列している。 $[111]$ 方向から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下)。 (Fe: 褐色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

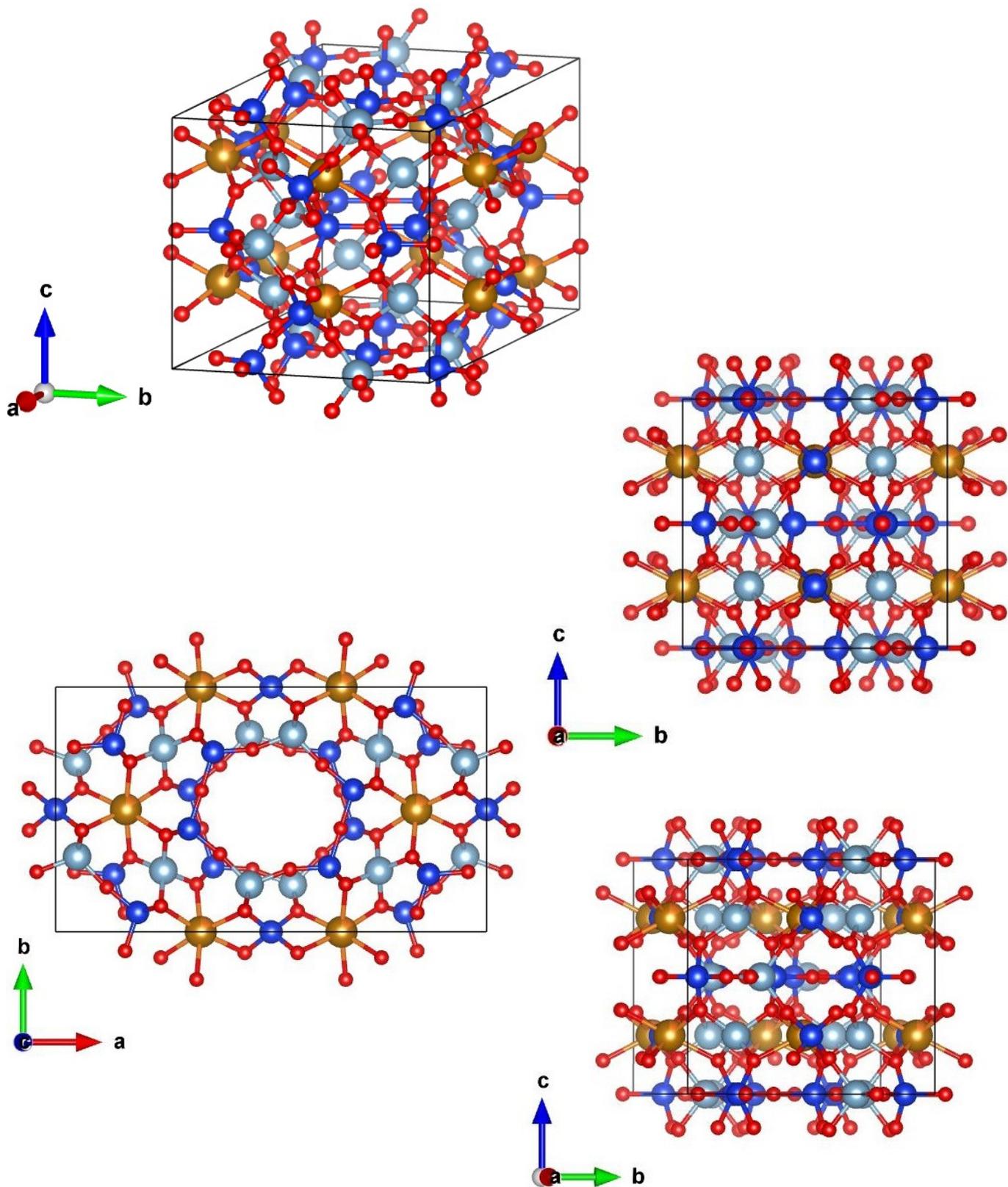


図3-29 鉄堇青石 (Sekaninaite $\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$) の正規の方向 (左上) と a 軸方向 (右上) 及び c 軸方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が a 軸方向に直線的に配列している. a 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (Fe: 褐色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

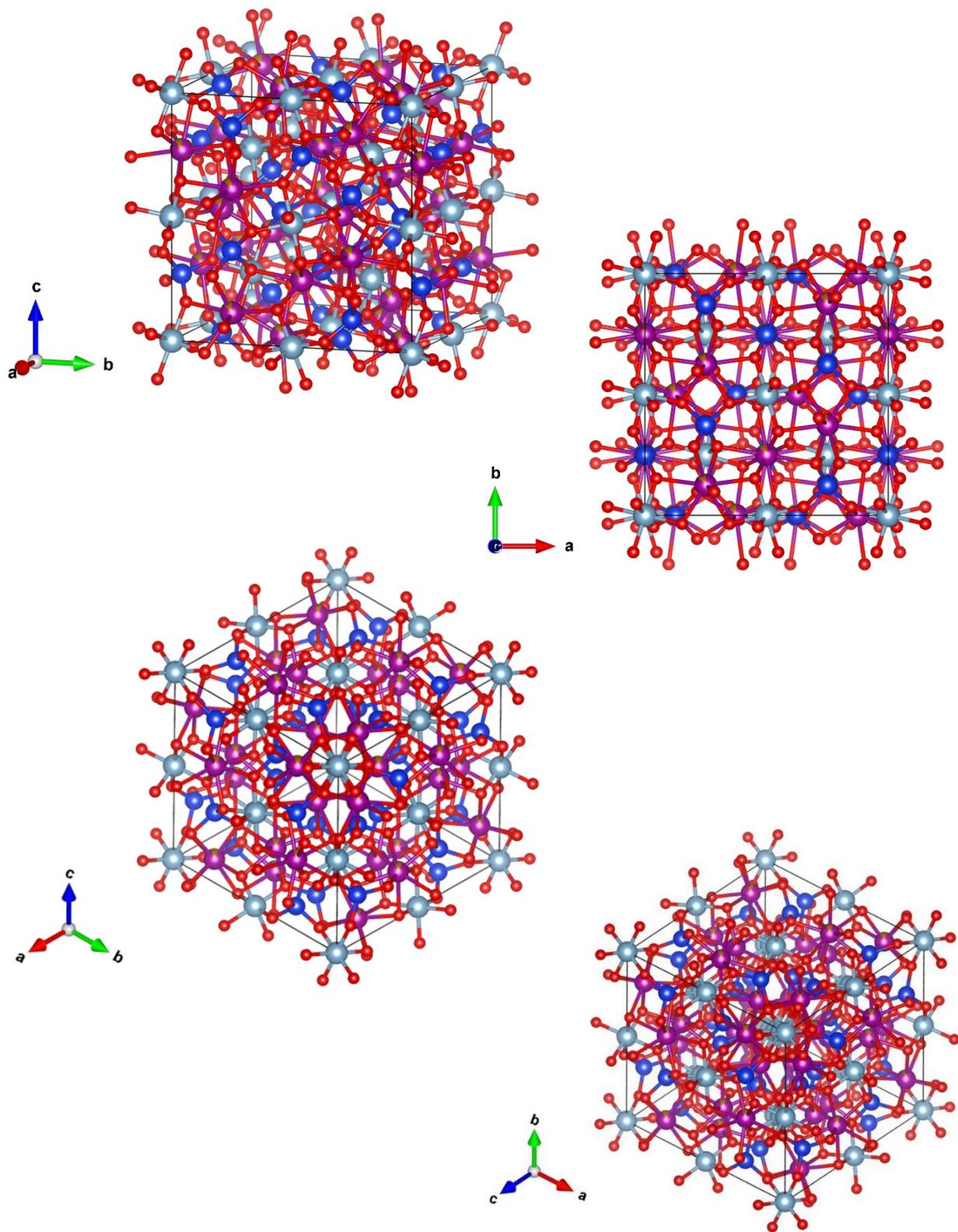


図3-30 満礬石榴石 (Spessartine $\text{Mn}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右下) 及び [111] 方向 (左下) から見た結晶構造。アルミニウム (Al) が a 軸・b 軸・c 軸及び [111] 方向に直線的に配列している。[111] 方向から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下)。 (Mn: 紫色, Al: 水色, Si: 青色, O: 赤色)

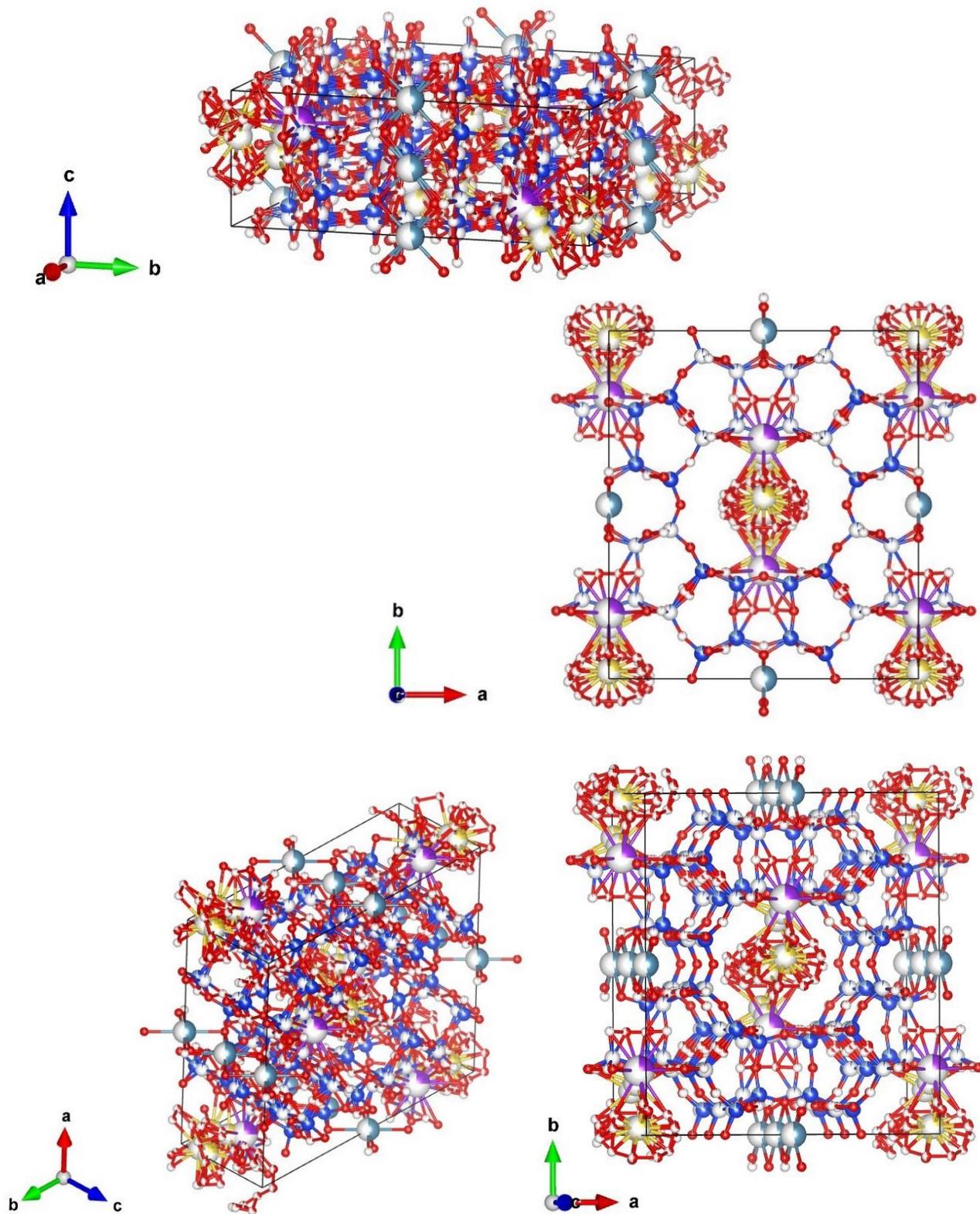


図3-31 モルデン沸石 ($\text{Mordenite } (\text{Na}_2, \text{Ca}, \text{K}_2)_4(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 28\text{H}_2\text{O}$) の正規の方向 (左上) と c 軸方向 (右上) 及び $[111]$ 方向 (左下) から見た結晶構造. アルミニウム (Al) が c 軸方向に直線的に配列している. c 軸から少しずらして見ると原子の重なり方がよく分かる (右下). (Na : 黄色, Ca : 薄青色, K : 紫色, Al : 水色, Si : 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), 霏石 (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・バナジウム酸塩鉱物 (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 $\text{SiO}_2 \cdot n(\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10})$, 立方晶系) にはメタン (CH_4) やエタン (C_2H_6) 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。

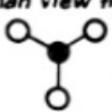
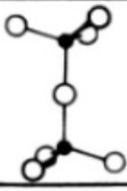
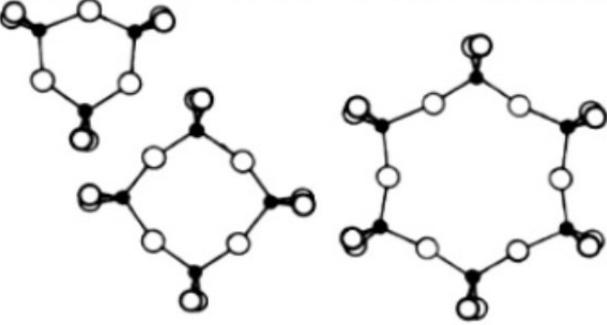
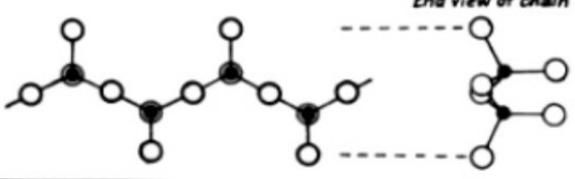
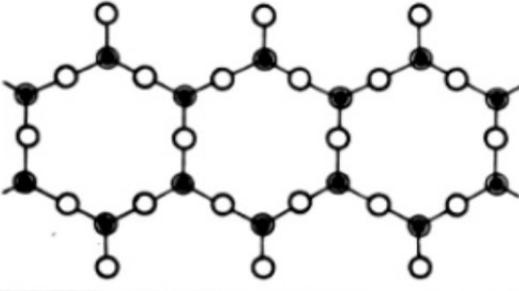
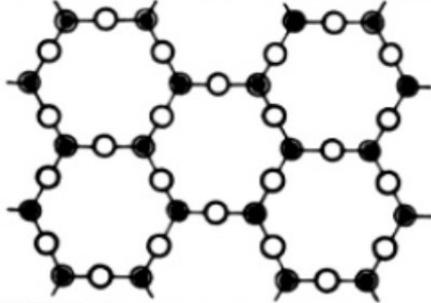
Type of Linkage	Formula Valency	Si:O Ratio	● Si ⁴⁺ ○ O ²⁻	Example
① Separate tetrahedra	(SiO ₄) ⁴⁻	1:4	  Plan view from beneath as used in later diagrams	Olivine
② Double tetrahedra	(Si ₂ O ₇) ⁶⁻	1:3.5		Melilite
③ 3-, 4- & 6-tetrahedron rings	(Si ₃ O ₉) ⁶⁻ (Si ₄ O ₁₂) ⁸⁻ (Si ₆ O ₁₈) ¹²⁻	1:3		Benitoite Zeolites Beryl
④ Single chains	(SiO ₃) ²⁻	1:3	 End view of chain	Pyroxene
⑤ Double chains (Bands)	(Si ₄ O ₁₁) ⁶⁻	1:2.75		Amphibole
⑥ Sheets	(Si ₂ O ₅) ²⁻	1:2.5		Mica
⑦ Three-dimensional networks	Si ₁ Al _n O _{2n} SiO ₂	1:2 1:2	Not readily depicted on plane diagrams	Feldspars Silicon dioxide

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る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品います。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 ⁻ ）	→	9	.....	①
水（H ₂ O）	→	10	.....	②
アンモニウム（NH ₄ ⁺ ）	→	11	.....	③
硼酸（BO ₃ ³⁻ ）	→	29	.....	④
炭酸（CO ₃ ²⁻ ）	→	30	.....	⑤
燐酸（PO ₄ ²⁻ ）	→	47	.....	⑥
硫酸（SO ₄ ²⁻ ）	→	48	.....	⑦
ヴァナジン酸（VO ₄ ³⁻ ）	→	55	.....	⑧
砒酸（AsO ₄ ³⁻ ）	→	65	.....	⑨
モリブデン酸（MoO ₄ ²⁻ ）	→	74	.....	⑩

タングステン酸 (WO_4^{2-}) → 106 ⑪

珪酸塩は、珪素 Si の原子番号 (14) を最初の数字とし、残りの有効数字3桁を下記の数字で表示します。

ネソ珪酸 (SiO_4^{4-}) → 046 ⇒ 14046 ⑫

ソコ珪酸 (Si_2O_7) → 084 (=2×14+7×8) ⇒ 14084 . . . ⑬

シクロ珪酸 (SiO_3)₆¹²⁻ → 228 (=6×(14+3×8)) ⇒ 14228 . . ⑭

単鎖イノ珪酸 (SiO_3)_n²ⁿ⁻ → $\text{Si}_3\text{O}_9^{6-}$ (n=3) → 114 ⇒ 14114 . . ⑮

複鎖イノ珪酸 (Si_4O_{11})_n⁶ⁿ⁻ → $\text{Si}_8\text{O}_{22}^{12-}$ 288 (n=2) ⇒ 14288 . . . ⑯

フィロ珪酸 (Si_2O_5)_n²ⁿ⁻ → $\text{Si}_{10}\text{O}_{25}^{10-}$ (n=5) → 340 ⇒ 14340 . . ⑰

テクト珪酸 ($\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_8$)_n^{xn-} → $\text{AlSi}_3\text{O}_8^{4-}$ (x,n=2) 236 ⇒ 14236 . . . ⑱

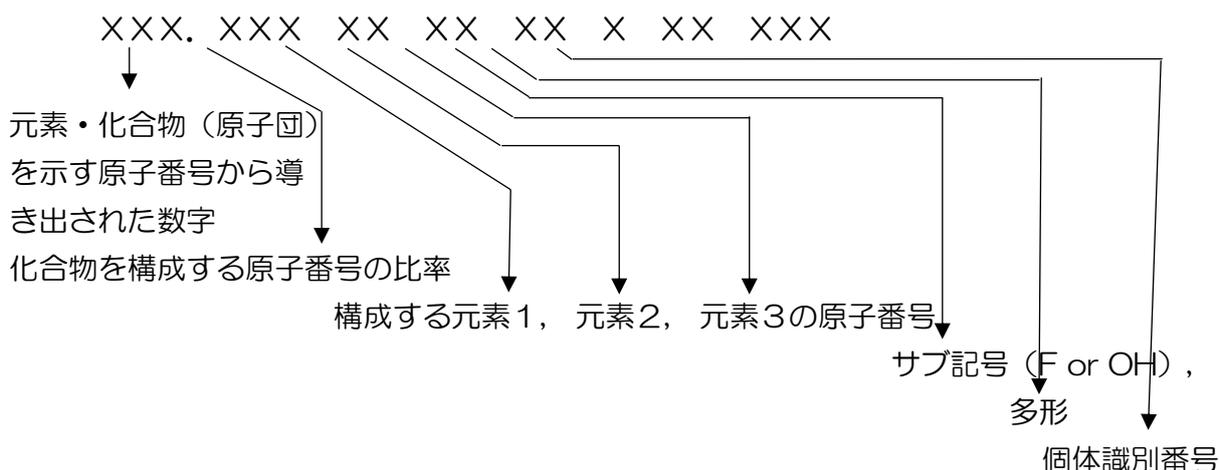
珪酸が他の陰イオンと組み合わせられた場合、次のように表示できる。

$\text{SiO}_4 + \text{Si}_2\text{O}_7$ → 130 ⇒ 14130 ⑲

$\text{SiO}_4 + \text{Si}_2\text{O}_7 + \text{OH}^-$ → 139 ⇒ 14139 ⑳

$\text{SiO}_4 + \text{Si}_2\text{O}_7 + \text{OH}^- + \text{O}^{2-}$ → 147 ⇒ 14147 ㉑

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)。



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02として表示、小数点以下に0が並ぶのは有効数字を揃えるためです。

6.0000002001～ 石墨 Graphite C 六方晶系

6.0000003001～ 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。

33.0000001001～ 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 Cu_2O)は、 $\text{Cu}:\text{O}=2:1$ 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_2O

B. 四三酸化物 (M:O=3:4)

800.1312131001～ 苦土尖晶石 Spinel MgAl_2O_4

C. 三二酸化物 (M:O=2:3)

800.1502601001～ 赤鉄鉱 Hematite Fe_2O_3

D. 二酸化物および近似物 (M:O=1:2)

800.2001401001～ 石英 Quartz SiO_2

E. 水酸化物

900.1001301001～ ブルース石 Brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$

フッ素Fや塩素Cl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)が結合したもので、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 Cu_2S) は、 $\text{Cu} : \text{S} = 2 : 1$ 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、そして固体番号 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 Cu_2S

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 Sb_2S_3

D. 二硫化物 (M : S = 1 : 2)

1600.2026001001 ~ 黄鉄鉱 Pyrite FeS_2

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 ($\text{Cu}_{10}(\text{Fe,Zn})_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) の場合の小数点以下は、 $(\text{Cu} + (\text{Fe,Zn}) + \text{Sb}) : \text{S} = 16 : 13$ から比率として 0.8 とし、鉄 (Fe) と銅 (Cu) の原子番号の 26 と 29 を使うと次のように表示します。

1600.0826291001 ~ 安四面銅鉱 Tetrahedrite $\text{Cu}_{10}(\text{Fe,Zn})_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$

IV. 硼酸塩鉱物

硼酸 (BO_3^{3-}) 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 (BO_3) 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 $\text{Mg}_3(\text{BO}_3)_2$

V. 炭酸塩鉱物

炭酸 (CO_3^{2-}) 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 (CO_3^{2-}) の割合が 1 : 1 なので比率は 1.0 となります。そ

ここで金属元素の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 $Mg[CO_3]$

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)の割合が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 $Cu_3[OH|CO_3]_2$

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)の割合が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 $Mg_5[(OH)_2|(CO_3)_4] \cdot 4H_2O$

VI. 燐酸塩・ヴァナジン酸塩・砒酸塩鉱物

燐酸(PO₄²⁻)、ヴァナジン酸(VO₄³⁻)あるいは砒酸(AsO₄³⁻)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)の割合が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 $CePO_4$

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 $Ca_5[(F,OH)|(PO_4)_3]$

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 $Fe[AsO_4] \cdot 2H_2O$

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 $Al_3(PO_4)_2(OH,F)_3 \cdot 5H_2O$

VII. 硫酸塩鉱物

硫酸 (SO_4^{2-}) を含むもの。硫酸 (SO_4 : $16(\text{S})+8(\text{O}) \times 4=48$) 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 SO_4 の割合が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 $\text{Na}_2[\text{SO}_4]$

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(SO_4+OH)の割合が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 $\text{KF e}^{3+}_3[(\text{OH})_3\text{SO}_4]_2$

B. 含水純硫酸塩 水 (H_2O) を含むもの。

硫酸に水 (H_2O) が加わると58 ($=48+10$) となる。

石膏は、Caと($\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}$)の割合が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 $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

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 (H_2O) 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+Al)と($\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}+\text{OH}^-$)の割合が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 cyanotrichite $\text{Cu}_4\text{Al}_2\text{SO}_4(\text{OH})_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

VIII. 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 MoO_4 の割合が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 $\text{Pb}[\text{MoO}_4]$

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 (SiO_4^{4-} , $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$, $(\text{SiO}_3)_6^{12-}$, $(\text{SiO}_3)_n^{2n-}$, $(\text{Si}_4\text{O}_{11})_n^{6n-}$, $(\text{SiO}_3)_6^{12-}$, $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n^{2n-}$) および $(\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_8)_n^{4n-}$ を含むもの (⑫~⑰参照)。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 (⑱~㉑参照)。

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 (SiO_4^{4-}) を含むもの

⑫より、14046を使います。

テフロ石は、Mnと SiO_4^{4-} の割合が2:1なので比率が0.5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 $Mn_2[SiO_4]$

B. 複陰イオンネソ珪酸塩 珪酸 (SiO_4^{4-}) 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 (O^{2-}) 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、Alと ($O+SiO_4^{4-}$) の割合が2:2なので比率が1となり、Al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 $Al_2[O|SiO_4]$

C. 純ソロ珪酸塩 珪酸 ($Si_2O_7^{6-}$) を含むもの

⑬より、14084を使います。

ゲーレン石は、Caと Si_2O_7 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 $Ca_2Al[AlSiO_7]$

D. 複陰イオンソロ珪酸塩 珪酸 ($Si_2O_7^{6-}$) 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 ($Si_2O_7+OH+H_2O$) 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 $Zn_4[(OH)_2|Si_2O_7] \cdot H_2O$

E. 複陰イオンシクロ珪酸塩 珪酸 ($(SiO_3)_6^{12-}$) と陰イオン (OH) などを含むもの

⑭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 ($(SiO_3)_6^{12-}$) 及び陰イオンとの割合が0.8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 $NaMg_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_3(OH)$

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 ($(SiO_3)_n^{2n-}$) 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 ($Si_2O_6^{4-}$ (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 $CaMg[Si_2O_6]$

G. 複鎖イノ珪酸塩 珪酸 ($(Si_4O_{11})_n^{6n-}$) 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 $(\text{Si}_8\text{O}_{22})^{12-} + (\text{OH})$ 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 $\text{Na}(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$

H. 鎖状一層状移化型フィロ珪酸塩

葡萄石(Prehnite $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)は、 $\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$ と $(\text{OH})_2$ の元素番号の合計166、Caと珪酸 $(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) + (\text{OH})_2$ 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 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

I. フィロ珪酸塩 珪酸 $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n^{2n-}$ を含むもの

n=5の時、⑰の14340を使います。

弗素魚眼石は、K及びCaと珪酸 $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-} + (\text{OH}) + \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{KCa}_4[(\text{F},\text{OH})](\text{Si}_4\text{O}_{10})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

J. テクト珪酸塩 珪酸 $(\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_8)_n^{x-}$ 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 $\text{AlSi}_3\text{O}_8^-$ 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 KAlSi_3O_8

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、 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 成分が90～70%、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 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、 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 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 $[(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)_{90-70}(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_{10-30}]$

さらに、斜長石 (plagioclase $(\text{Na},\text{Ca})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$) 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 $(\text{Na},\text{Ca})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$

b. 沸石グループ

沸石グループ Zeolite group は、構成している分子式 $\text{NaAlO}_2 \cdot \text{KAlO}_2 \cdot \text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ のそれぞれの原子番号の総数は206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。

NaAlO ₂	.....	40
KAlO ₂	.....	48
CaAl ₂ O ₄	.....	78
SiO ₂	.....	30
H ₂ O	.....	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=2CaAl₂O₄・NaAlO₂・5SiO₂ の原子番号の数である406を使って表示します。

14.412.0406000001～ 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, Akademische 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。

表3-2 鉱物（物質）の着色原因

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

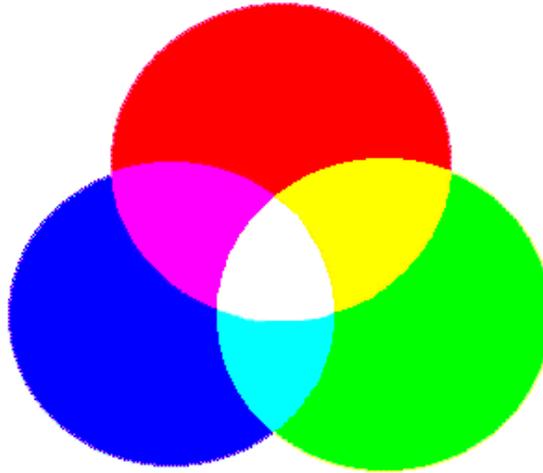


図3-32 色の三原色

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、この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）が見られることとなります。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となります。

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)。

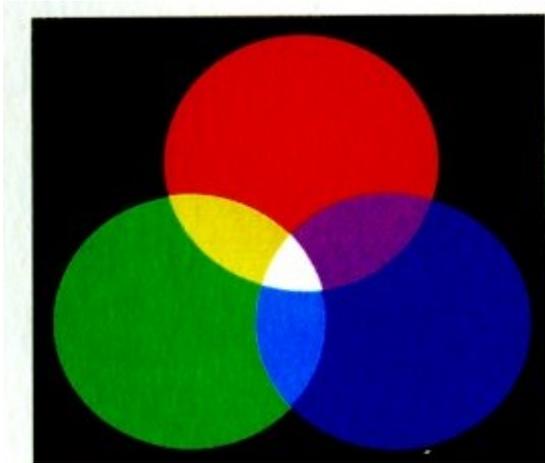


図3-33 加色混合

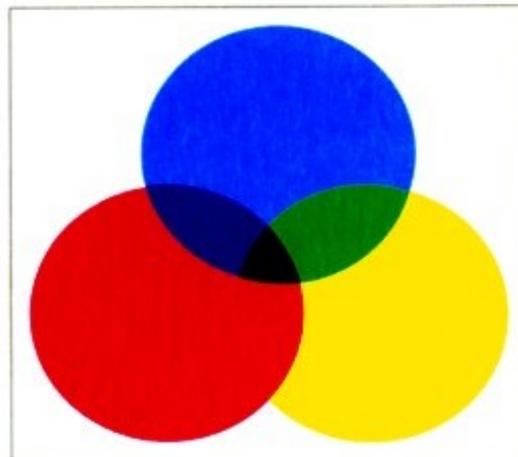


図3-34 減色混合

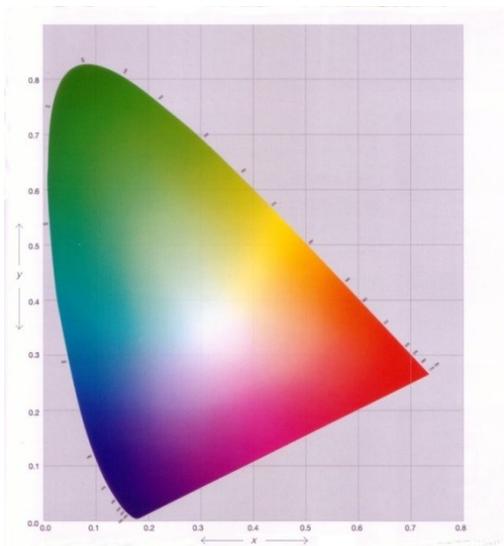


図3-35 色をグラフ上で表示するx y色度図
色彩学貴重書図説(2006)より

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

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。

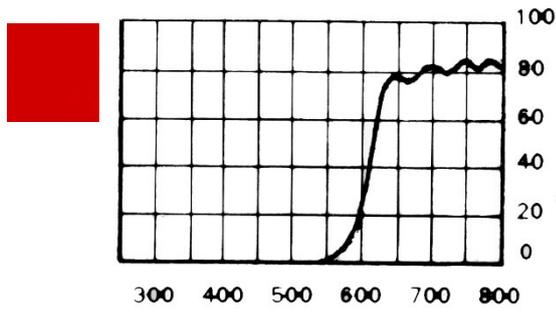


図3-36a 赤色のフィルムの可視分光特性

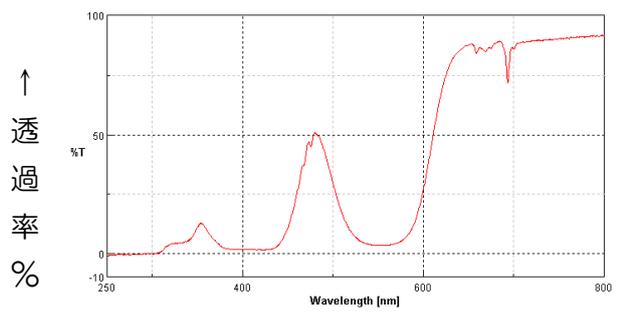


図3-36b ルビーの可視分光特性

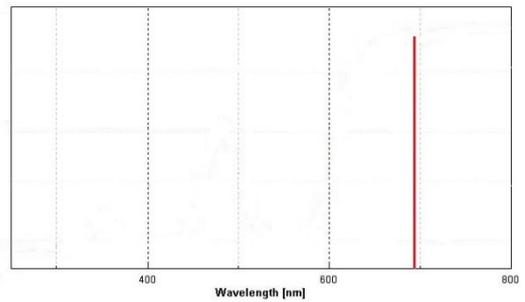


図3-36c ルビー・レーザーの可視分光特性

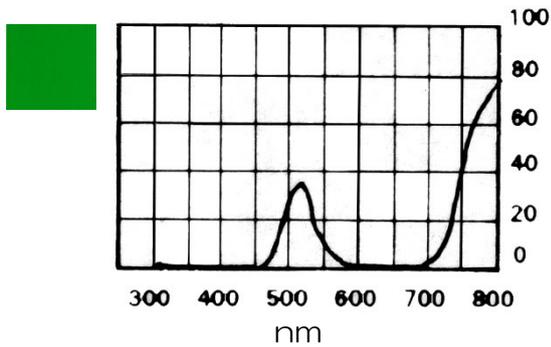


図2-37a 緑色のフィルムの可視分光特性

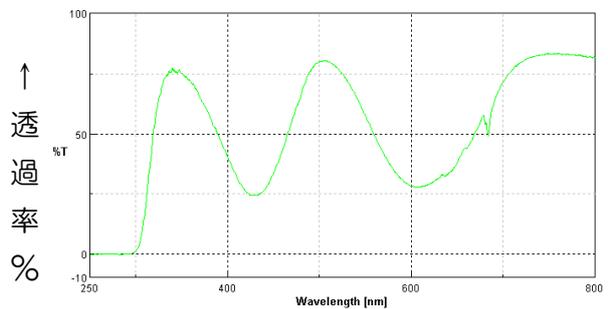


図3-37b エメラルドの可視分光特性

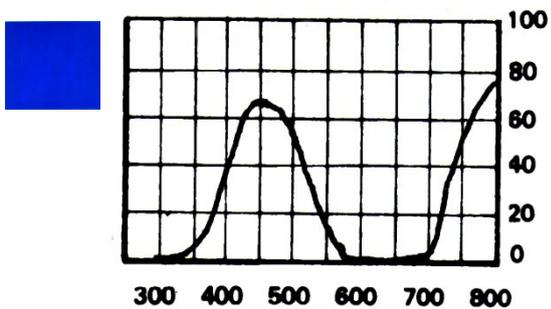


図3-38a 青色のフィルムの可視分光特性

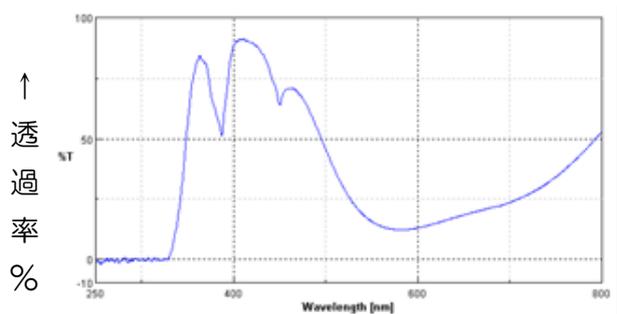


図3-38b ブルー・サファイアの可視分光特性

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(Cr^{3+})ですが、 Cr^{3+} 以外の遷移金属である Fe^{3+} , V^{3+} , Ni^{2+} 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 B e t h e 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 (l) : 軌道上にある電子の形態と関係がある。

$$l = 0 (s), 1 (p), 2 (d), 3 (f), 4 (g) \dots \dots, n-1$$

(3)磁気量子数 (m_l) : 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(バーンス, 1972)。

表 3-4 遷移元素の電子配置

遷移金属	電子配置
Ca	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 - 4s^2$
Sc	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^1 4s^2$
Ti	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$
V	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^3 4s^2$
Cr	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$
Mn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$
Fe	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
Co	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$
Ni	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$
Cu	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$
Zn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$

表 3-5 遷移金属イオンの d^n 配置とその状態

イオン	位置	状態
Ti^{3+}	d^1	2D
V^{3+}	d^2	${}^3F, {}^3P, {}^1G, {}^1D, {}^1S$
Cr^{3+}	d^3	${}^4F, {}^4P, {}^2H, {}^2G, {}^2F, {}^2D$ (2重), 2P (2重)
$\text{Cr}^{2+}, \text{Mn}^{3+}$	d^4	${}^5D, {}^3H, {}^3G, {}^3F$ (2重), ${}^3D, {}^3P$ (2重), ${}^1I, {}^1G$ (2重), ${}^1F, {}^1D$ (2重), 1S (2重)
$\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	d^5	${}^6S, {}^4G, {}^4F, {}^4D, {}^4P, {}^2I, {}^2H, {}^2G$ (2重), 2F (2重), 2D (3重), ${}^2P, {}^2S$
$\text{Fe}^{2+}, \text{Co}^{3+}$	d^6	${}^5D, {}^3H, {}^3G, {}^3F$ (2重), ${}^3D, {}^3P$ (2重), ${}^1I, {}^1G$ (2重), ${}^1F, {}^1D$ (2重), 1S (2重)
$\text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{3+}$	d^7	${}^4F, {}^4P, {}^2H, {}^2G, {}^2F, {}^2D$ (2重), 2P (2重)
Ni^{2+}	d^8	${}^3F, {}^3P, {}^1G, {}^1D, {}^1S$
Cu^{2+}	d^9	2D

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 (Al_2O_3) 中のアルミニウムイオン (Al^{3+}) を僅かにクロムイオン (Cr^{3+}) で置換したものです。この Cr^{3+} 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。 Cr^{3+} は Al^{3+} 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与ることになります。それらのエネルギー準位は 4T_1 、 4T_2 、 2E 、 4A_2 なので、 ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$ 、 ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ という励起に起因する吸収が見られることとなります (図3-39)。特に、 4A_2 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、田辺一菅野ダイアグラム (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。

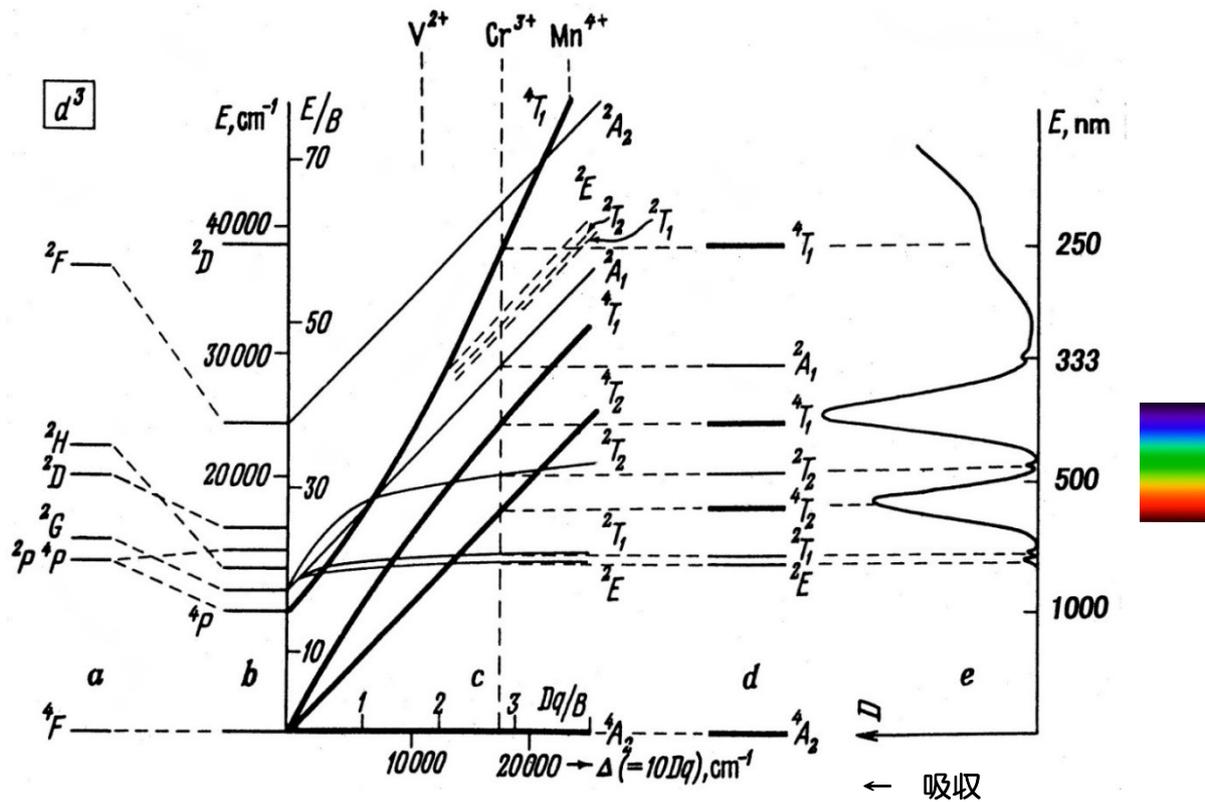


図3-39 d^3 の電場(左)とルビーの吸収スペクトル(右)

○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 Cr^{3+} 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 4T_1 と 4T_2 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）。

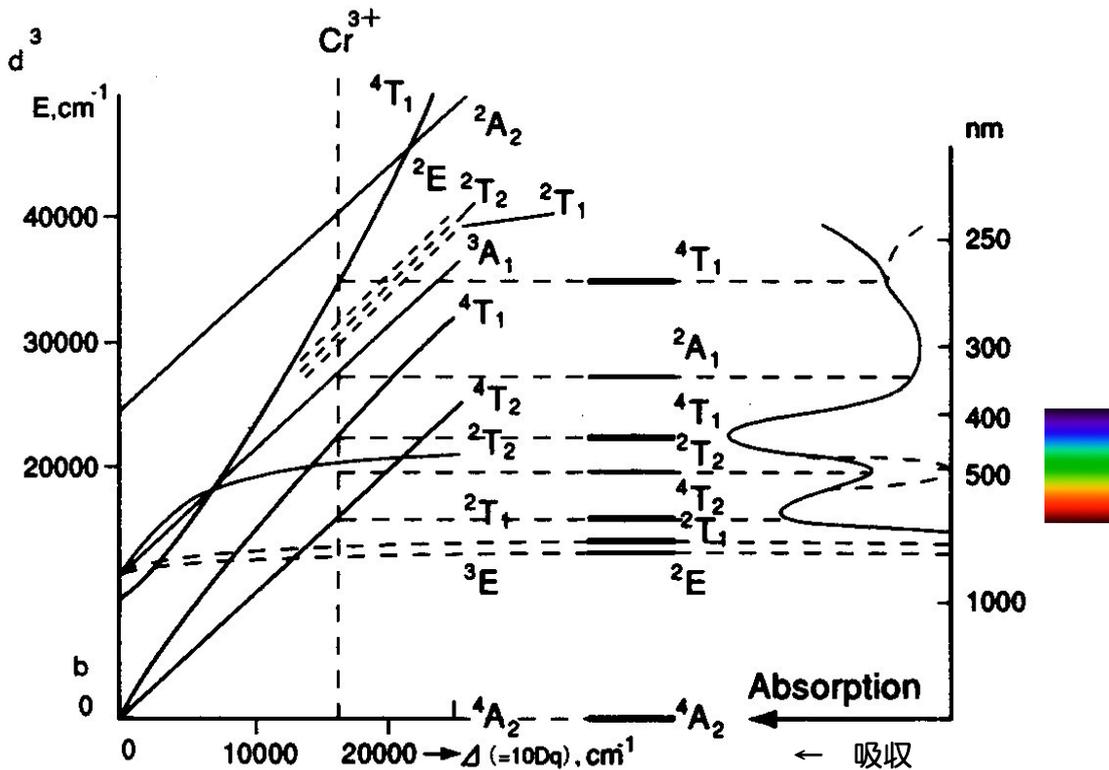


図3-40 d^3 の電場（左）と緑色ジェダイトの吸収スペクトル（右）

従って、 Cr^{3+} 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です。

また、 Fe^{3+} については、450nm 付近に見られる吸収が特徴です。緑色アンドラナ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、 Cr^{3+} 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 Fe^{3+} 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 V^{3+} と Ni^{2+} 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。

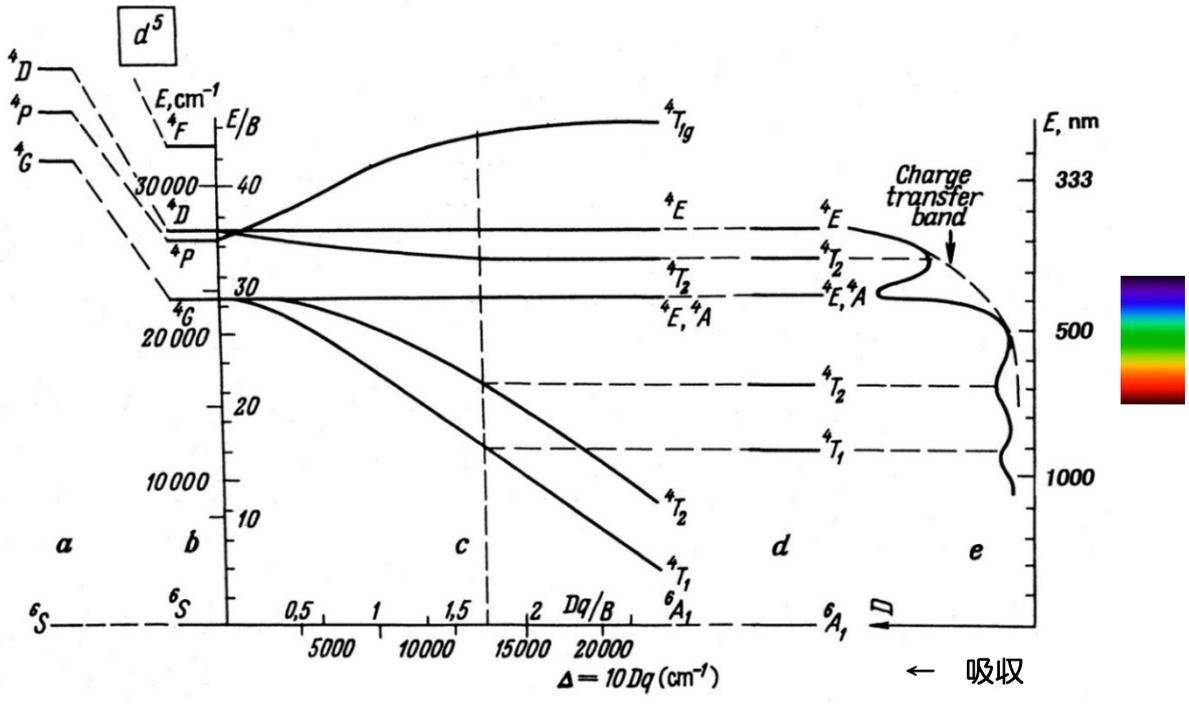


図3-41 d²の電場 (左) とダイヤモンド・ガーネットの吸収スペクトル (右)

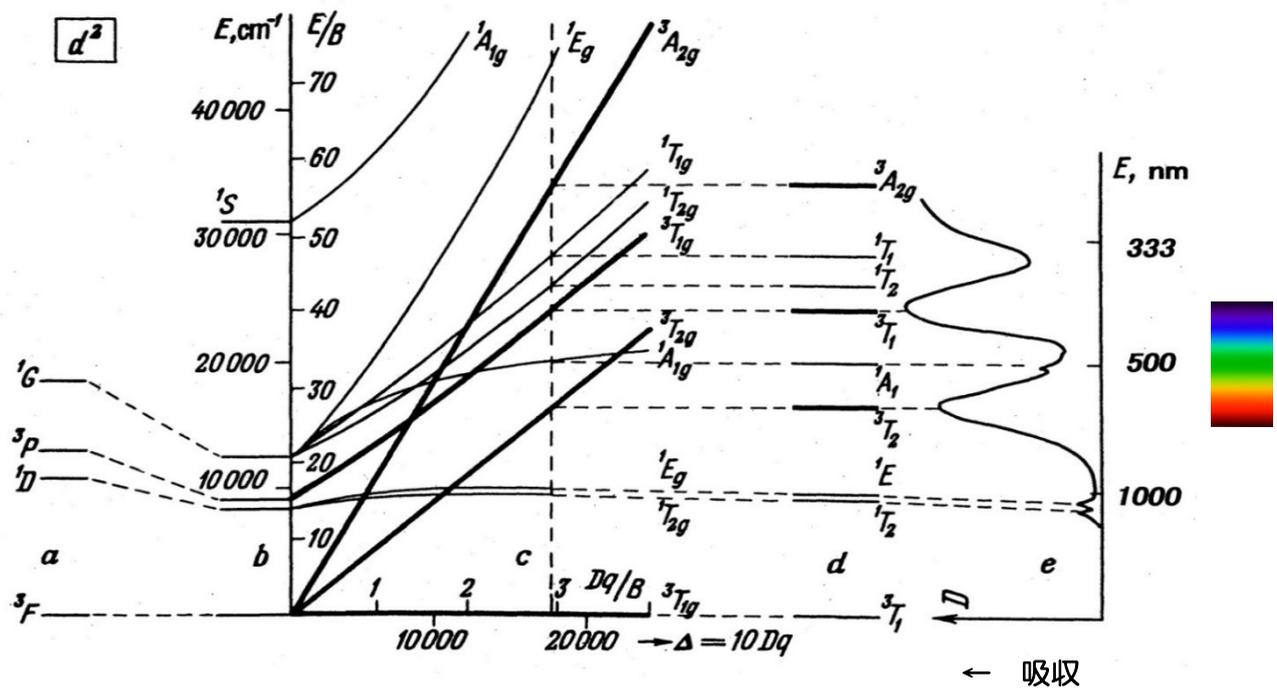


図3-42 d²の電場 (左) とタンザニア産クリソベリルの吸収スペクトル (右)

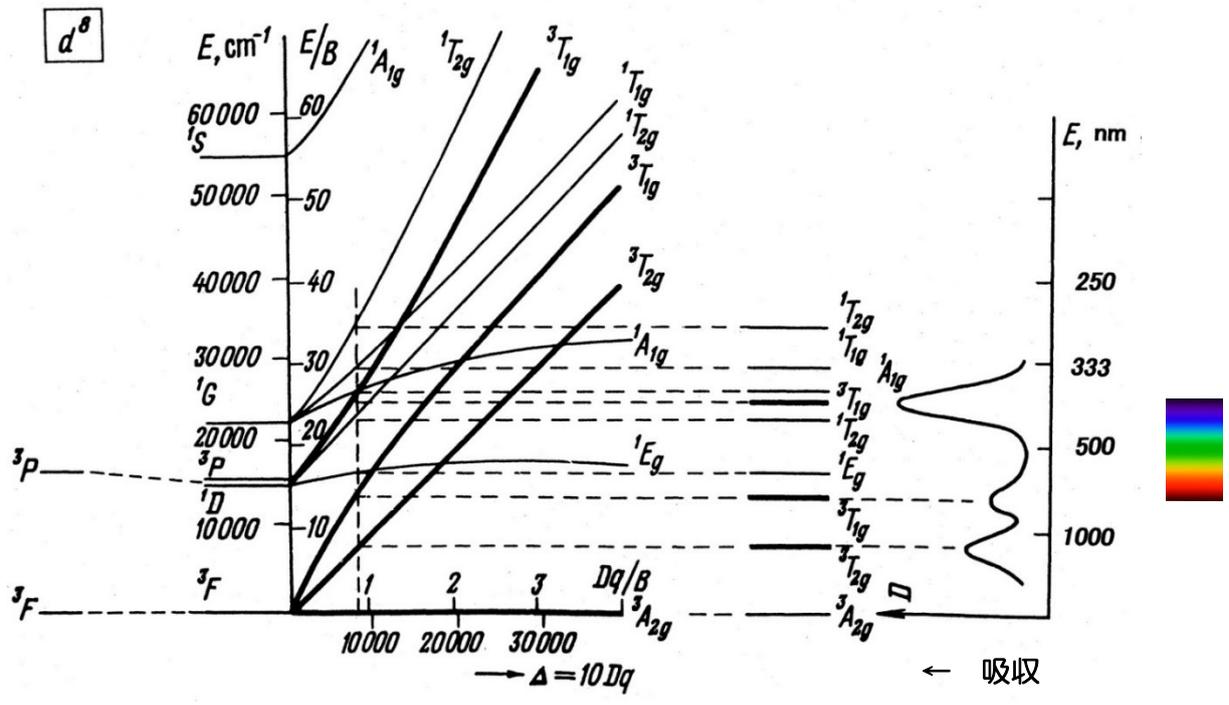


図3-43 d^8 の電場 (左) とクリソプレーズの吸収スペクトル (右)

以上のように緑色鉱物については、 Cr^{3+} , Fe^{3+} , V^{3+} , Ni^{2+} という遷移金属が大きく関わっています。

3章のまとめ：

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．

①：

②：

4. 鉱物の世界（Ⅱ）

・さまざまな外観の鉱物

鉱物と宝石

鉱物と宝石の関係については、表4-1 のとおり、鉱物が1種類にもかかわらず数種の宝石が相当していることがわかります。これは主に色調の違いにより宝石名が別々につけられているためです。

鉱物の色調が照明により変化するものがあります。アレキサンドライト（Alexandrite）と呼ばれる宝石（鉱物名はクリソベリル:Chrysoberyl）が代表例で、緑色から赤色に変化します。この現象は、変色効果（Color change effect）と呼び、その変色理由は、鉱物と光源の分光パターンを重ね合わせると理解することができます。光源にも様々なものがあり、例えば蛍光灯には、白熱電球や太陽光に近いものがあります。アレキサンドライトは白熱電球の光で赤色、太陽光では緑色に見えます。この色調の変化が、他の鉱物よりはっきりしているということです。言い換えれば、鉱物（植物・動物）の色は、種類の異なる光源では違って見えるということです。

さらに、鉱物を研磨加工した宝石に見られる現象で、猫目効果（Chatoyancy）やスター効果（Asterism）と呼ばれる光の特殊効果があります。これらの特殊効果の名称を、宝石の接頭語や接尾語として使われます。

代表的な特殊効果は、猫目（cat's eye）のような外観のもので、クリソベリル・キャッツアイと呼ばれています。これは、一方向に針状・管状の内包物（inclusion：インクルージョン）をもつものや繊維状の成長をしているものを、カボション・カット（山型に研磨）することで、その内包物や成長の方向に直交して光の反射が見られる現象を利用した宝石です。このような特殊効果を示す宝石は次のとおりです。

オパール、オブシディアン、ジプサム、アイオライト（コーディアライト）、クォーツ、タイガーアイクォーツ、ホークスアイクォーツ、スキャポライト、アクアマリン、エメラルド、ネフライト、ペクトライト、プレーナイト、アクチノライト、トルマリン、アパタイト、シリマナイト、マラカイト、エンスタタイト、コーネルピン、ダイオブサイド、クリソベリル、アレキサンドライト、ルビー、サファイア、ジルコンなどです。

これらの中からクリソベリル・キャッツアイ以外で流通している宝石の中で3種類を紹介します。

1) ジムサム（Gypsum 石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ 単斜晶系）

繊維状のジプサムは、カボション・カットされ、キャッツアイを示します。サティン・スパー（satin spar）とも呼ばれます。また、ジムサム（石膏）で、透明なものをセレナイト（selenite）、微細な集合体をアラバスター（alabaster）と呼ばれます。硬度が低いため、さまざまな形に加工されます。

産地：エジプト、イギリス、イタリア。

名前の由来：ジプサムは古代のギリシャ語 gypsos、セレナイトはギリシャ語 selene（月という意味）、アラバスターはエジプトの産地名の Alabastro から。

2) アパタイト (Apatite 磷灰石 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$ 六方晶系)

青色透明のブラジル産アパタイトは大変魅力的な色調です (図4-1)。黄色のものはメキシコ産などがあります。キャッツアイを示すものがあります。

産地：(青色)：ブラジル, ミャンマー, インド。(黄色)：メキシコ, カナダ
ブラジル。(キャッツアイ)：ブラジル, ミャンマー。

名前の由来：ギリシャ語の apate (惑わす) という意味で, 野外で他の鉱物と間違えられやすいため, この名があります。

3) シリマナイト (Sillimanite 珪線石 Al_2SiO_5 直方晶系)

繊維状 (fibrous) の形態からファイブロアイト (fibrolite) とも呼ばれます。その繊維状からキャッツアイを示すものがあります (図4-2)。同じ化学組成で結晶構造が異なる (多形と呼ぶ) ものである, カイアナイトとアンダリュースイトがありますが, これらとは外観がかなり異なります。

産地：ミャンマー, スリランカ, インド, ケニヤ, アメリカ, カナダ, ブラジル, 南
アフリカ。

名前の由来：化学者で地質学者でもあった Benjamin Silliman (1779-1864) に因んで。

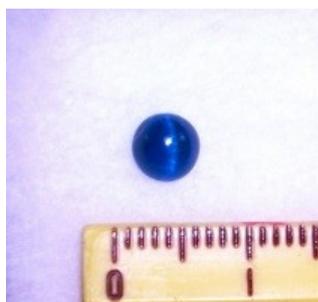


図4-1 アパタイト・キャッツアイ



図4-2 シリマナイト・キャッツアイ

オパールの色調

鉱物に見られる外観の特徴の中で, オパールが示す遊色 (Play of color) 効果は, 照明 (光源) の影響を最も受ける現象です。即ち, 太陽光線では綺麗な遊色を示しますが, 特定の波長を持つ光源では, 綺麗な遊色は期待できません。最近のLED (発光ダイオード: light emitting diode) と太陽光線との違いに気を付ける必要があります。

さて, オパールは回折により遊色という現象を示します。他の鉱物のように着色元素を含むものではありません。その元素が主成分に含まれているものを自色 (idiochromatic color) 鉱物, 微量成分として含まれているものを他色 (allochromatic color) 鉱物と呼びます。ところが, オパールは, それらのような成分には無関係です。

オパールの着色原因については, サンドース (Sanders) らが 1964 年に発表しましたが, Bragg 父子が発見したX線の回折現象であるブラッグの法則 (Bragg's law) を可視光線に応用したものです (76 頁参照)。即ち, X線回折で現れるピークの位置が, 可視光線が

強められたものに相当するということです。X線回折では元素を球と考えていますが、オパールもその表面をフッ酸で処理すると図 4-1 のように小さな粒子の集合体であることが分かり、これを原子の配列と同じように考えて、回折現象により特定の可視光線を強める、という考えです。

球が大きいほど可視光線の長い波長（赤色）、小さいほど短い（青色）が見られる、ということを説明しています。

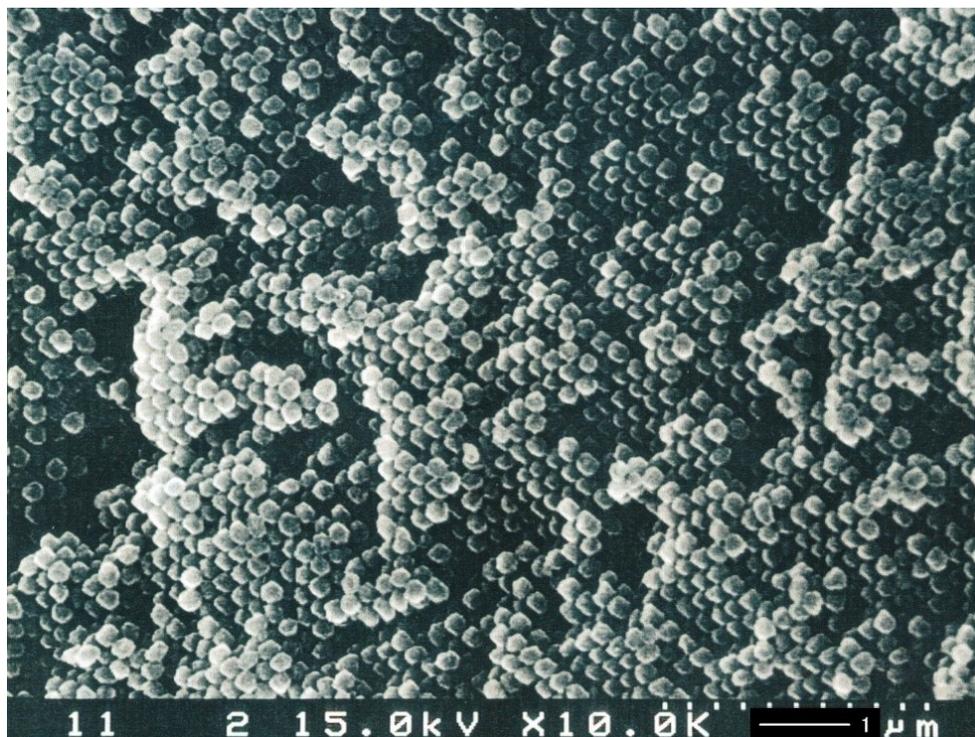


図 4-1 球状の珪酸が整然と配列している

外観により名称が異なる例として宝石を例にとりあげると表4-1のような関係があります。

表4-1 鉱物名と宝石名の関係

鉱物名	外観	宝石名
ダイヤモンド	透明無色, その他	ダイヤモンド
ジェイダイト	半透明緑色, その他	ヒスイ (ジェイダイト)
トパーズ	透明オレンジ褐色, 淡青色	トパーズ
トルコ石	不透明空青色	トルコ石
コランダム	透明赤色	ルビー
	スター効果のある赤色	スター・ルビー
	透明赤色以外	サファイア
	スター効果のある赤色以外	スター・サファイア
	透明ピンク・オレンジ	サファイア (パパラチャ)
ベリル	透明緑色	エメラルド
	透明淡青色	アクアマリン
	透明黄色	ヘリオドール
	透明ピンク	モルガナイト
	その他	ベリル
クォーツ	透明無色	ロック・クリスタル
	透明紫色	アメシスト
	透明黄褐色	シトリン
	不透明赤色および緑色	ブラッド・ストーン
	不透明赤褐色と白色の縞目模様	サード・オニキス
	不透明曲線の縞目模様	アゲート (瑪瑙)
エルバイト (トルマリン族)	透明ピンク, 緑, 青色	トルマリン
アルマンディン・パイロープ系 (ガーネット族)	透明赤紫色	ロードライト・ガーネット
グロッシュラー (ガーネット族)	透明緑色, その他淡い色	グロッシュラー・ガーネット
オルソクレス (フェルドスパー族)	半透明白色, シラー効果をもつ	ムーンストーン
マイクロクライン (フェルドスパー族)	半透明青緑色	アマゾナイト
オパール	半透明黒～灰色, 遊色効果をもつ	オパール (ブラック)
	半透明白色, 遊色効果をもつ	オパール (ホワイト)
	透明無色, 遊色効果をもつ	オパール (ウォーター)
	透明オレンジ色, 遊色効果をもつ	オパール (ファイヤー)
オパールと褐鉄鉱	不透明で底部が褐色, 遊色効果をもつ	オパール (ボルダー)
ラズライトと黄鉄鉱他	不透明青色	ラピス・ラズリ

