

GSJ

地球をよく知り、地球と共生する

地質ニュース

2021
10
Vol.10 No.10



10月号

235 斑れい岩類：その種類・成因と特徴 山崎 徹

242 海外自然史博物館紹介シリーズ（その1）
IMA（国際鉱物学連合）2010 開催地ハンガリーの大学（ELTE）
の自然史博物館 ～鉱物学の歴史を垣間見る～ 柳澤教雄

251 資源をつくる水のちから –その1 鉱物資源– 佐脇貴幸

267 新刊紹介 旅客機から見る世界の名山

斑れい岩類：その種類・成因と特徴

山崎 徹¹⁾

1. はじめに

岩石のうち、マグマから形成された、肉眼で判別できるほどの大きさの鉱物から構成された岩石のことを深成岩と呼びます。鉱物粒が大きいのは、地下深部でマグマがゆっくりと冷却してできるためです。深成岩は大きく花崗岩類^{注1}・閃緑岩・斑れい岩類から構成され、かんらん岩もしばしばその仲間を含められます。私たちに最も身近な深成岩は花崗岩類で、石材として御影石と呼ばれ、墓石としてよく使われています。深成岩は、墓石のような工芸品のほか、建材や庭石として、また、道具・調理用具としても広く使われています^{注2}。深成岩の産地には、有名な景勝地になっている場所もあります。例えば、米国のヨセミテ国立公園の岩峰や、日本の北アルプスの^{つばくらだけ}燕岳(2,763 m)稜線の奇岩は、花崗岩類で構成されています。一方、現在日本ジオパークに認定されている地域のうち、世界ジオパークであるアポイ岳(北海道)や隠岐(島根県)をはじめ、5地域のジオパークでは、かんらん岩やその関連岩からなる地質がジオサイトに指定されています。花崗岩類や閃緑岩はそれぞれ2地域程度ですので、かんらん岩類が多いのは、その希少性や地質体(岩体)としての特異性のためだと思われます。

斑れい岩類は、花崗岩類に似た粒状の岩石で、花崗岩類に比べると、より暗色で、より重い特徴をもっています。実は斑れい岩類も世界ジオパークである室戸(高知県)のほか、筑波山地域(茨城県)と萩(山口県)の合計3地域のジオパークでジオサイトに指定されていますが、花崗岩類に比べ、その実体が一般の方々に十分に認知・理解されていないように思われます。これは、花崗岩類に比べて分布(露出範囲)が狭いためにさほど身近ではないことや、花崗岩類に伴われて産するため、石材名として花崗岩類の一種のように扱われていたり、土地固有の岩石名称で呼ばれていること(例えば、石材名としての黒御影や、土地固有の岩石名称としての筑波石)などが原因かもしれません。

そこで、本論では、実はよく理解されていない(と思われる)、斑れい岩の特徴や、その成因について解説します。なお、本論は様々な教科書や論文の記述から、斑れい岩に関連する部分を再構成し簡潔にまとめたものです。特定の研

究成果について述べたものではないため、引用は最小限にとどめますが、末尾に参考文献を挙げますので、より詳しい内容について学びたい方はそれらを参照してください。

2. 岩石の種類と特徴 - 特に火成岩類について

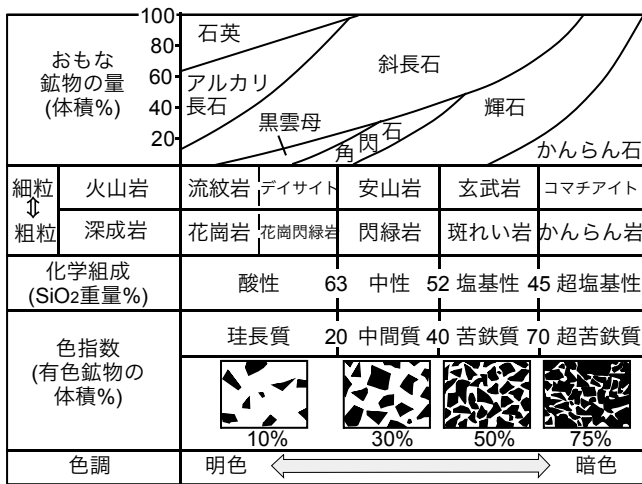
現在、私たちが住んでいる地表の堆積物や植生を取り除くと、その下は岩石で構成されており、地球規模でみると、表層部は硬い岩石が薄い層をなしています。この部分は地殻と呼ばれ、大陸部や日本列島のような島弧では平均35 km、海洋底では平均6 kmほどの厚さをもちます。ただし、この地殻部分は地球の全体積の1.6%であり、地殻のさらに深部は、地下2,900 kmまでのマントル(全体積の83%)と、さらに深部の核(全体積の16%)とに区分されています。

岩石とは、鉱物やガラスの集合体のことです。ガラスというのは、非晶質、つまり結晶化していない固体のことで、マグマが急冷されて結晶化できずに固化した火山ガラス(例えば黒曜石や軽石など)が最も一般的です。岩石には火成岩・堆積岩・変成岩の3つの種類があります。このうち、火成岩は、マグマが冷却・固結してできた岩石で、地殻全体の体積の80%を構成します。堆積岩は数万年・数億年という地質学的な時間の中で岩石が風化・削剥され、雨などで運ばれて海底・湖底・川底などに堆積し、固結した岩石です。堆積岩は地殻全体の体積の5%に過ぎませんが、陸地表面の75%を覆っています。一方、変成岩は、火成岩や堆積岩が、高い温度や圧力にさらされ、構成する鉱物の種類が変化したものです。変成岩は地殻全体の体積の15%に及ぶと考えられています。

火成岩は、その性質によって、深成岩と火山岩とに区分されます。かつては、深成岩・半深成岩・火山岩の3つに区分されていましたが、そもそもこの区分自体が明瞭な境界をもつものではないため、最近では半深成岩の名称はあまり使われません。深成岩と火山岩とは、化学組成や入っている鉱物の種類・大きさ・量でいくつかの種類に分類されます。国際地質科学連合(IUGS)の定義によると、深成岩は構成鉱物の大きさが概ね3 mm以上、すなわち肉眼で

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード：深成岩、斑れい岩、かんらん岩、花崗岩、キウムレイト、層状貫入岩体、アラスカン・タイプ超苦鉄質複合岩体、オフィオライト



第1図 火成岩の概略的分類図。この図はアルカリ元素を多く含む岩石には適用できない。有色鉱物とは、かんらん石、輝石、角閃石、黒雲母を指す。山口地学会編(1991)をもとに作成。

識別可能な程度の粒度をもつ火成岩のことを指します。一方、火山岩とは構成鉱物の大きさが1 mm未満のものとされており、深成岩との中間的なものは、深成岩の名称に“細粒”をつけることになっています。さらに、火山岩は、化学組成(SiO₂含有量)によって玄武岩・安山岩・流紋岩、あるいは玄武岩・安山岩・デイサイト・流紋岩に区分されます。深成岩は、一般に斑れい岩・閃緑岩・花崗岩、あるいは斑れい岩・閃緑岩・花崗閃緑岩・花崗岩に区分されず(ここでの花崗岩と斑れい岩は、厳密には“類”の意味です)。深成岩の親マグマ(深成岩を構成する鉱物を晶出したマグマ)の組成を対応させた、第1図のような分類を目にしたことがある方も多いと思います。なお、この図において酸性～超塩基性と書いてあるのは、SiO₂含有量に基づいた岩石の化学組成の性質の記述であり、溶液の液性を表す物理量である水素イオン指数(pH; ピーエイチもしくはペーハー)の概念とは異なります。また、超塩基性の火山岩であるコマチアイトは、始生代～原生代初期(概ね20億年前以前)の地質体に産出が限定されるため、一般的な火山岩には含まれません。かんらん岩は、その多くがマグマからできたものではありませんが、一般に深成岩の一種として扱われます。

第1図は、直感的にマグマの種類(組成)やそこから晶出する主な鉱物の種類・量比を理解する上では有用で、必ずしも誤りというわけではないのですが、このような理解が、斑れい岩の実体に対する誤解を生む原因のひとつでもあります。というのも、定義上、深成岩類は化学組成ではなく、色指数と構成鉱物の量比によって区分を行うため、火山岩の化学組成の区分とは正確には一致しないからです。

第1図において、花崗岩・花崗閃緑岩・閃緑岩あたりまでは火山岩と深成岩の区分は概ね対応していますが、斑れい岩では多くの場合一致しません。このことの意味を含め、これらの岩石の区分や成因について、次節で詳しく説明します。

3. 斑れい岩類の区分

地下深部の岩石は海底の地殻の割れ目や、地表・海底面からのボーリングによって観察・取得することができますが、地殻全体を貫くボーリングや、マントルに到達する割れ目は存在せず、人類はまだマントルの実体を目にしたことはありません。しかしながら、地震波等を使った地球物理学的な観察結果や玄武岩マグマの原岩を推定するための溶融実験の結果等から、マントルにはかんらん岩が分布していると考えられています。ここで注意が必要なのは、マントルはかんらん岩から構成されていると考えられているものの、かんらん岩の全てがマントル起源というわけではない、ということです。かんらん岩は、超苦鉄質岩の一種で、岩石の色指数に基づいて区分される岩石の一群です。具体的には、かんらん石や輝石等の苦鉄質鉱物の量比が90体積%以上の岩石のことを超苦鉄質岩類と呼びます。超苦鉄質岩類には、マントル起源と推定される岩石と、斑れい岩類と同様のメカニズムで形成されたと考えられる岩石が存在します。そこで、岩石の区分の前に、超苦鉄質岩類や斑れい岩類の成因について説明します。

仮に、玄武岩組成のマグマを何らかの容器に取り、密封して数千年～数万年かけてゆっくりと冷却すると、粗粒な斑れい岩が形成されます。この斑れい岩全体の化学組成は玄武岩と同じです。この場合、斑れい岩は液組成、つまり、マグマの化学組成を保持していると言います。一方、第1図には、おもな鉱物の量比が示されており、これは、その組成のマグマから晶出する鉱物の種類と量を意味しています。玄武岩組成のマグマからは、主としてかんらん石・輝石・斜長石が晶出します。このマグマがゆっくりと冷却する場合、地殻内には液状態の、しかも短時間では冷え固まらない程度のマグマの塊、すなわちマグマ溜まりの存在が必要とされます。そして、マグマ溜まり内では、マグマから晶出したこれらの鉱物が、底に沈殿したり、マグマの上部に浮いたりして溜まり、液状態のマグマから取り除かれるという現象が起きると考えられています。この現象により、元のマグマからは、晶出する鉱物の化学組成×晶出量に相当する成分が取り除かれることとなりますので、例えばかんらん石・輝石・斜長石が晶出する場合、

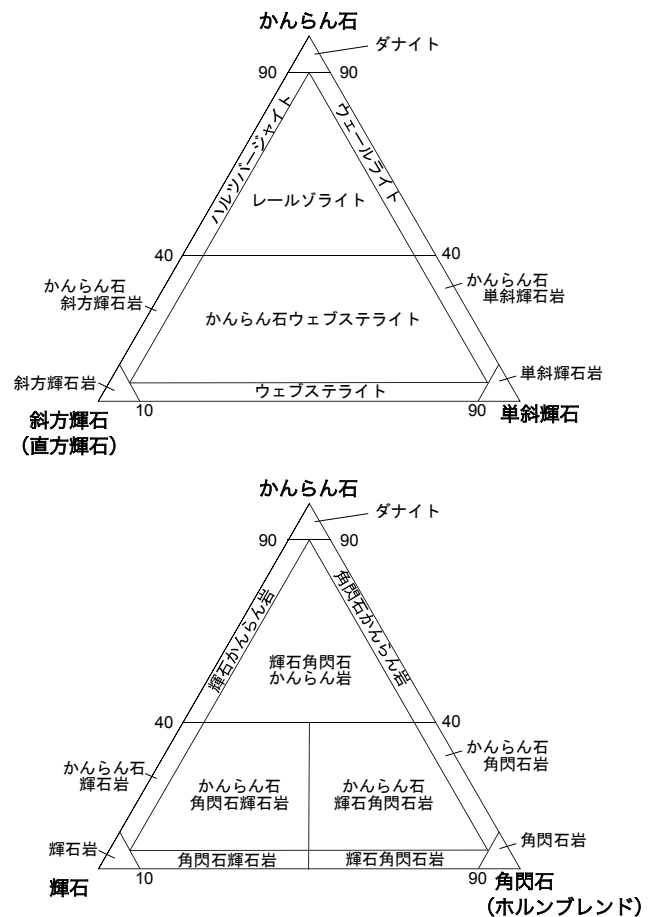
元のマグマの組成 C_1 = (かんらん石の化学組成 × 量 + 輝石の化学組成 × 量 + 斜長石の化学組成 × 量) = 残液の組成 C_2

となり、元のマグマの組成 C_1 と結晶を取り除いた後のマグマの組成 C_2 とは異なる組成となります。このようにして、結晶の晶出によってマグマの組成が変化していくことを結晶分化作用あるいは分別結晶作用と呼び、鉱物の晶出に伴うマグマの組成変化のことを分化と呼びます。そして、単純には、玄武岩質マグマから結晶が取り除かれると残液は安山岩質に、安山岩質マグマから結晶が取り除かれると残液はデイサイト質になります。

この結晶分化作用で取り除かれた鉱物、つまり、玄武岩質マグマから晶出・沈殿した結晶は、それらのみで固結して岩石となることがあります。このような岩石のことを沈積岩(キウムレイト)と呼びます。玄武岩質マグマはマントルかんらん岩が溶融することによって発生し、そのマグマ中におけるかんらん石・輝石・斜長石の晶出開始の順序や量比は、結晶作用の生じる圧力やマグマの含水量によって異なります。例えば、日本列島のような島弧の深部で水に富むマグマが結晶化する場合、かんらん石→輝石→斜長石の順に晶出が開始されます。このとき、かんらん石、あるいはかんらん石+輝石が沈殿し固結すると、第2図に示したかんらん岩に区分される鉱物の組み合わせとなります。したがって構成鉱物の種類や量比ではマントルかんらん岩と玄武岩質マグマから形成されたかんらん岩とは区別できない場合があります。また、ここで重要なことは、このようにしてできた沈積岩は、マグマの組成を保持していないということです。したがって超苦鉄質岩類や斑れい岩類のうち、沈積岩は第1図において火山岩組成と対応していないということになります。

さて、2節において、定義上、深成岩類は化学組成ではなく、色指数と構成鉱物の量比によって区分を行うことを説明しました。このことについて具体的に見ていきます。すでに述べたように、苦鉄質鉱物の量比が90体積%以上の岩石は、超苦鉄質岩類と呼ばれます。このとき、苦鉄質鉱物はかんらん石、斜方輝石(直方輝石)、単斜輝石、角閃石から構成され、時に黒雲母やざくろ石・スピネルといった様々な鉱物を少量含むことがあります。構成鉱物の種類によって、第2図のいずれかの図を用いて岩石の命名・区分を行います。

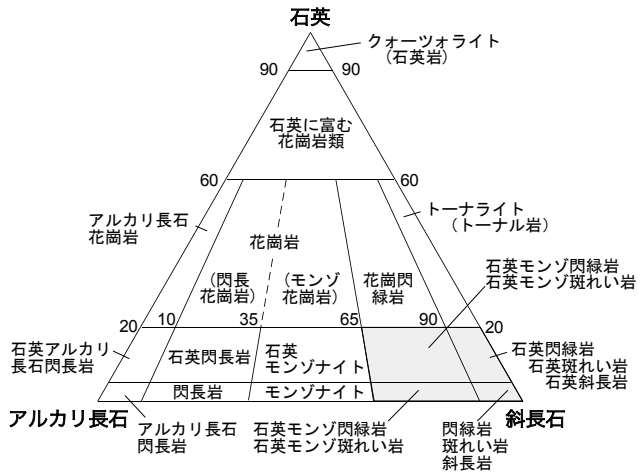
深成岩の鉱物の量比は、岩石から顕微鏡観察用のプレパラート(薄片)を作成し、顕微鏡下で数を数えて算出します。粗粒な花崗岩類の場合、岩石を板状に切り出して表面を薬品で処理して特定の鉱物を染色し、板状の岩石そのものの



第2図 IUGSによるかんらん岩類の分類図。この図は、色指数90%以上の岩石に対して、含まれる鉱物の種類によっていずれかを適用する。輝石岩及び角閃石岩は、それぞれ pyroxenite 及び hornblendite を意味し、輝岩及び角閃岩と訳されることもある。Le Maitre (2002) をもとに作成。

構成鉱物の量比を数える場合もあります。また、薄片や板状の岩石の表面の元素分析を行って鉱物種を同定し、その量比を計算する方法や、色などの光学的性質の違いを利用して画像処理で量比を計算する方法、岩石全体とその中の鉱物の化学組成のセットから、岩石全体の化学組成と一致する鉱物の量比を計算で求める方法などもあります。深成岩の研究者は、経験上、肉眼とルーペを用いた岩石片の観察によってだいたいの鉱物量比を推定することができますので、野外においてはそのような観察によって命名します。ただし、この命名法はかなり経験と主観に左右されるところがあります。

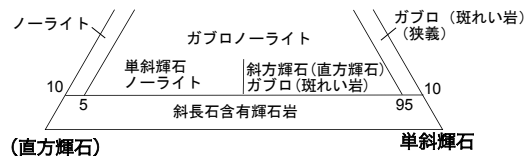
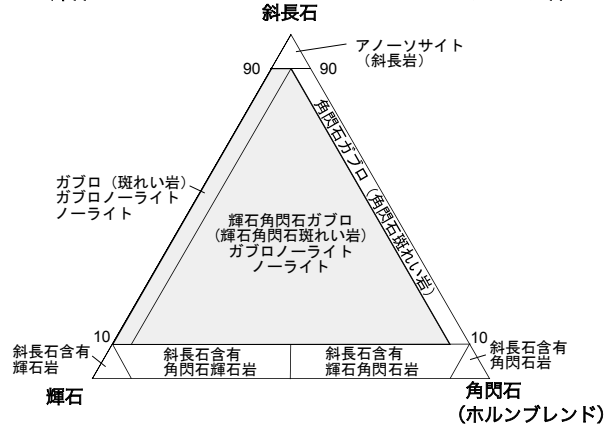
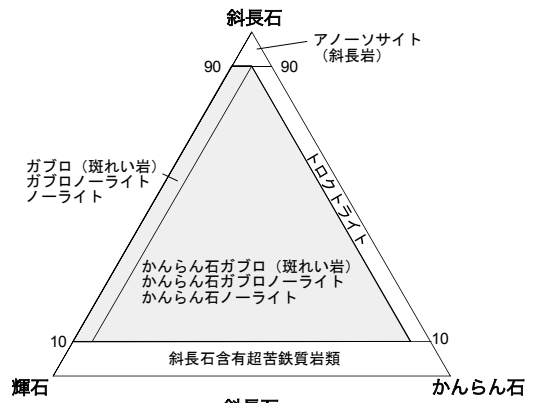
深成岩のうち、第2図にあてはまらない岩石群、すなわち、苦鉄質鉱物の量比が90体積%未満の岩石は、第3図の石英-アルカリ長石-斜長石図によって岩石名を決定します。斑れい岩類は、斜長石頂点の近くの、“斑れい岩・閃緑岩・斜長岩”領域に入る一群で、この領域に入るものは、さらに第4図の区分図を用いて岩石名を決定します。



