

# 地質調査

2024

## 第2号

(通巻164号)

Japan Geotechnical  
Consultants Association

編集／一般社団法人全国地質調査業協会連合会

### 総論

#### ≫ ヒトと鉱物

元AIST 地質標本館館長 青木 正博

### 小特集 鉱物と宝石 —身近な地質とのかかわり—

#### ≫ 海底鉱物資源開発の最前線

加藤 泰浩

#### ≫ 人を魅了するダイヤモンド

船山 訓宏

#### ≫ 生活の身近にある鉱物 ～ベントナイト～

新野 正明

#### ≫ 新鉱物の発見 ～有機鉱物・北海道石

田中 陵二

#### ≫ 鉱物の魅力

門馬 綱一

### 教養読本

#### ≫ これからの資源供給

渡辺 寧

### やさしい知識

#### ≫ 鉱物の基礎知識

松原 聡

### 基礎技術講座

#### ≫ 水文調査に関する基礎技術

富森 さとし

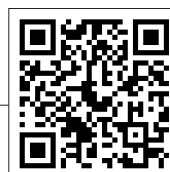
総論	≫ ヒトと鉱物	元 AIST 地質標本館館長 青木 正博	…… 1
小特集	■ 鉱物と宝石 ー身近な地質とのかかわりー		
	≫ 海底鉱物資源開発の最前線	加藤 泰浩	…… 7
	≫ 人を魅了するダイヤモンド	船山 訓宏	……11
	≫ 生活の身近にある鉱物 ～ベントナイト～	新野 正明	……15
	≫ 新鉱物の発見 ～有機鉱物・北海道石	田中 陵二	……21
	≫ 鉱物の魅力	門馬 綱一	……26
養教読本	≫ これからの資源供給	渡辺 寧	……30
やさしい知識	≫ 鉱物の基礎知識	松原 聰	……34
基礎技術講座	≫ 水文調査に関する基礎技術	富森 さとし	……40
私の経験した現場	≫ 沖縄県における不発弾探査とボーリング調査について	比嘉 大樹	……48
各地の博物館巡り	≫ 北海道大学 北海道大学総合博物館	渡部 靖	……51
大地の恵み	≫ 東海地方の焼物文化 ～今は存在しない巨大な湖～	小島 慎一郎	……53
各地に残すべき地形・地質	≫ 和泉層群基底礫岩と松山城 (愛媛県)	高柳 朝一	……55
研究所からの報告	≫ 地層処分事業と地質調査の展望 (前編)	西崎 耀	……57
地質だより	■ 令和6年度 全地連資格検定試験の実施結果について		…… 63
	■ 全地連 『安全手帳』の公開		…… 64
	■ 『発注者・若手技術者が知っておきたい「地質調査実施要領」』の発行		…… 64
	■ 全地連「技術フォーラム2024」の開催結果について		…… 65
	■ スキルアップ講習会 (BIM/CIM, 地質リスクマネジメント)の開催について		…… 66
	■ 小冊子「地質リスクマネジメント技術支援業務発注ガイド (案)」の発行		…… 66
	■ 令和6年度改訂版「地質調査業務発注ガイド」の発行		…… 67

## 既刊情報

下記の「地質と調査」は、次の URL または QR コードから、どなたでもご覧いただけます。

全地連の機関誌「地質と調査」

[https://www.zenchiren.or.jp/jgca\\_geo-se/](https://www.zenchiren.or.jp/jgca_geo-se/)



### ● 掲載概要

2000 年第 1 号 (通巻 83 号) ～ 2005 年第 4 号 (通巻 106 号) → メインテーマのみ

2006 年第 1 号 (通巻 107 号) ～ 2013 年第 1 号 (通巻 135 号) → 【会告】を除くすべてのページ

2013 年第 2 号 (通巻 136 号) 以降 → すべてのページ

※ Web 掲載版の「地質と調査」はカラーで閲覧いただけます。

### ● 最近の発刊

通巻	発行年月	メインテーマ
154 号	2019 年 11 月	小特集：沿岸
155 号	2020 年 4 月	小特集：AI で地質調査はどう変わるのか
156 号	11 月	小特集：防災・減災 - 豪雨災害の被害軽減に向けて -
157 号	2021 年 4 月	小特集：地図データの活用
158 号	11 月	小特集：物理探査が拓げる地質調査
159 号	2022 年 4 月	小特集：堆積物の科学
160 号	11 月	小特集：DX
161 号	2023 年 4 月	全地連創立 60 周年記念号
162 号	11 月	小特集：地質の楽しみ方 - 食と旅と地質 -
163 号	2024 年 4 月	小特集：アウトリーチ - 地学の魅力を広げる新たな展開 -
164 号	11 月	小特集：鉱物と宝石 - 身近な地質とのかかわり -

## 次号予告

**地質調査** 2025 年 第 1 号 (通巻 165 号) 内容 (予定) 令和 7 年 4 月発行予定

小特集テーマ：(仮) 地下水の奥深さ - 科学から文化まで -

\* 編集方針により小特集テーマは変更となる場合があります。



# ヒトと鉱物

あおき まさひろ\*  
青木 正博\***K**ey Word 石, 鉱物, ヒトと好奇心, 鉱物学, 宮澤賢治, 北海道石

## 1 石とヒトの縁

固体地球と気圏・水圏の境界は、地球内部で生まれた石が、水と空気と生物に出会う場所である。石は砕け、溶け、表面から粘土や鉄さびに置き換えられて行く。ヒトは、変化しつつある石や土壌を踏みしめ、土壌から生える植物や他の生物の生産力に、直接的・間接的に支えられている。他の生物にくらべるとヒトは石を活用したために、便利な生活を享受している。揺りかごから墓場まで、私たちは石とともにある。

石や土壌の質感や形は、ヒトの好奇心を刺激し、その物質を知るための試行錯誤に誘った。それぞれの経験は、言葉やスケッチなどを介して、他者と共有された。その長い営みの末にいる私たちは、いま、足下の石や土壌が、岩石、鉱物、有機物、無機～有機非晶質物質でできていることを知っている。岩石の最小構成単位である鉱物は、それぞれに科学的検証を経て独立種として認定され、今日、その種類は6000種にも達している<sup>1)</sup>。

豊富な語彙が、コミュニケーションを正確に楽にするように、様々な石を識別できる方が、目的に合った石を探しやすくなるし、地球のプロセスを記述しやすくなる。

実際に私たちは、岩石や鉱物を分類するだけでなく、それぞれの物性や化学的安定性に応じて、生活や生産のために活用している。見かけの美しい鉱物、硬く壊れにくい鉱物、産出が希な鉱物は、飾り石として丁重に扱われてきた。そこには、鉱物を生み出した地球への畏敬の念も込められている。

石を手にとってこれは何だと問い、その来歴に興味をそそられる心は、サイエンスにつながる。石を眺めて、質感、色調の美しさ、組織の面白さをロジッ

ク抜きに堪能する心は、アートにつながる。サイエンスとアートという、対照的表現の根元には好奇心がある。好奇心は、新しい事物との遭遇からその意味が腑に落ちるまでの過渡的な状態で、大脳が識別能力の増強を予感する期間といっても良い。

既存の知識を収集する「学習」モードは能率が良い。自分の気づきをサイエンスやアートの水準にまで高める「創造」モードは、多くの試行錯誤を含むために歩みはのろいかもしれないが、新発見の萌芽に満ちている。

石はヒトの快適な生活に役立つ物質であると同時に、その美しさや謎解きの楽しみを通じて、私たちの頭脳を活性化する。科学技術が大発展し、また、多様な分野の出版物があふれている。鉱物学に限らず、膨大な情報の圧力に負けて疲れないように、ヒトがサイエンスとアートにつながる豊かな好奇心を根に持っていることを覚えておきたい。

優れた地学者であり、童話作家、詩人としても知られる宮澤賢治は、多彩な好奇心の持ち主で、サイエンスとアートの世界を自由に行き来していた。「樫の木大学士の野宿」、「十力の金剛石」、「春と修羅」などの賢治の著述には、多くの鉱物の名前が登場する。賢治は、石を擬人化したり、石の質感を、気象現象や植物に自在に対比させた(図1)<sup>2)</sup>。地質・鉱物学をしっかり学んだ上での、言葉遊びである。少年時代に、好奇心に導かれて石と自由に遊び、自然と交感する心を育てていた賢治は、鉱物を化学組成と結晶形態(構造)だけで記述することに物足りなさを覚えたかもしれない。鉱物以外の自然物や現象を表現するときに、連想される鉱物の名前を使うことは愉快だっただろう。作品中の比喩は、個人的なイマジネーションから発するアートに近い。アー

\*元 AIST 地質標本館館長



図1 玉髓（青森県中泊町）写真左右長が約5cm

玉髓は、繊維状組織を持つ微晶質石英で、しばしば鈍い光沢を持った乳頭状の表面を見せる。水に満たされた空隙の中で、壁面の凹凸や重力の影響を受けながら成長したものは、泡立った液体のように見えるかもしれない。入道雲（積乱雲の一種）は、上昇気流により吹き上げられた水蒸気が、冷却に伴って凝結して水や氷の粒となって浮遊している状態である。上昇気流の勢いに応じて雲は大きくなる。白くモコモコした形は、石けんの泡を想起させる。鉱物にも気象現象にも深い興味を持っていた宮沢賢治は、詩や童話の中で白い雲を形容するときに玉髓になぞらえた。たとえば、「玉髓の雲が流れて・・・」（春と修羅）、「雲は光って立派な玉髓の置物です」（チュウリップの幻術）など。

トにつながる感性は、客観性を重んじるサイエンスの妨げになるとは限らない。実際、個人の経験や美意識に鼓舞されて新しいサイエンスが始まることは、希ではない。サイエンスでは、様々な角度から現象を見て、何度も仮説を手直ししながらゴールに近づいて行く。その頭の働きは、アートを追求するときと変わらない。

## 図2 ヒトは石に導かれて賢くなった

数億年にわたる生物進化の末、約700万年前に人類の祖先が現れたといわれている。ヒトと鉱物の関わりを、年表形式で概観したのが図2である。左側には、人類の歴史を時間軸（任意スケール）に沿って箇条書きにし、右側には、岩石・鉱物ごとに、主に活用された時期を示してある。

ヒトと石の積極的な関わりについてたどれるのは、約250万年前まで。古代人の生活跡の発掘を通して、あるいは石灰岩洞窟に残された壁画から、ヒトが、岩石・鉱物を選択して、道具を作り、高度なコミュニケーション能力を獲得してきたことがわかった。

狩猟では丈夫な飛び道具が役にたち、獲物を捌くには切れ味に優れた道具が必要になる。そんな道具をつくるために、破断面が鋭利な、チャート、フリント、黒曜石が活用された。生きやすくなった人間

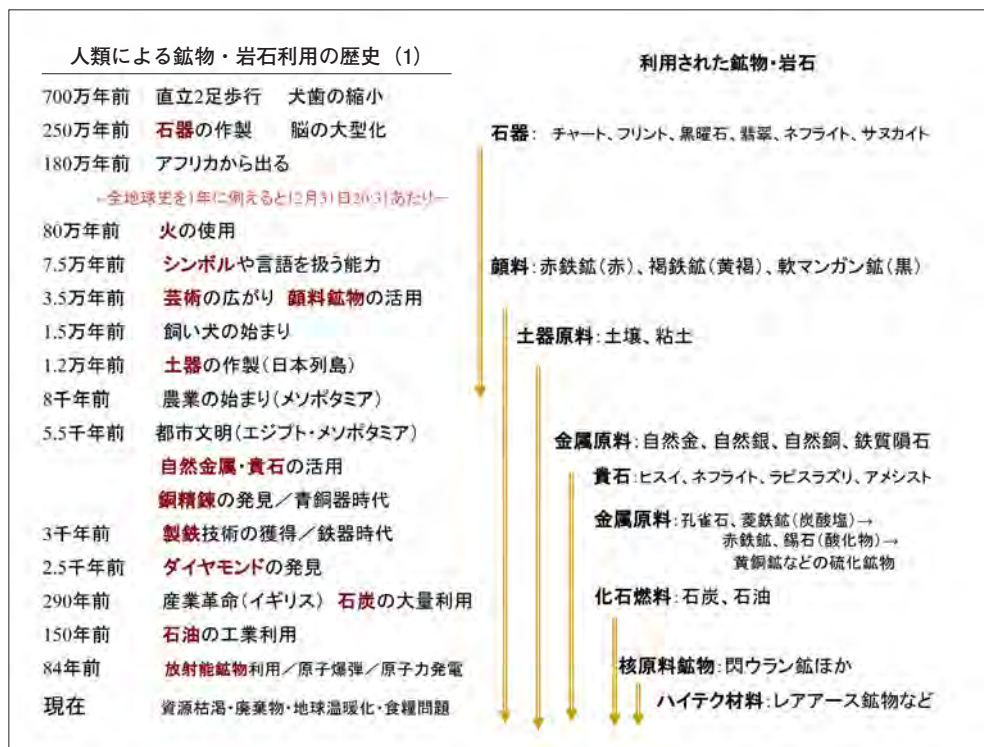


図2 人類による鉱物・岩石利用の歴史 (1)



図3 人類による鉱物・岩石利用の歴史 (2)

には、7.5万年前頃から言語的能力と、コミュニケーション能力が育ち、3.5～4.5万年前には絵を描くほどの芸術的センスが備わった。赤鉄鉱、褐鉄鉱、二酸化マンガン鉱物などが、顔料をつくる原料として活用された。スペインのアルタミラ、フランスのラスコーなどの石灰岩洞窟には、狩猟対象だった獣の壁画が残されている。それぞれ、スケッチの正確さと色使いの生々しさにおいて、アートとして高い水準を感じさせる。鉱物の粉末は化学的に安定しているものが多く、今日でも顔料として存在価値を失っていない。農耕が始まると、作物の保存や、調理の工夫も行われ、相携えて土器を製造するようになった。硬い石を割ることによっては得られない平らな皿や壺状の器は、水と一緒に粘土(土壌)を練り、たき火の中で焼くことによって製作できた。ヒトや動物の立体像の制作も、土器技術の応用である。土器づくりは、セラミクス産業となって今日に至っている。5.5千年前以降は、金属を活用する時代である。まずは、精錬が必要ない自然金属や隕鉄が利用され、次に炭酸塩鉱物を熱処理して銅を取り出し、酸化物、硫化物から酸素と硫黄を除去する工程を含む精錬が行われるようになった。クジャク石から銅を取り出すことに比べると、酸化鉄の鉱石から鉄を得るほうが、圧倒的に難しいため、鉄精錬は銅精錬より2千年ほど遅れて始まった。鉄精錬技術の獲得は、鉄鉱石が入手しやすいこともあって、今日につながる鉄器時代をもたらした。今から290年前頃に始まる産

業革命を経て、石炭、石油をエネルギー源とする産業が発展し、社会は大量生産、大量消費の時代に入った。そこにかぶせて、84年前頃から閃ウラン鉱などの放射能鉱物を利用する原子力時代に入った。

鉱物を利用しながら、人間は生産性を高めたが、一方で自然環境への負荷を増やしたり、核爆弾という、扱いにくいものも生み出してしまった。産業革命以降の期間は、人類のタイムスパン700万年のわずか0.05%にも満たない。ヒトは社会を作り急速な発展を遂げたが、その一方で、自然環境やほかの生物にインパクトを与えている。新たなバランス点への模索は、自然と交感する心からエネルギーを得るものと思われる。

### 3 鉱物学の歴史

天然の無機的に生成した固体化合物で、化学組成と結晶構造によって、他の物質と区別できる石を鉱物とよび、鉱物の集合体を岩石と呼ぶ。生物学と同様に、鉱物学は博物学の1分野として生まれた。歴史科学である地質学と異なり、物質科学の側面が強く、物理学、化学とは地続きである。

近代鉱物学の主な成果および研究者の氏名を、人類による岩石・鉱物利用の年表に対比して図3に示した。図の左半分は図2を背景に関連の岩石・鉱物種の写真を入れた。石器、顔料の材料、飾り石、自然金属、金属原料の化合物がある。古典的鉱物学(博

物学)の源流は、アリストテレス、大プリニウスの表した紀元前の著書にたどることができる。そこから起算して今日まで2350 - 2400年あるが、今日に直接つながるサイエンスは、1600年代に、結晶外形の規則性を調べて面角一定の法則を提唱した、ステノや、数理結晶学の体系を作ったアユイから始まったと言えよう。以降、鉱物の物質科学的なアプローチが加速した。化学組成に基づく鉱物の系統分類が、デーナによって1800年代に発表され、その後の記載鉱物学のより所となった。博物学の中核であった記載鉱物学は、野外の産状観察を必要とするため、地質学とは関係が深く、今日でも基本的重要性を失っていない。鉱物の観察・分析技術は、鉱床学、岩石学、宝石学、セメント鉱物学等の応用分野と刺激あって進化してきた。偏光顕微鏡は1840年頃に開発され、鉱物を扱う様々な分野を牽引した。光学的性質から微細な鉱物を同定するほか、鉱物の集合組織、結晶内の不均質性から、鉱物・岩石の生成プロセスの理解も進んだ。偏光顕微鏡は現在も鉱物観察の基本ツールである。偏光顕微鏡が、いかに情報量を増やすかの実例として、代表的な造岩鉱物である斜長石の画像を用いて示す(図4)。

1920年代以降は、ラウエ、ブラッグ親子により始められた、X線回折を用いた結晶構造解析に力が入った。1970年代以降は局所的な化学分析の手法が生み出された。走査電子顕微鏡、電子線マイクロアナライザー、レーザーアブレーションICP質量分析などである。電子線やレーザー光を細く絞って、試料の任意の場所に照射できるこれらの手法は、マイクロビーム分析と呼ばれる。結晶内の組織や化学組成の不均質性が高解像度で可視化される。変成岩や火成岩中のジルコン  $ZrSiO_4$  を、数十ミクロンの解像度で質量分析し、U-Pb法により年代測定を試みることにより、一つの結晶粒子が結晶の部位によりかなり異なる年代を示す事が知られるようになった<sup>3)</sup>。

有機化学的に生成した物質は古典的な鉱物学の対象ではなかったが、今日では無機鉱物と有機鉱物は分け隔てなく研究される。非晶質物質を含めて、自然界の固体物質はすべて鉱物学の対象になっている。それほど分析手法が多様化高度化したということである。