4章のまとめ：

- ・アレキサンドライト（変色）効果について説明しなさい

アレキサンドライト効果とは、太陽光と人工光（白色光）のような異なる光源で宝石を観察した時に、一般に緑色と赤色というように異なる色調を示すこと。

アレキサンドライト（Alexandrite）と変色効果を示すガーネット（Garnet）の分光パターンは図-1のとおり。

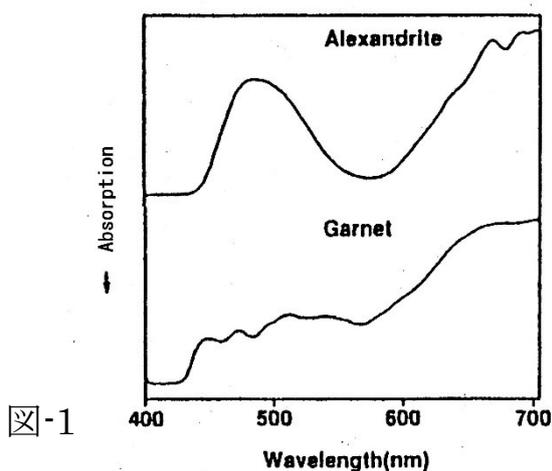


図-1

なお、太陽光（昼光色：Daylight）と白色光（50W の電球：Artificial light）の分光パターンは図-2のとおり。

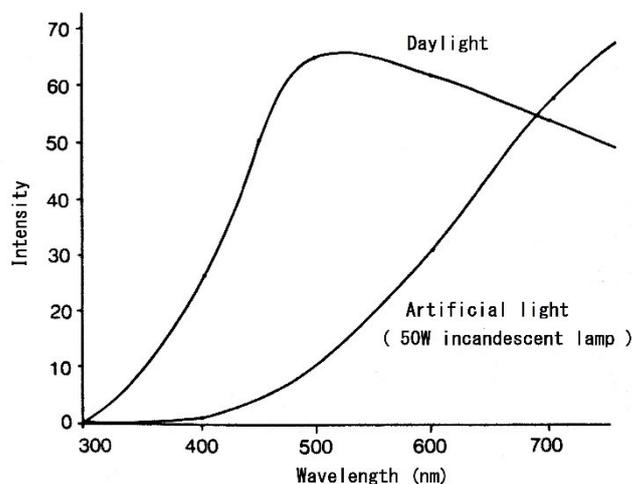


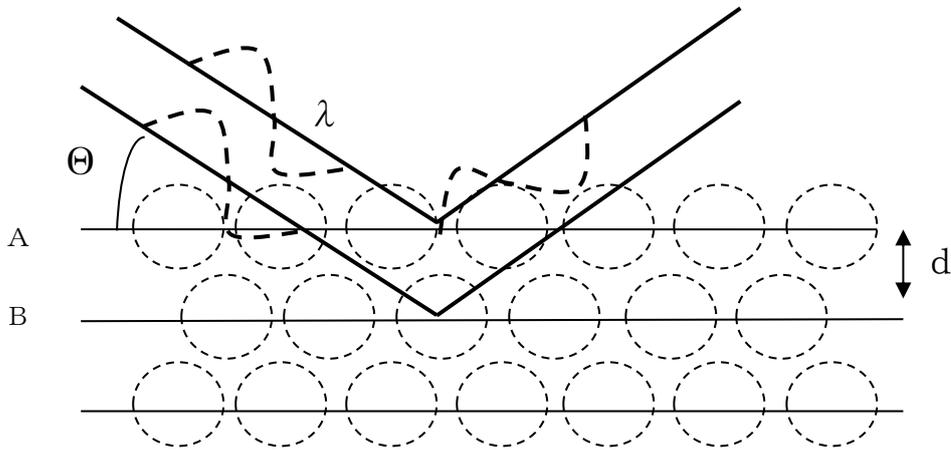
図-2

図-1と図-2から、アレキサンドライト（変色）効果が生じる理由について考えなさい。

ヒントは、図-1と図-2を重ね合わせた分光パターンを図示します。

・オパール（蛋白石：Opal）の着色原因について考えましょう

オパールを構成する球状粒子の集合を模式的に図—1のように表し、一番上の表面 A で反射した光と次の面 B まで透過して反射した光とが重なる現象を考えます。これは光路差¹⁾を計算することになります。



図—1

A 面と B 面との距離を d ，入射した時の角度を Θ ，光の波長を λ とすると，これらの関係は次のように表されます。

$$n \lambda = 2 d \times \sin \Theta \quad (n = 1, 2, \dots \text{整数})$$

n が整数の時に波長 λ が強め合うことになります。これはブラッグの法則 (Bragg's law) と呼ばれるもので、X線回折の原理として知られています。このような光の反射をブラッグ反射とも呼ばれます。このことから、オパールは可視光線のブラッグ反射とみなすことができます。

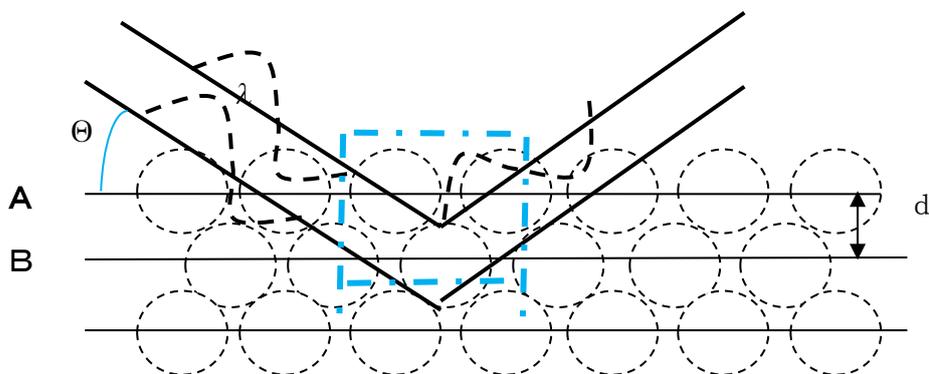
A 面と B 面との距離 d は、粒状粒子の (①) に関係します。オパールが赤色に見えるということは、青色より波長が長いので、粒状粒子が (②)，青色が見えるということは、赤色が見える場合より粒状粒子が 小さい ということが導き出されます。

このように、オパールの色は、構成する球状粒子が規則的に配列することと、その粒状粒子の大きさが可視光線の波長の半分程度の場合に見られるということになります。実際に、青色 (波長： $\lambda = 450 \sim 495 \text{nm}$) のオパールは 200nm 程度の球状粒子の集合であることが知られています。

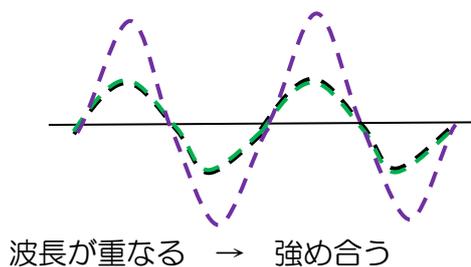
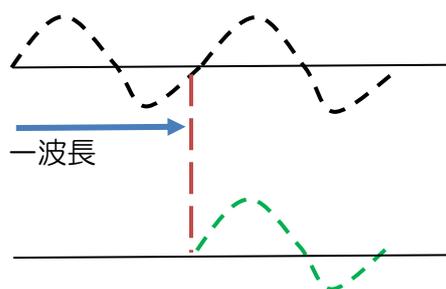
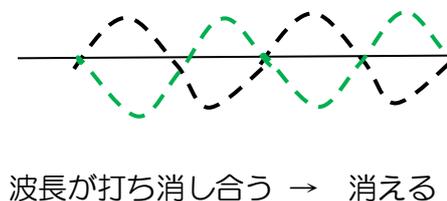
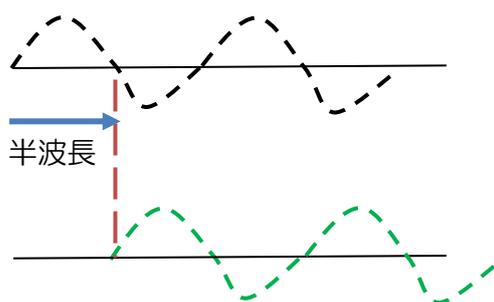
上記の括弧内の①と②に入れる語句は？

① = () ② = ()

1)光路差：光路差について，下記の青線で囲まれた範囲で考える。



そもそも干渉とは，A面とB面で反射してくる，それぞれの光の波長のズレがあるか無いかによって生じる現象です。すなわち，A面とB面によって反射してきた光が，ちょうど半波長ズレていればお互いに打ち消し合い，波長の長さ分であればお互いに強め合う，という現象です。



A面とB面から反射してくる光の波長の差を“光路差”と呼びます。
この光路差は $b'c'$ と $c'd'$ の距離です。
この距離を下図から求めることにします。

$\triangle a' b' c'$ と $\triangle a' d' c'$ はともに直角三角形であり左右対称です。
 よって、 $\overline{b' c'} = \overline{c' d'}$ なので、ここでは $\overline{b' c'}$ を求めることにします。この距離を
 2倍にしたものが光路差となります。

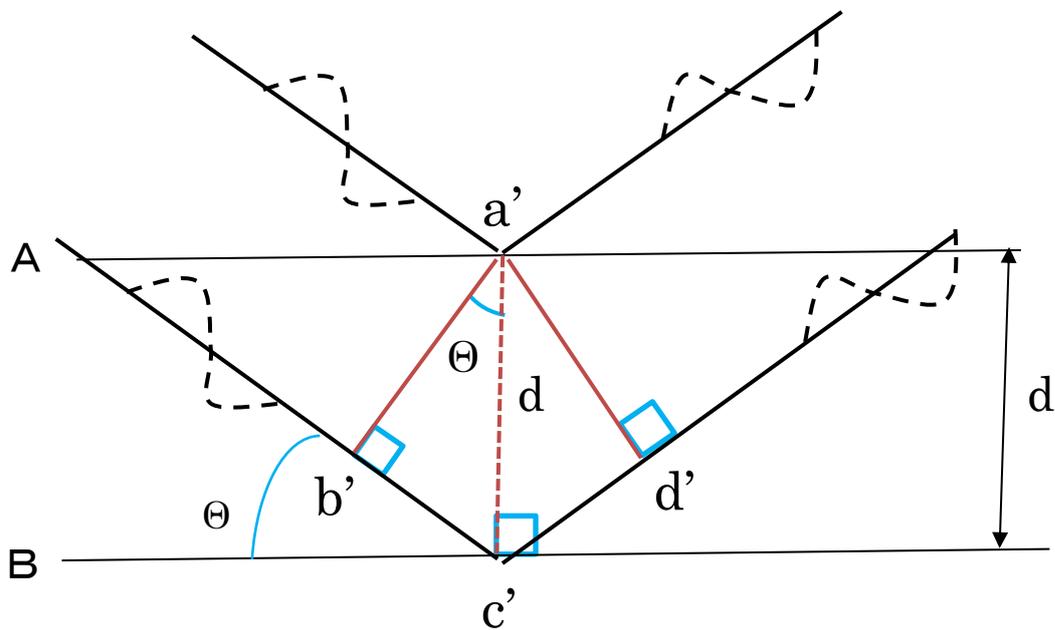
三角形の内角の和は180度から $\angle b' a' c'$ は角度 θ です。
 $a' c'$ はA面とB面との距離 d です。

三角関数を使い表現します。

$$\sin \theta = \overline{b' c'} / \overline{a' c'} = \overline{b' c'} / d$$

なので、求めたい $\overline{b' c'}$ は $d \times \sin \theta$ となります。

従って、光路差は $2d \times \sin \theta$ となります。



この光路差が、波長の一波長あるいはその整数倍なら光が強め合うこととなります。

補遺 層状構造によって見られる色

モルフォチョウ（蝶）（学名 *Morpho*）（下図）は、鱗粉や毛でおおわれているが、その鱗粉が層状に配列することにより、光を干渉させて青色の色調になる。これは、オパール内部の規則的に配列した小さな球状の集合により、光を干渉させてカラフルに見える現象と同じメカニズムである



5. 鉱物の同定（I）

・肉眼から光学顕微鏡を使った観察～野外でわかること～

鉱物の内部を観察することによって、その生い立ちを知ることができます。この生い立ちを知るということは天然起源なのか、あるいは人工的なものなのかを判断する際に大変重要です。一般的には次に紹介する実体顕微鏡を使用します。鉱物の内部に見られるインクルージョン（Inclusion：内包物あるいは包有物）の生い立ちは、次のように3つに分けて考えることができます。

1.初生インクルージョン

結晶が成長する時にすでに生成していた鉱物を取り込まれたもの。形態的には土状や不定形なものが多い。

2.同生インクルージョン

結晶が成長すると同時に他の鉱物が形成されたり、液体や気体を取り込まれたりしたもの。含まれた結晶の形態は幾何学的な自形をなしていることが多い。さらに、成長模様を示す色帯や双晶と呼ばれる、2つの結晶がある面や点に対して対称的に成長したものなどが見られます。

3.後生インクルージョン

結晶内に閉じ込められた液体中に結晶が生じたものや、成長後に熱変成作用を受けてできたものなど。

さらにインクルージョンの状態によって分類する次のようになります

A. 気体が単独に含まれる

気体が単独に気泡として見られる場合は人工的につくられたものに見られます。固体からの生成による、ベルヌイ法によって造られた合成ルビー、合成サファイア、合成スピネルなどに観察することができます。ガラスやいわゆる“ねり物”と呼ばれる模造石にも見られます。また、張り合わせ石には接着部分に気泡が見られます。

天然に産出する鉱物（宝石）には気泡が単独に見られることはありません(図 1-1 参照)。

B. 液体が見られる

鉱物、あるいは水熱法によって人工的に造られた合成宝石には液体が含まれます。合成宝石の液体の分布はほぼ均一ですが、天然宝石の液体の分布はさまざまなパターンを示します。コロンビア産の天然エメラルドには、液体・固体・気体が一緒に含まれることがあります。これは、エメラルドが生成する際に閉じ込められた液体が冷えるにつれて結晶と空隙が生じます。その結果、一つの隙間に液体、結晶、気体が一緒に見られることとなります。それらを、液相、固相及び気相と呼び、三つの相が含まれることでコロンビア産の特徴を示すこととなります。また、スリランカ産の天然サファイアには指紋（フィンガープリント）状と呼ばれる液体が見られます。

C. 結晶が見られる

鉱物には様々な結晶が含まれることがあります。一方、人工的に造られた合成宝石には他の結晶が含まれることは極めて稀です。

• 屈折率の測定

a. 屈折計とは

屈折計（図5-1，左）は，表面が平らであれば，屈折率が測定できます．使用する際には，その測定値が正しい数値であるかをチェックするため，水と合成無色サファイアを使います．水は，1.333，合成無色サファイアは，1.770～1.762を示します．もし，数値がズレている場合には屈折計内部にある調整用ネジを回して修正します．

この屈折計は，光の全反射を利用してつくられたアッペ型屈折計を改良したもので，平坦な面が2ミリ程度あれば，1.30～1.81までの範囲において，その最小目盛りが0.01なので，練習を積めば精度は±0.002程度により，屈折率を容易に測定することができます．

屈折計のガラス面（瑕がつきやすいので，取り扱いには注意します）の中央部に接触液（ヨウ化メチレンに硫黄などを混ぜた液体）を一滴たらす．

- ① 宝石の平らな面をその液体に付着させます．
- ② 覗くところに円盤状の偏光板をセットし，その偏光板を360°回転させながら観察し，明暗の境界線が，はっきり見えるところを探します．例えば，トルマリンは，1.644と1.624という値に明暗の境目が見えます（図5-1,右）．これが屈折率です．

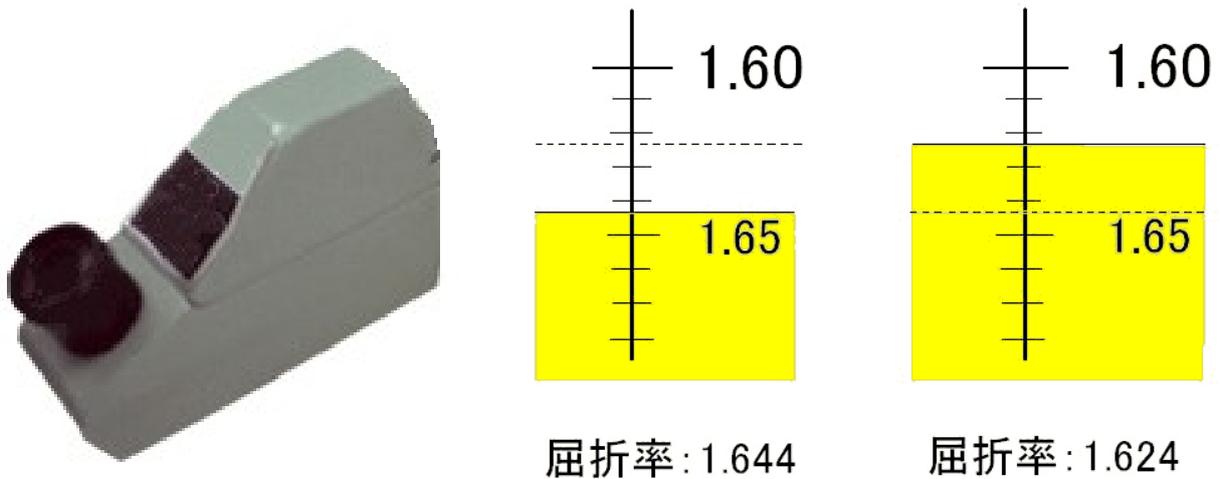


図5-1 屈折計の本体（左）とその見え方の例（右）

b. 屈折計の原理

前述のように光の全反射を利用して屈折率を測定する装置が屈折計です。

例えば、水の入ったコップにストローを入れると、ストローが曲がって見えます。これは、光が屈折するからです。何故そのように見えるかと言うと空気と水の密度が異なるので、光の進み方が違うことによります。図5-2で示すとその図の上のようになります。

宝石屈折計は右上のように光が左下から①、②、③、④と入射するとそれぞれ①'、②'、③'、④'、④''のように屈折と反射をするようになります(図5-2)。

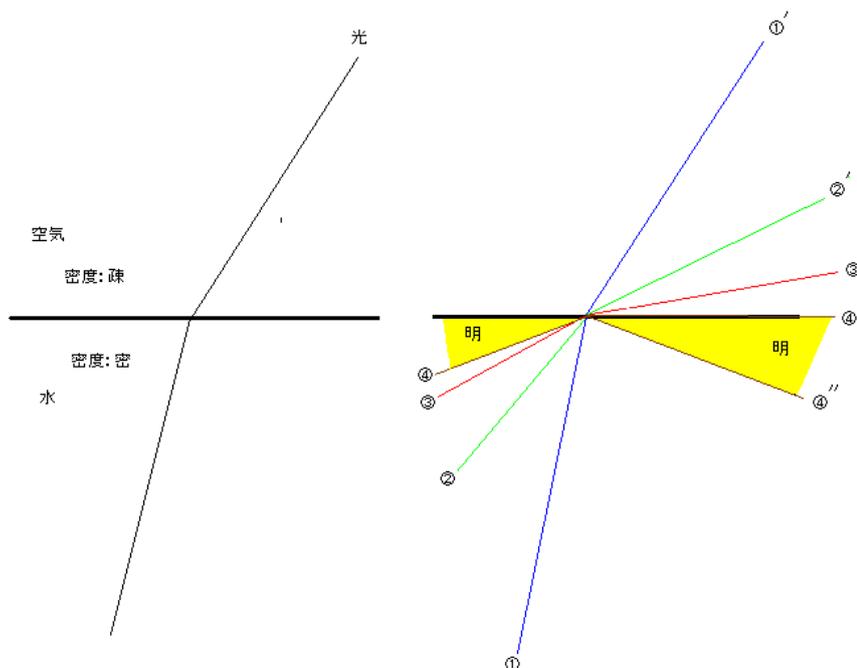


図5-2 光の屈折と反射

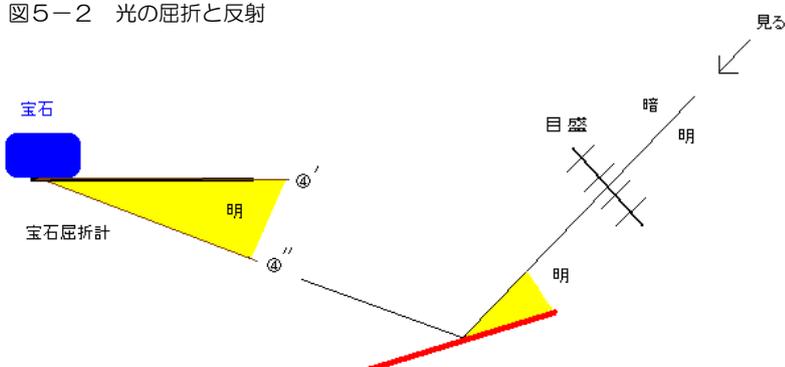


図5-3 屈折計内の光の様子

図5-3に示したように屈折計内に左側から入射した光は、全反射によって右側へ進みます。途中の鏡で反射してから目盛りがふってあるスケールを通ります。この時、全反射によって明るく見える範囲は目盛りの下側にきまします。明るい範囲と暗い範囲の境目が、求める鉱物の屈折率となります。鉱物と屈折計の間には、接触をよくするために接触液(ヨウ化メチレンと硫黄などを混ぜたもの)を使用します。この液体の量は多くしない方が屈折率の誤差を少なくします。

また、スポット法と呼ばれる方法は、カボション（山形）カットされたものや彫刻品などの屈折率の測定に使われます。この計測のポイントは、接触液をなるべく少量にすることです。スポット法の場合は、宝石屈折計から眼を 20~30cm 離して目盛りをみるようにします。見方として、下図の中央のように、カボション・カット面と屈折計が接している面が丸く見えますので、その丸のちょうど上半分が暗く、下半分が明るい位置を探します。その明暗の境目と目盛りが一致するところが、その鉱物の屈折率となります（図 5-4）。下図の場合は 1.54 です。

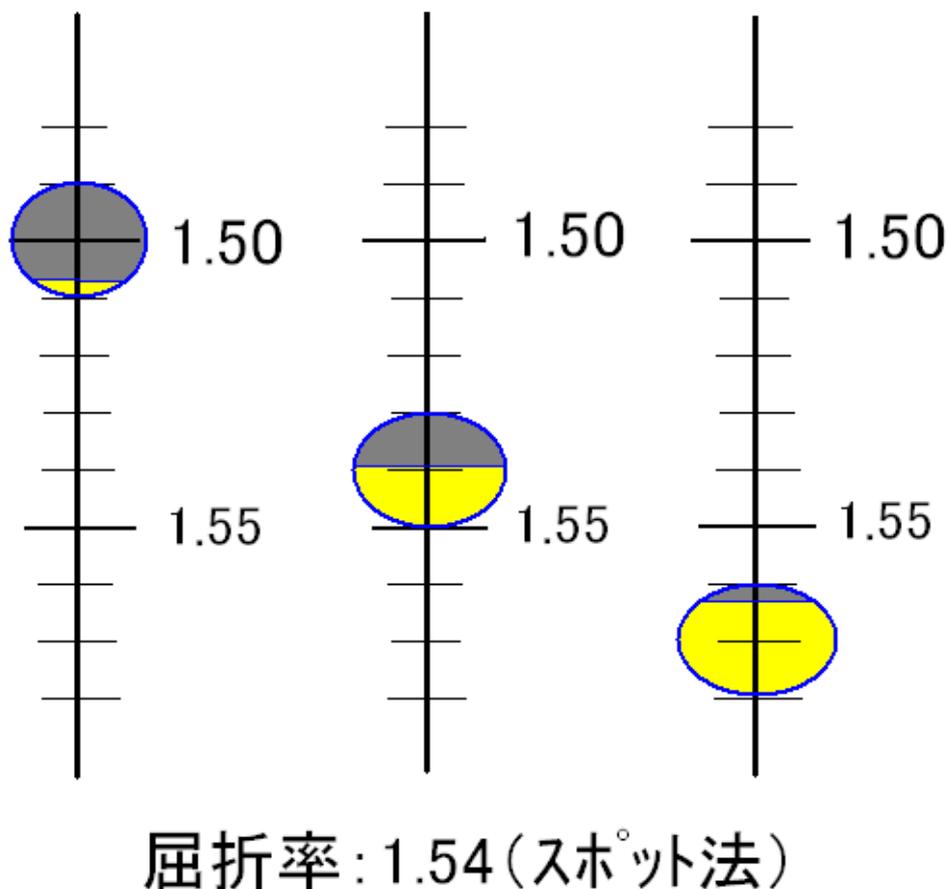


図 5-4 スポット法による屈折率の求め方

c. 屈折率について

光が物質の中を伝わっていく場合に、その方向によって光の速さが変化するものがあります。即ち、方向によって変化しないものは屈折率が一つ、変化するものは最大3つまであります。

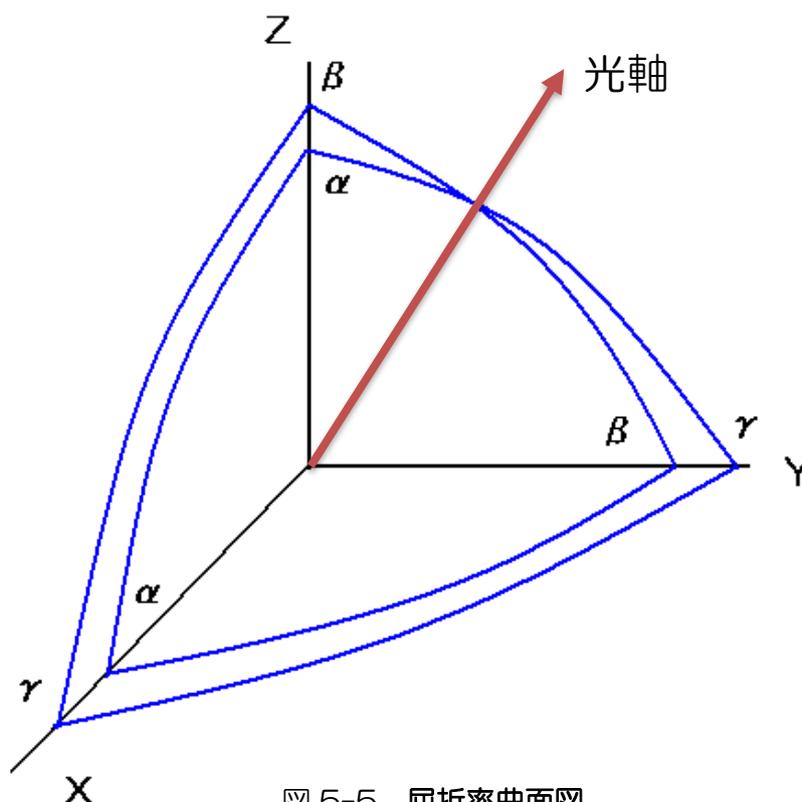


図 5-5 屈折率曲面図

3つの屈折率を α , β , γ と呼び、それぞれの屈折率が等しい ($\alpha = \beta = \gamma$) の場合は、屈折率が一つであり、単屈折性と呼びます。また、 $\alpha = \beta$ と γ , α と $\beta = \gamma$ の場合は、屈折率が二つとなり、これら屈折率を ω , ε という記号が使われます。

これらの屈折率と結晶系との関係は次のとおりです。

- 屈折率が一つ _____ 立方（等軸）晶系
- 屈折率が二つ (ω , ε)
 - _____ 六方晶系
 - _____ 三方晶系
 - _____ 正方晶系
- 屈折率が三つ (α , β , γ)
 - _____ 直方（斜方）晶系
 - _____ 単斜晶系
 - _____ 三斜晶系

非晶質のガラスのようなものは、等軸（立方）晶系と同じで屈折率が一つの単屈折性です。

宝石屈折計では、1度に2つの値しか測定できませんが、宝石の向きを変えて計測することによって、屈折率が3つの場合もある程度の推定ができます。即ち、ある方向で α と β , 別な方向で β と γ という値が測定できれば、それぞれ α , β , γ が求められたこととなります。

その他の簡易な検査手段

屈折計以外に、次に示すように紫外線を照射させて、その蛍光反応を観察したり、分光スペクトルなどの特性を調べたりする方法があります。

a. 紫外線蛍光反応

鉱物に長波（365nm）と短波（253.6nm）という2種類の紫外線を照射させ、その蛍光反応を観察する検査です。

b. 偏光器による検査

一方向にしか振動しない光を通す偏光板を2枚使い、それぞれを90度で交差させて重ねてみると、光を透過しない状態になり、真っ黒にみえます。ところが、複屈折性の鉱物は、入射した光を偏光させてしまうので、交差した偏光板の間に置いても明るくみえます。一方、単屈折性の鉱物（ダイヤモンドなど）は、光を偏光させないため、真っ黒です。

この検査は、透明であれば、複屈折性かどうか、簡単に分かりますので、複屈折性の水晶と単屈折性のガラスは、この偏光器だけで区別ができます。

c. 多色性による検査

複屈折性の有色鉱物は、多色性と呼ばれる性質をもっています。一方、単屈折性には多色性は見られないため、ルビーとスピネルあるいはガーネットとの区別に有効です。ダイクロスコープ（二色鏡）と呼ばれるカルサイト（方解石）を加工したものがあります。

d. 分光スペクトルによる検査

赤外～可視～紫外領域の分光スペクトルを検査します。

e. その他

エメラルド・フィルターと呼ばれる、ガラスとエメラルドを区別するために作られたフィルターがあります。これは、赤色（690nm）と黄緑色（540nm）のみを透過するように作られ、このフィルターを通してみると、赤色か緑色、あるいは茶褐色の色調に見えます。例えば、ガラスは緑色、エメラルドは赤色に見えます。

その他、様々な分析装置がありますが、別頁で説明します。

5章のまとめ（1）：

コロンビア産エメラルドに見られるインクルージョン

コロンビア産エメラルドにはインクルージョンとして、その空隙に固体（結晶）・気体・液体が図-1 のように見られます。含まれている結晶が岩塩（NaCl）であることから、アンデス山脈の造山運動の時、熱せられた周囲の海水が地層に浸透し、エメラルドが生成したと考えられています。有用な鉱物が集まっているところを鉱床と呼びますので、コロンビア産エメラルド鉱床は、このような熱水によって出来たということになります。もう一度、エメラルドに包有されたインクルージョンの生成について考えてみることにします。

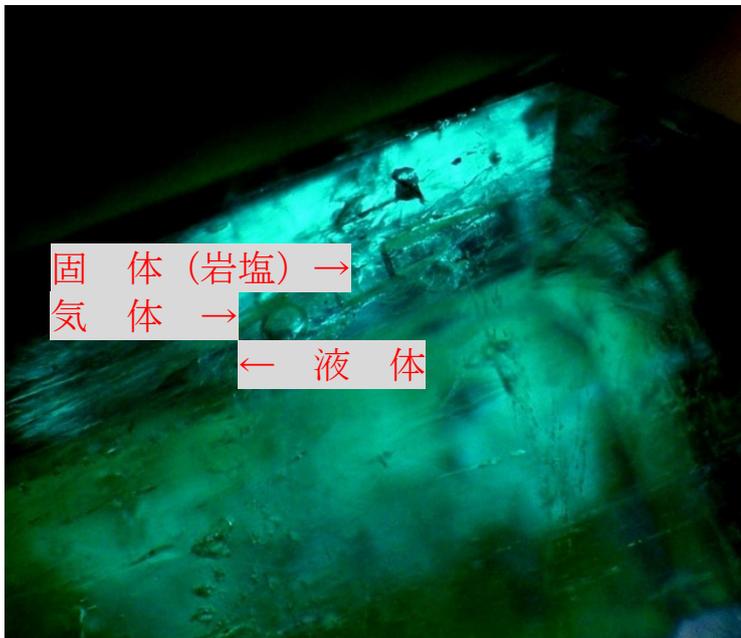


図-1

地層に（ ① ）が浸透し、その（ ① ）が冷える過程でエメラルドにも（ ① ）が取り込まれます。冷える時、岩塩（NaCl）のような固体（結晶）が生じます。結晶が生じて密度が増した分は空隙（気体）ができます。その結果、冷えた液体（液相）、結晶（固相）、気体（気相）が共存することになります。これを（ ② ）インクルージョン（内包物）と呼びます。

一方、アフリカのクレオパトラの鉱山と呼ばれる産地では結晶片岩中に見られるエメラルドがあります。この場合は、特徴的な鉱物が含まれます。

上記の括弧内の①と②に入れる語句は？

① = () ② = ()

5章のまとめ（2）：

屈折率（Refractive Index）について

鉱物に光が入射すると屈折します（図—1）。その屈折率は鉱物の特性の一つです。

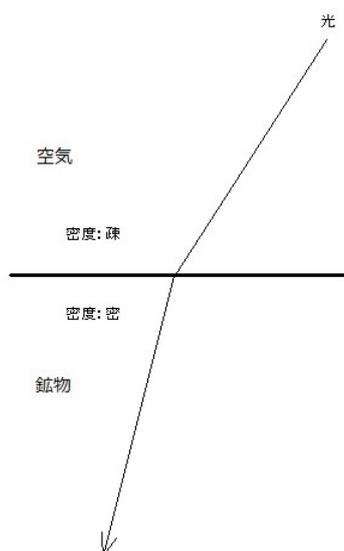
ダイヤモンドやガラスに光を入射させると一方向に屈折しますが、方解石（Calcite： CaCO_3 ，三方晶系）の場合は文字が二重に見えることから、光は二方向に分かれます（図—2）。

屈折率を三次元空間（座標： $X \cdot Y \cdot Z$ ）の中心からの長さで表現するとして、その位置は3つの座標で表されます。習慣的にそれぞれ α ， β ， γ という記号を用います。

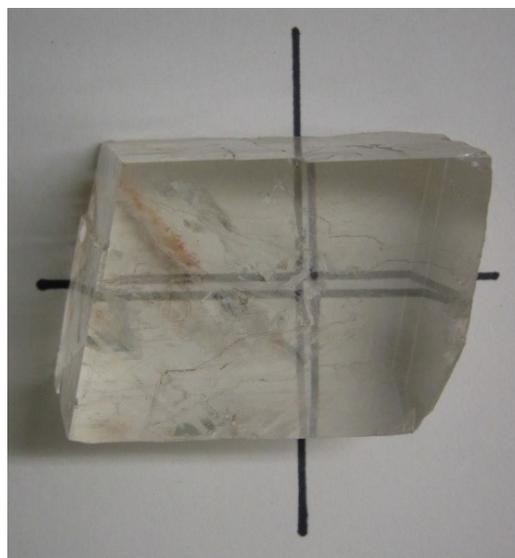
鉱物に入射した光が二方向（二つの屈折率）ということは、 α と β ， β と γ ， γ と α という二つずつの組み合わせで表されます。例えば、屈折率がダイヤモンドのような一つだけの鉱物は、 $\alpha = \beta = \gamma$ ということで、三次元空間で表すと球（断面は真円）になります（図—3）

一方、二方向に分かれる鉱物について、 $X \cdot Y \cdot Z$ 座標の上に α と β ， β と γ ， γ と α を書き入れて、 α ， β ， γ を線で結ぶと屈折率曲面図ができます（図—4）。この図を完成させなさい。

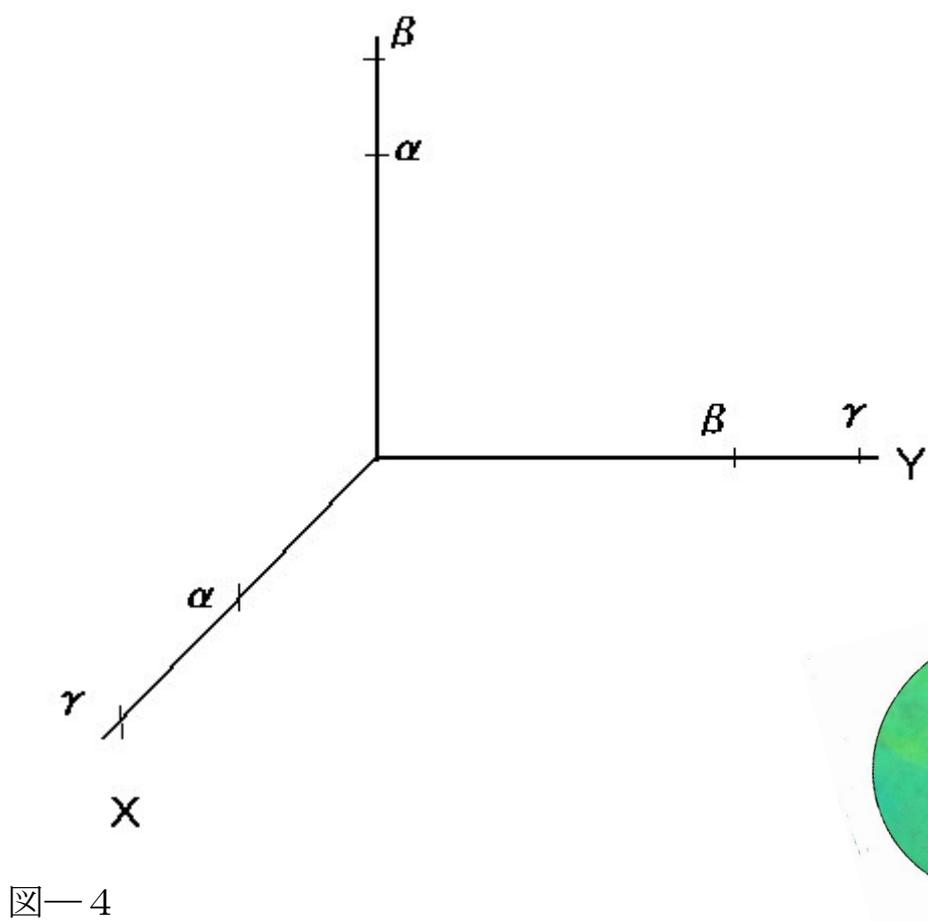
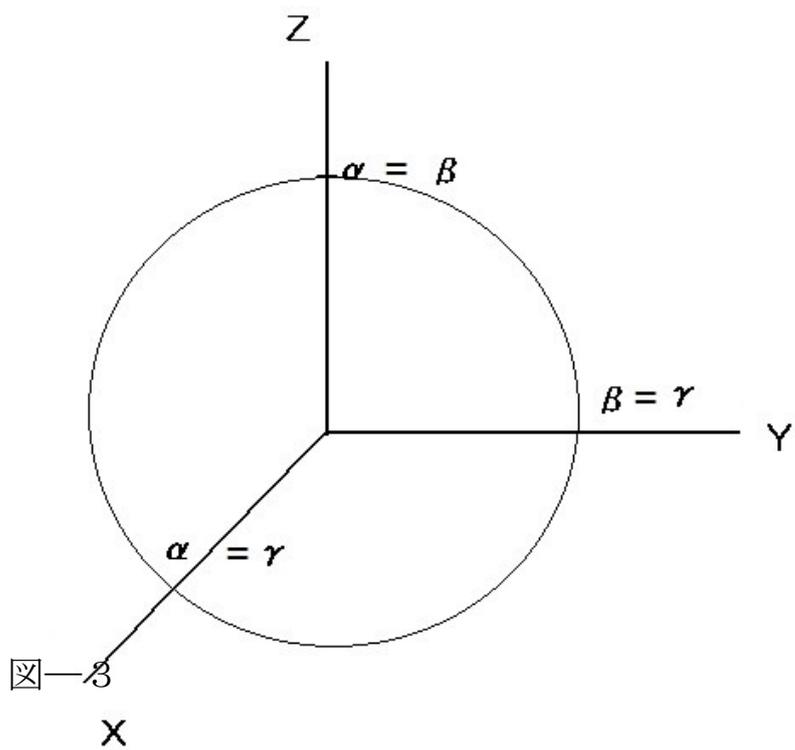
白雲母の屈折率曲面の様子をコノスコープ像で図—5に示します。



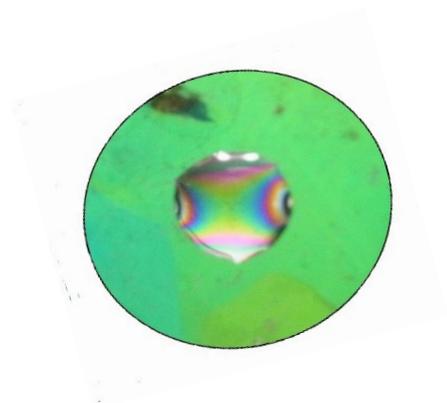
図—1



図—2



图—4



图—5

6. 鉱物の同定（Ⅱ）

・ X線を使った機器分析

X線を利用した分析

最初に発見された時は、未知のものを示すエックス（X）という文字が使われたX線ですが、現在ではその利用価値は大変大きなものとなっています。目に見える光（可視光線）と比べて極めてエネルギーが強い（波長が短い）ため、物質をよく透過するものがあり、レントゲンとして使われ、健康診断では欠かすことのできないものです。しかも、このX線が初期の頃一番活躍したのは、戦争で傷ついた兵士の状態を診察する時でした。最近では、このX線による検査は、遺跡で発掘された剣などの検査や油絵の下書きの調査、ダイヤモンドの割れ目に、ある種のガラスを含浸させたかどうかについて調べるためにも使われています。

ここでは鉱物の同定によく使われるX線回折装置（X-ray Diffractometer）の原理からその利用方法について説明します。

1. X線回折分析について

X線回折分析は、結晶性物質（以下、結晶と呼ぶ）を扱う分野で広く用いられ、重要な研究手段です。この分析により、鉱物の結晶構造の規則性に関する情報を得ることができます。

（1）X線の発生

X線は、波長が $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{m}$ （1pm \sim 10nm）程度の電磁波（図6-1）です。

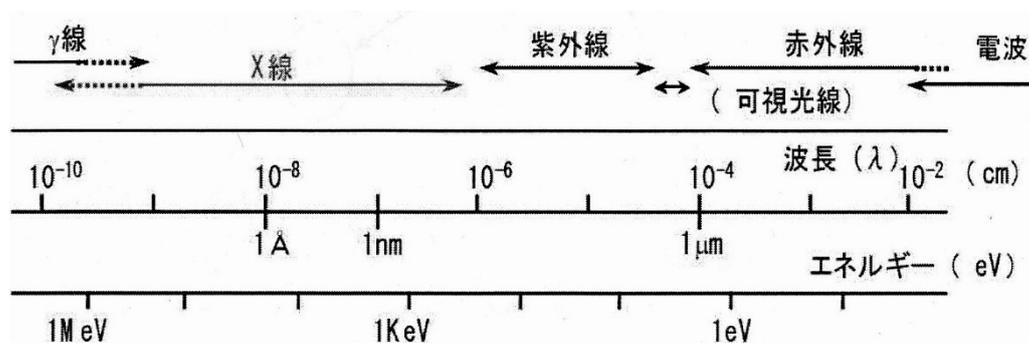


図6-1 電磁波の波長とエネルギー

X線は、真空中において高電圧(数万ボルト)で加速させた高速度の電子を、金属の陽極に衝突させた際に発生します。このようにして発生したX線は、電子が急に速度を失うため放出される連続X線と、原子の内殻電子の遷移による特性X線からなります（図6-2）。

連続X線の最大エネルギーは、波長 λ_{\min} (短波長端) とすると、

$$eV = h\nu_m = hc/\lambda_{\min} \quad (1)$$

$$\therefore \lambda_{\min} = hc/eV \quad (1)'$$

e : 電子の電荷 (1.60×10^{-10} C) , h : プランク定数 (6.61×10^{-34} Js)

c : 光速 (3.00×10^8 m/s) , ν_m : X線の振動数

で表されます。

(2) X線を用いた測定法

X線を物体に照射すると、図6-2に示すように透過X線、蛍光X線、散乱X線などが発生し、透過X線はX線透過法、蛍光X線はX線分光法、散乱X線はX線回折法など様々な測定法に用いられています。

実際、X線回折分析で取り扱うX線の「回折」現象は、散乱X線に起因するものです。

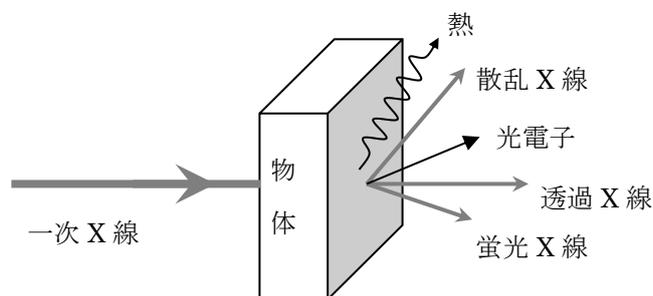


図6-2 X線を物体に照射した時に起こる現象

(3) X線の回折

物質は、原子や分子で構成されており、規則正しく並んでいるものや不規則に並んでいるもの、あるいはその中間的な状態で存在しているものなど様々あります。

規則正しく並んでいるものを結晶性物質、不規則に並んでいるものを非結晶物質と呼びます。結晶性物質は原子や分子の規則正しい配列が物質全体に連なっている、いわゆる単結晶と細かな結晶片がランダムな方向を向いて集っている多結晶体に分けることができますが、いずれの物質もその原子や分子の間隔は数 Å (オングストローム) 程度です。

波長がその間隔と同程度かそれ以下のX線が結晶中に入射すると、各原子から散乱X線が放出され、この散乱X線を観測すると、互いにその位相が完全に一致し、強め合う回折現象を見ることができます。これはBraggの条件を満たす場合に起こるもので、条件を満たさないものは互いに打ち消しあって観測されません。

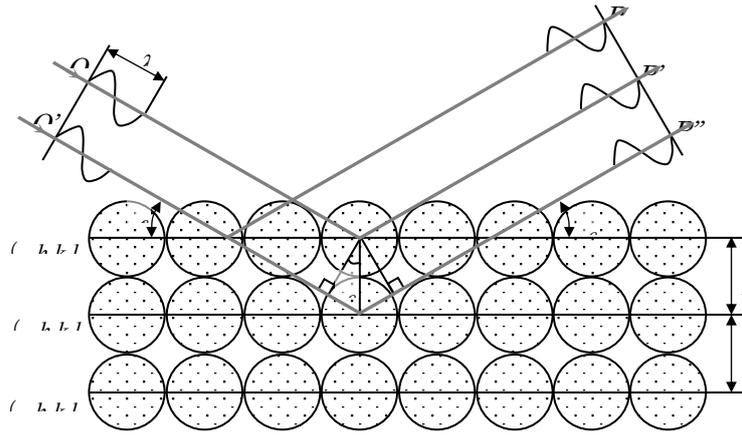


図6-3 結晶にX線が入射した場合のモデル

Braggの条件とは、等間隔に並んだ原子によってX線が入射した場合、そこから反射するX線が強めあったり弱めあったりすることを数式で表したもので、原子間の距離・X線の波長・入射角度によって求められます。即ち、原子の間隔を $d(\text{\AA})$ 、原子に対するX線の入射角(反射角)を $\theta(^{\circ})$ とすると、光路差の $2d\sin\theta$ が波長の整数倍 $n\lambda$ に等しいときに隣接する原子網面からの散乱波の位相が揃って回折現象が認められることとなります。よってBraggの条件は次の式ととなります (1)式)。

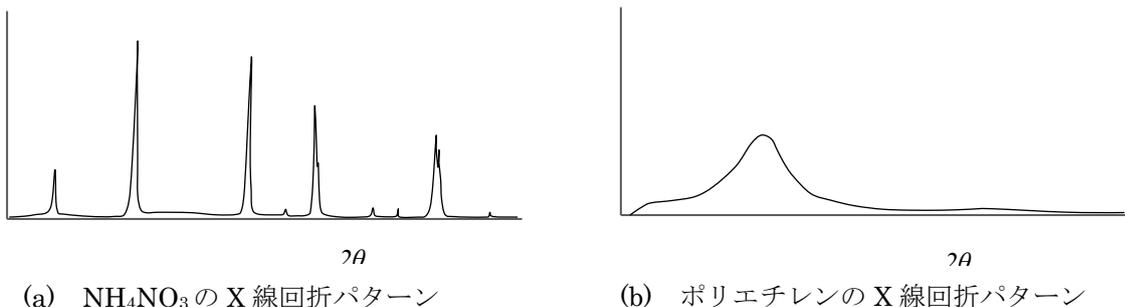
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

この式はX線に限らず、電子線、中性子線及び可視光にも適用できます。

(4) 粉末X線回折法

結晶は原子や分子が3次元空間で規則正しく並んでいます。異なる結晶ではそれぞれの結晶を構成する原子が異なることから、X線を入射させると、それぞれの結晶を特徴づける散乱波によるX線回折パターンが得られます。特に、粉末にした結晶にX線を入射させた場合、様々な方向からの回折パターンが得られることになり、その回折パターンは結晶固有のものであり、結晶である鉱物の特徴を示すことから、鉱物の同定に使われます。

このX線回折に利用するX線の波長はおよそ $0.5\sim 2.5 \text{\AA}$ であり、この波長範囲は原子イオンの大きさと同程度であるため、結晶により回折した散乱曲線は鋭い線スペクトルを示します。また、非晶質物質では基本的にはゆるやかな波型の散乱曲線となります(図6-4)。



(a) NH_4NO_3 の X 線回折パターン

(b) ポリエチレンの X 線回折パターン

図6-4 代表的なX線回折パターン

(5) X線回折法による鉱物の同定

X線回折による定性分析は、未知鉱物の回折図形と既知鉱物の回折図形とを比較することで行います。既知鉱物等の回折図形は、ICDD (International Centre for Diffraction Data) によりデータ化され、最初はカード (図6-5) であり、現在では電子化されたものが入手できます。

◎X線回折データ

粉末X線回折データの標準として広く利用されている。このカードは一つの物質について、回折データ (格子面間隔, 回折線強度, ミラー指数など), 結晶学的データ, 光学的データおよび測定条件が記載されています。図右上のマークは、信頼性を示し、★が最も信頼性が高く, Iはその次, Cは計算によるもの, Oは信頼性が低いことを示しています。

カード番号 → **5-0628 MINOR CORRECTION** ↓最大の面間隔

強線_面間隔 →	d	2.82	1.99	1.63	3.258	NaCl	★ ←信頼性
相対強度 →	I/I ₁	100	55	15	13	SODIUM CHLORIDE ←物質名 (HALITE)	
測定条件 →	Rad. CuKα	λ 1.5405	Filter Ni	Coll.	d Å	I/I ₁	hkl
	Dia.	Cut off			3.258	13	111
	I/I ₁	G. C. DIFFRACTOMETER	d corr. aba.?		2.821	100	200
	Ref. SWANSON AND FUYAT, NBS CIRCULAR 539, Vol. II, 41 (1958)				1.994	55	220
	Sys. CUBIC	S.G. O _h ⁵ - Fm3m			1.701	2	311
	a ₀ 5.6402	b ₀	c ₀	A	1.628	15	222
	α	β	γ	Z 4	1.410	6	400
	Ref. IBID.				1.294	1	331
	δ α	n β 1.542	γ	Sign	1.261	11	420
	2V	D ₅₀ 2.164 mp	Color	COLORLESS	1.1515	7	422
	Ref. IBID.				1.0855	1	511
	AN ACS REAGENT GRADE SAMPLE RECRYSTALLIZED TWICE FROM HYDROCHLORIC ACID. X-RAY PATTERN AT 26°C.				0.9969	2	440
					.9533	1	531
					.9401	3	600
					.8917	4	620
					.8601	1	533
					.8503	3	622
					.8141	2	444
	REPLACES 1-0993, 1-0994, 2-0818						

2003

図6-5 ICDD のデータ例 (旧称JCPDSカードあるいはASTM data カード)

• X線回折法の応用例

～微小領域X線回折による非破壊での検査～

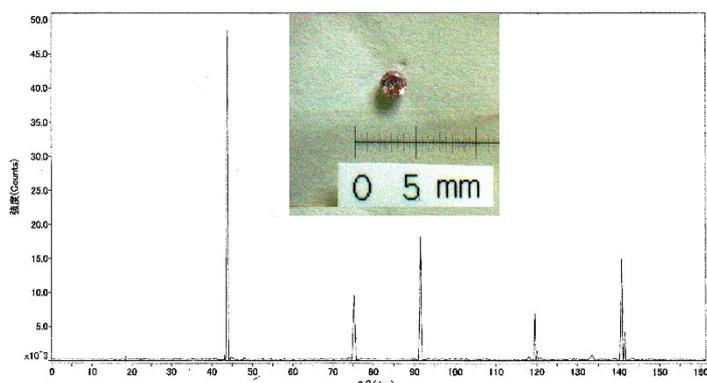


図6-6 微小領域X線回折装置 (右) と試料 (上), 試料のX線回折パターン (下)



試料を微小領域X線回折装置にセットして得られたX線回折パターン (図6-6) からダイヤモンドだと同定できました。

6章のまとめ：

・身近な鉱物として、石英（Quartz：クォーツ）が挙げられます。現在では、人工的に造られた石英が、携帯電話やコンピュータなどの電子機器に使われています。この石英は、無色透明なので、（ ① ）と呼ばれています。

・鉱物の同定には、化学組成と結晶構造を調べる必要があります。なかでも（ ② ）は、結晶構造を調べるために使われる装置ですが、同定にも使われています。しかし、肉眼だけでも同定できるものや硬度・屈折率・比重などの物理特性により鉱物名が判明するものもあります。例えば、硬度で、コランダム（モース硬度9）によって傷がつかなければダイヤモンド（モース硬度10）、屈折率で、1.69～1.66を示したピンク色の鉱物はスポジューメン（クンツァイト）と思われる、などがあります。

上記の括弧内の①と②に入れる語句は？

① = ()

② = ()

7. 鉱物の同定 (Ⅲ)

・電子線を使った機器分析

電子線を使用した電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) は有名ですが、これは小さなものを拡大するには最もポピュラーな装置となっています。高分解能で最新鋭の機種では原子の結合の様子までも見ることができます。

このSEMを用いてもXRFと同様に元素の分析が可能です。X線を用いる代わりに電子線を鉱物に照射させるのです。電子線によって、物質からX線 (特性X線) が出てきますので、これを検出します。この装置は電子線を照射させるため、金や炭素などを蒸着させて導電性をもたせる必要があります。しかし、最近ではこのような面倒な蒸着を必要としないタイプのSEMも登場してきました。SEMを二重構造にして、ほとんど大気中で測定できるようにしたタイプと、電子線の加速電圧を低く抑えたタイプです。

電子線を絞り数ミクロン程度までの極めて微小な面積の元素分析が可能な装置、いわゆるEPMA (XMA) と呼ばれているものは広く利用されています。このEPMAについて次に説明します。

(I) X線マイクロアナライザー (Electron probe X-ray MicroAnalyser (EPMA, XMA))

EPMAと呼ばれる装置は、電子線を試料表面に照射し、その領域から発生する特性X線を分析することで、構成元素の種類、含有量を測定する機器であり、走査型電子顕微鏡 (SEM) の機能を有しており、試料を観察しながら目的の場所を選び、直径1~数10μmの範囲をピンポイントで分析できます。

(1) 特性X線の発生

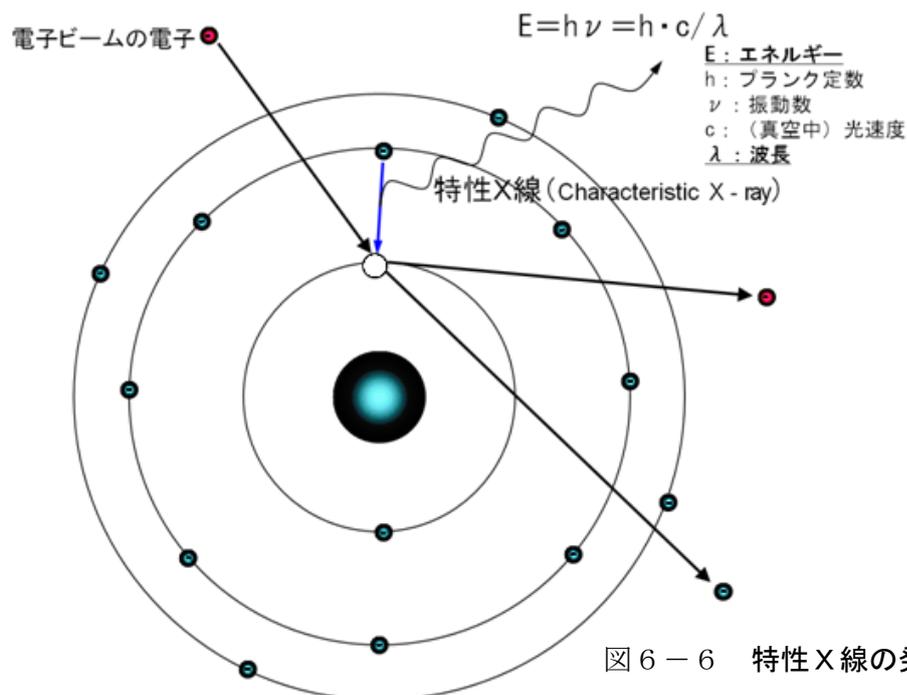


図6-6 特性X線の発生

(2) 試料に照射された電子線によって発生した元素固有の特性X線を利用する。

図6-6のように電子線の電子が試料を構成する元素の軌道電子を弾き出し、その空隙を埋めるために外殻電子が内側の軌道に遷移する際に両者のエネルギー差をX線として放出します。このX線が特性X線 (Charctaristic X-ray) です。軌道電子のエネルギー準位は元素固有であり、その差分として放出されるX線も元素固有のエネルギー (波長) を持ちます。この特性X線を計測分析すれば試料を構成する元素を特定でき (定性分析)、元素の含有量が決定できる (定量分析) ことになります。

(II) 特性X線の種類

一番内側のK殻に遷移して発生する特性X線をK線 ($K\alpha$, $K\beta$) と呼び、同様にL殻、M殻に遷移して発生するX線をそれぞれL線 ($L\alpha$, $L\beta$, ...)、M線 ($M\alpha$, $M\beta$, ...) と呼ばれます。K線には $K\alpha$ ($K\alpha_1 + K\alpha_2$) 線、 $K\beta$ 線があり、 $K\alpha$ 線は $K\beta$ 線に比べX線強度が大きいのが特徴です。

岩石を構成する主要10元素 Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Feでは通常K線を、原子番号の大きい元素、例えばAgやAuはL線やM線を利用します。特性X線のエネルギーは同じ系列 (例えばK系列) では原子番号が増えるに伴って大きくなります。一方、波長は短くなります。

表6-1に挙げた特性X線のうち、エネルギーの近接した $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ は分離せず一つのスペクトルとして現れます。波長分散型分光系に比べエネルギー分解能の劣るエネルギー分散型分光系ではSi以下の原子番号の元素は $K\alpha$ と $K\beta$ も分離ができません。

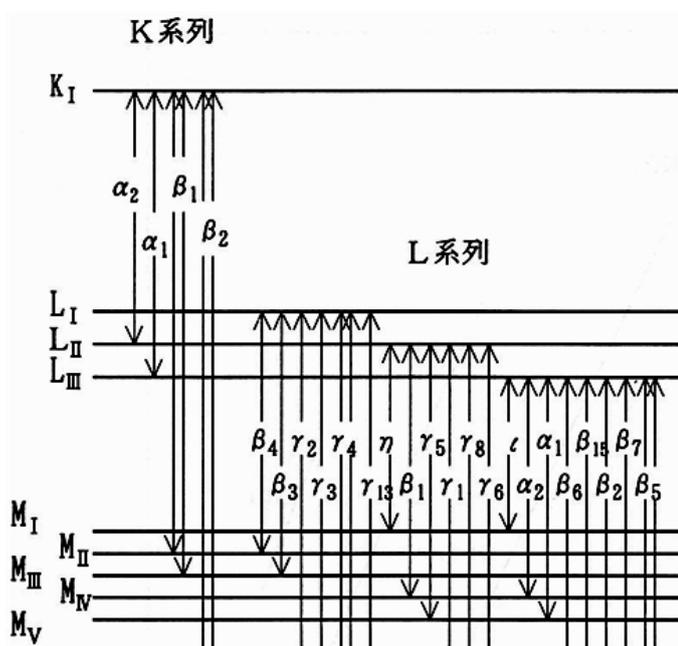


図6-7 特性X線の種類

表 6 - 1 特性 X 線 (K 線) の波長とエネルギー

X線		K α_1		K α_2		K β_1	
		λ (Å)	E(keV)	λ (Å)	E(keV)	λ (Å)	E(keV)
11	Na	11.9101	1.0410	-	-	11.575	1.0711
12	Mg	9.8900	1.25360	-	-	9.521	1.3022
13	Al	8.33934	1.48670	8.34173	1.48627	7.96	1.5574
14	Si	7.12542	1.73998	7.12791	1.73938	6.753	1.8359
15	P	6.157	2.0137	6.160	2.0127	5.796	2.139
16	S	5.37216	2.30784	5.37496	2.30784	5.0316	2.464
17	Cl	4.7278	2.62239	4.7307	2.62078	4.4034	2.8156
18	Ar	4.1918	2.9577	4.1918	2.9577	3.886	3.1905
19	K	3.7414	3.3138	3.7445	3.3111	3.4539	3.5896
20	Ca	3.35839	3.69168	3.36166	3.68809	3.0897	4.0127
21	Sc	3.0309	4.0906	3.0342	4.0861	2.7796	4.4605
22	Ti	2.74851	4.51084	2.75216	4.50486	2.51391	4.93181
23	V	2.50356	4.9522	2.50738	4.94464	2.2844	5.42729
24	Cr	2.2897	5.41472	2.293606	5.40551	2.08487	5.94671
25	Mn	2.10182	5.89875	2.10578	5.88765	1.91021	6.49045
26	Fe	1.936042	6.40384	1.93998	6.39084	1.75661	7.05798
27	Co	1.788965	6.93032	1.79285	6.9153	1.62079	7.64943
28	Ni	1.65791	7.47815	1.661747	7.46089	1.500135	8.26466
29	Cu	1.540562	8.04778	1.54439	8.02783	1.392218	8.90529

(Ⅲ) 装 置

EPMA装置は電子銃、各種レンズ、検出器、真空系装置など、SEMと同様な装置構成に X線検出器、光学顕微鏡などが付加されています。(図6-8)

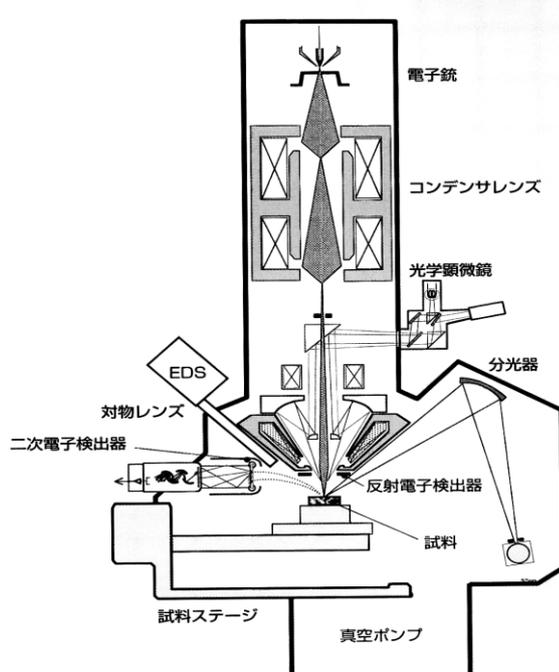


図 6 - 8 EPMA 装置の構成
(制御・分析・表示部以外)