第3図 IUGSによるかんらん岩類を除く深成岩の分類図。この図は、色指数90%未満の岩石に対して適用する。灰色で塗色された部分は、斜長石の化学組成によって扱いが異なる。斜長石のアノサイト値 [= 100 × Ca/(Ca + Na), 原子比] が0-50の場合は閃緑岩となり、それ以外の場合は、第4図を適用する。Le Maitre (2002) をもとに作成。

なお、閃緑岩と斑れい岩類とは、厳密には含まれる斜長石の化学組成によって区分されます。

花崗岩類は第3図ひとつで区分でき、その多くがトーナライト・花崗閃緑岩・花崗岩の領域の鉱物量比を示します。それに対して、斑れい岩類の命名には第4図の3つの区分図が必要で、かんらん岩類も2つの区分図を必要とします。このことは、主要構成鉱物の量比のみならず、種類の点で、これらの岩石が多様であることを意味しています。狭義の斑れい岩(ここでは広義の斑れい岩類と区別するため、ガブロと呼びます)は、単斜輝石と斜長石から構成される岩石のことを指します(第4図)。ガブロには、かんらん石や斜方輝石を含むものが一連となって産することが多いため、かんらん石ガブロやガブロノーライトが伴われます。また、単斜輝石の含有量が少なく、ほとんどがかんらん石と斜長石から構成されるトロクトライトもしばしば産します。上の説明において、玄武岩からは、主としてかんらん石・輝石・斜長石が晶出すると述べました。マグマの分化に伴う晶出順序を典型的な例(ここでは水に富むマグマではない例を示します)でみると、かんらん石→斜長石→単斜輝石→斜方輝石となります。したがって、マグマからかんらん石+斜長石が晶出しているときに、これらの結晶が沈積して取り除かれるとトロクトライトが、かんらん石+斜長石+単斜輝石の場合だとかんらん石ガブロが、斜長石+単斜輝石の場合だとガブロが、そして斜長石+単斜輝石+斜方輝石の場合だとガブロノーライトが形成される、ということになります。これらの岩石種(岩相と呼びま



第4図 IUGSによる斑れい岩類の分類図。この図は、斜長石のアノサイト値が50-100の岩石に対して適用し、図中の色指数90%以上(斜長石が10体積%未満)の岩石に対しては、図2を適用する。灰色で塗色された部分の岩石に対しては、一番下の斜長石-斜方輝石(直方輝石)-単斜輝石図を適用する。アノサイトと超苦鉄質岩類(斜長石の含有量が10体積%未満)を除く岩石のことを広義の斑れい岩類(gabbroid)と呼び、主として単斜輝石と斜長石のみからなる岩石のことを狭義の斑れい岩(gabbro)と呼ぶ(一般にはアノサイトも斑れい岩類に加えられることが多い)。Le Maitre (2002) をもとに作成。

す)は、いずれもメルト組成を保持していないキウムレイトです。このように、斑れい岩類はキウムレイトである場合が多く、鉱物の種類や量によって、大きく“斑れい岩類”といっても非常に多様です。このことが、斑れい岩といっても色々な岩相があって、“よく分からない石”と捉えられてしまう根本的な原因と考えられます。

4. 斑れい岩類の起源に応じたタイプと代表的産地

斑れい岩類には、これまで述べてきた岩相の組合わせによって、いくつかのタイプが存在します。このことは、裏

を返せば、いくつかの異なる成因によって、岩相の組合せのタイプがあることを意味しています。大学の岩石学の教科書に必ず出てくる斑れい岩の代表的な岩体としては、グリーンランドのスケアガード(スカエルガードとも表記されます)貫入岩体、ニューヨーク市西側のハドソン川河岸のパリセード・シル^{注3}、モンタナ州のスティルウォーター複合岩体、南アフリカのブッシュフェルト複合岩体等が挙げられます。上記の岩体のうち最大のものはブッシュフェルト岩体で、この岩体を形成したマグマの量は500,000 km³に及ぶと推定されています。これらの岩体はいずれも、比較的水に乏しい玄武岩質マグマを親マグマとして、結晶の沈積によって形成されたキユムレイトが、あたかも堆積岩のように層状構造をなす斑れい岩類から構成されることから、層状貫入岩体(あるいは層状分化岩体)と呼ばれています。詳しい研究の結果、巨大なマグマ溜まりでマグマの冷却に伴い鉱物の晶出と集積が生じるとともに、新たな玄武岩質のマグマが注入され、また冷却に伴って鉱物の晶出と集積が生じるといった過程を何度か繰り返して形成されたと考えられています。その晶出順序は、かんらん石→斜長石→単斜輝石の順で、第4図の岩石名としては、ダナイト→トロクトライト→ガプロに相当します。ただし、厳密には、沈積した鉱物の間に残っている液やマグマ本体との反応により、早期に晶出したかんらん石は斜方輝石に変化しており、岩石名としてはハルツバージャイト(第2図)に区分されるものも存在します。

一方、世界には層状貫入岩体とは異なるタイプの斑れい岩類の岩体も存在しており、その代表例がアラスカン・タイプの超苦鉄質複合岩体です。この岩体は、典型的には1-数kmの深成貫入岩体で、ダナイトのコアを取り囲むようにウェールライト・単斜輝石岩・角閃石岩・ガプロが同心円状に分布します(このような同心円状の構造を累帯構造と呼びます)。名前の由来であるアラスカや、ウラル山脈に沿う地域の岩体が古典的研究例として有名ですが、他にもブリティッシュ・コロンビア、シエラネバダ、ニュージーランド、タスマニア、中国、そしてカムチャツカ等各地に存在することが報告されています。アラスカン・タイプの岩体の岩石構成は、かんらん石→単斜輝石→斜長石の順でマグマから結晶が晶出したことを示唆しています。この晶出順序は上に示した層状貫入岩体とは明らかに異なっており、そのために沈積岩の岩石構成も異なります。岩石や、岩石を単純化した組成の薬品混合物を高温・高圧下に置いて実際に結晶作用を再現する実験岩石学による研究の結果、アラスカン・タイプの岩体に見られる晶出順序は、高圧条件下又は含水条件下(水を含むマグマからの結晶)に

よって生じることが分かっています。個々の岩体がどちらの条件で形成されたのかは、ケース・バイ・ケースですが、沈み込み帯上に分布するものの多くは、水に富むマグマから形成されたと考えられています。

上述のほかには、海洋底を構成する海洋地殻の大部分を構成する斑れい岩が挙げられます。海洋地殻は、日本列島のような沈み込み帯でマントルへと沈み込んで消滅していきますが、地殻変動や造山作用の一種によって、陸上に断片が存在する場合があります。このような地質体のことを、オフィオライトと呼びます。海洋地殻やオフィオライトには、トロクトライト・かんらん石ガプロ・ガプロ・ガプロノライト等からなるリズムックな層状構造(第5図)が観察され(層状斑れい岩と呼ばれています)、層状貫入岩体と同様に、かんらん石・斜長石→単斜輝石→斜方輝石の順にマグマから晶出したことを示しています。オフィオライトの層状斑れい岩に見られる層状構造が層状貫入岩体の斑れい岩類とよく似ていることから、当初、オフィオライトの層状斑れい岩も海嶺下の巨大なマグマ溜まりで形成されたと考えられていました。ところが、音波探査等の地球物理学的な手法を用いた調査によって、少なくとも現在海洋底に存在している海嶺の直下では、そのような巨大なマグマ溜まりは存在しないことが明らかとなりました。その結果、現在では、小規模なレンズ状の貫入体が繰り返し側方に貫入することによって、層状斑れい岩の構造が形成されたとする考え方が主流です。

ところで、オフィオライトはかつて、現在の海洋底を構成する海洋地殻そのものであると考えられていましたが、オフィオライトを構成する玄武岩に沈み込み帯上の玄武岩



第5図 オフィオライトの層状斑れい岩。数cm-数10cm程度のリズムックな層状構造がみられる。オマーン・オフィオライト、ワジ・スクバ(ワジとは、枯れ川のこと)。

によく似た組成のものが産することや、斑れい岩類には必ずしも上述のようなトロクトライトやかんらん石ガブロではなく、アラスカン・タイプの超苦鉄質岩体と同様のウェールライトや単斜輝石岩がしばしば伴われることから、オフィオライトは大洋の中央海嶺ではなく、沈み込み帯上で形成された海洋地殻であるという考えが支配的となってきました。したがって、オフィオライトでは、実際には第2図や第4図に示される岩石種の大半が存在しています。ほぼ完全な海洋地殻断面を有することで世界的に有名なオフィオライトとしては、キプロスのトルードス・オフィオライトやオマーン・オフィオライトがあります。その他、カナダのベイオブアイランズ・オフィオライト、米国のジョセフィン・オフィオライトやトリニティ・オフィオライトも有名です。

日本における代表的な斑れい岩体には、以下のようなものがあります。北海道のパンケヌシ斑れい岩体は、マントルからもたらされた玄武岩質マグマから結晶作用の早い段階で形成されたトロクトライトを含み、かんらん石ガブロ等が層状構造を示す、我が国では規模の大きな岩体です。親マグマは海嶺玄武岩質であるとされています。高知県の室戸岬にはかんらん石ガブロ・ガブロを主体とする斑れい岩体があります。マグマの分化の初期に形成された岩相は欠如していますが、鉱物化学組成から判断して、かんらん石・斜長石→単斜輝石の順に晶出したものようです。山口県の高山^{こやま}斑れい岩は、主としてガブロノーライトから構成され、全体的に強い磁性を持つことで知られています。局所的に層状の構造を示すことはありますが、岩体規模での層状構造や累帯構造は不明瞭で、このような斑れい岩はマグマと晶出鉱物の分離が不十分であるか、全体として液組成に近い組成を示している可能性があります。茨城県の筑波山、大阪府と兵庫県の県境部の生駒山、長野県～愛知県にかけては小規模な斑れい岩の岩体が点在します。これらは、領家帯という中生代白亜紀～新生代古第三紀の地質体に属しており、明瞭な累帯構造を示す例は少ないものの、多くはアラスカン・タイプの超苦鉄質岩体に類似する岩石構成を示しています。オフィオライトの代表的なものとしては、福井県の夜久野^{やくの}オフィオライト、北海道の幌加内^{ほろか}オフィオライトとポロシリ・オフィオライトの3つが挙げられ、その他断片的・小規模なものも多数あります。

5. 斑れい岩の特徴

これまで見てきたように、“斑れい岩類”といっても実に

多様な岩相があり、簡潔に共通の特徴を挙げることは困難です。そこで、ここでは、同じ深成岩の花崗岩類と比較して、その特徴をみていくことにします。

斑れい岩類は、花崗岩類に比べて密度が大きいこと、同じ大きさ(体積)で比べると重いという特徴をもちます。一般的な花崗岩の密度は2.6–2.7 kg/m³であるのに対し、斑れい岩は2.8–3.1 kg/m³程度あります。かんらん岩の場合は更に大きく、3.3–3.5 kg/m³程もあります。このような特徴は、含まれている鉱物であるかんらん石や輝石が、花崗岩を構成する鉱物に比べて高密度であることに由来します。深成岩類の命名が色指数、つまり有色鉱物の量比に基づくため、花崗岩に比べて黒っぽいという特徴があります。無色鉱物である斜長石は極めて新鮮な場合、ほぼ透明に見えますので、そのような斜長石を含む斑れい岩類では、黒色に見えることもあります。斑れい岩類の多くはキュムレイトで、10数cm–数10cm間隔のリズミックな層状構造が認められることがあります。

斑れい岩類は分布が少ない割に多様で理解が難しい存在ではありますが、マントルからマグマが発生する場の情報や、付随する多量の花崗岩類の成因に密接に関係した岩石学的情報をもつ、貴重な存在でもあるのです。

注

- 注1 花崗岩には、第3節で説明するように、第3図で示される、トータル岩・花崗閃緑岩・花崗岩等の珪長質深成岩を一括した“花崗岩類”(英語でgranitoid rocks,あるいはgranitic rocksと表現されると、狭義の“花崗岩(granite)”とがあり、斑れい岩も同様に斑れい岩類(gabbroidあるいはgabbroic rocks)と、狭義の“斑れい岩(gabbro)”があります。本論では、総称には“類”をつけて表記します。
- 注2 例えば、韓国料理の石焼きピビンバ(ピビンパ)の容器や、カーリング競技で使用されるストーンには、花崗岩類が使われています。このうち、カーリングのストーンは、カーリング発祥の地である英国スコットランド沖の島であるAlisa Craigと、英国ウェールズのTrefor採石場の2箇所からの花崗岩に限定されており、世界カーリング連盟の競技会では前者の産地からのもののみが使用されています。(https://metro.co.uk/2018/02/22/curling-stones-made-weight-much-cost-7334343/ 閲覧日:2021年8月18日)
- 注3 シル(sill)とは、地層面等に平行に貫入した板状岩体のことで、パリセード・シルは、厚さ300 m, 延長600 kmに達します。

引用文献

- Le Maitre, R. W., ed. (2002) *Igneous Rocks, A Classification and Glossary of Terms, 2nd edition*. Cambridge University Press, Cambridge, 236p.
- 山口地学会編(1991) 山口県の岩石図鑑. 第一学習社, 東京, 224p.

参考文献

- 鎌田浩毅(2008) マグマの地球科学 – 火山の下で何が起きているか. 中公新書 1978, 中央公論新社, 東京, 262p. (解説: 一般向けの新書ですが, 玄武岩質マグマの成因や分化に関連した, かなり専門的な内容が説明されています).
- 岡村 聡ほか(1995) 岩石と地下資源. 新版地学教育講座 4, 東海大学出版会, 東京, 201p. (解説: 大学専門教育課程の学部生向け相当の岩石学・鉱床学に関する専門書です. 他の専門書に比べると比較的平易に書かれていますが, 一般向けよりも高度な内容です. また, 火成岩岩石学の部分は全体の 1/3 程度です).
- 酒井治孝(2016) 地球学入門(第2版). 東海大学出版部, 東京, 319p. (解説: 大学の教養地学相当の内容が分かりやすく説明されています. 本論で取り扱ったマグマの分化についても簡潔に紹介されています).
- 鹿園直建(2006) 地球学入門. 慶応義塾大学出版会, 東京, 246p. (解説: 慶応義塾大学通信教育課程総合教育科目(教養科目)の教科書であり, 自習によるテキスト学習を前提に執筆されています).
- 高橋正樹(1999) 花崗岩が語る地球の進化. 自然史の窓 7, 岩波書店, 東京, 151p. (解説: 岩石学に関連した書籍としては珍しく, 花崗岩のみを扱った一般向けの書籍です. 斑れい岩類の多くとは成因が異なりますが, 同じ深成岩の仲間として勉強になると思います).
-
- YAMASAKI Toru (2021) Gabbroic rocks: their types, origin, and features.
-
- (受付: 2021年6月17日)

海外自然史博物館紹介シリーズ (その1)

IMA (国際鉱物学連合) 2010 開催地ハンガリーの大学 (ELTE) の自然史博物館 ～鉱物学の歴史を垣間見る～

柳澤 教雄¹⁾

1. はじめに

筆者が、GSJの地質標本(鉱物、化石等)を管理する部署である地質情報基盤センターアーカイブ室に2020年4月に着任して1年以上になる。着任までは、地圏資源環境研究部門および再生可能エネルギー研究センターで地熱利用に関する研究、特に地熱の配管に付着する鉱物(スケール)や材料腐食などの研究やトレーサー試験などの地球化学的な研究を行ってきた。その過程で国際的な共同研究や国際学会での成果発表を行ってきた。当時は地質標本館業務を兼務していたこともあり、出張時に会場付近の自然史博物館を見学する機会もあった。

これらの博物館の紹介をどこかでできればと考えていたが、地質標本管理が本務となった現在の観点で、海外の自然史博物館(大学等の博物館も含む)の紹介を数回ほどの連載で行いたい。

第1回は、2010年8月にハンガリー、ブダペスト市内にあるエトヴェシュ・ローランド大学(Eötvös Loránd Tudományegyetem: ELTE)(写真1)において開催されたIMA(International Mineralogical Association: 国際鉱物学連合)第20回総会に参加した際に見学したELTEの自然史博物館に所属する鉱物・岩石コレクションを紹介する。それとともに、鉱物学やIMAの歴史も紹介したい。



写真1 IMA 総会会場および鉱物・岩石コレクションのある ELTE

なお、本稿執筆にあたり、本誌の前身である「地質ニュース」を含めて国際鉱物学連合に関する報告を確認したところ、地質ニュース1965年8月号に「国際鉱物学連合総会に出席して」(砂川, 1965)、1970年12月号に「IMA-IAGOD Meetings'70」(砂川, 1970)の記事が確認できたが、以後の報告記事は確認できなかった。

2. ELTE 自然史博物館「鉱物・岩石コレクション」に展示されている鉱物学の歴史

会場となったELTEの歴史はIMA2010総会の開会式で紹介された。それによると、ELTEはハンガリーで最古の大学で設立は1635年、その後1777年に現在の場所に移転し、1950年に現在の名称になっている。自然史博物館に所属する鉱物・岩石コレクションの建物は、1774年に創建され、200年以上の歴史を持っている。その創建当時の状況や歴史については、博物館内では常設展示(写真2)、IMA総会会場のポスター展示(写真3)で紹介されていた。

このコレクションはハンガリーで最大の鉱物および岩石のコレクションで、18世紀末頃はヨーロッパで最大規模の



写真2 1774年の大学移転時の資料展示

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード: ハンガリー, 博物館, 鉱物, 岩石, 歴史, IMA, 結晶構造, 化学



写真3 鉱物・岩石コレクションの歴史を説明したパネル（学会会場内に掲示）



写真4 ELTE内の鉱物・岩石コレクション展示

体系化された教育目的のコレクションであった。展示ケースは1880年代に製造され、写真4, 5, 6などに示すようなかたちで鉱物の展示が行われている。

コレクションには約1000種類の鉱物とほぼすべての種類の岩石が収録され、ELTEの学生や研究者の地質学、環境学、化学、歴史学のトレーニングに利用されているだけでなく、高校生のトレーニング支援にも利用されている。鉱物分類学、隕石コレクション、化学周期表展などの他の展示や特別展もあり、2007年度から一般に公開されている。

さて、このコレクションの展示は17世紀以後の鉱物学の発展の歴史を反映しているものであるので、展示内容および「鉱物学」(森本ほか, 1975)の内容をもとに鉱物学の歴史を紹介したい。

まず、鉱物学における結晶学的発見は1669年になされている。1つはデンマークのステノ(N. Steno)が種々の水晶面を測定することによって、対応する面の角が一定であることを示した「面角一定の法則」、もう1つは同じくデンマークのバルトリン(E. Bartholinus)による方解石の複屈折の発見である。その後、結晶の内部構造や結晶軸に関する理論的な研究が進展し、1848年にフランスのブラベ(A.