鉱物学が急速に近代化したのは最近の200-300年であり、鉱物資源の活用による産業革命以降の期間に相当する。

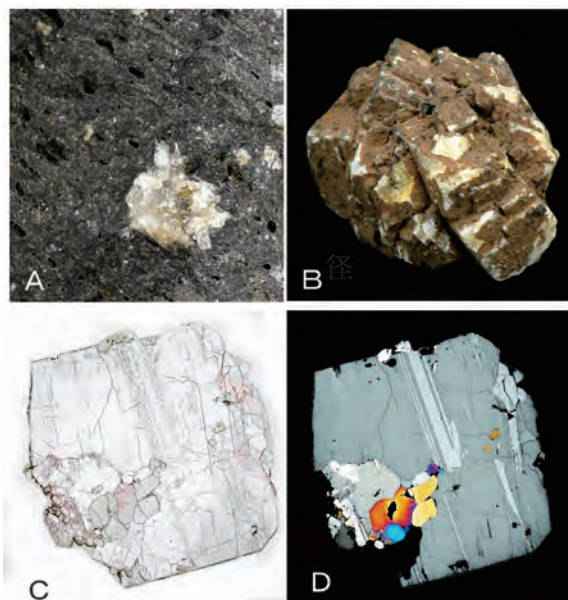


図4 斜長石斑晶 4態  
—東京都三宅島産の玄武岩を例として—

玄武岩の暗色細粒の基質中で、白い斜長石は目立つ。斑晶は数センチメートル大に達し、しばしばカールスバッド双晶をつくる。マグマ中に浮遊していた斜長石(灰長石)は、結晶火山弾となって噴き上げられ噴火口の周囲に堆積する。斜長石は、そばにいた別の鉱物を巻き込んでいることも希ではない。写真AとDを比較すると偏光顕微鏡が、結晶の内部組織を知るために、また成長の歴史を読むために、強力な道具になることがわかる。C,Dはデジタルカメラ+等倍マクロレンズ+偏光フィルム2枚を使用して撮影した。

- A. 玄武岩の手標本を自然光下で撮影。写真の左右幅が約5cmに相当。白色の大型結晶が斜長石の斑晶。暗色結晶を包有している。
- B. 径2-3cmの結晶火山弾。噴火のとき纏っていた玄武岩溶岩の皮膜は、酸化して赤褐色を呈している。方位が異なるカールスバッド双晶が複数集まってダンゴ状態となり、結晶内部の状態は分からない。自然光下で撮影。
- C. 径2cmに達する結晶火山弾を約30マイクロメートルの厚さに研磨した薄片を、透過光で撮影。直線的な輪郭は双晶の外形であり、結晶を貫く直線は、アルバイト双晶に平行に走っている。斜長石よりやや暗く曲線的な輪郭を持つ粒子はカンラン石。
- D. Cと同じ薄片を2枚の偏光フィルムで挟み、偏光顕微鏡の直交ニコル状態に似せて撮影。複屈折が大きいカンラン石は鮮やかな干渉色を見せる。斜長石のゼブラパターンはアルバイト双晶による。直交ニコルモードでは、地学的情報量が爆発的に増えるだけでなく、岩石・鉱物がアートとして蘇る。

#### 4 「北海道石」発見に思う

観察・分析技術の進歩とともに、新鉱物発見のチャンスは増える。

フィールドワークで自身が採集したものだけでなく、他者によって昔採集された標本から新鉱物が見つかることがある。個人の経験には限りがあり、分析技術は時代とともに進化するためである。未知の

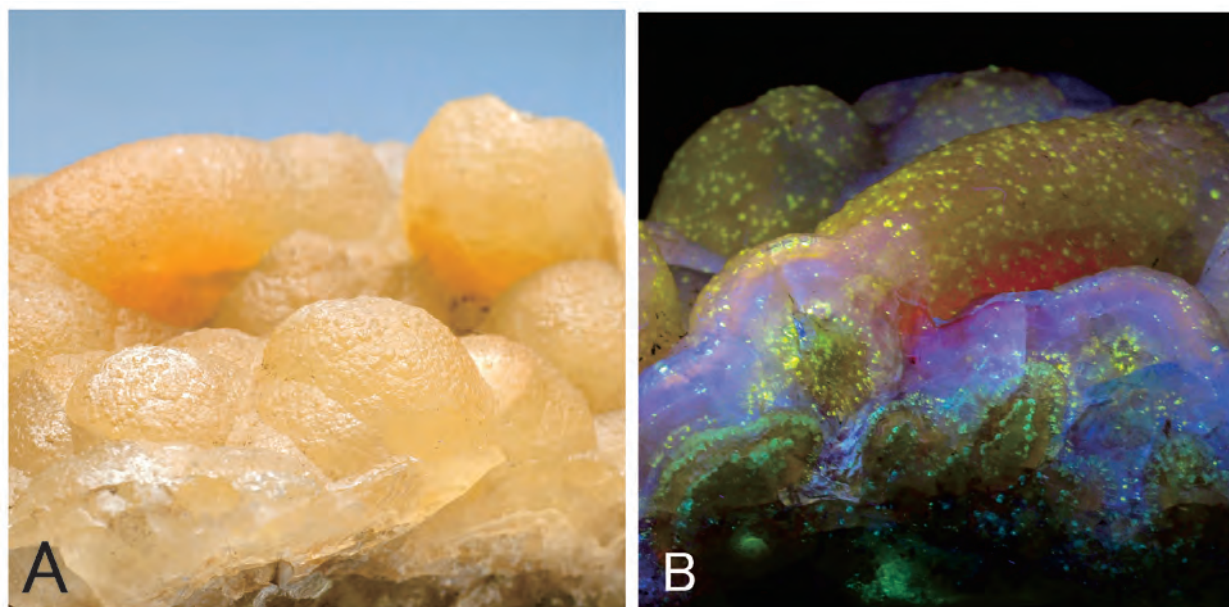


図5 北海道石 Hokkaidoite  $C_{22}H_{11}$  単斜晶系

- A. 北海道石を含む温泉珪華を通常光下で撮影した画像。仏頭状の表面が、熱水に最後まで接していた面で、珪華の成長速度が減少するに連れて、オパール以外の物質で覆われる。通常光下の肉眼観察では、北海道石の存在に気づきにくい。
- B. 同じ試料に紫外線を照射すると、鮮やかな蛍光色が出現する。黄緑色の蛍光を発している粒子が北海道石。珪華の内部にも包有されており、蛍光粒子の同心円状配列から、北海道石の沈殿が間欠的だったことがわかる。写真の左右長が約5cmに相当する。

物質に遭遇し、文献調査でも該当するものが見いだされないうち、肉眼的特徴、化学組成、結晶構造の解析を進めながら、新鉱物発見への期待が高まってゆく。その鉱物の産出状況を、地質学的、地球化学的に記述し、研究試料と同等の試料を、タイプ標本として保管し、第三者の追試に備える。既知の鉱物との本質的な違いを徹底的に記述して、国際鉱物学連合の審査に臨む。その審査をクリアすれば、晴れて鉱物学の世界で市民権をもつ鉱物となる。発見するまでの努力と幸運、幸運を無駄にしない迅速な研究力が伴わなければ、ゴールには届かない。新鉱物の発見は、好奇心とサイエンスの勝利であるが、そこにアートの要素が絡んでいることが珍しくない。

新鉱物「北海道石 Hokkaidoite」を一例として、発見物語を手短にご紹介しよう。北海道から発見された新鉱物はいくつかあったが、「北海道石」の名前はまだ使われていなかった。この鉱物にとっても、発見者にとっても幸運だった。北海道石は温泉から沈殿したオパールの内部に閉じ込められ、あるいは表面を覆った状態で発見された有機鉱物である。温泉活動に起因するオパールは世界各地で観察されているが、「北海道石」に相当する天然物はまだ記載されていなかった。

北海道十勝の然別火山周辺に、オレンジ色のオ

パールが露出していること、そして同地のオパールには、紫外線照射によって黄緑色の強い蛍光を発するものがあることが、地元の自然愛好家に見いだされていた。その記載報告<sup>4)</sup>のために、天然鉱物の同定や無機微量成分の分析にベテラン研究者が協力したが、蛍光の原因を解明するには至らなかった。その数年後に、有機化学に造詣が深く、鉱物結晶の観察にも経験豊富な研究者が、然別オパールの蛍光現象に新たなメスを入れた。蛍光鉱物の分離、化学組成の決定、結晶構造解析に成功したのだった。その物質は、ベンゾペリレンという、組成式が $C_{22}H_{12}$ で表される多環芳香族有機化合物だった。この鉱物はレモンイエローの板状結晶を作る。ベンゾペリレンには、天然産の結晶がまだ発見されていなかったため、新鉱物として認定されたもの（国際鉱物学連合の登録番号はIMA2022-104）。紫外線照射の有無によって、北海道石を含むオパールは、劇的に表情を変える。その光景はまさにアートと呼ぶにふさわしい。通常光と紫外光で撮影した写真を対比して図5に示す。紫外線の助けを借りただけで、肉眼でも結晶がわかる新鉱物の発見につながった経緯は、専門家だけでなく青少年、自然愛好家をも勇気づけたことだろう。アートの要素が好奇心を刺激し、サイエンスのアプローチにつながった好例である。



「北海道石」に限ったことではないが、新鉱物や希産鉱物が見つかったときは、いかにその産地の状態を保護するかという課題がいつも浮上する。自然への愛着をもち、現地の保全と、教育研究のバランスについて考え続ける人間を増やすことが、乱獲への抑止力になることを信じている。そのために、サイエンスとアートの両面から青少年の好奇心を刺激する出版物に期待がかかる。北海道石の発見に携わった研究者が執筆した「光る石北海道石」<sup>5)</sup>は、観察事実をわかりやすく説明し、北海道石の産出状態が保護される意味を伝えている。あとは、その情報を受け取った側の問題である。自然を愛する自分のセンスを信じて、新鉱物の産地保護と教育研究の振興のために知恵を出していただきたい。

---

#### 〈参考文献〉

- 1) Pasero, Marco; et al. (2024) : "IMA List of Minerals" , IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification.
- 2) 加藤碩一・青木正博 (2015) : 賢治と鉱物, 工作舎
- 3) 安間了 (2012) : ジルコン結晶形とU-Pb年代, フィッショントラックニュースレター 第25号, 11-16
- 4) 岡崎智鶴子 ほか7名 (2014) : 北海道然別火山地域に賦存する蛍光を発するオパール, 地質学雑誌, Vol.120, No.11
- 5) 田中陵二 (2024) : 光る石 北海道石, 月刊たくさんのふしぎ, 福音館書店

# 海底鉱物資源開発の最前線

かとう やすひろ\*  
加藤 泰浩\*

K  
ey Word

海底鉱物資源, レアアース泥, マンガンジュール, 南鳥島  
レアアース, バッテリーメタル

## 1. はじめに

鉱物資源は、エネルギー資源と共に人類の文明社会を支える上で重要な役割を果たしている。古来より人類は、陸上の鉱物資源を開発・利用することで、文明を発展させてきた。しかし、カーボンニュートラルを基軸とする持続可能な社会の構築が叫ばれる中、人類文明のさらなる発展を支えるためには、鉱物資源が圧倒的に不足することが予測されている。現在、陸上において高品位かつ大規模な鉱床を発見することは次第に難しくなっており、より低品位で、コストがかかり、環境への悪影響が大きい資源を開発せざるを得ない状況に陥りつつある。このような状況の中、注目を集めているのが海底鉱物資源である。

エネルギー資源である石油や天然ガスについては、1970年代より海洋からの生産が本格的に始まっており、現在では全体の実に約4割が海洋から生産されている。一方、海底鉱物資源については、現在に至るまで商業生産は行われておらず、本格的な開発には未だ至っていない。しかし、海底鉱物資源の開発に向けた動きは1960年代から存在しており、開発に必要な技術も着実に進歩を続けている。そのため、将来的には石油や天然ガスなどのエネルギー資源に続き、鉱物資源の開発も海洋へ進出することは確実であると考えられる。

現在までに発見されている海底鉱物資源は、「海底熱水性硫化物鉱床」「マンガンジュール」「コバルトリッチクラスト」「レアアース泥」の4つである。日本の排他的経済水域 (Exclusive Economic Zone: EEZ) 内には、これらすべての海底鉱物資源の分布が確認されており、将来的に日本独自の開発が可能である。本稿では、現在最も商用化に近いと考えら

れる「レアアース泥」および「マンガンジュール」について、その開発実現に向けた我々の取り組みと現状を紹介する。

## 2. レアアース泥の発見

2011年7月、我々の研究グループは、全く新しいタイプのレアアース資源「レアアース泥」を太平洋の海底から発見し<sup>1)</sup>、世界に大きな衝撃を与えた。この成果は、国内においてほとんどすべての主要紙の1面に掲載され、NHKなどで繰り返し報道されただけでなく、ロイター、AFP、BBC、WSJなど海外主要メディアでも大きく報道された。我々が発見したレアアース泥は、(1) レアアース (特に産業上重要な重レアアース) 濃度が高い、(2) 遠洋域の海底に広く分布するため資源量が膨大である、(3) 海底下の地層として広く連続的に分布するため探査が容易である、(4) 常温の希酸でレアアースを容易に抽出・回収できる、そしてなにより、(5) 陸上の資源開発で障害となるトリウム、ウランなどの放射性元素を含まないクリーンな資源である、という幾つもの有利な特長を兼ね備えた、まさに「夢の泥」である<sup>1)</sup>。

そして2012年6月、我々は我が国の排他的経済水域 (EEZ) 内にあたる南鳥島周辺海域にもレアアース泥が存在することを発表した<sup>2)</sup>。続く2013年には、独立行政法人 (現・国立研究開発法人) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と共同で南鳥島 EEZ 内の調査航海を行い、南鳥島の南方 250 km の海域 (水深 5,700 m) において、総レアアース含有量が 7,000 ppm に達する「超高濃度レアアース泥」を発見した<sup>3)</sup> (図1)。この超高濃度レアアース泥は、産業上特に

\*東京大学大学院工学系研究科 研究科長・工学部長 / 教授

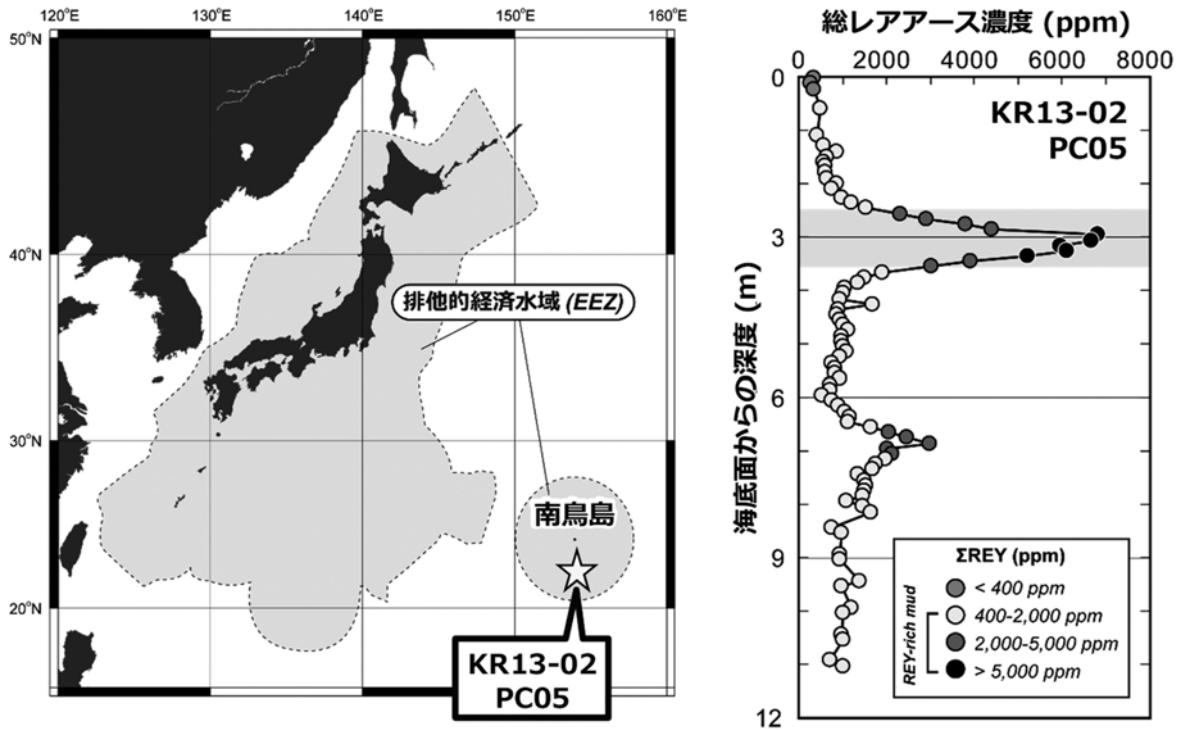


図1 南鳥島で発見された超高濃度レアース泥<sup>3)</sup>

重要な重レアースを中国の陸上鉱床の20倍に達する高い濃度で含んでおり、極めて優良な資源である。この超高濃度レアース泥は海底面に近い部分(海底面下2~4m)に分布しており、資源開発の際に有利であることも確認された。我々は2018年までに南鳥島EEZ周辺海域で計11回の調査航海を行い、取得した膨大なデータを解析した。その結果、南鳥島南方海域の2,500 km<sup>2</sup>の範囲が実開発の対象として最も有望なエリアであることを見出した<sup>4)</sup>。この有望エリアは、南鳥島EEZの面積のわずか0.6%にすぎないが、そこに眠るレアースの資源量は酸化物換算で1,600万トンを超える。これは世界のレアース需要の数百年分に相当する莫大な量であり、陸上のレアース埋蔵量と比較すると、このエリアだけで日本が中国、ベトナム、ブラジルに次ぐ世界第4位の「レアース大国」になることを示している。これに加えて南鳥島レアース泥は、軽量かつ高強度な新合金や高効率な固体酸化物形燃料電池(SOFC)などの次世代の革新的な環境・エネルギー技術を生み出すスカンジウムについても、非常に大きな資源ポテンシャルを有することが明らかとなっている<sup>5)</sup>。

さらに我々は、魚類の歯や骨を構成する生物源リン酸カルシウムがレアースを濃集していること、およびそれらの粒子を粒径の違いを利用して選択的に回収できることを実験に基づいて明らかにし、レ

アース泥開発の経済性を劇的に向上させられる可能性を示した<sup>4)</sup>。この粒径分離により、海上に引き揚げる泥の量を大幅に減らすことが可能となることから、海底で粒径選鉱を行うことで、非常に効率的かつ経済性の高いレアース泥開発が実施可能である。