EPMAのX線分析法は分光系の構造の違いにより、エネルギー分散（Energy Dispersive X-ray Spectrometry）と波長分散型（Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry）に分類します。

両者の違いは主に分光器の相違であり、エネルギー分散型はエネルギー分散型X線分光器（EDS：Energy Dispersive X-ray Spectrometer），波長分散型は波長分散型X線分光器（WDS：Wavelength Dispersive X-ray Spectrometer）が装備されています。

次に各装置についてその原理，構造を示します。

（1）エネルギー分散型X線分光法（Energy Dispersive X-ray Spectrometry）

EDSでは半導体検出器により広いエネルギー範囲の特性X線のスペクトルを同時に測定できるので、迅速な多元素同時測定が可能です。

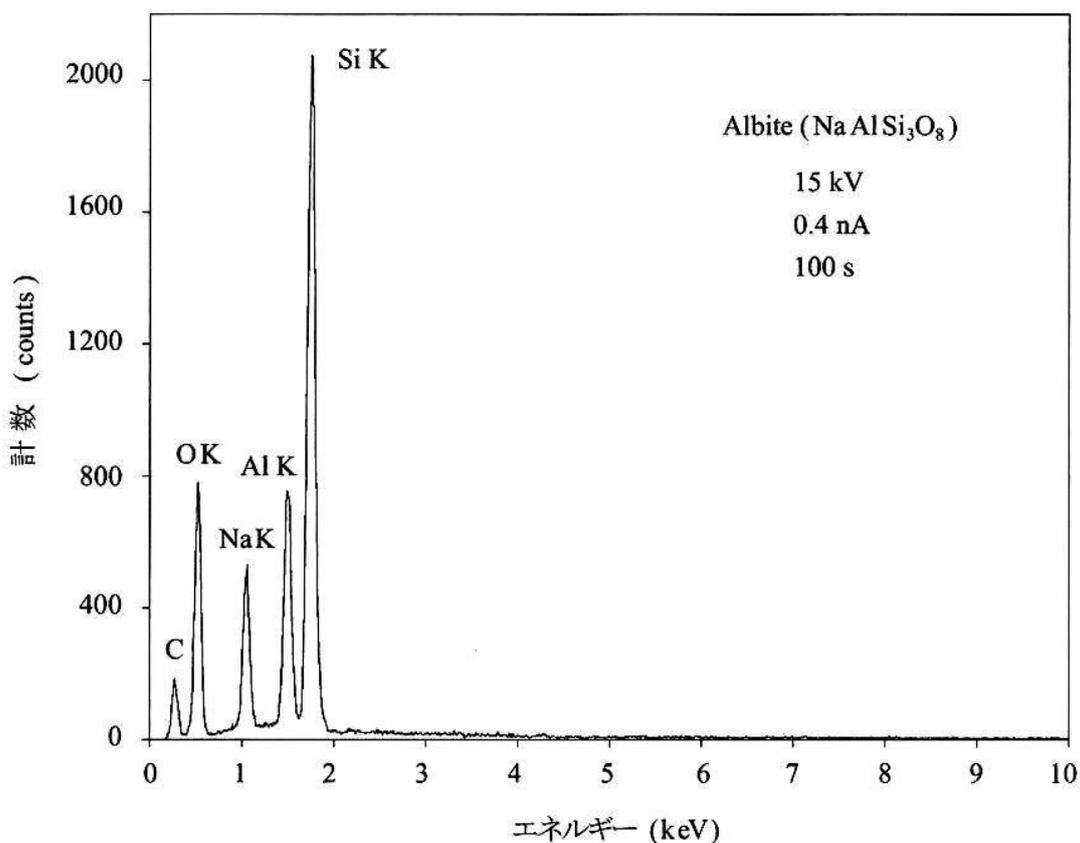


図6-9 斜長石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) のスペクトル

（2）波長分散型X線分光法（Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry）

WDSでは発生したX線を分光器の分光結晶を用いてブラッグの条件（ $2d\sin\theta = n\lambda$ ）に合った波長のX線のみ分光して比例計数管などのX線検出器で計測します。比例計数管は、入射したX線が、計数管内の不活性ガスをイオン化し、この時生成されるイオン対の数を計測します。電子は電極に集められ、電気パルスとして出力されます。この信号はプリアンプとアンプと呼ばれる装置で増幅され、単一チャンネル波高分析器（SCA：Single-Channel pulse height Analyzer）によって選別されることでデータ化されます。

・その他の分析機器

(1) SXM 走査型X線分析顕微鏡

回転放物面体X線導管を開発し、微小部分にX線を照射させて分析。前述のXRFで8ミクロンの微小な部分を測定できるようにしたものです。さらに透過X線像も見られるようになっていきます。

(2) ESCAあるいはXPS 光電子分光分析

特性X線を試料に照射させ、その時試料から放出される光電子のエネルギーを測定します。これによって原子の結合状態が分かるもので、しかも非破壊の状態で微量な試料の分析ができます。かつて、ブルー・サファイアを計測したところ、鉄が2価と3価の中間的な状態を確認することができました。これにより青色の原因は、2価と3価の電荷移動ということが分かりました。

(3) PIXE イオンビーム励起X線分析

高いエネルギーのイオンを試料に照射させ、試料原子の内殻電子を電離させた結果生じた空孔を埋める特性X線を測定します。元素の種類と濃度を知ることができます。EPMAより感度が高いのが特徴です。

(4) ICP-MS 誘導結合プラズマ質量分析

高周波数の電流を利用し、高電圧と高周波数の磁場により、誘導結合プラズマを発生させて試料をイオン化させ、そのイオンを計測することで元素の同定・定量を行う方法。試料を微細な霧状にしなければなりません。超高感度で多くの元素が同時に分析できます。レーザーを照射させイオン化させて分析する、LA-ICP-MSと呼ばれる装置もあり、EPMAでは検出できない軽元素のベリリウムやリチウムが検出できます。

(5) AA 原子吸光分光分析

溶液中の元素をppm近くまで検出できます。大変オーソドックスな分析機器ですが、溶液として試料を溶かさなければなりません。従って、このような分析手法は宝石には向きません。

(6) STM 走査型トンネル顕微鏡

トンネル効果を利用したもので、探針と呼ばれる極めて先の尖った針を試料表面に近付けることによって、電流の僅かな変化を調べるもの。この変化を解析すると極めて微細な表面状態が分かります。真珠表面を分析した例がありますが、アラゴナイトの綺麗な結晶が観察されています。

(7) ESR 電子スピン共鳴分析

元素の電荷数が分かります。NMR（核磁気共鳴分析）もこの分析手法の一つで、固体試料の原子排列や電子構造が分かります。最近ではこのESRによって年代測定にも利用されています。

(8) IR 赤外分析

赤外線を吸収する水などの分析には威力を発揮する。FT-IR（フーリエ変換型赤外分析）と呼ばれる装置が、現在最も普及しており、短時間で感度の良い測定結果が得られます。有機物の分析には欠かすことのできない分析手法です。宝石に樹脂を浸透させたりする処理

の鑑別に広く利用されています。

(9) Raman ラマン分析

物質に光を当てた時に見られる散乱光で、インドのラマンが発見したもので、ダイヤモンドの研究や内包物の同定に使われています。現在では、測定結果のデータベース化が行われています。

以上の他にも様々な分析装置が使われています。

7章のまとめ：

鉱物の同定

・未知な鉱物を同定するためには、X線回折分析により調べることが広く行われています。その分析結果が、これまで報告されていない場合は、新鉱物の可能性があります。

新鉱物の申請には、X線回折値と共に化学組成を求めることが必要です。そのため、近年では、(①)により化学組成を求めることが行われています。しかし、この(①)では水素やリチウムなどのような軽元素は分析できません。そのため(②)や(③)などのような別な種類の機器分析を併用することがあります。

上記の括弧内の①～③に入れる語句は？

① = ()

② = ()

③ = ()

8. 鉱物の産状（I）

・地球からの贈り物である鉱物

鉱物は、その内部に様々なインクルージョンを含みますが、それは生成の環境の多様性を示しています。一般に鉱床と呼ばれる、有用な鉱物が集まっている場所から産出されることになりませんが、岩石の中から砕いて取り出すものと、風化して河川や海に運ばれて堆積したものから選別するものがあります。前者を一次鉱床、後者を二次鉱床と呼びます。例えば、ダイヤモンドはキンバーライトという岩石から採掘する場合と河川から採掘方法が、場所により行われています。同じ鉱物でも場所（産地）で異なります。

鉱物の産出状態（産状）を鉱床別に分けて考えることが重要です。なぜなら地名は人が勝手につけたものですが、産状を考えることによって、地球が私たちにどのようにして贈り物である鉱物をもたらしてくれたのかを探るヒントを教えてくれるからです。

鉱床の成因による分類は次のとおりです。

- ・ **正 マ グ マ 鉱 床**：マグマ（岩漿）が固化してできたもの。高温 700～1500 度で晶出する。
- ・ **ペグマタイト 鉱 床**：マグマ（岩漿）の温度が 250～700 度に低下してできるもの。レンズ状や脈状で見られ、その空隙には大きな結晶が晶出する。ブラジルの産地はこのペグマタイトです。
- ・ **接 触 交 代 鉱 床**：スカルン鉱床とも呼ばれる。石灰質な岩石とマグマ（岩漿）が反応してできたもの。
- ・ **熱 水 鉱 床**：温泉水のような液体が鉱脈として岩の割れ目にしみこんでできたもの。100 度以下から 500 度までの温度で生じる
- ・ **漂 砂 鉱 床**：長年の風化によって運搬され堆積したもの。タイ、スリランカなどの産地では、ほとんどこの漂砂鉱床から採掘されている。
- ・ **変 成 鉱 床**：温度や圧力によって変成されたもの。例としてヒスイは高圧条件下でできた鉱物です。

鉱物の集合体である岩石、そして岩石が集まり地層を形成しています。その地層の一部が崩れて災害を起こすことがあります。その場所を調べてみると、粘土鉱物を多く含む場所であったりします。この粘土鉱物の一種であるカオリナイト（Kaolinite： $Al_4[(OH)_8Si_4O_{10}]$ ）は、水を加えて捏ねると粘性が出るため、陶器をつくる時に使われています。この鉱物は、土壌を構成していますが、花崗岩などの岩石が風化作用や熱水によって変質して生成されます。瀬戸内海には、御影石と呼ばれる花崗岩が産出し、また、瀬戸物とも呼ばれる陶器は、花崗岩が変質して出来た粘土鉱物を焼き固めたものです。

ここでは、地球からの贈り物であり、身近な鉱物を見てみましょう。

9. 鉱物の産状（Ⅱ）

・ 鉱物と人工物の違い

鉱物のインクルージョン生い立ちは、次の3つに分けて考えることができます。

1. 気体からの生成

ガス状のものが昇華した結晶で、自然界では火山の噴気口などに析出するものが相当します。人工的には CVD 法（Chemical Vapor Deposition：化学的気相成長法）とも呼ばれる方法で、原料である気体（ガス）を化学反応により結晶化させます。現在では合成ダイヤモンドなどが造られています。

2. 液体からの生成

物質の濃度の差によって、気相（vapor phase）、溶液相（solution phase）、融液相（melt phase）と分けられています。なかでも、気相および溶液相では、原子、イオン、分子などの結晶化する粒子によって、まず最初に核（固体）ができて、そこから大きく成長するとみられています。自然界では、地下から噴出した液体状のマグマ（岩漿）が地表で急冷されて固まった火山岩（図8-1）や、地下深くで固まった岩石が風化などによって地表で見られるようになった深成岩が見られます。それらの岩石は鉱物の集合です。

ダイヤモンドは、地下百数十キロの深さで大きく成長したものが、地表に一気に噴出したと考えられています。トパーズは、液体状のマグマが固まる時に、比較的大きな結晶と共に来た空隙中に見られます。ブラジルには、このような比較的大きく、有用な鉱物の集合であるペグマタイト鉱床と呼ぶ場所が、数多く知られています。熱水性鉱床と呼ばれるものはこれに相当します。温泉水のような液体が岩の割れ目にしみこんでできた熱水鉱床には、エメラルドや紫水晶（アメシスト）などが見られます。また、石灰質な岩石とマグマ（岩漿）が反応してできた、接触交代鉱床（スカルン鉱床）には、ミャンマーのルビーやサファイアなどが見られます。一方、人工的には圧力釜のような容器に水と原料を混ぜて高温にして溶かして生成させるもので、水熱法と呼ばれる方法をはじめ、原料を溶かしやすくするために融剤（フラックス：flux）と呼ばれるものを混ぜて生成させる方法（フラックス法）などがあります。これらは、その成長過程が異なるため、できた結晶の内部にその痕跡を残すこととなります。



図8-1 地下から噴出したマグマ（東京都大島）

3. 固体からの生成

自然界では広域変成作用や接触変成作用と呼ばれる、圧力や熱の作用によってできた変成岩の例があります。これは、固体同士の反応でできたものとも考えられますが、実際には水や二酸化炭素などの揮発性成分がその反応に大きな役目をしていたと考えられるので、100%固体から生成したものではないとされます。

一方、人工的には、1904年にフランスのベルヌイによって初めてルビーの製造方法が確

立されて以来、現在までに以下のような方法によって、最も多くの種類の宝石が合成されています。このような固体から製造された宝石には、前述のように気体が単独に気泡として見られます。

• 人工物（合成石）をつくる代表例（図8-2）

ベルヌイ（火炎溶融）法

原料を落下させて、酸素と水素ガスを燃焼した炎の中で溶融した後、種結晶の上に固化させ結晶を成長させる方法。特徴的な成長模様が見られる（図8-3）。

引き上げ法

原料を高周波によって加熱して溶融したものを引き上げて冷却固化させて結晶をつくる方法。

スカル・メルティング法

原料を包み込んだ容器の周囲を冷却しながら高周波で加熱すると、その中心部は溶融するが、その周り（外縁部）は冷却されているためスカル（頭蓋骨）状になるのでこの名がある。

浮遊帯域溶融（FZ）法

予め円柱状に焼結して固めた原料を楕円の一つの焦点におき、そしてもう一つの焦点に熱源をおく。その熱により原料を溶解し結晶を成長させる方法。

高温高压（HPHT）法

一ヶ所に圧力が集中できるようにつくりされている。約 2,000 度、6 万気圧の条件によってダイヤモンドやひすい（ジェダイト）が造られている。

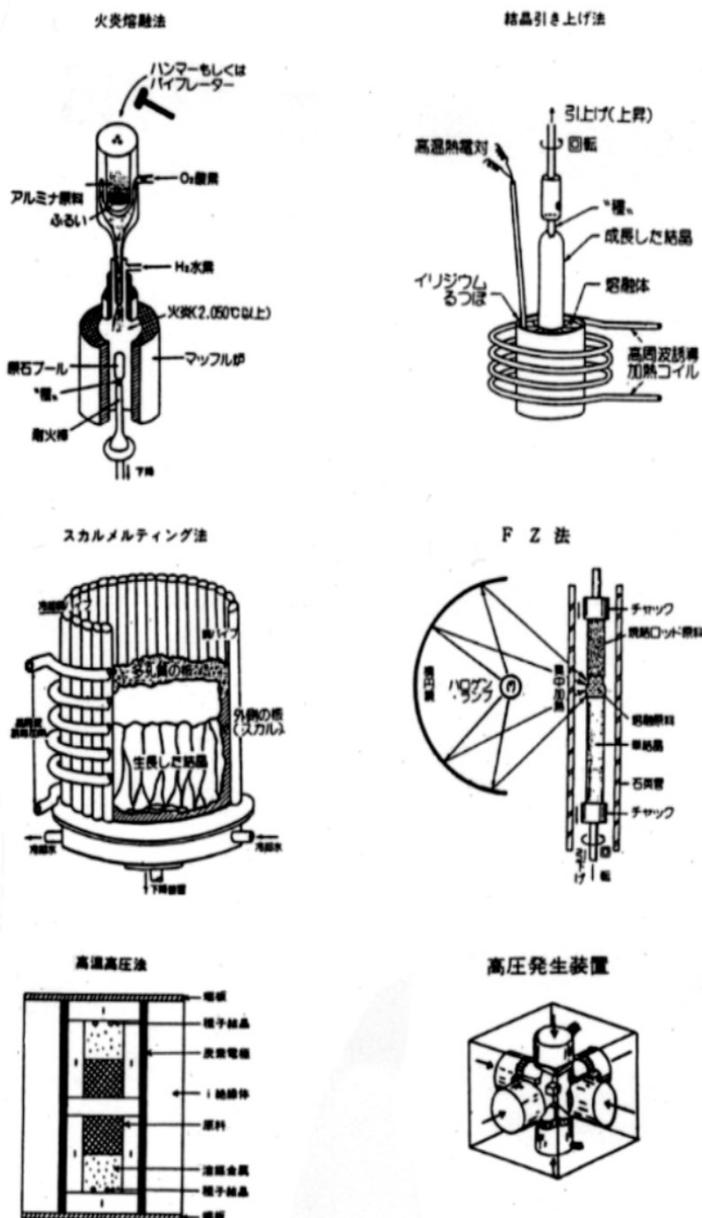


図8-2 合成方法（宝石ガイドブックより）

化学的気相成長（CVD）法

原料である気体（ガス）と、それを拡散させるキャリア・ガスに熱やプラズマなどのエネルギーによって化学反応を起こさせて、薄膜状の結晶を基板につくる方法があります。このようにして造った薄膜の上に何回も繰り返して成長させることで、ある程度の厚みがある結晶ができます。現在では、宝石質の合成ダイヤモンドも造られています（140 頁参照）。

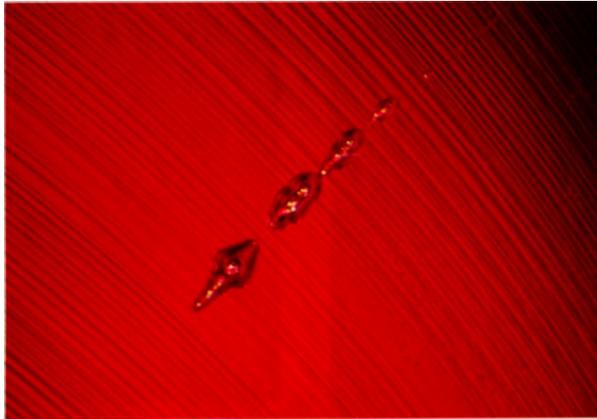


図 8-3 天然には決してみられないカーブラインと気泡
（ベルヌイ法の合成ルビー）
（E.J.Gubeline and J.I.Koivula,1986）



図 8-4 直線の色層は天然の証拠とも言える模様
（スリランカ産ブルー・サファイア）

・人工物と天然の鉱物との違い

天然のものは、その内部に様々な成長模様（図 8-4）やインクルージョンを含みます（図 8-5）が、それは生成の環境の多様性を示しています。一般に鉱物は鉱床と呼ばれる、有用なものが集まっている場所から産出されることとなりますが、岩石の中から砕いて取り出すものと、風化して河川や海に運ばれて堆積したのちから選別するものがあります。前者を一次鉱床、後者を二次鉱床と呼びます。例えば、ダイヤモンドはキンバーライトと呼ばれる岩石（一次鉱床）から採掘する場合と、河川（二次鉱床）から採掘する場合とに分かれます。

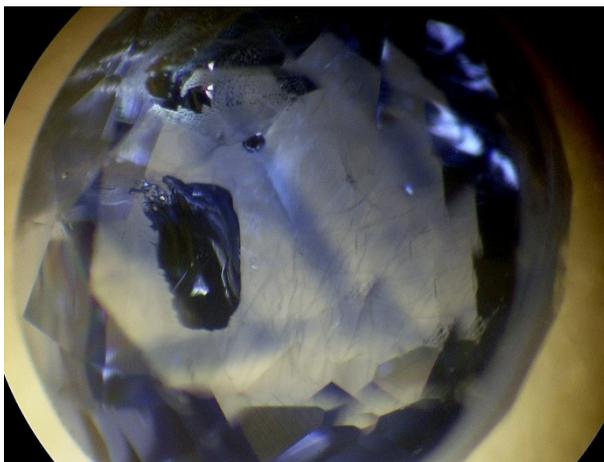


図 8-5 天然サファイア中の結晶（中央左）

鉱物の産出状態（産状）を考えることが重要です。なぜなら地名は人が勝手につけたものですが、産状を考えることによって、地球が私たちにどのようにして美しい鉱物をもたらしてくれたのかを探るヒントを教えてください。

流通していた合成ブルー・サファイア

これはガンボジアで売られていたもの（図 8-6,左）で，帰国後調べてみるとその内部にはカーブラインが見られ（図 8-6,右），明らかに合成ブルー・サファイアであった。

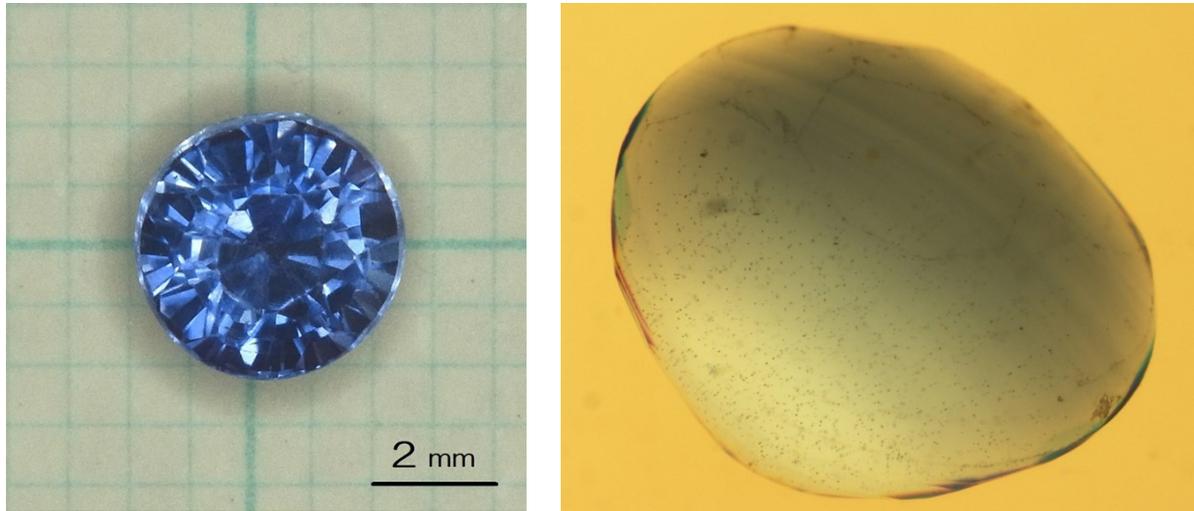
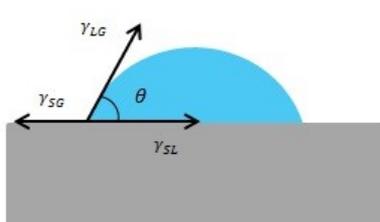


図 8-6 ブルー・サファイア（左），ヨウ化メチレン（ジヨードメタン）で浸液し顕微鏡で内部を観察した様子（右）

カーブラインが見られることからベルヌイ（火炎溶融）法で製造されたとみられるが，特徴的な曲面ができる理由について考えると，その生成メカニズムに関係することが分かる。即ち，火炎溶融法は，原料を熔融後に固化させることで結晶を得る（89 頁，図 8-2）。固化する時に表面積をなるべく小さくするために表面張力が働き，その表面は曲面になる（図 8-7）。そして，溶解した液体には重力が働き，さらに固化による収縮も受ける（図 8-8）。このようにして種結晶の上には液体から固化した結晶がつぎつぎと積み重なり成長する。これが火炎溶融法で製造する結晶にはカーブラインが見られる理由です。



$$\gamma_{SG} = \gamma_{LG} \cos \theta + \gamma_{SL}$$

θ : 接触角

γ_{SG} : 固体にはたらく表面張力

γ_{LG} : 液体にはたらく表面張力

γ_{SL} : 固体・液体界面にはたらく界面張力

引用 <https://ja.wikipedia.org/wiki/表面張力>

図 8-7 液体の表面張力の関係

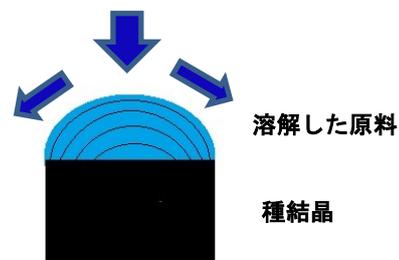
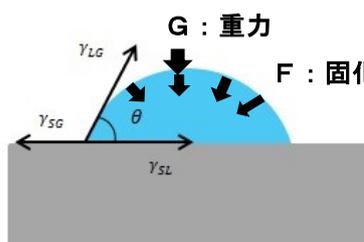


図 8-8 表面張力以外に重力や液体から固化による収縮が影響をうける（左），種結晶の上には溶解した原料が積層する（右）

8・9章のまとめ：

地球からの贈り物である鉱物について

現在、鉱物は約（ ① ）種知られています。わが国でも毎年数種類の新鉱物・新産鉱物が発見されています。しかし、肉眼で判別ができないほど微小な鉱物であったり、X線回折装置やEPMAで分析しないと同定できないものもあります。

また、これまで発見されて命名された鉱物が、その後の研究により抹消されるものもあります。例えば、幌別鉱（Horobetsuite $(\text{Sb}, \text{Bi})_2\text{S}_3$ 直方）は、輝蒼鉛鉱（Bismuthinite： Bi_2S_3 直方）と輝安鉱（Stibnite： Sb_2S_3 直方）の中間物とされ、鉱物種のリストから外されています。

上記の括弧内の①に入れる語句は？

① = ()

鉱物と人工物との違い

鉱物は自然に産するものであり、生物（動物・植物）とは異なり、自ら動いたり増殖（繁殖）したりしません。その形態は、一定な法則（面角一定の法則）はあるものの、さまざまに変化します。また、他の鉱物と共存して岩石を構成し、更に地層（地殻）をそして地球を形づくっています。鉱物が単独ではなく集合して産することに意味が生まれるという点において、動植物の共存とは異なります。

人工的に造られたものには、自然に産する鉱物とは明らかに成長のメカニズムが異なります。テキストの「鉱物の産状」でも説明したように人工的に製造されたものには、鉱物に含まれない（ ① ）が見られたり、（ ② ）のような成長模様が観察されます。

上記の括弧内の①と②に入れる語句は？

① = () ② = ()

10. 鉱物の産状（Ⅲ）

・未知鉱物との遭遇

最近遭遇した Be を含む“堇青石（Cordierite あるいは lolite）”



図 10-1 （左：最初のもの）



図 10-2 一部切断したもの(左)と再研磨したもの(右)

今回遭遇した青紫色の魅力的なカット石で、仕入れた業者によると、“柱石（scapolite）”とっていたそうである（図 10-1）。多色性が顕著であり、顕微鏡観察や屈折率等の測定結果からは、堇青石（Cordierite あるいは lolite、以下、ここではアイオライトと記す）と酷似していた。しかし、可視分光特性（UV-VIS）や赤外吸収（FT-IR）による測定結果からは、これまでのアイオライトとは明らかに異なるパターンを示すことが分かった。

最初の試料の物理データ

- ・大きさ：9.04 × 10.30 × 6.87 mm
- ・重量：2.949 ct
- ・屈折率：1.570 – 1.562
- ・比重：2.72（静水法）

・顕微鏡による観察

当該石の中央部を拡大して観察すると図 10-3 のとおり、液膜状のインクルージョンが見られる。これらから天然起源であることが推測される。

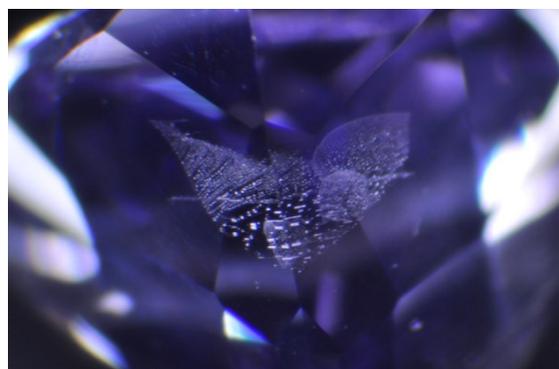


図 10-3 拡大すると液膜が観察される



図 10-4 図 10-3 をさらに拡大したもの

さらに詳しく調べるために切断したもの（図 10-2 の左）について、次のような機器を使って分析を試みた。

【分析機器】

- 可視～紫外分光特性：日本分光 V-550
- 赤外分光特性：日本分光 FT-IR4100
- 蛍光X線分析：日本電子 JSX3200M (30kV 3mA コリメーター7mm)
- ラマン分析：顕微ラマン Renishaw JRS-SYSTEM 1000
- レーザアブレーションICP質量分析：レーザー部は New Wave Research UP-213A/F, ICP-MS 部は Agilent 7500a.
- X線粉末回析分析：理学電機 Geiger Flex RAD I B (Cu/ $K\alpha$ 40kV / 20mA)

• 可視～紫外分光特性（測定範囲：250～800nm）

可視から紫外部にかけての分光特性を、アイオライトと比較してみると、図 10-5 のとおりで、似ているが両者は異なるものと考えた方がよさそうである。

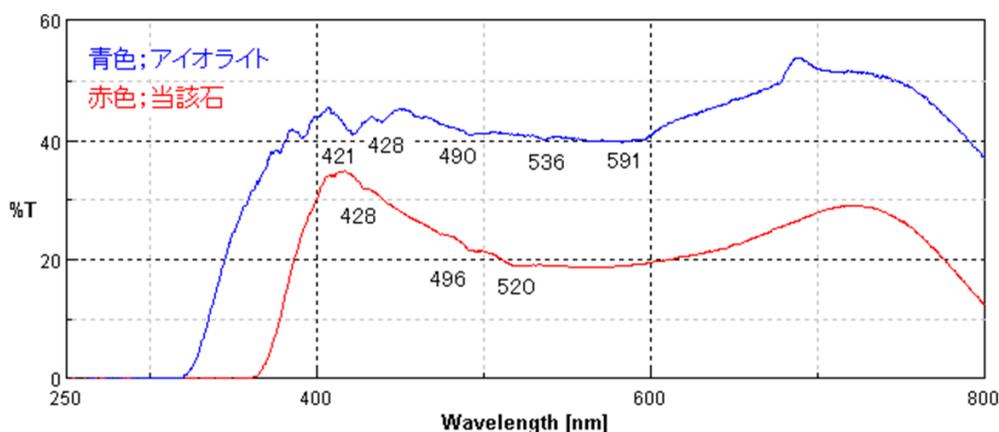


図 10-5 当該石と Cordierite (Iolite : アイオライト) との比較

• 赤外分光特性（測定範囲：400～2,000 cm^{-1} ）

赤外部の分光特性を分析したものが図 10-6 で、422 , 933, 1011, 1116, 1219 cm^{-1} などの特徴的なピークが見られる。

当該石とアイオライト及び鉄堇青石 (Sekaninaite, 以下, セカニナイトと記す) と比較をしたものが図 10-7 であり、アイオライトとセカニナイトは酷似しているが、当該石とは明らかに異なるパターンを示すことが分かる。なお、アイオライトとセカニナイトは、マグネシウム (Mg) と鉄 (Fe) の量の違いで名付けられている鉱物であり、マグネシウム (Mg) が多いと前者、鉄 (Fe) が多いと後者である。

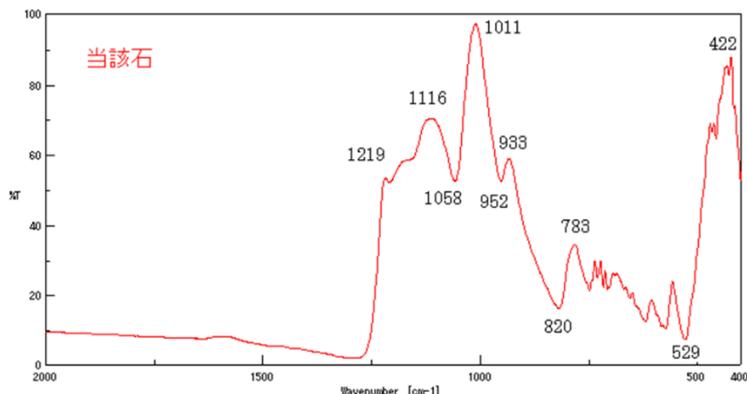


図 10-6 当該石の赤外分光特性

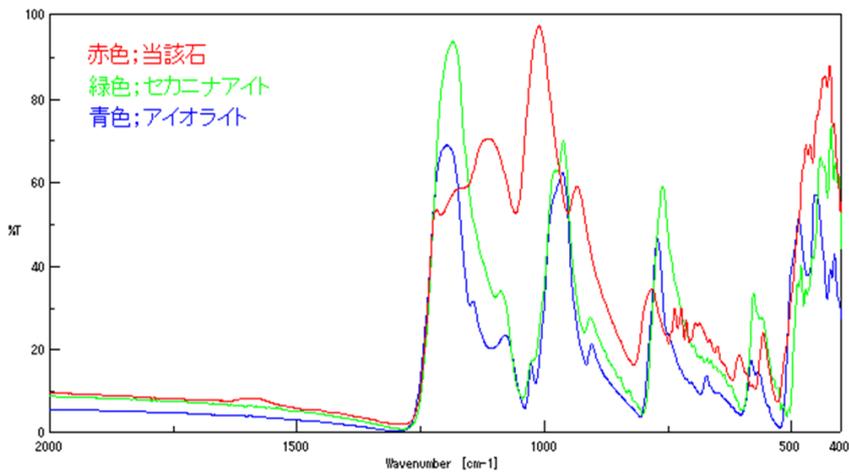


図 10-7 当該石とアイオライト (Iolite) ・セカニナイト (Sekaninaite) との比較

・蛍光X線 (XRF) による化学分析結果

化学分析を蛍光X線で行った結果は図 10-8 及び表 10-1 (左) で、比較のためアイオライトとセカニナイトを掲載 (表 10-1, 右) した。この結果からは、アルミニウム (Al) が少なく珪素 (Si) が多いことが分かる。

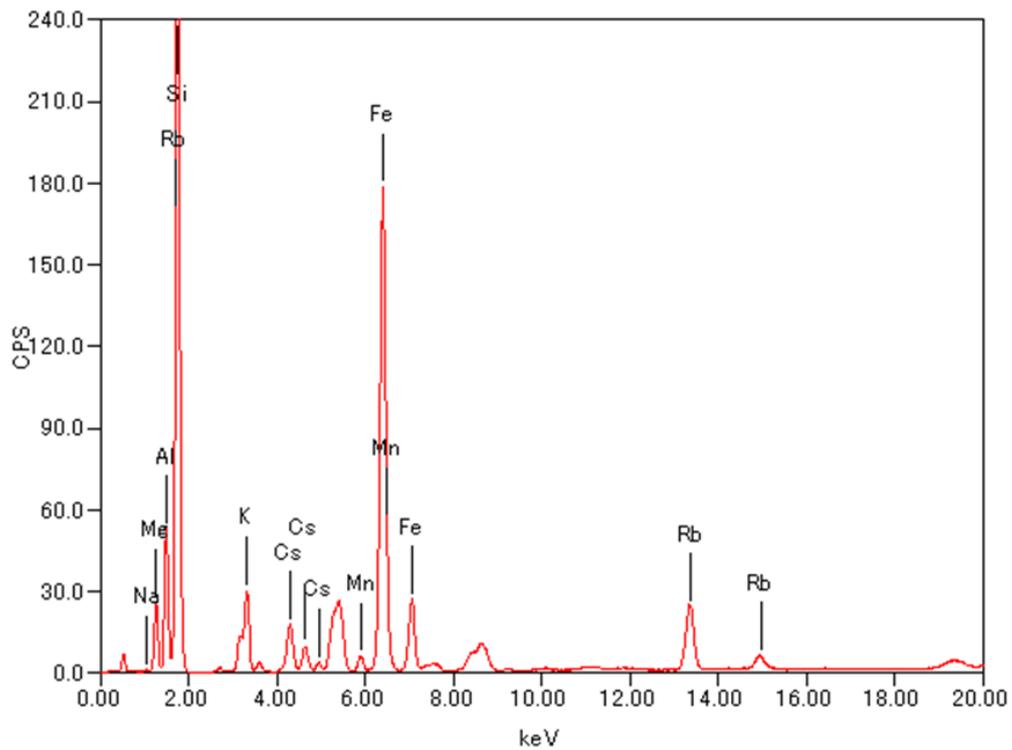


図 10-8 当該石のXRFによる測定結果

	当該石	Cordierite $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	Sekaninaite $Fe^{2+}_{1.5}Mg_{0.5}Al_4Si_5O_{18}$
Na_2O	1.76	—	—
MgO	13.28	13.78	3.19
Al_2O_3	11.16	34.86	32.25
SiO_2	64.12	51.36	47.52
K_2O	2.09	—	—
MnO	0.21	—	—
FeO	4.96	—	17.04
Rb_2O	0.40	—	—
Cs_2O	2.02	—	—
Total	100.00	100.00	100.00

表 10-1 当該石の分析結果，比較のため Cordierite と Sekaninaite を掲載。

・顕微ラマン分析結果

顕微ラマンの分析結果が図 10-9 で，1088，1034，760，683，591 cm^{-1} などの特徴的なピークが見られる。一方，当該石とアイオライト（Iolite）・セカニナイト（Sekaninaite）との比較をしたものが図 10-10 であり，アイオライトとセカニナイトは酷似しているが，当該石とは明らかに異なるパターンを示すことが分かる。

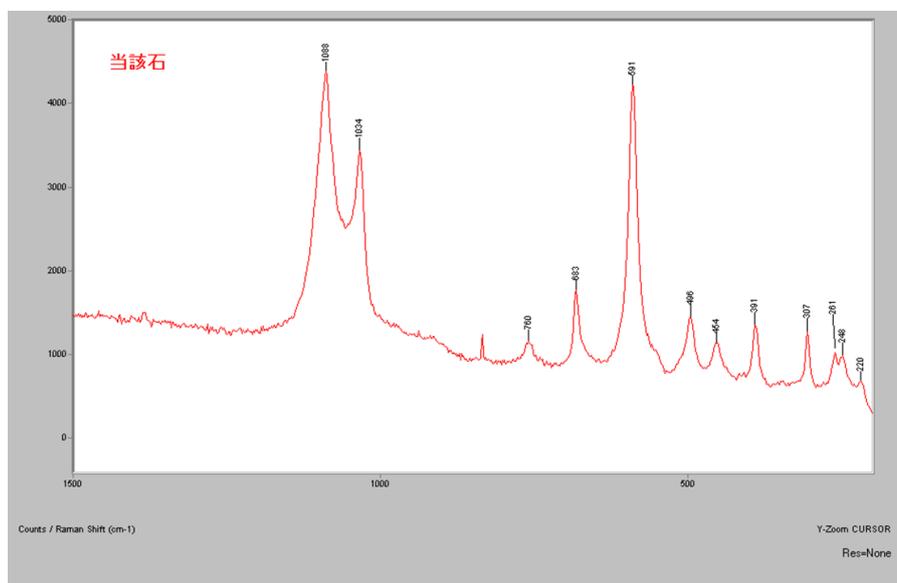


図 10-9 当該石のデータ

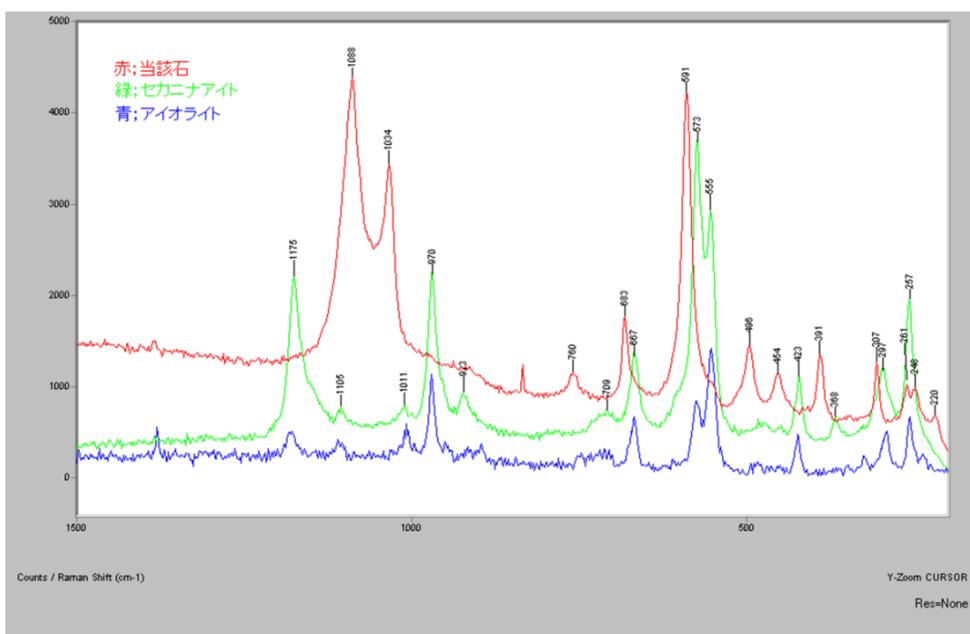


図 10-10 当該石の分析データ，比較のため Cordierite と Sekaninaite を掲載.

• レーザアブレーション ICP 質量分析による Be の確認

短時間ながら，計測すると当該石には，ベリリウム (Be) とリチウム (Li) が含まれていることが分かる (図-10-11) .

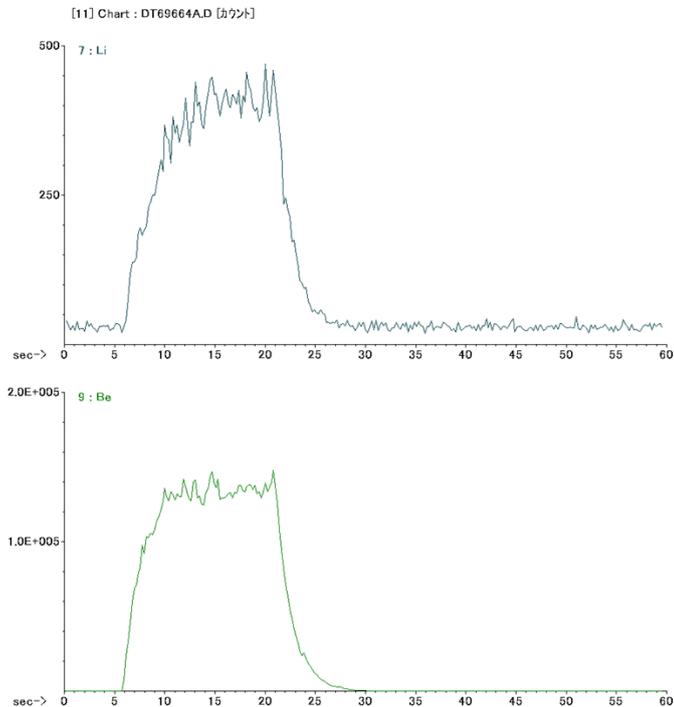


図 10-11 LA-ICP-MS による Li と Be の検出

• X線粉末回折 (XRD) 実験結果

当該石を粉末にしてX線回折実験を行った結果は表 10-2 の通りで、Hölscher らが合成した結晶である、 $\text{BeMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ の回折値とほぼ一致する。

表 10-2 当該石と $\text{BeMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ のX線粉末回折値。

h k l	当該石 (Sample)		$\text{BeMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ (Hölscher, A. and Schreyer, W., 1989)	
	d (Å)	Intensity	d (Å)	Intensity
1 0 0	8. 292	43	8. 3052	45
1 1 0	4. 787	21	4. 7933	46
0 0 2	4. 628	34	4. 6344	19
1 0 2	4. 033	63	4. 0450	41
1 1 2	3. 324	100	3. 3327	68
2 0 2	3. 085	53	3. 0934	54
2 1 1	2. 965	75	2. 9735	100
3 0 1	2. 761	70		
2 1 2	2. 592	15	2. 5999	24
2 2 0	2. 393	9	2. 3989	3
3 0 2			2. 3775	3
0 0 4	2. 312	14	2. 3185	13
3 1 1	2. 227	12	2. 2356	5
2 1 3	2. 194	8	2. 2031	4
2 2 2	2. 122	9		
1 1 4	2. 072	16	2. 0878	5
3 1 2	2. 056	10	2. 0634	10
2 0 4	2. 019	15	2. 0243	7
3 2 0			1. 9057	4
4 0 2			1. 8949	4
3 2 1	1. 860	7	1. 8664	4
3 1 3	1. 841	18	1. 8475	14
4 1 0	1. 807	14	1. 8131	6
3 0 4, 4 1 1	1. 772	27	1. 7781	18
4 1 2	1. 683	8	1. 6885	2
2 2 4	1. 662	27	1. 6667	24
5 0 0	1. 616	7	1. 6617	20
3 1 4			1. 6348	2
3 3 0	1. 593	7	1. 5981	5
4 2 0			1. 5700	5
4 1 3	1. 564	8	1. 5635	13
1 4 3	1. 559	22		
0 0 6	1. 540	12	1. 5459	5
3 3 2	1. 507	9	1. 5115	4
3 2 4	1. 467	20	1. 4717	11
2 0 6	1. 444	6	1. 4490	3
0 2 6	1. 441	7		
5 1 2	1. 415	8	1. 4205	8
2 1 6	1. 383	8	1. 3862	5
5 2 0	1. 325	11	1. 3295	4
6 0 2	1. 322	20	1. 3260	14
5 2 1	1. 319	13	1. 3166	6
3 3 4	1. 312	10		
4 2 4, 2 2 6	1. 295	13	1. 2992	9
4 1 5	1. 292	12	1. 2961	8
3 1 6			1. 2830	3
5 2 2	1. 279	7	1. 2791	3

化学組成と結晶構造

当該石は、これまでの化学組成とX線粉末回折実験から、合成結晶の $\text{BeMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ とほぼ同一と考えられます。この合成結晶に相当するものは、未だ発見されていないので、新鉱物の可能性があります。

化学組成は、Beの定量はしていませんが、次のように考えられます。



マグネシウム (Mg) のところに鉄 (Fe) やマンガン (Mn) が置き換わったとみられますが、リチウム (Li)、ナトリウム (Na)、カリウム (K) 等については、結晶構造に関係なく、内部に含まれた不純物と考えられます。

結晶構造については、前述の合成結晶が六方晶系 ($a = 9.592(1) \text{ \AA}$, $c = 9.273(1) \text{ \AA}$, $V = 738.9(1) \text{ \AA}^3$) で報告されており、得られたX線回折データから六方晶系と仮定して格子定数を計算したところ、 $a = b = 9.550(13) \text{ \AA}$, $c = 9.239(17) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$, $V = 729.7(17) \text{ \AA}^3$ の結果が得られました。

ところが、得られた格子定数は、かなりバラツキがありましたので、ここでは擬六方晶系としました。

当該石は、残念ながら産地が不明のため、新鉱物の申請ができない、ブラジル産と思われるが。

表 10-3

	当該石		—	Cordierite	Sekaninaite
			$\text{BeMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	$\text{Fe}_{1.5}^{2+}\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$
BeO	未定量	* 4.40	4.40	—	—
Na ₂ O	1.76	1.68	—	—	—
MgO	13.28	12.70	14.19	13.78	3.19
Al ₂ O ₃	11.16	10.67	17.95	34.86	32.25
SiO ₂	64.12	61.30	63.46	51.36	47.52
K ₂ O	2.09	2.00	—	—	—
MnO	0.21	0.20	—	—	—
FeO	4.96	4.74	—	—	17.04
Rb ₂ O	0.40	0.38	—	—	—
Cs ₂ O	2.02	1.93	—	—	—
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

10章のまとめ：

I. 鉱物の図鑑に掲載されていない外観の鉱物に遭遇しました。あなただったらどうしますか？

{

}

II. 鉱物を保管する時に気を付けなければいけないことは？ 次のなかで間違っているものは？ その番号の前の括弧内に○を書きなさい。

- () 他の鉱物と混ざらないように十分に注意する。
- () 購入した標本で、何処のものかは気にせずに標本についていたラベルは捨てた。
- () 空気中で変質する鉱物があるのでケースに入れた。
- () 表面は汚れていると思い、すべての標本は綺麗に洗うようにしている。
- () 産地別あるいは系統分類順に整理し、標本リストも作成している。

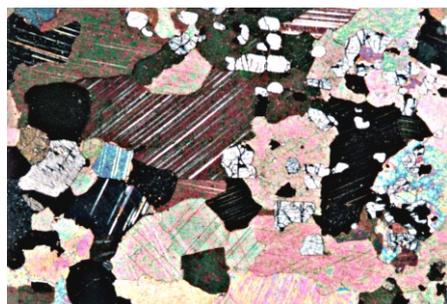
1 1 鉱物と岩石 (I)

・ 鉱物の集合である岩石を偏光顕微鏡で観察

私たちが海岸や川原へ行き、足元に転がっている石ころを見てみると、外観が異なるものから、見た目には同じように見えるものまで様々あります。それらの石ころのほとんどが鉱物の集合体である岩石です。そして、それぞれ鉱物や岩石には名前がつけられています。その場で肉眼鑑定により鉱物名や岩石名が分かるものもありますが、その場では名前がつけられないものもあります。

一般に岩石を調べるために、岩石を 0.03mm 程度まで薄くして薄片と呼ばれるプレパラートを製作します。その薄片を偏光顕微鏡と呼ばれる光学顕微鏡で観察すると、岩石を構成している鉱物の種類や岩石の組織が分かります。それによって岩石名も分かるようになります。実際に偏光顕微鏡によって各種岩石を観察します。さらに薄片を製作後、その表面を 1 μm (0.001mm) 程度の大きさの研磨材 (微粒なダイヤモンド) で磨く研磨片もつくられます。この研磨片に電気を通すために炭素などで蒸着した後、電子線を照射して得られる特性 X 線から元素の種類とその量を調べる X 線マイクロアナライザー (EPMA, XMA) を使用することも行われています。

岩石はマグマが冷えて固まったもの (火成岩)、岩石が風化などにより堆積して固まったもの (堆積岩)、そして岩石が熱や圧力により変化したもの (変成岩) というように 3 つに分類されますが、実際にはこれらがいくつか組み合わせられてできた岩石もあります。例えば、大理石と呼ばれる岩石は、薄片にすると綺麗な虹色に見える方解石 (Ca[CO₃]) のような炭酸塩鉱物によって構成されています。この岩石は、かつて海に生息していた珊瑚の死骸により堆積岩をつくった後、マグマなどによる熱の影響を受けた結果、方解石のような炭酸塩鉱物が大きく成長した、とみなすことができます (図 11-1)。



ただし、炭酸塩鉱物にはドロマイト (苦灰石: CaMg[CO₃]₂) という鉱物もありますので、これとの区別も必要です。そのため、K₂CrO₄-AgNO₃ 法^{*1} によって薄片を染色し、方解石だけを褐色に染めることで区別します (図 11-2)。

図 11-1 炭酸塩鉱物の集合



- *1: 次の①, ②の順序で、それぞれの水溶液に薄片を浸す。その結果、方解石が褐色に染色される。
- ① AgNO₃ 10% 水溶液に 1 分 30 秒~40 秒浸す (液温 20℃) この時の反応は次のとおり。ドロマイト (苦灰石: CaMg[CO₃]₂) は反応しない。
$$\text{CaCO}_3 \text{ (方解石)} + 2\text{AgNO}_3 \rightarrow \text{Ag}_2\text{CO}_3 + \text{Ca(NO}_3)_2$$
 - ② K₂CrO₄ 20% 水溶液に浸す。この時の反応は次のとおり。
$$\text{Ag}_2\text{CO}_3 + \text{K}_2\text{CrO}_4 \rightarrow \text{AgCrO}_4 \text{ (褐色)} + \text{K}_2\text{CO}_3$$

図 11-2 褐色に染色した様子

岩石は鉱物の集合体であり，構成する鉱物の種類・大きさ・数，そして配列（組織）によって分類され，その名前が決められます．これは，鉱物のように結晶構造や化学組成という，誰もが分析・解析しても同じ結果が得られる命名法とは異なります．

また，変質を受けて別な岩石に変わることがあります．例えば，主に橄欖石で構成されている橄欖岩は，蛇紋岩になってしまうことがあります．ただし，元の橄欖岩の組織が残っていれば“蛇紋石化が進んだ橄欖岩”と呼ぶことになります．

次に岩石の一例を紹介します．場所は北海道です．

• 堆積岩

三笠市桂沢ダムから幾春別にかけて，白亜系及び古第三系の堆積岩が観察できます．主として石英が主な構成鉱物の砂岩（図1 1-3）や泥岩などです，アンモナイトやイノセラムスなどの化石を含むことがあります．また，襟裳岬の歌露礫岩中の砂岩（図1 1-4）とは，構成鉱物の石英の形状が西桂沢のものと大きく違うことが分かります．

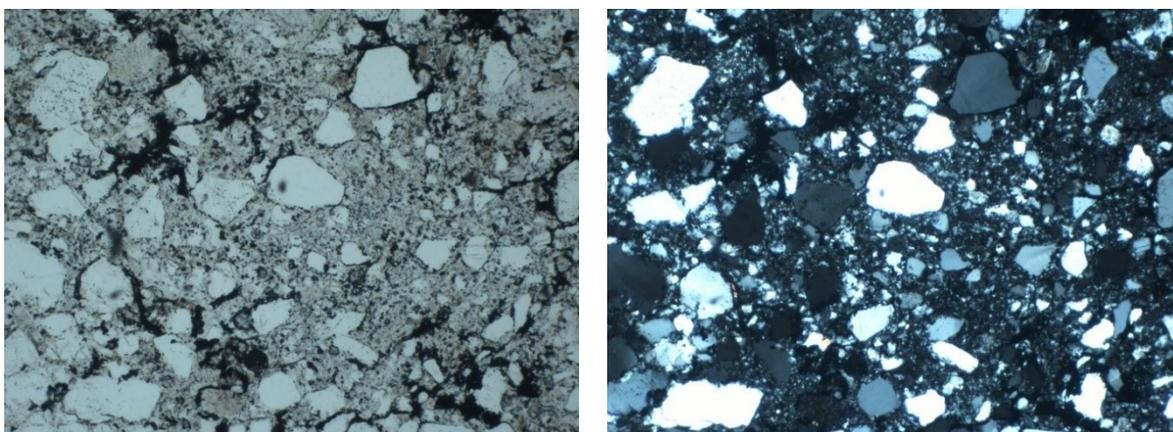


図1 1-3：西桂沢の砂岩（開放ニコール：左，直交ニコール：右），構成鉱物は主に石英．

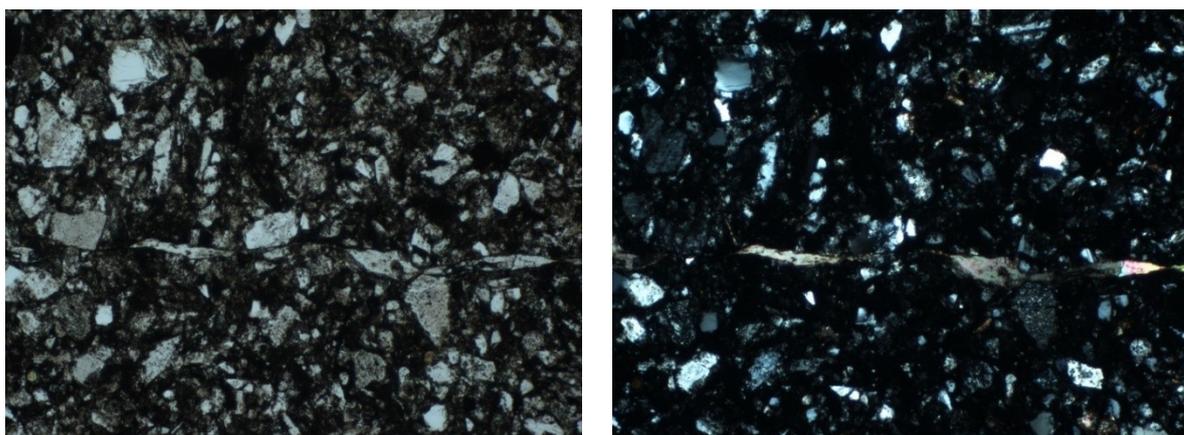


図1 1-4：襟裳岬の歌露礫岩中の砂岩（開放ニコール：左，直交ニコール：右），構成鉱物は，石英，長石類，方解石など．

————— 0.1mm

• 変成岩

神居古潭では泥質岩や塩基性岩などを原岩とする高圧型変成岩である，緑色片岩と藍閃石片岩などが観察できます（図11-5・6）。一方，熱による変成で生成したホルンフェルスは，えりも町目黒で観察できます（図11-7）。

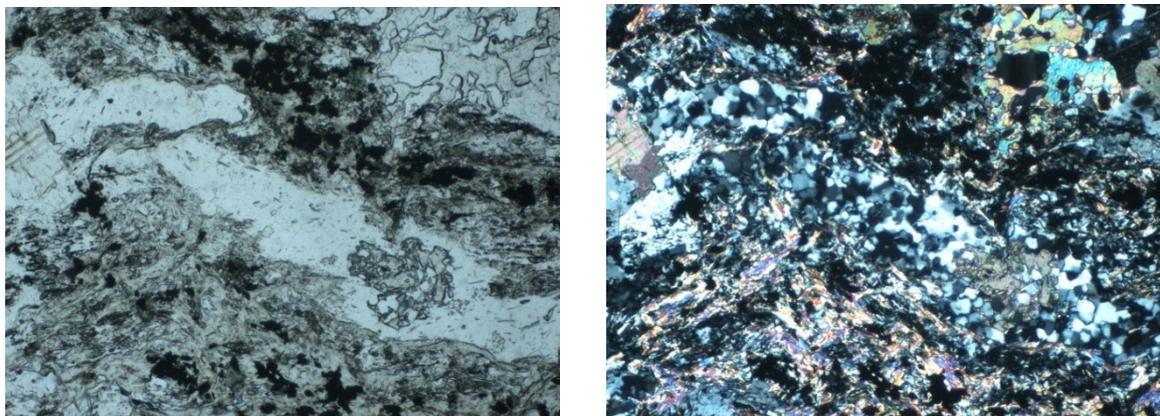


図11-5：神居古潭の緑色片岩（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，曹長石，石英，方解石，緑泥石⁽¹⁾，パンペリー石など。

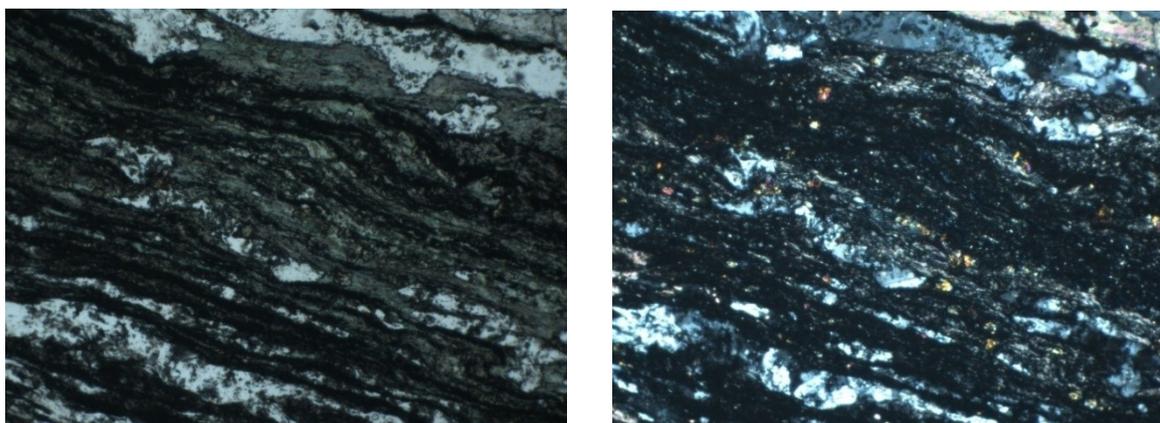


図11-6：神居古潭の藍閃石片岩（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，曹長石，石英，方解石，藍閃石など。片状組織が顕著

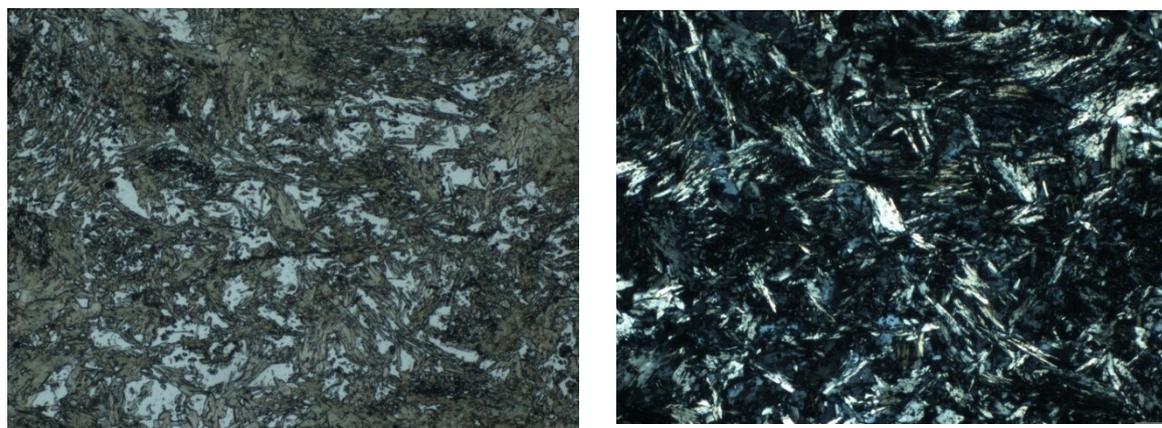


図11-7：えりも町目黒のホルンフェルス（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，石英，長石類，雲母類など。

0.1mm

• 火成岩

有珠山火山周辺ではマグマが冷えて固まった火山岩の紫蘇輝石デイサイトが観察できます(図11-8)。鏡下で大きな鉱物を斑晶、その周囲の小さな鉱物を石基と呼んでいます。一方、ほぼ等粒状の鉱物で構成されている深成岩である、花崗岩(図11-9)が黄金海岸で、同じ深成岩のダン橄欖(かんらん)岩(図11-10)が幌満でそれぞれ観察できます。