写真5 写真4の拡大



写真6 展示ケースの一例(イットリウムやアンチモンを含む鉱物)



写真7 ブラベの結晶空間格子の展示

Bravais)により結晶に空間格子が14あり,7つの結晶系に分けられることが示された(写真7)。

一方、鉱物の化学分析法は、18世紀頃から進歩し、ドイツのクラプロート(M. H. Klaproth)は鉱物の分析によりウラン(U)、ジルコニウム(Zr)、チタン(Ti)、セリウム(Ce)などの新元素を発見・確認した。そして、1774年にドイツのウエルナー(A. G. Werner)によって化学組成による鉱物分類の基礎が築かれた。

この鉱物の化学的研究と結晶学的研究との密接な関連はドイツのミッテェルリヒ(E. Mitscherlich)によって1818～1830年頃に行われた同形(例えば金属硫酸塩の多くが結晶水の量が等しければ同じ結晶形をとる)や多形(例えば、炭酸カルシウム(CaCO₃)が方解石とあられ石のように異なった結晶形をとる)の発見を機に確立されていくことになった。

その後多くの鉱物が正確に研究記載されるようになり、19世紀の間に多くのデータが集積された。そのデータは、例えばアメリカの鉱物学者・地質学者であったデーナ(J. D.

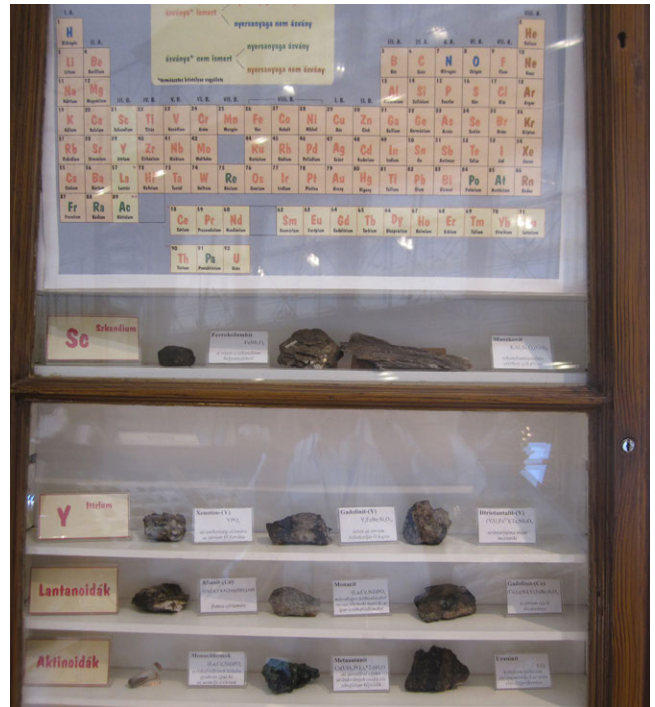


写真8 元素の周期表とスカンジウムやイットリウムなどを含む主要鉱物



写真9 1867年のハンガリーの地質学者ハントケンによる調査研究成果の展示

Dana)などによって整理・出版された。

鉱物学の進展と同時に、無機化学でも新規に発見される元素が増加し、1869年にロシアのメンデレーエフ(D. Mendeleev)によって元素の周期表が提案された(写真8)。

そしてELTE自然史博物館の鉱物・岩石コレクションには、1867年のハンガリー国内での調査として地質学者ハントケン(M. Hantken)による鉱山開発に向けての調査研究成果が展示されている(写真9)。

20世紀にはいとX線結晶学が進展してくる。まずド

イツのラウエ (M. Laue) が 1912 年に結晶が X 線に対して回折格子の役割を果たすことを示し、それを受けてイギリスのブラッグ (W. L. Bragg) が、塩化ナトリウム、塩化カリウム、硫化亜鉛、ダイヤモンドなどの原子的構造の解析に成功した (1915 年にノーベル賞受賞)。この解析の成功は化学や鉱物学に大きな影響を与え、塩化ナトリウムの解析からイオン性化合物の化学結合の性質が明らかにされてきた。そして、1920 年代の後半には、ゴールドシュミット (V. M. Goldschmidt) が簡単な無機化合物の化学組成と結晶構造と結晶の性質との間の関係を解析し、結晶化学の基礎を確立した。また 1930 年にブラッグはケイ酸塩鉱物の結晶構造の法則性を明らかにするとともに、構造的分類法を提案した。さらに、合成鉱物学や実験岩石学の進展により、鉱物の生成条件 (温度、圧力など) や相平衡の解析が行われていき、火山噴火などの現象との関連も解析されるようになってきた。博物館内には、ハワイやセントヘレンズなどの火山噴出物の展示もされている (写真 10)。

また、ブダペスト市内でも 1930 年ごろにマルティノビッチ山の晶洞が発見され、そこで発見された方解石などが地元の石コーナーで展示されている (写真 11)。

3. IMA の設立から 2006 年の IMA 神戸総会まで

このようにして、鉱物学は化学や結晶学、またそれらの分析手法の発達とともに進展し、多くの鉱物種が発見されるとともに鉱物学の立ち位置も変化してきた。

19 世紀後半頃から鉱物学者たちは、成果公表や国際協力のために、IGC (International Geological Congress: 万国地質学会議, 第 1 回はパリ万博と同時開催の 1878 年) や

I.U.Cr. (International Union of Crystallography: 国際結晶学連合) の会合に出席していたが、研究の進展につれ、各国で地質学会から独立した鉱物学会が創立されるようになった。まずイギリス (1876 年)、さらにアメリカ (1916 年)、ドイツ、フランス、カナダなどで鉱物学会が設立された。日本では事情はやや複雑で、1928 年に日本岩石鉱物鉱床学会が設立されていたが、国際協力の窓口になったのは、1955 年に日本地質学会から独立した日本鉱物学会であった。

このように、世界の主だった国で独立した鉱物学会が作られると、鉱物学者の間で独自の国際協力機関を作って、学術討論の場であるとともに、鉱物のデータ記載の統一や新鉱物が記載された場合に検討・承認の役割を果たすことが必要となってきた。1957 年のカナダの I.U.Cr. の席上で鉱物学の国際協力機関としての IMA の設立が提案され、1958 年にスペイン、マドリッドでの設立総会が行われた。その後定期的な総会が実施され、学術討論会および国際協力のための各種委員会 (博物館委員会、新鉱物および鉱物名委員会など) が開催されるようになった。これまでの IMA 総会の開催年と開催地を第 1 表に示す。

1958 年設立総会は 15 カ国、40 名ほどで実施され、第 2 回の 1960 年のコペンハーゲン以後は 2 年に 1 回となった。そして 1960 年以後は 4 年に 1 回は IGC と並行して開催されていた。この IMA の設立から、1964 年のインド、ニューデリーにおける第 4 回 IMA 総会までの経緯、IMA の各委員会の活動の詳細については、砂川 (1965) による地質ニュース記事「国際鉱物学連合総会に出席して」に記されている。

そして、1970 年には IMA 総会がはじめて日本で開催



写真 10 火山噴出物などの展示



写真 11 ブダペスト市内マルティノビッチ山の晶洞で採集された方解石などの展示 (この晶洞は 1930 年頃発見された)

第1表 IMA 総会の開催記録

回	開催年	開催地	
設立	1958	マドリッド	スペイン
1	1959	チューリッヒ	スイス
2	1960	コペンハーゲン	デンマーク
3	1962	ワシントン	アメリカ
4	1964	ニューデリー	インド
5	1966	ケンブリッジ	イギリス
6	1968	プラハ	チェコ
7	1970	京都	日本
8	1972	モントリオール	カナダ
9	1974	ベルリン	ドイツ
10	1976	シドニー	オーストラリア
11	1978	ノヴォシビルスク	ロシア
12	1980	オルレアン	フランス
13	1982	ヴァルナ	ブルガリア
14	1986	スタンフォード	アメリカ
15	1990	北京	中国
16	1994	ピサ	イタリア
17	1998	トロント	カナダ
18	2002	エジンバラ	イギリス
19	2006	神戸	日本
20	2010	ブダペスト	ハンガリー
21	2014	ヨハネスブルク	南アフリカ
22	2018	メルボルン	オーストラリア
23	2022	リヨン	フランス

されることになった。1970年の8月28日から9月2日にかけて東京の経団連会館と京都国際会議場でIAGOD (International Association on the Genesis of Ore Deposits: 国際鉱床学連合)との共催にて開催された。参加国は36カ国、参加者は860名(うち日本人380名)となり、この会議では宇宙鉱物学(隕石や月の標本)、結晶成長、記載鉱物学、鉱物物理・科学、硫化鉱物に関するセッション、10件以上の巡検(見学旅行)が実施された。この各セッションや巡検の詳細については、砂川(1970)により地質ニュース記事「IMA-IAGOD Meetings '70」に記述されている。また、開催に合わせ、「Introduction to Japanese Minerals」という200ページほどの冊子が配布された(写真12)。内容は日本の鉱物学の歴史、主要鉱物、日本で記載された鉱物の詳細などでまとめられていた。そして、出版の時点で日本での産出が確認された596の鉱物種と、日本から提案された新鉱物名70種のうち、IMAによって新鉱物種であると確認された27種が紹介されている。この27種については鉱物

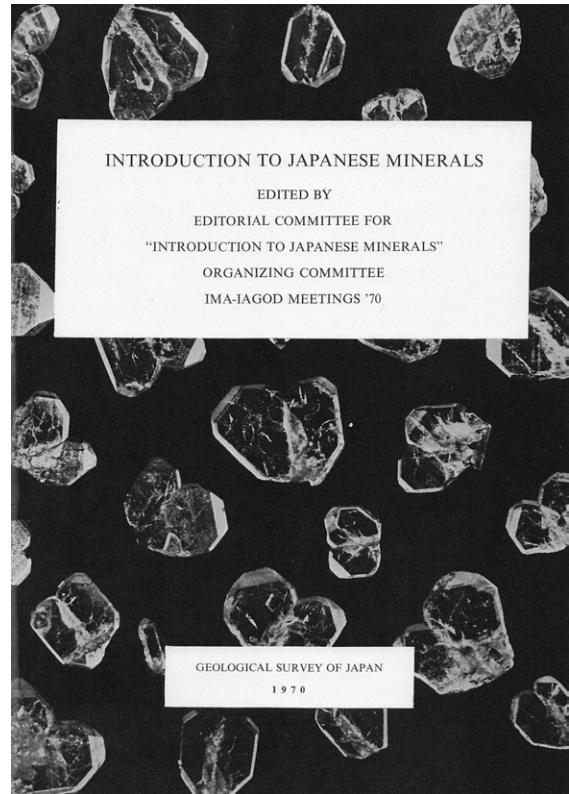


写真12 IMA1970の際に発刊された「Introduction to Japanese Minerals」

の結晶系や詳しい産状、写真や報告された論文などが示されており、1934年に記載された轟石など鉱山で発見されたものや湯河原温泉で産出された湯河原沸石などが含まれている(Editorial Committee for "Introduction to Japanese Minerals", 1970).

その後もIMA総会は2年に一度開催されていたが、1982年以後は、IGC開催の中間年の4年に1回の開催となった。

一方、日本においては日本鉱物学会が毎年春に、日本鉱物学会と岩石鉱物鉱床学会、鉱山地質学会(現在の資源地質学会)の連合学会(三鉱学会)が毎年秋に開催され、それぞれ学術成果発表が行われていた。その一方で、大学間の若手研究者の交流・意見交換を目的として1987年にYMO (Young Mineralogist Organization, 鉱物科学若手の会)が発足した。YMOは20~30代の若手研究者により運営され、上記の学会開催時に交流会を行うとともに、毎年1回夏の学校を開催し、さらに年3回ほどニュースレターを発行していた。

YMO主催の第1回の夏の学校は、1988年岐阜県中津川で行われた。ここでは、地球内部の高圧下での物性や鉱物学のセミナーが行われるとともに、苗木地域への巡検が行われた。また、その後の夏の学校ではKEK(高エネルギー

加速器研究機構)やSpring-8のような加速器を用いた鉱物の微細分析装置の見学会も行われた。テーマも分析技術、粘土鉱物、バイオミネラリゼーション、鉱物学と化学など幅広く取り上げられた。これらのテーマは、やがて日本鉱物学会のセッションでも充実した発表が行われるようになり、同時にIMA総会の日本再招致の機運が高まってきた。そして2006年に神戸国際会議場で36年ぶりに日本で開催されることになった。

2006年の神戸でのIMA総会では、参加国は50カ国となり、参加者は868名(うち日本人は509名)であった。鉱物科学の新基軸をメインテーマとして37課題のセッションが行われ868件の発表(口頭、ポスター)が行われた。さらに次の2010年のIMAがハンガリーのブダペストで開催されること、IMA会長に大阪大学の山中高光教授が就任することが決定された。また、IMA総会期間内に、日本鉱物学会と岩石鉱物鉱床学会が統合されることが決定され、2007年9月に新しく「日本鉱物科学会」が発足した。

4. IMA2010 について

ここでハンガリーでのIMA2010の開催状況についても紹介したい。前回の2006年が日本開催ということもあって、日本からの参加者は140名程度となっていた。産総研からは、筆者のほか、星野美保子さん(地圏資源)、渡辺

寧さん(現秋田大学)などが参加していた。そして、全体としては、参加国が74カ国、参加者数1700名、セッションは78課題となり、発表件数も1600件にのぼった。この参加者数は、現時点までのIMA総会で最大規模である。

開会式では、IMA会長の山中氏や、開催地域の鉱物学会の代表者などの挨拶が行われたが、最後に写真13に示すように大学(ELTE)の学生によるコーラスで締めくくられた。それだけでなく大会期間中、特に昼休みの時間帯には学生によるチェロやバイオリン等器楽演奏が行われた。このあたりはさすが音楽の都といったところである。なお、写真13のスクリーンの左下にある375は、大学設立後375年目であることを示している。

筆者は、「Metal sulfide minerals from deep-seated granitic geothermal reservoir」のタイトルでポスター発表を行った(写真14)。国内の地熱発電所の生産井の地上付近に沈殿した硫化鉱物スケール(閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱など)やシリカスケールについて、その産状や分布、深部の岩石との関連などをまとめた。地熱関係ということで、アメリカやイタリア、ニュージーランドの研究者から質問をうけたが、意外にも地元ハンガリーの参加者からも多くの関心が寄せられた。聞くとフランスのソルツの高温岩体試験に興味があるとのことであった。またハンガリーでは本格的な地熱発電所はないものの、ドナウ川沿いに温泉があり、朝早くからやっているから行って見たらと勧められた。とい



写真13 開会式を締めくくる学生のコーラス

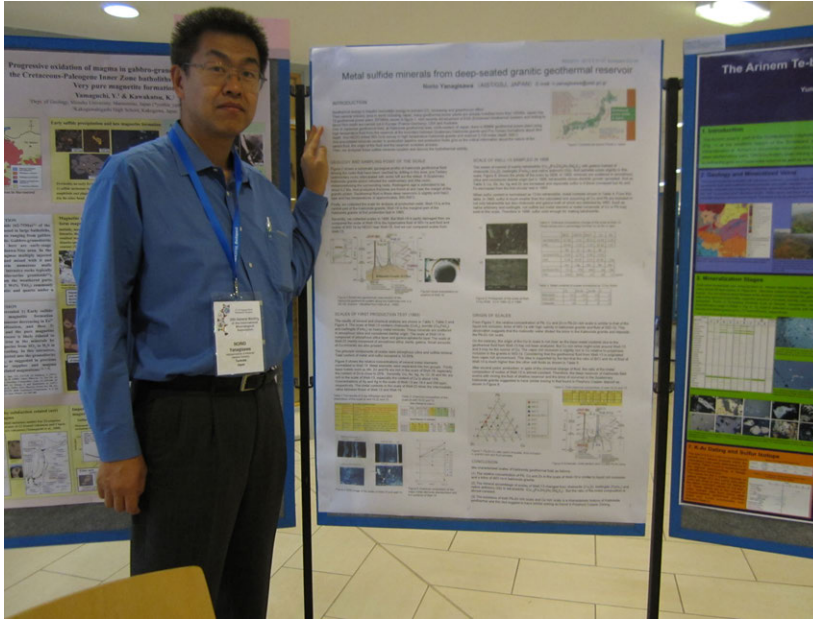


写真 14 筆者のポスター発表



写真 15 ドナウ川沿いの温泉施設の入口



写真 16 ポスター会場の雰囲気

うことで写真 15 に示すようなドナウ川沿いの温泉施設に
 いてプールのような温泉を楽しんだ。水着着用で温度は
 36 ~ 44 °C の数段階あった。

さて、学会会場内のポスター発表会場は写真 16 に示す
 ように常ににぎわっており、また多くの展示ブースが写真
 17 のように出展されていた。このあたりは多くの国際学
 会とあまり変わらない雰囲気であるが、ユニークであった
 のは、写真 18 のように鉱物ワインセレクションとして、
 鉱物の分類である元素鉱物(自然金や硫黄)、硫化鉱物(方
 鉛鉱、閃亜鉛鉱など)、酸化鉱物(磁鉄鉱など)の名称にち
 なんだワインが展示されていたことである。