### 3 南鳥島レアース泥開発への取組み

2014年11月、我々は南鳥島レアース泥の開発実現を目的とした「東京大学レアース泥開発推進コンソーシアム」を東京大学に設立した(2024年7月に「東京大学レアース泥・マンガンノジュール開発推進コンソーシアム」に改称)。2024年9月現在で、40に達する国内企業、政府機関および大学・研究機関が参画しており、海底鉱物資源開発の実現に向けた技術的検討を精力的に進めている。本コンソーシアムでは、レアース泥の開発システムについて、海洋石油生産で多く用いられている浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備(Floating Production, Storage and Offloading system, FPSO)を応用したシステムを提案している。海底からレアース泥を回収する揚泥システムに関しては、圧縮空気を送り込んで泥水(スラリー)に空気を混ぜ、密度を小さくして引き揚げる「エアリフト」を改良した「加圧型エアリフト」を検討している。揚泥さ

れたレアアース泥中のレアアースは、希塩酸を用いてリーチングされる。このリーチング溶液を支援船により陸上工場へ輸送後、既存の製錬手法によりレアアースを沈殿・回収する。2017年11月、我々は実際に南鳥島のレアアース泥を用いて「分離・精錬・製品化」の一連のフローを実証するためのパイロット試験を行い、「南鳥島国産レアアース」の精製とそれを用いた白色LEDや高輝度蓄光材の試作品の製造にも成功した。また、本コンソーシアムではレアアース泥開発の経済性についても検討を進めている。これまでに蓄積してきた様々な知見に基づく最新の評価結果から、現在のレアアース価格帯における開発で十分に採算がとれることが示されている。

我々が国や企業と共に進めているこのような一連の成果を受けて、我が国の主要施策である「日本再興戦略2016」(2016年)や「未来投資戦略2017」(2017年)、「第2期～第4期海洋基本計画」(2013年、2018年、2023年)にはレアアース泥の調査や開発技術の推進が明記され、2018年には「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」において生産技術の研究開発が開始されるなど、国を挙げての取り組みが着実に進捗しつつある

#### 図4 南鳥島マンガンノジュール開発への取組み

南鳥島EEZ内の深海底には、レアアース泥に加えて「マンガンノジュール」という別のタイプの海

底鉱物資源も広く分布している。マンガンノジュールは、電気自動車やモバイル電子機器などに使われるリチウムイオン電池に必須のバッテリーメタル(コバルトやニッケル)の資源として、世界的に注目されている海底資源である。マンガンノジュールが海底に豊富に賦存している海域として、ハワイの南東に位置するクラリオン断裂帯とクリップarton断裂帯に挟まれたCCZと呼ばれる海域(もしくは「マンガン銀座」とも呼ばれている)が知られている。この海域では、国際海底機構(International Seabed Authority, ISA)の制定した公海上での探査鉱業規則(マイニングコード)に基づき、日本を含む世界各国がマンガンノジュールの探査鉱区を取得している。2022年11月には、海外企業によりハワイ沖の水深4,300mの海域(ナウル共和国の鉱区)で、エアリフトを用いた揚鉱パイロット実験が実施され、1日あたり約2,000トンのマンガンノジュールが揚鉱されている。これは、我々が提案しているレアアース泥揚泥とまったく同じ揚鉱技術にあたる。

日本のEEZ内におけるマンガンノジュールの分布は近年まで明らかとなっていなかったが、2016年に我々の研究グループによる「しんかい6500」を用いた潜航調査が行われ、南鳥島EEZの南部～東部にかけての海域に、これまで予想されていなかった大規模なマンガンノジュール密集域が発見された<sup>6)</sup>。この成果は、我が国が持つ海底鉱物資源のポテンシャルを大幅に引き上げる重要な発見として、NHKをはじめとしたTVニュースや新聞主要

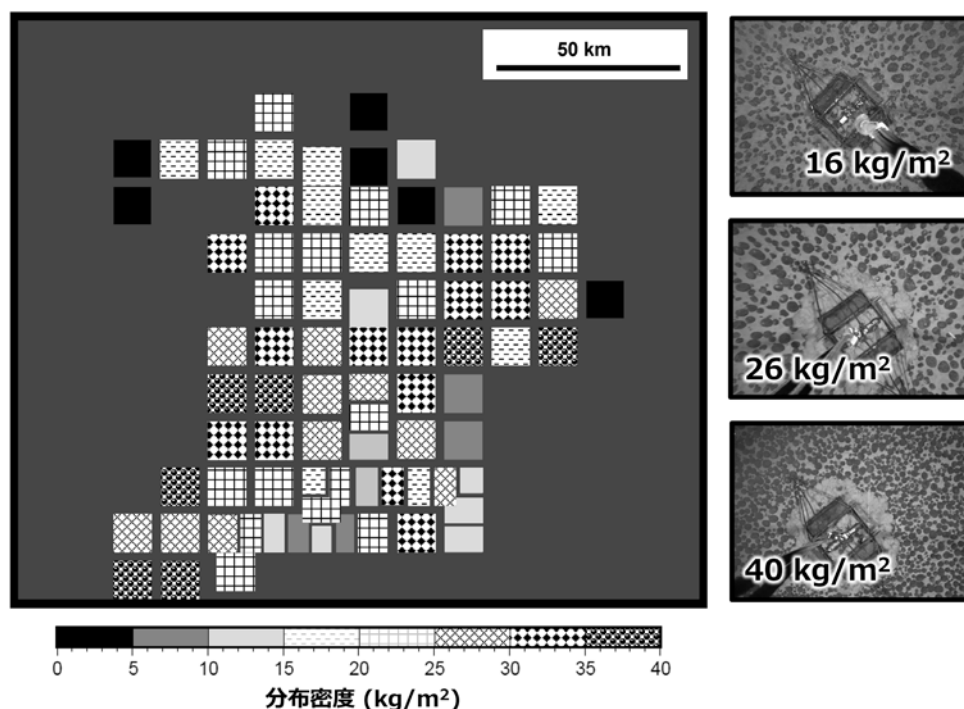


図2 南鳥島EEZで発見されたマンガンノジュール開発有望海域<sup>7)</sup>

紙に大きく取り上げられた。

さらに我々は日本財団の委託を受け、2024年4～6月にかけて、南鳥島EEZでより詳細な調査を実施した。その結果、10,000 km<sup>2</sup>以上の広大なエリアに、20～40 kg/m<sup>2</sup>という高密度でマンガノジュールが連続的に分布していることを確認することができた（図2）。エリア全体には2.3億トンものマンガノジュールが存在しており、この開発有望海域（南鳥島EEZ面積のわずか2%）だけでも日本の年間消費量の75年以上のコバルト資源が見込まれる<sup>7)</sup>。以上の成果については、2024年6月21日に日本財団と東京大学とのプレスリリースによって公表され、NHKや読売新聞をはじめとする各種メディアで大きく報道された。現在、我々と日本財団は、今後の商用化を見越して1日に数千トン規模でマンガノジュールを揚鉱する実証試験を実施すべく、海外の企業とも連携しながら計画を進めている<sup>7)</sup>。

## 5 「真に持続可能な資源開発」を目指して

海底資源の開発においては近年、開発時の海底への環境影響が懸念されている。しかし、実はレアアース泥やマンガノジュールは海底に分布する鉱物資源の中でも非常に環境影響が小さい資源である。特にレアアース泥は、陸上のレアアース開発で問題となる放射性元素に代表される、生物に有害な元素を含んでいない。さらに、これらの資源が分布する遠洋域の深海底は、生物の密度が低く、海底熱水噴出孔付近に見られるような固有の生物種も存在しない。そして開放的な環境であるため生物は周辺海域へと自由に移動可能である。そのため、採掘に伴う生物への影響が甚大で回復不能となるような事態は考えにくく、採掘場所についても、採掘が終了すれば周辺海域から生物が再び移住可能となり、生態系は比較的速やかに元の状態へと復元すると考えられる。

そして、陸上と比べて海底の資源開発には極めて重要な側面がある。陸上の鉱床では「誰でもアクセスできる」ことが仇となって、コンゴのコバルト鉱山での児童労働やアマゾンでの違法な金採掘に伴う水銀汚染など、様々な人権問題や環境問題が生じており、国連が掲げる持続可能な開発目標（SDGs）に対する障壁となっている。これに対して、深海の鉱物資源は、高度な技術としっかりしたコンプライアンスを持つ国や企業にしか開発できない。そのため、適切な管理の下での開発を徹底し、陸上鉱床開発に見られる様々な問題をシステマチックに防ぐこ

とが可能となる。したがって、海底鉱物資源開発の実現こそが、真に持続可能な資源開発の在り方といえよう。我が国が南鳥島のレアアース泥やマンガノジュール開発を実現し、真に持続可能な資源開発の新しい在り方を提示することができれば、世界各国の産業や安全保障の要となる戦略元素群の資源を巡る国際情勢を劇的に変化させることに繋がる。日本が世界の鉱物資源の開発を根本的に変える「ゲームチェンジャー」となることも夢ではないのである。

### 〈参考文献〉

- 1) Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T. & Iwamori, H.: 「Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements」, *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 535–539, 2011
- 2) 加藤泰浩: 「レアアース泥は有望な資源か?」, 資源地質学会第62回年会講演会講演要旨集, 2012
- 3) Iijima, K., Yasukawa, K., Fujinaga, K., Nakamura, K., Machida, S., Takaya, Y., Ohta, J., Haraguchi, S., Nishio, Y., Usui, Y., Suzuki, K. & Kato, Y.: 「Discovery of extremely REY-rich mud in the western North Pacific Ocean」, *Geochemical Journal*, Vol. 50, pp. 557–573, 2016
- 4) Takaya, Y., Yasukawa, K., Kawasaki, T., Fujinaga, K., Ohta, J., Usui, Y., Nakamura, K., Kimura, J.-I., Chang, Q., Hamada, M., Fujita, T. & Kato, Y.: 「The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements」, *Scientific Reports*, Vol.8, Article number: 5763, 2018
- 5) Yasukawa, K., Ohta, J., Mimura, K., Tanaka, E., Takaya, Y., Usui, Y., Fujinaga, K., Machida, S., Nozaki, T., Iijima, K., Nakamura, K. & Kato, Y.: 「A new and prospective resource for scandium: Evidence from the geochemistry of deep-sea sediment in the western North Pacific Ocean」, *Ore Geology Reviews*, Vol. 102, pp. 260–267, 2018.
- 6) 国立研究開発法人海洋研究開発機構: 「南鳥島沖の排他的経済水域内の深海底に広大なマンガノジュール密集域を発見」  
[https://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/archive/2016/20160826.pdf](https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/archive/2016/20160826.pdf) (2024年9月20日現在)
- 7) 公益財団法人日本財団: 「南鳥島近海における海底鉱物資源の調査速報」  
<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/information/2024/20240621-102397.html> (2024年9月20日現在)

# 人を魅了するダイヤモンド

ふなやま のりひろ\*  
船山 訓宏\*

**K**  
ey Word

宝飾用ダイヤモンド, 合成カラーダイヤモンド, 工業用ダイヤモンド, 結晶性,  
ダイヤモンド砥粒, 結合剤

## ▼1 はじめに

希少価値が高く、宝石の最高峰に君臨し人々を魅了するダイヤモンド。宝飾用としては屈折率が高く、輝きが美しいという特性が生かされていますが、それだけでなく他にも様々な唯一の特性を持っています。代表的な特性は地球上で最も硬いという事です。工業ではこの硬さを利用して、歯科治療や半導体物質をはじめ様々な加工に用いられています。最近では2020年前後から宝飾用ダイヤモンドに大変革が起きたことをはじめ、工業用ダイヤモンドのご紹介を通じて皆様が誰かに話したくなるようなお話をできたら幸いです。

## ▼2 ダイヤモンド

ダイヤモンドはご存じの通り炭素原子単体からなり、炭素原子の結びつき方によって、グラファイトや、フラーレン、ナノチューブと全く異なる物質に変化します。他の宝石であるサファイヤやルビー、エメラルド、水晶などは酸素が結びついた酸化物で成り立っており、結びつき方も一様であることを考えると単一元素からなるダイヤモンドは宝石の中でも特別であることがわかります。

また、ダイヤモンドは地球内部の高温高压という条件下で生成され、それが地殻運動などで偶然地球表面近くに移動し、発見されます。産地としては南アフリカやロシア連邦が有名です。一方、人工ダイヤモンドは地球内部環境を模した高温高压（5万気圧、1500度）条件下で生成されます。5万気圧とは、1セント硬貨（直径約19mm）にエッフェル塔を逆さまにして乗せたときの圧力と言われています。また、プラズマなどによる化学合成（CVD）も行わ

れ、その際は0.1気圧、1000度程度の条件でダイヤモンドを生成することができますが、非常に時間がかかります。写真はDeBeersが保有する世界最大級で273ctの無傷のダイヤモンドである<sup>1)</sup>The Centenary Diamondです。



<sup>1)</sup> The Centenary Diamond 273 ct

## ▼3 宝飾用ダイヤモンド

これまで人工ダイヤモンドは大きく、不純物を含まないダイヤモンドを作ることができませんでした。近年の技術進歩により透明で不純物の全くないダイヤモンドを作ることができるようになりました。人工とはいえダイヤモンドですので、結晶構造も同じで科学的な分析では区別することができません。これらは天然ダイヤモンド以上に大きくて透明度が高く、そのようなダイヤモンドが安価で購入できるため宝飾業界では大きな話題になりました。参考ではありますが、市場では1ctで\$500～700程度です。天然ダイヤモンドならば100万円以上の価格になります。さらには、映画でも有名になったブ

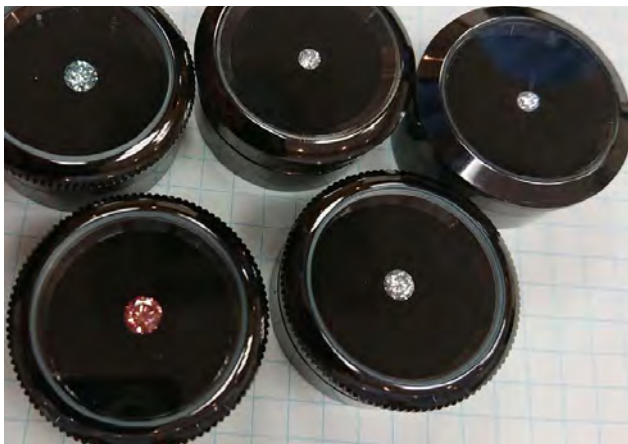
\*旭ダイヤモンド工業株式会社三重工場生産技術部課長

ルーダイヤモンドやレッドダイヤモンドをはじめ、着色も可能になってきており安価に購入できるようになってきました。そのため、従来の希少価値という点では疑問が生じてきていますが、「天然」という点においてはまだまだ価値があるのかもしれない。



2) 合成カラーダイヤモンド

世界の人工ダイヤモンドのほとんどは中国で作られています。その量は年間 150 億 ct 以上になり、多くは工業用ダイヤモンドですが、宝飾用ダイヤモンドも増えてきているようです。中国のダイヤモンド展示会に行くとサンプルとして無料で配布していたり、無料でないまでも安く購入できるようです。

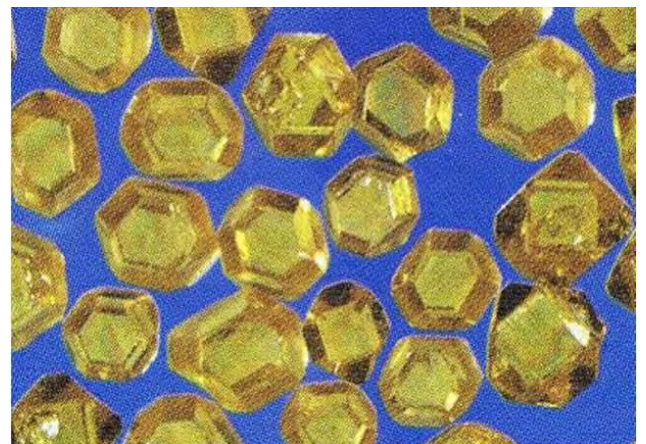


展示会で販売されているダイヤモンド

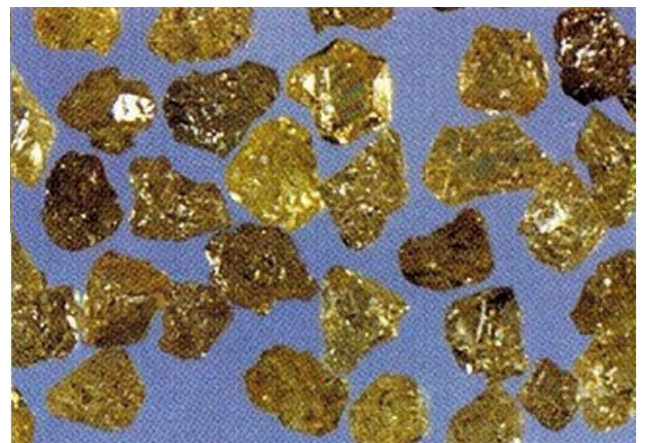
#### 4 工業用ダイヤモンド

工業用ダイヤモンドの多くは高温高压状態を作り出す大きなプレス機で合成されていますが、本来の条件より若干低圧低温度で合成するために、金属触媒を用います。その金属触媒がダイヤモンド中に残っていると、強度が低下してしまったり、耐熱性が低くなってしまいうため、合成後に不純物の量や、大きさ、形状毎に各グレードとして選別分類します。また、工業用ダイヤモンドは宝飾用ダイヤモンドと違って「硬度」を利用するため、透明度などは必要なく、有色砥粒であることが多いです。

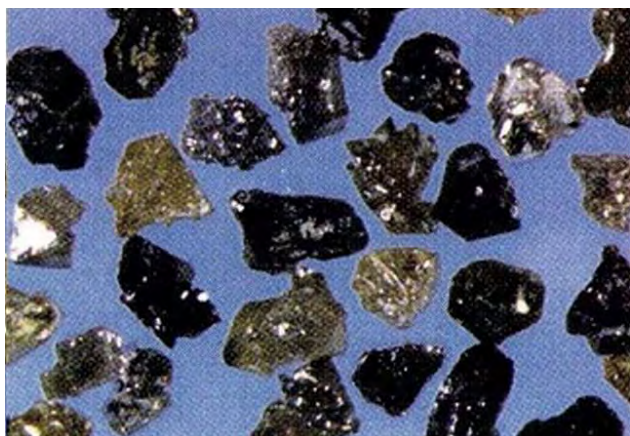
さらに、工業用ダイヤモンドは加工する材料によって結晶性の異なるダイヤモンドを使用します。結晶性は工具の切れ味や寿命、加工物の面品位に影響を与え、一般に結晶性が良い（砥粒形状がブロッキーで正八面体や十二面体、切頂二十面体のような形状）砥粒は切れ味が良く工具寿命が長くなりますが、加工物の面品位は悪くなります。一方、結晶性の悪い砥粒（表面の凹凸が多くモザイク形状）は切れ味が悪いですが、加工物の面品位は良くなります。ただし、後に述べますが砥粒の「自生作用」をコントロールするために砥粒を焼き固める結合剤の種類を使い分けます。この結合剤によって加工性能は大きく変えることができ、加工物それぞれに合った結合剤と砥粒を選定します。ビットを含む土木分野ではより強固な工具が必要であるため、より結晶性の良いダイヤモンドを用いて金属の結合剤で焼き固めます。シリコンをはじめとする半導体関連の加工にはより切れ味の優れたエッジの多いダイヤモンド砥粒を用いてガラス質の結合剤で焼き固めます。鏡面加工のように加工面の品質が求められるような加工には砥粒強度が小さく、さらに割れやすいダイヤモンド砥粒を用いて樹脂の結合剤で焼き固めて研削工具を製作します。