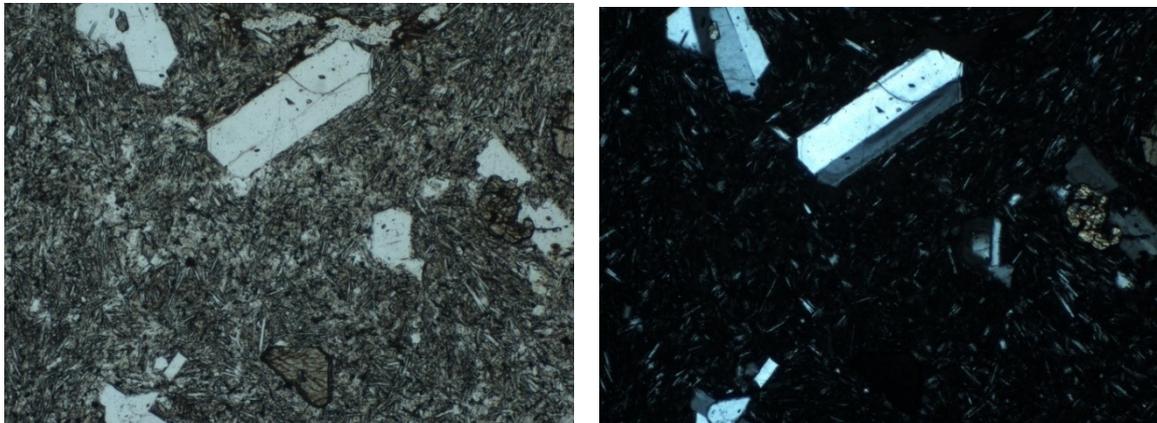


図11-8：昭和新山の紫蘇輝石デイサイト（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，石英，カリ長石，斜長石，紫蘇輝石（直方輝石），不透明鉱物など。

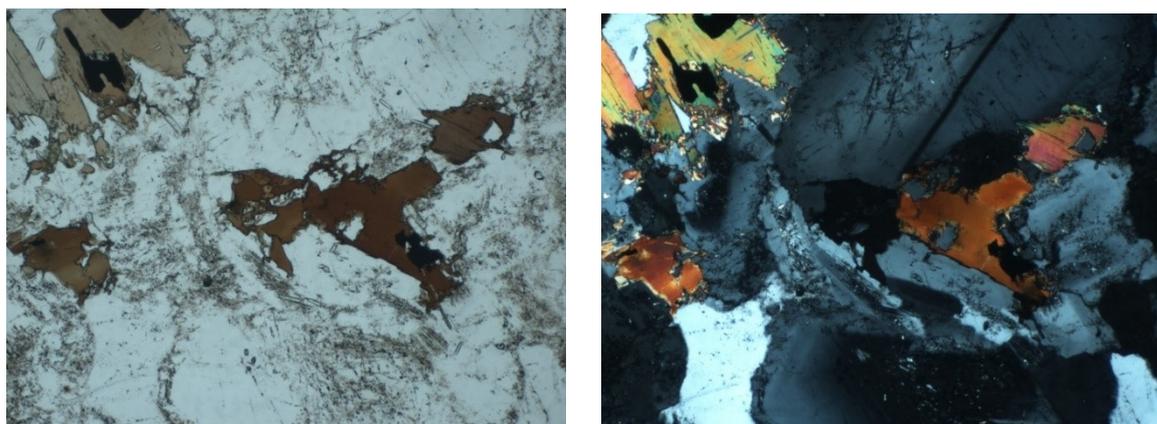


図11-9：黄金道路の花崗岩（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，石英，カリ長石，斜長石，黒雲母（金雲母—鉄雲母），単斜輝石など。

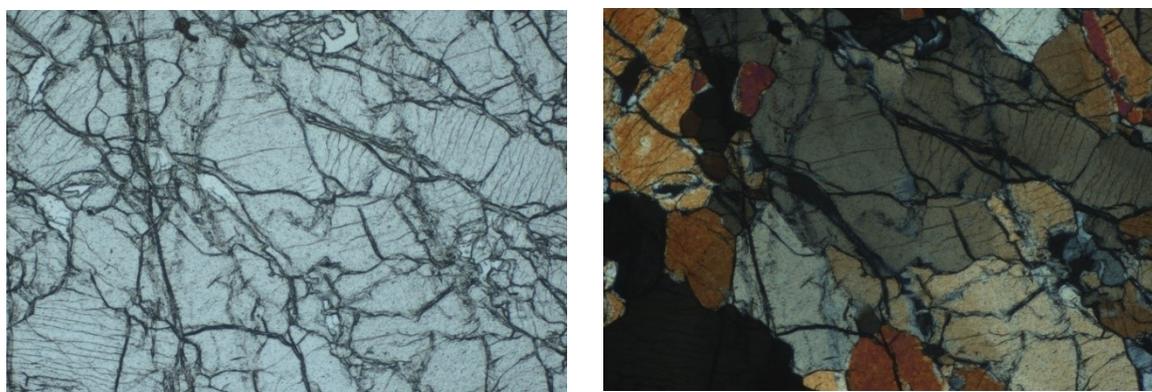


図11-10：幌満のダン橄欖岩（ダナイト）（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，主に苦土橄欖石。

— 0.1mm

・その他

マイロナイト（圧砕岩）と呼ばれる，変形を受けた鉱物が見られる岩石が，様似町幌満で観察できます（図1 1-11）。

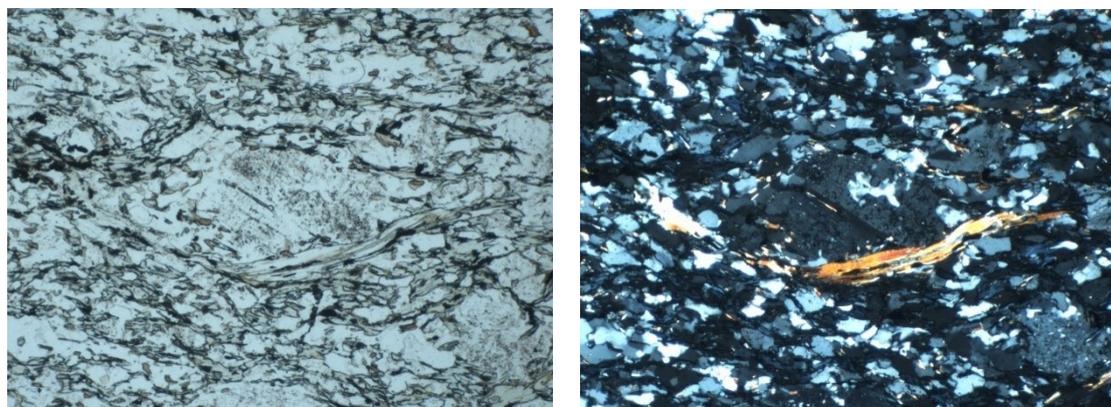


図1 1-11：幌満のマイロナイト（開放ニコル：左，直交ニコル：右）。構成鉱物は，石英，長石類，雲母類。

0.1mm

岩石を構成する鉱物（緑泥色・紫蘇輝石・黒雲母・普通角閃石）の話題

・緑泥石（Chlorite）は，緑色片岩や緑色岩，熱水変質を受けた火山岩などに産し，花崗岩質ペグマタイトの末期生成物としても産する。一般に輝石，角閃石及び雲母のような造岩鉱物の変質してできた鉱物としてよくみられる。この鉱物の結晶構造は，珪素の四面体でつくる層間に金属元素の八面体の層を挟み，さらにこれらの層間に金属元素と水分子でつくる八面体の層が入るのを特徴としている。このような詳細な研究により，須藤石やシャモス石及びクリノクロアなどの鉱物名があり，緑泥石という名称は，IMAの鉱物種リストからは削除されている。

・紫蘇輝石（Hypersthene）は，頑火輝石（Enstatite： MgSiO_3 ）あるいは鉄珪輝石（Ferrosilite： $\text{Fe}^{2+}\text{SiO}_3$ ）の中間組成の直方（斜方）輝石に使われていたが，現在のIMAの鉱物種リストからは削除されている。

・黒雲母（Biotite）は，主に金雲母（Phlogopite： $\text{KMg}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$ ）と鉄雲母（Annite： $\text{KFe}^{2+}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2$ ）の中間物に使われ，IMAの鉱物種リストから削除されている。

・普通角閃石（Hornblende）は，鉄普通角閃石（Ferro-hornblende： $\square\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}_4\text{Al})(\text{Si}_7\text{Al})\text{OH}_{22}(\text{OH})_2$ ，単斜）と苦土普通角閃石（Magnesio-hornblende： $\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_7\text{Al})\text{OH}_{22}(\text{OH})_2$ ，単斜）の中間組成の鉱物名として使われていたが，現在のIMAの鉱物種リストからは削除されている。現在，角閃石は，約200種もの鉱物種に細分化されている。

礫と砂について—堆積岩とは—

堆積岩と呼ばれる岩石は、元の岩石が雨や風などの風化によって砕かれ固まって出来た碎屑性のもので、その岩石を構成する岩石片（鉱物の集合）の大きさ（粒径）により、2mm以上を礫岩、2~1/16mmを砂岩、1/16以下を泥岩（1/16~1/256mmをシルト岩、1/256mm以下を粘土岩）と分類されます。礫岩のなかでも2~4mmを細礫（granule）、256mm以上のものは巨礫（boulder gravel）と呼ばれます。この堆積岩には、砕かれて出来た碎屑性の岩石の他に火山の噴火物が固まった火山碎屑岩、化学的に堆積した石灰岩やチャートなどがあります。

薄片について

不透明な岩石を30μm程度の厚さにするとほとんどのものは光を透過するようになります。薄くした岩石をガラス板（スライドガラス）に貼り付けたものを薄片と呼びます。その薄片の製作法については後述します（192~213頁参照）。

現在の国立科学博物館の前身である“東京科学博物館”（1931年から1949年まで設置されていた）が試料整理に使われていた標本ラベル（下図）には薄片の項目があります。当時は写真や化学分析と同様に重要な記録であったと推察できます。

標本番號	名 稱	
標本個數	産 地	
薄 片		
寫 眞	圖 幅	位 置
化學分析	採集年月日及採集者	
參 照	摘 要	

東京科學博物館

日本の歴史

1億年前までの日本は大陸の一部でした。3,000万年前には、恐竜は滅び、哺乳類の時代に太平洋プレートの移動により大陸から離れます。2,500万年前~1,500万年前になると、海底火山の活動が盛んになり、鉱山としてかつて採掘された金などの金属が地下から噴出してきます。400万年前は、未だ、日本のほとんどは海が占めていて、東北地方の海底火山も盛んになります。この頃より、火山が太平洋側から移動します。その後、300万年前にプレートの移動で平地が山地となり、北アルプスの火山も隆起し、その後に浸食を受けながら、ほぼ現在の日本が出来上がります。

12 鉱物と岩石（Ⅱ）

・人工的につくられたコンクリート

鉱物の集合である岩石の中でも礫岩と呼ばれる岩石の集合体と似ているのが、人工的につくられたコンクリートです。ここでは、コンクリートの劣化について取り上げます。

コンクリートの劣化は重要な課題であり、そのためには薄片製作が欠かせない。特に劣化の原因となるアルカリ骨材反応（Alkali Aggregate Reaction）等により劣化したコンクリートは強度自体が脆弱化している上に、ひび割れが多いことがあり、コンクリートコアやコンクリート片の切断から薄片研磨において、分離したり欠落したりすることが多く、その製作には細心の注意が必要です。

このアルカリ骨材反応とは、1940年にT.E. Stantonによって初めて報告され、わが国でも1950年頃から調査が行われていて、大きな問題となったのは1980年代に入ってアルカリ骨材反応によるコンクリートの早期劣化が顕在化してからです。

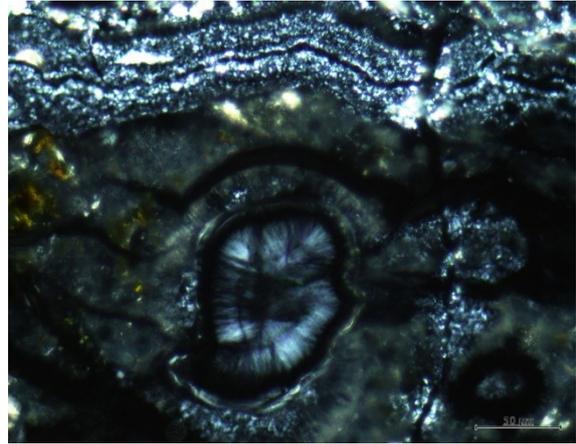
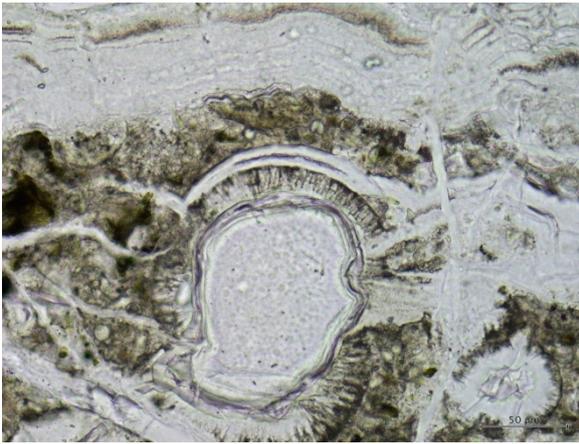
アルカリ骨材反応は、アルカリシリカ反応（ASR：Alkali Silica Reaction）、アルカリ炭酸塩岩反応、アルカリシリケート反応の3つに分類されていて、わが国でアルカリ骨材反応といわれているものは、通常アルカリシリカ反応（ASR）であり、この反応によって生成した物質（エトリンゲン石など）の生成や吸水に伴う膨張によってコンクリートの構造物にひび割れ（図12-1）が発生する現象の事を指しています。

1989年には骨材中のシリカ分の含有量を制限するなどの対策がJIS（日本工業規格）に明記されていて、最近造られた構造物ではアルカリ骨材反応はほぼ見られなくなったとされる。当然ながら、コンクリートを造る際に、その規格どおりに施工することで、アルカリ骨材反応を抑制し、コンクリートの寿命を長くすることができます。

鉄筋コンクリートは、鉄の表面に生じた褐色の錆（サビ）（ $\text{FeO}(\text{OH})$ などの組成を持つもの）を、アルカリ性のコンクリートによりそのサビを鉄（Fe）に戻すことで、その強度が保たれることとなります。

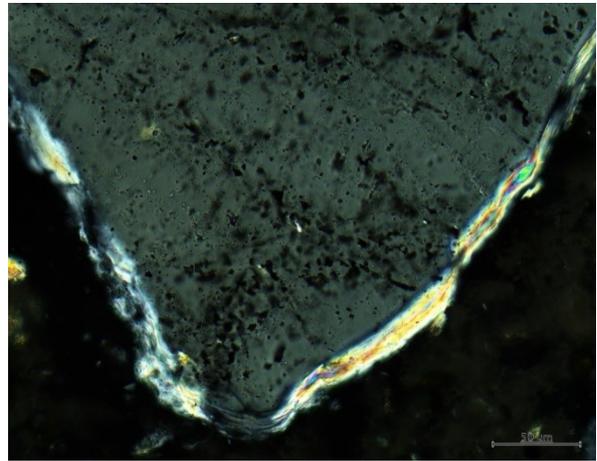
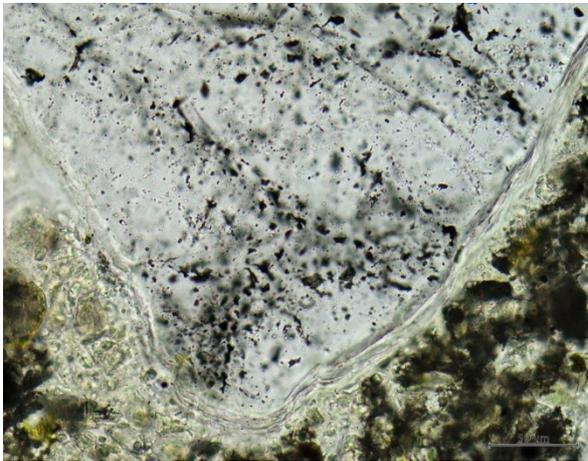


図12-1：道路橋の橋台部分（左）や鉄道構造物の橋脚（右）に見られるひび割れ



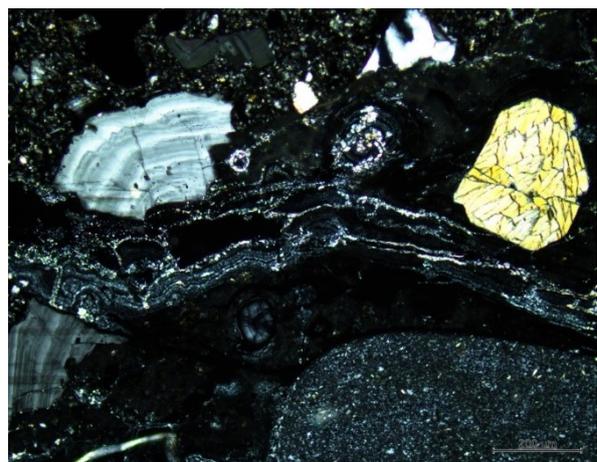
0.1 mm

図12-2：アルカリ骨材反応によって生じた針状のエトリンゲン石が空隙を充填するように放射状にて見られる



0.1 mm

図12-3：アルカリ骨材反応によって表面が炭酸化している



0.1 mm

図12-4：アルカリ骨材反応によって生じた非晶質物質とエトリンゲン石

1 1 ~ 1 2 章のまとめ :

I. 岩石名と鉱物名の違いについて説明しなさい

{

}

II. 岩石名は、構成する鉱物の種類や割合（量）や配列（組織）によって名前がつけられます。それを調べるために薄片と呼ばれる、厚さ 30 μm 程度にした切片を作成します。その薄片は、（ ① ）顕微鏡で観察して組織や構成鉱物を調べたり、さらに（ ② ）により元素分析を行い、構成する鉱物を詳細に調べたりします。

上記の①と②に入る語句を下記に書きなさい。

① :

② :

III. 岩石は地層を構成し、地層は地殻をつくり、その地殻は地球の表面を覆っています。地殻より深いところのマントルからもたらされた岩石や鉱物があります。それぞれ代表するものを挙げなさい。

岩石名 :

鉱物名 :

13 鉱物の鑑定

・ 鉱物の記載

動植物と同様に肉眼あるいはルーペ程度を使用して鉱物を鑑定する場合，そのほとんどが複数の鉱物の集合体であるため，どのような状態で産出したのか，大変重要な情報となります。産出状態から産状（Occurrence）と略されますが，鉱物を記載する上では欠かすことのできない内容です。

ここでは，日本の国石となったヒスイ（ひすい輝石）を紹介します。

現在では，新潟県糸魚川市から富山県朝日町周辺にかけて産出したとされているヒスイ（図 13-1,(2)）が，縄文時代の6千年前頃から首飾り等に使われていたことが知られています。さらに新潟県以外にも北海道神居古潭（図 13-1,(1)），長野県白馬（図 13-1,(3)），静岡県引佐（図 13-1,(4)）兵庫県養父市（図 13-1,(5)），鳥取県若桜町（図 13-1,(6)），高知県（図 13-1,(7)），あるいは長崎県長崎市（図 13-1,(8)）などからも産することが報告されています。

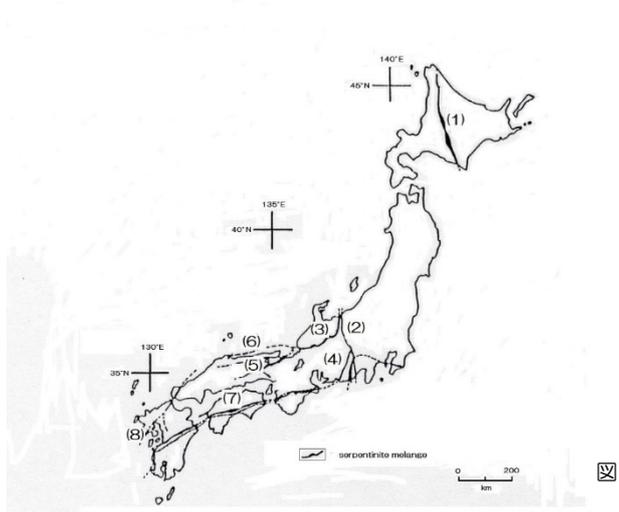


図 13-1 日本のヒスイ産地

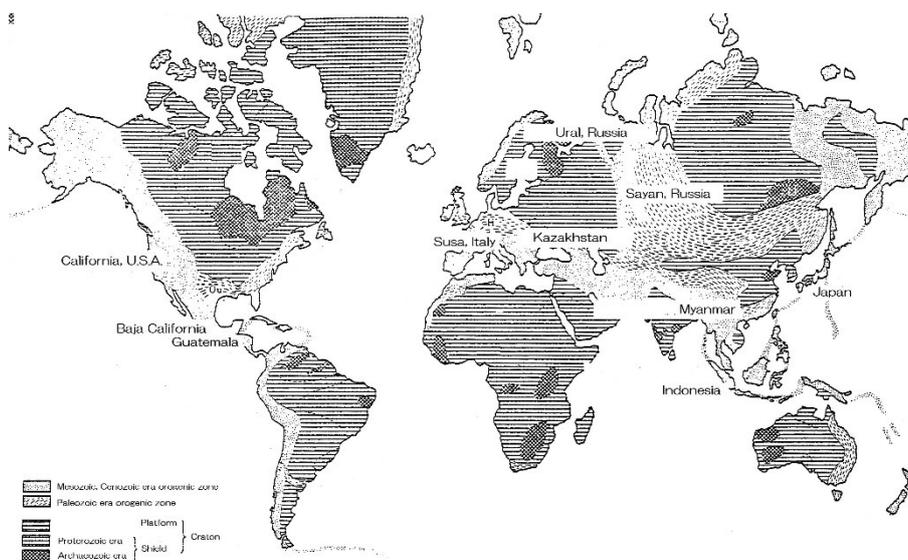


図 13-2 世界のヒスイ産地

また、外国では、ミャンマー (Myanmar) , インドネシア (Indonesia) , アメリカ (California,U.S.A.) , グアテマラ (Guatemala) , カザフスタン (Kazakhstan) , ロシア (Sayan,Russia) , イタリア (Susa,Italy) などでも知られています (図 13-2) .

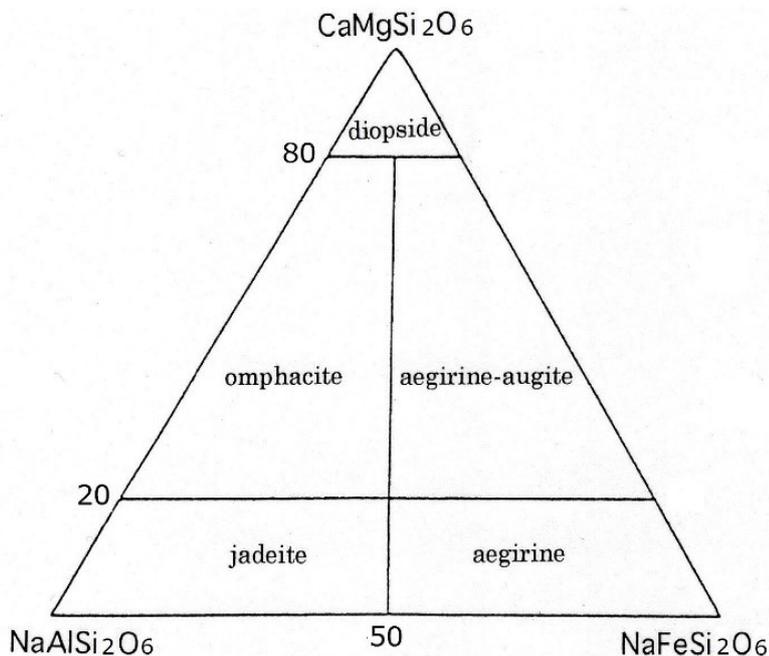
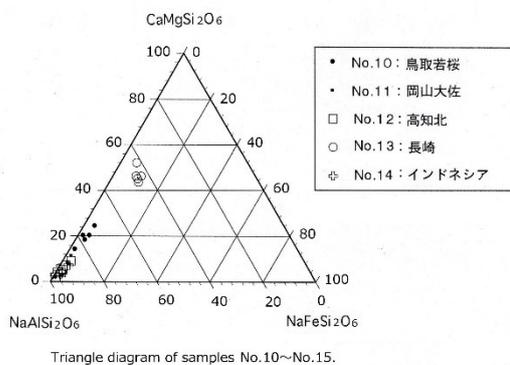
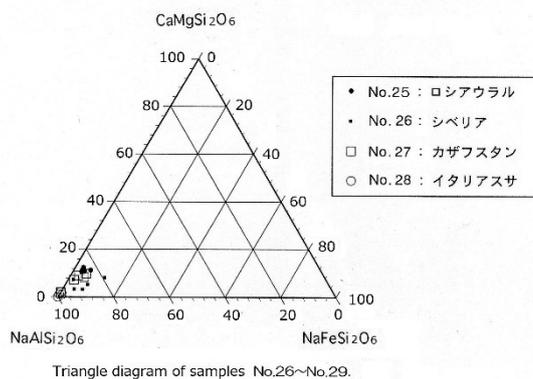
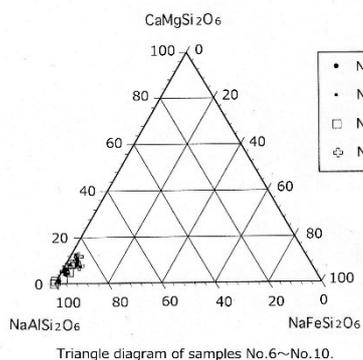
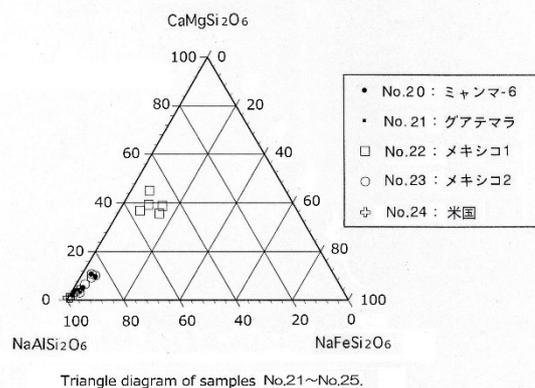
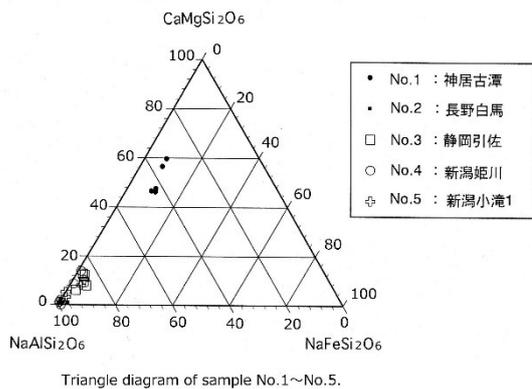


図 13-3. Triangle diagram of Ca-Mg-Fe and Na pyroxenes with accepted names.

(Morimoto et al.,1988.)

これらの産地から入手した試料について、X線粉末回折法と EPMA により同定を行い、化学組成については、輝石族の鉱物名分類(Morimoto ら,1988)に従い、図 13-3 のようなグラフ上で示すことにしました。このグラフは、化学組成を $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 、 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ 及び $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$ という三成分に分けて、それぞれが何%含まれているのかを示したもので、ひすい輝石(Jadeite)は左下の台形部分になります。

次頁に示したとおり、ほとんどのものはひすい輝石(Jadeite)でしたが、いくつかの産地のものはオンファス輝石(Omphacite)と呼んだ方がよいものもありました。これは、X線回折結果ともうまく一致していました。



このようにある産地の鉱物を科学的に分析した結果を記載することが自然界を理解する一歩となっています。

この論文は、

https://www.jstage.jst.go.jp/article/gsjapan/32/1-4/32_3/_pdf/-char/ja
から全文を読むことができます。

1 4 鉱物の見方

・まとめ

鉱物の見方に関連して、下記には肉眼鑑定について紹介します。また、ここでは別途に課題を出します。これがテストになりますが、時間内に書ききれない場合は、レポートとして1週間以内に提出（指定場所）してください。ただし、レポートの場合は、設問が増え、また配点に変更となります。

◎ルーペ：10倍程度のもの。

◎器具：・実体顕微鏡があれば便利。

・紫外線ライトは蛍光反応を調べるのに便利。長波(365nm)と短波(254nm)の2種類の紫外線を使う。

・放射線計測器（線量計）は閃ウラン鉱などの鉱物を調べるときに便利。

・磁石は磁性を持つ磁鉄鉱などを調べるときに便利。紐をつけておくとよい。ただし、ネオジム磁石は磁性が強いので鉄を含む石榴石も引き付けられることがあるので気を付けること。

・条痕色（鉱物の粉末の色）を調べるために条痕板（白色の素焼きのもの）が販売されていますが、茶碗の底でも代用できる。

◎その他：薬品の中でも塩酸は炭酸塩鉱物を調べるときに便利。気密性の高い容器に入れて保管する。水に薄めて使用します。

◎参考書：市販の鉱物図鑑の中でも、条痕色や蛍光反応などが掲載されている本を選ぶ。

鉱物の性質を具体的に調べるために、次のような項目をチェックするとよいでしょう。

1) 色, 2) 硬さ（釘などで引っ掻いてみる）, 3) 表面に割れ口（劈開）があるかどうか, 4) 光沢はどうか（ダイヤモンド光沢, ガラス光沢, 樹脂光沢, 真珠光沢, 絹糸光沢, 土状光沢あるいは金属光沢）, 5) 形態, 6) 重さ（比重）, 7) 集合の様子（放射状, 球状, ぶどう状, 皮殻状など）複数の集まりかどうか, 8) その他に条線（6頁参照）などのように特定の鉱物の特徴を示すものもあります。

それでは、次に鉱物の同定を試みましょう（時間の都合で割愛することもあります）。

トパーズ, 石英（水晶）, オパール, 正長石, 斜長石, 蛍石, 方解石, 霏石, 重晶石, 石膏, 滑石, 黄銅鉱, 黄鉄鉱, 班銅鉱, 赤銅鉱, 赤鉄鉱, 自然銅, 自然金, 硫黄, 石墨, 方鉛鉱, 閃亜鉛鉱, 磁鉄鉱, 鉄礬石榴石, 苦土カンラン石, 普通輝石, 苦土普通角閃石, 孔雀石, 藍銅鉱, 鉄電気石, 黒雲母, 濁沸石, 菱沸石, バラ輝石, テフロ石。

15. 鉱物各論

(1) ダイヤモンド

1. ダイヤモンドの起源

ダイヤモンド（Diamond：化学組成 C，等軸晶系）の絶対年代測定を，ウラン-鉛をはじめ，サマリウム-ネオジウム，ルビジウム-ストロンチウム，カリウム-アルゴンなどの同位体によって行われています。それらの測定結果から，ダイヤモンドと周囲の岩石（キンバレー岩）とでは生成した時期が異なることも分かってきました。

有名な南アフリカの有名なキンバレー鉱山のダイヤモンドの年代を測定したところ，今から約 33 億年前という結果が出ています。また，カリナン・ダイヤモンドと呼ばれる，世界で一番大きなダイヤモンド原石を産出したことのあるプレミア鉱山の年代は約 12 億年です。オーストラリアのアーガイル鉱山は約 16 億年前，ボツワナのオラバ鉱山は約 10 億年前です。いずれも，比較的ふるい地質年代に産出していることが分かります（図 15-1-1）。しかし，これらの年代測定は，ダイヤモンドに含まれる内包物を分析して得られた結果から導き出されたものなので，ダイヤモンドの年代を示しているわけではありません。ダイヤモンドがその内包物を取り込んだわけですから，その内包物が生成した後にダイヤモンドが出来たということになります。一方，母岩であるキンバレー岩の方は，そのほとんどがダイヤモンドより新しいという結果が得られています。このことから，ダイヤモンドが地下百数十キロメートル付近で生まれ，その後も地下に暫く留まっていたと考えられます。そして，ある時期に地下から地表へと一気に噴出してきたのでしょう。なお，もしゆっくりと地下から上昇したなら，ダイヤモンドは真っ黒な石墨（グラファイト）あるいは，炭酸ガス（CO₂等）にかわってしまったことでしょう。最も地下深くからもたらされた宝石鉱物がダイヤモンドである。このダイヤモンドを研究することによって，地下の様子を知ることができます。残念ながら，人類は地球の地下 20~30Km 程度までしか直接見ることができないため，地下深いところで出来たダイヤモンドからの情報は極めて重要です。

さて，このダイヤモンドが一体どのようにしてできるのかについては，ふるくから考えられていました。ローマ時代には，ダイヤモンドは稲妻が地中で凍結したものと信じられており，14世紀のイギリスのジョン・マンデビル卿によれば，ダイヤモンドには雌雄があり，その両方から，したたり落ちる露が集まって小さなダイヤモンドが生まれ，更にそれが大きく成長すると考えられていました。その後の19世紀にはブルースター卿が，松脂のような木の幹からしみだした樹脂がダイヤモンドであろうと考えていた時期もあったのです。今日では笑い話になるような話が，当時としては立派な考えであったのです。しかし，1799年にダイヤモンドが炭素から出来ているということがわかってからは，如何に炭（石墨）をダイヤモンドにすることができるかについて，数多くの実験が研究者によって繰り返し行われてきました。やがてダイヤモンドをつくる上で決定的な発見がありました。それは，1866年9月22日，ロシアのアラタイール川右岸に落下した 1.7kg の隕石に含まれていたダイヤモンドを 1888年にジェロフェジェフとラチノフらによって発見されたことです。このことから，ダイヤモンドは隕石が地表に落下する際に生じた高い圧力が必要であることが導

き出されたのです。

ダイヤモンドの合成において有名な実験は、1880年のハネーによる、鉄チューブの中に、骨油、パラフィン、アルコール、金属リチウムなどを入れて、反射炉で加熱する方法や、モアッサンによる、鉄の中に炭（石墨）を入れてから4,000度で溶解し、それを水中に投げ入れて急冷するという方法です。特に1892年のモアッサンの実験によって、直径0.5mmのものが出来たということが話題になりましたが、その後の追実験によって確認できておらず、残念ながら、現在ではこの方法では出来ないであろうと考えられています。

合成ダイヤモンドは、1955年にアメリカのGE（ゼネラル・エレクトリック）社によって、マン・メイド・ダイヤモンド（Man made diamonds）という名でネイチャー誌に発表されるまで待たねばならなりません。一般には、合成宝石をシンセチック・ストーン（Synthetic stone）と呼ぶのに対して、マン・メイド（Man made）としたところに、当時の研究報告に対する誇りが感じられます。この合成ダイヤモンドの成功によって、ようやく天然ダイヤモンドの生成条件も分かるようになってきました。その後の研究はめざましいものがあり、わが国でも科学技術庁無機材質研究所（当時）によって、かつて世界最大の大きさのダイヤモンドが造られたことがあります。

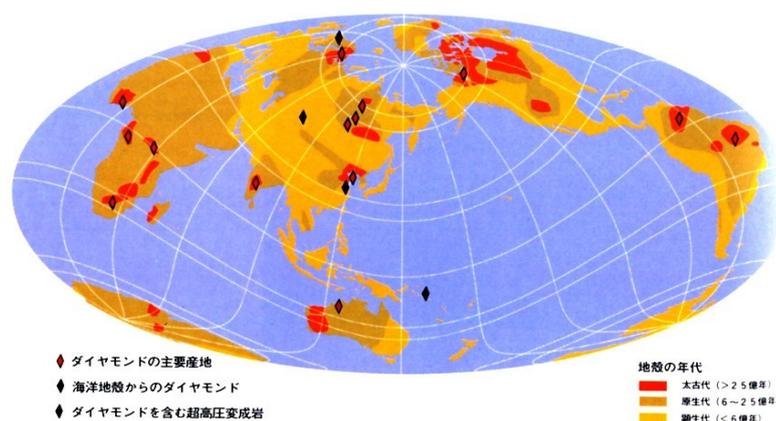


図 15-1-1 ダイヤモンドの主要産地「ダイヤモンド展」図録（国立科学博物館刊、2000）より

参考資料

最も大きなダイヤモンドの世界ランキング

1) ゴールデン・ジュビリー：545.67ct

1986年に南アフリカのプレミア鉱山で発見された原石（755.50ct）からクッション・シェープに磨かれた。タイ国王の在位50周年を記念して国民から献上された。

2) カリナンⅠ：530.20ct

1905年1月、南アフリカのプレミア鉱山で3,104ctという世界最大の原石が発見された。この原石は105個に分割されて磨かれた。この鉱山を開いたサー・トーマス・カリナンにちなんで名付けられた。ペアー・シェープに磨かれた。

3) インコンパラブル：470.88ct

1988年にゼール社が競売で落札した。産地は不明。890ctの原石からステップ・カットに磨かれたもの。同じ原石から他に14個が磨かれた。帯褐黄色。

4) カリナンⅡ：317.40ct

カリナンの原石から磨かれたもので2番目に大きいもの。クッション・シェープに磨かれた。

5) センチナリー：273.85ct

1986年に南アフリカのプレミア鉱山で発見された原石（599ct）で1991年にプリリアント・カットに磨かれた。1988年のデビアス社の創立百年（センチナリー）を記念して原石を公開した。

これらの他に、1739年にインドで行方不明になったグレート・ムガール（280ct）やインドにあるニザム（277ct）が推定重量として4番目と5番目に位置している。なお、青色のホープ・ダイヤモンド（45.52ct）やルイ15世の戴冠式に使われた王冠にはリージェント（140.50ct）と呼ばれるダイヤモンドがおさまっている。

2. 日本産ダイヤモンド

わが国では、平成19（2007）年9月10日に、水上知行氏、サイモン・ウォリス氏らが、愛媛県の露頭から採取した岩石中の輝石の包有物としてダイヤモンドが発見されました。残念ながら肉眼で確認できない大きさ（図 15-1-2）で、ラマン分光法という方法でダイヤモンドと確認しています。このラマン分光法は、レーザー光を鉱物に照射し、散乱（ラマン散乱）の様子を調べる手法で、今回のようにミクロンサイズの鉱物や包有物を調べる時に使われ、特にダイヤモンドの同定やその特性を調べるためによく利用されています。発見された図 15-1-3 には、ダイヤモンドの特徴を示す 1332cm^{-1} 付近のピークがはっきり見られます。これまで、超高压変成岩中からの産出例はありますが、地質年代が比較的新しい地域の火山岩中からの発見は初めてです。

大きさがあまりにも小さいので宝石にはなりません。今回の発見からは、日本のような火山活動が盛んな地域でも、ダイヤモンドが見つかる、ということが分かります。

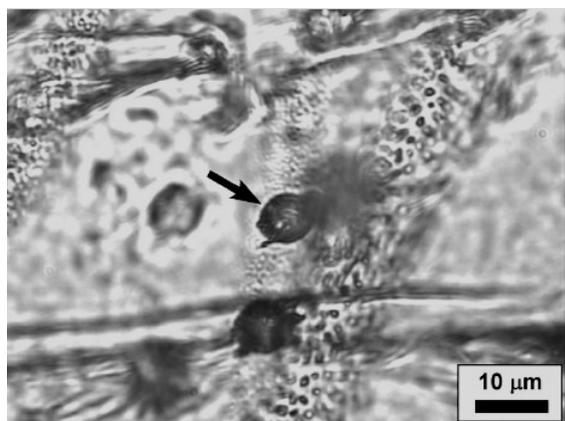


図 15-1-2 ダイヤモンドを含んだ包有物（矢印）

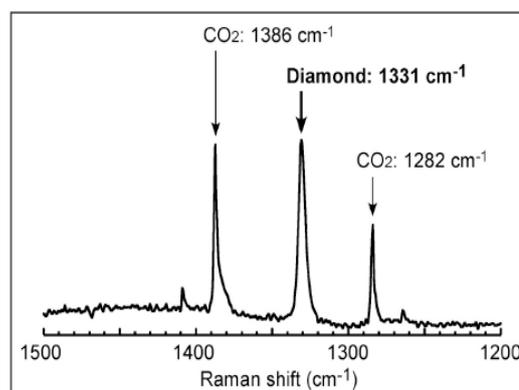


図 15-1-3 ラマン分光のチャート

3. ダイヤモンドの化学組成と結晶構造

ダイヤモンドの化学組成について

もともと外観からネーミングされてきた宝石鉱物は、18世紀からスウェーデンのクロンステッド（A.F.Cronstedt）をはじめベルリン大のクラプロート（M.H.Klaproth）らによる化学分析の研究の進歩につれて、その正体が説き明かされてきました。前にも書いたように、1772年にはダイヤモンドが石墨と同じ炭素でできているらしいことが有名な化学者であるラポアジェによって示唆され、その後炭素であるということが確認されました。このように、18世紀以降の分析技術の進歩はめざましいものがありました。

ダイヤモンドについては、ほとんどが純粋な炭素（C）の結晶ですが、僅かに不純物としてチッ素（N）とホウ素（B）が含まれていることがわかってきました。そのチッ素は、厚さ数原子、直径数百原子の円形又は細長い楕円となって分布しており、最大 0.5 % も含まれています。一方、ホウ素は合成によって 270ppm までも含ませることが出来ます。

ダイヤモンドは、ほとんどが純粋な炭素であるが、僅かに不純物として窒素（N）や硼素（B）などが含まれていて、Ⅰ型・Ⅱ型というように分類されます。

Ⅰ型は、N原子を含むもので、更にⅠaA型・ⅠaB型・Ⅰb型の3つに分けられます。Ⅰ

aA型は、N原子2個が隣り合って炭素原子を置換したもので、I aB型は、N原子4個と空孔の集合体が炭素原子を置換したもので、I b型は、N原子が単独で炭素原子を置換したものです。

II型は、N原子を含まないもので、更にII a型とII b型に分けられます。II a型は、Nをほとんど含まない極めて純粋なもので、天然では稀ですが、産出する時は比較的大きな結晶であることが多いという特徴を持ちます。II b型は、Bを含むもので、有名な青色のホープ・ダイヤモンドはこの型に属します。

これらはFTIR（赤外分光特性の検出器）などによる測定によって分かります。I a型とI aB型は、それぞれ 1280cm^{-1} と 1175cm^{-1} で、I b型は、 1130cm^{-1} に観察されます。その他のII a型、II b型もそれぞれ特徴的な分光特性を示します。

ダイヤモンドの結晶構造の中には、チッ素原子以外にプレートレットと呼ばれる不規則な板（プレート）状構造が見られることが、X線の分析により知られています。このプレートレットについては、いまだにされてはいませんが、さらに、バーシル(Bursill)らによって、ポイダイトと呼ばれる小さな崩れたプレートレットが見られると報告されています。

以上のように、ダイヤモンド結晶構造中にはチッ素やホウ素という元素を含み、さらにプレートレット、ポイダイトと呼ばれる特徴的なものを含むことがあるということで、一方、ダイヤモンド結晶中には、別な結晶がインクルージョン（内包物）として含まれることがあります。含まれる結晶は、ペリドット（フォルステライト）、ガーネット（パイロープあるいはパイロープアルマンディン系）、エンスタタイト、オンファス輝石、透輝石、クロム鉄鉱、コース石、ルチル、藍晶石、イルメナイト、黒雲母、磁硫鉄鉱、ペントランド鉱、黄銅鉱など22種類が知られています。なかでも美しいエメラルド・グリーン色を呈する透輝石や灰緑色のオンファス輝石、暗赤色のクロムに富んだパイロープ、黒色粒状のマグネシウムを多く含んだクロム鉄鉱などが低倍率の顕微鏡下で観察できます。

ダイヤモンドの結晶構造

ドイツのラウエ(Laue)によって、X線が鉱物の結晶を調べるのに有効であることを示し、その後のブラッグ(Bragg)父子がその結晶構造を解析する方法を発見したのは20世紀に入ってからの出来事です。現在は化学組成と結晶構造を求めることによって、鉱物の種類が決定されることになるので、新しい種類を見つけた場合にはIMA（国際鉱物学連合）の新鉱物・鉱物名委員会にデータを送り、命名されることになります。

X線による構造解析の中でも、粉末回折法と呼ばれる手法は、現在では鉱物種を決める場合に最も広く用いられているものです。粉末にしなければなりません、未知鉱物の同定には必ずといってよいほど常套手段となっています。

最初に、X線による構造解析について説明します。これは、原子間距離にほぼ近い波長のX線を結晶に照射させ、回折と呼ばれる現象を引き起こすことを利用して、その原子の配列を知ろうというものです。この回折は原子間やその原子の種類によって異なるため、結晶構造とその結晶を形づくっている原子の種類の違いも反映されることとなります。ということは、鉱物一つ一つで異なったデータになることが分かります。このX線による回折のパター

ンについては、粉末にした結晶のデータ集として、ICDD (International Center for Diffraction Data) と呼ばれるデータ・ベースがある。このデータと比較することにより鉱物の同定が比較的容易にできるのです。

従って、全く不明な宝石鉱物が持ち込まれた場合に、X線粉末回折を行うことによってその鉱物の名前が分かることとなります。ただし、X線粉末回折法は試料(鉱物)を粉末にしなければならないのが大きな問題です。

この試料づくりは、乳鉢でその未知宝石鉱物を粉末にする。その時に、色や硬さや劈開の有無などを調べる。数十分くらいの間は、ひたすら乳鉢の中で粉末を細かく砕き続けます。粉末を手の指にとってみて、その粉末の粒が感じられなくなる程度まで擦ることが肝心です。鉱物によっては力まかせにゴリゴリと擦ると相転移と呼ばれる、別な鉱物に変わってしまうものもあります。粉末になったら、次に試料台(ホルダー)に平らにセットして測定を開始します。この粉末表面が平らになっていることが大切です。しかも、粉末にするということは結晶の向きがバラバラになった状態からの情報を得るということになります。しかし、雲母と呼ばれる鉱物は平らに並ぶ性質がありますので、粉末にしてもある程度は揃ってしまうことがあります。そこで、定方位法と呼ばれる、結晶の向きが揃った状態からの情報を使用する方法もあります。

さて、ダイヤモンドの結晶構造についてX線を使って調べてみることにしましょう。炭素原子が正四面体の頂点に位置し、その正四面体の中心部にもう一つの炭素原子が配列しています(図 15-1-4)。その原子間距離は狭いところで 0.154 ナノメートル (nm) あります。銅から発生するX線の波長(λ)は 0.1542nm で、ダイヤモンドの原子間距離(d)とちょうど同じ長さです。

Bragg の式 ($2 d \sin \theta = n \lambda$) に代入してみます。ここでは、 $d \doteq \lambda$ なので、 $n = 1$ の場合は、

$$\sin \theta = 1 / 2 \qquad \therefore \theta = 30 \text{ (度)}$$

よって、試料に対してX線の照射角度が30度の位置に回折線と呼ばれるものが現れることとなります。実際には、ダイヤモンドの結晶構造を三次元的に眺めて見るともっと様々な原子間距離(d)が現れてきます。その中で強度の強いものから順に 0.206, 0.1261, 0.10754nm という回折線が見られます。これらを検出することによって、ダイヤモンドであるということが分かるのです。

しかし、このX線粉末回折法は、ダイヤモンドを粉末にしなければなりません。そこで、ダイヤモンドかどうかについての同定によく使われるのはラマン分光法と呼ばれる方法です。ただし、X線回折とは異なり、得られたデータを理論的に説明するためには更なる研究が必要です。

X線の回折で Bragg の式を導き出した時に使われたものは塩 (NaCl) の結晶でしたが、いかなる宝石(結晶していない非晶質なものは除きます)も、X線の照射によって、その結晶構造に対応した回折線が現れます。しかし、宝石は流通しているダイヤモンドのように、多面体として研磨加工(カット)されたものについて、そのX線の回折パターンを調べることは、わが国では、今までほとんど行われていませんでしたが、最近になって、ダイヤモン

ドの結晶方位と成長パターンとの関係について報告した例があります。

現在では、合成ダイヤモンドがつくられ、天然のものと混ぜられて流通することも懸念されています。その区別の方法の一つに、合成ダイヤモンドには、鉄やニッケルが比較的多く含まれるのに対して、天然ダイヤモンドにはあまり含まれないということに着目して、蛍光X線による元素分析(XRF)によって、天然ダイヤモンドと合成ダイヤモンドを区別することが実際に行なわれています。また、赤外吸収(IR)にも天然と合成の違いが現れます。さらに中国製合成ダイヤモンドの燐光反応が長いということから、それをチェックする装置もつくられています。

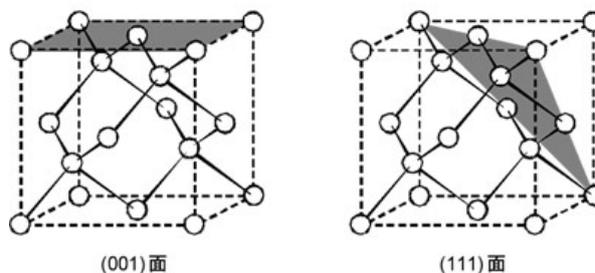


図 15-1-4 ダイヤモンド構造

4. 宝石としてのダイヤモンドの識別(鑑別)について

ダイヤモンドは、無色透明な外観をもつ鉱物や人工的に造られた物質によって代用されることがあります。ダイヤモンドは、他の代用品(模造石:イミテーション)と比較すると、面の端(エッジ)が極めて鋭いことが特徴の一つです(図 15-1-5)。最近では、モアッサナイトという物質が、ダイヤモンドの模造石(イミテーション)として使われていますが、これはダブルリングと呼ばれる、二重に線が見えることで区別ができます(図 15-1-6)。無色のダイヤモンド以外に、青色やピンク色というカラー・ダイヤモンドと呼ばれるものがあります。ところが、人工的に放射線を照射させて着色させたダイヤモンドがあります(図 15-1-7)。これは、1905年に臭化ラジウム塩によってダイヤモンドの色を変化させることが分かってから、電子線や中性子線などによっての処理が行われています。処理されていないダイヤモンドと区別するためには、一般的には可視光~赤外領域における吸収パターンを調べることとなります(図 15-1-8)。

無色透明なダイヤモンドは極めて純粋なもので、チッ素など不純物を含まないⅡa型と呼ばれるタイプのもので、しかし、一般には黄色がかったものが多く、チッ素が薄板状に分布したⅠa型と呼ばれるダイヤモンドです。また、青色のダイヤモンドにはホウ素が含まれています。一方、放射線で処理して黄色や青色に発色させたものは、そのチッ素やホウ素の有無には無関係です。そこで、チッ素やホウ素の存在やそれらの分布状態を知ることによって、処理されているかどうかの区別(鑑別)ができます。そのために、近年では赤外領域の分析が広く行われるようになりました。最近では、カラー・ダイヤモンドと呼ばれる、明らかに色がついているダイヤモンドの流通量が増えているため、それらの色が天然(自然)のものなのか、あるいは人工的に着色されたものなのか、その起源を明らかにする必要があります。

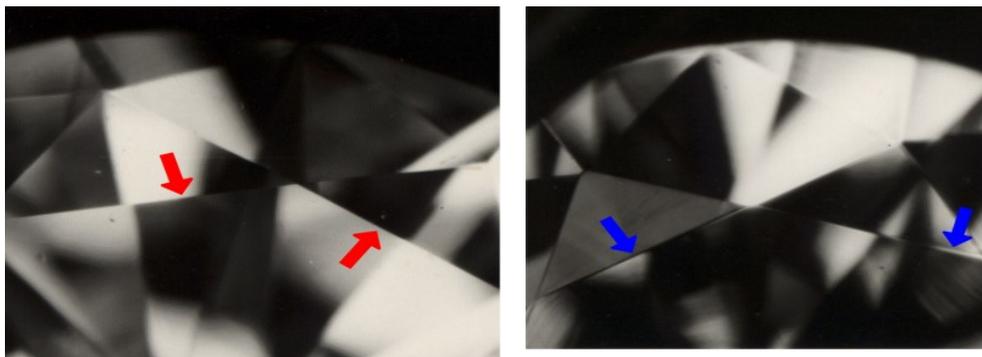


図 15-1-5 ダイヤモンド（左）の表面のエッジ（赤矢印）がGGG（右）のエッジ（青矢印）よりシャープに見える

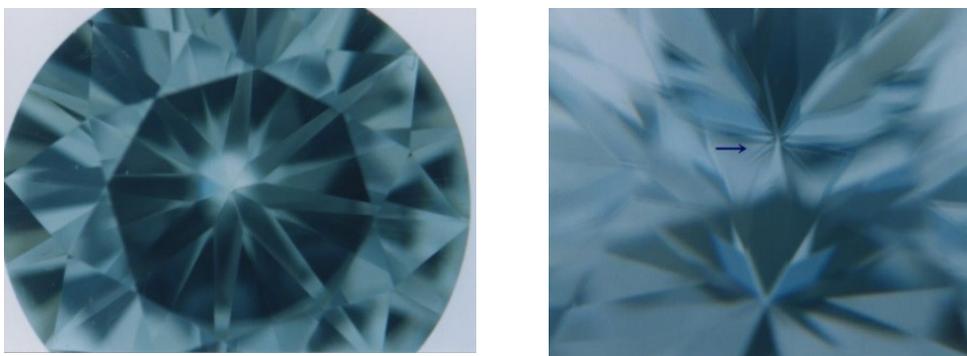


図 15-1-6 モアッサナイトの上部の様子（左）と，斜めから拡大して見ると二重に見える（右，矢印）

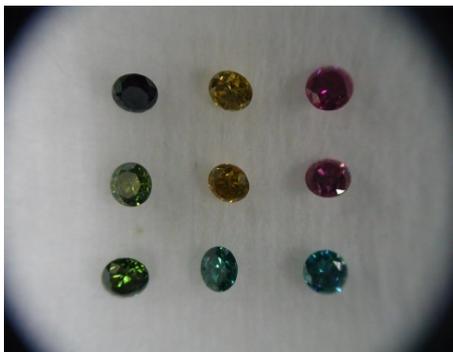


図 15-1-7 放射線処理ダイヤモンド

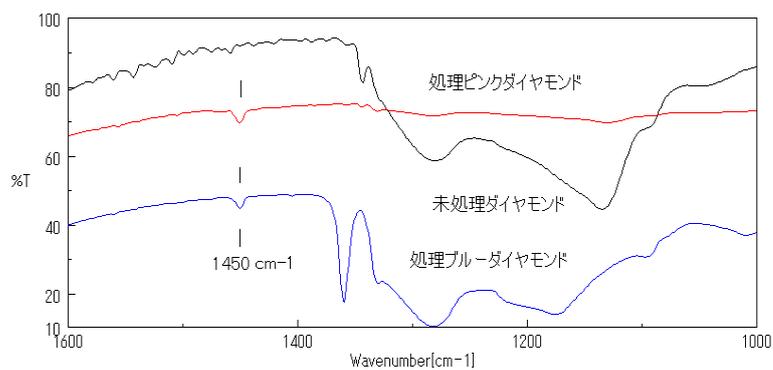


図 15-1-8 未処理と処理ダイヤモンドの分光特性の違い

表 15-1-1 ダイヤモンドと無色透明宝石の性質表

宝 石 名	光学特性			硬 度	比 重	鑑別のポイント	
	屈折率	複屈折率	分散率				
合成ルチル	2.616	2.903	0.287	0.330	6~6.5	4.26	強い分散
合成珪酸塩	2.654	2.697	0.043	0.104	9.5	3.22	ダブルリング・強い分散
天然ダイヤモンド	2.417		—	0.044	10	3.52	表面のイットがツヤブ
合成ダイヤモンド	2.417		—	0.044	10	3.52	分光スペクトル
ストロンチウム・矽酸塩	2.409		—	0.190	5.5	5.13	強い分散
リチウム・ニオブート	2.210	2.300	0.090	0.120	5.5~6	4.64	強い分散
キュービック・ジルコニア	2.150~2.18		—	0.060	7.5~8.5	6位	比重
天然ジルコニウム	1.925	1.984	0.059	0.059	7.5	4.70	ダブルリング
G・G・G	1.95~2.03		—	0.038	6.5	7.05	比重
Y・A・G	1.832		—	0.028	8~8.5	4.55	比重
天然サファイア	1.770	1.762	0.008	0.018	9	4.00	インクルージョン
合成サファイア	1.770	1.762	0.008	0.018	9	4.00	気泡
合成スピネル	1.730		—	0.020	8	3.65	歪
天然スピネル	1.718		—	0.020	8	3.60	インクルージョン
天然トルマリン	1.644	1.624	0.020	0.017	7~7.7	3.06	ダブルリング
天然トパーズ	1.617	1.609	0.008	0.014	8	3.53	インクルージョン
天然クォーツ	1.544	1.553	0.009	0.013	7	2.65	インクルージョン
合成クォーツ	1.544	1.553	0.009	0.013	7	2.65	ダブルリング
ガラス	1.44~1.77		—	—	5	2.3~4.5	気泡

5. 宝石としてのダイヤモンドの評価（鑑定）について

広く流通している無色のダイヤモンドの鑑定に際しては、評価システムが確立しています。それは4C評価と呼ばれる、4つの基準です。即ち、重さ・形・透明度（キズ）・色という4つの要素に分けられ、それぞれに基準があります。

- ・重さは、Carat (カラット) と呼ばれる重さの単位が基準です。CTあるいはCTSという記号が使われます。1CTは0.2gです。かつて、乾燥したイナゴ豆（カロブ：Carob）の実（図15-1-9）が、重さを量る時の分銅の代わりとして使われていたことによります。
- ・形は、Cut（カット、即ち形状です。）と呼ばれ、ラウンド・ブリリアント・カット（図16-1-10）が基本形です。
- ・透明度は、Clarity（クラリティ）で、外部や内部のキズによって評価します。
- ・色（Color：カラー）は、無色を最高とします。

以上の4つの基準がすべて英語のCで始まることから4C評価と呼ばれるゆえんです。次にそれぞれについて説明します。

（1）カラット（重さ）

重さは天秤によって正しく計量できます。そして、重さによって価格が大きく影響されますので、研磨を行う際に、なるべく削る量を最大限に減らすことが大切です。原石を研磨した場合に、どれ位の割合になるのかをあらわす用語として「歩留まり」があります。ダイヤモンドの場合は、43%程度とされます。ということは、半分以上は削ってしまうということです。そこで、原石を研磨した場合に、何カラットとなるかを予測することは、非常に重要な問題です。従来は簡便な近似式を用いていましたが、最近、極めて正確な計算式によって、その歩留まりを計算によって求めることが可能となりました（詳細後述）。図15-1-9 乾燥したイナゴ豆とその実



（2）カット（形状）

左右対称な形状がよいとされます。ブリリアント・カットは、トルコフスキーが1919年に考えた形状（図15-1-11・12）が基本で、ダイヤモンドが最も輝く形状について、ダイヤモンドに入射する光の屈折と反射を計算して導き出されたものです。わが国では、ダイヤモンドの形の評価について、1997年から宝石鑑別団体協議会（AGL）が提唱した基準が用いられています。

（3）クラリティ（透明度）

ダイヤモンドの瑕を10倍のルーペで観察し、その大きさ・数・位置・種類によって評価されます。一般に10ミクロン以下の瑕は無いとみなされています。瑕は表面及び内部の欠陥のことで、表面に見られる引っかき瑕やインクルージョンと呼ばれる内部に含まれる割れや結晶に分けられます。研磨される前の原石の表面が残されているものをナチュラルと呼び、その表面に三角形（トライゴン）が見えることがあります（図15-1-14）。

この評価は11段階に分けられますが、未だにその明確な判断基準はなく、経験者の主観

によるところが多いのが実情です。中央と周囲，内部と外部では同じ大きさの瑕でも評価が異なります。即ち，中央や内部にある瑕の方が，周囲や外部にある瑕より低く評価されます。

(4) カラー（色）

ダイヤモンドの色に関しては無色のものがよいとされます。アルファベットのD～Zという記号が使われます。

現在では，マスター・ストーンあるいはキー・ストーンと呼ばれるような，あらかじめ評価されている基準となる宝石が決められます。ダイヤモンドには業界で初の統一基準となるマスター・ストーンを用意し，1998年に「認定マスター・ストーン制度」を発足させました。これは，（社）日本ジュエリー協会（JJA）と任意団体である宝石鑑別団体協議会（AGL）が“マスター・ストーン”を1セット用意し，それをもとに複数のマスター・ストーンを作成して，それに認定番号と呼ばれる番号をつけるというものです。その認定番号入りのマスター・ストーンと比較してダイヤモンドの色を評価することになります。しかし，各マスター・ストーンは天然のものであるため，全く同じものをつくるのは極めて困難です。

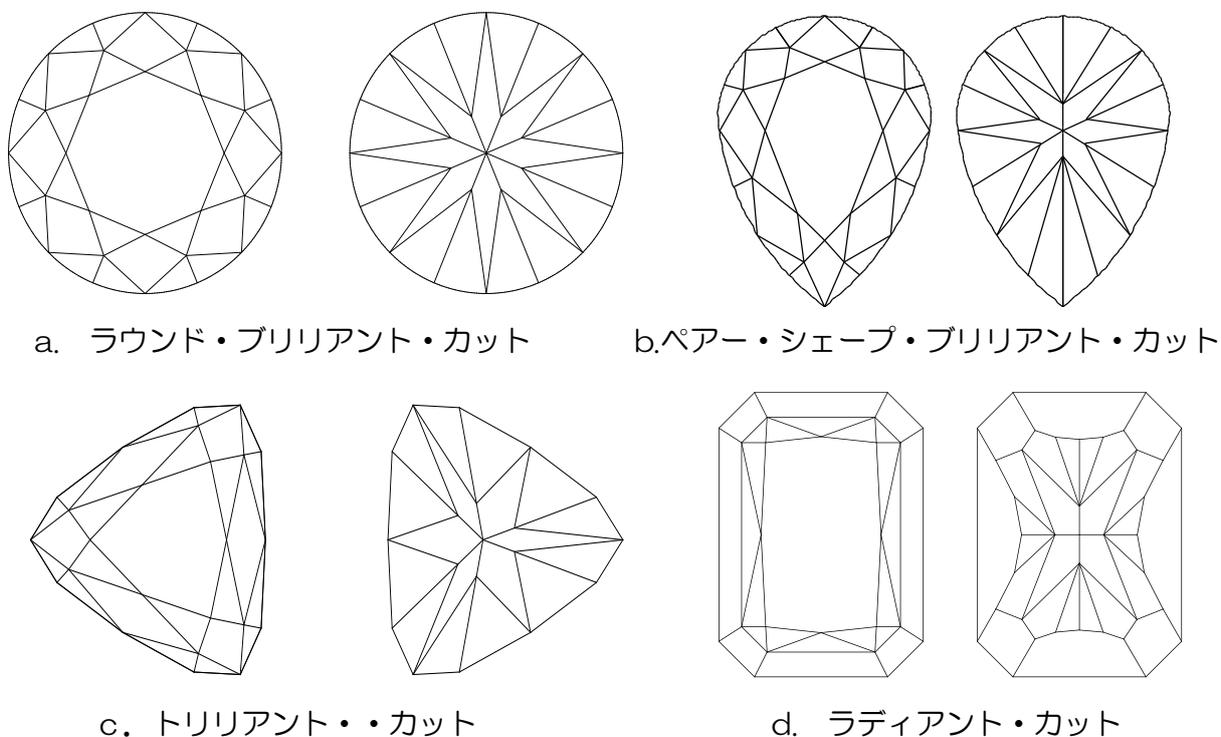


図 15-1-10 ダイヤモンドのカット形状

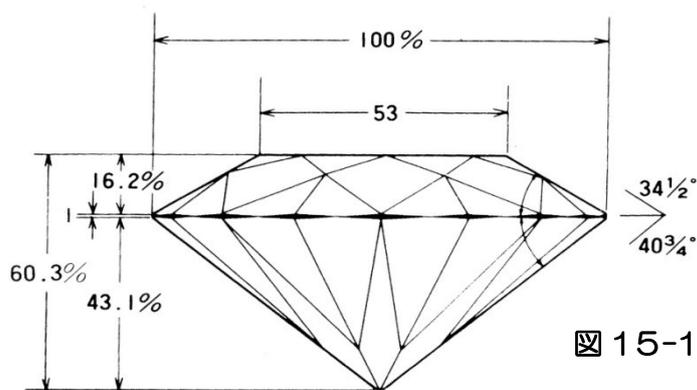


図 15-1-11 トルコフスキーのカット形状

◆上部(クラウン)側

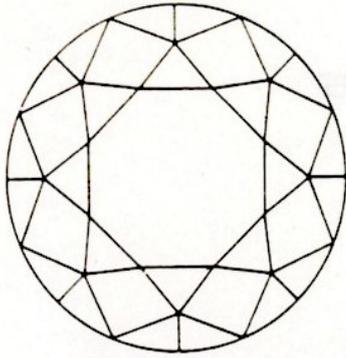
テーブル Table (1面)