そして、この IMA2010 の参加者からこれまで紹介した
 ELTE の自然史博物館(鉱物・岩石コレクション)に寄贈さ



写真 17 学会会場の展示ブース



写真 18 鉱物にちなんだワインコレクションの展示 (鉱物の分類方法である, 元素鉱物, 硫化鉱物, 酸化鉱物など関連づけて展示されている)



写真 19 日本から ELTE 博物館への寄贈標本の展示, 6つの新鉱物とひすい輝石などが展示されている。



写真 20 ロシアから ELTE 博物館への寄贈標本(クジャク石), 文献も展示されている。

れた鉱物の紹介がされていた。写真 19 には日本からの寄贈標本を示す。この中には新潟県のフォッサマグナムミュージアムから寄贈されたひすい輝石(jadeite)や日本からの新鉱物として、岡山産の逸見石など 6 種類が展示されていた。なお、ひすい輝石については、2016 年の日本鉱物科学会総会にて日本の国石に選定されている(日本鉱物科学会ウェブサイト)。

同様にほかの国からも寄贈されている。写真 20 にはロシアから寄贈された鉱物(クジャク石と関連文献)の展示を示す。コレクションには写真 21 に示すように、アメリカ産の水晶の日本式双晶も展示されているが、現在は上記の寄贈標本も加えて、鉱物展示がさらに充実していると思われる。



写真 21 アメリカ, アリゾナ州産の水晶の日本式双晶

5. IMA2022 について

鉱物種は年々増加しており、IMA 設立の頃は約 1500 種類であったが、2021 年 6 月時点では鉱物種リストに掲載されているものは約 5700 種類となっている (IMA ウェブサイト)。

そして、次回の第 23 回 IMA 総会は、2022 年の 7 月 18 日から 22 日にかけてフランスのリヨンで開催される予定である。公式ウェブサイトによると、IMA2022 では伝統的な鉱物学とフロンティアに向けての鉱物学のための総会になるとのことである。

伝統的な側面としては、フランスの鉱物学者で現代の鉱物学と結晶学の父であるアユイ (Haüy R. J.) の死から 200 年を迎えることである。アユイは 1802 年にパリの自然史博物館で鉱物学の教授に就任以後、多くの鉱物の結晶学的研究を進めてきた。例えば方解石の断片を観察して劈開面であること、さらに方解石の破片が一貫して菱面体晶となることを発見し、それをもとに結晶構造の理論の研究を進めた。また、結晶の焦電性と圧電性の研究も行った。その研究の過程で、写真 7 に示すような結晶構造模型の製作も行って来た。

そして彼の没後 200 年を記念して、IMA は 2022 年を鉱物学の年 (Min2022) と宣言した。Min2022 は、基礎科学としての鉱物学の重要性を強調するもので、ユネスコによって承認された持続可能な開発のための国際基礎科学年の後援の下で行われる予定である。

その一方で、フロンティアとしては、太陽系天体の鉱物学であり、例えば NASA による火星探査 Mars 2020 による火星の調査、そして、日本のはやぶさ 2 による小惑星リュウグウから採集された試料の鉱物学的解析の成果が期待されている。

はやぶさ 2 については、すでに報道されているように小惑星リュウグウで採取した岩石片は 2020 年 12 月 6 日にオーストラリアで回収に成功し、現在国内の参加機関で各

種分析が進められている。回収の様子とオーストラリアでのガスサンプリング、そして国内での分析計画については、2021 年 5 月 30 日の日本地球惑星科学連合大会の「地球・惑星科学トップセミナー」で橘 省吾さん (東京大学大学院理学系研究科宇宙惑星科学機構) によって紹介されている。

IMA2022 では、上記のトピックスを踏まえて、鉱物分類学、鉱物の物理学と化学、鉱石と鉱物の鉱物学、惑星鉱物学、惑星内部、鉱物の動的な世界などを中心に多くのセッションが開催される予定である。

文 献

- Editorial Committee for "Introduction to Japanese Minerals", Organizing Committee IMA-IAGOD Meetings '70 (eds.) (1970) Introduction to Japanese Minerals. Geological Survey of Japan, Tokyo, 208p.
- IMA (国際鉱物学連合) ウェブサイト. <https://www.ima-mineralogy.org/> (閲覧日: 2021 年 6 月 15 日)
- 森本信男・砂川一郎・都城秋穂 (1975) 鉱物学. 岩波書店, 東京. 640p.
- 日本鉱物科学会ウェブサイト. <http://jams.la.coocan.jp/> <https://www.ima-mineralogy.org/> (閲覧日: 2021 年 6 月 15 日)
- 砂川一郎 (1965) 国際鉱物学連合総会に出席して. 地質ニュース, no. 132, 42-50.
- 砂川一郎 (1970) IMA-IAGOD Meetings '70. 地質ニュース, no. 196, 1-11.

YANAGISAWA Norio (2021) Introduction of the natural history museum in the world (No.1) The Natural History Museum of ELTE, university of Hungary at the venue of IMA meeting 2010 with the history of mineralogy.

(受付: 2021 年 6 月 29 日)

資源をつくる水のちから

—その1 鉱物資源—

佐脇 貴幸¹⁾

1. はじめに

産業技術総合研究所(産総研)の地質標本館には、様々な岩石・鉱物・化石標本が展示されていますが、それらの中には、日本及び世界各地の鉱山から採取された鉱物・鉱石が多数含まれています。こういったものは、しばしば鉱物資源という呼ばれ方をすることがありますが、ではそういった鉱物資源はどのようにしてできたのでしょうか？

その解説は、地質標本館の2階第2展示室にあります。ここでは、各種鉱石標本(第1図下)とともに、鉱物資源および燃料資源(石油、石炭、天然ガス)が、多様な地質環境下で形成されたことを示す模式図(第1図上方)が展示されています。特に鉱物資源の多くは、地下にあるマグマの活動に関連して形成されたことが示されています。

しかしながら、この模式図ではあまりはっきり示されていないものがあります。それは、「水」の関与です。実は、地球上の多くの鉱物資源の形成には、「水」(より正確に言えば流体)が大きな働きをしています。また、燃料資源の

形成にも「水」は関わっていますし、地熱資源は「水」の熱エネルギー、水資源(地下水、河川水など)はまさに「水」そのものが資源となっています。

さて、鉱物資源、燃料資源、地熱資源、水資源という資源の呼び方は、いわば利用する物質(例えば鉄鉱石、石油など)及びエネルギー(例えば熱)の視点から分類したものといたえますが、一方、これを「水」という物質が持つ「ちから」(機能、作用)から見たときにはどう捉えられるのでしょうか？ 2016年4月28日に地質標本館で実施した「イブニング・ジオ・ツアー」のプログラム「資源を作る水のちから」(https://www.gsj.jp/Muse/event/archives/20160428_event.html 閲覧日:2021年5月18日)では、地質標本館の展示物を使って、その「水のちから」という観点から様々な資源のでき方を解説しました。ここでは、その時の説明内容に肉付けして、私たちの生活・社会を支えている基盤の一つである上記の鉱物資源などのでき方のことを紹介します。



第1図 地質標本館2階第2展示室の鉱床のでき方の解説と鉱石標本

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード：水、鉱物資源、燃料資源、地熱資源、地質標本館

2. 「資源」とは何か？

2.1 「資源」の定義

ここで、改めて「資源」とは何かについて考えてみましょう。地質学の分野で主に研究対象とされているのは、前述の鉱物資源、燃料資源、地熱資源、水資源などですが、広く社会に目を向けると、水産資源、森林資源、観光資源、人的資源、情報資源など、様々な使われ方のものがあります。

深海(1972)は、科学技術庁資源調査会(1961, 1971)の文言を引用して「資源」を最広義に定義しており、「資源とは、人間が社会生活を維持向上させる源泉として働きかけうる対象となりうる事物である」、「資源は物質あるいは有形なものに限らない。まして、天然資源のみが資源なのではない。それは、潜在的な可能性を持ち、働きかけの方法によって増大するし、減少もする流動的な内容を持っている。欲望や目的によっても、変化するものである」と述べています。また、山口(1981)は、「鉱石」の定義を「有用成分を含有し、経済的に採取・利用しうる土砂・岩石」とし、この中の経済性が最も重要であると指摘しています。

これらを筆者なりに解釈すると、「資源とは、様々な物質・事象に対応する人間の関わり方によって規定されるもので、その位置づけ・価値は、産業分野、技術革新などの総合的な経済性の状況によって常に変わりうる」ということだと思います。例えば、石英と鉄鉱物(赤鉄鉱や磁鉄鉱など)からなる岩石があったとしましょう。製鉄業を行う上では石英は邪魔なもので、鉄鉱物の方が価値ある「資源」とみなされます。一方、ガラス製造業を行う上では石英の方が価値ある「資源」であり、鉄鉱物は邪魔なものともみなされることになります(例えば、柴田, 1956, p.99を参照)。最近よく聞く「都市鉱山」の場合ですと、廃棄物として処分になっていた電化製品、携帯電話などが、ある時から有用金属(例えば金)が回収できる宝の山に変わった、即ち「ゴミが資源に変わった」ことになるわけです。また、品位が低い、生産コストが高い、使い道があまりない、経済的に見合わないなどの理由のためにあまり重要視されていなかった物質が、回収技術の進歩・開発、生産コストの低下、利用技術及び産業の発展、市場価格の上昇などの理由で、改めて価値ある重要な「資源」とみなされるようになります(例えば、希土類元素)。逆に、市場価格の低下、生産コストの上昇、代替物の登場などによって、価値ある「資源」とはみなされなくなる場合もあります(例えば、火山の噴気孔周囲で採取されていた自然硫黄：後述)。回収技術に関しては、例えば海水1 km³あたり亜鉛が0.3

t、銅及び錫がそれぞれ3.1 t、銀が220 kg、金が4.3 kg含まれています(スキナー [松尾訳], 1971)が、これらを経済的に回収する技術が確立されていないので、現時点で海水はこれらの元素に関しての「資源」とはみなされていません(高多, 1992)。しかし、金をはじめ、ウラン(志賀, 2019)やリチウム(<https://www.jaea.go.jp/02/press2013/p14020701/> 閲覧日: 2021年6月9日)などの元素に関する海水からの回収技術の開発はこれまでも進められてきており、回収技術に経済性、さらには国の安全保障が伴えば、「資源」とみなされることになります(高多, 1992)。このように、「資源」の定義には、産業分野、技術革新などの経済性、さらには安全保障といった社会情勢が大きく関係します。

2.2 地質学での「資源」研究

前述のように、「資源」は様々な物質・事象に対して使われますが、地質学において研究対象としているのは、そのうちの鉱物資源、燃料資源、地熱資源、水資源といった非生物的な天然資源です。ただし、「資源」をつくる「水のちから」という観点からは、水資源はその点を論ずるまでもないので、それ以外の「資源」について話を進めたいと思います。

さて、第1表には、「資源」に関わる主な用語をリスト化しました。このうち、鉱物資源・燃料資源についてみると、「鉱区」は日本では鉱業法で規定される区域、「鉱山」は実際に人間が採掘する活動(鉱業)の場所という、共に人為的な事象に関わる用語といえます。ただし地熱資源は、日本では鉱業法の適用外(金子, 2012, 2016)なので、「鉱区」、「鉱山」という言い方はありません。一方、第1表の中でそれより下位の行にある「鉱床」、「貯留岩」、「熱水系」などは、天然に存在する事象・物質に対する用語です。地質学で研究対象とするのは、実はこの天然に存在する事象・物質です。

つまり、地質学における「資源の研究」を厳密に表現すれば、「資源」として利用することを念頭において、鉱物資源、燃料資源に関しては鉱床の成因や分布、地熱資源に関しては地熱系・地熱貯留層の発達過程・性状などを研究し、「資源となりうるもの」(鉱床、地熱系など)がどのようにしてできたのか、どこにどのように分布しているのかなどを明らかにすることを目的としています。産総研地質調査総合センターでは、旧地質調査所時代以来、長年にわたってこのような地質学的観点から「資源の研究」を重ねてきており、その研究成果の一部が地質標本館に展示されています。

第1表 「資源」に関する主な用語

1: 竹内ほか (1970), 2: 地学団体研究会 (1983), 3: 地熱エネルギー基準用語集委員会 (1982), 4: 森田・谷田部 (2021).

鉱物資源関係		意味	文献
鉱区	mining claim	鉱業法の下で鉱業権の設定された一定の土地の区画.	1
鉱山	mine	鉱業の行われる場所.	1
鉱床賦存地域	ore-bearing area	鉱床分布の偏在性によって限定される鉱床賦存地域のための総括的用語で、規模のいかんは問わない.	2
鉱床	ore deposit, mineral deposit	特定の鉱物又は化学成分がその周囲の岩石の鉱物組成又は化学組成の通常の変化度合いを超えて、特に濃密に集まっているもの.	2
鉱体	ore body	有用鉱床において採掘の対象とされる鉱石の集合部. 鉱床と混同して使用されることが多い.	2
鉱脈	mineralization vein, lode, reef	岩石の割れ目を有用鉱物が充填した、全体としては板状の鉱床.	2
鉱層	ore bed	地層中に介在して層状・レンズ状をなす鉱床.	2
鉱石	ore	有用元素又は有用鉱物が特に豊富に濃集し、鉱業として採掘の対象となり又は利用のために採掘された鉱物の集合体又は鉱床の一部分.	2
脈石	gangue	鉱床、鉱石に伴う経済的に役に立たない鉱物の総称.	2
尾鉱	tailing	鉱石を選鉱して有用鉱物粒を採取した残りの鉱石.	2
鉱物	mineral	物理的、化学的にほぼ均一かつ一定の性質を有する固体物質.	2
鉱化流体(鉱液)	ore-forming fluid	鉱床構成物質を運搬し、鉱床形成の元になる流体.	2

燃料資源関係		意味	文献
鉱区	mining claim	鉱業法の下で鉱業権の設定された一定の土地の区画.	1
鉱山	mine	鉱業の行われる場所.	1
油田	oil field	狭義には主に石油を産出する区域、広義には複数の産油区域を包含した一地方.	2
ガス田	gas field	狭義には主にガスを生産している区域、広義には過去に生産したか今後生産する可能性がある区域.	2
炭田	coal field	経済価値のある炭層が豊富に産出する地域.	2
石油鉱床	petroleum deposit	地下の岩石中に移行しうる量の石油を集積しているもの.	2
ガス鉱床	gas deposit	地下の岩石中に移行しうる量の天然ガスを集積しているもの.	2
石炭鉱床	coal deposit	地下の岩石中に移行しうる量の石炭を集積しているもの.	2
貯留岩	reservoir rock	多孔質・浸透性の岩石で、その孔隙が石油、水などで満たされているもの.	2
油層岩	reservoir rock	貯留岩のうち、特にその一部に連続層として石油を包蔵するもの.	2
油層	petroleum reservoir	貯留岩の中で石油が連続層をなす部分.	2
ガス層	gas reservoir	貯留岩の中で天然ガス、あるいは天然ガスを溶かした水が連続層をなす部分.	2
炭層	coal seam, coal bed	地層中に層状をなして存在する石炭の層.	2
帽岩	cap rock	石油・天然ガス鉱床において、貯留層を直接覆って流体を上方に通さない、不浸透性岩.	3
油頁岩(油母頁岩)	oil shale	頁岩のうち、油母を含有していて、乾留して多量の石油を生成するもの.	2
油砂	oil sand	石油を含んでいる砂・砂岩及び炭酸塩岩などの堆積岩類.	2
ケロジェン(油母)	kerogen, petrogen	泥岩中に含まれる有機堆積物のうち、アセトンやベンゼンなどの有機溶媒と呼ばれる薬品に溶けない成分.	2, 4
油田水	oil field water	油田鹹水(かんすい)ともいい、油層の周り・油層内に存在する塩水.	2

地熱資源関係		意味	文献
地熱地域(地帯)	geothermal area, geothermal field	地熱現象を有する地域.	3
熱水系	hydrothermal system	地熱流体とその熱の流れ、およびそれを支配する物理条件(温度、圧力)の場を含めた全体のシステム.	3
地熱貯留層	geothermal reservoir	透水性の地層の孔隙が地熱流体で満たされ、地下深部の熱源からの加熱によって生ずる浮力及び周囲の強制的圧力などにより、地熱流体がその中を流動しうる地層.	3
開口性フラクチャ	no-closed fracture	岩盤中に存在する割れ目. 天然の熱水が入っている場所.	3
帽岩	cap rock	地熱貯留層を直接覆って流体を上方に通さない、不浸透性岩.	3
地熱流体	geothermal fluid, hydrothermal fluid	地熱地域の地下にある高温の流体(蒸気、熱水).	3
深層熱水	deep geothermal water	主に平野部の地下深くに存在する地下水で、地球内部からの熱伝導によって温められた熱水.	3

3. 水の「ちから」

身の回りにある水。当たり前のように毎日飲んで、手を洗って、お風呂に入って……でも、水は自然界ではとても「異常な物性」を持つ物質です。例えば、固体(氷)の方が液体(水)よりも密度が小さい、分子量(水=18)に近い他の物質(例えばメタン=16)に比べて融点・沸点が異常に高い(1気圧下での水の沸点が100℃に対し、メタンは-161.5℃；国立天文台編, 2004), いろいろなものを溶かし込んでしまうなど、実は当たり前ではない性質を持つ物質なのです。その特異性については、様々な本、ウェブページに解説がありますので詳しいことはそちらを見ていただきたいと思います。小論の主題である資源との関係でいえば、「水のちから」のうち、「溶かし込む」、「沈殿させる」、「化合する」などの化学的な「ちから」、及び「削る」、「運ぶ」、「溜める」などの物理的な「ちから」(第2図)が「資源」をつくる上で重要となります。