金属の結合剤で用いるダイヤモンド<sup>3)</sup>



ガラス質の結合剤で用いるダイヤモンド<sup>3)</sup>

樹脂の結合剤で用いるダイヤモンド<sup>3)</sup>

また、これらのダイヤモンドをさらに細くなるまで砕碎して、シリコンなどをより欠陥の少ない表面に仕上げるためにミクロンサイズのダイヤモンド砥粒を製作します。小さいものではダイヤモンドの粒径が1 μm以下になる物もあります。

ダイヤモンドは粒径と、先に述べた結晶性によって分類選別されます。粒径は工具の切れ味と寿命、加工物の面品位に影響を与え、一般に粒径が大きくなるほど切れ味が良くなり、工具寿命が長くなる傾向にあります。加工物の面品位は悪くなる傾向にあります。粒径はJIS規格により一般砥粒(アルミナ、カーボランダム等)と同様に篩(ふるい)によって分類されますが、一般砥粒とは規格の数字が異なるので注意が必要です。篩は網目の大きさは#18/20(1.18～1.00mm)から#325/400(45～38um)<sup>3)</sup>まで規格化されており、これより小さい砥粒については厳密に規格化されておらず、砥粒メーカー毎に分類の値が異なり、使用する際にはきちんと管理して工具を製作する必要があります。篩による分類は例えば#325/400では#325(45um)の網目を92%以上の砥粒が通過し、#400(38um)の網目上に90%以上の砥粒が残留しなければならないと決められています。

次にJIS規格の粒度の種類及び表示を示します。

表 粒度の種類及び表示<sup>4)</sup>

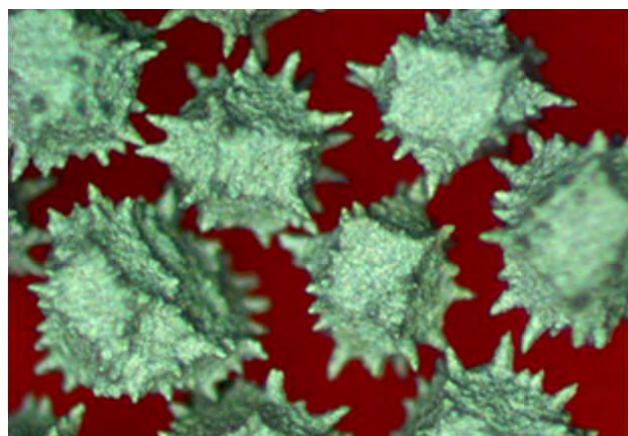
## 1:ナローレンジ

粒度の種類		ふるいの 目開き寸法(1) (μm)
A方式 の表示 (3.1)	B方式 の表示 (3.2)	
16/18	1 181	1 180/1 000
18/20	1 001	1 000/850
—	851	850/710
—	711	710/600
—	601	600/500
—	501	500/425
—	426	425/355
—	356	355/300
50/60	301	300/250
—	251	250/212
—	213	212/180
80/100	181	180/150
100/120	151	150/125
120/140	126	125/106
140/170	107	106/ 90
170/200	91	90/ 75
200/230	76	75/ 63
230/270	64	63/ 53
270/325	54	53/ 45
325/400	46	45/ 38

注(1) JIS Z 8801による。

更に、ダイヤモンド砥粒と結合剤の化学的・機械的接合強度改善や、焼結時の砥粒保護、加工時に発生する熱の拡散など、加工工具としての工具寿命を改善するためにダイヤモンド砥粒表面に主に金属皮膜を生成して使用することも多々あります。

以下にニッケルコーティングダイヤモンドとチタンコーティングダイヤモンドの写真を示します。

図 ニッケルコーティングダイヤモンド<sup>3)</sup>



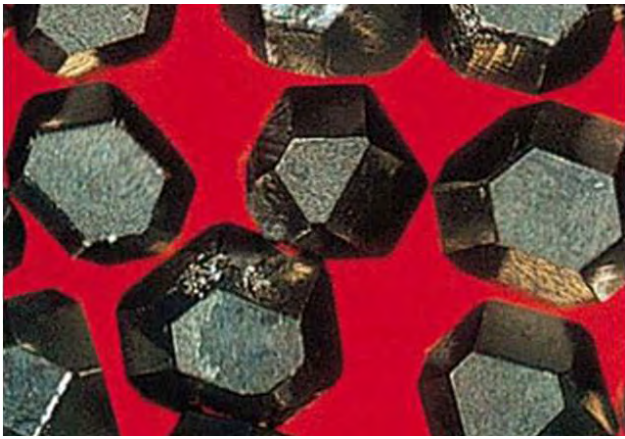


図 チタンコーティングダイヤモンド<sup>3)</sup>

ニッケルコーティングダイヤモンドは主に樹脂の結合剤に対して用いられ、その表面積と形状から結合剤との接合力が増加し砥粒が脱落しにくくなります。一方、チタンコーティングダイヤモンドはダイヤモンドと化学的に結合して炭化チタンとなり、本来600～700度以上で燃焼を開始してしまうダイヤモンドを保護する役目と、金属の結合剤で用いられる場合に、その結合剤と金属間化合物を生成し接合力を改善する役目を果たします。下にチタンコーティングしたダイヤモンドとノンコーティングダイヤモンドの温度と燃焼による重量減少の関係を示します。

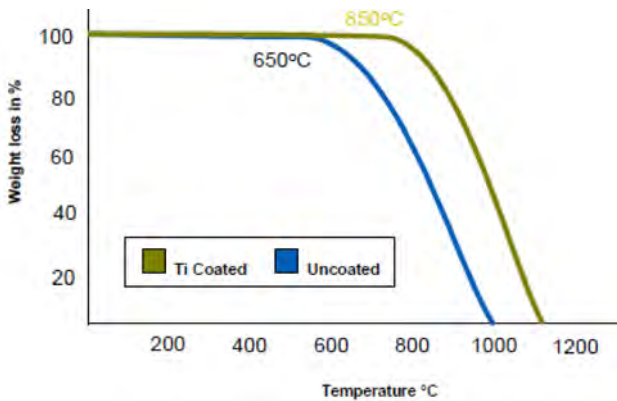


図 チタンコーティングダイヤモンドとノンコーティングダイヤモンドの熱分析比較<sup>3)</sup>

先に少し述べたように、ダイヤモンド工具は「自生作用」を継続することで加工性能を維持できます。ダイヤモンドはその高い「硬度」によって、加工物に突き刺さることで掘り起しや破碎によって加工を行います。しかしダイヤモンド砥粒の先端が摩滅したりカケが発生すると、加工物に刺さり難くなり加工が行えなくなります。この状態の砥粒は加工を阻害するため速やかに除去し、新しい砥粒に交換することで再び切れ味を回復することができ、この一連のサイクルを砥粒の「自生」と呼びます。「自

生」は加工により発生した切りくず（切粉）が、砥粒を支えている結合剤を除去することで進行するため、切れない砥粒で切りくずが発生しない場合は自生が進行せず、「自生」サイクルが生まれなため、砥粒を支える結合剤、砥粒粒径、加工物によって「自生」サイクルが発生するようにバランスを取る必要があります、これがノウハウとなります。

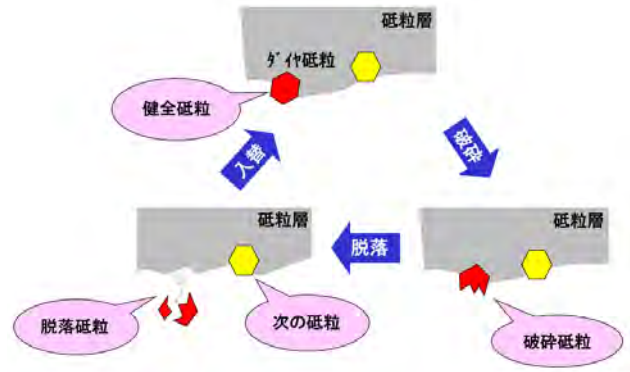


図 砥粒の自生作用サイクル

## 5 人工合成ダイヤモンドの応用

地球上でもっとも高い硬度と、最も高い屈折率で有名なダイヤモンドですが、実は他にも低摩擦係数、高熱伝導率、高弾性率、半導体特性（電子放出度、広い電位窓）、化学的安定性などで物質中最高値を示します。これらの特性を生かして他の分野での応用が研究されています。例えば半導体材料として、これまでのシリコンや、今話題のSiC以上の半導体特性を持っており、SiCの次世代の半導体材料としての研究や、核融合技術への応用や、量子コンピューティングへの応用が始まっています。

### 〈参考文献〉

- 1) NATIONAL GEOGRAPHIC : 「Are diamonds really 'forever」, <https://www.nationalgeographic.com/premium/article/diamond-engagement-rings-history-debeers-marketing>, 2024年8月13日現在
- 2) 長岡技術科学大学 結晶工学研究室 : 「ダイヤモンド結晶成長の様子」, [https://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~h-aida/?page\\_id=2748](https://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~h-aida/?page_id=2748), (2024年8月13日現在)
- 3) 小杉剛, 安藤豊, 海老塚香子 : 「ダイヤモンド工業協会主催 第1回ダイヤモンド/ CBN 砥粒基礎講座」, pp13, pp24, pp26, 2024.7.17
- 4) JIS B4130, 「ダイヤモンド/ CBN 工具ーダイヤモンド又はCBN 砥粒の粒度」

# 生活の身近にある鉱物 ～ベントナイト～

にいの まさあき\*  
新野 正明\*

Key Word

ベントナイト, モンモリロナイト, スメクタイト産地, 生産量, 特性, 用途

## はじめに

ベントナイトとは、図1に示すように海底に堆積した火山灰の続成変質作用、またはガラス質流紋岩の熱水変質作用によって生成した弱アルカリ性の粘土岩（図2）の名称であり、商業的には一般に微粉末として市販されている。モンモリロナイトを主成分鉱物とするベントナイトは、“A clay with thousand uses（千の用途を持つ粘土）”と従来から呼ばれ様々な用途に使用されている。副成分鉱物としては、石英、クリストバライト、長石、雲母、ゼオライト、方解石、ドロマイト、石膏、黄鉄鉱などを含んでいる。ベントナイトは、大別すると天然には2種類のタイプがあり、Naイオンに富み多量の水を吸収して高膨潤性を示すNa型ベントナイトと、CaイオンやMgイオンを多く含む膨潤性の低いCa型ベントナイトがある。また低膨潤性のCa型ベントナイトを炭酸ナトリウムで処理をして人工的にNa型に転換し高膨潤性とした活性化ベントナイトがある。

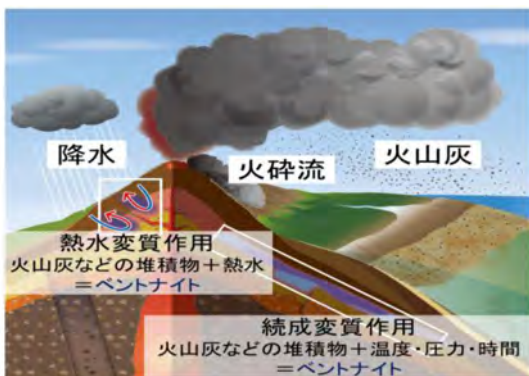


図1 ベントナイトの成因

1849年にアメリカのカリフォルニア州で金が発見されゴールドラッシュとなり、開拓者たちがベントナイトを“Mineral Soap（鉱物石鹸）”や“Soap Clay（石鹸粘土）”と呼んで洗濯に使い、またホロ馬車の車輪の潤滑として用いた。ベントナイトは、1888年にアメリカのワイオミング州ロック・クリークにおいて企業採掘されたのが最初とされており、1898年には採掘対象となっていた地質学上の地層名が、“Fort Benton Series”であったことから“Bentonite”と命名された。我が国のベントナイト鉱床は、新生代第三紀中新世（約2000万年前）の地層に分布しているが、アメリカのワイオミング州ベントナイト鉱床は、中生代後期白亜紀（約1億年前）の地層を起源としている。



図2 ベントナイト原鉱

ベントナイトが持つ特異な性質としては、膨潤性、増粘性、粘結性、潤滑性、チクソトロピー性、陽イオン交換性、吸着性、コロイド性など他の粘土が有しない極めてユニークな性質であるため、鋳物生型砂粘結材、土木工事材、建築基礎工事及び井戸・地熱ボーリング用泥水、農薬基剤、ペットリター（猫、小動物のトイレ砂）などに大量に用いられている。

\*クニミネ工業株式会社 研究開発部黒磯研究所 所長

また、Na型ベントナイトからその主成分鉱物であるモンモリロナイトを抽出し、製品化したものを“ソジウム・モンモリロナイト”として医薬品、化粧品及び水系塗料などの添加剤として使用されている。更には、ある種の有機化合物と化学反応して粘土-有機複合体を形成させたものを有機ベントナイトと呼び、有機液体中でも膨潤、分散して有機コロイド系を生成するので様々な有機液体系で用いられている。

## 2 モンモリロナイトの構造

モンモリロナイトの結晶構造は図3のように酸素原子4個で形成される正四面体の中心にシリコン原子が入ったSi-O四面体が底面の酸素原子を共有しながら2次元的に広がったSi-O四面体2枚の間に形成されるO-OH八面体シートの中心にAl原子またはMg原子が入った構造となっている。

四面体シート2枚と八面体シート1枚で形成されるため、2:1構造と呼ばれている。八面体の中心原子はAlを主とし、一部分がMgである。AlがMgの置換により結晶層は陽電荷が不足し、それを補うため結晶層の間(層間)にNa、Mg及びCaなどの陽イオンが存在する。層間の陽イオンは交換性があり、交換性陽イオンと呼ばれる<sup>1)</sup>。

モンモリロナイトの単位結晶は、厚さ約10Å、広がり0.1~1µmの極めて薄い薄片状であり、この単位結晶が図4のように数枚~十数枚程度積み重なって1個の鉱物粒子を形成している。図5は走査型透過電子顕微鏡でモンモリロナイトの原子の配列を観察したものであるが四面体の六員環が規則正しく構造を成していることが分かる。

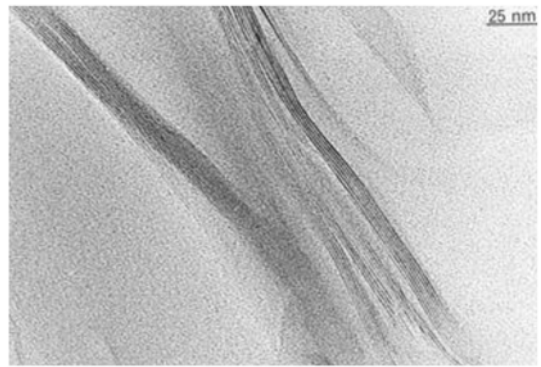


図4 積層したモンモリロナイトの透過型電子顕微鏡写真

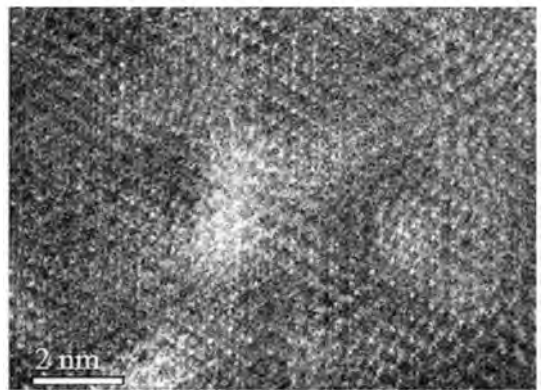


図5 モンモリロナイトの走査型透過電子顕微鏡写真(10,000,000倍)

また、モンモリロナイトはスプーン1杯程の量(約1g)で100~800m<sup>2</sup>の比表面積を持っており、この表面の高い極性と交換性陽イオンの水和のため、水を吸水し保持する力がある。モンモリロナイト1,000gの比表面積は千葉県浦安市にある東京ディズニーランドの面積に相当する。

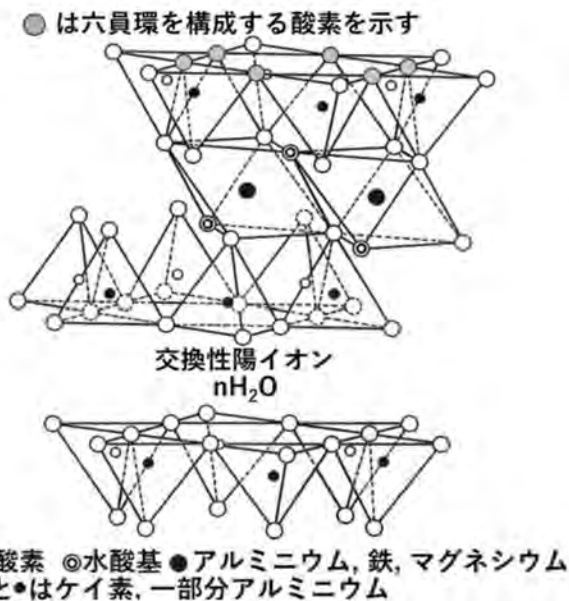


図3 モンモリロナイト構造<sup>2)</sup>

## 3 ベントナイトの産地及び生産量

日本国内においてベントナイト資源の自給率は高く、国内のベントナイト生産量は1995年頃の約60万トン/年をピークに減少傾向となり、2010年から2022年では25~30万トン/年となっているものの、鑄物、土木などの用途に大量に使用されている。尚、ベントナイトの国外からの輸入量は増加傾向にあり40~50万トン/年程度となっている。現在、我が国において工業的に稼働しているベントナイト鉱床としては、青森県黒石、山形県月布、宮城県川崎・土浮山、群馬県碓氷峠付近、新潟県三川、島根県大田・出雲、岡山県笠岡などに存在する。図7及び図8で鉱山、賦存状況を紹介する。