スター・ファセット Star Facet (8面)

ベゼル・ファセット Bezel Facet (8面)

アッパー・ガードル・ファセット

Upper Girdle Facet (16面)



◆下部(パビリオン)側

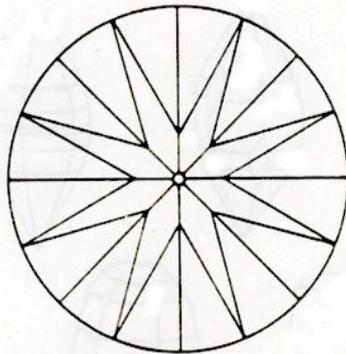
ローア・ガードル・ファセット

Lower Girdle Facet (16面)

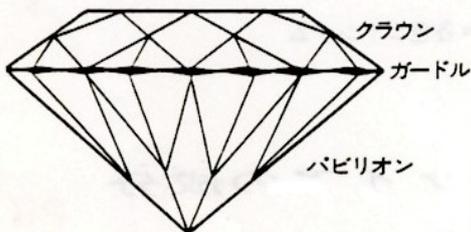
パビリオン・ファセット

Pavilion Facet (8面)

キューレット Culet (1面)



◆ガードル



一般のブリリアント・カットは上部(クラウン)側にテーブルとスター、ベゼル及びアッパー・ガードル・ファセットで33面、下部(パビリオン)側にはローア・ガードル、パビリオン・ファセット及びキューレットで25面ある。従って合計58面ある。

最近では、キューレットの無いもの、ガードル部を研磨しているものがある。



テーブル
キューレット

図 15-1-12 ブリリアント・カットの各部の名称

カラットの計算式について

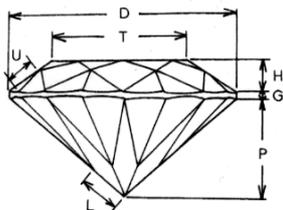
多面体といえるダイヤモンドの体積計算からその重量を求める計算式をつくりました。この式は、大変複雑な式ですが、計算誤差が問題にならないように考慮しながらつくりました(図 15-1-13)。

この重量計算式は 100ct (20 g) 程度のダイヤモンドの重量を小数点以下2桁までの正確さで計算結果が得られるようにしてありますので、歩留まりのシミュレーションなどにも応用ができます。シミュレーションによって、原石から研磨した場合における歩留まりや再研磨の時に得られる重量を予想することができます。

コンピュータが進歩したお陰で、複雑な計算が瞬時にできるようになりました。しかし、あくまでも得られた結果を解釈するのはコンピュータではありません。意味のないデータかどうかも十分考慮する事が肝要と思います。計算式に数値を代入して計算する場合に、数値が多ければ精度の高い結果が出るとは限りません。例えば、アンケート調査で百人程度の結果をまとめる際に、計算の結果が 25.3% となっても、25% という表記で十分です。この場合の 0.3% の差というのは、あまり意味がないのです。次頁では、数値の取り扱いについて書いておきましたので興味のある方はお読みください。

図 15-1-13 ダイヤモンドの精密な重量計算式 (宝石学会誌 17 号参照より)

$$\begin{aligned} \text{重量計算 (ct)} = & 0.004853203 \times H \cdot (D^2 + D \cdot T + T^2) - 0.0007107349 \times T^2 \cdot (H - X_2) - 0.0003694281 \times D^2 \cdot X_2 \\ & + 0.01380337 \times D^2 \cdot G - 0.00004975073 \times D^2 \cdot \left(\frac{H \cdot X_2}{1.961571 \times (D - T) \cdot X_2 - 0.1493155 \times D \cdot H} \right. \\ & \left. + \frac{P \cdot Y}{1.961571 \times D \cdot Y - 0.1493155 \times P \cdot D} \right) \\ & + 0.004853203 \times D^2 \cdot P - 0.0003694279 \times D^2 \cdot Y \\ X_2 = & \frac{0.07612047 \times D \cdot H \cdot (D - T) + 1.847759 \times H \cdot \sqrt{[(D - T)^2 + 3.414214 \times H^2] \cdot U^2 - 0.005794326 \times D^2 \cdot H^2}}{(D - T)^2 + 3.414214 \times H^2} \\ Y = & \left(1 - \frac{1.847759 \times L}{\sqrt{D^2 + 3.414214 \times P^2}} \right) \cdot P \end{aligned}$$



ただし、D はガードル直径 (mm)、P はパビリオンの深さ (mm)、G はガードル厚 (mm)、H はクラウンの高さ (mm)、T はテーブル (mm)、U は上部ガードル・ファセットでガードルからクラウン側に伸びている辺の長さ (mm)、L は箆目と呼ばれる下部ガードル・ファセットのキューレットに近い頂点からパビリオンの頂点までの長さ (mm) をあらわす。

```

10 REM The weight of a round brilliant cut by calculation
20 REM Copyright 1993 Masahiko Hayashi
30 *LOOP
40 CLS
50 LOCATE 10,1
60 PRINT "The weight of a round brilliant cut by calculation"
70 LOCATE 10,3
80 INPUT "Diameter (mm)=";D
90 LOCATE 10,4
100 INPUT "Table (%)"=;TP
110 LOCATE 10,5
120 INPUT "Crown (")=;CA
130 LOCATE 10,6
140 INPUT "Girdle (%)"=;GP
150 LOCATE 10,7
160 INPUT "Pavilion (%)"=;PP
170 LOCATE 10,10
180 PRINT "Star Facet : Girdle Facet = 1 : 1 "
190 LOCATE 10,11
200 PRINT "Culet : Girdle Facet = 2 : 8 "
210 T=.01*TP*D
220 H=.5*(D-T)*TAN(3.14159*CA/180)
230 G=.01*GP*D
240 P=.01*PP*D
250 LOCATE 21,16
260 PRINT "[ Total Depth (mm) ] =";H+G+P
270 X=H*(16*H+3.41421*T+4.65914*D)/(32*H*(D-T)*(8.65914*D-8*T))
280 I=SQR(4.0862915*D*D*D+64*P*P*P+34.738377*D*D*P*P)
290 Y=P*(32*P*P+9.3279928*D-D-I)/(30*P*P+8.7867967*D*D)
300 Q=1.96157*X*(D-T)-.149316*D*H
310 R=1.96157*D*Y-.149316*P*D
320 A=.0048532*H*(D*D+T*T)
330 B=-7.10735E-04*T*(H-X)
340 C=-3.69428E-04*D*D*X
350 K=.0138034*D*D*G
360 E=-4.97507E-06*D*D*D*(H*X/Q-P*Y/R)
370 F=.0048532*D*D*P-3.69428E-04*D*D*Y
380 W=A+B+C+K+E+F
390 LOCATE 21,14
400 PRINT "Weight (CT) =" ;W
410 LOCATE 41,20
420 INPUT "Next Yes=Y or No=N";N$
430 IF N$="N" THEN END
440 IF N$="Y" GOTO *LOOP
    
```

計算式での数値の取り扱いについて

計算によって得られる値をA、その値の中で真値をa、誤差をbとします。

$$A = a + b$$

この計算を足し算でn回繰り返すとします。 $n \times A = n \times a + n \times b$

即ち、誤差(b)がn倍増えることとなります。なお、計算を単純にするために、同じ計算を繰り返した場合を想定しています。このことは、例えば10回足し算を行う計算式を使う場合に、得られる結果に誤差が影響しないようにするためには、一桁精度を上げれば十分よいことを示しています。ところが、掛け算となるとかなり事情が異なります。足し算と同様に、計算を分かり易くするため、同じ計算を繰り返しn回行うことにします。

$$A^n = (a + b)^n$$

これは、二項定理で展開されます。

例えば $a = 1.00$ 、 $b = 0.01$ 、 $n = 10$ 、とすると、

$$(1.00 + 0.01)^{10} \approx 1.00 + 10 \times 0.01 = 1.10$$

これは、1.00mmに0.01mm程度の誤差を含む式の掛け算を10回繰り返した場合には、その真値が1.10mmとなってしまっていることを示しています。そこで、もう少し測定精度を上げて、0.001mm程度までの誤差(b)にして計算をやり直してみると、1.01mmとなります。誤差が少なくなってきました。実用上では問題ないかも知れませんが、さらに測定精度を0.0001mmで計算すると1.001となります。これなら1.00mmと比べて見ると明らかのように、誤差については全く問題がないでしょう。

以上のことから、10回の掛け算を含む式を使って、有効数字3桁の精度を得るためには、それより2桁多い5桁の精度で測定する必要があることを示しています。

最近では電卓で簡単に計算ができますが、やみくもに数字を増やして有効数字を上げれば、それだけよい結果が得られるわけではないことが分かるでしょう。無意味な計算もあるので、計算するときには気を付けることが必要です。

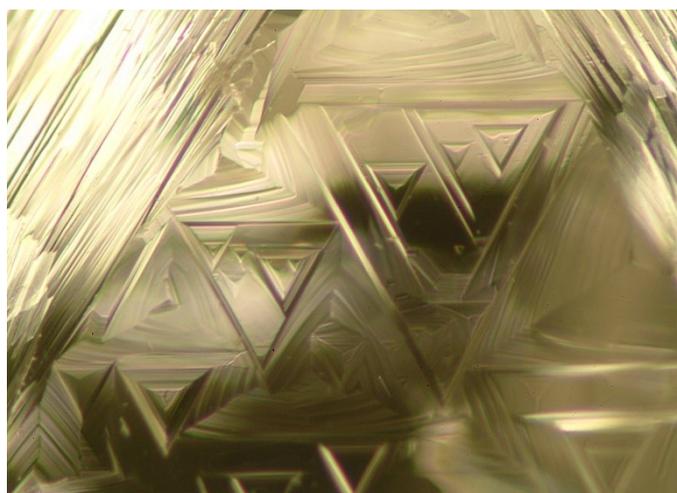


図 15-1-14 天然ダイヤモンド表面に見られる三角形の模様（トライゴン）

クラリティ（透明度）の評価

クラリティの評価は、10倍のルーペ（虫めがね）で観察し、含まれている包有物（内包物）の大きさ、位置、種類などにより、F、IF、VVS₁、VVS₂、VS₁、VS₂、SI₁、SI₂、I(P)₁、I(P)₂、I(P)₃という11段階に評価されます。

包有物（内包物）は欠陥とも呼び、実務的にはルーペより、暗視野照明付の実体顕微鏡を使用しての観察（評価）が行われています。この評価は熟練者（経験者）によって行われるとされています。

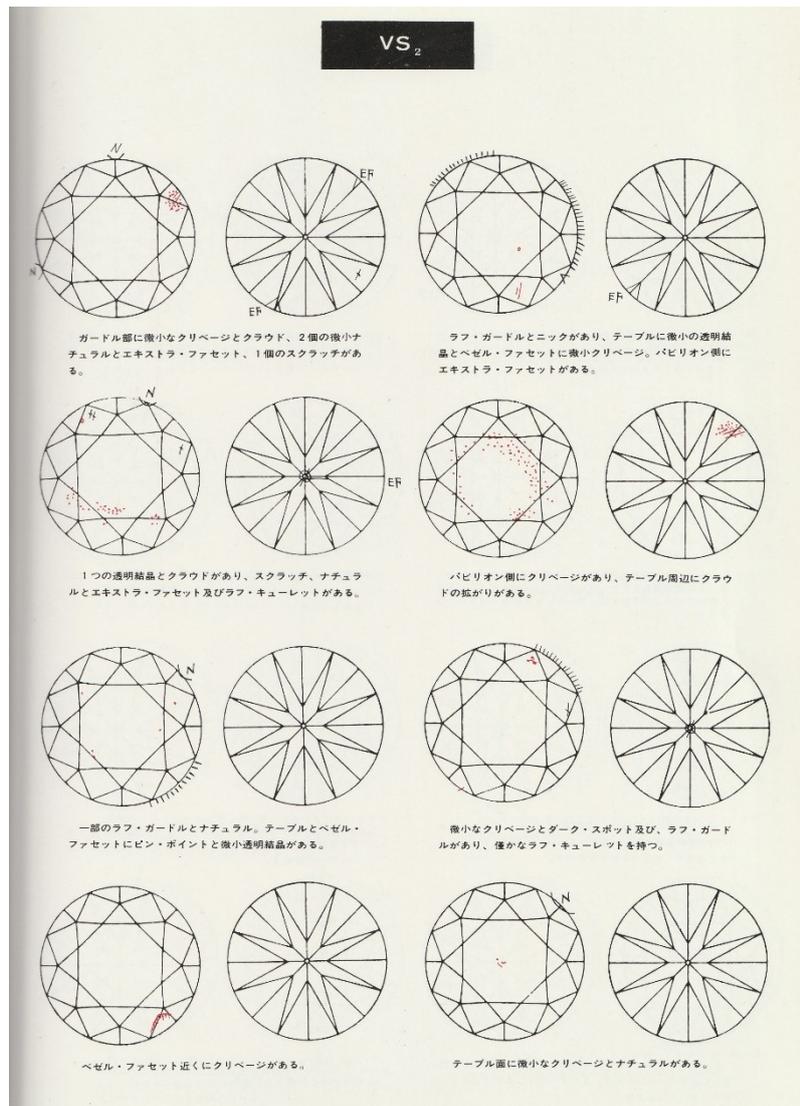
5 μm より小さい欠陥は無いものとするのが一般的です。例えば、VVS₁は12 μm、VVS₂は25 μm、VS₁は40 μm、VS₂は70 μm、SI₁は150 μm、SI₂は150 μm、I(P)₁は0.5mm、I(P)₂は1.5mm、I(P)₃は3mm以上という、具体的な大きさを明記するという方法もあります。ただし、大きさだけでなく位置も当然ながら考慮する必要があります。

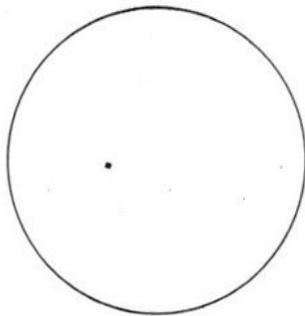
教育用のテキスト「ダイヤモンド」（並木正男、1978）などをデータ化して用いる方法もあるでしょう。下図は、ダイヤモンドに含まれたインクルージョン（内包物）や表面のキズを図示した例であり、このようなデータをデジタル化することにより、これら蓄積した

データから、図示したものを自動的に評価するようなシステムの構築も可能でしょう。

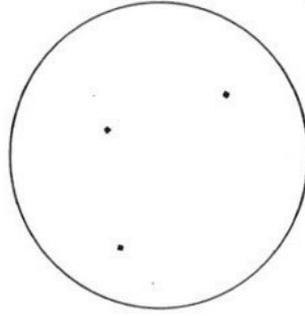
また、次頁のようにカラー・インデックス（色指数：円中の黒色の割合）のパーセンテージ（%）により評価するという方法もあるでしょう。この色指数は0.05%～20%のものを用いています（片田正人・田中憲一、1966）。それぞれをC3～C11という記号で表わした。

いずれにせよ、今後はクラリティの評価について、ルーペや顕微鏡を使用する観察とのクロス・チェック用として、科学的な手法の研究が望まれるでしょう。

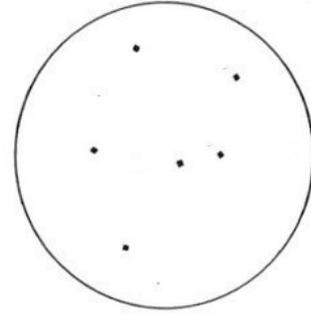




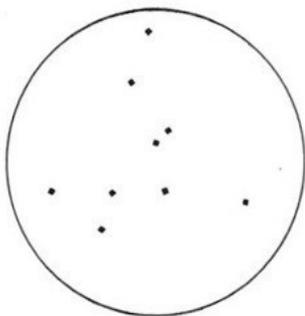
0.05%
C 3



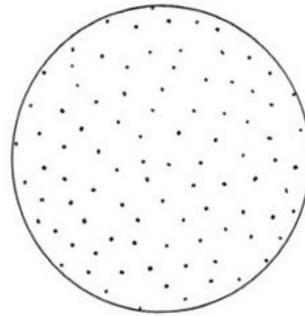
0.1 %
C 4



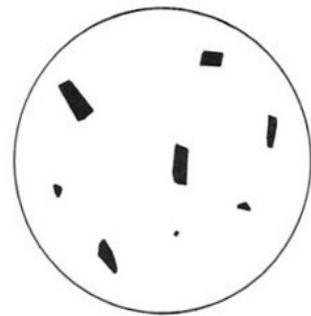
0.2%
C 5



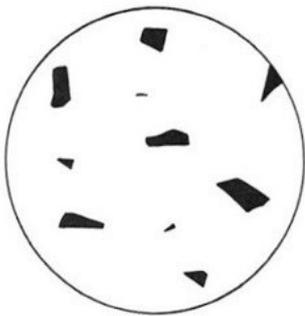
0.33%
C 6



1%
C 7



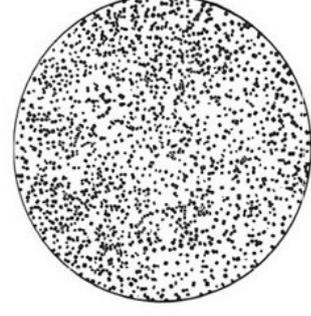
3%
C 8



5%
C 9



10%
C 10



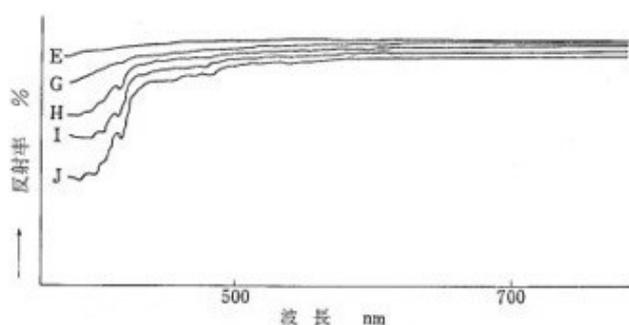
20%
C 11

カラー（色）の評価

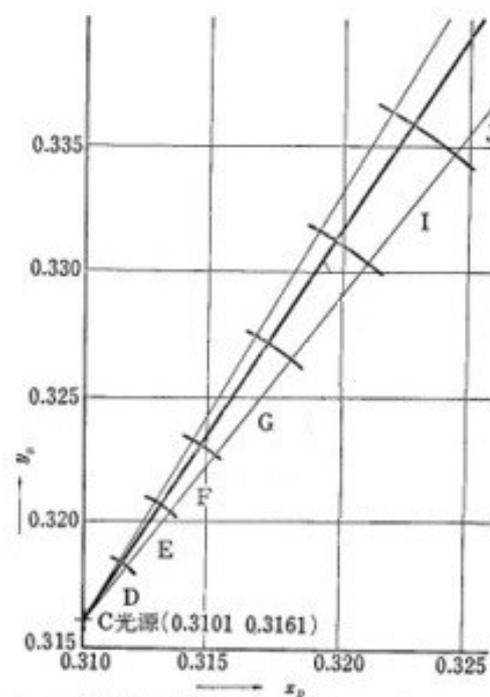
一般にカラーの評価は、無色から黄色までを、アルファベットのDからZという文字を使用して行われています。具体的には、マスター・ストーンあるいはキー・ストーンと呼ばれる基準のダイヤモンドとの比較で行われます。

このような方法は、合理性や信頼性に欠陥があるという指摘し、分光器の計測データから、ダイヤモンドの色の評価を試みた報告があります（並木ら,1980）。これを応用した“カラー・メーター”という装置が作られたこともありました。

この分光学的な評価とは、ダイヤモンドの可視領域の透過率の高さの違いにより行う方法（下図の左）や、計測して得られた刺激値（ x_0 と y_0 ）を用いる方法が紹介されています（下図の右）。



ダイヤモンドの分光パターン



計測した刺激値（ x_0 と y_0 ）を図示

現在では、ダイヤモンドの分光特性を利用したカラーの評価は行われていないが、目視による評価とのクロス・チェックとして普及することが望まれる。

6. 宝石としてのダイヤモンドの流通について

ダイヤモンドは、ふるくから王侯・貴族の持ち物として身につけられていましたが、その量は極めて少量でした。主な産出量はインドでしたが、1866年に南アフリカのオレンジ河流域でダイヤモンドを発見されてからは、一気に産出量が増加しました。現在ではカナダや中国（図15-1-15）などでも産出しています。

組織的な採掘、流通機構が確立されるまでは、個々の生産者が、研磨・加工と流通の中心地であったベルギーのアントワープで、それぞれが個人的に取引していました。当時は、価格が自由に設定されていましたが、非常に不安定な市場であったと言えます。そこで、価格の安定化をはかるため、1930年代に、南アフリカのダイヤモンド鉱山をほぼ手中に収めていたデビアス社は、他の産地のダイヤモンドを買い占めるようになり、世界のダイヤモンド生産量の80%をコントロールするようになりました。

デビアス社は、その独特な販売方法によって、価格の安定化も図ります。特に、宝飾用ダイヤモンド原石は、デビアス社の中央販売機構（CSO）を通じて、ベルギー、イスラエル、アメリカ、インド、日本などの研磨業者に販売してきました。CSOでは、世界中の産地から採掘したダイヤモンドを、イギリスのロンドンに送られ、約5,000種以上に分類されてから、CSOが定めた価格で販売します。現在では、ダイヤモンドの販売は、CSOからDTC（ダイヤモンド・トレーディング・カンパニー）によって行われています。

ダイヤモンドは、南アフリカ以外に、ロシア、オーストラリア、カナダ、中国などで産出しており、それぞれの国からも独自に販売しています。そのため、ダイヤモンドの流通も変化しています（図15-1-16）。

かつて、わが国で「ダイヤモンドは永遠の輝き」・「ダイヤモンドの婚約指輪は給与の3倍」というキャッチフレーズをつくり、年間数億円もの広告費を使ってTVコマーシャルを流したのもデビアス社でしたが、現在では、そのようなPRは見られません。それだけ、ダイヤモンドが広く流通しているのでしょうか。

また、アフリカの紛争地域からのダイヤモンドが、反対勢力の資金源になっているという指摘が国連でもなされ、紛争地域からのダイヤモンド原石ではないという証明書が取引の時に必要となっています。このような取り組みを「キンバリー・プロセス」と呼んでいます。

ダイヤモンドは、“地下からの手紙”としての研究対象以外に、最も硬い物質として研磨



材として使用され、また熱伝導率が高いので熱を逃がすための部品にも使われていますが、そのような工業用途以外にも、その評価方法も確立され、世界中に広く流通している宝石です。

近年では、中国やインド・アメリカなどで合成ダイヤモンドが製造され流通しているが、天然ダイヤモンドと混ぜられて販売されることがないことが望まれる。

図15-1-15 ダイヤモンド鉱山（中国）

ダイヤモンドの流通経路

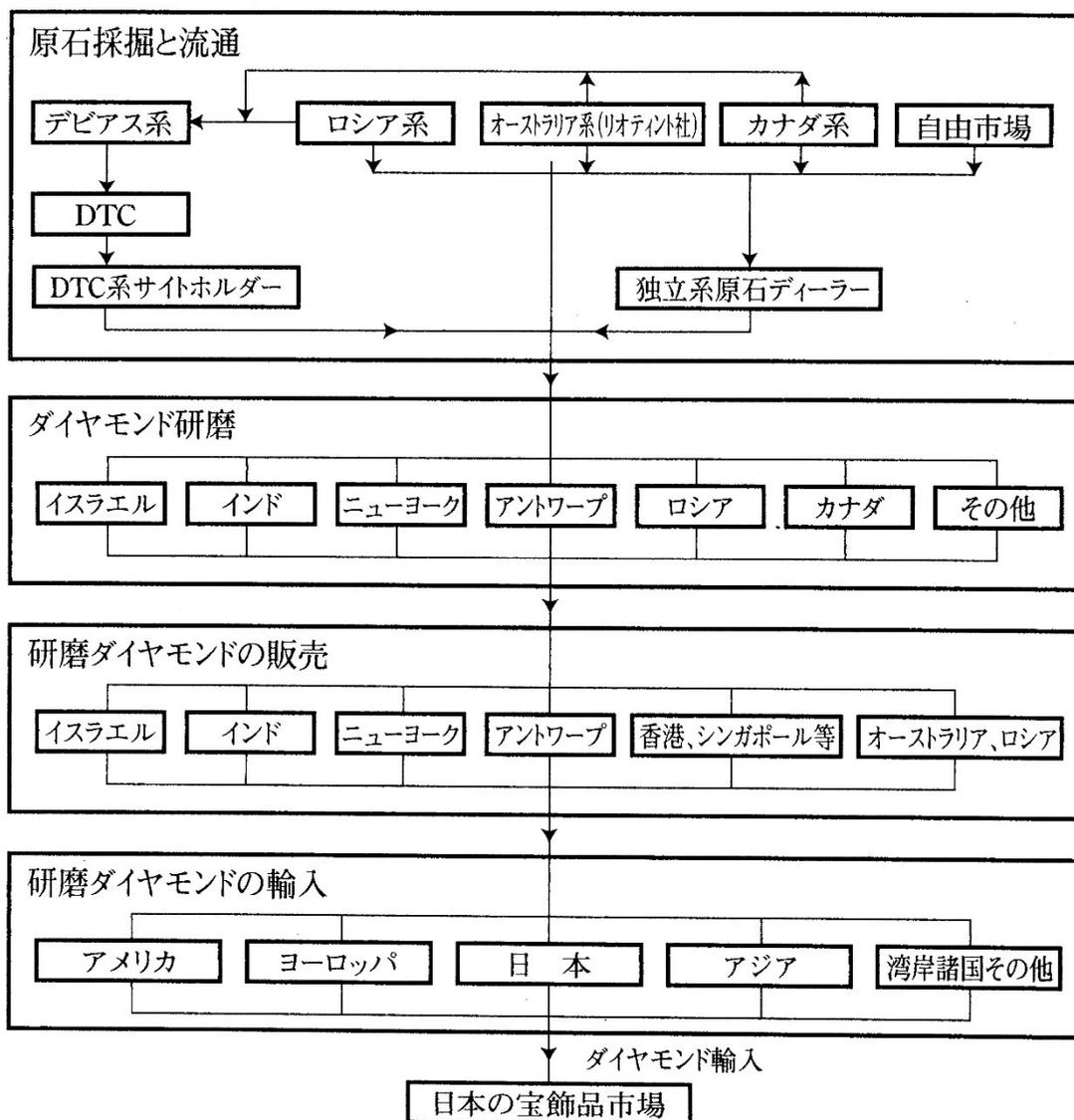


図 15-1-16

宝石ガイドブック（中央宝石研究所、2006）

トピック（1） 宝石としてのダイヤモンド

かつては、硬いもの（鋳物）というだけで、宝石としての価値は、今ほど高くはありませんでした。15世紀に加工（研磨）技術が確立され、19世紀後半に南アフリカでダイヤモンドが発見されたことにより、今日のような有名宝石の一つになります。わが国では、昭和40年代以降、“ダイヤモンドは永遠の輝き”というCMで人気となり、現在でも流通量の最も多い宝石となっています。

近年では人工的に造られた合成ダイヤモンドが、天然ダイヤモンドより安価で販売されています。今後は流通量がますます増えることでしょう。

わが国で製造された初期の頃の合成ダイヤモンド

合成ダイヤモンドは、米国の General Electric (G.E.) 社が公表する前にスウェーデンの Allmana Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) 社が、1953 年に初めて製造に成功しました。G.E.社が、1955 年に合成ダイヤモンドの製造方法を発表して話題になりましたが、その僅か数年後の 1961 年5月3日には、わが国の石塚博らが合成に成功しています。そして、1962 年5月に東京芝浦電気株式会社 中央研究所 (現東芝研究開発センター) でも合成に成功し、新聞紙上で公表されました。その結晶は、Ni 系触媒を使用した、20~30 μm の微小粒子であり、{111}や{100}が優勢な形態でした。

その後、GE 社が特許権を握っていた元素を一切含まない触媒である銅(Cu)を用いて製造したもので、{100}が著しく優勢で無色透明に近いものがあったという (若槻雅男氏の私信)。これが図 15-1-17 (左) と見られ、そのX線回折図からは銅(Cu)や SiC(炭化珪素)などが検出されている。そのカソードルミネッセンス (CL) 像は図 15-1-18 のとおり。

無機材研 (当時) や住友電工でも単結晶が造られ、現在では前述のように中国やインド、アメリカなどで合成ダイヤモンドが製造され、指輪などの製品として加工され販売されています。

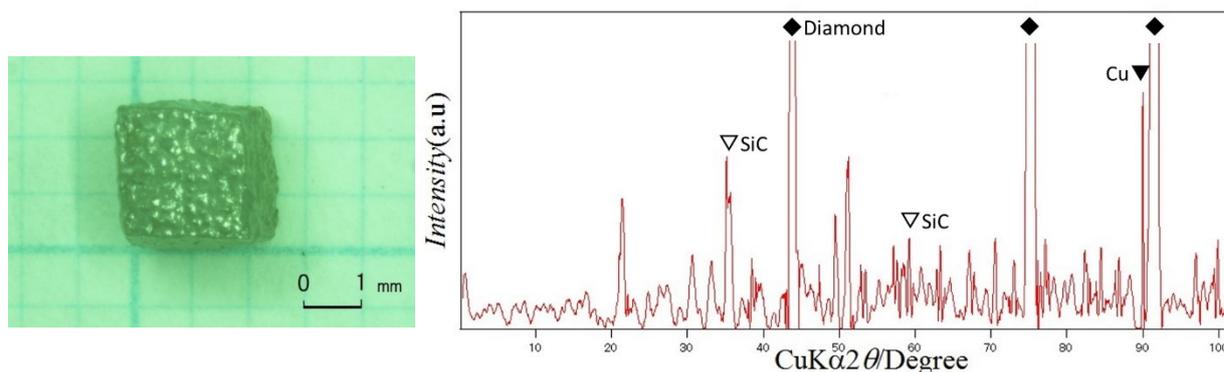


図 15-1-17 東芝製と見られる合成ダイヤモンド (左) と X 線回折図 (右)

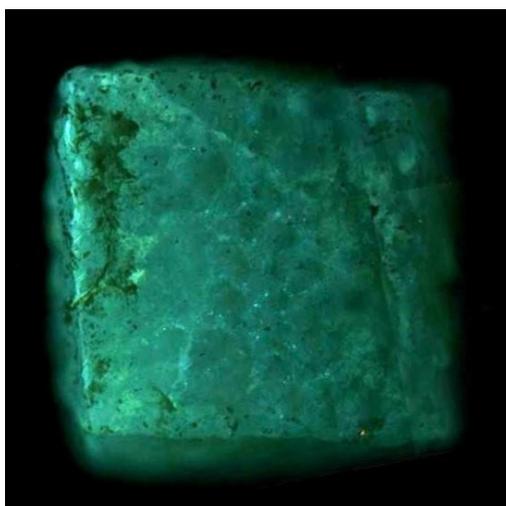


図 15-1-18 カソードルミネッセンス (CL) 像

わが国で流通している合成ダイヤモンド

2019年4月に甲府で開催された宝石関連の展示会中に図15-1-19の左側は1,000円(0.10ct)、右側は2,000円(0.08ct)で販売されていました。その後、2020年の東京(池袋)でのミネラルショーでも左側の黄色ダイヤモンドは、ほぼ同額で売られていました。その時、薄黄色ダイヤモンドには、CDV(化学的気相成長)法で造られたものというラベルがありましたが、内部をよく観察すると金属インクルージョンが見られ、しかも磁石に吸い付くことから明らかにHPHT(高温高圧)法の合成ダイヤモンドです。

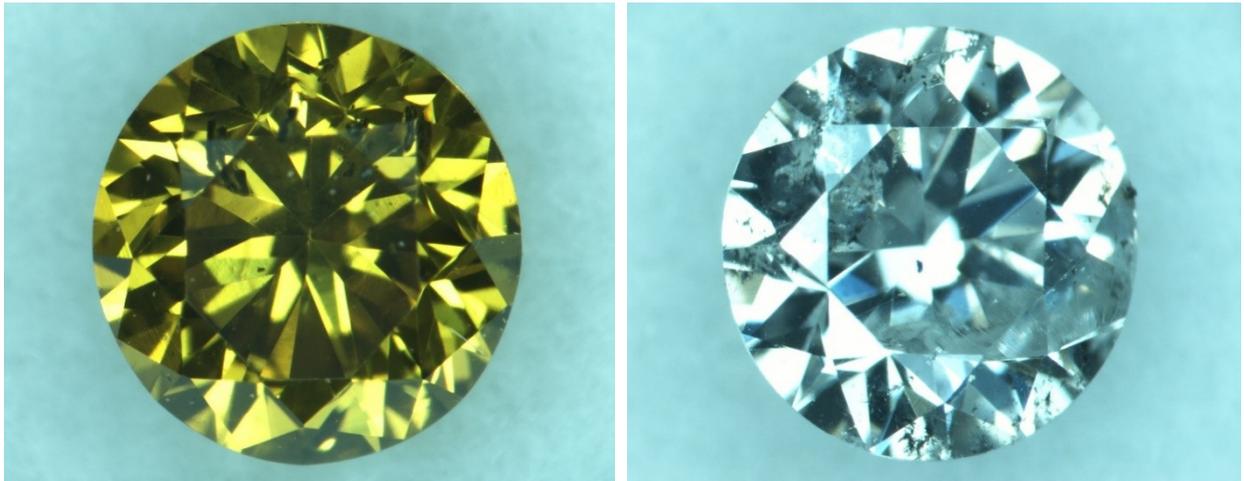


図15-1-19 合成ダイヤモンド(HPHT法によるもの(左)とCVD法によるもの(右))

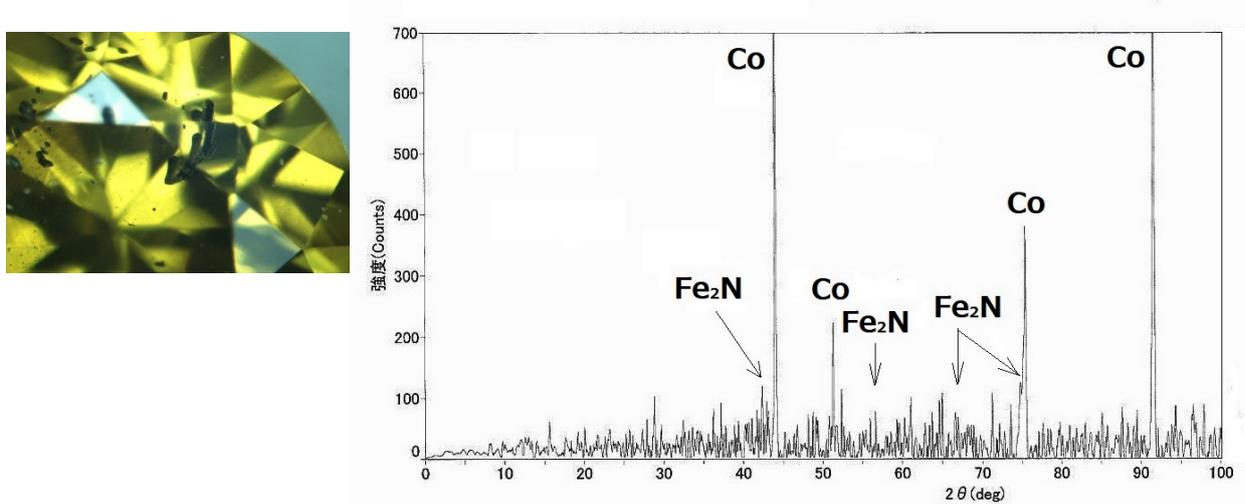


図15-1-20 HPHT法による合成ダイヤモンド(左)に含まれる金属のX線回折パターン(右)

黄色合成ダイヤモンド表面に見られる金属の一部について、微小領域X線回折実験を行ってみると、金属コバルト(Co)や Fe_2N と一致しました(図15-1-20)。他にも回折線が見られますが、これはアウルワ鉱(Awaruite $\text{Ni}_3\text{Fe}-\text{Ni}_3\text{Fe}$ 立方)などの可能性があります。窒素(N)と鉄(Fe)の化合物については、天然では、Roaldite $(\text{Fe,Ni})_4\text{N}$ 立方晶系とSiderozot FeN_x ($x=0.25\sim 0.5$) 六方晶系などが知られていますが、これらが含まれてい

るかどうかは、更に詳細な分析が必要です。

次の無色の合成ダイヤモンド（F/Iクラス）にも黒色インクルージョンが見られ（図 15-1-21）、石墨と思われましたが、今回の微小領域X線回折装置では確認できませんでした。

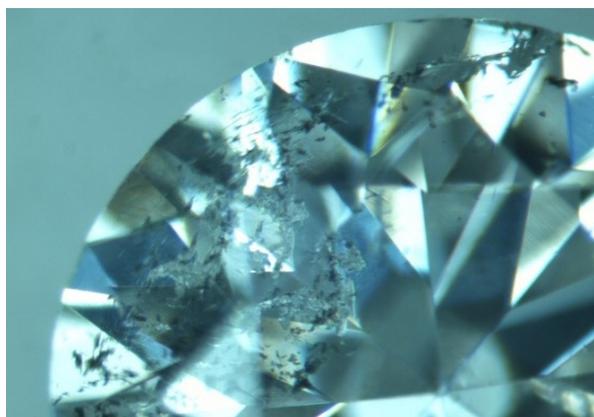


図 15-1-21 CVD法による合成ダイヤモンドに見られる黒色インクルージョン

このような外観で、インクルージョンが少なくなってくると、天然ダイヤモンドとの違いが、通常の光学顕微鏡下では困難になってきます。

2021年には、インクルージョンが少ない（VS₁クラス）もので、婚約指輪等に使用される大きさ（0.49ct）で、僅かに青色を帯びた合成ダイヤモンドが3万円程度で販売されています（図 15-1-22）。

今後は、天然か合成かが直ちに分かる目印（マーカー）などが必要になるかも知れません。

鑑定書（グレーディング・レポート）が付いて販売されている合成ダイヤモンドにはそのガードル部に番号等が刻印されています。



図 15-1-22 CVD法による合成ダイヤモンド（0.49ct/V_{S1}クラス/僅かに青色）の外観（左：正面，右：パビリオン側）

わが国で最も規模が大きい国際宝飾展（IJT）では、これまでも合成ダイヤモンドが数社から販売されていたが、2023年にその一社から原石を購入したもの（中国製）を紹介します（図 15-1-23）。

国内の合成ダイヤモンド販売店一覧

• Brilliant Earth

Beth Gerstein と Eric Grossberg によって 2005 年に創業。
天然も取り扱う。米国内7店舗。

商品例：ダイヤモンド 0.41ct I VVS2 Very Good 300ドル
備考：Lab Created Diamonds と紹介。

• Lightbox jewelry

De Beers 社グループ Element Six で製造し、2020 年までには年間50万カラット供給。

カラーダイヤモンド（ピンクとブルー）も製造・販売している。
1カラット当たり800ドルで販売。

• Pure Diamond

米国サンフランシスコ。わが国の数社に卸している。プロモーションビデオには CVD が紹介。

カラーダイヤモンド（ピンク、黄色及びブルー等）も製造。

• Unique Lab Grown Diamonds

米国ニューヨークとインド・スーラットに拠点。天然も取り扱う。

合成（Lab Grown Diamond）は、天然（Earth Mined Diamond）より30～35%安い

• WD Lab Grown Diamonds

米国ワシントン DC に本拠地を置く。Clive Hill によって 2008 年に創業。

以上の他に20社以上もネットで紹介されている。

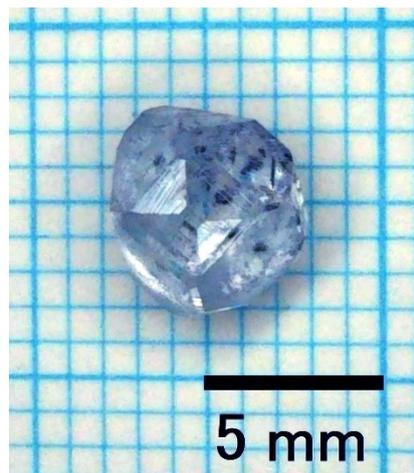


図 15-1-23 高温高压（HPHT）法による合成ダイヤモンド（1.18ct）

宝石質ダイヤモンドの製造あるいは販売会社一覧

- Apsilon Enterprise：トルコ、イスタンブール。Me Diamondとして販売。0.5-1.5ct
- ALTR Created Diamonds：米国ニューヨーク、RA RIAM Group。4.5ct以上も製造。
- Ada Diamonds：米国。1ct/D-E/VVS2以上は\$5,500～\$10,000。1ct/H/SI,\$3,150～\$3,650
- Advanced Optical Technologies Corporation (AOTC) sold via D.NEA：米国ミシガン州。VS₁~SI₁/F-H/0.25ct \$275 - \$440, 1.00ct \$4,400~\$7,600.
- Amiable Diamonds：2014年創立。インド・スーラット,VVS~SI/D~H.CVDで製造。天然ダイヤモンドの40%で販売。1時間100μmの成長。
- Apollo Diamond：1990年に創立。2011年、Scio Diamond Technology社に譲渡,米国。CVD。
- Carat Systems：1998年創立。米国ボストン。工業用製品も販売。Apsilon Enterpriseに供給(?), CVDで製造。HPHT処理でGカラーに。
- Chatham Created Gems & Diamonds：HPHTとCVDで製造。1~1.25ctのブライダル用指輪で\$2,000~3,000。品質は不明。
- De Beers (through a subsidiary called Element Six)：Lightbox Jewelryとして販売。34.8 ct(type Ib, yellow)を製造。
- Diamond Foundry：2012年創立。米国サンフランシスコ。国内の会社に販売。大粒有4.12ct/G/VS₁/\$53,354。(国内で天然は600~800万円で購入)
- Ila Technologies：2005年創立。シンガポール。CVD。具体的な商品紹介なし。
- Krystal Grown Diamonds：2001年創立。インド、スラト。CVDとHPHT。
- LifeGem (memorial diamonds)：遺骨・髪の毛から造る。灰として200g必要。無色0.10~0.19ct/\$2,999, 0.91~0.99ct/\$19,999。カラーダイヤモンド有。
- Lucent Diamonds：米国ロスアンゼルス。Ia型天然ダイヤモンドにHPHT処理・放射線及び低温熱処理でピンク~紫色から赤色~オレンジ褐色に変える。
- New Diamond Technology：2014年創立。ロシア、サンクトペテルブルク。2016年、5.03ctのエメラルドカットのブルーダイヤモンドをHPHTで製造。1.0~10.0ct/D-H and Fancy Blue/IF-SI。価格は未公開。
- Pious Eco Diamonds：インド、ムンバイ。パートナーを探している。
- Pure Grown Diamonds (formerly Gemesis)：米国サンフランシスコ。CVD。カラーダイヤモンド（ピンク、黄色及びブルー等）も製造。ガードルに刻印。
- Scio Diamond Technology Corporation (colorless)：Apollo Diamondの技術で製造。CVD。1.15 ct/D/VS₁/\$6,250などWeb上で紹介。ガードルに刻印。
- Valour Grown Diamonds：製品を販売。D-F/VS。天然より30%-50%安い。
- WD Lab Grown Diamonds：2008年創立。米国ワシントンDC。カーネギー研究所からライセンスを得て製造。CVD。ガードルに刻印。9.04ct/I/VS2製造。
- The Better Diamond：シンガポール。0.55ct/F/VS₁/\$1,371(天然ダイヤモンド:\$2,715), 2.0ct/F/VS₁/\$22,000(天然ダイヤモンド:\$34,668)等Web上で紹介。
- Fine grown Diamonds：インド、スラト。CVD。メレーサイズ(0.01ctで\$150など)からある。0.5ct/D-E-F/VVS-VS/\$570など国内でも販売。
- Eco Star Diamond：米国ワシントンDC, 1ct/H/I/\$1,600, 2.01 ct/H/VS₂/\$10,050等。KRAZY Philosophy: Kindness, Respect, Action, Zero-Hassles and a "Yes I Can!"

(List of synthetic diamond manufacturers, Wikipedia, 2019.5.24.調)

(2) クリソベリル

クリソベリルという鉱物（化学組成 BeAl_2O_4 ，直方晶系）には、アレキサンドライトやキャッツアイという宝石があります。

アレキサンドライトは1830年代に発見された宝石です。したがって、宝石の中では最も新しく仲間入りした宝石と呼べるでしょう。このアレキサンドライトとは、あてる光の種類を変えることによって、その外観が緑色や赤色に変化して見える性質をもった宝石です。アレキ効果とも呼ばれるもので、これは一般に宝石に含まれる僅かな量のクロム（Cr）が、0.5%程度含まれると明瞭に変化します。主な産地は、ロシア、スリランカ、ミャンマー、ブラジル、ジンバブエ（ローデシア）、ザンビアなどです。

このアレキサンドライトとは、発見された場所がロシアのウラル山中で、当時即位する予定のロシア皇帝アレキサンダーⅡ世に因んで命名されましたが、その正体はクリソベリル（和名は金緑石）という鉱物名でした。その原石の形は、六方向に中心から伸びた”交差三連双晶”と呼ばれるもので特徴ある形態をとることがあります。この双晶とは、ある面、点あるいは線を境目として二つ以上の結晶が結晶学的に接合しているものです。言い換えれば、二つの結晶が隙間無く接合しています。ただし、水晶がたくさん集まっているものが、御土産屋や鉱物標本店で販売していますが、これらは単に集合しているだけなので、一般には群晶と呼び区別しています。

また”クリソベリル・キャッツアイ”のことを業者間で、単に”キャッツアイ”と呼んでいます。この宝石は山形（カボション）に研磨（カット）され、その山の中央に猫の目（キャッツアイ）のような光の筋が見える宝石です。しかし、クリソベリル以外にもエメラルドやトルマリリン、トパーズなどのように、他の宝石でもこの猫の目（キャッツアイ）が見られるものがあります（P21・22参照）。そこで、それらは、エメラルド・キャッツアイ、トルマリリン・キャッツアイ、トパーズ・キャッツアイなどと呼び区別します。最も有名なのはアレキサンドライト・キャッツアイです。

トピック (2) 宝石としてのクリソベリル

1830年頃、ウラル山中で発見されたクリソベリルは、日中の太陽光線下で見ると緑色でした。ところが、夜になり、ろうソクや暖炉の光で見ると、同じものが赤く見えたということで、見つけた人は驚いたそうです。このように、照明の光の種類によって、色調が変化して見える宝石は、他の宝石（鉱物）にも見られます。変色効果あるいはアレキ効果などと呼ばれ、サファイア、ガーネット、トルマリリン、フェルドスパーなどの宝石（鉱物）です。

合成アレキサンドライトと合成ルビー

2009年に入手したチャザム社製合成アレキサンドライト（クリソベリル）は小さな結晶の集まりである群晶で、その表面には銀白色柱状金属光沢のプラチナと透明無色ガラス光沢のフェナカイトが付着していました（図15-2-1,2,3,4,5）。

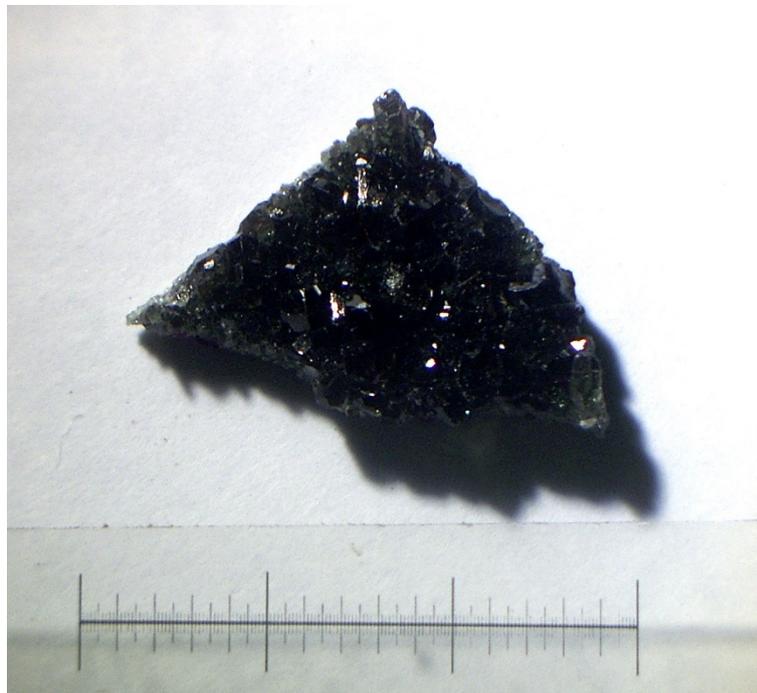


図15-2-1 チャザム製合成アレキサンドライトの群晶

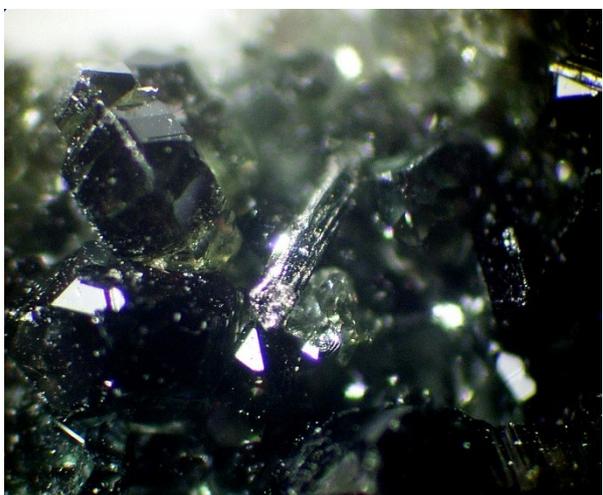


図15-2-2 銀白色柱状金属光沢のプラチナ（中央）

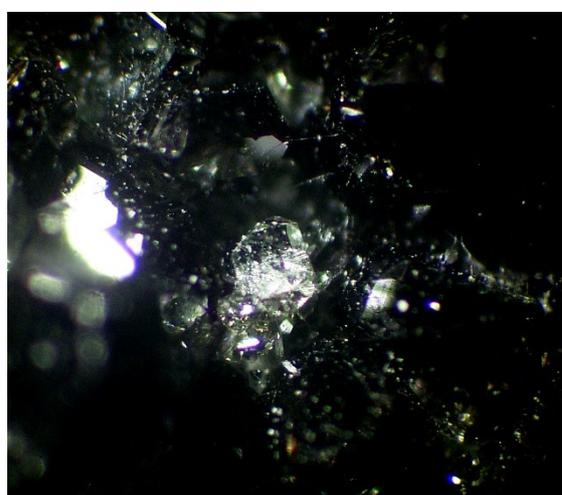


図15-2-3 無色透明ガラス光沢のフェナカイト（中央）

アレキサンドライトは、変色効果を持つクリソベリルで、ベリルより生成温度が高いことが分かっています。また、酸性溶液中（pH～4から5）では、ベリルの代わりに今回見られたフェナカイトやベルトランダイト、ユークレース等が生成するとされています（Cerny,1970）。さらにプラチナが見られることから、その生成温度は、プラチナの融点で

ある 1768℃まで上昇したと見られます。そして、そのような高温下でフェナカイトも生成したと見られます。京都セラミック社の特許では、温度が上昇するにしたがい、ベリル→フェナカイト→クリソベリルという順に生成されるとしている（特開昭 51-94499）。

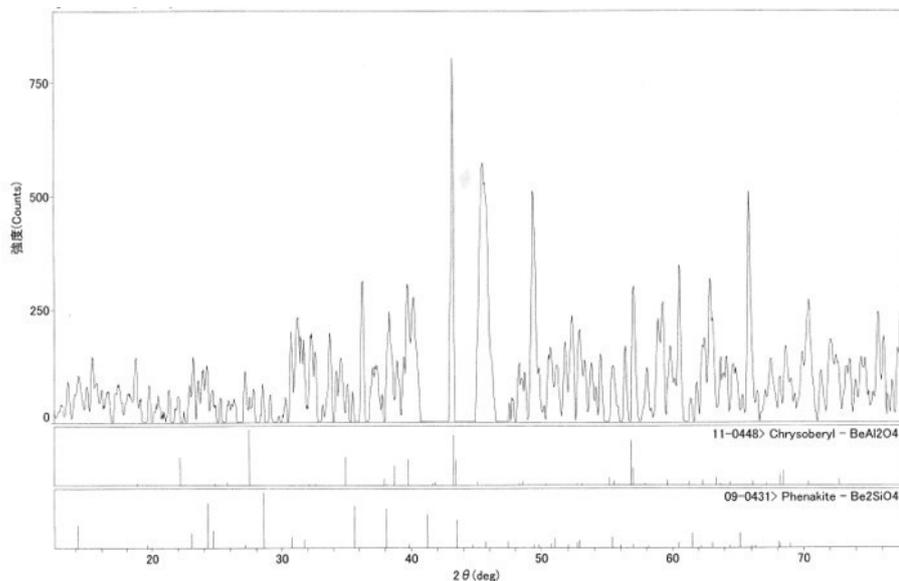


図 15-2-4 微小領域 X 線回折結果からクリソベリルとフェナカイトを同定



図 15-2-5 チャザム製合成アレキサンドライトの群晶の裏面

この結晶の裏面を見ると赤色ガラス光沢の部分が見られ、合成ルビーも生成していることも分かりました。即ち、温度を上げてしまうと合成クリソベリルではなく合成ルビーが生成してしまうことになります。

(3) コランダム

鉱物名では、コランダム（Corundum：鋼玉，こうぎよく，化学組成 Al_2O_3 ，三方晶系）と呼びますが，宝石名では，赤い色調のものをルビー（Ruby），それ以外の色調のものをサファイア（Sapphire）と呼び，区別しています。

ルビーという名は，ラテン語の rubeus（英語の赤色を意味する red と同じ語源です）が Ruby の語源とされています。その色から名付けられました。赤い宝石と言えば文句なくルビーを連想する人がほとんどでしょう。

サファイアという名は，古代語のひとつであるヘブライ語の sappir，あるいはサンスクリット語の sanipruja に関係していると考えられます。一般的に青い宝石と言えばサファイア（ブルー・サファイア）が代表例ですが，以前は青色鉱物のラズライトにも使われていました。また，ピンクとオレンジ色が混ざった色調で，蓮の花を意味するサンスクリット語のパパラチャ（Padparacha）から，パパラチャ・サファイアとして呼ばれるものがあります。

このように，ルビー，ブルー・サファイア，パパラチャ・サファイア以外にも，ゴールドテン・サファイアとかピンク・サファイアなどのような呼び名があります。

ルビーには，数%のクロム（Cr）が入り，ブルー・サファイアには，鉄（Fe）とチタン（Ti）が含まれています。

ルビーは，ピジョン・ブラッド（鳩の血）の色が最高と言われています。7月の誕生石に使われ，邪念を取り去る激しい情熱が秘められているとされ，争いを和解させる力を持つと言われています。

サファイア（Sapphire）は，コーンフラワー（矢車草）の花（図 15-3-1）の色のような，瑩色がかかった青色が最高とされています。9月の誕生石に使われ，不貞に対するお守りで，神の恵みが得られると言われています。



図 15-3-1 矢車草の花

これらコランダムで，最も古い産地は，マルコ・ポーロ（1245-1323）の「東方見聞録」に書かれています。おそらくミャンマー付近と思われます。

主な産地は次のとおりです。

産出国（地域）	産状，発見時期。
ミャンマー	漂砂鉱床中あるいは石灰岩の中に見られるものもある。1780年以前に発見。
タイ	漂砂鉱床，玄武岩に見られる。
インド（カシミール地方）	漂砂鉱床，1881年以降に発見された。
スリランカ	漂砂鉱床，イラム層と呼ばれる地下数mに存在するところから採掘。
オーストラリア	漂砂鉱床，1946年以降。
アフリカ諸国	漂砂鉱床，1953年以降。



図 15-3-2 天然ルビーと天然サファイア

加熱処理（内部拡散・外部拡散）

近年になって、加熱によって色調を変えたり、凹部にガラスを充填させたり、あるいは放射線によって、ピンク・サファイアにオレンジ色を帯びさせて”パパラチャ・サファイア”をつくりだすことも行われていますが、恒久性のないものは問題です。例えば、放射線によってつくりだした”パパラチャ・サファイア”の色は不安定で、光や熱によってすぐに元の色に戻ってしまいます。また、ガラス充填も恒久性はなく問題があります。

一般に加熱処理は恒久性があると言われておりますが、また、ドーピング処理あるいは外部拡散処理と呼ばれるものは、表面的だけの色調が変化しているので、再研磨などで色が元に戻ってしまいます恐れがあります。

コランダムが溶解する温度は、2,050 度ですが、それより僅かに低い温度である 1,600 度以上の高温で数十時間加熱し続けると、サファイアの色調が変化するものがあります。このような処理を内部拡散と呼びます。いわゆる加熱処理です。

また、ドーピング処理あるいは外部拡散処理と呼ばれるものは、液体の中に浸して観察すると、宝石表面のレリーフが浮き出て見えます。これは、宝石（ここではコランダム）に近似した液体であるジョードメタン（ヨウ化メチレン）の中に宝石を入れて観察するとよく分かります。

この処理については、加熱しながらコランダム表面に着色成分を浸透させるもので、アメリカのユニオン・カーバイド社から、その方法についての特許が出されています。この外部拡散は、表面しか着色されていないために、コランダムとほぼ同じ屈折率の液体に浸して観察すると、着色されているコランダム表面のレリーフが浮き出て見えることになるのです。通常のコランダムは、その成長方向に沿って着色されていますので、区別ができるわけです。

内部拡散は、単に加熱によって着色されるので、接触交代鉱床のようにマグマ（熔岩）の熱によって加熱されることと同様なので、人工的な加熱処理との区別ができないのではないか、という意見もありますが、加熱処理されたブルー・サファイアと未処理のブルー・サファイアに含まれる鉄（Fe）とチタン（Ti）の元素量比に違いがあることが、最近になってXRF（蛍光X線元素分析装置）による分析の結果、分かってきました。

更に、ルビーをXRFで調べてみると、タイ、ミャンマー、ベトナムなどの各産地と合成メーカーとの元素量比の違いがあることが分かります。それは、天然には鉄が必ず含まれているのにかかわらず、合成には鉄がほとんど入っていないということです。また、FT-IRによればタイ産のように水のほとんどない条件と思われる火成岩（玄武岩）起源のルビーと石灰岩中に見い出されるミャンマーとの違いや、熱水合成でつくられた合成ルビーとはより違いがはっきりします。

かつて熱処理の青色サファイアと未処理のサファイア（スリランカ産の灰色サファイアで、熱処理すると青色になるもの、GEUDA：ギウダと呼ばれる）の違いについて、XPSあるいはESCA（光電子分光分析）で検査すると、チタンの電子軌道の変化は認められませんでした。鉄の方は加熱によって変化していることが確認できました。しかも、鉄の電子が高いエネルギー状態へと移動することが分かりました。これは電荷の価数が増加することを示唆し、即ち鉄が2価から3価へと変化したとみなすことができます。その電荷移動によって生じたカラーセンターによって青色を呈するようになったと考えられます。チタンの方は鉄の電荷の変化によって生じた電荷の不釣り合いを補うだけなのかも知れません。

ガラス充填

前述の凹部にガラスを充填させたものは、落射照明だけで観察すると反射率が低くため暗く見えるので、すぐに判断できるでしょう。

これを取り除くために、フッ化水素（HF）などの酸によってガラスを溶かすことが行われています。このガラス充填の除去作業を行う場合は、換気に十分気をつけて下さい。

• もう一つのルビーとサファイア（スター・ルビーとスター・サファイア）

ルビーとサファイアにはそれぞれスター・ルビーとスター・サファイアと呼ばれる山形（カボション）に研磨された宝石があります。これは、インクルージョンとしてルチル（金紅石）という針状の結晶が三方向に綺麗に配列されていることによって現れるものです。それぞれのルチル（金紅石）が交差する角度は120度になります。

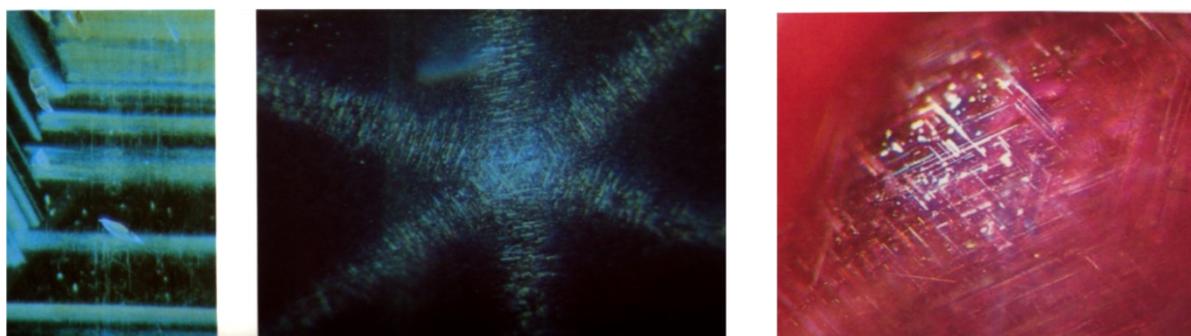


図15-3-3 天然サファイア（左端・中央）と天然ルビー（右端）（E.J.Gubeline and J.I.Koivula,1986）



図15-3-4 火炎溶融法で製造されたスター・ルビーとスター・サファイア



図15-3-5 火炎溶融法で製造されたルビー、サファイア（左）とフラックス法で製造されたカシャー製ルビー（右）



表 15-3-1 市場にある合成ルビーと合成サファイアについて(製造国・メーカー名は製造当時)