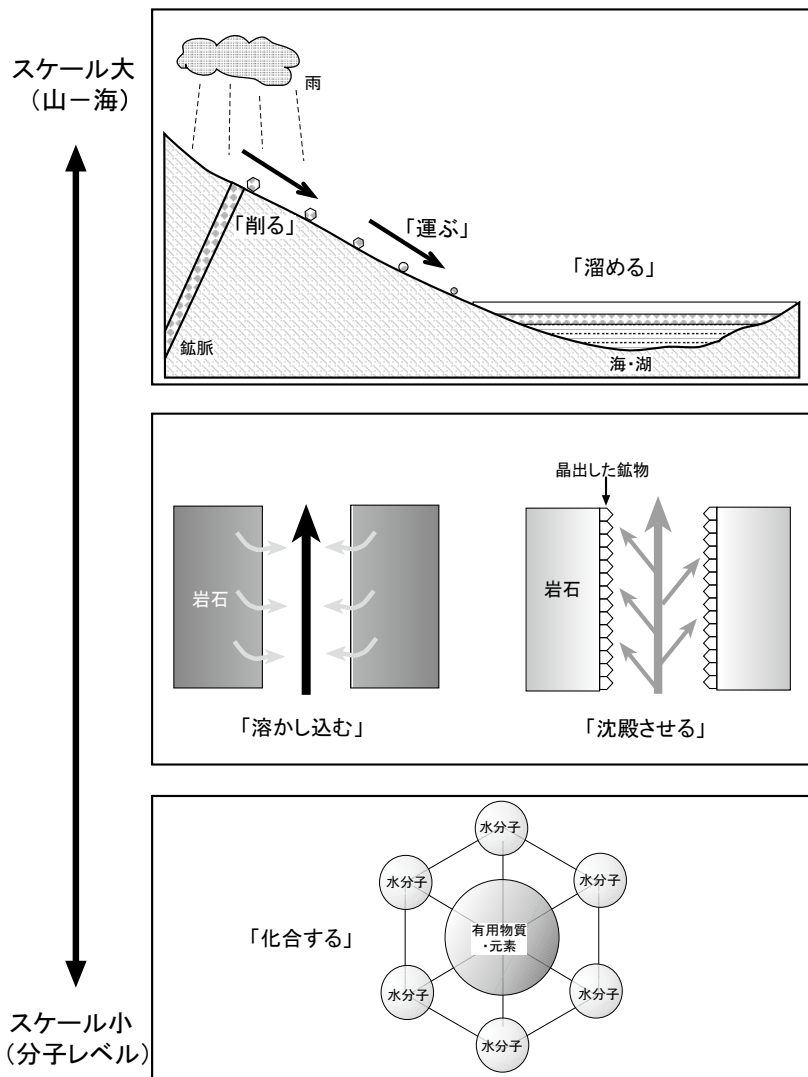
4. 鉱物資源をつくる「水のちから」

小論では、まず鉱物資源に関わることを述べ、燃料資源・地熱資源に関しては稿を改めて述べたいと思います。

4.1 鉱床の分類

鉱物資源の鉱床は、対象とする元素や物質によって、金属鉱物資源、非金属鉱物資源の鉱床に分けることができます。金属鉱物資源の鉱床としては、例えば金、銀、銅、鉄、鉛、亜鉛、希土類元素(レアアース)などがあります。非金属鉱物資源の鉱床としては、長石、珪石、粘土、石灰岩などがあります。

一方、鉱床の成因に基づく分類もあります(第2表)。この表を見てお分りの通り、実は鉱床の分類名は必ずしも統一されているわけではありませんが、大まかには火成作用、堆積作用、変成作用それぞれに応じて形成される鉱床という観点から分類がなされていることがお分りと思



第2図 様々な「水のちから」

第2表 鉱床の成因に基づく分類
 なお、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)については、風化残留鉱床と漂砂鉱床は分類表(p.123, 表 4-5-2)には示されていないが、
 その他の箇所の文中の内容に合わせて付加。

梶子(2008)	産業技術総合研究所地質標本館編(2006)	武内(1986)	スミルノフ(渡辺・岸本訳)(1976)	岡野(1975)	渡辺・岩生(1969)	柴田(1956)
マグマ鉱床 結晶分化鉱床 液相分離鉱床 その他のマグマ鉱床 熱水鉱床 斑岩型鉱床 スカルン鉱床(接触交代鉱床) 貫入岩に伴うその他の熱水鉱床 広域変成作用に伴う熱水鉱床 陸上火山活動に伴う熱水鉱床 海底熱水鉱床 低温熱水鉱床	正マグマ性鉱床 ベグマタイト鉱床 スカルン鉱床 熱水鉱床I 中～高温熱水鉱床 熱水鉱床II ゼノサーマル鉱床 熱水鉱床III 浅熱水鉱床 熱水鉱床IV 鉱染型金鉱床 温泉堆積性鉱床 海底熱水鉱床I 黒鉱鉱床 海底熱水鉱床II キーラーガー 海底熱水鉱床III 層状マンガン鉱床 昇華鉱床	マグマ成鉱床 正マグマ鉱床 ベグマタイト鉱床 カーボナタイト鉱床 スカルン鉱床 熱水鉱床 岩銅硫化鉄鉱床	マグマ系鉱床 マグマ分化鉱床 ベグマタイト鉱床 カーボナタイト鉱床 接触交代鉱床 気成鉱床 熱水鉱床 噴気堆積鉱床	岩漿系鉱床 深成岩漿系鉱床 正岩漿性鉱床 ベグマタイト鉱床 気成鉱床～気成-深熱水性鉱床 接触交代鉱床 熱水性鉱床 高温型 中温型 低温型 浅岩漿系鉱床 高温-中温-低温移過型熱水性鉱床 中温-低温移過型熱水性鉱床 低温型熱水性鉱床 火山噴気型鉱床 陸上火山噴気-温泉型鉱床 海底火山噴気-堆積鉱床	火成鉱床 正岩漿鉱床 ベグマタイト鉱床 気成交代鉱床 接触交代鉱床 熱水鉱床 熱水交代鉱床 昇華鉱床	
堆積鉱床 化学的堆積鉱床 風化残留鉱床 漂砂鉱床	風化残留鉱床 漂砂鉱床	堆積源鉱床 風化鉱床 砂鉱床 堆積鉱床	堆積系鉱床 機械的堆積鉱床 化学的堆積鉱床 蒸發岩鉱床 有機的堆積鉱床 風化残留鉱床 風化浸透鉱床	堆積系鉱床 風化残留鉱床 天水-地下水性鉱床 化学的沈殿鉱床 機械的堆積鉱床 有機的堆積型と機械的堆積型の中間型鉱床 風化残留作用により生じた鉱床 有機的沈殿鉱床	水成鉱床 露天化鉱床 沈殿鉱床 砂鉱床	
	変成鉱床	変成源鉱床 被変成鉱床 変成鉱床	変成鉱床 続成作用による鉱床 熱変成鉱床 広域変成鉱床 自変成鉱床	変成鉱床 接触変成鉱床 広域変成鉱床 自己変成鉱床 多重変成鉱床	動力変成鉱床	
						有機鉱床 石炭鉱床 石油鉱床

ます。

例えば、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)では、有用鉱物が濃集する機構に基づき、鉱床の成因を

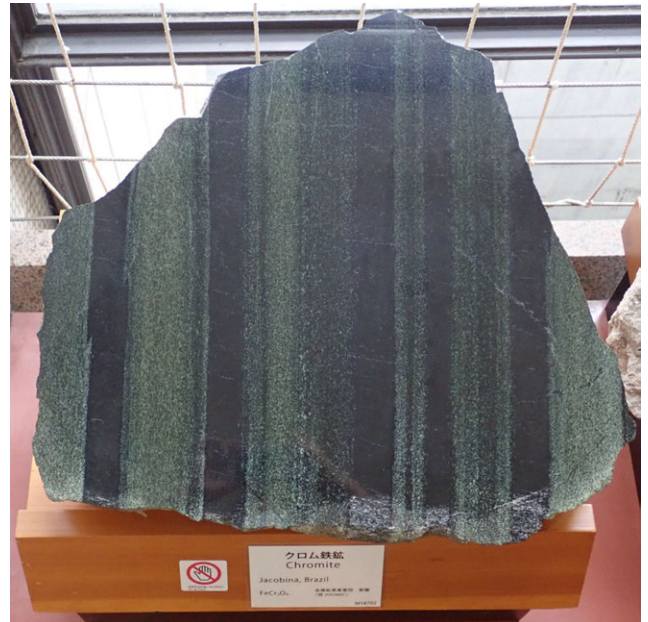
- (1) マグマという高温の溶融体中で物理的に分別(正マグマ性鉱床)
- (2) 液体状態や超臨界状態の水から鉱物が化学的に沈殿(ペグマタイト鉱床, スカルン鉱床, 熱水鉱床, 温泉堆積性鉱床, 海底熱水鉱床)
- (3) 高温の蒸気からの昇華濃集(昇華硫黄鉱床)
- (4) 岩石が雨水や熱水の作用で溶かされた後に最も安定な鉱物だけが残留(珪石鉱床, 粘土鉱床)
- (5) 風化作用によって岩石から分離した鉱物粒子が, 水流によって物理的に濃集(砂金, 砂鉄鉱床, 堆積性粘土鉱床)

の五種類に分けています。このうち、今回のテーマである「水のちから」がほぼ関係しないのは、(1)の正マグマ性鉱床だけです。これは、マグマの固結に伴って鉱物が晶出し、それがマグマだまり内で集積してできた鉱床で、例えばクロム鉄鉱鉱床(第3図)が代表的なものです。一方、他の四種類は、全て何らかの形で「水のちから」が関係しています。それを踏まえ、第4図には、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)の図5-4-1及び記述内容に基づいて、

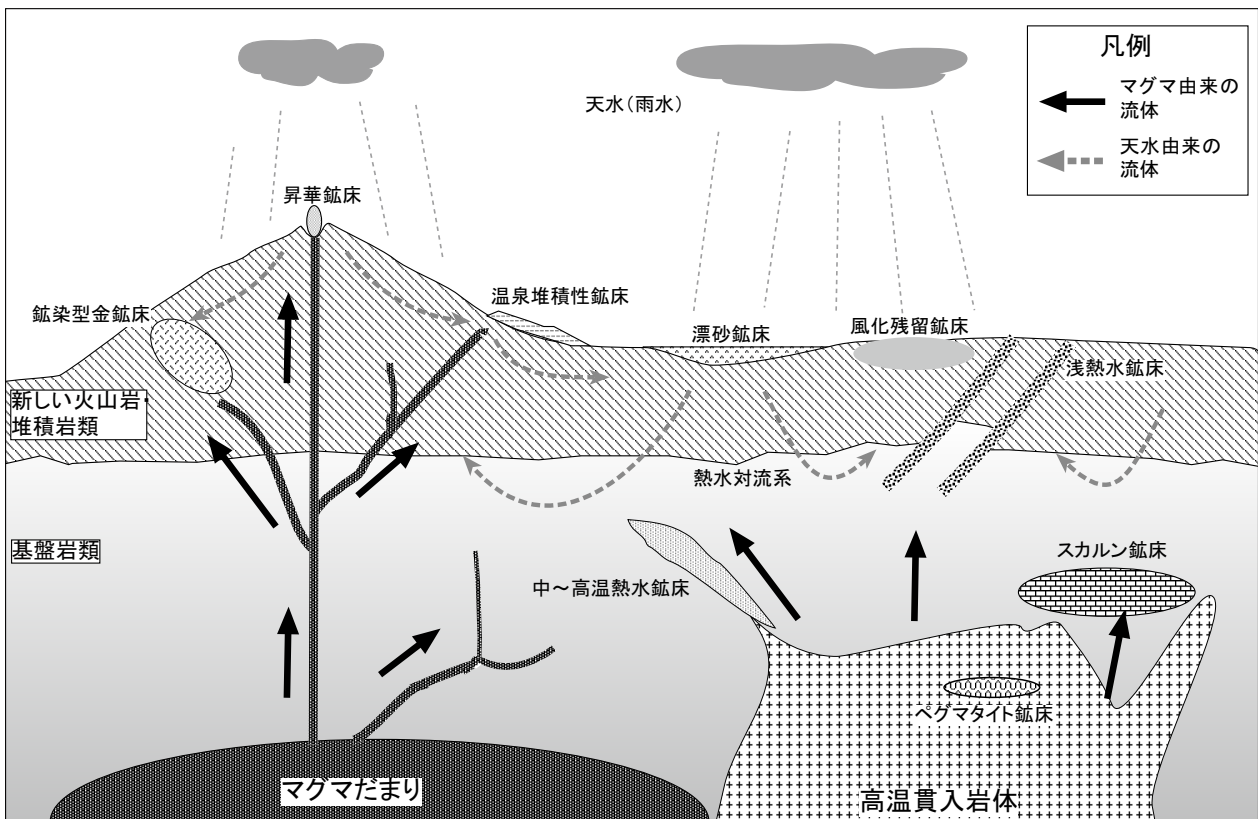
鉱床の生成環境を模式的に示しました。

4.2 鉱床をつくる「水」

上記の(2)のような鉱床をつくる「水」は、より正確に言えば鉱化流体、鉱液、熱水などと呼ばれるもの(第1表)で、



第3図 クロム鉄鉱の標本(2階第2展示室入口)



第4図 第2表の産業技術総合研究所地質標本館編(2006)の分類に基づく鉱床の生成環境の模式図

高温高压の条件下で、様々な元素を高濃度に溶かし込んでいるものです。この「水」が一体どこから来たのか、そこに溶け込んでいる元素がどこから来たのか、それらの元素がどのように集積したのか、という点はまさに鉱床の形成過程を明らかにする「鉱床学」という学問分野での核心となる問題です(例えば飯山, 1989)。

ごく簡単に言いますと、鉱化流体などと呼ばれる「水」の由来にはいくつか種類があり、マグマが冷却する段階で分離・放出され、様々な成分を溶かし込んだマグマ由来のもの(マグマ水)、雨水が地面に浸み込んだ地下水に由来するもの(天水)のほか、海水、地層中に長年取り込まれていた遺留水、変成作用に伴う変成水などがあると考えられています(鞠子, 2008)。第4図では、このうちのマグマ水と天水に関して示していますが、これらの「水」が周囲の岩石と反応しながらそこに含まれる元素を溶かし込み、また冷却、沸騰、化学反応などの過程を経て、それらの元素を鉱物として沈殿(晶出)させ、鉱床が形成されると考えられています。すなわち、第2図の「水のちから」のうち、化学的な「溶かし込む」、「沈殿させる」、及び物理的な「運ぶ」(第2図の状況とはちょっと異なりますが)という「ちから」が重要になります。

ただし、実際に鉱床を探索しても、そこには「水」そのものは目に見える形ではほとんど残っていません。そのため、鉱物の詳細な産状観察・化学分析や、鉱物中に残っている流体包有物(例えば佐脇, 2003)と呼ばれる微小・微量の水の分析を通して、元の「水」(鉱化流体など)の性状、鉱床の成因を探っています。

以下には、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)の分類を踏まえ、実際に地質標本館内に展示されている標本を例にとって、「水」と資源の関係をお話したいと思います。鉱床の種類は、形成過程・場所を考慮すれば実に多種多様に分類されますが、ここではそのうちの①ペグマタイト鉱床、②スカルン鉱床、③熱水鉱床、④温泉堆積性鉱床、⑤昇華鉱床、⑥海底熱水鉱床、⑦海底沈殿鉱床、⑧風化(残留)鉱床、⑨漂砂鉱床、⑩蒸発岩鉱床に絞って紹介したいと思います。

4.3 ペグマタイト鉱床

ペグマタイト(pegmatite)とはギリシア語の“pegma”(くっつけ合わされたもの)に石を意味する接尾語“-ite”が付けられた言葉で、和訳は巨晶花崗岩です(歌代ほか, 1978)。その名の通り、大きな鉱物結晶からなることが特徴です。

第5図に示したのはペグマタイトの例ですが、Aは岐阜

県の苗木花崗岩中のペグマタイト、Bは山梨県の甲府花崗岩中のペグマタイトの石英(水晶)、Cは島根県の馬谷城山^{うまのたにしろやま}の石英、Dは福岡県福岡市長垂^{ながたれ}のリチウムペグマタイト(下川, 2017)です。日本では上記の苗木地方のほかに、福島県石川地方、滋賀県田上山^{たなかみやま}周辺が三大ペグマタイト産地として知られています。また、山梨県の甲府花崗岩体は、ここに示したような巨大な水晶が産出することが有名で、これが山梨県での宝飾品製造(水晶細工)の原料となりました(草下, 1990; 梅田・吉澤編, 2012)。馬谷城山鉱山の石英は、珪石として陶磁器原料、建材、濾過材などに利用されています(酒井, 1994)。