国外においては、アメリカは世界最大のベントナイト産出国であり、ワイオミング、モンタナ、南ダ

コター帯にNa型ベントナイトの広大な鉱床が存在する。その他、ヨーロッパにおいてはギリシャ、イタリア、イギリス、スペインなども大きな鉱床が存在しているが、ヨーロッパにはNa型ベントナイトは賦存せずCa型ベントナイトのみである。また、アルゼンチン、ブラジル、中国、ロシアなども大きな産出国である<sup>1)</sup>。

#### 4 ベントナイトの製造工程

ベントナイトの製造工程は、ベントナイト鉱石が有する組成や構造を保持させつつ、その特性値を経済的にかつ最大限に引き出すように配慮と工夫がなされている。製造プロセスとしては、粗砕、乾燥、粉碎及び分級に大別される。図9は国内のNa型ベントナイトの製造工程を示したものであるが、ベントナイト鉱石が粗砕から粉碎されるまでの時間は約120～180分である。粉碎工程では微粉末として製品化が行われ、図6のように数十ミクロン～百数十ミクロンの粉末とし、水分は10%前後に調整され紙袋やフレコンバッグに包装される。また、ベントナイトの随伴（夾雑）鉱物である粒度の粗い石英や長石が多く含まれる場合にモンモリロナイト含有量を増加させ品質を向上させる目的として粉碎・分級工程において一部を抜き出すことも行われる。



図6 製粉されたベントナイト



図7 坑内採掘のベントナイト賦存状況  
地下数十mに数十層が厚さ数十cm～数mの層としてベントナイトが賦存している。中間の層がベントナイトであり、上下の層は硬い頁岩層でベントナイトとは互層している。



図8 露天掘り採掘のベントナイト賦存状況  
地表面から数m程度の浅いところから数十mの深さまでベントナイトが堆積している。地表面から浅く賦存しているベントナイトはCa型ベントナイトが多く産出される。

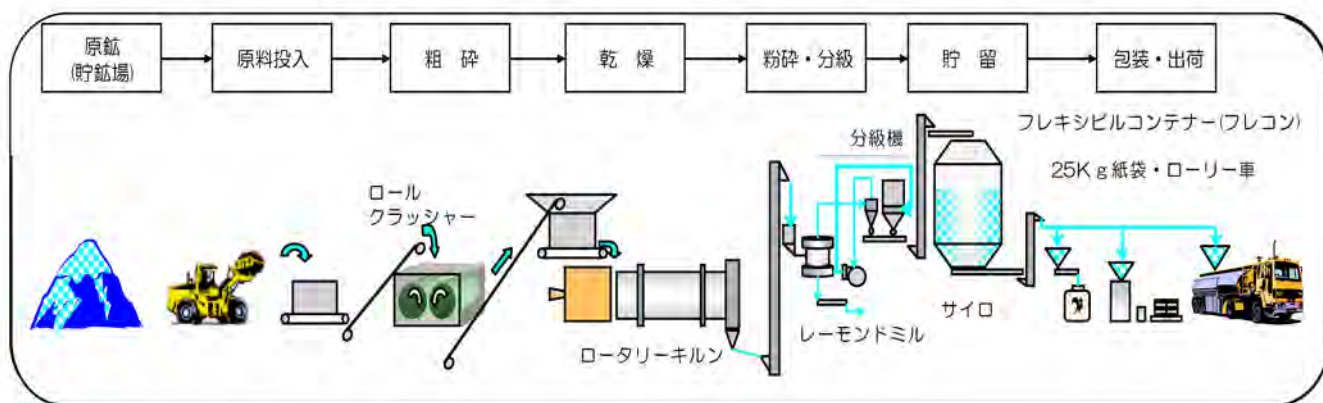


図9 ベントナイトの製造フロー

## 5 ベントナイトの種類と特性

ベントナイトは、Na型ベントナイト、Ca型ベントナイトおよびNa交換（活性化）ベントナイトに大別される。ベントナイトの分類法としては、交換性陽イオン組成による方法、膨潤性による方法、用途による方法などがあるが、交換性陽イオン組成による方法が基本となっている。これら3種のベントナイトの特性の違いについて表1に示す。

表1 ベントナイトの種類と特性

ベントナイトの種類	Na型ベントナイト	Na交換ベントナイト	Ca型ベントナイト
膨潤力(ml/2g)	15~30	15~35	5~8
pH(2%水分散液)	8.5~10.5	9.5~11.0	7.0~9.0
粒子の形状	薄く広がり大きい	厚く広がり小さい	厚く広がり小さい
粘度発現性	中~大	中~大	小
分散液のゲル化	小~中	大	小
懸濁安定性	大	中~大	小
止水性	大	中~大	中
粘結力	小~中	中~大	小
耐熱性	高	高	低
主な用途	土木掘削安定液 ボーリング泥水 鑄物砂粘結材 農薬基材	鑄物砂粘結材 猫のトイレ砂 土木掘削安定液	鑄物砂粘結材 猫のトイレ砂

## 6 ベントナイトの用途

ベントナイト、モンモリロナイト及びスメクタイトの用途には、図10のように土木・建築基礎工事掘削安定液、地熱・温泉・井戸ボーリング、ペトリター（猫のトイレ砂）、農薬粒剤、放射性廃棄物地層処分、土質遮水、土地改良、鑄物砂粘結材、洗濯柔軟剤、製鉄ペレット、医薬用、ハップ材などと

して多種多様である。

ここでは、土木・建築基礎工事・ボーリング関連、鑄物砂関連、ペトリター（猫のトイレ砂）関連及び放射性廃棄物地層処分について紹介する。

### 6.1 土木・建築基礎・ボーリング工事関連

ビルなどの建物の基礎を構築する、トンネルなどを掘削推進する、人工池や修景池などを造成する、温泉を掘るなど土木・建築基礎工事、ボーリングに多種多様なベントナイトが用いられている。ベントナイトの機能として掘削した地盤が崩壊しないように壁を保護する安定液（泥水）の材料としてベントナイトが使用されている。また、セメントと組み合わせ流体として使用する場合も多く、土木・建築工事で発生する隙間の充填材や地盤の強度を高めたり、地中に設置した芯材などを固定する目的に使用されている。近年は、環境関連分野でビオトープの造成や産業廃棄物処分場の遮水材料として用いられ、都市空間の有効利用やヒートアイランド対策を目的に、建築物の屋上や室内に庭園を設け、市民の憩いの場でも用いられている。また、農業分野では水田の漏水防止、若返りなどに多量に用いられている。図11.1及び図11.2はベントナイト安定液による崩壊防止実験の様子であるが、土木・建築基礎工事での地中に杭や連続壁を構築する際、ベントナイト安定液に求められる機能は掘削孔壁の崩壊防止が重要であり、崩壊防止には幅広い粒度分布を有するベントナイトは最適である。孔壁への目詰りと最終的に薄いシート状の主成分鉱物のモンモリロナイトが孔壁を被覆して「マッドケーキ（泥壁）」を形成し、その泥壁に安定液の水圧が作用して掘削孔内の壁面崩壊を防止する。尚、石油、地熱温泉ボーリング等

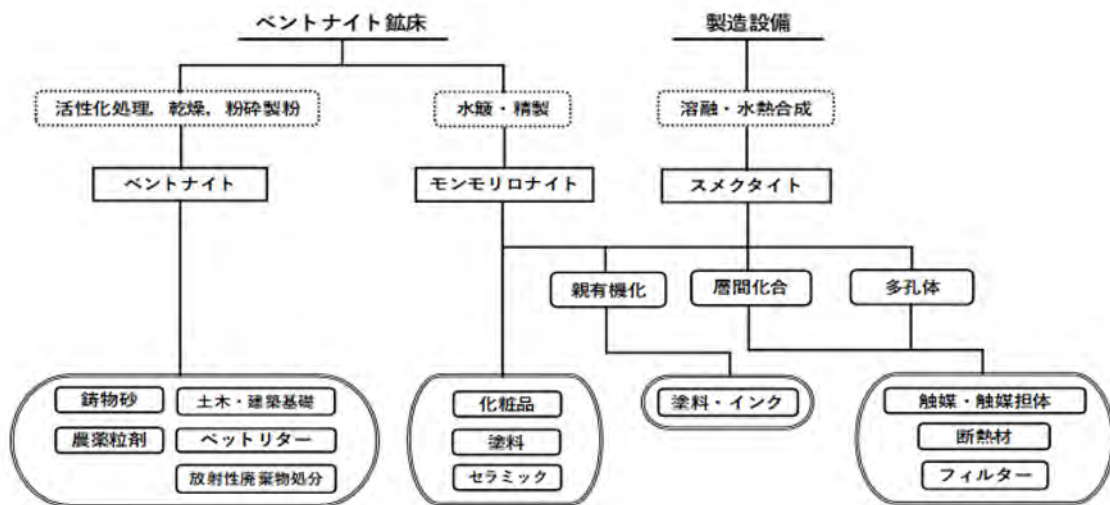


図10 ベントナイト、モンモリロナイト及びスメクタイトの製法及び用途

に求められる粘度や降伏値等は必要としない<sup>3)</sup>。

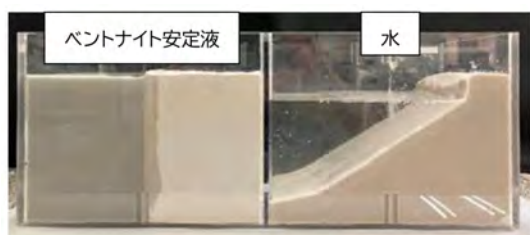


図 11.1 ベントナイト安定液の崩壊防止実験  
砂と水の場合は容易に砂に水が浸透し崩壊するが(右)、ベントナイト安定液と砂の場合は安定のわずかな砂への浸透で崩壊を防止できる(左)



図 11.2 ベントナイト安定液の崩壊防止実験  
ベントナイト安定液で砂の壁面が薄いシート状のベントナイトで安定化され崩壊を防止し自立する

## 6.2 鋳物生型砂関連

わが国でベントナイトの最大の需要があるのは生型砂粘結材であり、国内で生産される鋳鉄鋳物の65%は自動車用部品である。その他には、二輪車関係や建設機械、航空機などの部品に多く使用されており、また、産業機械のロボットアームなどがある。身近なものだとスキレットのような調理器具や、マンホールの蓋などが鋳物で作られている。

ベントナイトを生型砂粘結材に用いることはその特性を上手に利用しているものの、ベントナイトにとっては厳しい条件での使われ方である。湿潤状態、乾燥状態及び図12のように1,000℃以上の高温で溶解された鋳鉄との接触など様々な環境に晒されながら繰り返し使用されている。生型砂におけるベントナイトの役割は、骨材である珪砂を均質にコーティングし、水により膨潤したベントナイトのゲルの力で珪砂を粘結し鋳型を作製する。生型砂は、「混練→造型→注湯→型バラシ」というサイクルを何十回も循環して使用されるため、粘結材であるベントナイトに要求される役割も複雑で、混練に要するエネルギーや時間が少なく済むこと、高い湿態強度を発揮すること、適度な乾態強度を有すること、耐熱性が優れていることなどが求められる。



図 12 1500℃で出湯される溶湯(鋳鉄)

## 6.3 ペットリター(猫のトイレ砂)関連

1980年代後半からのペットブームや飼い方の変化などにより急速に猫のトイレ砂関連の市場が大きくなってきた。猫のトイレ砂には様々な種類があり、鉱物系では従来はゼオライトやセピオライトが主であったが、これらは脱臭効果があるものの、尿で汚れたトイレ砂の処理に手間が掛かり容易ではなかった。ベントナイトのトイレ砂は尿を吸収して固形化、無臭化しその塊を取り除くことにより尿で汚れた部分だけを選択的に処分することができる<sup>4)</sup>。図13にベントナイトのトイレ砂の形態と猫が尿をした後の固まり状態を示す。トイレ砂として用いられるベントナイトは、1～数mm程度の粒状であり、粒度や粒度分布が極めて重要である。粒状のトイレ砂の製造法には数種類あり、乾燥した原鉱をふるい分けにより調整した「破碎粒」、ベントナイト粉末に加水して混練し、押し出し造粒機で円柱状の粒子とした「押し出し造粒」及びベントナイト粉末に加水して転動型造粒機で球形状にした「転動造粒」がある。尿で固まった猫のトイレ砂は、可燃物や不燃物で廃棄処分することができる<sup>5)</sup>。



図 13 猫のトイレ砂と尿後の固まり状態  
左側は押し出し造粒(脱臭粒や抗菌粒なども含まれるものもある)、右側は破碎粒

## 6.4 放射性廃棄物処分関連

放射性廃棄物には何種類があるが、代表的な「低レベル放射性廃棄物」及び「高レベル放射性廃棄物」に大別される。

低レベル放射性廃棄物とは、原子力発電所の作業員が運転、定期点検などに使用した作業服や手袋、金属片、床の洗浄水など放射能レベルが低い廃棄物で、蒸発、灰化、圧縮などの減容処理を行った後にアスファルトやセメントなどと混合しドラム缶に収めて地下10～20m程度に設置したコンクリート構造物に収納され、その周囲を締め固めたベントナイト混合土で囲い水の浸透を防ぐような構造としている。

高レベル放射性廃棄物とは、使用済核燃料の再処理によって発生する廃棄物で放射能レベルが高く、発熱もある廃棄物である。

将来の人間に管理を委ねずに済むように、地下深くの安定した岩盤に閉じ込め、人間の生活環境から隔離して処分することが考えられており、現在考えられている処分方法としては地下300m以深に埋設する方法で深い地層が本来もつ性質を利用し、将来にわたって人間の生活環境に影響を与えないようにしている<sup>6)</sup>。

図14のように高レベル放射性廃棄物はガラス化してキャニスターという金属の容器に収め、さらにオーバーパックという金属容器に収めてその周囲を圧縮成形したベントナイトブロックで囲って地中に埋設される。ベントナイトに求められる機能は、止水性、自己修復性、吸着性、熱伝導性、化学的緩衝性、物理的緩衝性、長期安定性などである<sup>7)</sup>。表2にベントナイトに求められる機能を解説する。

表2 ベントナイトブロックに求められる機能

項目	機能
止水性	地下水が廃棄物に達するのを抑える
自己修復性	地震などによってベントナイトブロックに生じる亀裂を膨潤によって修復して止水性を回復する
吸着性	ベントナイトが持つ陽イオン交換能、コロイド吸着能により放射性物質を吸着する
熱伝導性	廃棄物から発生する熱を周囲の地盤に逃がす
化学的緩衝性	pHの調整や還元的雰囲気を維持する
物理的緩衝性	地震などによる変形を吸収する
長期安定性	1万年～100万年の超長期間維持する

## 7 おわりに

普段は猫のトイレ砂以外に多くの人には直接触れる機会や目に留まることのないベントナイトではあるものの、日々様々な分野で少量から大量まで使用されている。天然資源として重要な材料となるが有限な資源でもある。ベントナイトに携わる者として近年は3R（リデュース、リサイクル、リユース）をより意識した取り組みをしており、更には新たなニーズを生み出すことにも取り組んで参りたい。尚、本稿ではベントナイトを主に紹介したが、その機能を発揮している主成分鉱物であるモンモリロナイトの用途である化粧品、ガスバリア、触媒、塗料及びセラミック等の紹介は機会に恵まれた折には寄稿させて頂きたい。

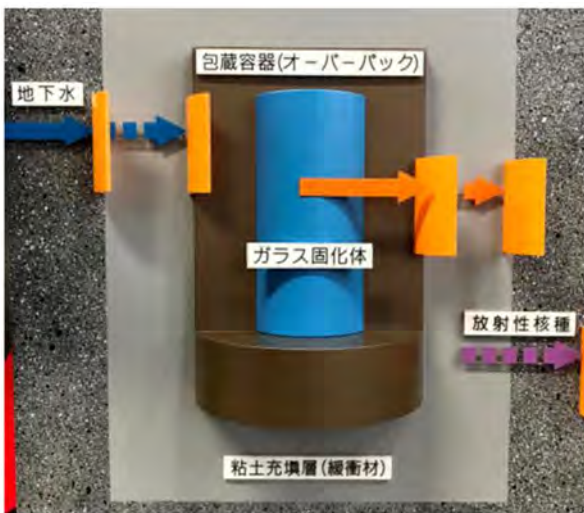


図14 多重バリアによる包蔵容器

### 〈参考文献〉

- 1) 長慈彦：「粘土ハンドブック（第三版）」，技報堂出版，pp.889-891,2009.4
- 2) 鈴木啓三，佐藤秀夫，新野正明：「ベントナイトの役割・種類・特性」，「基礎工」第22巻11号，pp.7-13,1994.11
- 3) 平岡成明：「地中連続壁の安定液」，山海堂，pp.27-33,1991.5
- 4) 鈴木啓三：「ベントナイトの用途とモンモリロナイトの特性」，「鑄造工学」第89巻第5号 pp.274-278,2017
- 5) 伊藤雅和：「ベントナイト利用の現状と新展開」，「粘土科学」第33巻第4号，pp.193-201,1994
- 6) 伊藤雅和，藤原愛，伊藤洋，大谷洋之，鈴木啓三：「土質工学会・日本粘土学会共催シンポジウム発表論文集」，pp.43-50,1991
- 7) D.G. ブルッキンス：「放射性廃棄物処分の基礎」，現代工学社，pp.260-275,1987.5

# 新鉱物の発見 〜有機鉱物・北海道石

たなか りょうじ\*  
田中 陵二\*

Key Word 新鉱物, 有機鉱物, 北海道石, カルパチア石

## 1 はじめに

鉱物種は、既存のもののみならず、年々研究により新種が見いだされ、日々その数は増加している。これは国際鉱物学連合を元締めとした承認制により新種の認定がなされ、その際に学名も命名・決定される。筆者らは最近、北海道より新鉱物に相当する特異な有機鉱物を見出し、hokkaidoite（北海道石）として承認を受けた。これを例として、新鉱物の発見・記載プロセスについて紹介する。

## 2 新鉱物の記載

鉱物は天然の地質学的作用により生じた均質組成を有する結晶性物質と定義される。すなわち、液体の自然水銀や非晶質のオパールなどの一部の例外を除けば

1. 定まった化学組成を有する
2. 固有の結晶構造を示す

の要件を満たす物質が鉱物であると置き換えてもよい。この要件から考えれば、無機・有機化合物の別はなく、有機物であっても純物質結晶なら鉱物として扱うことができる。鉱物種の命名は国際機関による承認制で、現在では国際鉱物学連合 (International Mineral Association: IMA) の、新鉱物命名・登録委員会 (Commission on New Minerals Nomenclature and Classification: CNMNC) がその業務を遂行している。2024年10月現在までに約6000種の鉱物種がIMAリストに登録されているが、世界中の研究者により続々と新しい鉱物種が見いだされ、増加の一途をたどっている。最近では分析機器の進歩もあり、この数年の実績では年間100種程度の新鉱物 (new mineral) が承認され、リストに追