合 成 法	製造国	メーカー名	商 品 名
火炎溶融(ベルヌイ)法	日本	信光社	
		中住アース・クリスタ	サントメール
		電気化学工業	
		ルビカ工業	
		日本カーバイト	
		社会福祉法人札幌育成園	
	ドイツ	ヴィーデス・カーバイト・ベルケ	
	スイス	ジェバ社	
		サテム社	
	フランス	バイコースキー社	
		アルプス合成ルビー社	
	アメリカ	ユニオン・カーバイト社	リンデ
フラックス法	日本	日本電波工)	サラマンドール
	アメリカ	チャザム・クリエイトッド・ジェムス	チャザム
		カシャーン	カシャーン
		オーバーランド・ジェムス社	ラモラ
	フランス	ピエール・ギルソン	ギルソン
	スイス	ジェバ社	
	オーストリア	オッター・クニシカ	クニシカ
		レヒライトナー	
引き上げ法	日本	京都セラミック	クレサンベール
	アメリカ	ユニオン・カーバイト社	リンデ
		ベル・テレフォン・ラボラトリー	
浮遊帯域溶融法	日本	諏訪精工舎	ビジョレーブ

トピック (3) 宝石としてのコランダム

赤色のコランダムであるルビーの色は、鳩の血色(ピジョン・ブラッド)が最高と言われています。ルビーは、かつてミャンマーでは、人跡未踏の谷にあるとされ、採集する場合は、その谷へ生肉を投げ入れるという。ハゲタカが、その肉と一緒に付着したルビーを巣に持ち帰るので、その巣を探して、ルビーを採集するというものである。このような話は、マルコ・ポーロ(1245-1323)の東方見聞録にも紹介されています。

ルビーのカソードルミネッセンスについて

ルビーの特徴である赤色の発光について、電子線を照射させた時に発光する現象（カソードルミネッセンス：Cathodoluminescence）（以下CL）を機器により測定し、そのCLの波形から、ルビーに含まれる微量元素の濃度との関係について調べたことを報告します。

このCLの波形から不純物や欠陥のエネルギー準位、濃度、組成分析、歪み量などを調べることができるため、現在では物性評価や機能評価に広く用いられています。

天然ルビーは主成分である Al_2O_3 に微量の不純物 Cr_2O_3 が固溶することによりルビー特有の赤色の発色を呈します。しかし、色むらやインクルージョンの存在から均一とは言えないものも多くあります。そこで、天然ルビーと同じ構造を持ち、 Cr_2O_3 の含有率が異なった試料を作製し、それぞれの試料のCL測定をすることにより、 Cr_2O_3 含有率とCL波形の関係を調べました。

最初に試料を2つ用意しました。

試料（その1）： Al_2O_3 - Cr_2O_3 系固溶体づくり

AlCl_3 （関東科学，一級）と $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ （関東科学，特級）を蒸留水に溶解させ、100mlの水溶液にした。つぎに、攪拌子を用いて水溶液を攪拌させながらpH7になるまで1N- NH_4Cl 水溶液を滴下し、共沈物を得た（均質な共沈物を得るために、さらに12時間攪拌を続けた）。攪拌終了後、遠心分離器を用いて固液分離を行い、 120°C で24時間乾燥させた。その後、各共沈物試料を、めのう乳鉢で粉碎し、粒度を200メッシュ程度に調整したのち、ペレット状に成形をし、約 $1,200^\circ\text{C}$ で24時間電気炉（(株)三陽理化学機器製作所製、SYK-450MD）にて焼成を行った。

試料（その2）： Al_2O_3 - Cr_2O_3 - Fe_2O_3 系固溶体

AlCl_3 、 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ 、 FeCl_3 （国産化学，特級）を蒸留水に溶解させ、100mlの水溶液にした。作製の手順は Al_2O_3 - Cr_2O_3 系固溶体と同じである。

これらの試料について、X線回折（XRD）測定では、試料はすべて α - Al_2O_3 の単相であることが確認できた。さらに電子マイクロアナライザー（EDS測定）から、各試料に含まれる Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 の化学分析を行いました。

CLスペクトルでは677.5、697.5、701.2、717.0nm付近にシャープなCLが観察され、これらのピークは、 Cr_2O_3 の含有量が増加するにつれて、長波長側にシフトする傾向が見られた（図15-3-6）。

また、 Fe_2O_3 を含有した試料は、CL強度が極度に減少した。

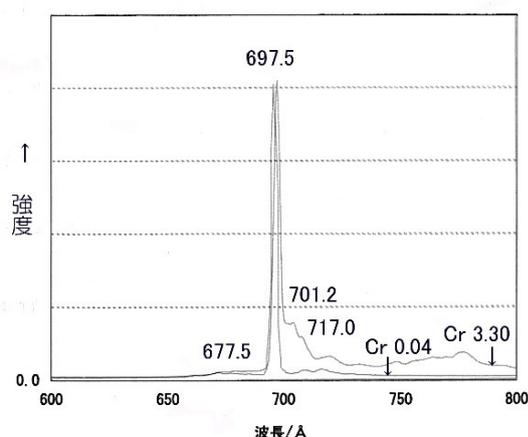


図 15-3-6 CLスペクトル

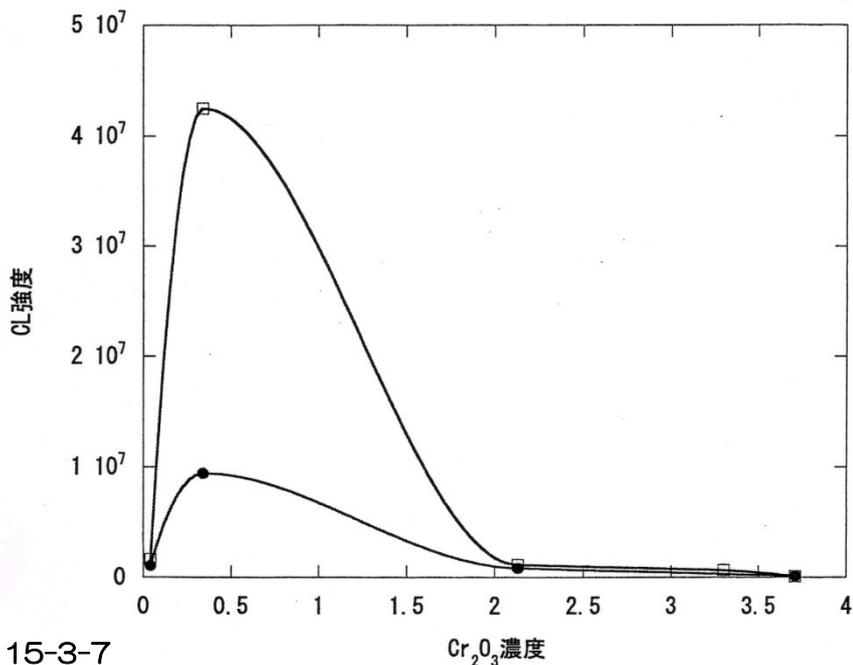


図 15-3-7

ピーク1番および4番における Cr_2O_3 の濃度とCL強度の関係

CLの強度は Cr_2O_3 の含有量が約0.4wt%の 때가最も高く、過剰の Cr_2O_3 は濃度消光が引き起こされ、CLの強度が低下することがわかった(図 15-3-7)。

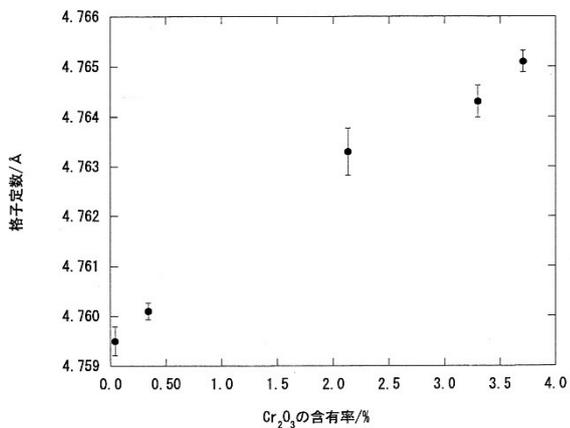
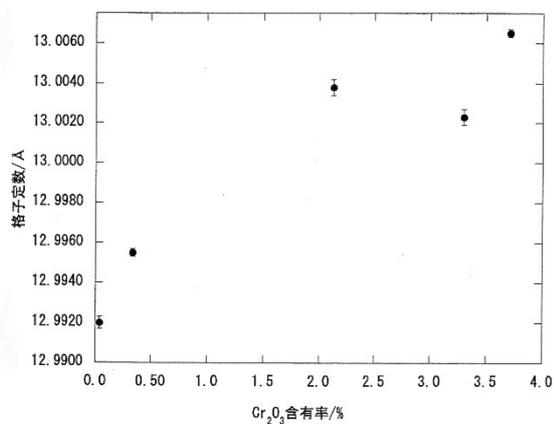


図 16-3-8 Cr_2O_3 の含有率と格子定数の関係(a軸)



Cr_2O_3 含有率と格子定数の関係(c軸)

Cr_2O_3 の含有量の増加により、格子定数(a,c)が大きくなること分かる(図 15-3-8)。

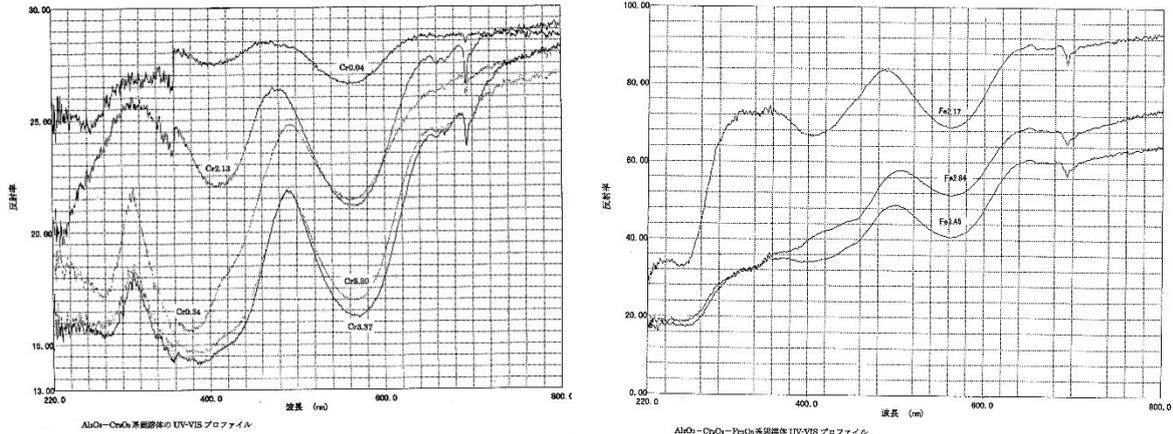


図 15-3-9 Al₂O₃-Cr₂O₃系固溶体（左）と Al₂O₃-Cr₂O₃-Fe₂O₃系固溶体（右）の可視光の吸収特性

製作した Al₂O₃-Cr₂O₃系固溶体と Al₂O₃-Cr₂O₃-Fe₂O₃系固溶体の可視光の吸収特性を調べた（図 15-3-9）。Al₂O₃-Cr₂O₃系固溶体では Cr₂O₃の含有率が高くなるにつれ 400nm および 550nm の吸収強度が大きくなり、その吸収波長が長波長側にシフトをしていることが分かる。また、700nm 周辺の細かい吸収も Cr₂O₃の含有率が高くなるにつれ大きくなっていることが分かる。一方、Al₂O₃-Cr₂O₃-Fe₂O₃系固溶体の場合は、Fe₂O₃の含有率が増加するにつれ 400nm および 550nm の吸収が小さくなり、400nm の吸収が消滅しているものも見られることから、紫色領域の波長の吸収がなくなったことを意味する。また、700nm 付近の細かい吸収は Fe₂O₃含有量が増加しても、大きな変化は見られなかった。

天然のタイ産ルビーをシリコンユニット高温工業製（DSH SH-30）で加熱実験を行った。

条件 昇温速度：300℃/時 ・保持時間：48 時間 ・保持温度：1,500℃
雰囲気：大気雰囲気下

その結果、加熱によって CL のピークが長波長側に大きくシフトする傾向が見られた。これは、加熱処理によって Cr₂O₃が拡散し、そのため格子定数が伸張したためと考えられる。その結果、CL のピークが長波長側にシフトするようになったと思われる（図 15-3-9）。

表 15-3-2 加熱前後におけるピークシフト

ピーク番号	ピーク波長			半価幅		
	処理前(T1)	処理後(T2)	差(=T2-T1)	処理前(T1)	処理後(T2)	差(=T2-T1)
1	677.38	677.64	0.26	21.28	21.35	0.07
2	696.00	697.74	1.74	5.59	5.31	-0.28
3	701.42	701.82	0.40	5.56	4.09	-1.47
4	715.53	716.43	0.90	22.96	25.76	2.80

以上から次のようにまとめられます。

- (1) 677.5 nm, 697.5nm, 701.2nm, 717.0nm 付近に細いシャープなCLが観測された。これらのピークは、 Cr_2O_3 の含有量が増加するに従って、長波長側にシフトする傾向が見られた。
- (2) CL強度は Cr_2O_3 の含有率が約0.4wt%の 때가最も高く、過剰の Cr_2O_3 がルビー中に存在すると濃度消光が引き起こされ、CL強度が低下することがわかった。
- (3) 調製した試料のうち Fe_2O_3 を含有した試料は、CL強度を極度に減少した。
- (4) 加熱処理したルビーを施すとCLのピークトップ波長が長波長側におおきくシフトする傾向が見られた。これらは、加熱処理により Cr_2O_3 が拡散し、それにより格子定数が伸張したためと考えられる。

今回の実験からは、カソードルミネッセンス（CL）の位置と波形を測定することにより、ルビーの赤色を定量的に捉えることができることが分かります。これは、ルビーの色の評価を行う際の一つの方法となります。

(4) ベリル

鉱物名では、ベリル（Beryl：緑柱石）と呼びますが、宝石名では、緑色の色調のものをエメラルド（Emerald）、水色（薄い青色）の色調のものをアクアマリン（Aquamarine）と呼び、区別しています。

①エメラルド（Emerald）

緑色の代表的な宝石はエメラルドです。なかでもコロンビア産のものは市場の約8割を占めると言われています（図 15-4-1）。この緑色はルビーと同様にクロム（Cr）が含まれることによって鮮やかな緑色を呈するようになります。

緑色の色調のエメラルド（Emerald）は、セム語起源と考えられるラテン語の Smaragdus とギリシャ語の Smaragdos が由来で、5月の誕生石。迷信と伝説が数多くあり、不滅と信頼の象徴とされます。

最も古い産地は、エジプトの紅海沿岸にあるクレオパトラのエメラルド鉱山と呼ばれるところで、雲母片岩・滑石片岩中に産出されています。その鉱山は、紀元前 2,000 年頃より採掘していました。

主な産地は右記のとおりです。



図 15-4-1 コロンビア、ムソー鉱山産エメラルド

産地	発見した年代
エジプト	BC2,000 年以降
オーストリア	ローマ時代以降
コロンビア	インカ時代以降
ロシア	1830 年以降
アメリカ	1875 年以降
オーストラリア	1890 年以降
南アフリカ	1927 年以降
ローデシア	1956 年以降
インド	1943 年に初めて産地を確認
タンザニア	1969 年以降
ザンビア	1970 年以降

ブラジル、ザンビア、マダガスカル産エメラルドについて、Rb/Sr 法で年代測定した結果、先カンブリア時代という、かなり古い時代に生成したことが分かりました。一方、コロンビア産エメラルドも同様な方法で測定すると、それより若い、4,600～6,600 万年前に生成したことが判明しました。これは、コロンビア地域を含んだアンデス山脈が誕生した時期にほぼ相当します。即ち、アンデス山脈が生まれる、大きな地殻変動の時期に、熱水的作用によってエメラルドが生成したものと見られます。

エメラルドの割れ目（劈開：クリベージ）を隠すためにセダー・ウッド・オイル（西洋杉の油）を浸透させることは、ローマ時代から行われていましたが、現在の市場の約8割を占めるコロンビア産も、すべてではありませんがオイルが割れ目に見られるものがあります。

エメラルドの産地の同定に屈折率と比重の関係を使おうとする試みなどがありますが、そ

これらの値に幅があるため、確実に産地を割り出すのは極めて困難です。ただし、宝石に含まれるインクルージョンによって、それらの産地の起源が分かることがあります。次のように宝石質のエメラルドについては大きく二つに分けることができます。

1. 熱水性起源（コロンビア）

2. 変成岩起源（南アフリカ，オーストリア）

三相インクルージョンと呼ばれる、固体・液体・気体が一緒に見られるものがあります（図 15-4-2）。これはまさしく熱水性起源のもので、その固体は岩塩の結晶ですが、コロンビアのエメラルド産地のそばにはその岩塩を採掘しているところがあります。「欠陥のない人間はいないのと同様にキズのないエメラルドはない」と言われるように、エメラルドには様々なインクルージョンが含まれます。もし、トレモライト（透閃石）のような角閃石を含むものがあれば変成岩起源のもので（図 15-4-3）。

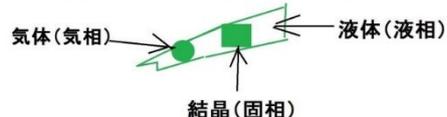


図 15-4-2 コロンビア産エメラルド中の三相インクルージョン（赤矢印の先，下図は模式図）

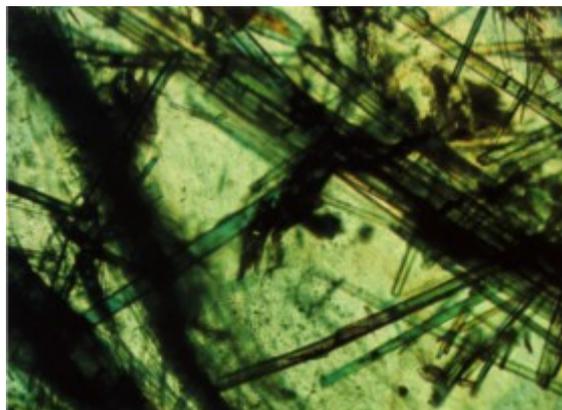


図 15-4-3 南アフリカ産エメラルド中の角閃石インクルージョン (E.J.Gbeline et al.1986)

熱水（温泉のように温かい水）の中から結晶が成長してきたと考えられるエメラルドは、FT-IRでは水の様子がよく確認できます。インクルージョンでも三相と呼ばれるものが存在します。この三相とは、気相、液相、固相という三つを含むので三相と呼びます。コロンビア産エメラルドにはこのような三相インクルージョンがよく見られます。

もう一つ、エメラルドには熱水の中から成長してきたタイプとは異なるもので、変成鉱床と呼ばれるタイプから成長してきたものがあります。ウラル産・ブラジル産及びアフリカのジンバブエ産などは結晶片岩と呼ばれる変成した岩から産出されます。変成鉱物として雲母や角閃石（トレモライトやアクチノライト）などが含まれるのが特徴です。有用な鉱物（宝石など）が集まっているところを鉱床と呼んでいますが、エメラルドは熱水鉱床と変成鉱床に見られます。

オイル処理

古くローマ時代よりエメラルドにオイル（油）を入れる処理は行われていたようです。セダー・ウッド・オイル（西洋杉の油）と呼ばれる、防腐剤にも使われたことのあるオイルですが、鉱物油として金属顕微鏡観察の時にも使われる油です。

顕微鏡で観察すると、割れ目にオイルが染み込んだ様子が分かりますが、近年ではエポキシ系樹脂をセダー・ウッド・オイルの代わりに使用しているものもあります。FT-IRの

検査によって、明らかにそれらの相違が分かります。

合成エメラルド

エメラルドを人工的に製造することは、合成ルビーや合成サファイアと同じように、数多くの場所で製造されてきました。1800年代にはドイツのエーベルマンが合成エメラルドを製造しました。しかし、エメラルドは、ルビーやサファイアと異なり、ベルヌイ（火炎溶融）法では合成できません。その理由は、エメラルドの生成温度が900~1,100度という温度の範囲内でしか生成しないことによります。この温度より高いと、ファナカイトやクリソベルルが生成するようになります。ベルヌイ（火炎溶融）法では、2,000度以上にもなりますので、この方法ではエメラルドが生成できないことは明らかでしょう。

緑色のガラスとエメラルドの違いは、チェルシー・フィルター（別名はエメラルド・フィルターあるいはカラー・フィルター）で観察すると、簡単に区別することができますが、合成エメラルドは天然エメラルドより鮮やかな赤色に見えるものがほとんどです。なお、水熱法によってつくられたエメラルドの中には、緑色のガラス同様に、まったく変わらないものもあります。

いくつかの合成エメラルドをFT-IRによって測定すると、それぞれの特徴が分かります。フラックス法によるものと水熱法によるものとは大きな違いがあります。

以前にナッソー（Nassau）が、エメラルド中に含まれる水（H₂O）の状態によって、水（H₂O）のIタイプ、水（H₂O）のIIタイプとに分けましたが、天然と合成ともに同様な吸収が見られることが分かっています。

緑色のガラスとエメラルドの違いは、チェルシー・フィルター（別名はエメラルド・フィルターあるいはカラー・フィルター）で観察すると、簡単に区別することができます。エメラルドは赤色に見え、緑色ガラスは赤くは見えません（図15-4-4）。また、フラックス法によって製造された合成エメラルドは天然エメラルドより鮮やかな赤色に見えます（図15-4-5）。さらに、水熱法によってつくられたエメラルドの中には、緑色のガラス同様に、まったく変わらないものがあります。このフィルターは赤色の690nmと、黄緑色の540nm付近の光を透過させるようにつくられています。

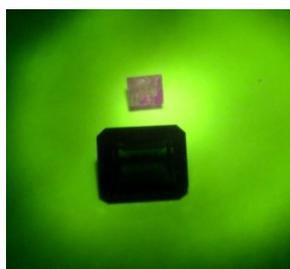


図 15-4-4 チェルシー・フィルターでの観察(1)
天然エメラルド(上)、緑色ガラス(下)



図 15-4-5 チェルシー・フィルターでの観察(2)
天然エメラルド(左)・合成エメラルド(右)

トピック（4） 宝石としての緑色ベリル（エメラルド）

緑色のベリルであるエメラルドは、最も古くから使われていた宝石で、紀元前4000年頃のバビロニアでも取り引きされており、この頃の産地として、エジプトの紅海沿岸であったとされています。16世紀以降は、南米のコロンビアでエメラルドが産出することが知られるようになり、現在では最も多く世界中に流通しています。

わが国で製造された合成エメラルド

クロムを含むベリル，すなわちエメラルドは，熱水合成法と呼ばれる方法で製造されます。これは，高温の水に原料を溶かし，その後，少しずつ温度を下げながら結晶を成長させる方法で，オートクレーブ（autoclave）という容器を使い，かつて 1.5kbar，600℃という条件下で製造させたことが知られています（Thomas & Klyakhin, 1987）。

一方，原料をより低温で溶かしやすくするためにフラックス（融剤）を混ぜて製造することもあります。

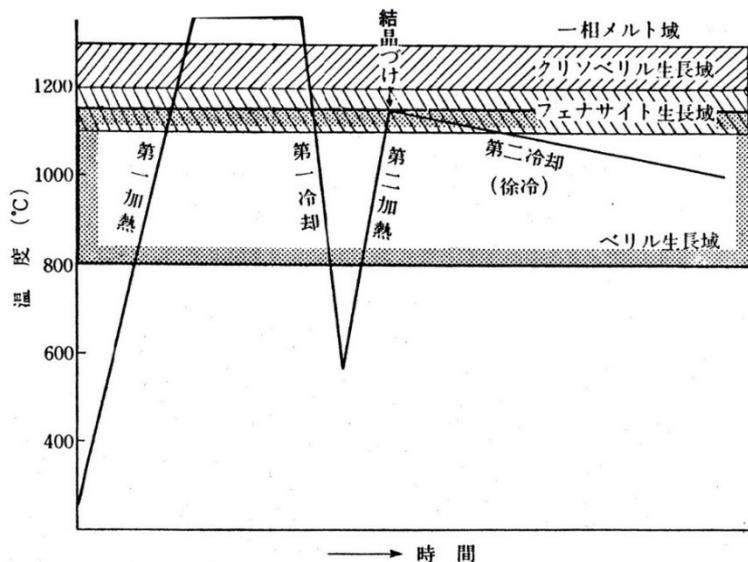


図 15-4-6 ベリルの生成領域（特許公開 昭 52-39396 より）

合成する時の温度と経過時間の関係（図 15-4-6）から，ベリルは 1,100℃でフェナカイトという別の鉱物が生成し，さらに 1,200℃以上ではクリソベリルになることが分かります。即ち，このことから，ベリルは 800～1,100℃の範囲内でなければ生成しないこととなります。

ベリル $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ = クリソベリル BeAl_2O_4 + フェナカイト $\text{Be}_2\text{SiO}_4 + 5\text{SiO}_2$
 という関係式から，条件によっては右辺に反応がすすむということが分かります。

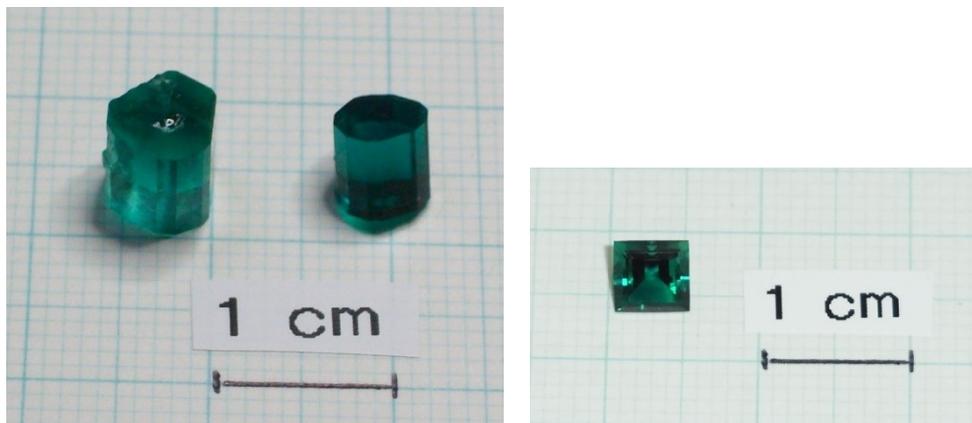


図 15-4-7 合成エメラルドの原石（左）とカット石（右）

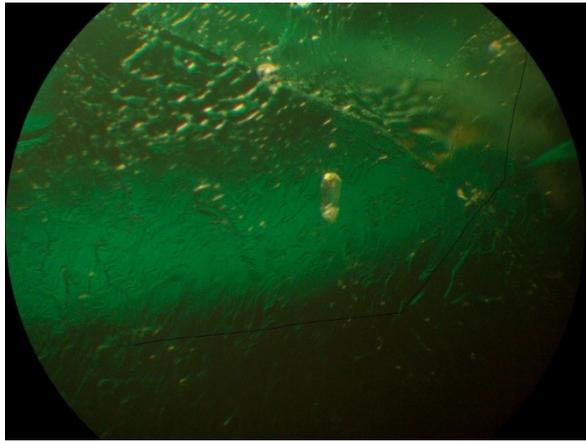


図 15-4-8 合成エメラルド中のフェナカイトとみられる柱状結晶（中央）

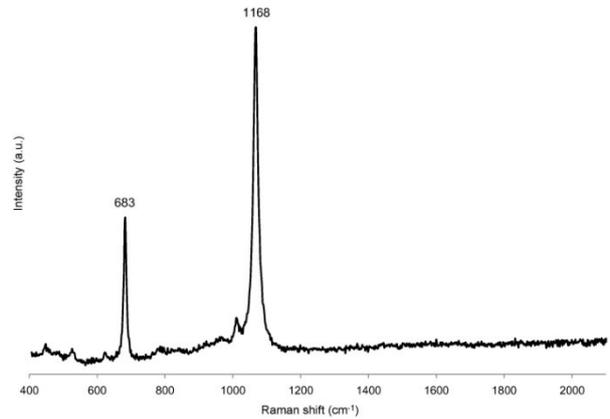
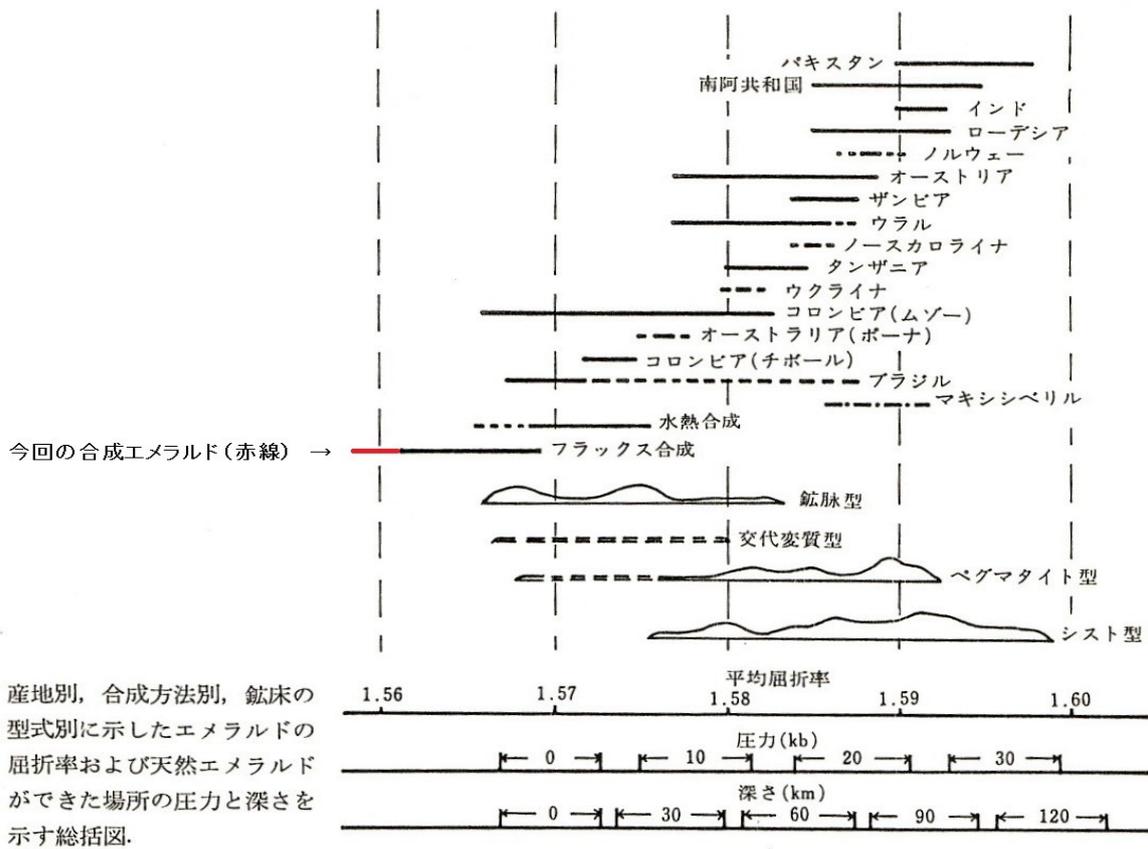


図 15-4-9 合成エメラルドのラマン・スペクトル



田窪ら(1977)より

図 15-4-10 天然・合成エメラルドの屈折率

図 15-4-8 には合成エメラルド中のフェナカイトと見られるインクルージョンと図 15-4-9 はラマン・スペクトルを示しました。

いずれにせよ、この合成エメラルドは、屈折率を計測すれば問題なく天然エメラルドとの区別は容易です（図 15-4-10）。

ロシア・ノボシビルスク製合成エメラルド

2009年に入手したロシア・ノボシビルスク製の合成エメラルドの群晶には、明らかに外形が異なり、黒色に見えるクリソベリルが含まれていました（図 15-4-11・12・13）。



図 15-4-11 ロシア・ノボシビルスク製の合成エメラルド



図 15-4-12 黒色六角柱状ガラス光沢のクリソベリル

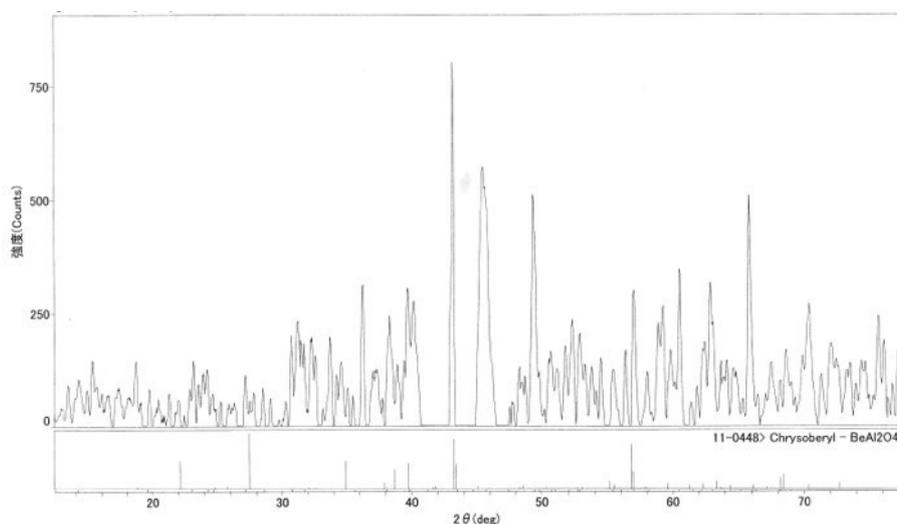


図 15-4-13 微小領域 X 線回折結果からクリソベリルと同定

前述のようにエメラルドを製造中に、生成温度を上げてしまうとクリソベリルできることから、この標本のクリソベリルも同様な理由で生成したものと推測されます。

②アクアマリン (Aquamarine)

ペグマタイトと呼ばれる、大きな結晶が見られる場所（鉱床）にアクアマリンが見られますが、そのペグマタイトの空隙にはアクアマリンの他に、様々な結晶が、綺麗に成長していますので、鉱物マニアやコレクターにとっては狙い目です。トパーズなども大きなものが見られることがあります。アクアマリンの成長は、ペグマタイトという比較的自由的な空間で行われたために、透明感のある比較的インクルージョンの少ない結晶が生まれたものと思われます。したがって、アクアマリンとエメラルドは同じ鉱物であるベリルに属しますが、その生い立ちが異なるために、その外観も大きく違うのです。

市場にある合成エメラルドについて（製造国・メーカー名は製造当時）

合 成 法	製造国	メーカー名	商 品 名
フลักス法	日本	京都セラミック	クレサンベール
		日本電波工業	サマランドール
		昭和電工	
		中住アース・クリスタル	サントメール
		諏訪精工舎	ビジョレーブ
	アメリカ	チャザム・クリエイテッド・ジュムス	チャザム
	フランス	ピエール・ギルソン	ギルソン
		エル・レンズ	レニックス
	ドイツ	ツェルハス	
	ソビエト	ノボシビルスク地球物理学研究所	
	オーストラリア	レヒライトナー	
水 熱 法	アメリカ	ユニオン・カーバイト社	リンデ
		バキューム・ベンチャー	リージェンシー
	オーストリア	スワロフスキー	スワロフスキー
		バイロン	
		レヒライトナー・コーテッドストーン	エリタ・シマルト [®]
	ソビエト	ノボシビルスク地球物理学研究所	
ガス固体反応法	日本	安達新産業(株)	エーシック

(5) ジェダイト (ひすい輝石)

一般に”ひすい(ヒスイ)”をジェダイト(Jadeite:ひすい輝石)とみなすことは定着してきました。しかし、硬玉をジェダイト、軟玉をネフライトと呼び、それらを”ヒスイ(翡翠)”と総称していたことがあります。しかし、一つの名称に二つ以上の宝石がネーミングされているのは、混乱を招くこととなりますので、近年ではジェダイトのみをヒスイと呼んでいます(図15-5-1左)。

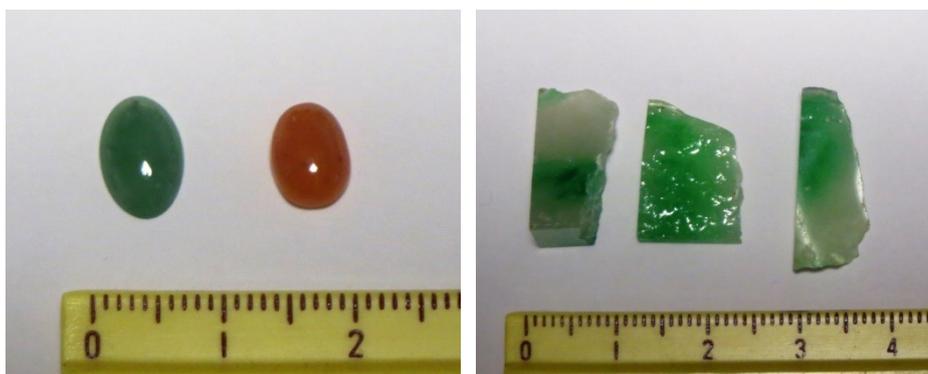


図15-5-1 天然ヒスイ(緑色:左と赤褐色:右)と樹脂含浸ヒスイ

樹脂含浸ヒスイ

このジェダイト(ヒスイ)という鉱物は、小さな結晶の集合体です。そのために、なかなか割れない石となってしまったのです。典型的な変成鉱物であり、周囲から圧力を受けてできた鉱物です。小さな結晶の隙間に樹脂や染料を含浸させたもの(図15-5-1右)が登場しても、当然の成り行きかも知れません。FT-IRによって分析すると、エポキシ系樹脂と思われる吸収が確認できます。

以前から染料によって着色されているものがありますが、これはジェダイト(ヒスイ)のひび(割れ目)を注意深く観察することが必要です。また、エメラルドでグリーン・ガラスとの違いを簡単に知ることができる、チェルシー・フィルター(別名はエメラルド・フィルター、カラー・フィルター)で観察すると染色ジェダイト(ヒスイ)は、赤く見えます。

ジェダイトとオンファサイト

最近になって、鉱物名であるジェダイトとは少し異なるものが登場してきました。ジェダイトの化学組成は、ナトリウム(Na)とアルミニウム(Al)及びケイ素(Si)と酸素(O)が1:1:2:6という比率で示されます。ところが、このナトリウム(Na)を置き換えてカルシウム(Ca)やマグネシウム(Mg)が入ってくると別な鉱物になります。ナトリウム(Na)成分が80%以上含まれていないとジェダイトとは呼ばないのです。したがって、ナトリウム(Na)が80%未満のものは、オンファサイト(和名はオンファス輝石)と呼んで区別しています。このオンファサイトとジェダイトを宝石用屈折計で測定すると、その屈折率がほぼ1.68と1.65というような違いがあります。

合成ジェダイト

アメリカのGE社が、1984年12月に合成に成功しています。クロムとマンガンを着

色成分として使用し、それぞれ緑色とランダー色の合成ジェイダイトを製造しましたが、商品化していません。この製造には合成ダイヤモンドの同じ装置を使用したとされています。翌年にはセイコー・エプソン社も合成ジェイダイトを製造していますが、こちらも商品としては流通していません。

半透明緑色の宝石はすべて”ヒスイ”として流通する可能性がありますので、十分に注意が必要です。肉眼で判断するのは困難でしょう。宝石用屈折計で測定して、ジェイダイトを確認し、さらにFT-IRによって、樹脂浸透の有無をチェックすることが必要です。一般にジェイダイト（ひすい）と間違われやすいものをまとめて紹介しておきます。

ヒスイとその類似石の屈折率（スポット法）

宝石名	鉱物名	商業名	屈折率
天然ジェイダイト	ジェイダイト（ひすい輝石）	ヒスイまたは硬玉	1.66
天然ネフライト	アクチノライト（透緑閃石）、 トレモライト（透閃石）	軟玉、台湾ヒスイ シベリア・ヒスイ	1.61~1.63
天然グロッシュラー・ガーネット	グロッシュラー（灰礬石榴石）	南アフリカ・ヒスイ	1.73~1.74
天然アイドクレース	ベスピアナイト（ベスプ石）	カリフォルニア・ヒスイ	1.72
天然ダイオプサイド	ダイオプサイド（透輝石）	日高ヒスイ	1.68
天然エメラルド	ベリル（緑柱石）	「品質の悪い石」	1.57~1.59
合成エメラルド		「品質の悪い石」	1.56~1.58
天然クリソプレーズ	クォーツ（石英）	オーストラリア・ヒスイ	1.53
天然アベンチュリン・クォーツ	クォーツ（石英）	インド・ヒスイ	1.53
染色カルセドニー	クォーツ（石英）		1.53
染色クォーツアイト	クォーツ（石英）		1.53
天然アマゾナイト	マイクロクライン（微斜長石）	アマゾン・ヒスイ	1.53
天然サーペンティン	サーペンティン（蛇紋石）	朝鮮ヒスイ	1.50~1.55

トピック（5） わが国で最も古い装飾品としてのヒスイ

わが国では、縄文時代から古墳時代の遺跡から、ヒスイがしばしば発見されます。新潟県糸魚川市周辺から産出されるヒスイを加工したもので、北海道や九州の遺跡でも見つかっています。当時は日本海側の交流が活発だったようです。中米でも産出したヒスイは、マヤ文化でも装身具として使われていましたが、16世紀のスペイン人による侵略以降、忘れられてしまいます。わが国でも奈良時代以降は、ヒスイを身に着けることはありませんでしたが、昭和期に新潟県小滝からヒスイを再発見されてからは、指輪や帯留めなどにも使われています。

・日高ヒスイ

ひすい輝石ではなく透輝石の“日高ヒスイ”は、番場猛夫が1972年に鉱山地質学会誌（現、資源地質学会誌）で発表し、1980年には宝石学会誌でも紹介され、世界的に有名になった日本産宝石の一つです。かつて採取されたものを、現場近くの転石で観察する機会を得たので、他の産地のものと合わせて紹介します。



図 15-5-2 北海道沙流郡日高町千栄（ちさか）から採取された“日高ヒスイ”を含んだ岩石（上左右・左下）と磨いたもの（右下の左端），緑色輝石を含む様似産橄欖岩（右下の中）及び幌満産橄欖岩（右下の右端）

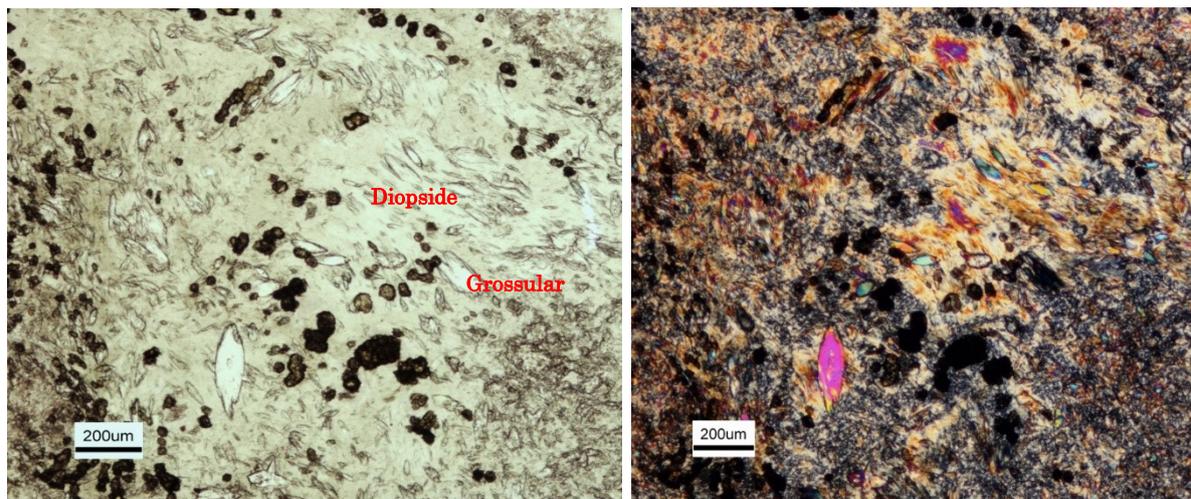


図 15-5-3 千栄産日高ヒスイの偏光顕微鏡写真 左(単)・右(直交)

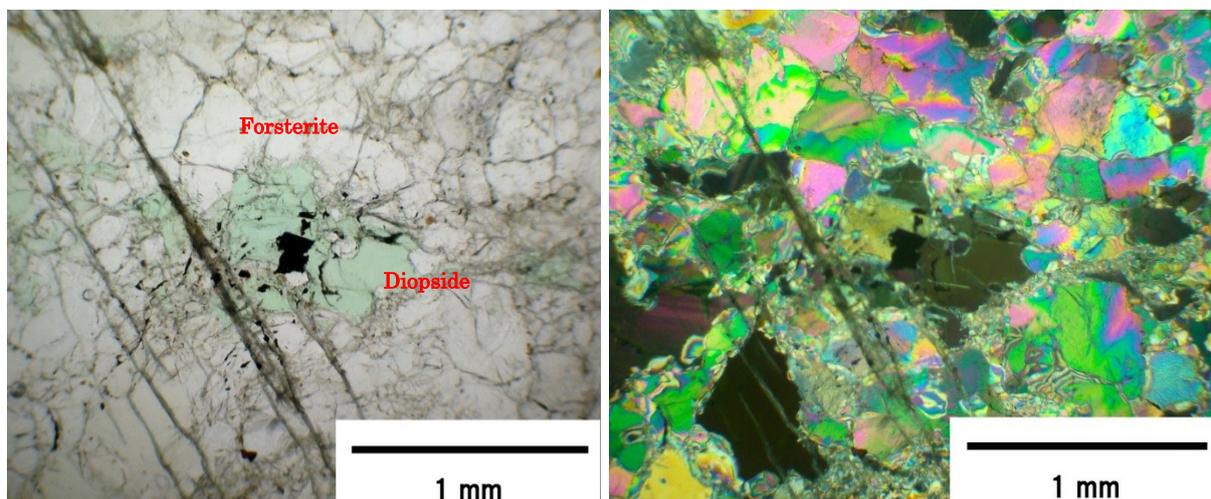


図 15-5-4 幌満産かんらん岩の偏光顕微鏡写真 左(単)・右(直交)

表 15-5-1 日高ヒスイと幌満産緑色単斜輝石の化学分析値

	日高ヒスイ		様似産橄欖岩中		幌満橄欖岩中		CaMgSi ₂ O ₆
	Jeol	Hitachi	Jeol	Hitachi	Jeol	Hitachi	
Na ₂ O	0.00	0.31	0.97	1.32	1.06	0.54	—
CaO	23.29	25.79	21.82	20.68	21.81	22.48	25.90
MgO	17.58	16.49	15.73	17.79	15.49	19.68	18.61
FeO	3.95	2.46	2.75	2.70	2.70	1.91	—
Cr ₂ O ₃	0.30	0.08	1.80	1.30	2.25	0.77	—
Al ₂ O ₃	0.13	0.51	4.09	4.18	3.43	2.03	—
SiO ₂	54.75	54.36	52.85	52.03	53.25	52.58	55.49
Total	100.00	100.00	100.01	100.00	99.99	99.99	100.00

- (1) Jeol : SEM 日本電子製 JSM-6360
 条件 加速電圧 15 kV ・電流 6×10⁻⁶ A ・計測時間 60 sec
 計測範囲 10 μm ・標準物質 Co ・炭素蒸着
 EDS OXFORD 製 Inca Instrument
- (2) Hitachi : SEM 日立ハイテクノロジーズ社製 卓上顕微鏡 Miniscope TM3000
 条件 加速電圧 15 kV ・電流 0.6~0.8 nA
 計測時間 200 sec ・計測範囲 5~10 μm ・炭素非蒸着
 EDS Bruker 社製 エネルギー分散型 X 線分析装置 Quantax70

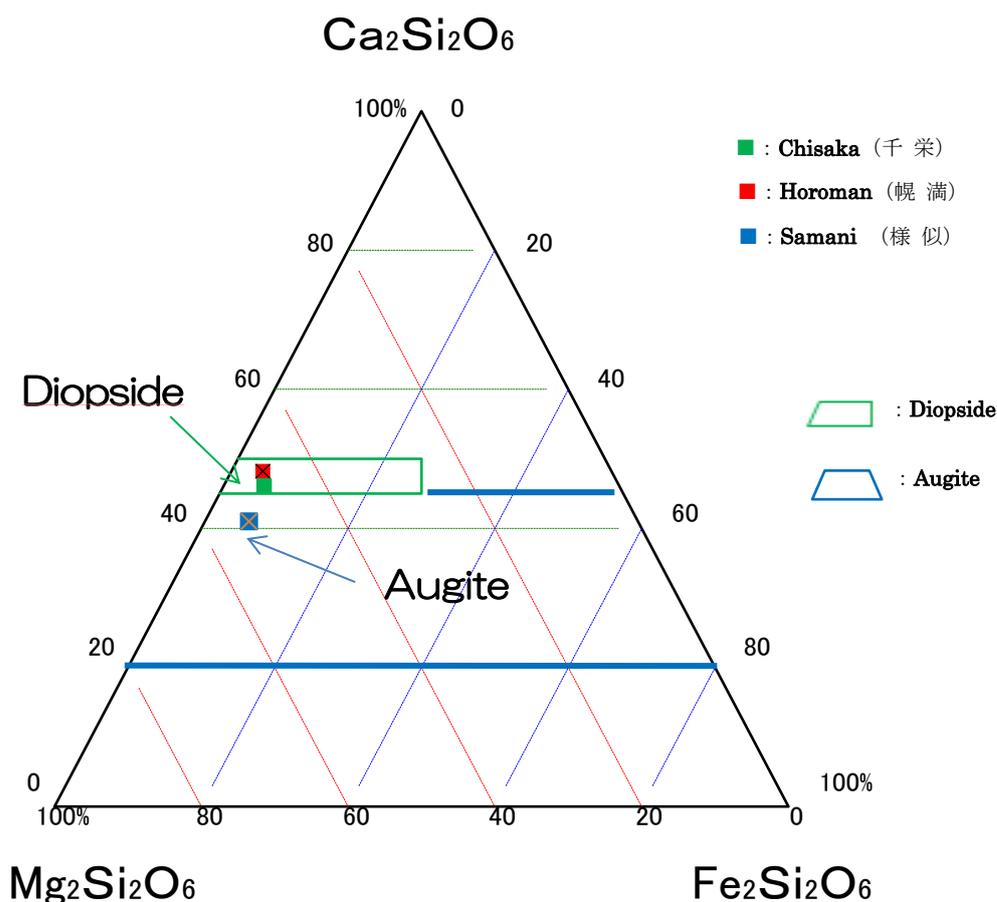


図 15-5-5 三成分系 ($\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ - $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ - $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) で表した日高ヒスイと幌満産緑色単斜輝石 (Jeol の分析値)

日高ヒスイは、日高山脈博物館で観覧できますが、現地での確認は困難でした (2014 年 9 月 20 日調)。しかし、かつて採集したと見られる転石が現地付近で見られ、さらに様似や幌満産のかんらん岩にも同様な緑色の輝石を含んでいる。これらの緑色の着色原因はいずれもクロムであり (表 15-5-1)、綺麗な緑色を呈する魅力的な宝石として、今後は流通する可能性があります。

ただし、幌満や様似町で見られる橄欖岩中の緑色輝石の中には、普通輝石に分類されるものも産出することが分かった。

(6) クォーツ（石英）—水晶，玉髄など—

クォーツ（石英）は，様々に利用されていますが，宝石としても種類が多く，その流通も多いものです。特に，クリスタル・クォーツと呼ばれる透明感の優れたものは，その色の美しさと共に人気のある商品の一つと言えるでしょう。特に，ロック・クリスタル（水晶）はわが国でも古くから加工され利用されてきました。

天然と合成のクリスタル・クォーツの違いについては，ブラジル双晶の確認やインクルージョンを冷却したときの变化などで区別が可能です。即ち，天然アメシストや天然アメシストを熱処理して得られたシトリンは，交差ニコル下で綺麗なブラジル式双晶が観察できることや，あるいは合成水晶に見られる管状二相インクルージョンを -30°C 程度まで冷却すると，無色から暗褐色化して明らかな変化が見られることなどです。また，合成水晶のインクルージョンには厚みが薄いものが多いことなどの違いがあります。ところが，インクルージョンも観察されず，しかも双晶も見られないクォーツに関しては，天然かどうかについての判定ができません。しかし，最近になって，赤外吸収による違いによって区別ができるようになりました。

また，半透明のクォーツである，カルセドニー（玉髄）が，人工着色されているものがありますが，これはXRF（蛍光X線元素分析装置）などによって区別が可能です。

天然水晶と合成水晶の相違

合成水晶は振動子としてコンピュータ等に幅広く使われています。産状の異なる水晶についてFT-IRによって， $400 \sim 7000\text{cm}^{-1}$ の領域における吸収を調べたところ，ブラジル産，川端下産，玄倉産及び竹森産の水晶に共通して， 3596cm^{-1} に特徴的な吸収が見られるのが分かりました。一方，アメリカ製や日本製合成水晶には 3584cm^{-1} に見られる吸収がそれに相当するものと思われましたが，明らかに天然水晶より短波数側にシフトしていることが分かりました。このことから，産状の異なる天然水晶における赤外吸収がほとんど同じ吸収を示すのに対し，合成水晶とは明らかに異なることは特筆すべきことと思われます。おそらくその成長環境の違いによるものなのでしょう。図15-6-1からは，割れた天然水晶が合成により綺麗に修復されている様子が分かります。

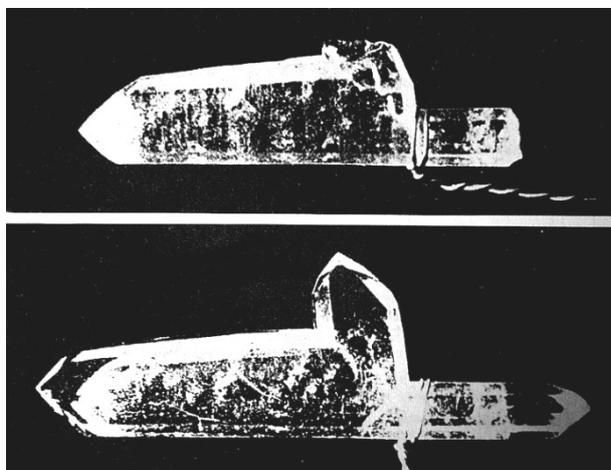


図15-6-1 天然水晶（上：長さ 2.5cm）を，水熱法によって 5 ヶ月間育成した結果得られた合成水晶（下）（Spezia,1908）

次に、電子線を物質に照射させて、その発光現象を調べる、カソード・ルミネッセンス（CL）という手法で、水晶の成長模様を見ると長野県川端下産をはじめ各産地の水晶のCL像は、ほとんどが結晶外形に平行なゾーニングとして観察されましたが、ペグマタイト起源の山の尾についてはその外形とは逆向きに発光が観察できました。このようにCL像によって、通常の顕微鏡では観察されできない成長模様が観察できることから、水晶の成長過程を考える上で有力な方法です。

さらに石英脈中の山梨県竹森産において顕著に見られるように、生成温度がそれ程高くないと思われる水晶ほど明瞭なCL像が確認できるようです。このCL像の発光原因については、結晶の不均一性によるものと考えられています。従って、生成温度の比較的低いと思われる合成水晶において、そのCL像がほとんど観察できなかったことから、発光させる原因と考えられる欠陥の極めて少ない結晶であることが分かります。

アメシストとシトリン

クォーツ（石英）のなかでも透明なものをクリスタル・クォーツと呼び、その中で無色をロック・クリスタル（水晶）、灰～黒色をスモーキー・クォーツあるいはモリオン、紫色をアメシスト（紫水晶）、黄色をシトリン（黄水晶）と一般に呼ばれます。これらの中で、シトリン（黄水晶）は、アメシスト（紫水晶）を加熱処理して得られるものです。

色の原因について

石英は理想化学組成上は、ケイ酸（ SiO_2 ）で不対電子がなく、電子と光の相互作用も生じないことから無色と考えられます。よって、極めて純粋なものは水晶と呼ばれ、宝石として研磨加工されることとなります。しかし、自然に産出する水晶にもさまざまな内包物、即ち、不純物を含むことは知られていますが、着色に影響するのは結晶格子の中に入り込み、電子と光の相互作用に影響を与えるような場合です。

ペグマタイト中に見いだされるスモーキー・クォーツは、放射性鉱物によって長い地質学的時間にさらされた結果、結晶の格子に欠陥を生じ、灰～黒色になるとみなされています。これは、水晶中に含まれた微量のアルミニウム（Al）不純物に隣接した酸素原子の電子対から1個の電子を追い出し、電子軌道に不対電子を残すこととなります。電子の欠けた状態は正孔と呼ばれ、後に残った不対電子が過剰電子の励起状態とよく似た励起準位をもつようになります。このような励起状態では光のエネルギーを吸収するようになり、灰～黒色の水晶となまります。いわゆるスモーキー・クォーツです。

アメシストは水晶の中でも、前記のように紫色を呈するものであるが、その紫色の着色原因については、かつて、1800年にRoseによりマンガン（Mn）含有説が唱えられたことがあります。その後、1841年にPoggendorffはMnに代わって、鉄（Fe）が、その他に CH_4 、Ra、Na、Ti、K等の元素が原因であるという説も出されました。現在では、Feの存在によって生じた正孔型着色中心が原因であると考えられています。しかし、Feだけがアメシストの着色原因であるとはいえません。それは、Feを含む水晶の中でもシトリンや緑色水晶のように紫色以外の色調を示すものもあるからです。

最近の合成着色水晶の研究より、 γ 線を照射することによってもアメシストが得られています。これは Fe^{3+} が Fe^{4+} に変化するという推定をしたのが Lehmann,G (1967) と Tsinober (1972) らです。その後になってERP スペクトルからアメシスト中に Fe^{4+} の存在が示されています。よって、アメシストの着色原因には4価の鉄イオンが関係していることに対しての異論はないとされています。

しかし、鉄以外にも放射線が着色に関係することは、合成アメシストの研究で詳しく解明されています。合成アメシストは、1959年に Tsinober と Chentsova により造られましたが、 Fe^{3+} をドーピングした無色～薄い黄色の合成水晶にイオン化照射（X線または γ 線）すると紫色の水晶、即ちアメシストになるというものです（Zaitov et al.,1975；Balitsky, 1977;Hosaka and Taki,1983）。ただし、Feを含む全ての合成水晶が紫色を呈するようになるのではなく、precursor sites と呼ばれるSi サイト中の Fe^{3+} の存在が必要とされています（Lechmann,1967）。また、アメシストは加熱によりその紫色は変化してしまいますが、過度に加熱しなければ、ionizing radiation により色を復元することができるかとされています。

前出の Lechmann(1967)によると、アメシスト中のFeは precursor sites と呼ぶSi サイト中の Fe^{3+} が放射線により Fe^{4+} を生じ、その結果、紫色を呈するようになるということです。

天然と合成アメシストともFT-IRによる400～7000 cm^{-1} の波数領域においてほとんど同じ吸収を示しています。ブラジル双晶の確認が最も簡単でしょう。

アメシストを熱処理したものは、アメシストと同様な吸収を示していることから、熱処理したアメシストと天然シトリンの区別には赤外吸収によるチェックが必要です。

アメシストの加熱実験

次の4つの産地の天然アメシストと1つの合成アメシストをそれぞれ加熱実験し、色調の変化を確認してみました（表 15-6-1）。

- (1) ブラジル、リオ・グランデ産：Iai, Rio Grande do Sul, Brazil
- (2) ウルグアイ産：North Cantera mine, Artigas, Uruguay
- (3) メキシコ産：Ras Begas mine, Mexico
- (4) ロシア製合成アメシスト：Synthetic amethyst, Russian Academy

表 15-6-1 各試料の加熱による色調の変化

試料	色調	脱色温度 (°C)	色調が変化した時の温度 (°C)	加熱による色調
ブラジル	紫色	450	500	黄色
ウルグアイ	紫色	420~430	450	黄褐色
メキシコ	紫色	500	-	無色 (白色)
合成ロシア製	紫色	420~430	450	黄色

これらの加熱実験結果から、ブラジルのリオ・グランデ産、ウルグアイ産及び合成アメシストは、420～450℃で脱色し、その後に黄色あるいは黄褐色のシトリン（黄水晶）の色調を呈するようになりました。

一方、メキシコ産アメシストについては、脱色はするがその後の色調の変化は見られず、最終的に白色（不透明な無色）になったことです。

他の分析である、CL 像の観察・化学分析・IR 吸収スペクトル測定なども行った結果から、次のような結論を得ました。

○カラーセンターによって生じた可視領域の吸収（550nm 付近）が、420～500℃程度の加熱によって消滅した結果、紫色は消失した。

○黄色に変化するというのは、分光特性において可視部から紫外部にかけて徐々に吸収が大きくなることを示している。

○黄色に変化しないものは、カラーセンターによって生じた可視領域の吸収（550nm 付近）が、加熱によって消滅した後、さらに加熱温度を上昇しつづけても、その他の吸収の変化が可視領域になかったことを示している。即ち、水（あるいはOH）による吸収と思われる可視部から紫外部にかけての吸収がなかったことを示している。

○アメシストを加熱することによりシトリンの色調に変化させるには、H₂O 分子の存在と 450～500℃という温度が必要である。

カルセドニー（玉髓）

カルセドニーとは、石英の細かい繊維状結晶の集合体で、半透明の外観を呈しています。特に緑色カルセドニーの中で、オーストラリア産のアップル・グリーンの色調のものをクリソプレーズと呼びます。この緑色の原因は、ニッケル（Ni）によるものであることが分かっています。一方、半透明石英であるカルセドニーを人工的に着色することも広く行われておりますが、その着色元素としてクロム（Cr）を使用しており、明らかな違いがあります。ただし、天然カルセドニーにもクロムによって緑色に着色されているものがあります。ただし、天然の場合はほとんどクロム雲母あるいはクロム鉄鉱から由来したもので、いわゆる鉱染のような状態で観察されます。

このカルセドニーは、更に詳しく分類され、その繊維状の結晶の伸長方向（細長く伸びた結晶の方向）と消光角（それぞれ2枚の偏光版を上下2枚交差させ、その間に石を、偏光方向と伸長方向を一致するように置いてから、石を回転させて、暗くなった位置と最初の位置とのなす角度）によって次のように3つに分類されます。

- ・カルセドナイト（伸長性負、消光角0度）
- ・コーツィン（伸長性正、消光角0度）
- ・ルーテサイト（伸長性正、消光角30度）

一般にはカルセドナイトであることが多いようですが、宝石のように伸長性や消光角が測定できないものはカルセドニーという結果になります。また、繊維状ではない小さな不定形な結晶の集合体で、主に野外（フィールド）で使われるクォーツァイト（珪岩）があります。このクォーツァイト（珪岩）とは、変成作用を受けた場合に限定して使われる岩石名です。

宝石のような小さな塊だけで判断するのは困難です。

鉱物名と岩石名との大きな違いは、岩石名は組織（鉱物の組み合わせ）検査などから変成の有無や地質的な解釈（見方）を行う訳ですが、一方、鉱物名の場合には、単に組成（成分）や結晶構造（結晶形）だけによってネーミングされているのです。

宝石名は鉱物名や岩石名が混在して使われているので混乱することがあります。宝石名を決める時には、一体何をもとにしているのかを十分に考えながらネーミングする必要があります。