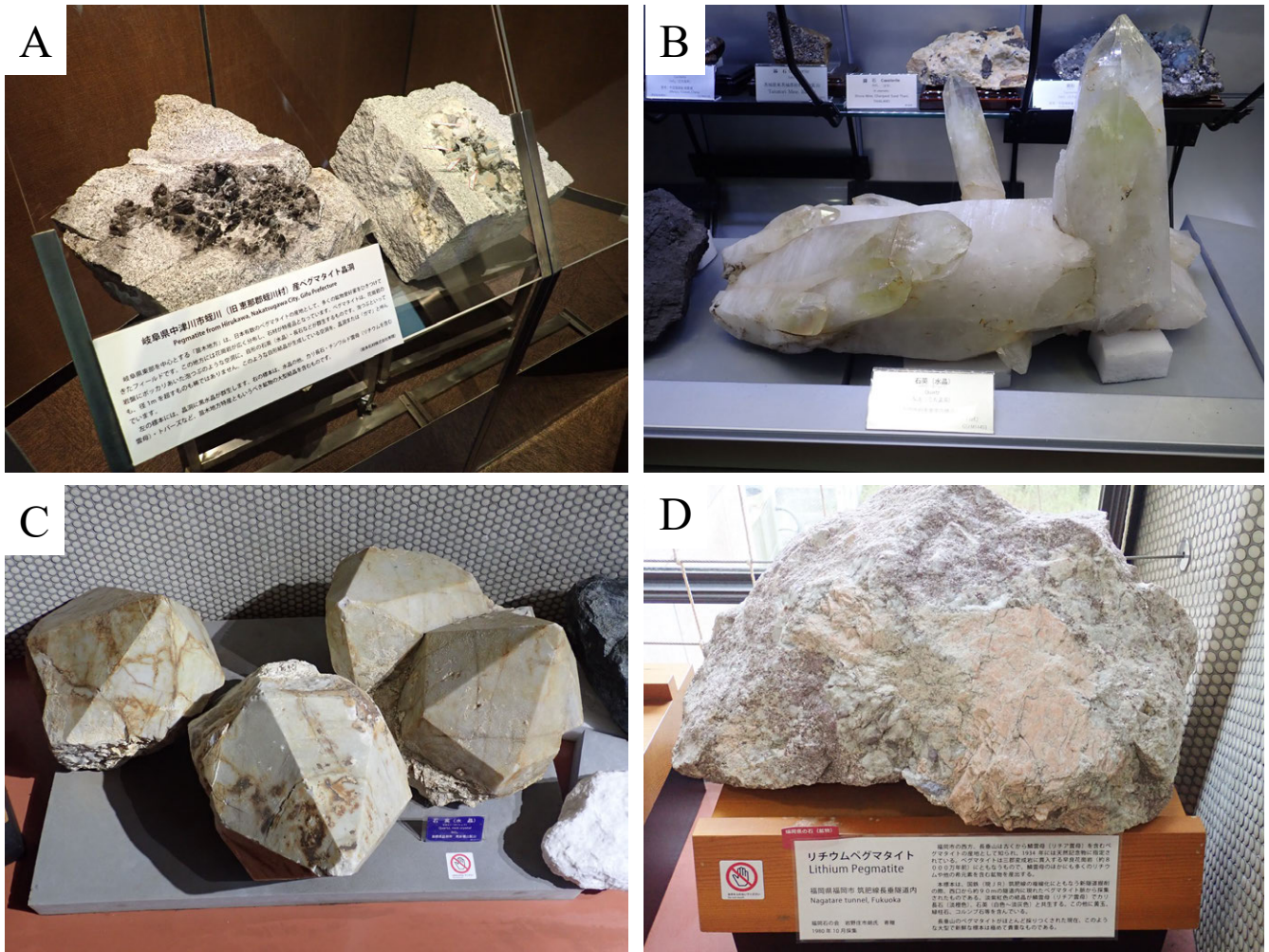
このようなペグマタイトは、マグマが冷却して鉱物が晶出する過程で分離された「水」が、固結しつつあるマグマ～火成岩体内の一部に集まることで形成されます。この「水」には、シリカ分(SiO₂)などのほかに、それまでに晶出した鉱物には含まれにくい元素、例えばリチウム(Li)、フッ素(F)、希土類元素、ウラン(U)などが比較的高い濃度で溶け込んでいます。冷却するにつれ、この「水」からこれらの元素を含む鉱物が晶出し、石英(SiO₂)、リチア輝石(LiAlSi₂O₆)、リチア雲母(K₂Li₃Al₅Si₆O₂₀(OH, F)₄)、螢石(CaF₂)、モナズ石((Ce, La, Y, Th)PO₄)、各種ウラン鉱物などからなるペグマタイトが形成されることとなります。それらの鉱物が多量に存在する場合には鉱床として扱われ、珪石、リチウム、フッ素、希土類元素、ウランなどを得るための資源として利用されることとなります(飯山, 1998)。

4.4 スカルン鉱床

スカルン(skarn)というのは、もともとはスウェーデン語で汚物、不潔物、ごみなどの意があります。それが鉱山用語として使われるようになると、資源として価値が低い脈石(第1表)の意味で使われるようになったようです(鈴木, 2005)。

第6図には、スカルンの例を示します。Aは茨城県^{いなだ}の稲田花崗岩中にみられるスカルン、Bは岩手県^{かまいし}の釜石鉱山の鉄鉱物を含むスカルン鉱石、Cは岐阜県^{かみおか}の神岡鉱山の垂鉛・鉛鉱物を含むスカルン鉱石です。

スカルンは、花崗岩などのマグマが固結して形成された火成(貫入)岩体に伴って形成されることが多く、特に、石灰岩や苦灰岩などの炭酸塩からなる、あるいは炭酸塩を多く含む岩石が、様々な元素を溶かし込んだ高温の「水」と反応して形成されることが一般的です。ただし、火成岩体から離れたところにもスカルンは存在することがあり、このことから、火成岩体は必ずしも「水」の供給源ではなく、むしろ「水」を熱し、対流系をつくるための熱源としての働き



第5図 ベグマタイトの例 A: 岐阜県苗木花崗岩中のペグマタイト (2階第2展示室), B: 山梨県甲府花崗岩中の水晶 (1階第4展示室), C: 島根県馬城山鉱山の石英 (1階アンモナイト階段下), D: 福岡市長垂のリチア雲母を含むリチウムペグマタイト (2階第2展示室入り口)

が重要であると考えられています(飯山, 1998)。

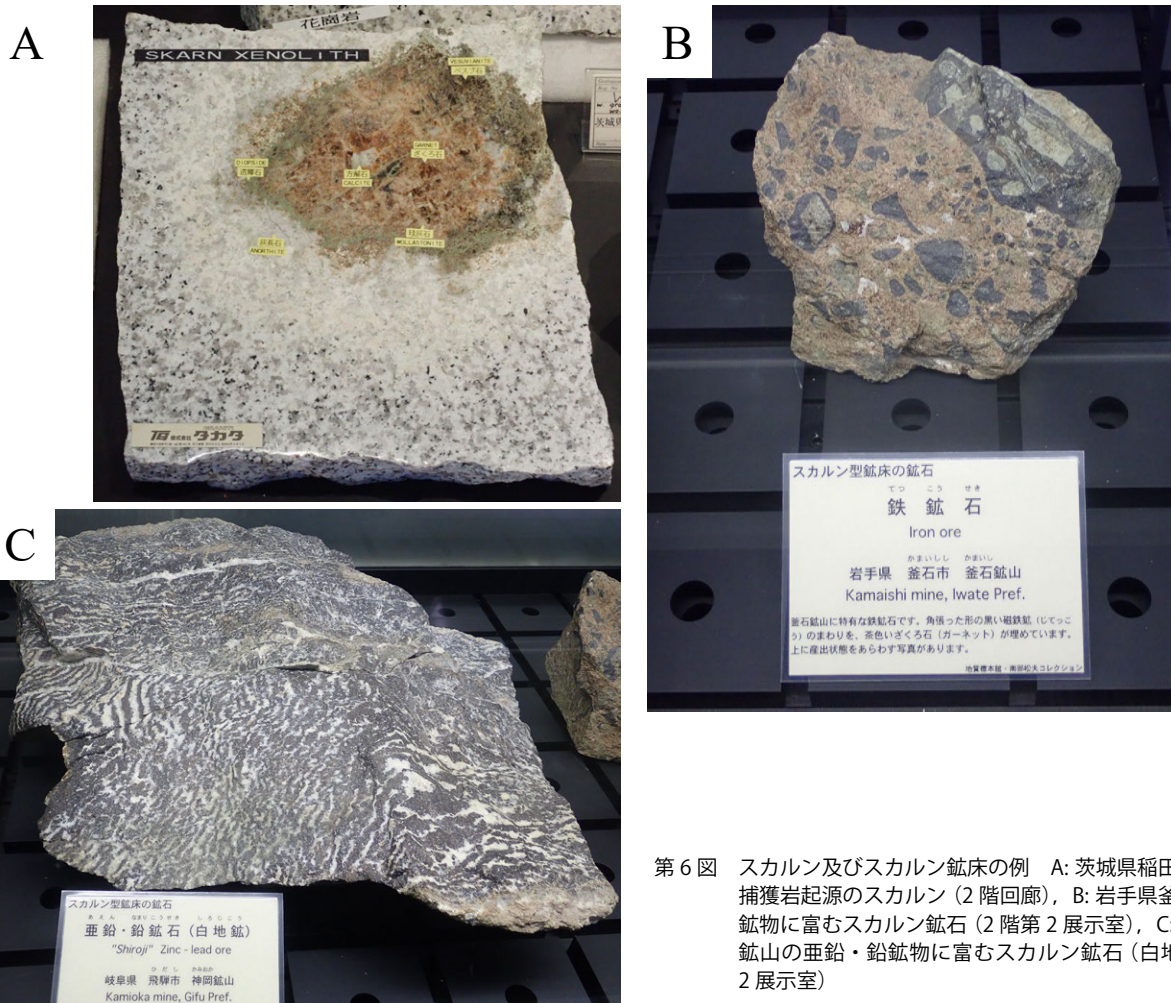
一般的に、この「水」にはシリカ分が多く含まれており、これが炭酸塩と反応することで、珪灰石(CaSiO_3)、Ca-単斜輝石($\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_6$)、Ca-石榴石(グランドイト: $\text{Ca}_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)、^{りよくれんせき}緑簾石($\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$)などが形成されることとなります。また、鉍化流体の温度が下がっていくと、角閃石、電気石(これらの化学式は省略)、^{すず}螢石などの出現とともに、タングステン、モリブデン、錫などの金属元素の酸化物や各種硫化物(CuFeS_2 , FeS_2 , FeS , ZnS , PbS など)が出現するようになります(飯山, 1998)。これらの金属鉍物が十分な量存在するところが、スカルン鉍床として開発対象になるわけです。

4.5 熱水鉍床

熱水鉍床は、その名の通り、高温の「水」(熱水)が様々な岩石と反応しつつ地下を移動し、温度、圧力、pHなどの物理化学条件が変化すると、熱水から鉍物が晶出して形成

される鉍床です。日本では、このタイプの鉍床は非常に数多く存在します。これは、日本では火山に代表される火成活動とそれに伴う熱水系の形成が、過去から現在に至る長い期間に、国土の広い範囲にわたって起きてきたためと考えられます。

この熱水鉍床に属する鉍石は地質標本館に数多く展示されていますが、その中の代表的なものを第7図に示します。第7図Aは北海道の光竜鉍山の金・銀鉍石、Bは秋田県^{あらかわ}の荒川鉍山(銅鉍床)の石英脈、Cは世界トップレベルの金鉍山である鹿児島県の菱刈鉍山の金・銀鉍石です。鉍脈は、^{ひしかり}岩石がパカッと割れて開いた面(割れ目)に沿ってできますので、鉍脈全体の形状は、いわば、厚さに対してずっと幅広い面を持った板状の形態となります(実際には割れ目の形状によって、面がうねったり分岐・合流したりして、複雑な形状になります)。A、C、及びBの写真手前にある小さな標本は、その鉍脈の「厚み」の方向から、一方Bの写真奥側の大きな標本は、鉍脈の「面」の方向から見ているもの



第6図 スカラン及びスカラン鉱床の例 A: 茨城県稲田花崗岩中の捕獲岩起源のスカラン (2階回廊), B: 岩手県釜石鉱山の鉄鉱物に富むスカラン鉱石 (2階第2展示室), C: 岐阜県神岡鉱山の垂鉛・鉛鉱物に富むスカラン鉱石 (白地鉱; 2階第2展示室)

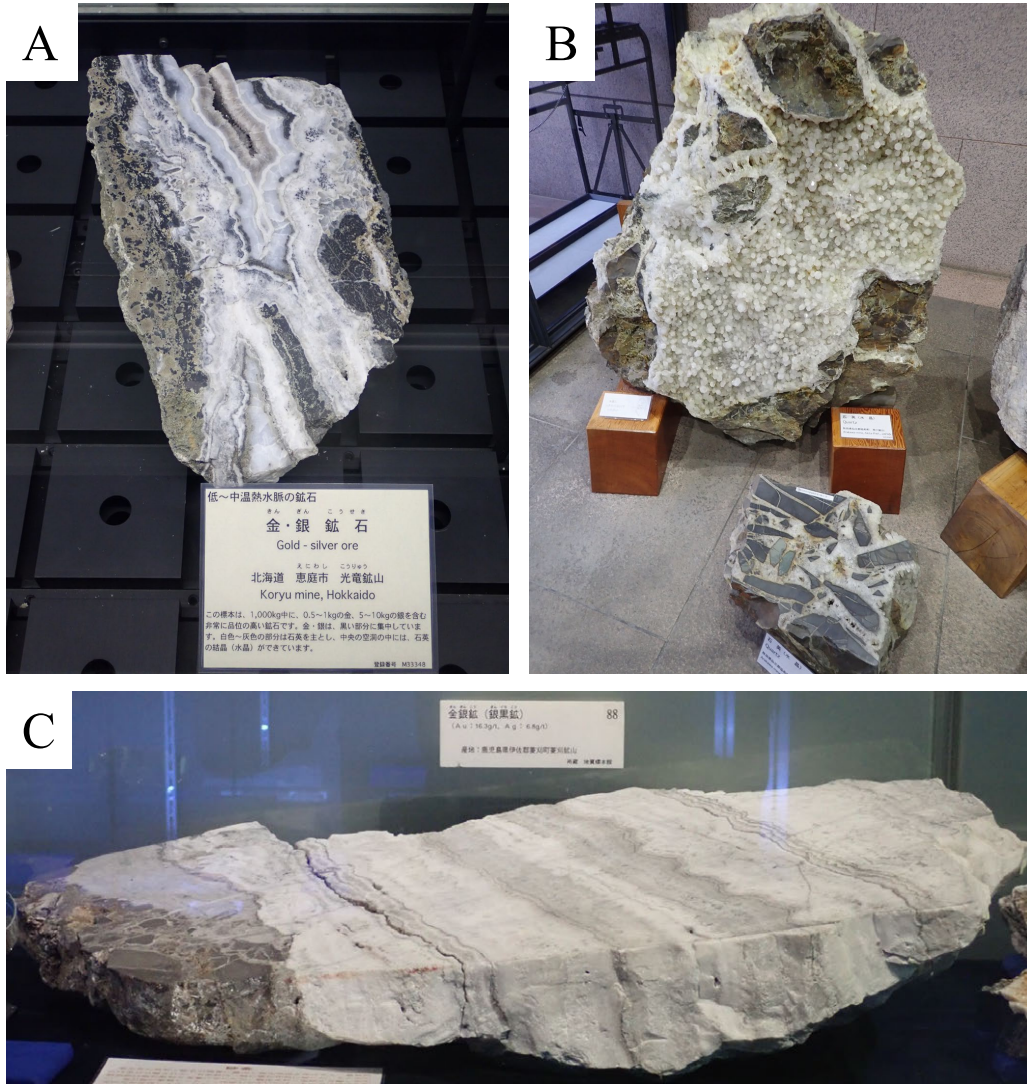
に相当します。これらの標本を見てお分りの通り、鉱脈を「厚み」の方向から見ると、どれも地層のように、鉱物の帯状組織が幾重にも重なってできているように見えます。このような鉱脈の組織は、まさに「水のちから」のうちの、「溶かし込む」、「運ぶ」、「沈殿させる」などのちからが働いて形成されました。

第8図にその模式図を示します。まず、岩石中に割れ目ができ、そこを様々な成分を溶かし込んだ熱水が通過する時(第8図(1))に、温度低下、沸騰などにより溶解度が下がると、溶存成分が鉱物となって沈殿します。これが割れ目を充填することで、割れ目は一旦閉塞します(第8図(2))。第7図Bの荒川鉱山の手前の小さな標本でいうと、母岩中に多数の割れ目ができ、そこを通った熱水から石英が晶出して割れ目が充填され閉塞しています。このようにして閉塞した割れ目は、地震や深部に閉じ込められた熱水の圧力上昇などによって、古傷のように再び開くことがあります(第8図(3))。そこを、再び熱水が通過して鉱物が沈殿し、割れ目が閉塞するという過程を何度も繰り返して

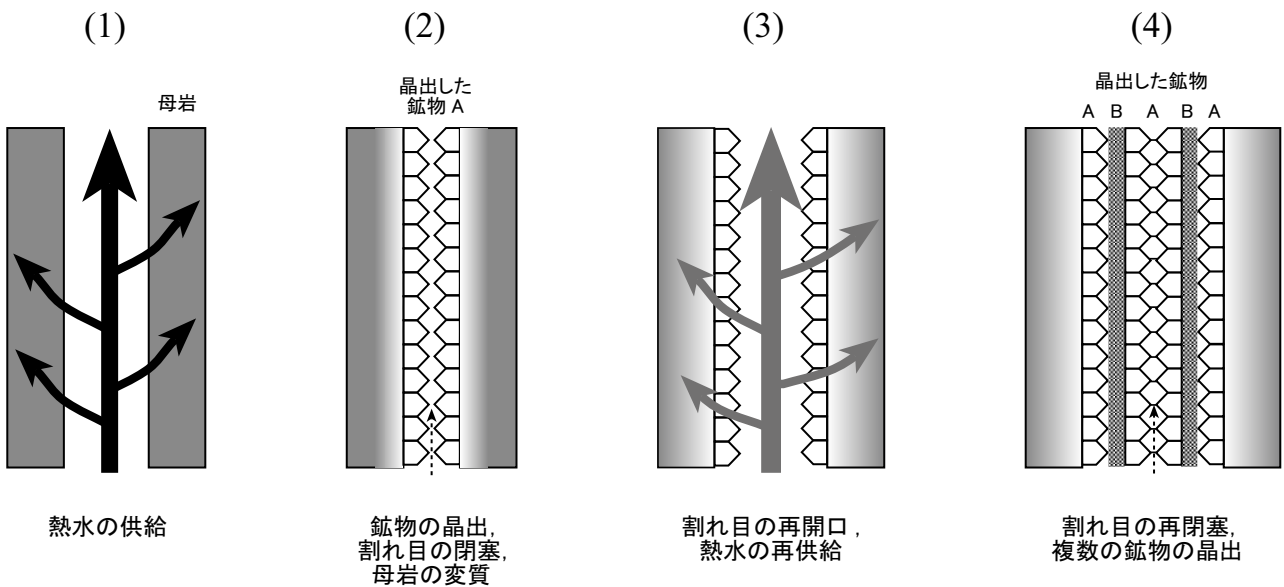
いくことで、徐々に鉱脈全体の幅が広がります。また、温度、化学組成などの物理・化学条件が異なった熱水が通過すれば、最初とは異なる鉱物が沈殿することがあります(第8図(4))。例えば、光竜、菱刈の標本(第7図A, C)では、石英を主とする鉱物帯の間に、銀黒と呼ばれる黒っぽい帯状部分があり、ここに金・銀が集まっています。このように、熱水が供給され鉱物が沈殿するという過程が何度も繰り返されることで、金・銀などの元素が多量に沈殿する鉱床になったと考えられます。