加されている。

日本における実際の新鉱物承認プロセスは以下のようなものである。

1. IMAの新鉱物提案チェックリストに必要な項目を記述する
2. 日本鉱物科学会の新鉱物命名委員会にチェックリストを提出し、提案の妥当性についてチェックを受ける (一ヵ月)
3. 国際鉱物学連合の新鉱物命名・登録委員会にチェックリストを提出する。投票制であり、チェッカー20人の2/3以上の票が集まると、新鉱物としての承認および命名の承認が得られる (三ヵ月)
4. 新鉱物記載論文を2年以内に公表する。

項目1における必要な項目はすなわち、化学組成、結晶系、結晶学パラメータ (格子定数)、X線粉末回折の高強度ピークの $2\theta$ 、および硬度・屈折率などの物理的特性、産地および産状である。必須ではないが結晶構造解析データの提出が強く推奨される。単結晶X線結晶構造解析はこの20年でめざましい進歩を遂げ、きわめて微細な結晶から短時間で結晶構造を導けるようになったため、現在では結晶構造解析による新鉱物の結晶構造が同時に提出されることが多い。リートベルト解析による粉末回折パターンからの結晶構造でもよい。

我々が発見した新鉱物、北海道石の場合は有機鉱物の分子結晶であったため、低温 (100K) において回折実験のデータ収集を行い、熱振動による原子位置の揺らぎを抑えることとした。また、有機物では元素分析に難があり、特性X線を用いた無機化合物の元素組成定量を行うことができなかつた。そ

\*東海大学 客員教授 相模中央化学研究所 主任研究員



のため、比較的多量のサンプルを収集し、これを従来のCHN元素分析（秤量サンプルを燃焼させ、発生した二酸化炭素および水の量をもとに、有機物の元素組成を確定する方法）に供した。この分析法はかつては主に化学の論文において、新規な有機化合物を記載する際には必須の方法であったが、質量分析が発達した現在においては、精密質量による組成確定でも問題ないことになっている。鉱物学では有機化学の出番が少なく、サンプル量を必要とする古典的な分析手法によらざるを得ない。このあたりは、今後の有機鉱物学の発展によりある程度は解消できるものと期待している。

以下、北海道石を例にとり、その発見や新鉱物記載の流れを紹介する。

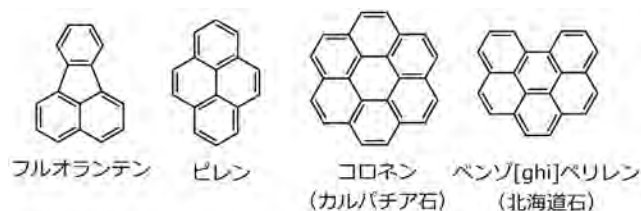
### 3 天然PAHとその産出

多環芳香族炭化水素（Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs）は、骨格全体に及ぶ $\pi$ 電子共役の効果により、高い熱的安定性と骨格独自の電子的性質を示し、天文学から材料科学に至るまで、さまざまな科学分野で注目される興味深い分子系である。ベンゼンやトルエンなどの単環の芳香族炭化水素は、化石燃料である原油に少量存在し、ナフサからも製造できる。また、芳香環が複数縮合したPAH類は、石炭からコークスを生成するときに副生するコールタールやその高沸点留分に著量含まれる。

しかし、高度縮合したPAH類の化学のスタートは、実は化石燃料起源ではない。これらは化学史上、水銀製錬の副産物として見つかった。水銀鉱の製錬は乾式焙焼で、焙焼ガスを冷却すると液体水銀が得られるが、この際に乾式製錬釜の出口付近に蛍光性の固体物質が凝華してくることがある。これは古くより「イドリアリン」とか「スタップファット」と呼ばれていたが、これが有機化合物であることが1800年代末に報告され<sup>1)</sup>、後にピレンやフルオランテンのようなPAH類であることが明らかとなった。しかし、PAH類がなぜ水銀製錬で生じるのかは、まったくわかっていなかった。

1955年、現在のウクライナの最西部、ルーミアニア県境に近いザカルパートの水銀鉱山から、黄色～オレンジ色の奇妙な鉱物が見つかった。これは、なんとコロネンの天然結晶で、産地名から「カルパチア石」と名づけられた<sup>2)</sup>。その後、極東ロシアやスロバキアの水銀鉱床からも相次いで発見された。この鉱物のもっとも立派な標本は、米国カリフォルニアの水銀鉱山から産したものだ。カリフォルニアの

カルパチア石は最大で5cm程のほぼ純粋なコロネン結晶で、紫外線照射でネオンブルーに強く蛍光する<sup>3)</sup>。しかし、コロネンのようなPAHが、結晶性純物質としてなぜ水銀鉱床に産するのか、その説明はなかなか付かなかった<sup>4)</sup>。コロネンの生成に水銀の関与が疑われたこともあったが、それに対し決定打となる情報はなかった。このように、カルパチア石は謎深き鉱物であるのは間違いなかった。



Chart

### 4 日本新産のカルパチア石と新鉱物

2022年の正月過ぎに、石の仲間からメッセージが届いた。北海道の愛別町の鉱山跡で見つけた鉱物が、粉末回折実験の結果カルパチア石である、ということであった。北海道でのカルパチア石の産出には少なからず筆者も驚いたが、正直なところ有機鉱物の同定は難しく、半信半疑であった。取り急ぎ件の石を送ってもらい、有機化学的な機器分析を行った。その標本は、熱水性の石英-辰砂（硫化水銀）鉱の一部の空隙に、強蛍光性の小さな粒がまばらに付くもので、粒の大きさは大部分は0.5mmもない。これを丁寧に削り出して、クロロホルムやテトラヒドロフランのような有機溶剤に溶かしてみると、実によく溶け、溶液が強蛍光性になった。この溶液を逆相の高速液体クロマトグラフィー（HPLC）で分析してみたところ、ピークの保持時間は試薬のコロネンのそれと完全に一致し、確かにコロネンであった。カルパチア石は国内で初めて見いだされたPAH系有機鉱物である（有機鉱物としては、シュウ酸塩鉱物が知られていたもので、国内初ではない）。興味深いのは、拾う粒によっては保持時間がコロネンより明らかに小さい別の有機物が含まれていることであった。これの0.1mmほどの単結晶を拾い出し、最新の半導体検出器型単結晶X線回折計で数日かけてデータ収集し結晶構造を解いてみると、得られた構造はコロネンより環数のひとつ少ないベンゾ[ghi]ペリレンであり、どうやら新鉱物が含まれているらしいことがわかった。これは、黄色透明の板状結晶で、コロネン（カルパチア石）のレモン黄色の針状結晶とはだいぶ結晶形態が異なる。しか

し、新鉱物の記載は国際鉱物学連合による認証制で、結晶構造解析のみでは成立しない。特に、組成決定のための元素分析データ、この場合は有機物であるので燃焼式 CHN 元素分析の結果を得るには、この試料ではまったく量が足らず、ひどく困ってしまった。燃焼式元素分析は、腕の立つオペレーターでも 1mg、普通は 5mg 以上のサンプル量を必要とする。この問題は、再調査でかき集めても解消されなかった。無機物なら軽元素を除けばごく微量のサンプルでも元素定量は可能である。有機鉱物がゆえの苦勞であろう。

しばらくこの問題に悩み、この新鉱物の記載の進退を考えていたとき、ふと別の産地の鉱物のことを思い出した。愛別町から 100km ほど離れた鹿追町然別の山中で、最近、紫外線照射により強く発光するオパール（非晶質二酸化ケイ素）の産出が知られていた。この発光性オパールはすでに産総研のグループにより微量金属分析の結果が報告されていたが、蛍光の起源となりやすいランタノイドやウランといった金属元素はほぼ含まれていないとのことであった。試しにこのオパールを破碎し有機溶剤で抽出後に HPLC で分析したところ、蛍光成分は先の新鉱物候補と同一のベンゾ [ghi] ペリレンであることがわかり、その偶然に驚愕しつつもあわてて北海道に調査に赴いた。

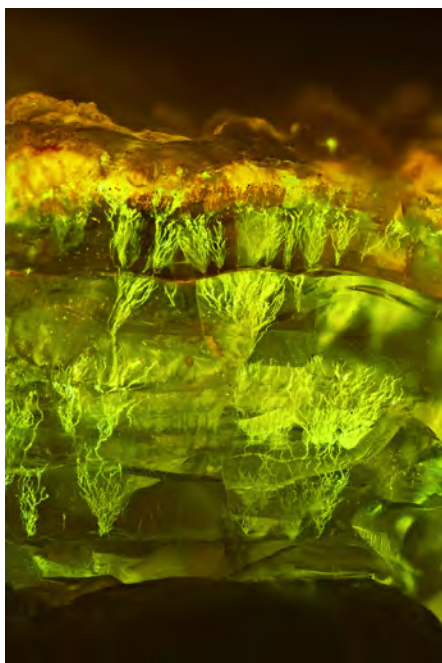


写真1 然別産の北海道石。オパール中に北海道石の樹枝状結晶が包有されている。この構造は、オパールの沈殿化に競合して北海道石結晶が育ったためと予想される。紫外線を照射して撮影。上下 7mm



写真2 愛別水銀鉱山産北海道石。変質した安山岩の空隙に育った自形結晶。結晶サイズ 2.8mm

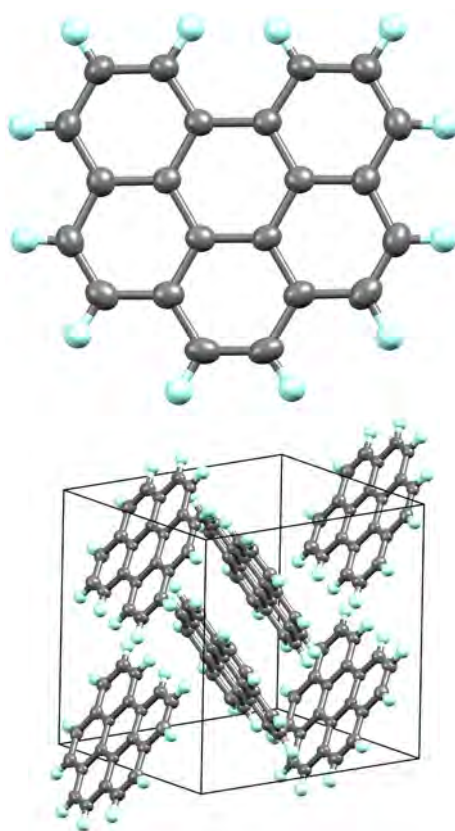


図1 北海道石の結晶構造。有機化合物の分子結晶であり、分子間はファンデルワールス力により相互作用している

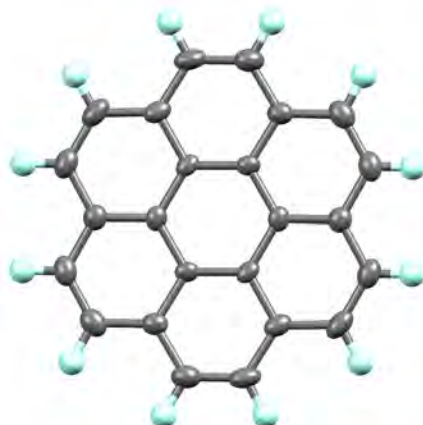


図2 愛別産カルパチア石の分子構造

## 5 然別の光るオパール

然別のオパールは、新生代第四紀の南ペトウトル火山中腹にかつて湧出していた古温泉に由来するもので、温泉が沈澱させた地表生成性の粗鬆な珪華（シリカシンター）の層に、比較的緻密な蛍光性オパールが、層理に調和した脈として多数貫入している。一部には、地表生成性の蛍光オパールも見られる。このオパールは可視光では半透明白色～オレンジ色だが、長波紫外線を照射すると、青、黄色、黄緑色、オレンジ色など、色とりどりに発光する。これはオパール中に少量含まれる有機物による蛍光で、多彩な蛍光色は脈の部位によってその存在形態や有機物組成がかなり異なっていることを示している。この有機物は分析の結果、30種ほどの分子量150-400の範囲の有機化合物群で、その大部分は母骨格のPAHであることがわかった。それらのうち、もっとも多量に包有されるのはベンゾ [ghi] ペリレン、次いでコロネンで、これらは結晶相としてそれぞれ別々にオパールに包有されており、紫外線照射では黄色～黄緑色蛍光を示す。オレンジ色の蛍光は種々のPAH分子混合物が非晶質微粒子（ビチューメン）としてオパールに分散したものである。これらのことから、然別のオパールは、PAHを多量に溶存した高温高压の熱水から、地表近くでの温度・圧力低下に伴って有機物が分別結晶化して析出・沈澱したものであると予想される。産地をくまなく回ると、多孔質のシリカシンターに新鉱物候補の半自形結晶が多数分散しているところがあり、これが新鉱物記載の決め手となった。

然別のオパール産地は、延長200メートル程の範囲に蛍光性オパールが分布しており、かなり規模が大きい。夜間まで現場に残り、暗闇の中で紫外線ライトを周囲に当てると、露頭や沢の転石が色とりどりに発光し、壮観である。この現場は2023年9月に、「然別火山群のオパール産地」という名称で、町指定文化財（天然記念物）に指定された。

然別では、記載に必要な分析をするに足る十分なサンプル量を確保することができ、天然のベンゾ [ghi] ペリレン結晶は、晴れて新鉱物「北海道石 (hokkaidoite)」として国際鉱物学連合から承認された。なお、hokkaidoite は、英語での「道産子」の意味もある。この新鉱物名称は道民に熱烈歓迎された。新鉱物の命名では、記載者の名前、研究機関・組織名は原則として付けることができない。好ましいのは、産地地名、化学的特徴や外観に基づくもの、鉱物学や地質学に貢献した研究者の名前などをもとにした名称である。「北海道」の名前はいささか産地としては広すぎる感もあるが、北海道では化石燃

料産業が古くより盛んであり、火山フロントとして大小の火山が存在する。そういった地質学的特徴をうまく反映した新鉱物であるという含みはあった。



写真3 然別の沢の河床に紫外線を当てたところ。河床部は幅3mほどのオパールの盤になっている。黄色い発光部分は有機鉱物を多く含むところ。オレンジ色はビチューメンを多く含むところ。

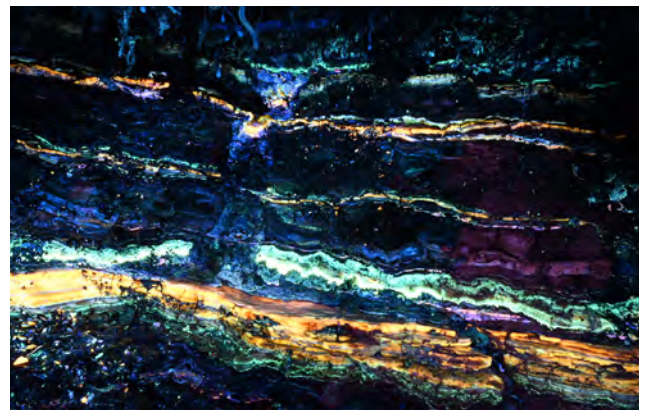
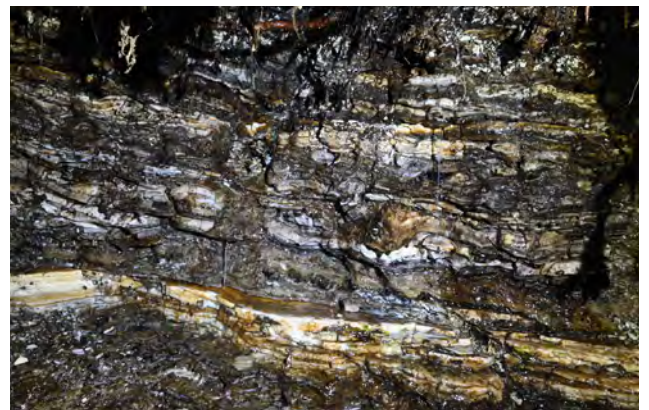


写真4 然別のオパール露頭に紫外線を当てたところ。可視光下と紫外線照射下。幅60cm

## 6 北海道石と有機地球化学

コロネンは代表的なPAHであると同時に、有機地球化学においては最重要な化学種である。コロネンは生物起源有機化合物の高温下での乾式燃焼によ

り生じやすい。これは、例えば森林の大規模な火災イベントなどにより生成し蒸発して、ブルームに乗り飛散し大気中に拡散する。コロネンは冷水に対する溶解度が極端に低く化学的にも安定なため、その層準の地層中に痕跡量ながらも半永久的に存在することができる。また、土星の衛星タイタンなど地球外天体にも存在し、天体化学においても注目すべき化学種でもある。このコロネンの遍在性は、その極端な耐熱性・熱力学的安定性に起因している。同炭素数の有機物中では、もっとも安定なものと考えてよい。コロネンの存在は、高い熱作用を受けた有機物の証とされる。

然別オパール中の有機物の起源は、火山山体基盤岩である付加体堆積岩中の生物起源有機物であることが、炭素 13 同位体分析の結果から推測される。おそらく、地下深部の植物化石（ケロジェン）が、火成作用、特に水を多く含むマグマの岩漿水により極端に高温条件下で湿式に熱熟成され、そのうち特に熱・熱水作用に最も安定で、高温高压で熱水に溶解する低分子量 PAH 類のみが生成し、これが熱水を媒体として地表に輸送されたものと予想される（これは、水銀鉱床の生成条件によく似ている）。こういった、続成・火成作用による生物起源有機物の熱熟成は、古くより石炭・石油化学の分野で多く研究されてきた。また、廃棄物としての有機汚泥の熱水変質による改質化・資源化の研究も多く進められている。近年では、バイオマーカーと呼ばれる多環式脂肪族炭化水素が、分子化石として、その分子を与えた生物の分類や熱熟成の程度を推測する上で重要である。しかし、バイオマーカーからコロネンまでの中間に不明領域があり、コロネン分子がどんな前駆体から、どういう機構で生成するのか、といった詳細な情報はほとんどなかった<sup>5)</sup>。北海道石の生成の条件・環境は、コロネンの前駆体としてのベンゾ [ghi] ペリレンの存在と、PAH 分子の構築反応が（従来の想像より）かなりシンプルであることを示している。然別のピチューメンの分析を進めてわかったのは、含まれる大部分の有機分子が偶数炭素数の母骨格 PAH で、その骨格にはメチル基等の置換基やベンジル炭素、五員環構造をあまり含んでいない。この分子の構築経路の解明は簡単ではないものの、フィッシャー・トロプシュ反応のような炭素数 1 を鍵とした増炭反応ではなく、アセチレンやエチレンなどの偶数炭素分子のディールス・アルダー付加やラジカルの環化による増環反応により、比較的選択的に骨格拡大しているものと考えられる。現在、理論計算による裏付けを含め、この分子構築メカニズムの解析を進めている。

北海道石はおそらくそれほどまれな有機鉱物ではない。にもかかわらず、これが今まで世界中で見逃されてきた要因は、コロネンよりもわずかに熱熟成が低い領域で生じるという生成条件の狭さもあるが、それよりも地質学・鉱物学の分野で、有機分析の手法論が十分に浸透していないことが大きいのだろう。熱水起源のシリカ脈に有機物が結晶化して含まれているという現象は調査現場ではなかなか思いつかず、しかもそう思い至っても PAH 系分子の分離や分析は、クロマトグラフィーを主とする有機分析を必要とするため、分析のハードルが高い。有機物が熱水と共に輸送され浅部で析出する地質現象は、筆者の調べたところ、有機物含有量の差こそあれ日本・世界各地で普遍的に起こっているようだ。水を媒介として、常温常圧下では水に溶けづらい PAH 類が生成、純化するという現象も、有機化学の常識からは外れている。北海道石発見の意義はそのようなところにもあるのだろう。

## 謝辞

- 北海道石研究グループ：石橋 隆（地球科学社会教育機構）、井上裕貴（九州大学大学院理学府）、萩原昭人（日本地学研究会）、長田裕也（北海道大学 化学反応創成研究拠点）
- 有機鉱物類の構造決定では、東京大学統合分子構造解析拠点「FS CREATION」の皆様にご協力いただきました。佐藤宗太（東京大学特任教授・分子科学研究所）、青野佑亮、川上和宏（株式会社島津製作所）、小木曾直人（日本電子株式会社）、菊池 貴（株式会社 リガク）
- 本記事中の鹿追町然別の調査は、環境省の許可（環北大国許第 2205123 号）に基づいて行われたものです。一帯は、大雪山国立公園内かつ保安林であるため、無許可の立ち入りはできません。現在、オパール産地は町指定文化財として登録され、文化財保護法による保護を受けています。

## 〈参考文献〉

- 1) G. Goldschmidt, J. Chem. Soc. 36, 167 (1879) .
- 2) G. L. Piotrovskii, Min. Sbornik (Lvov) , 9, 120-127 (1955) .
- 3) J. Murdoch, T. A. Geissman, Am. Min., 52, 11-16 (1967) .
- 4) T. Echigo et al., Am. Min., 92, 1262-1269 (2007) .
- 5) M. Blumer, Chem. Geol., 16, 245-256 (1975) .