ジャスパー（碧玉）

クォーツ以外の鉱物が多くを占め、不透明なものをジャスパーと呼んでいます。一般には、クォーツ以外の成分が約 10%程度含まれています。

クォーツ部分は微小結晶の集合体で、それらの隙間を埋めるように赤鉄鉱や褐鉄鉱が含まれます。クォーツの部分はカルセドニーとして分類されるものが一般的です。

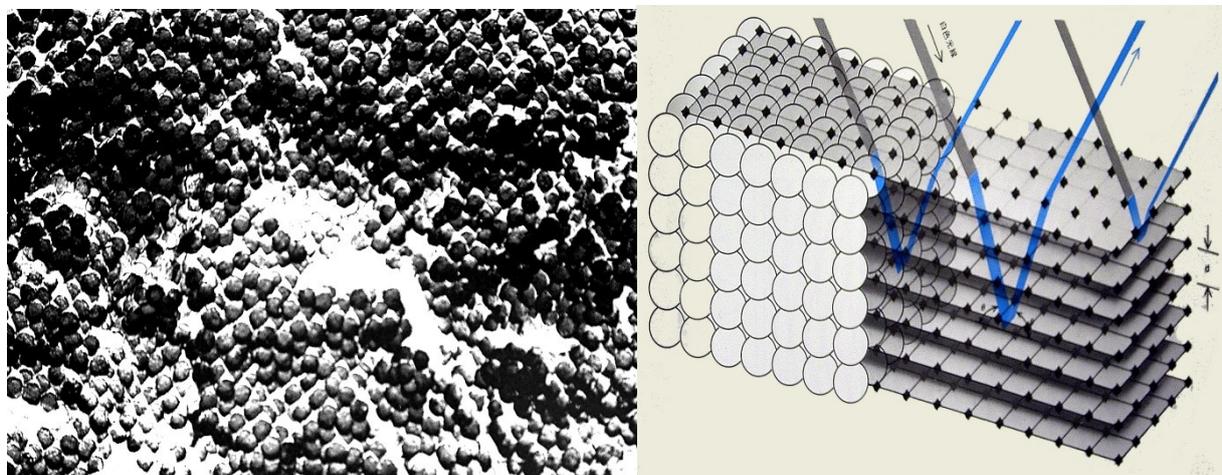
ブラッド・ストーン

不透明なジャスパーの中でも、その外観が不透明緑色を呈し、赤色が斑点状に見られるものをブラッド・ストーンです。緑色は緑泥石、赤色は赤鉄鉱です。

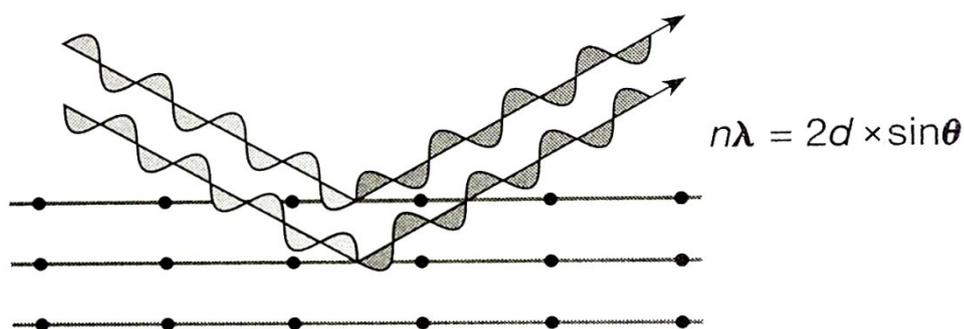
(7) オパール

オパールは、結晶構造を持たない鉱物ですが、宝石として使用されるものは、斑（ふ）と呼ばれる虹の七色が綺麗に見られるものが高価で取引されます。この美しい色調の変化については、オーストラリアのSanders らが1964年に解明しました。それは、オパール内部に直径 200nm 前後の球状粒子によって規則正しく配列していることを確かめ、その規則正しい配列が回折格子^{*1}の役目をはたして、特定の可視光線を強めて綺麗な色調を示すしました。シャボン玉の表面が虹色に見えるのと同じ原理です。このような美しい斑（ふ）を持つオパールをプレシャス・オパールあるいは貴蛋白石と呼んでいます。

わが国でも石川県赤瀬や福島県宝坂などで綺麗な色調のオパールを産出したことがありましたが、和名の蛋白石（たんぱくせき）から分かるように一般には乳白色の外観のものが多いのです。



プレシャス・オパール表面をフッ化水素酸でエッチングしたものとその様子を模式的に表現したもの
別冊サイエンス「光と色」(Science Illustrated 9)より

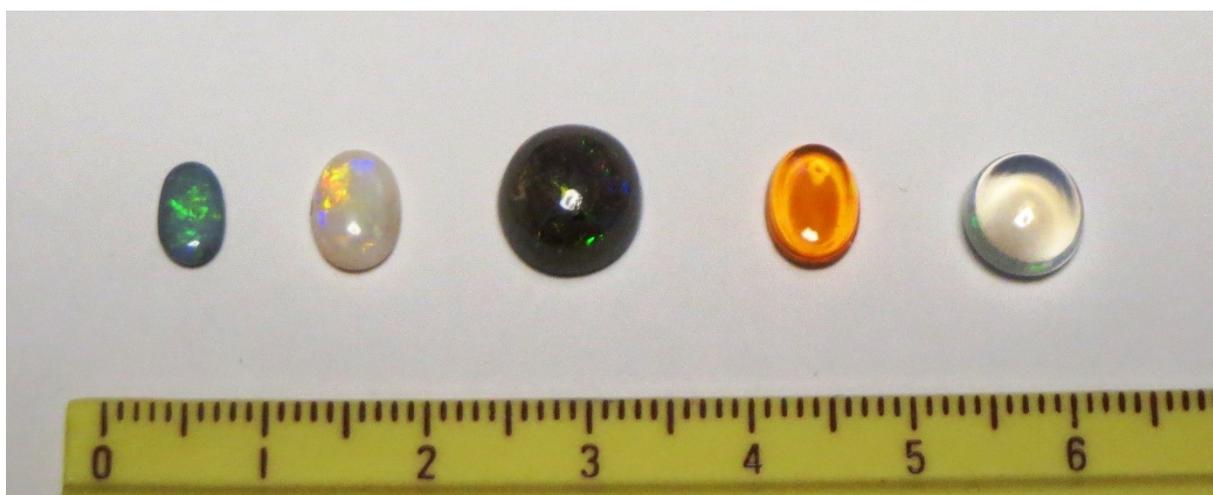


*1：回折格子は、上図のように結晶が格子状に並んだところに、光が入射し、回折した光が、強め合う関係は上式のとおり。n=1,2…整数。光の波長がλ、格子間隔がd、入射光と格子状とのなす角度がθ。

宝石として使われるプレシャス・オパール（貴蛋白石）は、このようにオパール自体が着色しているわけではありません。

虹色以外の部分を地色と呼んでいますが、その地色によって、次のように分類できます。

外観（地色）	名 称	産 地
灰～黒色	ブラック・オパール	オーストラリア
白色	ホワイト・オパール	オーストラリア
褐色	ボルダー・オパール	オーストラリア
オレンジ色	ファイアー・オパール	メキシコ
無色	ウォーター・オパール	メキシコ



左からブラック・オパール，ホワイト・オパール，ボルダー・オパール，ファイアー・オパール，ウォーター・オパール。

これらのなかでも、希少で高価なブラック・オパールは、オーストラリアのシドニーの北西 770Km に位置するライトニング・リッジが最も有名な産地です。いずれのオパールもその重さの約 10% が水として含まれていますので、熱には十分注意が必要です。

これらのプレシャス・オパールは、FTIRにより、クリストバライトあるいはトリディマイトと呼ばれる鉱物が出来ていることが分かります。一方、合成にはそのような鉱物は出来ておらず、単にガラス状物質で出来ているのが分かります。

このクリストバライト (Cristobalite) とトリディマイト (Trdymite) とは、クォーツ (Quartz: 石英) と同じ組成で結晶構造が異なる、多形 (Polymorph) と呼ばれる関係にあるものです。一般にオパールを調べてみるとガラス質 (Amorphous) であったり、クリストバライト (Cristobalite) やトリディマイト (Trdymite) になっているものがあります。そこで、オパールでガラス質 (Amorphous) なものをオパールーA、クリストバライト (Cristobalite) が含まれているものがオパールーC、トリディマイト (Trdymite) が含まれているものをオパールーT と呼んで区別することがあります。

今まで調べた限りでは、宝石質のオパールは、すべてオパールーC あるいはオパールーT でした。ところが、合成オパールは例外なくオパールーA でした。

(8) ガーネット

ガーネットの外観は、赤～赤褐色あるいは赤紫色、オレンジや緑色など様々な色調をもつことで親しまれています。このガーネットという名称は、総称でグループ名です。宝石として使われるのは、パイロープ (Pyrope) やグロッシュラー (Grossular) という鉱物種が主です。ガーネット (Garnet) の仲間ということを示すために、パイロープ・ガーネットなどのように語尾にガーネットという名をつけて呼ぶことがあります。

このガーネットという名称は、ラテン語の Granatum (Pomegranate: 石榴の木を意味する) からきたものとされています。その実が似ているからです。和名は石榴 (ざくろ) 石と言い、語源を直訳したものです。ガーネットは構成する成分によって、さまざまな名称に細分化されています。なかでも赤色の宝石としてふるくから使われるパイロープ (Pyrope) は、ギリシャ語で火 (fire) をあらわす Pyr と見ることをあらわす ops との合成語です。見た目が鮮やかな赤い色を示すことから名付けられました。

赤色のガーネットの中でも紫色がかかったものは、パイロープとアルマンディンの中間の性質をもつもので、ロードライト (Rhodolite) と呼ばれています。このロード Rhodo は薔薇 (Rose) を意味し、リソス lite は石を意味するギリシャ語から名付けられています。いわゆる”薔薇石”と呼べるものです。薔薇色を呈する石ということになります。このように赤色以外にも、グロッシュラーと呼ばれるガーネットは、一般に緑色と淡い色及び無色を示します。

一般に、ガーネットは、その結晶構造が同様なものを、**ガーネット・スーパーグループ**と総称され、下記の化学組成式 (①) に含まれる鉱物で、Z に入る元素の価数が 12 のものとなっている。この分類により、石榴石と同じ結晶構造を持つ酸化鉱物なども含まれることになった。一方、加水石榴石 (Hydrogrossular) という呼び名は鉱物のリストから外されることになった。

即ち、これまでの**石榴石**と同じ構造をもつ鉱物は、**石榴石のスーパーグループ**という呼び名になった。



X : Na, Mg, Ca, Mn²⁺, Fe²⁺, Y

Y : Mg, Al, Si, Sc, Ti⁴⁺, V, Cr, Mn, Fe³⁺, Zr, Sn⁴⁺, Sb⁵⁺, Te, U⁶⁺

Z : Li, Al, Si, V⁵⁺, Fe³⁺, Zn, As

φ : O, OH, F

• Zの価数が0の鉱物。これは水酸化鉱物に含まれる。

加藤石榴石 Katoite {Ca₃}[Al₂](□₃)(OH)₁₂

• Zの価数が3の鉱物。これはハロゲン化鉱物に含まれる。

リチウム氷晶石 Cryolithionite {Na₂}[Al₂](Li₃)F₁₂

• Zの価数が6の鉱物。これは酸化鉱物に属す。

ヤフソアン石 Yafsoanite $\{Ca_3\}[Te^{6+}_2](Zn_3)O_{12}$

・Z の価数が8の鉱物は、**アンリターミエル石族**（この族は正方晶系）と呼ぶ。これらは珪酸塩鉱物に含まれる。

アンリターミエル石榴石 Henritermierite $\{Ca_3\}[Mn^{3+}_2](Si_2)(\square)O_8(OH)_4$

ホルツタム石榴石 Holtstamite $\{Ca_3\}[Al_2](Si_2)(\square)O_8(OH)_4$

・Z の価数が9の鉱物は、**ビティクル石族**と呼ぶ。これらは酸化鉱物に含まれる。

ビティクル石 Bitikleite $\{Ca_3\}[Sb^{5+}Sn^{4+}](Al_3)O_{12}$

デヒュル石 Dzhuluite $\{Ca_3\}[Sb^{5+}Sn^{4+}](Fe^{3+}_3)O_{12}$

エルブルス石 Elbrusite $\{Ca_3\}[U^{6+}_{0.5}Zr_{1.5}](Fe^{3+}_3)O_{12}$

ウスター石 Usturite $\{Ca_3\}[Sb^{5+}Zr](Fe^{3+}_3)O_{12}$

・Z の価数が10の鉱物は、**ショーロム石榴石族**と呼ぶ。これらは珪酸塩鉱物に含まれる。

イリーナラス石榴石 Irinarassite $\{Ca_3\}[Sn^{4+}_2](SiAl_2)O_{12}$

ケリマシ石榴石 Kerimasite $\{Ca_3\}[Zr_2](SiFe^{3+}_2)O_{12}$

キムゼイ石榴石 Kimzeyite $\{Ca_3\}[Zr_2](SiAl_2)O_{12}$

ショーロム石榴石 Schorlomite $\{Ca_3\}[Ti^{4+}_2](SiFe^{3+}_2)O_{12}$

トチュール石榴石 Toturite $\{Ca_3\}[Sn^{4+}_2](SiFe^{3+}_2)O_{12}$

・Z の価数が12の鉱物は、これまで通り、**石榴石族**と呼んでいる。これらは珪酸塩鉱物に含まれる。

鉄礬石榴石 Almandine $\{Fe^{2+}_3\}[Al_2](Si_3)O_{12}$

灰鉄石榴石 Andradite $\{Ca_3\}[Fe^{3+}_2](Si_3)O_{12}$

満鉄石榴石 Calderite $\{Mn^{2+}_3\}[Fe^{3+}_2](Si_3)O_{12}$

灰スカンジウム石榴石 Eringaite $\{Ca_3\}[Sc_2](Si_3)O_{12}$

灰ヴァナジウム石榴石 Goldmanite $\{Ca_3\}[V^{3+}_2](Si_3)O_{12}$

灰礬石榴石 Grossular $\{Ca_3\}[Al_2](Si_3)O_{12}$

苦土クロム石榴石 Knorringite $\{Mg_3\}[Cr^{3+}_2](Si_3)O_{12}$

メイジャー石榴石 Majorite $\{Mg_3\}[SiMg](Si_3)O_{12}$

メンツァー石榴石-(Y) Menzerite-(Y) $\{Y_2Ca\}[Mg_2](Si_3)O_{12}$

桃井石榴石 Momoiite $\{Mn^{2+}_3\}[V^{3+}_2](Si_3)O_{12}$

森本石榴石 Morimotoite $\{Ca_3\}[Ti^{4+}Fe^{2+}](Si_3)O_{12}$

苦礬石榴石 Pyrope $\{Mg_3\}[Al_2](Si_3)O_{12}$

満礬石榴石 Spessartine $\{Mn^{2+}_3\}[Al_2](Si_3)O_{12}$

灰クロム石榴石 Uvarovite $\{Ca_3\}[Cr^{3+}_2](Si_3)O_{12}$

・Z の価数が15と最も大きい鉱物は、**ベルツェリウス石族**と呼ぶ。これらはヴァナジウム酸塩・砒酸塩鉱物に含まれる。

ベルツェリウス石 Berzeliite $\{Ca_2Na\}[Mg_2](As^{5+}_3)O_{12}$

マンガンベルツェリウス石 Manganberzeliite $\{Ca_2Na\}[Mn_2](As^{5+}_3)O_{12}$

パレンツォーナ石 Palenzonaite $\{Ca_2Na\}[Mn_2](V^{5+}_3)O_{12}$

シェーフェル石 Schäferite $\{Ca_2Na\}[Mg_2](V^{5+}_3)O_{12}$

石榴石は珪酸塩鉱物であり、酸化鉱物やヴァナジウム酸塩・砒酸塩鉱物などとはかけ離れているように思われがちであるが、結晶構造は同じということで、このようなはグループ化される。このような分類により、これまであまり意識していなかった鉱物同士の関係がよく分かる。

なお、今回のグリッサリーより詳細な説明が、次のIMA（国際鉱物学連合）の報告書からダウンロードできる。

http://www.minsocam.org/msa/AmMin/TOC/Abstracts/2013_Abtracts/Apr13_Abtracts/Grew_p785_13.pdf

実際に流通しているガーネットのうちで、赤～赤褐色のものはアルマンディン（鉄礬石榴石）で、古くから知られるボヘミア・ガーネットと呼ばれるものはパイロープです。中世にカーバングル（Carbuncle）と呼ばれていたのは、このボヘミア・ガーネットです。

グロシュラー（Grossular：灰礬石榴石）の中で、その外観が緑色をツァボライト（Tsavorite）、オレンジ色をヘソナイト（Hessonite）と呼ばれます。

デマントイド（Demantoid）は、アンドラダイト（Andradite：灰鉄石榴石）の中で緑色のものに使われる名称です。このガーネットは、高い屈折率を持つため反射率が高く、いわゆるテリ（照り）の良いものとなります。なかでもダイヤモンドのような光沢をもつという意味で、デマントイド（Demantoid）という名称になっています。更に、アンドラダイトで、黄色をトパーゾライト（Topazolite）、黒色をメラナイト（Melanite）という名称を使うこともあります。

“マラヤ”あるいは“マンダリン・ガーネット”という名称は、オレンジ褐色のガーネットに使われることがあります。その化学組成から、様々な種類が含まれていることが分かっています。スペッサルティン（Spessartine：満礬石榴石）成分が多く含まれていたガーネットで、かつてマラヤあるいはマンダリン・ガーネットという別名もあります。

このようにガーネットについては、その種類として様々ありますので、化学組成を決めることができるXRFなどによる分析が必要です。

(9) トパーズ

人工放射線処理についての鑑別は困難を極める場合が多いことはダイヤモンドの例から分かることです。これは、自然界の中で、天然の放射能によって着色されている宝石と、人工的につくられた放射線により処理され着色された宝石とは基本的に同じ着色メカニズムによっているとすれば、それらの区別（鑑別）は困難であることは明らかです。ところが、人工放射線処理と天然放射線によって着色された宝石の違いは、メカニズムは同じでも、その照射された放射線の量や種類が違っているので、区別は可能かも知れないです。

放射線処理トパーズで、2つにカッターで切断したところ、熱が伝わりやすい小さな方が青色に変化してしまったのです（下図左）。日光でも緑色の放射線処理トパーズは青色に変化することが知られており、一般に流通しているブルー・トパーズは、放射線処理をおこなった後、加熱によって色調を安定にさせたものです。

また、トパーズはフッ素（F）と水酸基（OH）の量によって性質が異なり、フッ素（F）の多いものと、水酸基（OH）が多いものとは、屈折率に0.02の違いがあります。同じ種類とは思えない程です。ピンク・トパーズは、ブラジルのミナス・ジェライス州オーロ・プレト（Ouro Preto）産の黄色～オレンジ褐色のトパーズを加熱することによって得られることが知られていますが、最近ではパキスタン産未加熱のピンク・トパーズも流通しています。

このトパーズの屈折率に近いものにダンビュライト（Danburite）があります。わが国の宮崎県土呂久鉱山で美しい無色で産出することで有名です。また、褐色のダンビュライトは、極めてトパーズによく似ています。屈折性の中で2軸の負（-）と正（+）の違いということになっていますが、事実上の区別は困難です。トパーズの屈折率を宝石用屈折計で測定すると、 α と β が接近しているために一見すると1軸の正（+）のように見えます。比重の測定が可能であれば有効です。FT-IRやXRFでも区別は可能です。

褐色のトパーズは、シトリン（黄水晶）と同じように見なされることがあったため、インペリアル・トパーズと呼び区別していました。シトリンとの区別には、研磨される前の原石に見られる条線の向きを観察すると区別ができます。その方向が、結晶の長い方向に平行に見られるのがトパーズで、直交するのがシトリン（黄水晶）です（下図右）。

名前の由来：ギリシャ語の探し求めるという意味のtopazos（トパゾス）が語源で、産地である紅海の島が常に霧深く、その島を探すのが困難だったからその名が付けました。

処理の有無：有。（1）放射線照射、（2）加熱処理。オレンジ褐色のトパーズを加熱でピンク色に変えることができる。

頻 度：11月の誕生石として有名。

備 考：誠実・友情・潔白の象徴とされる。



放射線処理（左側）と加熱処理後（右側）



トパーズ（左）とシトリン（右）

(10) トルマリン

トルマリンという宝石は、あらゆる色調を示す宝石としても有名で、ブラジル産で多く産出しています。最近では、パステルカラーの青色や緑色の“パライバ・トルマリン”は、かなり割高な価格で取引されています。加熱処理されることもあります。ブルー・トパーズと同じように照射線処理をされるものもあります。

特に、放射線処理されたピンク・トルマリンと天然のピンク・トルマリンとの区別は極めて困難です。

また、トルマリンはガーネットと同様に様々な鉱物種の総称です。一般的に広く流通しているトルマリンは、エルバイトという鉱物種です。

赤色のトルマリンをルベライト(rubellite)、赤紫色をシベライト(siberite)、青色をインジゴライト(indigolite)、無色をアクロアイト(achroite)と呼びます。

トルマリンは一般に下記のような化学組成で表され、ガーネットと同様にグループ名です。

$(\text{Ca, Na, } \square)(\text{Li, Al, Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+})_3(\text{Al, Mg, Fe}^{3+}, \text{Mn}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{V}^{3+})_6(\text{F, OH})|(\text{OH})_3(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
なかでも

- ・エルバイト(elbaite : $\text{Na}(\text{Al}_{1.5}\text{Li}_{1.5})\text{Al}_6[(\text{OH})_4](\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$)
- ・リディコートイト(liddicoatite : $(\text{Ca, Na})(\text{Li, Al})_3\text{Al}_6(\text{F, OH})|(\text{OH})_3(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$)
- ・ドラバイト(dravite : $\text{NaMg}_3\text{Al}_6[(\text{OH})_4](\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$)
- ・ユーバイト(uvite : $\text{CaMg}_3\text{Al}_5\text{Mg}[(\text{OH, F})](\text{OH})_3(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}]$)

などが知られています。

これらの物理特性は極めて近いため、リチウム(Li)、ナトリウム(Na)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)などの元素を確認することが必要で、そのためにはLA-ICP-MASやXRFのような分析機器が必要です。

外観が赤色、ピンク色、緑色、青色のもの。また、一つの結晶に数種類の色調がみられるトルマリンがあります。トラピッチェ・エメラルドに外観が似ているものを“トラピッチェ・トルマリン”と呼ばれます。これらはエルバイトであることが多く、褐色のものはドラバイト、リディコートイトはエルバイトと密接にみられます。

1990年頃からブラジルのパライバ州で発見された青色や緑色などの鮮やかなエルバイトを、パライバ・トルマリンと呼ばれます。その後、2001年頃からアフリカのナイジェリア、2005年頃からモザンビークでも同様な色調のトルマリンがそれぞれ発見され、これらもパライバ・トルマリンと呼ばれ流通しています。これらには着色元素として銅(Cu)が含まれているのが特徴です。

カボション・カットされたトルマリンでチューブ状の内包物(inclusion)が含まれたトルマリン・キャッツアイがあります。

名前の由来：スリランカのシンハリ語のジルコンの呼び名に由来する。これは、1703年にアムステルダムへジルコンと共にトルマリンが運ばれ、その時に誤って伝えられた。

合成石：なし

処理方法：(1)加熱により一般的に明るくなるとされる(下表)。ただし、ピンク色を約700℃に加熱すると無色になる。(2)放射線を照射させると、ピンク色が濃くなる。

頻 度：ピンク色のトルマリンは10月の誕生石。指輪やペンダントの他、様々な色調のものを集めてネックレスとして流通しています。

・ バライバ・トルマリンの加熱処理（Beckerが行った実験より,1990）

色調（重さ）	加熱温度				
	350℃	400℃	450℃	500℃	550℃
紫青色 (3.997ct)	変化なし	淡灰	帯緑灰	明青	
紫青色(3.008ct)	変化なし	淡灰	帯緑灰	明青	鮮緑
灰青色(8.204ct)	変化なし	灰色がかかる	灰緑	明帯緑青	鮮緑
濃青色(2.774ct)	帯灰	帯緑	明青	明青	鮮帯青緑
青緑(2.007ct)	帯緑	変化なし	明緑	より鮮やか	鮮緑
青灰(1.507ct)	変化なし	変化なし	緑	明緑	鮮緑



各色トルマリン(左下：トピ ッチ・トルマリン)



パライバ・トルマリン



トルマリン・キャッツアイ

（11）トルコ石

この石はトルコを経由してヨーロッパに伝わり広まったためにトルコ石と呼ばれました。その美しい空青色と加工がやり易いことによりすでに古代エジプト時代にはネックレスなどの飾り石として使われていました。

この青色は銅イオンの色によるもので、鉄が銅の代わりに置換されてくると緑色を帯びるようになってきます。この鉱物は、ひすい（ジェイダイト）同様に微小結晶の集合として産するため透明ではありません。また、アメリカ産のスタビライズ・トルコ石（Stabilized turquoise）と呼ばれる、樹脂で固めた処理石があります。この樹脂の確認には、ひすい（ジェイダイト）同様にFT-IRによる検査が有効ですが、ホット・ポイントと呼ばれる簡便な方法もあります。これは熱した針を、トルコ石表面に触れると、樹脂が入っているものは汗をかいたようになります。しかし、この方法は表面に触れるため長時間検査していると柔らかくなった樹脂が焦げる場合がありますので、十分に注意して行って下さい。顕微鏡で熱した針とトルコ石が触れるところを観察しながら行うとよいでしょう。なお、ホット・ポイントは毛皮、木や紙などに字を書いたりする、いわゆる電気ペンのようなもので十分です。また、縫い物用の針をライターなどで熱して使用するのも手軽な方法です。

(12) ラピス・ラズリ

このラピス・ラズリという名前は、6世紀頃 lazurium という言葉が登場し、ラテン語の石 (Stone) とペルシャ語の青色を意味するのが語源とされています。

紀元前 19 世紀、古代エジプト中王朝の第 12 王朝、王女サトハトホルの胸飾り (1894 年 3 月モルガンによって発見) や紀元前 13 世紀新王朝第 19 王朝、ラムセス 2 世の腕輪 (1906 年発見) などにトルコ石やカーネリアンと共にラピス・ラズリが使われていました。

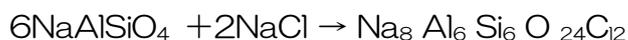
このラピス・ラズリは、ギルソンによってイミテーションが造られていますが、その正体はウルトラマリンと含水リン酸亜鉛の混合物であることが知られています (Schmetzer, 1985)。しかし、組成上ではアフガニスタンから産出されるものに酷似しています。なお、有名産地として、アフガニスタンのヒンデュ・クシュ (Hindukushu) 山やコクチャ (Kokcha) 谷をはじめ、チリのオバール (Ovalle) やロシアのバイカル湖 (Baikal) 畔などです。

この青色の正体はラズライト (Lazurite) と呼ばれる鉱物で、真鍮色は黄鉄鉱 (Pyrite)、白色は方解石 (Calcite)、透明感のある無色鉱物は透輝石 (Diopside) であることが分かっています。即ち、ラピス・ラズリは数種類の鉱物 (ラズライト、黄鉄鉱、方解石など) によって構成された岩石と見なすことができます。

このラズライト (Lazurite) の化学分析を産地別に行ったところ、珪素 (Si) とアルミニウム (Al) の量を比較すると次のように異なることが分かりました。

産地	珪素 (Si) とアルミニウム (Al) の比率
ロシア (バイカル湖) 産	Si/Al = 1.04~1.06
アフガニスタン産	Si/Al = 1.06~1.07
チリ産	Si/Al = 1.11~1.14

また、これらの産地に共通して見られる特徴としては、薄片 (Section) と呼ばれる厚さ 0.03mm 程度に薄くスライスして観察した結果から、一般にミルメカイトと呼ばれる霞石などに見られる特徴的な組織に類似しているのが観察できます。このような組織は、次の反応式から推定できます。



この式は霞石 (NaAlSiO_4) とソーダライト ($\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$) の関係をあらわしたものです。この塩化ナトリウム (NaCl) の部分を石膏 (Gypsum: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) あるいは硫黄 (S) などで置き換えるとラズライトに相当することになります。この反応式のように、霞石が組織を残しながらラズライトに変化した (仮晶と呼ばれる) と考えれば、ラズライトに観察されるミルメカイト様な組織について説明できそうです。

ラズライトという鉱物は、かつて瑠璃石あるいは青金石という和名で呼ばれ、英名 (学名) では Lazurite です。同じラズライトでも Lazulite は、天藍石と呼ばれるリン酸塩鉱物で、栃木県那須鉦山産の葉ろう石中に美しい青~紫色で見られるものが有名です。

(13) その他の鉱物

・月長石（ムーン・ストーン：Moon-stone）

その外観は、その色調の美しさ以外に光の特殊効果と呼ばれるスター効果（アステリズム）、キャッツアイ（猫目）効果（シャトヤンシー）及び変色（アレキ）効果などによって特徴づけられますが、なかでも猫目効果に似ていて、その目がやや不明瞭なシラー効果と呼ばれるものがあります。これは、猫目効果がチューブ（管）状インクルージョンによって生じるのとは異なり、シラー効果は層状組織によるものです。この層状組織は、フェルドスパー・グループ（長石類）と呼ばれるものによく観察できます。ラメラあるいは葉片状と呼ばれることもあります。薄い層を何枚も重ねたような組織をしているのです。この長石類のなかでも、一般にムーン・ストーンと呼ばれるものは、主に鉱物のオルソクレーズ（正長石）が層状（薄い切片を顕微鏡によって数十倍に拡大することによって確認できますが、肉眼では分かりません。）に並ぶことによって、猫目効果と同様な現象を生じることになるのです。また、ラブラドル効果（ラブラドレッセンス）と呼ばれるものは、鉱物のラブラドライト（和名は曹灰長石。長石類の一種であることが、この名から分かります。カナダ東部のラブラドル半島で発見されたことによってラブラドライトと名付けられたのです。）につけられた光の特殊効果の名称です。これも、ムーン・ストーン同様に層状組織をもつラブラドライトが、その層間で光が干渉を起こし、その美しい干渉色を示す色調を持つものです。

・ペリドット（Peridot）

その外観である緑色の色調が、オリーブ（Olive）の実に似ていることによりオリビン（Olivine：橄欖石）とも呼ばれています。鉱物名ではオリビン・グループ（橄欖石族）に属します。鉄を多く含んだフェイヤライト（Fayalite：鉄橄欖石）とマグネシウムを多く含んだフォルステライト（Forsterite：苦土橄欖石）に分類できます。宝石として使われているものは、鉄とマグネシウムが両方とも含まれているもので、クリソライト（Chrysolite）という名称もありますが、この名称は現在ではあまり使われていません。この緑色の色調は、含まれている鉄とマグネシウムの割合によって変化します。

ペリドットは、トルマリンやシンハライトなどに間違いやすい宝石ですが、トルマリンは屈折率の測定で容易に区別ができます。シンハライトとは外観の色調が僅かに異なりますが、決め手は光学的性質で、2軸性の負（-）と正（+）の違いをチェックすることが必要です。しかし、カットされた宝石の屈折率を求める場合には、どうしても限られた部分しか測定できないため、2軸性の正（+）と負（-）を決定するのは、実際上困難な場合が多いのです。

(14) 宝石として使われる有機質—真珠(Pearl)—

鉱物は主として無機的な化学反応によって地球表面あるいは地球の内部からもたらされるもので、今から数十億年前に出来たものもあります。一方、真珠は貝の中で成長したものです。その成長の途中に貝から真珠を取り出したものが宝石として使われます。

真珠が、貝の中から突然現れた時は、大きな驚きだったでしょう。そして、自然界の神秘を感じ、その真珠を大切にしたことでしょう。そのような真珠が、今から 5,500 年前の縄文時代の鳥浜貝塚（福井県）から発見されています。さらに、正倉院にある、太刀や履物の飾りに 4,000 個以上の真珠が使われていたことから分かるように、最も古くから使われていた宝石の一つです。真珠が持つ、その柔らかな輝きや、その独特の形状が、他の宝石には見られない特徴です。

現在でも、6月の誕生石として人気があります。その真珠のほとんどが、人の手によって養殖されています。その養殖技術は、わが国が今から 100 年以上も前に開発したもので、今では世界中でその技術が使われています。最初は、アコヤ貝と呼ばれる貝の養殖から始まりましたが、その後、クロチョウ貝、シロチョウ貝、マベ、イケチョウ貝などの貝にも、技術が応用されています。

かつて中国の仏像真珠やスウェーデンのリンネ（1707～1778）による半形真珠の試みなどが行われていましたが、商品として流通するほど、品数や品質の良いものではありませんでした。

わが国では、御木本幸吉（1858～1954）・見瀬辰平（1880～1924）・西川藤吉（1874～1909）ら三人が真珠の養殖に大きく貢献しました。御木本は“半円真珠”を、見瀬と西川らは“真円真珠”の養殖を成功させました。現在では、ピース式とも呼ばれる“西川式”の方法が使われています。

かつて、海外では養殖真珠と天然真珠の区別が問題となり、イミテーション（模造石）ではないかと疑われ、裁判になりました。しかし、養殖真珠と天然真珠との違いは、真珠の内部の核と呼ばれるものが、人工的なものかどうかの違いであり、その表面は同じものということで、イミテーション（模造石）ではないことが明らかとなり、御木本側の主張が通りました。この時点では、天然と養殖は同じものということになったのです。しかし、この問題は、1980 年代にも持ち上がり、天然真珠、養殖真珠、模造真珠という分類に分けるように、ヨーロッパ各国が主張していました。現在では、養殖真珠を Cultured Pearl と明記して海外で販売するようにしています。

真珠は、貝であれば何でも養殖するというわけではなく、わが国では、アコヤ貝と呼ばれる貝が使われています。別名は”日の出貝”と呼ばれ、その貝の内側の光沢は大変美しく、”真珠光沢”と呼ばれます。この光沢は、霰石（アラゴナイト）と呼ばれる炭酸カルシウムの結晶がレンガ造りの塀のように並んでいることにより、その境目に光が反射することによって見られるものです。

真珠を生み出す貝は、海や湖あるいは沼地に生息しています。それぞれの貝の主な種類を海水産と淡水産に分けると次の表の通り。

	母 貝	名 称	産 地
海水産	アコヤ貝	真珠	日本（三重・愛媛・長崎），中国
	黒蝶（クロチョウ）貝	黒真珠	日本（沖縄），タヒチ
	白蝶（シロチョウ）貝	白蝶真珠	オーストラリア
	マベ	マベ真珠	日本（鹿児島）
	アワビ	アワビ真珠	日本
淡水産	池蝶（イケチョウ）貝	淡水真珠	日本（琵琶湖・霞ヶ浦），中国

流通している真珠は、主として海水産真珠ですが、その産地はわが国をはじめ、オーストラリア、中国などです。一方、淡水産真珠は、わが国の琵琶湖や霞ヶ浦のものがかつて知られていましたが、今は中国産のものが多く流通しています。

河川や湖のような淡水で養殖される真珠は、池蝶（イケチョウ）貝以外の種類も使われており、例えばアメリカではドブ貝を、中国産の真珠は三角貝やカラス貝などを使って養殖しています。

真珠を生み出す貝を母貝と呼び、それぞれから特徴ある真珠を我々にもたらしてくれますが、実際にその母貝をよく観察して、貝のもつ美しい内側の真珠光沢の部分が球形になった場合を想像してみると、その真珠の母貝の種類がある程度分かるようになります。

即ち、真珠は、その貝の内側と同じもの（同質）であるので、アワビ真珠は、その特徴的な緑色によってすぐに分かります。母貝のなかでも、黒蝶（クロチョウ）真珠は、その色調が独特なものであり、可視光線の一部を吸収します。これは、黒色の薄い、シルバーがかった黒蝶（クロチョウ）真珠にも見られるものであり、クロチョウ吸収と呼ばれ、他の真珠にはみられない特有なものです。おそらく、黒蝶（クロチョウ）真珠に含まれる色素によるものとされています。

真珠の構造

真珠の表面は、その独特な渦巻き模様（図15-14-1）が見られるので、イミテーション（模造石）とは簡単に区別がつきます。真珠層と呼ばれるレンガ状に積み重なった霏石（アラゴナイト）の間には、コンキオリンという有機物が、レンガのセメントの代わりの役目を果たしています。そのコンキオリンが、真珠の種類によって異なります。まだ、完全には解明されてはいませんが、アコヤ貝には黄褐色の色素をもち、黒蝶（クロチョウ）貝には緑褐色の色素をもつ有機物ことが知られています。クロチョウに特徴的に見られる吸収は、この色素によるものなのです。

人工的に染料や顔料を染み込ませる方法はわが国で発達し、実際に利用されてきました。何も処理されていない真珠のことを生珠と呼んでいますが、現在ではそのような真珠はほと

んどなく、シミ抜きや漂白などの処理が行われています。



図15-14-1 真珠表面の模様（和田浩爾,1958）

真珠養殖の歴史

わが国の真円真珠が世界で最初に真珠養殖に成功してから百年が経ちます。御木本幸吉が明治26年(1893年)に養殖に成功したのは真円ではなく半円の真珠でしたが、その後の明治40年(1907年)に、西川藤吉と見瀬辰平が相次いで真円の真珠養殖方法を特許で出願しています。いずれも、真珠光沢をもつ貝の裏に接している薄い膜(細胞)を利用します。ちょうど、貝の内臓を包み込むようにして、貝殻との間にあり、外套膜とも呼ばれている細胞です。この外套膜を利用して真珠の養殖を行うこととなりますが、その貝の部位は次の3ヶ所です。

- (1) 貝の生殖巣付近
- (2) 貝の外套膜の中
- (3) 貝殻の内側

このうち、貝の生殖巣付近で養殖する真珠には、外套膜の切片(ピース)を、球形に研磨した貝殻片(核と呼ぶ)に密着させて、真珠を形成させることとなります。したがって、有核真珠と呼ばれるものは、この部位でつくられる真珠です。また、貝の外套膜の中に別な貝のピース(外套膜の切片)を入れてつくる真珠は、無核真珠です。さらに、貝殻の内側には半形真珠と呼ばれる真珠をつくることとなります。

一般に同じ種類の貝を使って養殖が行われますが、マルドブ貝の外套膜をイケチョウ貝に入れると、紫色を帯びた美しい真珠ができることは知られています。ただし、このような異種間の真珠養殖は淡水産真珠に限られているようです。近年のバイオテクノロジーの進歩によって、白蝶(シロチョウ)貝で大きな美しいマベ真珠が誕生する日がくるかも知れません。

天然真珠と養殖真珠

人為的に真珠をつくるきっかけを与えたことによって生成された真珠を養殖真珠と呼び、自然にできたものは天然真珠(図15-14-2 左)と区別されます。養殖真珠の場合は、核と呼ばれる貝殻を球形に磨いたものが入っている(図15-14-2中)ので、真珠のレントゲン

写真とも呼べる X 線による透過写真（図15-14-2右）で見ると明らかになります。ただし、核を使わない無核真珠もあるので、核がないからと言って一概に天然真珠とはいいきれません。



図1514-2 天然真珠の断面（左）と養殖真珠の断面（中，中央部分が核）及び養殖真珠のX線での透過写真（右：中央の黒く見える部分が核）

真珠はまだ人の手によって合成されておりません。今後の大きな課題です。

最近では、コンクパール（図15-14-3）と呼ばれるピンク色の宝石が流通しています。従来の定義では、真珠層を持たないものは真珠（パール）と呼びませんでした。が、例外的にパールという用語を使うことが認められています。

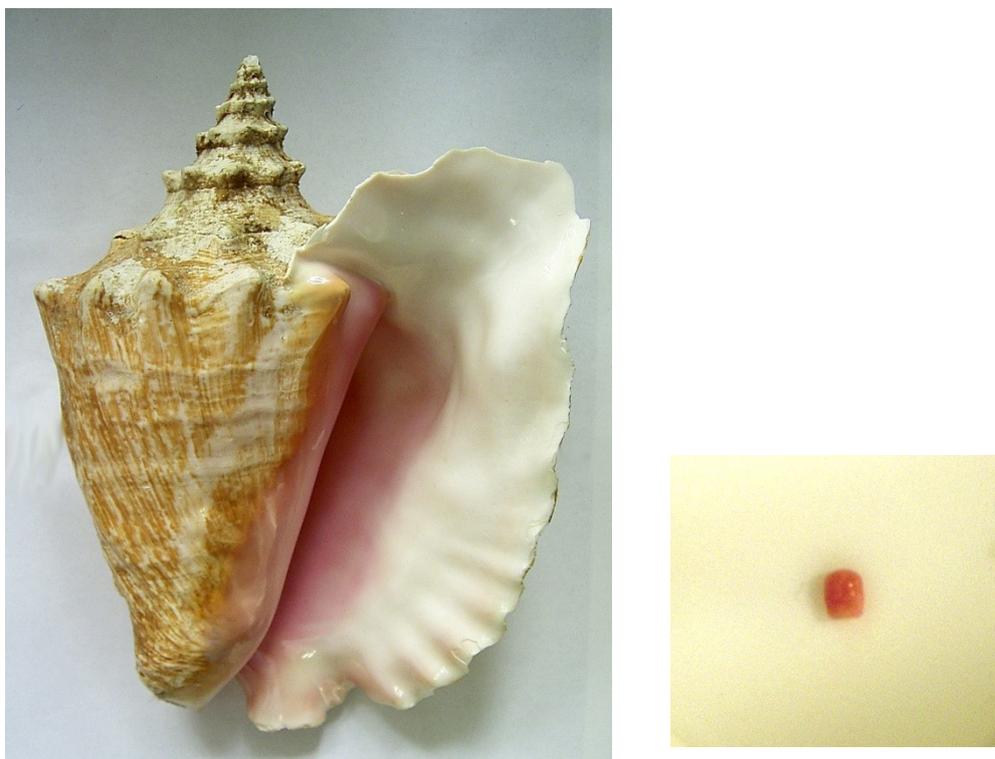


図15-14-3 コンクパール（右）とその母貝（左）

・真珠光沢の作製例

“しじみ”を使い真珠光沢を呈するものをつくる：

真珠特有の真珠光沢(pearly luster)は、霏石(Aragonite: CaCO_3)と有機物(Conchiolin)の層状構造によってもたらされます。そこで、現在、一般廃棄物として処分されていて漁村環境保全上の問題も引き起こされている、“しじみ”の貝殻を処分する方法の一つとして、有機物のPVA(polyvinyl alcohol)を使い、霏石(aragonite: CaCO_3)との層状構造を、多層膜作製方法により人工的に作りだすことで、真珠光沢(pearly luster)を呈するものを作製する試みを紹介します。

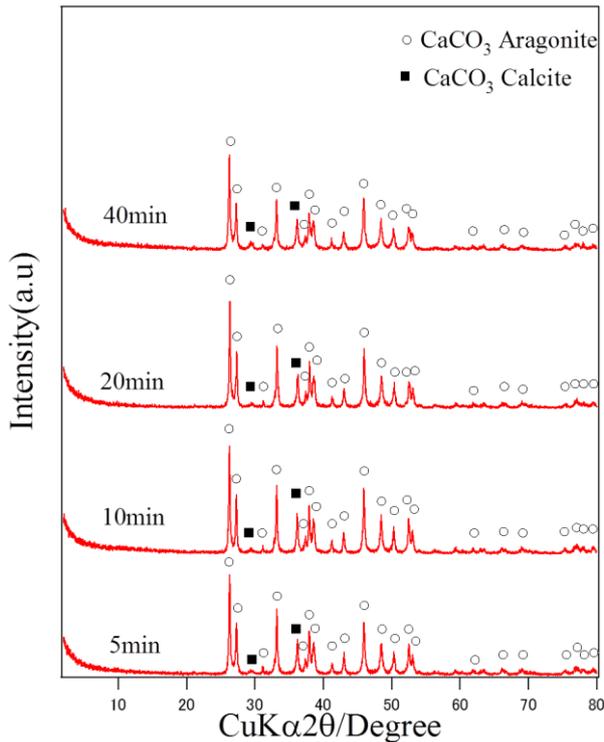


図 15-14-4 “しじみ”の貝殻のX線回折パターン

原料の一つである霏石(Aragonite)は、粗粉碎した“しじみ(Corbiculas)の貝殻”を使います。これを5分~40分間粉碎後(図15-14-4)、エタノール中で超音波を使って20分間振とうします。その後、ストークスの式に従い $10\mu\text{m}$ 以下の粒子を含んだ溶液を取り出します。その後、溶液を遠心分離し、澄み液を取り出し、澄み液(微粒子分散溶液)をガラス基板上に滴下して、 80°C に熱したホットプレート上で加熱後、乾燥させます。そして、ガラス基板上有機溶液を滴下し、スピコートさせて15分間乾燥させます。さらに 180°C に熱したホットプレート上で1.5分間加熱します。これらの操作を繰り返すと綺麗な真珠光沢を持ったものが完成します(図15-14-5)。

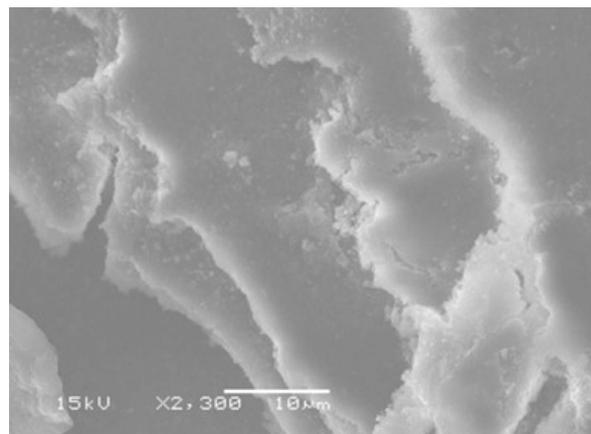


図15-14-5 完成した“真珠光沢”をもったもの(左)とその電顕写真(右)

(15) 宝石として使われるその他の有機質

・珊瑚 (Coral)

高知県の沖合では、明治時代から珊瑚採りがさかんに行われていました。もともとは、仏教伝来と同じ時期にわが国に持ち込まれたようです。その後、江戸時代の鎖国ではオランダとの貿易によって、当時の徳川幕府への貢物として使われていたようです。土佐沖で珊瑚が発見されて以来、高知県の特産品として珊瑚が挙げられるようになりましたが、最近では小笠原諸島の沖合までも出掛けていくようになってしまったようです。

ヨーロッパでは約2万5千年前のドイツで旧石器時代に珊瑚玉が発見されているので、かなり古くから人類とかかわりあっていたようです。

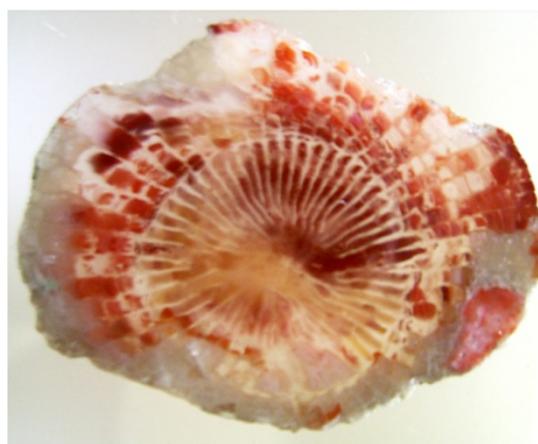
珊瑚に染料を染み込ませたものを、ラマン分光法によって測定したという報告があります (J.P.Poiru,1982)。その報告では、天然珊瑚の色はカチノイドであるとしています。

通常の検査は、実体顕微鏡下において染料の確認を行うこととなりますが、すぐに確認できるような、明らかな染色処理もあります。おそらく、ネックレスとして使用すると、首の回りに染料が抜け落ちて赤い輪ができてしまうことでしょう。

高知県の沖合では、明治時代から珊瑚採りがさかんに行われていました。もともとは、仏教伝来と同じ時期にわが国に持ち込まれたようです。その後、江戸時代の鎖国ではオランダとの貿易によって、当時の徳川幕府への貢物として使われていたようです。土佐沖で珊瑚が発見されて以来、高知県の特産品として珊瑚が挙げられるようになりましたが、最近では小笠原諸島の沖合までも出掛けていくようになってしまったようです。



天然珊瑚の海中での様子(リベリーノ,1986)



天然珊瑚の横断面

珊瑚（サンゴ）の種類

宝石名としての珊瑚は、クラゲと同じ仲間である腔腸動物に含まれます。その中でも花虫綱八放サンゴ亜綱ヤギ目貴重サンゴ類として分類されたものが宝石として使われます。アカサンゴ、シロサンゴ、モモイロサンゴ、地中海サンゴ、（深海サンゴ）と呼ばれるものを加工します。

わが国では血赤サンゴと呼ばれる、血のような色調をしたサンゴが最も好まれます。薄いピンク色をしたボケサンゴ（モモイロサンゴ、別名エンゼルスキンという）は採取量が減ったため、幻のサンゴと呼ばれています。

最近では、珊瑚に染料を染み込ませたものも見かけるようになりました。顕微鏡下で染料の確認が必要です。ネックレスとして使用すると、身に着けている洋服を汚してしまうようなものも粗悪なものもあります。

珊瑚の構造

珊瑚はその断面には木の年輪のような成長模様が見られます。これは、ポリプと呼ばれる小さな白色の動物が増殖しながら、石灰（炭酸カルシウム）成分の沈着物を生成した履歴をあらわしたものです。珊瑚はポリプの棲家となっているのです。

珊瑚の模造石

ギルソンによって模造石がかつて製造されましたが、珊瑚のもつ“木の年輪の模様”が見られないのですぐに区別ができます。

・琥珀(Amber)

かつてヨーロッパでは、バルト海から地中海や黒海沿岸までの交易ルートが、わが国では岩手県久慈地方から奈良の都までの交易ルートがあったようです。それぞれを“アンバー・ルート”と呼ばれています。今でもバルト海沿岸では琥珀が打ち上げられていますし、わが国の岩手県久慈地方をはじめ千葉県銚子の灯台の下でも琥珀が採集できます。なお、最近の産地としては、ドミニカ、シシリー島、コロンビア、メキシコなどが知られています。

琥珀は、かつて針葉樹の樹液が固まったものと思われていましたが、ドミニカ産はヒメネアという豆科の広葉樹起源であることや、岩手県久慈産のものはアラウカリアと呼ばれる南洋杉の葉が入った琥珀もあることが最近の研究で確認されています。



岩手県久慈産琥珀中の昆虫

琥珀がいつごろ生成したのか、ということについては、琥珀を含む地層の年代を知る必要があります。また、琥珀に含まれる昆虫や小動物などによっても時代を推定することができます。わが国の岩手県久慈の琥珀は白亜紀後期ということが分かっています（左図）。

琥珀の模造品

一般には 3,000 万年以上も前に繁茂したある種の松の木の樹脂が固化したものを琥珀と呼びますが、それより新しい時代の樹脂もあります。それをコパルと呼び琥珀とは区別します。

市販されている、エーテル（エチルエーテル）を 1 滴たらすと、すぐベトベトになるので区別ができるとされているが、あまり変化をしないものもあります。赤外線分光分析によって、重合の割合を調べるという方法も知られています。

また、最も多い模造石はプラスチックでしょう。例えばベークライトと呼ばれるフェノール蟻酸アルデヒドは、琥珀より比重が重いので、区別は比較的簡単です。飽和食塩水の中で、琥珀は浮きますが、ベークライトは沈みます。その他、ポリスチレンはベンゼンやトルエンにすぐ溶けるので区別はできます。

・象 牙(Ivory)

かつて象牙は、印鑑の材料として数多く流通していました。ところが、1973 年にワシントンで採択された国際条約である、いわゆる”ワシントン条約”は、絶滅のおそれのある野生動植物の種の国際取引に関する条約であり、現在わが国では輸入禁止となっています。ところが、その象牙の代わりにマンモスの牙が脚光を浴びるようになってきていますが、それらの区別は、象牙とマンモスの牙に含まれているカルシウム（Ca）とスロンチウム（Sr）の比率に違いがあるとされています。

・鼈 甲(Tortoiseshell)

鼈甲は、海亀の一種である、タイマイ（Hawks-bill turtle: *Chelone imbricata*）の背甲あるいは盾状部を加工したものです。外観は、暖かみを持った半透明で黄色と褐色のまだら模様が特徴です。通常は、数枚を重ねて適当な温度で加熱して接着させたものを作ります。それを櫛などに製品に仕上げます。

かつてローマ時代には調度品の象嵌として使用したり、フランスのルイ 14 世の時代にも同様に使われていました。

鼈甲も象牙同様にワシントン条約によって取引が規制されており、わが国では輸入禁止となっています。ところが、その象牙の代わりにマンモスの牙が脚光を浴びるようになってきていますが、それらについては、佐藤ら(1991)によると、象牙とマンモスの牙に含まれているカルシウム（Ca）とスロンチウム（Sr）の比率の違いによって区別ができることを発表しています。

赤色～ピンク色鉱物(物質)の性質表

宝石名・鉱物名 ・物質名	結晶系	屈折率			比重	硬度	多色性	特徴
		$\omega(\gamma)$	$\varepsilon(\alpha)$	複屈折率				
合成ルチル	正方	2.616	2.903	0.287	4.26	6~6.5	弱	ダブルリング
天然ダイヤモンド	等軸	2.417			3.52	10	無	鋭いエッジ
合成ダイヤモンド	等軸	2.417			3.52	10	無	CL像
リチウムニオブート	六方	2.300	2.210	0.090	4.64	5.5~6	強	ダブルリング
天然ジルコン	正方	1.925	1.984	0.059	4.70	7.5	弱	スペクトル
YAG	等軸	1.832			4.55	8~8.5	無	浸液
天然アルマンディン	等軸	1.78~1.81			3.95~4.20	7.5	無	分光特性
天然スペッサルティン	等軸	1.81以上			4.10~4.20	7~7.5	無	スペクトル
天然コランダム	三方	1.770	1.762	0.008	4.00	9	強	インクルージョン
合成コランダム	三方	1.770	1.762	0.008	4.00	9	強	気泡・カブリ
天然クリソベリル	斜方	1.755	1.746	0.009	3.73	8.5	強	二軸性
合成クリソベリル	斜方	1.756	1.747	0.009	3.70	8.5	強	インクルージョン
天然パイロープ	等軸	1.73~1.74			3.60~3.70	7~7.5	無	分光特性
合成スピネル	等軸	1.730			3.64	8	無	光学的な歪
天然スピネル	等軸	1.718			3.60	8	無	インクルージョン
天然クンツァイト	単斜	1.675	1.660	0.015	3.18	7	強	蛍光
天然アンダリュースサイト	斜方	1.643	1.632	0.011	3.17	7~7.5	強	強い三色性
天然トルマリリン	三方	1.644	1.624	0.020	3.04	7~7.5	強	強い二色性
天然トパーズ	斜方	1.637	1.629	0.008	3.53	8	明瞭	二軸性
天然ベリル	六方	1.594	1.585	0.009	2.84	7.5~8	明瞭	一軸性
天然クォーツ	三方	1.544	1.553	0.009	2.65	7	弱	一軸性
天然こはく	非晶質	1.540			1.08	2~2.5	無	再製に注意
ガラス	非晶質	1.44~1.77			2.3~4.5	5	無	気泡, 脈理
天然オパール	非晶質	1.39~1.45			2.15	5~6.5	無	遊色
合成オパール	非晶質	1.44~1.45			2.03~2.06	4.5~6	無	亀甲模様

青色鉱物(物質)の性質表

宝石名・鉱物名 ・物質名	結晶系	屈折率			比重	硬度	多色性	特徴
		$\omega(\gamma)$	$\varepsilon(\alpha)$	複屈折率				
合成ルチル	正方	2.616	2.903	0.287	4.26	6~6.5	弱	ダブルリング
天然ダイヤモンド	等軸	2.417			3.52	10	無	導電性
合成ダイヤモンド	等軸	2.417			3.52	10	無	CL像
リチウムニオベート	六方	2.300	2.210	0.090	4.64	5.5~6	強	分光特性
天然ジルコン	正方	1.925	1.984	0.059	4.70	7.5	弱	分光特性
YAG	等軸	1.832			4.57	8~8.5	無	UV-フィルターで赤色
天然コランダム	三方	1.770	1.762	0.008	4.00	9	強	インクルージョン
合成コランダム	三方	1.770	1.762	0.008	4.00	9	強	気泡,カーブライン
合成スピネル	等軸	1.730			3.64	8	無	光学的な歪
天然スピネル	等軸	1.718			3.60	8	無	インクルージョン
天然ソイサイト	斜方	1.700	1.690	0.010	3.30	6.5~7	強	強い三色性
天然トルマリン	三方	1.644	1.624	0.020	3.04	7~7.7	強	強い二色性
天然トパーズ	斜方	1.637	1.629	0.008	3.53	8	明瞭	二軸性
天然アクアマリン	六方	1.580	1.575	0.005	2.71	7.5~8	明瞭	処理石に注意
天然クォーツ(処理)	三方	1.544	1.553	0.009	2.65	7	弱	一軸性
合成クォーツ	三方	1.544	1.553	0.009	2.65	7	弱	光学的な歪
天然アイオライト	斜方	1.551	1.542	0.009	2.61	7~7.5	強	強い三色性
プラスチック	非晶質	1.49~1.67			2.00	3	無	温感
ガラス	非晶質	1.44~1.77			2.3~4.5	5	無	気泡, 脈理
天然オパール	非晶質	1.39~1.45			2.15	5~6.5	無	遊色
合成オパール	非晶質	1.44~1.45			2.03~2.06	4.5~6	無	亀甲模様

緑色鉱物(物質)の性質表

宝石名・鉱物名 ・物質名	結晶系	屈折率			比重	硬度	多色性	特徴
		$\omega(\gamma)$	$\varepsilon(\alpha)$	複屈折率				
天然ダイヤモンド	等軸	2.417			3.52	10	無	人工着色に注意
合成ダイヤモンド	等軸	2.417			3.52	10	無	分光特性
天然アンドラナイト	等軸	1.875			3.85	6.5~7	無	分光特性
天然ジルコン	正方	1.920	1.962	0.042	4.40	7.5	弱	分光特性
YAG	等軸	1.832			4.55	8~8.5	無	分光特性
天然ジルコン (0-タイプ)	正方	1.810	1.815	0.005	4~4.2	6	弱	分光特性
天然コランダム	三方	1.770	1.762	0.008	4.00	9	強	インクルージョン
合成コランダム	三方	1.770	1.762	0.008	4.00	9	強	気泡,カーブライン
天然エビドート	単斜	1.768	1.729	0.039	3.45	6.5	強	二軸性
天然クリソベリル	斜方	1.755	1.746	0.009	3.73	8.5	強	二軸性
天然グロッシュラー	等軸	1.745			3.65	7~7.5	無	UV-フィルターでピンク色
合成スピネル	等軸	1.730			3.64	8	無	蛍光
天然スピネル	等軸	1.718			3.60	8	無	インクルージョン
天然ダイオプサイド	単斜	1.701	1.675	0.026	3.29	5~6	弱	分光特性
天然ペリドット	斜方	1.690	1.654	0.036	3.34	6.5~7	弱	ダブルリング
天然エンスタタイト	斜方	1.668	1.658	0.010	3.25	5	弱	分光特性
天然アンダリュースサイト	斜方	1.643	1.632	0.011	3.17	7~7.5	強	強い三色性
天然トルマリリン	三方	1.644	1.624	0.020	3.04	7~7.5	強	強い二色性
天然トパーズ	斜方	1.617	1.609	0.008	3.56	8	明瞭	二軸性
天然ベリル	六方	1.583	1.577	0.006	2.70	7.5~8	明瞭	インクルージョン
天然エメラルド	六方	1.583	1.577	0.006	2.72	7.5~8	明瞭	インクルージョン
合成エメラルド(フラック型)	六方	1.563	1.560	0.003	2.65	7.5~8	明瞭	インクルージョン
合成エメラルド(水熱型)	六方	1.573	1.568	0.005	2.68	7.5~8	明瞭	インクルージョン
合成クォーツ	三方	1.544	1.553	0.009	2.65	7	弱	一軸性
ガラス	非晶質	1.44~1.77			2.3~4.5	5	無	気泡, 脈理

16. 鉱物の研磨

ここでは、鉱物（宝石）や岩石の研磨とその方法について紹介します。

・鉱物や岩石の研磨

鉱物や岩石の切断から始まり、その表面を、150番→400番→800番→1,500番→3,000番という順序で、研磨材の粒子のサイズを粗いものから細かいものへと変えて研磨します。そして、3,000番の後に1 μ m（ミクロン）の研磨材で磨いて出来上がりです。この出来上がった研磨片は、金属顕微鏡や電子顕微鏡などを使って観察・分析されます。

また、研磨薄片と呼ばれる、ガラス板に貼り付けた鉱物（厚さは約0.05ミリ）を1ミクロンで磨いたものを作成すると、偏光顕微鏡観察はもとより、EPMA（Electron Probe Micro Analyzer：電子プローブマイクロアナライザー）による化学分析ができる試料となります。詳細は80頁以降を参照。

・宝石の研磨

宝石は平らな面で囲まれたファセット・カットあるいは曲面のカボション・カットに研磨されます。研磨された形状は、一般に左右対称なため、鉱物や岩石を四角形や楕円をイメージしながら整形することから始めます。研磨する鉱物は、原石（Rough Stone）と呼ばれますが、その原石の形態は四角柱や六角柱という幾何学的な形態をもつ鉱物の自形であったり、その結晶が割れて不定形になったりしたもののなので、一つ一つの原石をよく観察しながら、研磨をすすめることとなります。その研磨の工程には、荒摺りと仕上げ摺りというように大別されます。

荒摺りは、原石から仕上がりの製品を想像しながら行い、そのサイズを決定してしまうので、大切な工程です。なぜなら、削って無くしてしまう量をいかに少なくして仕上げるのが重要だからです。歩留まりを上げると言いますが、削る量を抑えることができれば、それだけ原石を無駄にしていないこととなります。重いものほど高い評価を得られるのは明らかです。

仕上げ摺りとは、整形した面を鏡のようにピカピカにすることですが、もう一つ重要なことは、図のようにきちんと左右対称なものになっているかどうか絶えず確認しながら行うことです。

研磨を行う際には、ある程度の器材が必要となります。整形するための切断機や表面を磨くための研磨材などです。切断機には、ダイヤモンドが付着した円盤状の歯が回転して、原石を整形するものが使われています。さらに、研磨材については、荒摺り用にはエメリーと呼ばれる酸化アルミニウム（コランダムと同じ）をはじめ、炭化珪素、炭化硼素などの微粒子が使われます。仕上げ用には荒摺り用より細かい粒子の酸化アルミニウムや酸化クロム、酸化セリウム、酸化鉄（べんがら）などの他、最近ではダイヤモンドが使われています。

荒摺りから仕上げ摺りまでは、通常は何回に分けて研磨することとなります。例えば、原

石を切断後に 200 ミクロン (μm) 程度の粗い粒子で磨き、そして 20 ミクロンの粒子というより細かい研磨材で磨くという具合です。そして、最後には酸化クロムや 1/4 ミクロンのダイヤモンドのような超微粒子で磨くと鏡のような面に仕上がります。研磨とは表面の凹凸を少しずつ小さくすることです。