なお、熱水の一部はもともと存在していた岩石(母岩といいますが)内にも浸透して化学反応を起こし、母岩中の成分が溶け出したり、逆に熱水中の溶存成分が母岩に付加されたりして、もとの母岩中に含まれていたものとは違った組織・鉱物が形成されること(熱水変質)が一般的です(第8図(2))。熱水鉱床(に限りませんが)を探すためには、まずこのような熱水変質した岩石を探すことが重要な手掛かりとなります。

さらには、この熱水変質が進むことで形成される鉱床も



第7図 熱水鉱床の例 A: 北海道光竜鉱山の金・銀鉱石 (2階第2展示室), B: 秋田県荒川鉱山の石英脈 (地質標本館入口), C: 鹿児島県菱刈鉱山の金・銀鉱石 (2階第2展示室)

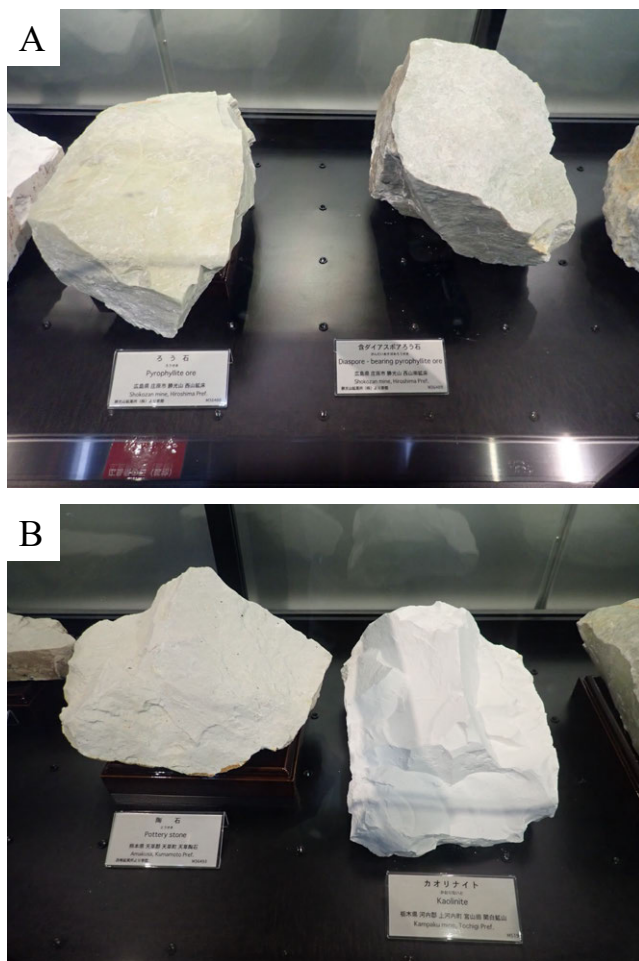


第8図 熱水鉱床の形成過程の模式図 (鉱物の沈殿, 熱水変質等)

あります。熱水の供給により岩石中のアルカリ金属(ナトリウム、カリウムなど)やシリカ分が溶けて排出される(溶脱^{ようだつ}といいます)ことで、4.1節で述べたような様々な非金属鉱物鉱床が形成されることがあります。鉱床の形態は、熱水系の規模・形、熱水の上昇の仕方によって変化しますし、形成される鉱物は、熱水の温度やpHによって多様なものがありますが、例えば珪石、ロウ石、陶石、カオリナイト、セリサイト、タルク、長石、ドロマイトなどがあります(須藤, 1992)。第9図には、そのロウ石、陶石、カオリナイトの例を示します。これらの鉱石は耐火物、一般陶磁器、タイル、衛生陶器、碍子^{がいし}などの原料として重要で、わたしたちの身近な生活用品に幅広く使われています。

4.6 温泉堆積性鉱床

4.5節で述べた熱水が、徐々に温度を下げながら地表まで到達すれば、温泉として湧出することになります。この湧出する温泉が地表を流れ下る間に溶存成分を沈殿させて



第9図 非金属鉱物鉱床の例 A: 広島県勝光山^{しょうこうざん}のロウ石, B: 熊本県天草の天草陶石(左), 栃木県関白鉱山^{かんぱく}のカオリナイト(右)(A, Bともに2階第2展示室)

鉱床をつくる場合があります、それが温泉堆積性鉱床(鉱層)と呼ばれるものになります。特に、強酸性の温泉は鉄イオンを多量に溶かしており、これが酸化鉄として沈殿します(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。

第10図にはその例を示しますが、A, Bが群馬県の群馬鉱山, Cが長野県の諏訪鉱山の標本です。ともに、針鉄鉱^{しんてつこう}(褐鉄鉱^{かってつこう})を主成分とし、群馬鉱山の標本では塊鉄層と粉鉄層、あるいは鉄明礬石^{てつめいばんせき}(第10図B)が層状に堆積している組織がみられます(高島, 1954)。また、資源として採掘されたわけではありませんが、北投石を含む標本(青木, 2017)も、温泉からの沈殿物として形成されました。

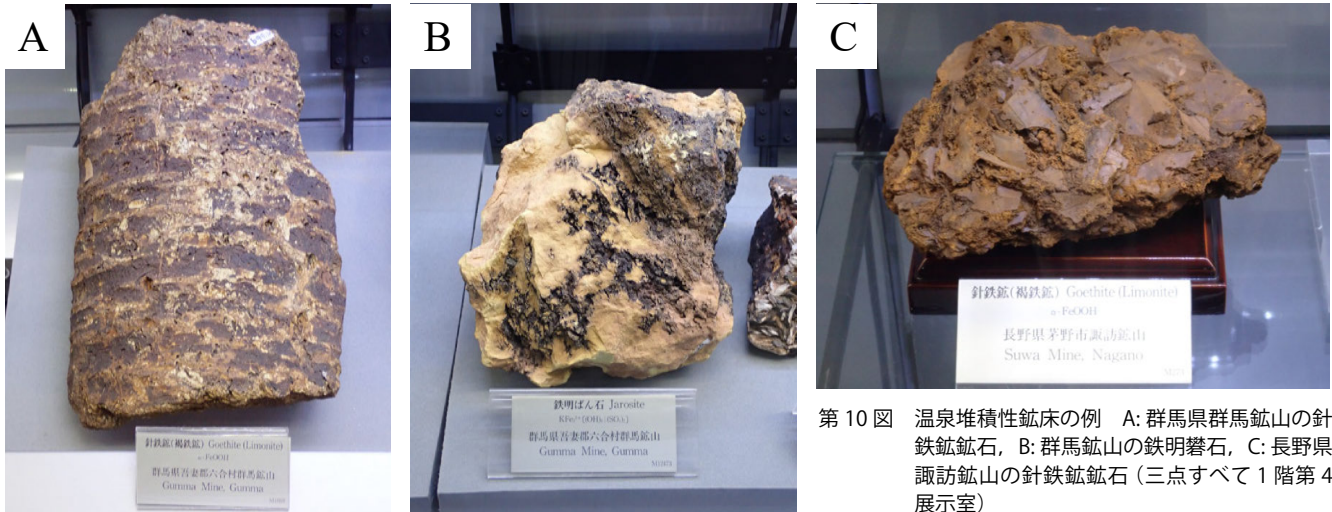
4.7 昇華鉱床

火山や地熱地帯の噴気孔では、黄色い硫黄の塊(結晶)がよく見られます。これは、火山ガス・蒸気中に含まれていた硫黄分が温度低下によって昇華したものの(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)で、これまで記してきた鉱床とは異なり、気体状態の「水」から分離して形成されたこととなります。この例として、第11図には大分県九重火山^{くじゅう}の自然硫黄を示します。

かつては、このような噴気孔で採取される硫黄は工業原料として重要な資源であり、多数の火山・地熱地帯が存在する日本では、全国各地に硫黄鉱山がありました。しかし、石油の脱硫装置による安価な硫黄が生産されるようになると、天然の硫黄採取はその役目を終えました。上記の標本の採取地である九重火山の硫黄鉱山は、1972年(昭和47年)に閉山しています(http://www.city.oita.oita.jp/o204/bunkasports/shitebunkazai/event/documents/09_panel.pdf 閲覧日: 2021年7月2日)。

4.8 海底熱水鉱床

様々な成分を溶かし込んだ熱水が、海底面下から直接海水中に噴き出すと、急速に冷却されて鉱物を沈殿させます。この時、噴出している熱水中に硫化物やシリカ分が晶出すると、その色によって、海底から灰黒色あるいは白色の煙が噴き上がっているように見えます(飯山, 1998)。その硫化物やシリカ分が沈殿し、煙突状の構造をつくったものが第12図Aのチムニー(chimney)です。真ん中の大きな標本(高さ約150cm)は北部東太平洋海膨で採取されたものの、左下の小さな標本は南部東太平洋海膨で採取されたものを縦に切断したもので、標本の中央に熱水の通路となった穴が上下につながっているのがわかります。これらには金、銀、銅、鉛、亜鉛などが含まれています。これは現在形成されつつある海底熱水鉱床(塊状硫化物鉱床)といえま



第 10 図 温泉堆積性鉱床の例 A: 群馬県群馬鉱山の針鉄鉱(褐鉄鉱) Goethite (Limonite) (No. 10001) 群馬県吉里郡六合村群馬鉱山 Gunma Mine, Gunama B: 群馬県吉里郡六合村群馬鉱山の鉄明礬石 Jarosite (No. 10003) 群馬県吉里郡六合村群馬鉱山 Gunma Mine, Gunama C: 長野県茅野市諏訪鉱山の針鉄鉱(褐鉄鉱) Goethite (Limonite) (No. 10001) 長野県茅野市諏訪鉱山 Suwa Mine, Nagano



第 11 図 昇華鉱床の例 九重火山の自然硫黄 (1 階第 4 展示室)

すが、地球史の中では何度も繰り返して同じような海底熱水鉱床が形成され続けており、例えば西グリーンランドのイヌア (Isua) 鉱床は、37.6 億年前のものと考えられています (佐藤, 1983)。

日本海が拡大した中新世(約 1,500 万年前頃)にも同様の活動が起き、その時形成された海底熱水鉱床が地層中に取り込まれ、北海道西南部～東北地方の日本海側、山陰地方に点在する「黒鉱」と呼ばれる鉱床をつくったと考えられています (鹿園, 1988; 産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。第 12 図 B には秋田県深沢鉱山・餌釣鉱山産の黒鉱及び関連する標本を示しますが、4 つの標本のうち、写真右下が閃亜鉛鉱、方鉛鉱を主とする「黒鉱」、右上が石英、赤鉄鉱を主とする「珪鉱」、左下がその中間的な「黒鉱質珪鉱」、左上が黄鉄鉱、黄銅鉱を主とする「黄鉱」です。さら

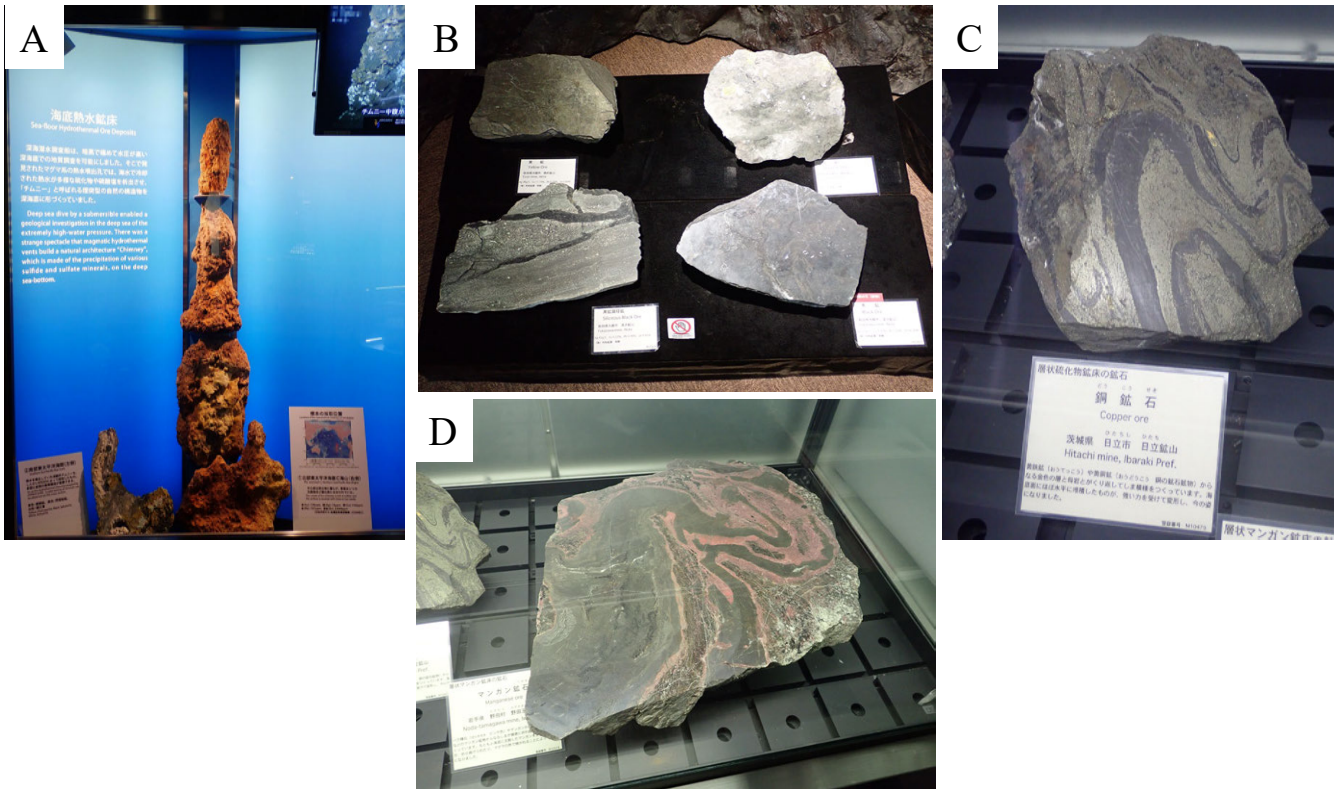
に、このような黒鉱鉱床が變成作用を受けたものが、層状含銅硫化鉄鉱床(ドイツ語でキースラーガー: Kieslager)と呼ばれる鉱床になります。この例としては別子鉱山、日立鉱山(第 12 図 C)があります。

一方、海底で、硫化物をあまり含まない熱水(温泉水)からマンガンが沈殿して鉱床を形成することもあり、このようなタイプは、北上山地、足尾山地、丹波山地などの付加体の堆積物中に見いだされます(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。第 12 図 D は岩手県の野田玉川鉱山のマンガン鉱石ですが、この鉱床は、白亜紀の花崗岩の貫入による接触變成作用を被っており、また吉村石、木下雲母、原田石などの日本産新鉱物を産したことで有名です(松原, 2009)。

4.9 海底沈殿鉱床

海底には、前節のような高温の熱水から沈殿したものだけでなく、低温の海水から成分が沈殿して形成される鉱床もあります。その例として、マンガン団塊(第 13 図 A, B)、コバルトリッチ(マンガン)クラスト(第 13 図 C)があります。これらは、一般的には前節の海底熱水鉱床と共に「海底鉱物資源」と表現されることが多いようですが、第 2 章の資源の定義のところでも述べたとおり、「資源」という表現には経済性の観点が含まれるため、ここではあえてその表現を避け、「海底沈殿鉱床」と表現することにしました。

マンガン団塊は、大きさ 1～十数 cm の球～楕円体で、鉄・マンガン酸化物を主体としています。マンガン団塊は、火山岩の礫や生物の遺骸を核とし(第 13 図 B)、海水や堆積物中の間隙水に溶けている金属成分が海底表面で酸化され、数 mm/百万年という非常にゆっくりとした速度で核の上に沈殿して形成されたものです。地域的な偏在があ



第12図 海底熱水鉱床の例 A: 東太平洋海膨のチムニー, B: 秋田県深沢鉱山・餌釣鉱山の黒鉱鉱床の鉱石, C: 茨城県日立鉱山の層状含銅硫化鉄鉱床の銅鉱石, D: 岩手県野田玉川鉱山のマンガン鉱石 (A~D 全て2階第2展示室)

り、ハワイ南東海域の水深 4,000 m を超える深海底には、銅、ニッケル、コバルトの総重量が 2.5 % を超えるマンガン団塊が濃集しており、資源として有望視されています(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。また、コバルトリッチ(マンガン)クラストは、堆積物があまり溜まらない海山の頂部や斜面で、岩石の表面に海水中の金属、特にマンガンや鉄などが酸化物として沈殿して形成されます。酸化物層の厚さは数 mm ~ 十数 cm のものまであり、その成長速度は、マンガン団塊と同様、非常に遅いと考えられています。この酸化物層には、コバルトや白金などが含まれており、資源として有望だと考えられています(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。

4.10 風化(残留)鉱床

風化作用とは、岩石が、地表付近で気象現象(降水、気温など)や生物の活動などを受けて分解される作用のことです。この風化作用によって、新たに有用な鉱物が形成されて鉱床となったものが風化鉱床です。逆に、風化されにくい鉱物ばかりが残って形成される、風化残留鉱床もあります(須藤, 1992)。「水のちから」という点では熱水鉱床と似ているところもありますが、風化(残留)鉱床は、常温の「水」が岩石の成分を溶かし、分別することで形成されると

いう点が違います。

第14図には、その例として、岐阜県大垣市^{きんしょうざん}金生山の赤鉄鉱を示します。金生山は、現在も石灰岩を採取している鉱山です。石灰岩台地では、風化作用によってしばしば鉄分に富む赤土(terra rossa)が発達し、その中に褐鉄鉱・赤鉄鉱の塊が含まれることがあります(高島, 1954)、この標本はその例の一つです。このほかによく知られているのは、アルミニウムの原料となるボーキサイトです。

4.11 漂砂鉱床

第2図の最上段には、地表に露出した鉱脈が雨水によって削られ、運ばれ、海や湖などの堆積場に運ばれて溜まるという状況を示していますが、これが漂砂鉱床のでき方です。これまでは化学的な「水のちから」が中心でしたが、漂砂鉱床の場合は、物理的な「水のちから」が重要になります。