## 鉱物の魅力

もんま こういち\*  
門馬 綱一\*

Key Word

晶洞, 自形結晶, 巨晶, 熱水, ペグマタイト, マグマ, 変成岩, 宝石

### 1 はじめに

地球の内部構造は、外側から、地殻、上部マントル、マントル遷移層、下部マントル、外核、内核に大別でき、このうち熔融金属からなる外核を除いては基本的に固体、すなわち鉱物の集合体である。体積比にすると地球の約85%が鉱物と言え、とても身近な存在である。しかし日常生活においては、石を目にする機会は多くとも、そこに含まれる鉱物が意識されることは少ないかもしれない。なぜなら、資源としての鉱物の多くは分布が偏っているし、結晶本来の形を示す肉眼的サイズの鉱物も、局所的な条件下でしか生成しないので、意識的に探さないとそうした鉱物と遭遇できないためである。本稿では、そうした身近なようで馴染みのない鉱物の魅力を、筆者がこれまでに訪れた産地の話題を交えながら、産状別に紹介したい。

### 2 結晶の源、熱水

岩石の成因は、火成作用、変成作用、堆積作用に大別できるが、鉱物の成因を考える上では、堆積作用に代えて熱水作用を挙げた方が良いかもしれない。鉱物が生まれるためには、その構成原子が一旦バラバラになって再配列しなければならないが、碎屑物の堆積という狭義の堆積作用ではそのようなことは起きない。堆積岩中で鉱物が生まれる場面としては化学的堆積作用や続成作用があるものの、それらは水を介した元素の溶解と析出であるから、母岩が堆積岩であっても、厳密には堆積作用というよりは低温熱水作用の延長と言えると思う。火成作用や変成作用に由来する鉱床でも、例えば深成岩中に胚胎する斑岩型銅鉱床や、石灰質岩の接触変成により

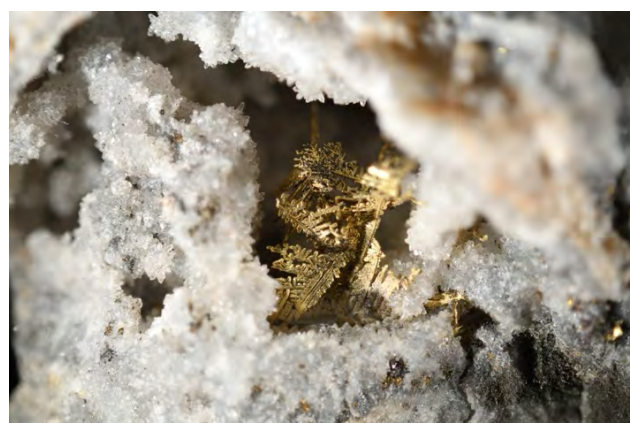


図1 石英の晶洞中に生じた自然金の樹形結晶。大分県馬上鉱山産。左右2.2cm

形成するスカルン鉱床のように、熱水の介在が元素の移動や濃集に欠かせない役割を果たしている場合が少なくない。

熱水は原子をバラバラに溶かし込む溶媒の役割だけでなく、地下の広範囲を循環すると、岩石中に僅かしか含まれない成分を溶かし込み、特定の場所に鉱物として析出させることで元素を濃縮する機能も果たす。鉱脈型鉱床はそのような作用で熱水の通り道に形成された鉱床である。金銀鉱床をはじめ、日本にはこのタイプの鉱床が数多く存在した。例えば、地殻中の金の元素存在度（質量比）は数億分の1程度に過ぎないが、一般的な金鉱山では平均品位数ppm程度と、1000倍くらいに濃集している。通常の金鉱石では、肉眼で見えないほど細かなエレクトラム（金と銀の合金）の粒が石英脈中に点在し、「銀黒」と呼ばれるが、品位が上がるに従って金の粒が肉眼的に視認できるようになる（図1）。世界屈指の金品位を誇る菱刈鉱山では、最高品位の鉱脈で部

\*国立科学博物館

分的に金品位が3割、銀品位が1.5割を超えていたというから、驚くべき濃縮具合である。その鉱石を手を取らせてもらったことがあるが、切断面は金色に輝き、ずっしりと重たかった。

鉱脈の空隙には、さまざまな鉱石鉱物や脈石鉱物の自形結晶も見られる。小さな空隙ならどの鉱脈でも見つかるし、現役の鉱山では時に数メートルから数十メートルもある空隙が見つかることもある。筆者は以前、ロシア極東の、ウラジオストクから北東へ300kmほど行った場所にあるダルネゴルスクという小さな町で、そのような光景に遭遇したことがある。ダルネゴルスクには大規模な露天掘りのホウ素鉱床のほか、銀、鉛、亜鉛などの多金属鉱床を坑道掘りする鉱山がいくつか点在し、鉱床タイプとしては岐阜県の神岡鉱山と似る。それらの鉱山の一つで坑道内を見学させてもらった際、坑道の側面から天井に向かって空洞が伸びている部分があり、登ってみると、壁の内壁一面が拳大くらいの方解石と螢石の結晶で埋め尽くされていた(図2)。方解石には白く光沢のある結晶と、表面がザラザラで薄汚れた結晶の2種類があり、両者では結晶の形も異なっていた。また、ザラザラの結晶は別の形の方解石結晶の表面に再成長したようにも見え、複数回の結晶成長ステージがあったこと、つまり熱水溶液の供給



図2 壁一面が螢石と方解石の結晶で埋め尽くされた熱水脈中の空洞。ロシア、ダルネゴルスク

が複数回あったことがわかる。塊状の鉱脈部分も、かつては岩の表面に同様の結晶が輝いていたはずであるが、空隙が鉱物で埋め尽くされた結果、結晶の形が見えなくなったのである。

熱水脈の空隙に生じた結晶として世界最大のものは、メキシコ、チワワ州北部のナイカ鉱山の地下で見つかった石膏の巨晶である。結晶洞窟(Cave of crystals)と名付けられた、長径109m、幅12mほどの空間の内部に、太さ1m、長さ11mにも達する巨大な柱状結晶が林立する光景は圧巻である。結晶がこれほどまで大きく育った理由は、平衡濃度に限りなく近い熱水溶液が10万~100万年という長年にわたって存在したためと見積られている。熱水への石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )と硬石膏( $\text{CaSO}_4$ )の溶解度は温度によって逆転し、54.5℃以上では硬石膏が、それ以下では石膏が安定相として晶出する。結晶洞窟では地温勾配によって、この平衡温度よりわずかに低い温度の熱水で満たされており、平衡濃度に非常に近い条件下で、周囲の岩石に含まれる硬石膏が溶解、石膏として晶出する反応が長年持続したことが、巨大結晶誕生のポイントである<sup>1)</sup>。

結晶で満たされた巨大な晶洞といえば、インド、デカン高原の沸石類と、南米、パラナ洪水玄武岩中の紫水晶も必見である(図3)。それらは洪水玄武岩中の空洞の内壁全面を結晶が覆い尽くしたもので、大きな晶洞は人が中に入れるほどのサイズがある。洪水玄武岩とは大量のマグマが広大な大地を覆い尽くすほどの超巨大噴火で、その面積は日本の国土より広い数十万~数百万 $\text{km}^2$ 、噴火の期間は100万年オーダー、複数の噴火口から間欠的に噴出したマグマの層厚はデカン高原で最大2km、パラナ洪水玄武岩で1.5kmほどに及ぶ。地球史の中で、同様の超巨大噴火は何度か起きているが、なぜかインドと南米の洪水玄武岩だけが巨大な晶洞を伴う。また、デカン高原では沸石とその近縁鉱物、方解石などが晶洞中の主な鉱物であるが、パラナ洪水玄武岩ではシリカ鉱物がメインで、方解石、石膏、硬石膏なども伴うが沸石の大型結晶は産出しない。それら晶洞中の鉱物はマグマから直接結晶化したのではなく、マグマの固化後に熱水と反応して生成したもので、その温度はパラナ洪水玄武岩ではおおよそ100℃以下である。結晶の成長にかかった具体的な時間は未だ不明であるが、低温熱水へのシリカ成分の溶解度は低いため、巨視的な紫水晶の結晶ができるには、非常に長い地質学的時間が必要だったことであろう。

その他にも、熱水の作用で生成する鉱物は、金属鉱床の酸化帯に生じる色とりどりの2次鉱物、



図3 ウルグアイ産の巨大な紫水晶ジオード（左）と、ブラジルでのジオード採掘の様子（右）

蒸発岩由来の岩塩や炭酸塩、硫酸塩、ホウ酸塩鉱物、火成岩や堆積岩中のオパール等々、枚挙にいとまがない。

### 3 宝石の宝庫 ペグマタイト

特殊な岩石中に生じる魅力的な鉱物といえば、ペグマタイト中の鉱物も挙げられる。ペグマタイトとは、非常に粗粒で特殊な深成岩の一種で、はんれい岩や閃緑岩にも見られるが、花崗岩質のものが多いため巨晶花崗岩とも呼ばれる。マグマが冷え固まる際には、岩石中に入りやすい成分とマグマ中に残りやすい成分があり、後者である揮発性成分などはマグマ中に残され濃度が徐々に上がる。そして、そのようなマグマが最後の最後に固まった部分がペグマタイトである。マグマ中の主要揮発性分である水の含有量が上がるに従って、マグマの粘性が下がり、元素の拡散速度が上がるので、結晶核の形成頻度に比べて成長速度が速まり、結果として、大きなものでは数mもある巨晶が生じる。

マグマ中に濃集する成分としては水や二酸化炭素、ハロゲン元素などの揮発性成分の他に、リチウム、ベリリウム、ホウ素、希土類元素、ウラン、トリウムなどの、元素存在度が低い元素もあり、ペグマタイトは、それらを主成分とする稀産鉱物の宝庫である。また、トパーズ、アクアマリン、ガーネット、トルマリン、リチア輝石(クンツァイト)、石英(水晶)などの宝石鉱物も産出し、特に晶洞部分には魅力的な鉱物の自形結晶が見られる。日本国内のペグマタイトとしては滋賀県、岐阜県、福島県のもの特に有名で、明治時代の一時期、日本はトパーズの産出国として海外で名を馳せた。ただ、島国である日本のペグマタイトは規模が小さく、それに比べ大陸では花崗岩体の規模が大きいため、付随するペグマタイトも規模が大きい。筆者が訪れたことのあるナミ

ビアやブラジルでは、粒径が数mもある石英や長石からなる脈状のペグマタイト中に、1mを超えるペタル石(リチウム鉱物)や鉄電気石の巨晶が多産する様子や、10mはあろうかという巨大な晶洞中に水晶が林立している光景などを目撃した(図4)。

ペグマタイトの体積は、その成因から必然的に、どれほど巨大なものでも、元となったマグマの総量に比べれば微々たるものであり、極めて局所的な存在である。その中でも晶洞はさらに局所的で、物理探査も困難であるため、晶洞中の宝石鉱物を目的とした採掘では、多くの場合、勘と経験を頼りに掘り進めるしかない。ナミビアのエロンゴ山(標高2350m)は正にそのような現場であった。山の中腹より上には無数の晶洞性ペグマタイトが点在しており、多くの地元鉱夫が食糧を持って山に登り、水は現地で雨水を調達し、岩陰でキャンプ生活を送りながら、採掘を続けていた。彼らは晶洞中に産出するアクアマリンなどを求めて、ザイルで急斜面の岩場に張り付き、ハンマーとタガネを手に、わずかな岩の間隙やペグマタイトの細脈を辿って、手掘りで大地と格闘するのだった。



図4 ブラジル ミナスジェライス州のペグマタイト鉱山中の巨大な晶洞。右奥に映る筆者の足元には最大1mほどの水晶が林立している。

#### 4 マグマ中の鉱物

前項のペグマタイトもマグマからの結晶化ではあるが、冷却の最後期は相対的に水の影響が強くなり、マグマというより熱水に近づくため、より一般的なマグマから生じる鉱物も紹介しよう。マグマ中に浮かんで成長する鉱物は、最も身近に見られる自形結晶の鉱物であろう。火山岩の斑晶として(図5)、あるいは結晶弾(火山弾の一種で斑晶がマグマとともに火口から噴出するもの)として、長石、輝石、角閃石、石英などの造岩鉱物の自形結晶が多産する。微細なものなら、火山灰を拡大して観察すれば、無数の自形結晶が見つかる。宝石鉱物のダイヤモンド、かんらん石、サファイア、ジルコン、ムーンストーンなどもマグマから結晶化する。特殊なマグマとしては、マントルから地表までダイヤモンドを運ぶキンバーライトマグマや、ケイ酸塩メルトではなく炭酸塩メルトを主体とするカーボナタイトマグマ、さらには硫黄単体が溶けた溶融硫黄のマグマや、溶融磁鉄鉱からなるマグマなども存在する。こうした特殊なマグマの成因は未だ未解明の部分が多い。

#### 5 変成岩中の鉱物

最後に変成岩に伴う鉱物についても少しだけ紹介したい。プレートテクトニクスに伴い生成する広域変成岩、マグマによる熱変成を受けて生じる接触変成岩のどちらからも魅力的な鉱物が産出し、例えばルビー、サファイア、エメラルド、ひすい、ラピスラズリ、スピネル、ガーネットなどの宝石鉱物が挙げられる。岩石の経験した温度圧力は代表的な変成鉱物の種類、たとえば緑簾石、紅柱石、藍晶石、珪線石、十字石、藍閃石などを指標に推定できる一方、アルミニウムに富むラテライト質変成岩や、層状マンガニ床のように、原岩の違いによっても産出鉱物が全く変化するため、その多様性が実に面白い。



図5 屋久島花崗岩中の正長石の巨大斑晶



図6 形の整った銅の2次鉱物、ダイオプテーズの結晶。1cmを超える結晶も少なくないが、これはわずか1mmほどの微細結晶。カザフスタン産

#### 6 おわりに

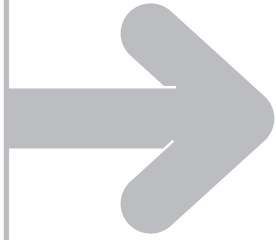
本稿では鉱物の魅力をわかりやすく紹介するため、大きく美しい鉱物を中心に紹介したが、結晶の形は基本的に大きさによらず相似形であるため、小さな鉱物を拡大して観察すれば、大きな鉱物と同じか、それ以上に美しい世界が目の前に広がることであろう。大きくて傷のない結晶はほとんどないが、小さな結晶なら数が多いため美しい結晶も見つけやすい(図6)。その精緻な造形を生み出す自然の妙に、きっと感心すると思う。

熱水、マグマ、プレートテクトニクス、風化侵食と水性堆積物の固結、変成・溶解による岩石の循環、などなど、鉱物を生み出す地質イベントは冷却の進んだ「死んだ惑星」には存在せず、地球内部が活動的であるが故の地質現象である。鉱物はそれら「地球の息吹」を伝える「地球からの手紙」なのである。鉱物の種数は2024年現在、約6000種であるが、同一種類の鉱物でも、多様な生成条件を反映して色や形状は変化し、さまざまな外観を示す。それら多様な鉱物によって綴られた「手紙」を解読することも、鉱物を知る醍醐味である。

#### 〈参考文献〉

- 1) F. Otálora, J. García-Ruiz: 「Nucleation and growth of the Naica giant gypsum crystals」, Chemical Society Reviews 43, pp. 2013–2026, (2014)





# これからの資源供給

わたなべ やすし  
渡辺 寧\*

**K**  
ey Word

カーボンニュートラル, レアメタル, ベースメタル, 副産物,  
リサイクル, 日本, 資源循環社会

## 1. はじめに

戦後、国内外の鉱物資源の生産は様々な変遷をたどってきた。国内の金属の生産は、戦後の復興とともに1970年にかけて増加した。しかし1973年の円・ドルの為替完全自由化により、海外の資源を安く輸入できるようになり、80年代半ばにかけて国内金属資源の生産量は漸減、90年代にはほとんどの国内鉱山が閉山し、金属生産量は急激に減少した。金属鉱業事業団が実施していた国内探鉱も2006年度までに廃止され、日本企業は海外での探鉱に集中することとなった。