研磨材は水と一緒に回転する金属製の円盤の上に塗布するようにしながら原石を磨くことになります。この時に注意しなければならないのは、粒子のサイズを小さいものに替える時には研磨用の円盤を水できれいにしておくことです。粗い粒子が残っていると宝石の表面にキズが残ることになるからです。一般には、最終的な仕上げに使用する研磨用の円盤は、仕上げ専用になっています。

研磨材の番号（メッシュの数）と粒のサイズ（ μm ：ミクロン）

番号(メッシュの数)	100	400	800	1,000	1,500	3,000	10,000	18,000
粒のサイズ(ミクロン)	170	33	16	13	8	4	1	0.3

・ 鉱物や岩石の薄片・研磨片づくりの方法

薄片が我が国に伝えられたのは、小藤文次郎（1856-1935）がドイツから持ち帰ったのが始まりとされています。かつて渡辺武男によって 1938 年に発表された新鉱物の小藤石 (kotoite, $Mg_3(BO_3)_2$) は、小藤文次郎に因んで名付けられたものであり、鉱物の記載には X 線回折による結晶構造の解析や、化学分析と共に、光学的な特性を調べる上で、欠かすことのできないのが薄片です。現在でも薄片の重要性は変わりませんが、その手法は日進月歩です。特に脆い鉱物・岩石の薄片製作には効力を発揮する接着剤や切削力の強いダイヤモンドが入手しやすくなっていて、製作するための環境はますます良くなっています。しかし、誰でもが手軽に作製できるかと言うとそうでもありません。自然のものを対象としているため、同じ鉱物・岩石でも一つ一つの個体に違いがあるため、少なからず薄片製作にも影響を与えています。即ち、同じ鉱物・岩石でも全く同じ手法では薄片をうまく作製できないことがある、ということです。薄片を作製する場合には、その都度工夫しながら行う必要があります。

I 試料の切断

野外で採集した試料（岩石・鉱物）には、土砂や植物などが付着しています。研究対象が粘土鉱物などのように水で洗うと流れてしまうものでない限り、流水でよく洗ってから切断します。

切断機は大きな音が出るので、耳栓や耳当てを使い、さらに切断した岩石片や鉱物片から保護するためにゴーグル（防護メガネ）も着用して作業を行います。

脆い岩石・鉱物やひび割れなどのクラックがある場合は、樹脂などで固めから切断します。エポキシ系やポロエステル樹脂など様々なものがあります。小さな割れや脆いものには、粘性が低く浸透しやすいシアノアクリレート系の接着剤（図 16-1）



図 16-1：商品名アルテコ

などを使うとよい。ただし、この接着剤は熱に比較的弱いいため、加熱して硬化させて使用するエポキシ系接着剤であるペトロポキシとの併用は避ける。また、使用する際は、試料をよく乾燥させること。

- ① 最初は試料（岩石・鉱物）を切断機（岩石切断機：図 16-2）で、適用な大きさにする。通常は、貼りつけるスライドガラスの大きさに合わせる。岩石・鉱物の場合は、その大きさが 28mm×48mm なので、それより小さくする。

- ② 岩石切断機の刃と試料の位置関係は、円形である刃の接線と平行に試料の切断面を当てるとよい。試料が当たる面が刃に対して斜めになると、うまく切断できずに刃が反ってしまうことがある。反ってしまうと、刃が欠けたりする恐れがあるので注意が必要である。切断中に刃が反ってしまった場合は、台を手前に引いて、再度切断を試みる。
- ③ 切断した試料の裏側も先ほど切断した面と平行に切断しておくとうい。これは、後でスライドガラスに試料を接着する時に、裏側が凸凹しているとやりにくい。小さな試料なら、アルミホイルを折ったり丸めたりして試料を固定するとよい。



図16-2：岩石切断機



図16-3：岩石切断機（図左）には集塵機（図右）が取り付けられている

- ④ 岩石切断機で試料を切り終わる時、力を入れすぎると試料が割れたりすることがある。これを避けるため、最後に切り終わる時には、少し押す力を弱めるとよい。なお、刃の切れ味が悪くなったら、レンガや砥石等の柔らかく均一なものを切ってドレッシング(目たて)するとよい。これは刃に付着しているダイヤモンド砥粒の間に挟まった岩石片を取り除いたり、削られたダイヤモンド砥粒の下にある新しいダイヤモンド砥粒を表面に出すためである。

- ⑤ 切り出した試料の裏側は、赤鉛筆などで試料番号などを書いておく事。ただし、超音波洗浄器で洗ったりすると落ちてしまうことがあるので、作業中はこまめに試料番号をチェックするとよい。特に一度に多くの薄片を製作する場合は、試料の特徴（形や色など）をスケッチ（メモ）して残すとよい。
- ⑥ 試料の切断中のトラブル（例：岩石切断機の刃の破損など）は、思わぬ事故につながる場合がある。自分が起こしたトラブルでなくても、気づいた時点で必ず薄片室の担当者に報告をする事。また、水や油を使用しないで切断する時は、必ずマスクを着用し、集塵機（図16—3、右図）が設置してある岩石切断機（図16—3、左図）を使用し、集塵機も起動させる事。

II 岩石・鉱物の研磨（1）：回転研磨機を使用した研磨

観察したい試料の面を回転研磨機(グラインダー)（図 16-4）に研磨材を塗布して研磨する。グラインダーは専用のものであるが、水平に回転する盤であればよい。研磨材は炭化珪素（SiC，商品名：カーボランダム）で、#800（約 20 μ m），#400（約 30 μ m）及び#150（約 100 μ m）を使う。数字が大きいものほど細かい。



図16—4（左）：2連式のグラインダー。使用する研磨材は左右で変える（左：#800，右：#400）。電源スイッチは手を使わずに膝で押せるようになっている



図16—5：回転盤の傍らには水と研磨材が入った容器（左：#400，右：#150）。研磨材を変える時は手や回転盤をよく洗う。水の容器も必ず変える。

- ① グラインダーの回転盤の傍らには、水を入れる容器（片手が自由に動ける大きさのもの）と研磨材が入った容器も用意する（図16—5）。これも細かい（番号の大きい）ものから準備する。後片付けも同様の順序で行う。

- ② グライNDERを回転させ、水が入った容器から片手で水をすくい取って、盤の中心付近に撒く。その後、水で溶いた研磨材をひとつかみ取って同様に撒くと、中心から遠心力で外側に拡散する。
- ③ 試料を両手でしっかり持ち、試料を真上から押さえるようにして回転盤に接触させる。最初は、回転盤の動きで試料が飛ばされることがあるので注意する。研磨する面がほぼ平らなら、#800 からでよいが、面に凹凸のある場合は#150 もしくは#400 から始める。
- ④ 研磨材を細かいものに変えるタイミングは、面の凹凸がなくなり、一つの面になればよい。岩石切断機の刃の跡が残っていれば、その跡がなくなるまで研磨する。試料を流水でよく洗ってから送風機で乾燥させ、研磨面に光を反射させて天井の照明を見るようにするとよい（図16—6）。凹凸があると、反射して見える照明（蛍光灯）が一様に見えない。湾曲していたり、一部が磨りガラス状に見えたりすると、やり直す。

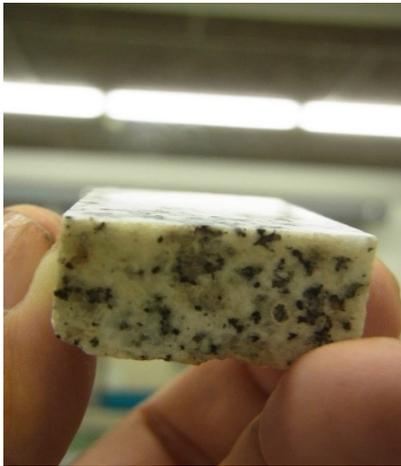


図16—6：磨いた面の表面をよく観察する

- ⑤ グライNDERの回転盤上に研磨材と水があることに心掛ける。研磨するためには研磨材と水は欠かすことができない。試料が回転盤に貼り付きそうになったら、水と研磨材を補充する。最初で、慣れない場合は、グライNDERを一度止めてから、回転盤に水と研磨材を塗布する。慣れてくると試料を片手で押さえながら、もう一つの手で水と研磨材が補充できるようになる。回転盤に試料が貼り付くと怪我の原因になるので、貼り付きそうになったら、急いで電源のスイッチを押す。
- ⑥ 研磨する時は、回転盤全体を大きく利用するとよい。小刻みに研磨すると、指の力を入れた箇所が削れて平らにならないことがあるので気を付ける。
- ⑤ #800 研磨の終了時には、スライドガラスの稜線を取る（面取り）を行っておくと、角で怪我したり、次の工程の研磨（琢磨）時に研磨布（クロス）を傷つけない。
- ⑥ 回転盤の使い終わりには、回転盤上を清拭後、回転させて完全に乾かしてからスイッチを切る。
- ⑦ 研磨材が少なくなったら、補充しておく。その際、粒度を間違えないように気を付ける。補充する際は、必ず細かい（番号大きい）順で行う事。

- ⑧ 本学の授業や講習会では、一度に実習する学生が多いため、#150・#400 が同じ回転盤を使い、研磨材を変える時に、その都度清拭して使うが、授業や講習会の終了後は、研磨材の粒度ごとに回転盤を変えるとよい。その際は、#800 の回転盤で#150 あるいは#400 を使用しない事。

岩石・鉱物の研磨（２）：ガラス板を使用した研磨

グラインダーによる#800 の研磨面が仕上がったら、ガラス板を使った研磨に移る。図16-7参照。研磨材としてアルミナ (Al_2O_3) #1500 (約 $8\mu\text{m}$) と#3000 (約 $4\mu\text{m}$) を用いる。まず#3000 を用意し、次に#1500 を用意する。



図16-7：ガラス板をセットした台。研磨材、水、均し石などを用意する。準備は研磨材の番号の大きいもの（細粒）から行う。後片付けも同じ順序で行う。

- ① ガラス板を使用した研磨では、研磨台上によく洗ったガラス板をセットし、その上に#3000 の研磨材をスパチュラに1杯盛る。水を垂らし、研磨材と水を混ぜる。専用の均（なら）し石を使用するとよい。次に#1500 も別なガラス板に同様にして準備する。
- ② 最初は#1500 を使い、研磨する面を下にし、指で真上から押さえて、ガラス板全体を使って研磨する。研磨が試料の面全体にゆきとどいて均一になれば、#1500 段階は終了。ガラス板研磨は立った姿勢で行う方が、力が均一にかかりやすい。
- ③ #1500, #3000 終了毎に試料は流水でよく洗う事。多孔質と思われる岩石などは、超音波洗浄機を使い、隙間に入り込んでいる研磨材等を落とす。超音波を長く使用すると試料が割れたりする恐れがあるので、10~30秒でよい。使用後は流水で洗浄してから送風機でよく乾かす。ただし、脆弱な試料については、超音波をかけない方がよい場合もあるので、試料の状態をよく観察しながら行うこと。

Ⅲ 接 着

ガラス板による#3000の研磨面が仕上がったら、スライドガラスに貼りつける。

一般的に試料のスライドガラスへの接着にはエポキシ系樹脂が使われる。加熱により硬化する樹脂（商品名：ペトロポキシなど）と時間をかけて硬化させる非加熱型のもの（商品名：スーパーセメダインなど）がある。また、アクリレート系樹脂の光硬化型も使われる。さらにシアノアクリレート系樹脂（商品名：アロンアルファ、シアノボンドあるいはアルテコ（図17-1）など）も使用されることがあるが、キシレンなどの有機溶剤で剥がすことができるため、両面研磨片を作成する際に使用する。

それぞれの接着剤に粘性・加熱温度・硬化時間・硬化時の剛性・気泡の発生具合などの長所・短所があるので、試料の性質や観察方法によって接着剤を選ぶ。

(1) ペトロポキシによる接着

140℃程度で加熱させて固化する接着剤のため、粘土鉱物などのような含水鉱物を含む岩石を作製する場合には不向きであるが、現在では広く使用されている接着剤の一つである（図16-8）。

- ① 試料を180℃のホットプレート上で30分以上乾燥させる（図16-9）。あるいは、恒温槽60～100℃で一晩乾燥させる。ホットプレートや恒温槽には、接着する面を上にしておく。また、直に置くのではなく、アルミホイルを敷いておくと、他の付着物の混入を防ぐ（コンタミを避ける）ことができる。



図16-8：ペトロポキシ（商品名）は主剤（上図左）と硬化剤（上図右）を10：1で混合させる。シリンジ（下図）を使って正確に測る。



図16-9：ホットプレートにはアルミホイルを敷く。試料とスライドガラスも小さく切ったアルミホイルを下に敷く。

- ② ペトロポキシは冷蔵庫の中（電源は入っていない）にあるので、それを使う。量が足りない場合は、調合してつくることになる。調合は、ドラフトの下にある主剤と冷蔵庫の上にある硬化剤を、10：1（体積比）の割合で混ぜる。主剤を容器に入れた量が5mlなら硬化剤を0.5ml正確にシリンジで採ってよく攪拌させから使用する。この時、室内が下が

ると硬化剤が二液に分離することがある。そのような場合、80 度のお湯あるいは恒温槽で温めて、分離がなくなってから使用する。

- ③ 接着剤の準備が整ったら、ホットプレートの温度を 140℃に下げる。次に作業台に紙を敷く。ピンセットで試料を取り、紙を敷いた作業台上に貼り付け面を上向きのまま降ろし、120℃くらいまで冷ます。
- ④ スライドガラスをホットプレートの上に置く。スライドガラスの埃などはキムワイブなどで取り去り、貼り付け面を上向きにしておく。
- ⑤ ペトロポキシを、試料の中心付近に 1~2 滴垂らす。この時、調合の際に使用した攪拌棒が直接試料に触れないように注意する。上から距離を置いて垂らす、もしくは爪楊枝をその都度使い捨てにするなどして、岩石粉粒などがカップの中を汚染しないようにする。多くの人が共同で使うものなので、細心の注意を払うこと。
- ⑥ スライドガラスをペトロポキシを垂らした側の端からゆっくり倒すように被せて数秒置く。
- ⑦ ピンセットのつなぎ目側を使って、スライドガラスを前後左右にずらす作業を繰り返しながら、気泡を追い出す。コツは、力を入れすぎず、中心から外側に向かってゆっくり行う。気泡がうまく追い出せない場合は、もう一度同じ作業を試みる（加熱して固化させるまでは何回も繰り返せる）。
- ⑧ 貼りつけたスライドガラスをつけたスライドガラスを下側にして、140℃ホットプレートで 15 分間硬化させる。固まったかどうかを確認するには、周囲のはみ出た樹脂を、楊枝などで触れてみる。
- ⑨ 長時間、ペトロポキシで試料をスライドガラスに張り付けた状態で長時間放置すると、スライドガラスが割れたり、試料が剥がれたりするので、次の作業にとりかかった方がよい。

(2) スーパーセメダインによる接着

加熱せずに接着させる場合に使われる（図 16—10）。

- ① 試料を洗浄して十分に乾燥させたのち、研磨面を上向きにして試料台の上に置く。
- ② 40~50℃のホットプレートに載せておく。接着面は上になる。



図16-10：スーパーセメダインはA液とB液を等量混ぜて使う。

- ③ ガラス板の上で、スーパーセメダインの主剤と硬化剤（図16-10）を1:1の割合で使う分だけ混ぜる。シリンジを使うと正確な量になる。調合の際は、白濁するまで根気よく混ぜる。白濁後、ガラス板ごと40～50℃のホットプレート上でもよくかき混ぜる。この時、気泡が大きくはじけて少し透明になってくる。
- ④ スーパーセメダインをスライドガラス上に延ばし、そのスライドガラスを岩石チップの上に被せる。スーパーセメダインが試料面全体に行き渡るように、力をかけずにスライドガラスを水平に1～2回転させる。
- ⑤ ピンセットを使ってスライドガラスを前後左右に軽くずらす作業を繰り返しながら、余剰なスーパーセメダインと一緒に試料とスライドガラスの間の気泡を追い出す。
- ⑥ 試料の周りにはみ出たスーパーセメダインを楊枝などで取り除く。
- ⑦ 接着後、水平な場所でスライドガラスを下側にして置く。25℃程度の室温で2～3時間放置する。スライドガラス上の試料がずれることがあるので、時々チェックするとよい。動かなくなったら夏場では2時間以上、冬場の場合は6時間以上で実用強度に達するとされているが、できれば一日程度水平な場所に置いた方がよい。
- ⑧ 作業を急ぐ場合は、接着後3～4時間が過ぎて（ある程度硬化して）から40～50℃のホットプレートまたは恒温器に2時間置いて硬化を促進させることができる。

（3）光硬化型による接着：

気泡が入りやすい岩石・鉱物には向いている（図16-11・12）。



図16—1 1：袋に入っている光硬化型接着剤（左図）と接着する試料（右図）



図16—1 2：光硬化型接着剤を紫外線で固化させる。

- ① 試料を洗浄して十分に乾燥させたのち、研磨面を上向きにして試料台の上に置く。
- ② スライドガラスを 40～50℃のホットプレートに載せておく。接着面は上になる。
- ③ 光硬化型の接着剤を冷蔵庫から取り出して、試料の中心付近に 1～2 滴垂らす。スライドガラスを試料に覆いかぶせる。スライドガラスの重みで接着剤が広がり、試料全体にわたるようにスライドガラスを多少動かす。試料からはみ出た接着剤は、楊枝などで取り除く。なお、光硬化型樹脂は、周囲からの紫外線で固化が進むので、接着剤の蓋は使用後すぐに閉め、容器の袋に入れておく。
- ④ 試料に接着剤がゆきわたったら、試料とスライドガラスの間に気泡が入っていないかどうか確認する。気泡が入っていたら、外側に出すようにスライドガラスをゆっくり動かす。
- ⑤ 固化には、机上の紫外線ライトで25分程度照射させる。最初は、スライドガラスを下にして5分間照射させて、試料が動かないようにさせる。この時、携帯用の紫外線ライト（長波）の照射によっても動かなくなる。その後、試料を下にして20分間、紫外線ライトを照射させ硬化を十分に進行させる。

IV 成 形

スライドガラスへの接着が完了したら、スライドガラスの裏面（研磨面の裏側）の端にダイヤモンドペンで簡単な情報（試料番号など）を記入しておく。次に、いわゆる二次切断と呼ばれる成形により、研磨の時間を短縮させることができる（図17—13・14）。

(1) スライドガラスに貼り付けた試料の厚さを2～3mmまで成形(二次切断)する。



図16-13：成形用の岩石切断機



図16-14：スライドガラスに貼り付けた試料の厚さを2～3mmまで薄くする

(2) 試料をさらに薄くしたい場合は、精密切断機で二次切断することがある。

V 薄片の研磨(1)：グラインダーを使用した研磨

岩石・鉱物の研磨と同様にグラインダーを使ってカーボランダム#150, #400, #800と段階的に研磨する。

- ① スライドガラスに貼り付いた試料をグラインダーで研磨する場合、試料の一面を研磨する時と同様に、回転盤に水で溶いた研磨材と使って削ることになる。この時、左右の人差し指と中指でスライドガラスを押さえ、スライドガラス下の研磨材の様子を見ながら、回転盤全体を使って研磨する。水が少なくなったら、試料を回転盤から離して、回転盤に水と共に研磨材を補充すると効率的に研磨が進む。回転盤の水が減って、スライドガラスが貼り付くと怪我の原因となるので、回転盤が乾きそうになったら、膝を使って回転盤のスイッチを押して、水と研磨材を足す。
- ② #150, #400では力を入れて研磨するが、あまり力を入れすぎるとスライドガラスが割れることがある。#800では少し力を弱めて慎重に研磨すること。削りすぎたら元には戻らないので要注意。

- ③ #800 では偏光顕微鏡で厚さを確認する。石英が含まれている場合、その干渉色がオレンジ色を示す程度まで薄くするとよい。図16—15・16参照。軟らかい試料や部分的に薄くなってしまった場合は、ガラス板を使って研磨する。
- ④ それぞれの段階が終わったら、回転盤を洗い、試料と手も綺麗に洗う。これは、粗い研磨材をおとすため。次の細かい研磨材とは決して混ぜないこと。

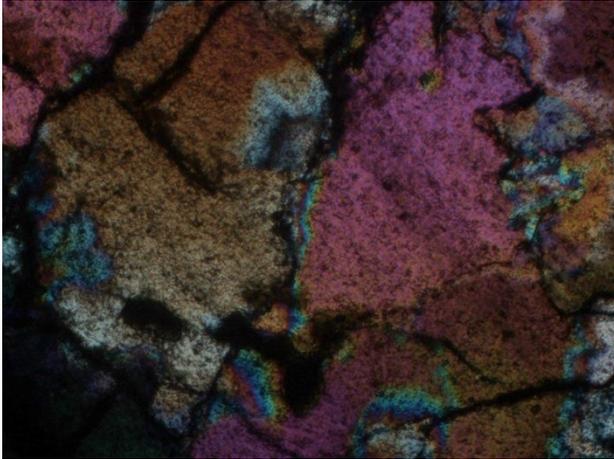


図16—15：#400 では石英は濃ピンクなどカラフルに見える。

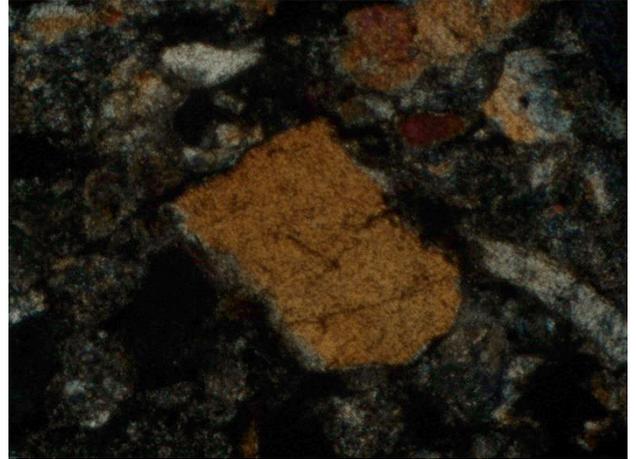


図16—16：#800 では石英がオレンジ色まで薄くする。

薄片の研磨（2）：ガラス板を使用した研磨

岩石・鉱物の研磨と同様にガラス板を使って#1500, #3000, #6000 と段階的に研磨する。ただし、偏光顕微鏡を使っての観察のみの場合（EPMAなどで表面観察や分析を行わない時）は、#3000での研磨終了後は、カバーガラスによる接着を行う。

- ① 研磨材を、#1000→2000→#3000 と段階を追って順次薄片を薄くしていく。硬い鉱物が多く含まれている場合は、研磨材としてボロンカーバイト（ B_4C ）を使用するとよい。研磨材が多いとムラが出来やすくなり、軟らかい部分が削り過ぎて均一に薄くならないことがあるので、量は少なめがよい。ただし、大きくすり減らす必要がある場合は適宜研磨材を足して、均し石でよく均してから研磨すること。水を多いと同様にムラがしやすいので注意する。
- ② #1000, #2000 では、円運動よりも直線的な運動で研磨を行うほうが均一に薄くなる。円運動は、部分的に厚い（硬い鉱物が多い）ところを薄くするときに行うとよい。

- ③ #3000 になると薄片の完了まであと一歩なので、偏光顕微鏡で厚さをよく確認しながら作業を行うこと。均一になるように十分注意しても岩石・鉱物の硬さが場所により異なるため、厚さにムラができることがある。このように部分的に厚いところが出来てしまった場合は円運動により薄くする。
- ④ #1000, #2000 は「目的の厚さに近付けるために磨り減らす」、#3000 は「表面を滑らかにする」という意識で研磨を行うとよい。
- ⑤ 各段階において偏光顕微鏡でこまめに薄片全体の厚さをチェックする。石英が含まれている場合、最終的には図16—17のように灰色まで薄くする。ただし、研究目的により長石類を黄色で終わらせる場合もある。なお、そのあと琢磨を行う場合は、全体的に少しずつ厚めで次段階に移行する。また、柔らかい岩石に関してはさらに厚めで推移する方がよい。



図16—17：石英（下部）が灰色で終了。上部の累帯構造が見えるのは斜長石。ともに灰色にする。

- ⑥ さらに研磨（琢磨）する場合、次にグリーンカーボラダム(GC) #6000 もしくはボロンカーバイド(B₄C)による研磨を行う。GCはカーボラダム(SiC)の純度の高いもの。B₄Cはモース硬度9.5にあたるので研削力がある。B₄Cの1 μm, 2.5 μm, 5 μmをそれぞれ揃えてあるので使用してみるとよい。
- ⑦ この研磨については、厚さを減らすことよりも、表面をこの粒度の研磨面に仕上げることが主目的となる。ただし、薄くならないわけではないので、柔らかい岩石・鉱物では注意が必要。

薄片の研磨（3）：研磨機を使用した研磨（琢磨）

薄片中の鉱物の化学組成を調べたりするための試料づくりには、さらに研磨機（図16-18）とダイヤモンドの研磨剤及び潤滑剤（図16-19）を使用して表面を磨きます。

ダイヤモンドの研磨剤は、 $6\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 及び $1/4\mu\text{m}$ などで試料を研磨（琢磨）する。ただし、ダイヤモンドはペースト状あるいはスプレーで研磨（クロス）に塗布して使用する。この時、水の代わりにアルコールが入っている潤滑剤（商品名：ルブリカント）を用いる。

なお、これまでの研磨工程中に間違えて研磨面の反対側を磨き、曇りガラス状になったものは、このダイヤモンド（ $\sim 1\mu\text{m}$ ）による研磨（琢磨）で綺麗な光沢面になる。

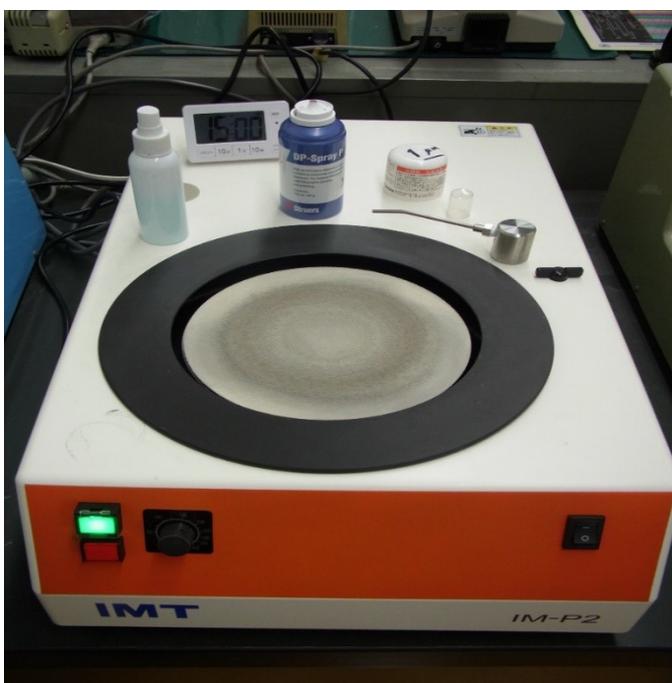


図16-18：琢磨専用の研磨機。ダイヤモンドの研磨剤、潤滑剤、研磨機には専用のクロス（布）が装着されている。

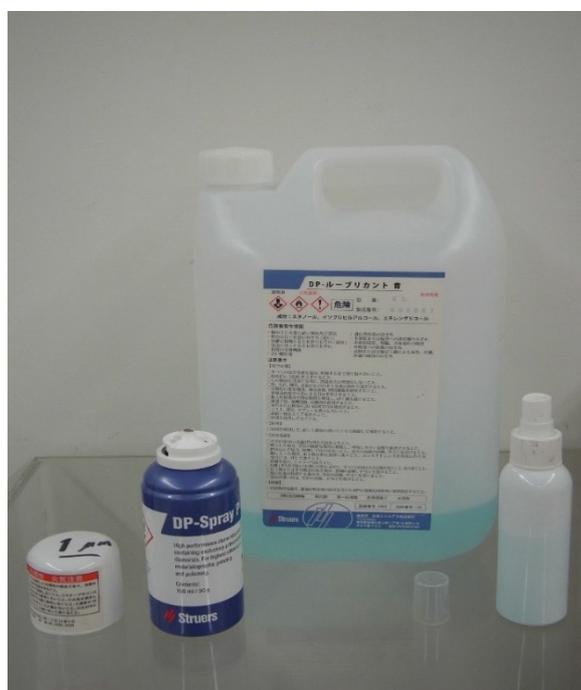


図16-19：ダイヤモンドの研磨剤（左図）と潤滑剤（商品名：ルブリカント）とそれを入れた容器（右図）。

- ① 琢磨機に研磨布（クロス）をセットし、ダイヤモンドスプレーをクロスの上7~8cmからクロス中心に向かって1~2秒噴射する（ペーストの場合は中心部に約1cm出して、指で四方に伸ばす）。洗瓶からルブリカントブルーを中心に1秒垂らし、専用の研磨機（琢磨機）を回転させる。
- ② クロスはMD-Molなどの毛足の短いものを使用する。 $3\mu\text{m}$ の琢磨で毛足の長いクロスを使うと、柔らかい鉱物がより選択的に奥に向かって磨かれ、研磨面の段差の原因になる。

ので注意。

- ③ 研磨は、あまり両手を動かさずに一方向に研磨するつもりで行う。数分位毎に筆を使って洗剤入りの水で丁寧に洗浄し、送風機で乾かしてから観察する。
- ④ 研磨の際は、グラインダーの時と同じように両手の指で押さえつけて行う。慣れない場合は、図16-20のように吸盤を貼り付けて行うとスライドガラスを保持しやすい。
- ⑤ やわらかい部分はすぐ磨けるが、硬い部分はなかなか鏡面にならない。磨きの度合いを見る目安として、薄片の周囲にある接着剤の表面を観察するとよい。
- ⑥ 回転盤での研磨時間が長くなると、岩石中に含まれる硬い鉱物の端の角が丸くなる（ダレ）が生じるようになる。また、表面の凹凸がなかなか平坦にならない場合は、#800の時などで試料に凹みが生じていて、それが残っていることがある。これは、#1000や1500、#3000で丁寧に研磨することで解決することがある。
- ⑦ 研磨（琢磨）はあわてずゆっくり丁寧にすることが肝心かも知れない。
- ⑧ EPMAなどの分析に使う場合は、一般的には $1\mu\text{m}$ 琢磨が最終仕上げ段階となる。 $3\mu\text{m}$ 琢磨と同じように、ダイヤモンドスプレー（またはペースト）とルーブリカントブルーを使って琢磨する。試料中の鉱物に硬度の差がある場合は、クロス（毛足）の短い方がよい。硬度差がない場合は毛足の長いクロスで軽く琢磨する。
- ⑨ $1\mu\text{m}$ 琢磨では、 $3\mu\text{m}$ 段階と違って、力をあまり入れず、回転に対して向きを少しずつ変えながら琢磨する。 $3\mu\text{m}$ 琢磨でほとんど鏡面にしてあるので、 $1\mu\text{m}$ で研磨傷を落とせばほぼ完成。5分くらい磨けば十分なので、時間をかけすぎないこと。さらに $1/4$ (0.25) μm のダイヤモンドや $0.04\mu\text{m}$ のコロイダルシリカを使って琢磨することがある。
- ⑩ 最初は凹凸がある研磨面（図16-21）が平滑になれば終了。図16-22・23参照。

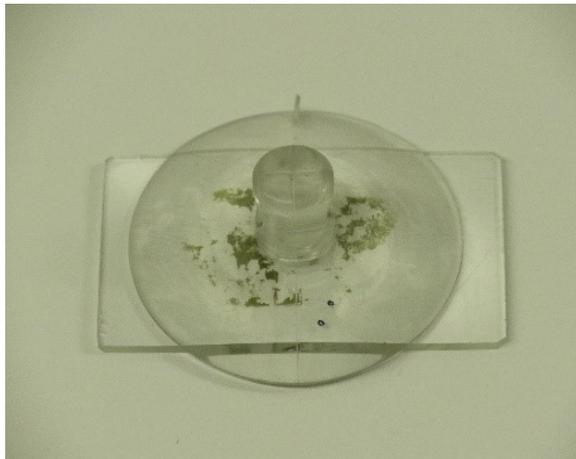


図16-20：スライドガラスに吸盤を付けたもの。

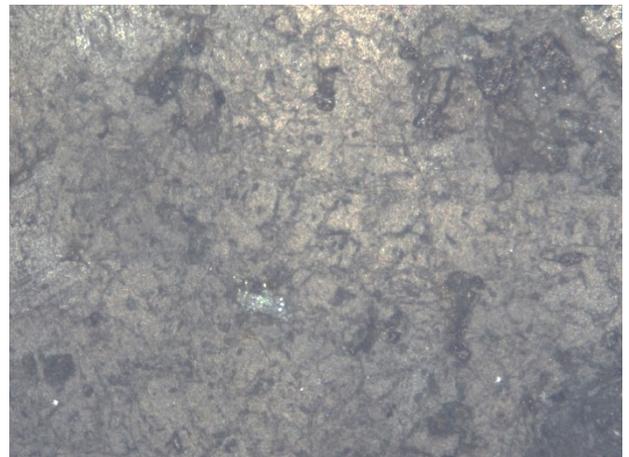


図16-21：#3000で研磨した表面。ボソボソした凹凸が黒く見える。

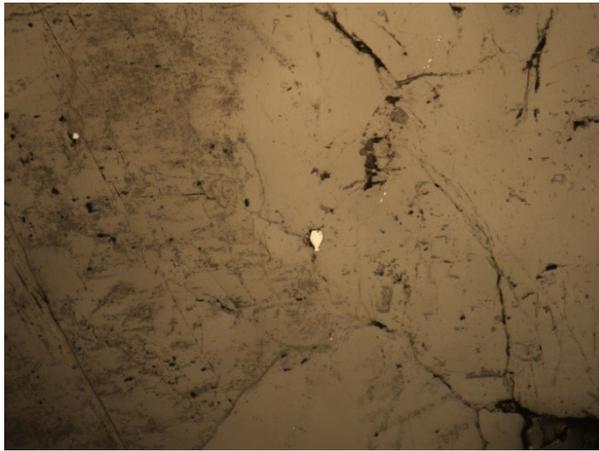


図16-22：1 μmのダイヤモンドで研磨すると平滑な面になる（その1）。

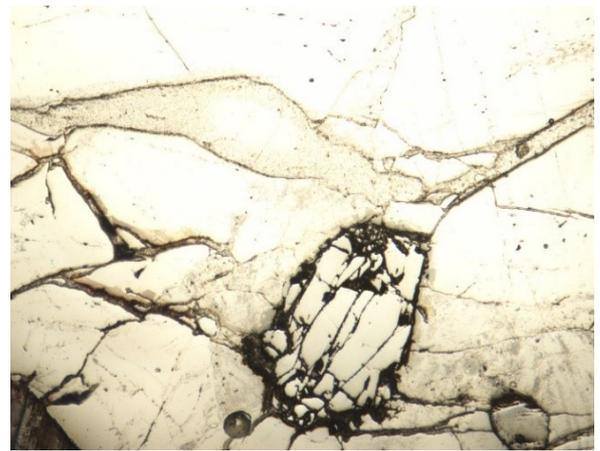


図16-23：1 μmのダイヤモンドで研磨すると平滑な面になる（その2）。

VI カバーガラスの接着：偏光顕微鏡観察用薄片の仕上げ

薄片を偏光顕微鏡で観察する際にカバーガラスを被せると見やすくなる（図16-24・25）。これは表面の乱反射を防ぐからで、かつてはカナダバルサムが用いられてきたが、最近では光硬化型のものが簡便なので普及している。ただし、光硬化型の樹脂で接着すると、カバーガラスを外すことはできないので注意が必要である。一方、カナダバルサムは有機溶剤を用いて簡単に外すことができるので、後にEPMAなどによる分析が可能となる。一方、手軽に薄片を観察したい場合は、透明マニキュアでコーティングして済ませる方法もある。

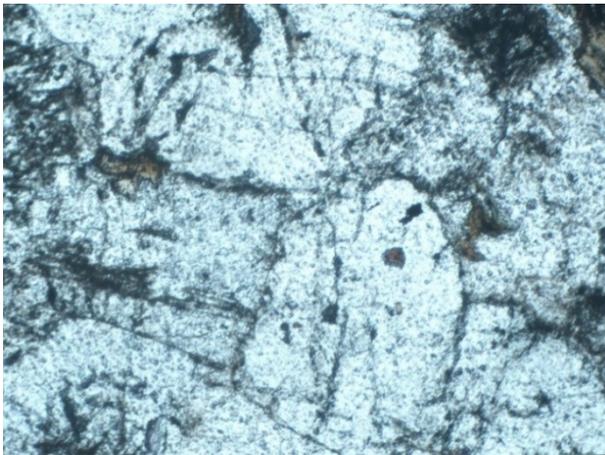


図16-24：カバーガラスを被せていない薄片

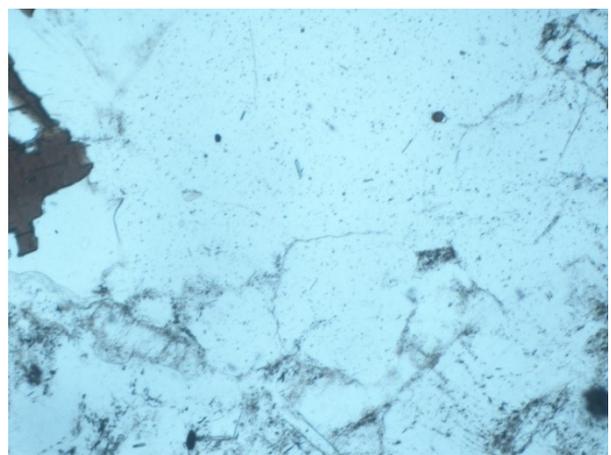


図16-25：カバーガラスを被せた薄片



図 16—26：袋から取り出した紫外線硬化型樹脂
(図右)



図 16—27：カバーガラスを被せた薄片

- ① 薄片の中心付近に紫外線硬化型樹脂を、小さい試料なら 1 滴、図 16—27 の試料なら 2 滴垂らす。その上にカバーガラスを右端から覆い被せるようにして全体を覆う。
- ② 気泡がカバーガラスの中に入っている場合は、指を使って外側に押しやるように軽く押す。あまり強く押すと指を離れた際に気泡が入ってしまうことがある。カバーガラスからはみ出した接着剤は楊枝などで取り除く。



- ③ 気泡がないことを確認できれば紫外線を 10 分程度照射させると樹脂は固化する。
- ④ 固化が終了したら、カミソリ用の刃を使ってスライドガラスの周囲の樹脂などを取り除く。図 16—28 参照。
- ⑤ ラベルを貼り、必要な情報を書く。

図 16—28：カミソリの刃は 1 / 4 に折って使う (図右下)

薄片の薬品による鉱物の着色例（方解石と長石）

方解石の着色

方解石（ CaCO_3 ）と苦灰石（ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）は、どちらも炭酸塩鉱物であり、光学的特性が近いために区別が難しい。そこで、化学薬品を使い、方解石を着色して区別をする。

使用する薬品

- ・硝酸銀：10%溶液 100ml
- ・重クロム酸カリウム：20%溶液 100ml

用意する器具

- ・シャーレ（径9cm）2個 ， ビーカー：100ml 2個 ， ガラス棒：2本 ， ピンセット ， ゴム手袋 ， 偏光顕微鏡

着色の手順

- 1) 通常の厚さの薄片を洗浄・乾燥させておく
- 2) 硝酸銀（10%溶液）を入れたシャーレに薄片を1分30秒～40秒（液温20度）浸す。ここで炭酸銀（ Ag_2CO_3 ）ができる。その後、水を入れたビーカーの中ですすぎ乾燥させる。
- 3) 次に重クロム酸カリウム（20%溶液）を入れたシャーレに着色の度合いを見ながら浸す。ここでは、クロム酸銀（ AgCrO_4 ）ができて赤褐色に方解石が着色される。その後、水を入れたビーカーの中ですすぎ乾燥させる。
- 4) 偏光顕微鏡で確認後、カバーガラスをかけて終了。



炭酸塩鉱物の薄片例（直交ニコル）



方解石は赤褐色に着色（開放ニコル）

長石の着色

長石のなかでもカリ長石 (KAlSi_3O_8) と斜長石 ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_2\text{O}_8$) を、化学薬品を使い、鉱物の化学組成の違いにより着色して区別をする。斜長石と石英が容易に区別できる場合は、斜長石の着色は省略する。

使用する薬品

カリ長石の着色（黄色）

- ・フッ化水素酸：濃度46～55% 6ml
- ・ヘキサニトロコバルトⅢナトリウム（コバルチ亜硝酸ナトリウム）：4g + 蒸留水 20ml

斜長石の着色（赤褐色）

- ・塩化バリウム5%溶液 50ml
- ・ロジゾン酸カリウム：0.05g + 蒸留水 20ml

用意する器具

- ・プラスチック容器：カバーガラス（24×32mm）のプラスチック容器を整形
- ・シャーレ：径9cm 2個 / ・ビーカー：100ml 3個
- ・ガラス棒：3本 / ・スポイト付き滴ビン / ・ピンセット / ・ゴム手袋
- ・偏光顕微鏡

着色の手順

- 1) 通常の厚さの薄片を洗浄・乾燥させておく
- 2) 室温（20～25度）で、フッ化水素酸を入れたプラスチック容器の上に薄片を被せ、3分間その蒸気にさらす。これで薄片表面の珪素がとり取り除かれ、カリウムやカルシウムと薬品が反応しやすくなる。
- 3) ヘキサニトロコバルトⅢナトリウム（コバルチ亜硝酸ナトリウム）飽和溶液を入れたシャーレの中に、薄片を上に向けて約45秒間浸す。その後、水を入れたビーカーの中ですすぎ乾燥させる。これでカリ長石は黄色に着色される。これはコバルチ亜硝酸カリウムができて黄色となる。
- 4) 次に塩化バリウム5%溶液に薄片を1～2度手早く浸して、水を入れた別なビーカーの中ですすぎ乾燥させる。
- 5) ロジゾン酸カリウム溶液をスポイトにとり、薄片の試料全体に滴下させる。約10秒放置後、水を入れた別なビーカーの中ですすぎ乾燥させる。ここで斜長石は赤褐色に着色される。これはロジゾン酸バリウムができて赤褐色となる。
- 6) 偏光顕微鏡で確認後、カバーガラスをかけて終了。

水も油も使わない(乾式)による薄片づくり

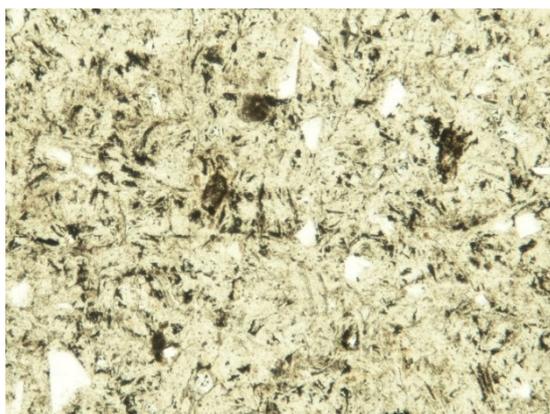
柔らかい岩石や粘土鉱物を薄片にする場合、よく乾燥させた後、シアノ系の接着剤を浸透させてから行うとよい。ただし、この接着剤は熱に比較的弱いので、スライドガラスに貼りつける場合は、スーパーセメダインのような非加熱型接着剤を使用する。

水や油を使ってもうまくできないものは、本学では耐水性の紙ヤスリ（＃120、＃320、＃800、＃1,200）、ラッピングフィルムシート（＃1,500、＃3,000、＃10,000、＃20,000）を回転研磨機につけて研磨し、ダイヤモンド粉末（～0.4 μm）を用いる時は、クロスに塗布してよく乾燥させてから研磨（琢磨）を行う。当然ながらルーブリカントブルーのような液体も使用しない。そして、最終仕上げにエーテルに混ぜたアルミナ粉末（0.05 μm）をクロスに塗布し、エーテルがよく乾いた後に研磨する方法により、従来のコロイダルシリカ（0.04 μm）での研磨と同様な仕上がりになっている。

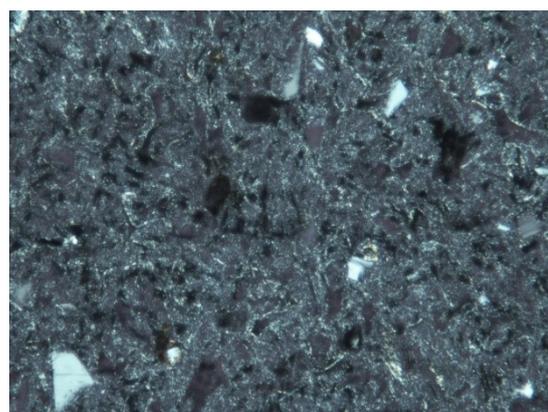
この乾式と呼ばれる方法は、「薄片でよくわかる岩石図鑑」（誠文堂新光社刊、2014）に紹介されているが、この方法を確立された産業技術総合研究所（産総研）の大和田朗氏、佐藤卓見氏、平林恵理氏の方々により研究報告書の第64巻第7/8号221-224ページに「新開発乾式法による脆弱岩石試料の薄片・研磨薄片製作」として書かれているので参考にされたい。

乾式も従来の水や油を使用した研磨工程と基本的には同じであるが、柔らかい試料のため、回転研磨機を毎分50回転程度の遅い速度で研磨して作製することになる。また、製作工程中に試料が剥離してきた場合（表面がザラついてくる）は直ちにシアノ系の接着剤で補強するなど、試料の状態をよく観察しながらの作製が大切である。

柔らかい試料である粘土鉱物を主とした岩石を乾式で行った例が下図のとおり。



単ニコル



直交ニコル

粘土鉱物のモンモリロン石($(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 単斜)を主とした岩石（ベントナイト）を乾式で作製した薄片の例。

隕石(コンドライト)の研磨薄片例

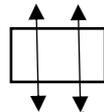
試料が小さかったので研磨して接着した後、2次切断には精密切断機を用いた。

試料が柔らかいので#800から始める。試料がなくならないように十分に注意する。次の例を参考にしながら、偏光顕微鏡で薄片の状態をよく確認しながら製作すること。

- #800 → 試料が黒色から濃茶になり、透明な部分が一部見えるようになってくる。
回転研磨機（グラインダー）は、ほどほどにして、少し薄くなったら手ずりに変更。
- #1500 → 濃茶から全体的に茶色にする。
カンラン石が赤色まで薄くする。
透明な部分がポツポツ見えてきたら#3000にする。
- #3000 → 茶色から明るい茶色にする。
透明鉱物がはっきり分かるようになるまで。

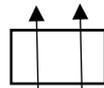
研磨（琢磨）は、ダイヤモンドの $1\mu\text{m}$ で3分程度。

試料の向きを研磨機の回転方向と垂直にして1分30秒ほど研磨（琢磨）する。



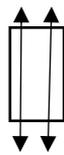
回転スピードも遅めで

試料の向きを180度回転させて1分30秒ほど研磨（琢磨）する。



180度回転させる

最後に試料の向きを90度変えて30秒ほど研磨（琢磨）する。



90度回転して30秒で完成

17. 貴金属製品

宝石は研磨されたのち、貴金属（地金）を用いて指輪やネックレスなどのような身を飾る宝飾品（製品）になります。わが国で使われる貴金属は金やプラチナです。それらは純金や純プラチナを使用するのではなく、金の含有量は75%、プラチナは85あるいは90%のものが多く流通しています。

純金を24金（K24）という24分率で表現すると金が75%含まれる場合は、18金（K18）ですが、（独）造幣局で検定されたものには、1000分率で表されますので、18金は750ということになります。同様にプラチナも1000分率で表されます。例えば、プラチナを90%含むものは、下の図のように日章旗・900・Pt（プラチナの元素記号）というマークが刻印されます。



刻印の例

地金を、曲げたり、切ったり、削ったりして加工されて製品に仕上げますが、2つのパーツを接合するためには融点の低い金属（蝋と呼ばれる）が使われます。これは一品ずつ制作するもので手作りとも呼ばれます。また、結婚指輪、婚約指輪あるいはよく見られる指輪などのような製品は、鑄造（キャスト）によって大量生産されます。

キャストは、原型をつくることから始まります。その方法は、歯科技工士の技術が応用されています。

出来上がった製品は、身を飾る部位によって次のようなものがあります（基礎編のテキストにも掲載）。

頭	ティアラ
耳	イヤリング、ピアス
胸	チョーカー（ネックレス）、ペンダント
腕	アームレット、ブレスレット、指輪
足	アンクレット

宝石や鉱物を使用した製品に使われる地金の種類は次のとおりで、主として金・プラチナ・銀の合金です。

金　　ふるくから装身具や貨幣に使われている金属です。純粋な金を純金と呼びますが、通常は18金と呼ばれる、金を75%含んだものが使用されます。残りの25%が銅によって混ぜられると、赤色を帯びたものになるので、あかわり（赤割り）と呼ばれます。銀で混ぜられると青葉色（みどり色）になるので、あおわり

（青割り）と呼びます。さらに、ホワイト・ゴールド（White Gold：略して WG）と呼ばれるものは、ニッケルなどを混ぜた白色の合金です。

プラチナ 白金（はっきん）とも呼ばれますが、白い金製品であるホワイト・ゴールドとの混同をさけるために業界ではプラチナと呼びます。通常は 15%ほど他の金属によって混ぜたものが使われます。

銀 かつて貨幣として世界中でよく使われていました。わが国では江戸時代頃に銀細工が発達しました。その完成された技術は世界に誇るものがあります。スターリング・シルバーと呼ばれる、銀を 92.5%含むものが銀食器などにも使われています。

18. 野外巡検

授業の一環として、野外巡検（鉱物観察会）を実施しますので、次頁の実施要項を読んでご参加ください。

なお、野外で鉱物を探すために必要なポイントは次のとおりです。

○事前に準備すること

- ① 目的地（現地）の土地の所有者の了解を得る
わが国の場合、国立公園内での採集は原則禁止されています。また、鉱山の跡地で、実際に採業していなくても会社等が管理している場所がありますので、許可が必要です。さらに、鉱山へ行くために森林を通る場合は、森林管理署（旧営林署）にも届出が必要の場合があります。手続きが必要な場合は、あらかじめ必要な書類等を用意しておきます。
- ② 現地の地質図（Geological map）を入手
目的の鉱物が産出されている場所は、地質図を見ることで予測することができます。わが国では、産業技術総合研究所地質調査総合センターの地質 Navi (<https://gbank.gsi.jp/geonavi/geonavi.php>) を利用することができます。
- ③ 現地での案内者を探す
現地に詳しい案内者は必要です。特に外国の場合は、現地の法律等についてもよく知っている案内者は不可欠です。
- ④ 携帯する物としては、ルーペ・ハンマー・サンプル袋、目的の場所（坑道など）や鉱物によっては懐中電灯やカラーフィルターなどの器具が必要です。
- ⑤ 現地で長時間滞在する場合はそれなりの備品も必要でしょう。

○現地での注意

- ① 土地の所有者への挨拶や、手続きが必要な場合は迅速に行います。
- ② 穴を掘ったりした場合は、元に埋め戻したり、最初の状態になるべく近づけましょう。
- ③ 現地で出会った人にも挨拶して、コミュニケーションを図るようにしましょう。思いがけない情報を得ることがあります。
- ④ 見つけた鉱物は、場所の状態（詳細な場所・日付・産状等）を記録に残しましょう。

○事後の注意

- ① 持ち帰った試料は、名称・採集場所等を書いたラベル（217 頁参照）をつけて箱等に入れて保管します。ラベルには標本番号を記しておく整理に便利です。例えば、2020 年 4 月 27 日に採集したものは、20200427 というような数字をラベルに書いておくとよいでしょう。
- ② 保管の際に試料をよく水洗して箱や瓶等に入れることがあります。ただし、水に溶けてしまう鉱物もありますので注意が必要です。
- ③ 日光や大気中の影響で変質する鉱物もあります。そのような場合は、密閉して暗所に保管します。

鉱物観察会 実施要項

鉱物観察会を下記のとおり、実施しますので、ご参加下さい。

必要な道具（ハンマー、ルーペなど）を、当日までに6号館3階の事務室（16号館ではありません）で借りてください。終了後は、同じ場所にご返却ください。借りる場合、科目名「鉱物の世界-地球からの贈り物への誘い」とお名前を申し出てください。

当日は、小雨決行。当日何かありましたら携帯電話(Tel.090-4529-8630)へ連絡をください。現場付近の海岸で昼食をとりますので、予めご用意ください。服装は軽装で大丈夫ですが、海岸を歩きますので多少濡れてもよい格好で参加してください。怪我を防ぐため、軍手をご用意ください。海岸付近の崖は大変危険ですから近寄らないようにしてください。足元の岩石から鉱物を観察するようにしてください。

記

- ・日 時：2024年5月26日（日） 現地に午前10時～午後3時
- ・場 所：静岡県賀茂郡河津町浜の海岸
- ・目 的：自然金や沸石類の鉱物を観察する
- ・集 合：伊豆急線「河津駅」改札口前に午前10時
- ・解 散：伊豆急線「河津駅」改札口前に午後3時頃
- ・備 考：電車利用の場合は、次の時間をご参考ください（令和4年10月確認）。当日の時間は各自でご確認ください。

（行き）

- 1) JR・小田急線・伊豆急線を利用する場合（交通費 3,164 円）
高田馬場駅 05:43 → 新宿駅 05:48
新宿駅 小田急線急行(小田原行) 06:00 → 小田原駅 07:30
小田原駅 東海道本線(熱海行) 07:56 → 熱海駅 08:19
熱海駅 伊東線(伊豆急下田行) 08:26 → 河津駅 09:38
- 2) JR 普通電車と伊豆急線を利用する場合（交通費 3,745 円）
高田馬場駅 06:03 → 品川駅 06:27
品川駅 東海道本線(東日本)(熱海行) 06:41 → 熱海駅 08:19
熱海駅 伊東線(伊豆急下田行) 08:26 → 河津駅 09:43
- 3) 新幹線と伊豆急線を利用する場合（交通費 5,505 円）
高田馬場駅 06:55 → 品川駅 07:20
品川駅 新幹線「こだま 705 号(名古屋行)」07:34 → 熱海駅 08:10
熱海駅 伊東線(伊豆急下田行) 08:26 → 河津駅 09:43

（帰り）

- 1) JR・小田急線・伊豆急線を利用する場合（交通費 3,164 円）
河津駅 15:50 → 熱海駅 17:12
熱海駅 東海道本線(東日本)(高崎行) 17:30 → 小田原駅 17:52
小田原駅 小田急線急行(新宿行) 18:16 → 新宿駅 19:43
新宿駅 19:53 → 高田馬場駅 19:57
- 2) JR 普通電車と伊豆急線を利用する場合（交通費 3,745 円）
河津駅 15:50 → 熱海駅 17:12
熱海駅 東海道本線(東日本)(高崎行) 17:30 → 品川駅 18:58
品川駅 19:08 → 高田馬場駅 19:34
- 3) JR 新幹線と伊豆急線を利用する場合（交通費 5,505 円）
河津駅 15:50 → 熱海駅 17:12
熱海駅 新幹線「こだま 734 号(東京行)」17:32 → 品川駅 18:11
品川駅 18:25 → 高田馬場駅 18:50

概 要

今から 2,000~1,000 万年前に深海で火山活動がありました。その後、1,000~200 万年前になると比較的浅い海での火山活動が見られるようになります。さらに 200~100 万年前には、ようやく陸地ができます。その陸地は本州に近づきます。そして 100~60 万年前に本州と衝突して、丹沢山地が形成されます。現在の伊豆半島の原型は 60 万年前にできます。箱根火山は 60~20 万年前に誕生し、伊豆半島については、ほぼ現在の形になりました。富士山（4 つの火山活動でできた）や、今でも火山活動が盛んな地域は 20 万年前に生まれ現在に至ります。今後もこの活動は続くことになるでしょう。

このように伊豆半島は、火山の噴火活動によりできたので、堆積岩や変成岩及び深成岩はほとんど見られません。即ち、地質年代の新第三紀以後の火山岩や火山砕屑岩による地層から成り立っています。

現場では、火山活動に伴う熱水により変質した安山岩質の凝灰角礫岩中に脈状や斑点状で沸石が見られます。この周辺には縄地鉱山や大松鉱山と呼ばれる、金を目的に採掘された鉱山があります。海岸にはそれらの鉱山からもたらされた礫の中に自然金が含まれているものが見られます。

鉱物各論

- 1) 自然金 Gold Au 等軸 海岸に打ち上げられた石英礫中のいわゆる“銀黒”中に黄金色の微粒状の金属光沢にて産する。ここの自然金には銀が 40%~50%含まれる。
- 2) 黄鉄鉱 Pyrite FeS_2 等軸 石英礫中に真鍮色粒状あるいは立方体の金属光沢にて産する。
- 3) 黄銅鉱 Chalcopyrite CuFeS_2 正方 石英礫中に真鍮色粒状の金属光沢にて産する。
- 4) 方解石 Calcite CaCO_3 三方 凝灰角礫岩中に白色不透明な集合ないし犬牙状、菱面体の自形にて産する。
- 5) 弗素魚眼石 Fluorapophyllite $\text{KC}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{F},\text{OH}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 正方 凝灰角礫岩中に白色四角形の集合のガラス光沢にてモルデン沸石や輝沸石などと産する。
- 6) モルデン沸石 Mordenite $(\text{Na}_2,\text{Ca},\text{K}_2)_4\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ 直方 凝灰角礫岩の中に白色毛状にて産する。
- 7) 灰ダキアルデイ沸石 Dachiardite-Ca $(\text{Ca},\text{Na}_2,\text{K}_2)_5\text{Al}_{10}\text{Si}_{38}\text{O}_{96} \cdot 25\text{H}_2\text{O}$ 単斜 凝灰角礫岩の空隙中に白色板状の自形ないし板状集合のガラス光沢にて、輝沸石、方解石などと共に僅かに産する。
- 8) 灰輝沸石 Heulandite-Ca $(\text{Ca}_{0.5},\text{Na},\text{K})_9\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72} \cdot \sim 24\text{H}_2\text{O}$ 単斜 凝灰角礫岩中 白色板状で、真珠光沢にて産する。
- 9) 灰束沸石 Stilbite-Ca $(\text{Ca}_{0.5},\text{Na},\text{K})_9\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ 単斜 凝灰角礫岩中 白色板状

あるいは束状で、真珠光沢にて産する、長さが2cmに達するものもある。

10) 石英 Quartz SiO_2 三方 白色ガラス光沢、塊状ないし空隙中には自形の六角柱状の水晶として産する。海岸の礫の主な構成物。

以上

付 録：採集した標本は下記のようなラベルをつけておきましょう。

自然金
Gold
Au 等軸
(銀が40%~50%含まれる)
静岡県賀茂郡下田町菖蒲沢海岸

弗素魚眼石
Fluorapophyllite
 $\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{F},\text{OH}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 正方
静岡県賀茂郡下田町浜

モルデン沸石
Mordenite
 $(\text{Na}_2,\text{Ca},\text{K})_4\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ 直方
静岡県賀茂郡下田町浜

灰ダキアルデイ沸石
Dachiardite-Ca
 $(\text{Ca},\text{Na}_2,\text{K})_5\text{Al}_{10}\text{Si}_{38}\text{O}_{96} \cdot 25\text{H}_2\text{O}$ 単斜
静岡県賀茂郡下田町浜

灰輝沸石
Heulandite-Ca
 $(\text{Ca}_{0.5},\text{Na},\text{K})_9\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72} \cdot \sim 24\text{H}_2\text{O}$ 単斜
静岡県賀茂郡下田町浜

灰束沸石
Stilbite-Ca
 $(\text{Ca}_{0.5},\text{Na},\text{K})_9\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ 単斜
静岡県賀茂郡下田町浜

国立科学博物館での鉱物の見学

野外巡検（鉱物観察会）を授業の一環として実施しますが、当日参加できない場合は、下記の要領にて国立科学博物館（科博）で展示している鉱物（地球館と日本館の二カ所）を各自で観覧し、別掲の課題に解答してください。この解答を提出することで、鉱物観察会に参加したものとみなします。

科博の入館料は無料ですが、入館の際に学生証をご提示ください。また、休館などについては、ホームページ（<https://www.kahaku.go.jp/>）などで確認してください。

記

- 日 程 : 2024年4月から6月末の期間
- 場 所 : 国立科学博物館（〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20）
TEL. 03-3822-0111（代表）
*高田馬場駅から上野駅までは20分（片道198円、IC利用）。
上野駅から徒歩5分。
- 課 題 : 別掲（授業中にお知らせします）
- 備 考 : 場所は下図参照。



国立科学博物館 上野本館

以上

流通している鉱物や宝石の展示会

わが国では、鉱物や宝石の展示即売が各地で開催されています。最も規模の大きい展示会（国際宝飾展 IJT, 下図参照）では、世界中からバイヤーが集まる場で、販売や仕入れの場となっています。



主な参考書

- (1) 加藤 昭 (1973) 櫻井鉱物標本, 櫻井欽一博士還暦記念事業会.
- (2) 森本信男, 砂川一郎, 都城秋穂 (1975) 鉱物学, 岩波書店.
- (3) 砂川一郎監訳 R.ウェブスター著 (1980) 宝石学, 全国宝石学協会.
- (4) 並木正男 (1986) 宝石の科学と鑑別法, 中央宝石研究所.
- (5) Eduard J. Gubelin and John I. Koivula (1986) Photoatlas of Inclusions in Gemstones, ABC Edition, Zurich, Switzerland.
- (6) Richard V. Gaines, H. Catherine W. Skinner, Euge E. Foord, Braian Mason and Abraham Rosenzweig (1997) Dana's New Mineralogy, John Wiley & Sons, Inc.
- (7) Hugo Strunz and Ernest H. Nickel (2001) Strunz Mineralogical Table, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany.
- (8) ロバート・ハイゼン (著), 円城寺 守 (著), 渡会 圭子 (翻訳) (2014) 地球進化 46 億年の物語, 講談社.
- (9) 日本鉱物科学会・宝石学会 (日本) (2019) 鉱物と宝石の科学事典, 朝倉出版.

あとがき

鉱物は、自然界からの贈り物です。このテキストでは、美しい鉱物を例に挙げ、実際に流通しているものを観察しながら、科学的な見方を通して紹介しました。

鉱物を磨いた宝石では、研磨される時に余分なものは取り除かれてしまうため、学術研究上必要な情報をなくしてしまうこともあります。しかし、その特徴的な外観や大きさにより、自然界に見られるものとして興味ある研究対象となっています。特に生成メカニズムを考える場合に、欠かすことのできない試料でもあります。

鉱物が、身近なものとして、かけがえのない地球から産出するものとして、大切に利用され活用されることを願うものです。

なお、岩石薄片づくりの項目では、薄片技術をご指導いただいた国立科学博物館の池田重夫技官や同館で長年薄片を作製していた林富士子氏、そして早稲田大学薄片室に勤務されていた力田正一氏をはじめこれまでの薄片室の担当者、そして同大教育学部地球科学教室の方々とその関係者、さらに薄片技術研究会の諸兄に深く感謝いたします。

発行日 2024年1月31日

著者・発行者 Copyright © 2024 Masahiko Hayashi All Rights Reserved.