第15図には代表的な漂砂鉱床である砂金の標本を示しますが、北海道では砂白金が産することも知られています(弥永, 2006)。漂砂鉱床をつくる鉱物は、一般に変質に強く、比重が高く、化学的に安定なものであり、上述の金、白金族元素(白金、イリジウムなど)のほか、錫石、ルチル、ジルコン、モナズ石、チタン鉄鉱、磁鉄鉱などがあり



第13図 海底沈殿鉄床の例 A: マンガン団塊 (2階第2展示室), B: マンガン団塊とその切断面(1階第4展示室), C: コバルトリッチクラスト (2階第2展示室)



第14図 風化残留鉄床の例 岐阜県大垣市金生山産の赤鉄鉱 (1階第4展示室)

ます(鞠子, 2008)。鉄鉱が集まったものがいわゆる砂鉄鉄床になり, 日本ではたたら製鉄の原料として使われていました。

なお, 似たようなプロセスではありますが, 地表での風化・熱水変質で生成された粘土鉱物が純粋かつ多量に湖や内湾などに堆積した場合は, 堆積性の粘土鉄床となります。こちらは漂砂鉄床ではなく, 堆積鉄床に分類されることが一般のようです。このような堆積性の粘土鉄床としては, 愛知県瀬戸地域, 岐阜県多治見地域, 三重県島ヶ原地域などに産する木節粘土, 蛙目粘土が有名で, これらの地域の窯業の重要な原料となっています(須藤, 1992)。

4.12 蒸発鉄床

蒸発鉄床とは, 「水」が蒸発することで後に沈殿して残った溶存成分が集まって鉄床となったものです。端的な例は, 第16図に示す岩塩です。これらは, 過去の塩湖や浅い海が干上がって沈殿・堆積した塩分が地層中に取り込まれて鉄床となったものです。現在の乾燥地帯の湖ではまさにこのようなことが起きており, 特にリチウムの供給源として非常に高く期待されています(荒岡, 2015)。



第 15 図 漂砂鉱床の例 山形県寒河江市の砂金 (1 階第 4 展示室)



第 16 図 蒸発鉱床の例 アメリカ合衆国ニューメキシコ産 (左) 及びドイツ産 (右) の岩塩 (1 階第 4 展示室)

5. おわりに

以上、駆け足で「水」がどのようにして鉱物の鉱床をつくるかを示しました。繰り返しになりますが、鉱物の鉱床をつくる「水のちから」で特に重要なのは、「溶かしこむ」、「運ぶ」、「沈殿させる」です。「水は生命をつくった源である」ということはよく知られています。それと同様に、社会を支える資源として重要な様々な鉱物（鉱床）も、「水のちから」が働いて作られたものが非常に多いことがご理解いただけたと思います。

ただし、ここに挙げたのは多様な鉱物の鉱床のほんの一部であって、物理化学条件、地質学的条件に応じて、複雑な形成過程を持つ鉱床がほかにもたくさんあります。地質標本館内にもそのような標本がまだまだ多数展示されていますので、ご来館の折は、一つ一つの標本をよく観察いただき、それらがどのように形成されたのかを想像していただければ幸いです。

なお、鉱床学に関してより専門的に知りたい方は、本文中でもいくつか挙げましたが、例えばスキナー [松尾 諷] (1971)、岡野 (1975)、立見編 (1977)、鎌田ほか編 (1985)、鹿園 (1988, 1997)、飯山 (1989, 1998)、長沢・クズヴァルト (1989)、番場 (1990)、松葉谷 (1991)、石川 (1991)、千田 (1996)、黒田 (2002)、野津・清水 (2003)、鞠子 (2008) などの鉱床学及びそれに関連する地球化学に関わる文献をご覧いただきたいと思います。

文 献

青木正博 (2017) 含鉛重晶石 (北投石). 地質標本館お

すすめ標本ストーリー (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_020.pdf 閲覧日: 2021 年 6 月 4 日) 荒岡大輔 (2015) リチウム資源 —各鉱床タイプの概要とリチウム同位体による成因論—. 岩石鉱物科学, 44, 259-270.

番場猛夫 (1990) いま地球の財産を診る —鉱床学と鉱物資源—. 教育出版センター, 東京, 286p.

千田 佑 (1996) 地球化学反応速度と移動現象. コロナ社, 東京, 175p.

地学団体研究会 (地学事典編集委員会) (1983) 増補改訂地学事典 (改訂版第 3 刷). 平凡社, 東京, 1612p.

地熱エネルギー基準用語集委員会 (1982) 新エネルギー技術用語集 —地熱編—. 日本産業技術振興協会, 東京, 107p.

深海博明 (1972) 2 日本の資源問題と資源学. 板垣與一編, 日本の資源問題, 日本経済新聞社, 東京, 314p.

飯山敏道 (1989) 鉱床学概論. 東京大学出版会, 東京, 196p.

飯山敏道 (1998) 地球鉱物資源入門. 東京大学出版会, 東京, 195p.

石川洋平 (1991) 地学ワンポイント 4 黒鉱 —世界に誇る日本の資源をもとめて. 共立出版, 東京, 119p.

科学技術庁資源調査会 (1961) 日本の資源問題 (上). 科学技術庁資源調査会報告第 19 号, 612p.

科学技術庁資源調査会 (1971) 将来の資源問題 人間尊重の豊かな時代へ (上). 科学技術庁資源調査会報告第 60 号, 772p.

鎌田政明・小沢竹二郎・村上悠紀雄・吉田 稔編 (1985) 地熱流体の化学 —環境科学の視点から—. 東京大学

- 出版会, 東京, 215p.
- 金子正彦 (2012) 世界の地熱法. 日本地熱学会誌, **34**, 123-137.
- 金子正彦 (2016) 世界の地熱法 (2). 日本地熱学会誌, **38**, 85-100.
- 国立天文台編 (2004) 理科年表 (机上版) 第 78 冊. 丸善, 東京, 1015p.
- 黒田吉益 (2002) 水素同位体比から見た水と岩石・鉱物. 共立出版, 東京, 203p.
- 草下英明 (1990) 鉱物採集フィールドガイド (第 8 刷). 草思社, 東京, 254p.
- 鞠子 正 (2008) 鉱床地質学 — 金属資源の地球科学—. 古今書院, 東京, 580p.
- 松原 聡 (2009) 増補改訂フィールドベスト図鑑 14 日本の鉱物. 学研教育出版, 東京, 268p.
- 松葉谷 治 (1991) 熱水の地球化学. 裳華房, 東京, 139p.
- 森田澄人・谷田部信郎 (2021) ケロジェン. 地質標本館おすすめストーリー (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_038.pdf 閲覧日: 2021 年 6 月 4 日).
- 長沢敬之助・クズヴァルト, M. (1989) 工業原料鉱物資源. 修学館, 東京, 280p.
- 野津憲治・清水 洋 (2003) 地球化学講座 3 マントル・地殻の地球化学. 培風館, 東京, 308p.
- 岡野武雄 (1975) 地球科学講座 12 地下資源. 共立出版, 東京, 230p.
- 酒井禮男 (1994) 私の推薦する天然記念物 馬谷城山鉱山のペグマタイトと大水晶. 地質ニュース, no. 476, 58.
- 産業技術総合研究所地質標本館編 (2006) 地球 図説アースサイエンス. 誠文堂新光社, 東京, 175p.
- 佐藤壮郎 (1983) 地球史の中の黒鉱型鉱床. 鉱山地質特別号, no. 11, 1-21.
- 佐脇貴幸 (2003) 流体包有物: その基礎と最近の研究動向. 岩石鉱物科学, **32**, 23-41.
- 柴田秀賢 (1956) 鉱物と地下資源 (再版). 研究社学生文庫, 研究社, 東京, 181p.
- 志賀美英 (2019) 鉱物資源問題と日本 — 枯渇・環境汚染・利害対立—. 九州大学出版会, 福岡, 148p.
- 鹿園直建 (1988) 地の底のめぐみ — 黒鉱の化学—. 裳華房, 東京, 182p.
- 鹿園直建 (1997) 地球システムの化学 — 環境・資源の解析と予測—. 東京大学出版会, 東京, 319p.
- 下川浩一 (2017) リチウムペグマタイト. おすすめ標本ストーリー (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_022.pdf 閲覧日: 2021 年 6 月 4 日).
- 須藤定久 (1992) 第 1 章 日本の窯業原料総説. 工業技術連絡会議窯業連合部会編, 日本の窯業原料 1992, ティー・アイ・シー, 1-30.
- スキナー, B. J. [松尾禎士訳] (1971) 地球科学入門シリーズ 7 地球資源学入門. 共立出版, 東京, 166p.
- スミルノフ, ヴェー・イー [渡辺武男監訳, 岸本文男訳] (1976) 新版鉱床地質学. ラテイス, 東京, 859p.
- 鈴木淑夫 (2005) 岩石学辞典. 朝倉書店, 東京, 877p.
- 高島 彰 (1954) I 鉄鉱. 地質調査所編, 日本鉱産誌 B I-c 主として金属原料となる鉱石 — 鉄・鉄合金および軽金属 —, 工業技術院地質調査所, 6-55.
- 高多 明 (1992) 地球資源戦略ノート. 白亜書房, 東京, 245p.
- 竹内 均・片山信夫・森本良平・木村俊雄 (1970) 新版地質学辞典 (I). 古今書院, 東京, 483p.
- 武内寿久禰 (1986) 4 鉱床の分類と成因. 山口梅太郎編, 現代資源論, 財団法人放送大学教育振興会, 東京, 28-36.
- 立見辰雄編 (1977) 現代鉱床学の基礎. 東京大学出版会, 東京, 257p.
- 梅田美由紀・吉澤康暢編 (2012) 第 72 回特別展 きら² クリスタル — 水晶とそのなかまたち—. 福井市自然史博物館, 福井市, 72p.
- 歌代 勤・清水大吉郎・高橋正夫 (1978) 地学の語源をさぐる. 東京書籍, 東京, 195p.
- 渡辺武夫・岩生周一 (1959) III 日本の鉱床の成因. 地質調査所 (編), 日本鉱産誌 A 総論, 工業技術院地質調査所, 150-323.
- 山口梅太郎 (1981) 2 資源の有限性について. 山口梅太郎編著, 鉱物資源とその開発 — 技術者にとっての資源論 —, ラジオ大学講座, 旺文社, 東京, 17-24.
- 弥永芳子 (2006) 砂白金 ~ その歴史と科学 ~. 文葉社, 東京, 233p.

SAWAKI Takayuki (2021) Water's function that produces geo-resources: (1) Mineral resources.

(受付: 2021 年 7 月 9 日)

旅客機から見る世界の名山 美しい山々を国際線の機窓から楽しむ

須藤 茂 [編著]

イカロス出版株式会社
発売日：2021年3月29日
定価：1900円（税込み）
ISBN:978-4-8022-0977-9
25.7 cm x 18.3 cm x 1.0 cm
並製
192ページ

これまでの私は、年に2、3回ほど国際学会や学術調査のために航空機に搭乗し、海外に出かけることが通例であった。例えば、成田国際空港からヨーロッパ路線に搭乗した場合、10時間近く狭い機内^{とうりゅう}に逗留することになるが、その途中で機窓から見下ろすシベリア湿原やアルプス山脈の雄大な景観に圧倒されたことがしばしばある。しかし、昨年来のCOVID-19の世界規模の感染拡大に伴い、我々が海外に出かけることが制限されるようになり、本稿を執筆している2021年4月現在、その解決の目処はたっていない。そのためあって、在宅中にはテレビ放送で放映されている旅番組をたびたび視聴するようになった。しかし、これらの番組で使われている映像の多くもCOVID-19感染拡大以前に放映されたものが多く、新鮮な情報は余りないようにお見受けする。

我が国においては歴史的に見て多くの山は神聖な場所であり、見る者に畏敬の念さえも抱かせる信仰の対象として古くから崇められてきた。例えば、首都圏近郊の高尾山や秋田県の鳥海山は修験道の間であったことがよく知られている。一方、大学院生時代から北海道の日高山脈およびその周辺をフィールドにしていた私にとって、山は研究対象であり、年間50日近くも過ごす生活の間でもあった。

ところで、山の成因は大きく2つ知られている。一つは前述した高尾山や日高山脈のようにプレート運動もしくは地殻変動によって生じた山である。世界最高峰であるチョモランマ（もしくはサガルマータ）を擁するヒマラヤ山脈や



ヨーロッパのアルプス山脈もこの範疇にある。もう一つは鳥海山に代表される活火山である。世界の火山の最高峰は南米アンデス山脈のオホス・デル・サラド山であり、アフリカ大陸のキリマンジャロも活火山である。

須藤 茂氏は産総研OBであり、在職時には長年にわたって我が国の火山研究を先導してこられた。また、在職時代からアウトリーチ活動にも積極的に取り組んでこられ、我々が目標とすべき研究者のお一人であった。実は、彼が2年前に出版した「旅客機から見る日本の名山」については、私がGSJ地質ニュースの誌上にご紹介させていただいた経緯がある（七山，2020）。今回はその続編として、舞台を世界へとスケールアップし、「旅客機から見る世界の名山」というタイトルの書籍を編著者としてまとめられた。本書の内容は単なる普及向けの機窓写真集の域を脱しており、少しマニアックではあるがGSJ地質ニュースの多くの読者の皆さまが関心を持たれると考えた。そこで、以下に本書の概要を皆さまにご紹介したいと思います。

本書では、編著者である須藤氏を含めた火山や地形分野の研究者や国際航業の地質コンサルタント技師からなる9名の筆者たちが分担して、世界の著名な名峰を主要な対象として、定期便の旅客機の機窓から撮影した世界の山々700座の写真を掲載している。ただし、“本書で使用される写真は定期便の旅客機から撮影されたもののみ使用”，という須藤氏の拘りがある。さらに、地質地形分野の専門家らしく、それらの山の成り立ちや地質などを個々にわかり



やすく解説している点が最大の特徴と言える。本書の目次は、以下の通りである。

はじめに

山の名前の表記について

山の高さの表記について

知っているとは便利なこと

山が何でできているか 外国の山の地質を調べる方法

山はどうして高くなったのか？

世界地図(索引図)

世界の火山の分布図

本編：(A) アラスカ・カナダ, (B) 米国本土, (C) メキシコ・中米, (D) 西インド諸島, (E) 南米, (F) ハワイ, (G) ニュージーランド, (H) 西太平洋, (I) オーストラリア, (J) インドネシア, (K) フィリピン, (L) 台湾, (M) 韓国, (N) 中国中東部, (O) インド・インドシナ, (P) ネパール・ヒマラヤ, (Q) 中国西部・カラコルム, (R) 中東, (S) ロシア・シベリア, (T) 東ヨーロッパ, (U) アルプス, (V) 南ヨーロッパ, (W) アイスランド, (X) アフリカ

技術的な問題(山の写真が撮れるかどうかは運次第 & 金次第)

おわりに

写真リスト

山名索引

本書のメインの内容は、本編に記載された世界各地のフライトごとの700座の山の機窓写真とその解説であり、その記述は160ページにもおよぶ。掲載されている写真の全てがカラー版となっている。巻頭には、“山はどうして高く

なったのか？”等について、初学の方にも解りやすい解説文、また、本編の牽引図として世界地図が付記されている。一方、巻末には機窓写真の撮影方法のノウハウなどが書かれている。また、詳細な写真リストと山名索引が掲載されており、辞書代わりに世界の名峰が直ぐ見つけられるような仕掛けになっている。全編を通じて、細部にわたり須藤氏の熱意や拘りが見てとれる。“おわりに”にも少し触れられているが、COVID-19禍のため、本編で手薄になっている地域の写真の補填も思うようにできなかった点は、たいへん心残りのことであろう。是非、この点も含めて、須藤氏による続編を心待ちにしたい。

なお、イカロス出版は、航空定期誌である「AIRLINE」の他、航空機関係の書籍やジャーナルを専門的に出していることで知られている。上述した「旅客機から見る日本の名山」も2年前にこの出版社から刊行されている。この2冊を合わせ読むと、GSJ地質ニュースの読者の皆さまにも、“機窓からの山の景観の楽しみ方”や“上手な機窓写真の撮影方法”をご理解いただけるようになると思う。私自身も、長引くCOVID-19禍が過ぎたら、直ぐにでも海外に出かけたいと思っている。早期にCOVID-19が収束し、再び安全で快適な世界旅行ができる生活に戻れることを、心から念じている。

文 献

七山 太 (2020) 新刊紹介 旅客機から見る日本の名山
美しい山々を機窓から楽しむ. GSJ 地質ニュース, 9,
55-56.

(産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門 七山 太)

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 宮地良典
副委員長 小松原純子
委員 杉田創
児玉信介
戸崎裕貴
森田雅明
宇都宮正志
森尻理恵

事務局

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター
地質情報基盤センター 出版室
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ 地質ニュース 第10巻 第10号
令和3年10月15日 発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

印刷所

GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor : MIYACHI Yoshinori
Deputy Chief Editor : KOMATSUBARA Junko
Editors : SUGITA Hajime
KODAMA Shinsuke
TOSAKI Yuki
MORITA Masaaki
UTSUNOMIYA Masayuki
MORIJI Rie

Secretariat Office

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Geological Survey of Japan
Geoinformation Service Center Publication Office
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ Chishitsu News Vol. 10 No. 10
October 15, 2021

Geological Survey of Japan, AIST

AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1, Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305-8567, Japan

気仙沼湾周辺に露出するペルム系岩井崎石灰岩と大規模防潮堤 [cover photo](#)



気仙沼市の岩井崎周辺には主に生砕物からなる石灰岩が広域に露出し、ペルム紀中期のフズリナや四射サンゴ、腕足類、ウミユリ等の多様な大型化石を露頭観察することができる南部北上帯有数のジオサイトである。これらは、当時の熱帯域で形成された生物礁が起源であったと理解されている。この岩井崎を含めた気仙沼湾一帯は、2011年東北地方太平洋沖地震による大津波によって大規模に被災し、現在もその復興過程にある。湾を介した対岸(写真奥)には、被災後に大規模にコンクリートで護岸された大島西岸の海岸線が見える。

(写真・文：七山 太 産総研地質調査総合センター地質情報研究部門)

Permian Iwaizaki limestone exposed around Kesennuma Bay and the large seawall against tsunami. Photo and Caption by NANAYAMA Futoshi