世界では1970年代半ばから2000年にかけて、金属の生産量は緩やかに増加した。この間、日本では金属資源は海外から潤沢に輸入することができ、もはや資源の研究の重要性はないとして、多くの大学や研究機関では、資源学科や資源部門が廃止され、環境研究へとシフトしていった。

ところが2000年以降、中国を中心とする新興国での経済発展に伴い、ベースメタルを中心として金属の需要が急速に高まり、その傾向は現在も続いている(図1)。特に中国の経済発展は目覚ましく、中国は世界の半分以上の金属資源を生産・消費するまでになっている。

同時に2000年前後に様々な新しい電子機器やハイブリッド自動車が生産されるようになり、これまであまり使用されなかった多種多様のレアメタルの需要が高まった。2015年の国連気候変動枠組み条約締約国会議(COP21)(パリ協定)で温室効果ガス削減に関する世界的な取り決めが示され、温暖化防止のために、各国は自然エネルギーの活用や自動車の電動化に取り組み始めた。自動車の電動化に必要な磁石や電池に使用される資源の需

要も急速に高まっている。

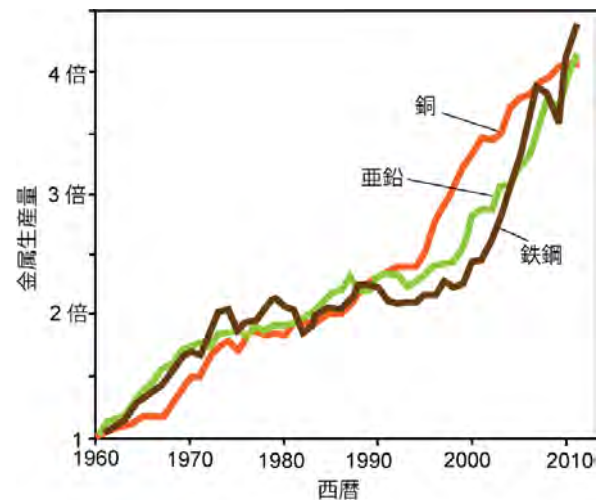


図1 世界のベースメタル生産量推移<sup>1)</sup>

## 2. レアメタルの資源量と遍在

レアメタルは、鉄や銅、アルミニウム等の主要金属とは異なり、使用量は少ないが、電気伝導、熱伝導、磁性、触媒機能、耐食性、光学等の特性を持つため、構造材料、電子材料、機能材料として先端工業製品に必要不可欠な金属元素を指す。日本では経済産業省が希土類を1種類として、タングステン(W)、インジウム(In)、モリブデン(Mo)、クロム(Cr)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)、ガリウム(Ga)、ゲルマニウム(Ge)、バナジウム(V)、プラチナ(Pt)、パラジウム(Pd)など31元素をレアメタルに指定している。

これらのレアメタルの中で、現在、需要が急速に

\*秋田大学国際資源学研究科教授

伸びているのが、グリーンテクノロジーに使用されるレアメタルである。PtやPdは自動車の排気ガス浄化触媒に使用されている。現在、エンジン自動車は電動車に移行しつつあるが、船舶や航空機用の触媒にこれから大きな需要が見込まれる。希土類、中でもネオジム (Nd) やプラセオジウム (Pr)、ジスプロシウム (Dy)、テルビウム (Tb) は、電気自動車や風力発電に用いられる永久磁石の材料として、リチウム (Li) に加えて、CoやNi、グラファイトはリチウムイオン電池の電極に欠かせない。Inは主として液晶画面の透明電極に使用されているが、GaやTeとともに太陽電池にも使用されている。このようなレアメタルは地球温暖化を防ぎ、持続可能な社会の実現のための製品作りに必要不可欠な材料となっており、その需要は中国を中心として急速に増大してきた。

これらのレアメタル資源は特定の国に偏在するものが多く (表 1)、特に南アフリカ共和国と中国では多くの元素が独占的に生産されている。南アフリカ共和国にはブッシュフェルト複合岩体と呼ばれる東西 300km、南北 200km にわたる火成岩体が分布する。この岩体は約 20 億年前に地殻を構成する岩石が大規模に熔融し、元素の再配分を伴いながら再固結したものである。もともとの岩石に含まれていた Pt や Cr は、厚さ数 10m から数 cm の薄層に濃縮している。これらの層は連続性が良く、各地で鉱石の採掘が行われている。

中国に産出する W や In、Sn、ビスマス (Bi)、テルル (Te)、希土類は、海洋プレートの沈み込みに伴う付加体を構成する堆積物が大規模に熔融することにより形成された還元的なマグマに由来する花崗岩に随伴する。このような花崗岩は西太平洋沿岸域に広く分布するが、中国南部での分布が最大で、このことが中国をレアメタル資源の宝庫としている。

これらのレアメタルの可採年数を見ると、Cr は 13 年と短い、120 億トンの資源量があり<sup>2)</sup>、今世紀に枯渇することは考えられない。Sn も 14 年と短い、西アフリカ、東南アジア、豪州、ボリビア、ブラジル、インドネシア、ロシアに資源が知られており、これらが開発されれば、将来の供給量は確保できると考えられる。その他の元素は可採年数が充分長く、将来にわたって資源が枯渇することは考えられない。

しかしながら、供給国の政策や戦略により、安定的に資源の供給が行われないことがある。2010 年の尖閣諸島中国漁船衝突事件の際には、数カ月間中国から日本への希土類の供給が停止された。また 2023 年には欧米諸国の対中半導体輸出規制に対す

る対抗措置として中国からの Ga、Ge の輸出規制が実施されている。

表 1 主要レアメタル (鉱物) のトップ産出国のシェア、世界の可採年数

元素	産出国とシェア	可採年数
Bi	中国(82%)	不明
グラファイト	中国(72%)	167
Co	コンゴ民(73%)	56
Cr	南ア(46%)	13
Ga	中国(98%)	不明
In	中国(67%)	不明
Mo	中国(42%)	59
Nb	ブラジル(90%)	203
Ni	インドネシア(48%)	>40
Pd	ロシア(43%)	188
Pt	南ア(71%)	188
希土類	中国(70%)	367
Re	チリ(53%)	不明
Sb	中国(48%)	>24
Se	中国(39%)	29
Sn	中国(23%)	14
Ta	コンゴ民(45%)	不明
Te	中国(66%)	62
W	中国(83%)	55

データは米国地質調査所<sup>2)</sup>に基づく。可採年数は 2022 年の埋蔵量/年間鉱山生産量。

### 3. ベースメタルの供給

ベースメタルについては 1 章で述べたように 2000 年以降生産量が激増している。それでもなお、アルミニウムの原料であるボーキサイトは 75 年、銅や鉄は 40 年以上の可採年数を持つ (表 2)。亜鉛は可採年数が 18 年と短い、確認された資源量は埋蔵量の 8 倍以上の 19 億トンに達する<sup>2)</sup>。

しかしながら、これらの資源のもととなる鉱石の品位は、年々低下している (図 2)。米国で生産される銅鉱石の品位は 1900 年初頭の 3% から 2010 年の 0.5% へと徐々に低下しており、最近では 0.3% 台で生産している鉱山もある。豪州の亜鉛鉱石品位は長年 9% 程度であったが、2000 年以降急激に低下し、2010 年位は 4% を切っている。この鉱石品位の低下は、資源量の増加につながる一方、生産コストが上がり、金属の価格の上昇をもたらしている。さらに品位が低いために鉱山では多量にズリが発生している。

表2 ベースレア金属のトップ産出国のシェア、世界の可採年数

元素	産出国とシェア	可採年数
ボーキサイト	豪州(26%)	75
Cu	チリ(24%)	46
Fe	豪州(38%)	56
Pb	中国(44%)	21
Zn	中国(32%)	18

データは米国地質調査所<sup>6)</sup>に基づく

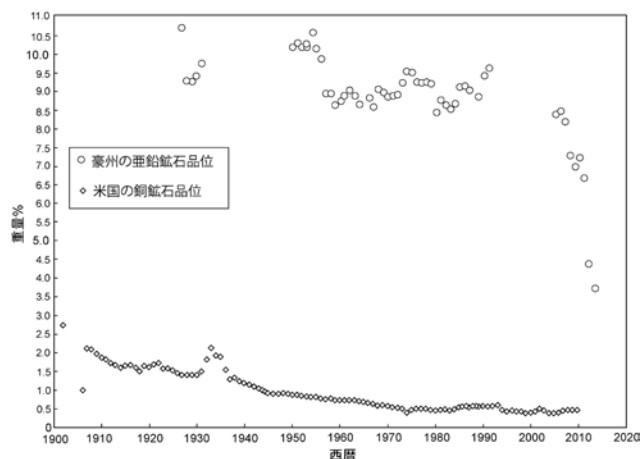


図2 豪州の亜鉛鉱石品位と米国の銅鉱石品位の変遷<sup>3)</sup>

#### 4. 日本が主役の鉱物資源

資源に乏しいと言われている日本が生産に関して主役となっている資源がある(表3)。これらのうち、鉱床から採集されるものは、ヨウ素(I)であり、主として南関東ガス田の水溶性ガスから回収されている。世界生産量はチリに次いで第2位(2022年世界シェア31%)である。一般には塩湖から回収される臭素(Br)はイスラエルとヨルダンが世界第1位と2位の生産国である。これらの国では死海の湖水から回収されている。日本では、海水に塩素を吹き込んでBrを遊離させる海水法とにがりに含まれるMgBr<sub>2</sub>に塩素を吹き込んでBrを遊離させるにがり法で生産されている。

鉄製品や銅、亜鉛は海外からの鉱石、選鉱物を国内の精錬所で精錬し生産されている。GaやInは亜鉛の副産物として、Biは鉛の副産物として、SeとTeは銅の副産物として生産されている。金も日本では銅の製錬過程で回収されている。三菱マテリアルは47.2t(2024年度)<sup>4)</sup>、パンパシフィック・カッパー株式会社は32.8t<sup>6)</sup>、住友金属鉱山は15.6t(2024年度)<sup>5)</sup>の金を生産予定しており、日本全体では約100tの金が年間で生産されることになる。この量は世界10位のペルーの生産量(96.7t)に匹

敵する。また硫黄は石油精製の際の不純物である。このようにIとBr、Sを除くと、他の元素は、ベースレア金属の製錬の際の副産物として生産が行われている。

表3 日本で生産される鉱物資源

元素(製品)	世界シェア	順位
Bi	2.6%	4
Br	5.0%	4
Cu(製錬)	6.0%	4
Ga	0.5%	3
In	6.7%	3
I	31%	2
Fe(銑鉄)	4.9%	2
Fe(粗鋼)	4.7%	3
Se	21.5%	2
S	3.8%	9
Te	11.6%	3

データは米国地質調査所<sup>6)</sup>に基づく

さらに日本ではInの56%、Gaの41%(いずれも2022年)がスクラップからのリサイクルでまかなわれている。日本で生産されたIは80%以上、Seは93%、Teは28%、Sは70%程度が輸出されている<sup>7)</sup>。

#### 5. 資源循環社会の実現へ

日本の2019年の金属リサイクル率(使用済み製品からのリサイクル量/見かけ消費)を見ると、鉛が62%、白金族元素40%、銅35%。亜鉛24%、バナジウム17%、タンゲステン9%、錫8%、チタン0.31%となっている<sup>8)</sup>。2020年には錫が9%、2021年には鉛が65%、銅は43%、亜鉛が27%、バナジウム18%に微増している。アルミ缶は、国内では97.5%がリサイクルされている<sup>9)</sup>。このように日本では最終製品からの金属リサイクル率が徐々に増加しており、リサイクル率は世界でもトップクラスである。

日本の金属消費量は社会の成熟とともに年々減少している。銅をみると、世界の銅消費は、中国の消費量の増加を反映して、年々増加しているが(図1)、中国以外の国を総計した銅消費量は2000年以降減少している。日本の銅需要は2000年以降減少傾向にあり、国内需要合計は2000年135万トンから2015年の92万tに大きく減少している。輸出が2000年29.9万tから2016年54.1万tに増加したことにより、需要合計は2000年165万tか

ら2015年146万tの減少に止まっている<sup>10)</sup>。

このような日本の特徴は、1) 金属資源需要の横ばいまたは低下、2) 副産物の回収、3) 高いリサイクル率、で特徴づけられる。現在操業中の鹿児島県にある菱刈金鉱山や春日、赤石、岩戸金鉱山では、鉱石は銅の製錬所に送られ、脈石鉱物の石英は銅精錬のフラックスとして使用されている。したがって、鉱山開発に伴うズリの量も極めて少なく、環境への負荷も抑えられている。

今後、資源の生産現場では、未だ十分に生産されていない副産物、例えばアパタイトに含まれる希土類<sup>11)</sup>やボーキサイトに含まれるGaやスカンジウム(Sc)<sup>12)</sup>の生産などが期待される。

日本はかつて資源収奪社会であり、鉱山開発に伴い環境に大きな負荷を与えたが、現在は「副産物活用社会」(図3)に位置づけられ、ベースメタル選鉱物から様々な金属を作り出し利用している。InやGaなど国内でリサイクル率の高い資源は、例え中国からの輸入が途絶えても数年は国内の需要を満たすことができ、その間に新たな供給源を模索することも可能となる。

今後、金属鉱石の品位低下や世界需要の増大で金属価格は益々上昇することが予測される。金属価格の上昇は、金属のリサイクルを後押しすることになり、日本が世界に先駆けて資源循環社会を実現することが期待される(図3)。

- 4) 三菱マテリア：2024年度上期地金生産計画について <https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/news/press/2024/24-0401a.html> (2024年9月18日現在)
- 5) 住友金属鉱山：2024年度の地金生産計画について [https://www.smm.co.jp/news/release/uploaded\\_files/20240401\\_2\\_JP.pdf](https://www.smm.co.jp/news/release/uploaded_files/20240401_2_JP.pdf) (2024年9月18日現在)
- 6) パンパシフィック・銅株式会社：2024年度上期における金属製品等の委託生産予定について [https://www.ppcu.co.jp/news/pdf/news\\_2024\\_0401.pdf](https://www.ppcu.co.jp/news/pdf/news_2024_0401.pdf) (2024年9月18日現在)
- 7) アルム出版社：「工業レアメタル139」, アルム出版社, 2023
- 8) JOGMEC：「鉱物マテリアルフロー2020」, JOGMEC, 2021
- 9) 日本アルミニウム協会：アルミ缶のリサイクル [https://www.aluminum.or.jp/box/junkan\\_new/can.html](https://www.aluminum.or.jp/box/junkan_new/can.html) (2024年9月18日現在)
- 10) 独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構：銅ビジネスの変遷—2000年以降—, 独立行政法人石油天然ガス・金属資源機構, 2018
- 11) 渡辺 寧：レアアースから見た鉱物資源供給の将来像, 資源地質, Vol. 66, No. 1, pp.27-34, 2016.3
- 12) 実松健造, 星野美保子, 渡辺 寧：ラテライト型スカンジウム含有鉱床, 資源地質, Vol. 62, No. 1, pp.17-26, 2012.3

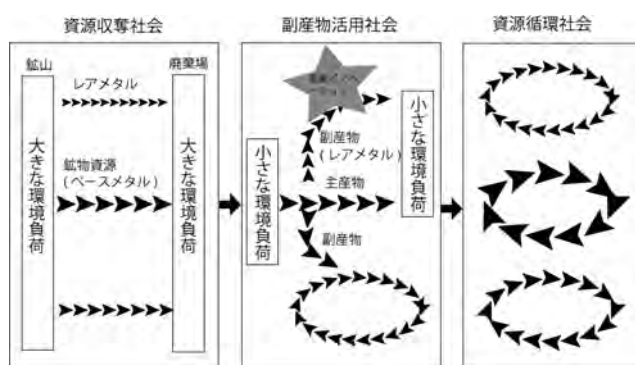


図3 資源生産社会の変遷

〈参考文献〉

- 1) Arndt, N. T., Fontboté, L., Hedenquist, J. W., Kesler, S. E., Thompson, J. F. H., Wood, D. G.: Future global mineral resources, *Geochemical Perspectives*, pp. 1-171, 2000
- 2) U.S.GS: Mineral Commodity Summaries 2024
- 3) 渡辺 寧：ポストコロナの資源供給, 金属, Vol. 92, No. 2, pp.104-109, 2022.2

**K**ey Word 化学組成, 固溶体, 結晶系, 比重, 硬度, 色, 劈開, 紫外線, 産状

## 1. はじめに

鉱物（ミネラル；mineral）は、地質学的な過程を経て形成された物質のうち、基本的に固体のものと定義される。さらに、化学組成がある一定の範囲内にあり、その構成原子が規則正しく配列している必要がある。この状態にあるものを結晶（クリスタル；crystal）とよぶ。ただし、例外もあり、常温常圧で液体の水銀（鉱物として産出する場合は、自然水銀という）、結晶でないいくつかの物質（火山ガラス、オパール、樹脂化石である琥珀など）は鉱物として取り扱う。かつては、鉱物を天然の無機物としていたが、ベンゼン環からなるような有機物（北海道石のようなもの）も鉱物である。しかし、生命体内で作られた固体物質（歯、骨、結石など）は通常は鉱物として扱わず、生鉱物（バイオミネラル；biomineral）として別に扱うことがある。

以上のような鉱物の定義から、鉱物を特徴づけるいろいろな性質が特定されてくる。主なものは、化学特性と物理特性で、前者は主に化学組成、水や試薬との反応であり、後者は結晶学的諸性質、密度（または比重）、硬度、色、条痕色、光沢、劈開、屈折率、紫外線下の反応、放射能などである。さらに、産出状態（産状と略されることが多い）は、どのような地質環境で生成されたのかを推定する重要な要素であり、特に有用鉱物の探索には必須の情報である。以下、化学特性や物理特性について解説していこう。

## 2. 化学特性

あらゆる物質は元素からできているが、鉱物は

多くの有機物に比べて単純な化学組成をしている。鉱物の主成分となる元素は72種類もあるが、我々が接したり聞いたりする多くの鉱物は5元素以下である。化学組成は、構成する原子の種類と量比で表されるので、石英なら $\text{SiO}_2$ （ケイ素と酸素の量が1:2。数字は下付きとする）となり、曹長石なら $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ となる。これを化学組成式あるいは化学式という。副成分を化学式には表記しないものを特に理想化学式ということがある。固溶体などでは記入する場合があります、たとえば曹灰長石（ラブラドライト）（曹長石—灰長石固溶体のうちやや灰長石よりの組成）を、 $(\text{Ca}, \text{Na}) \text{Al} (\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$ のように表す。これは、 $\text{NaSi}$ の半分以上が $\text{CaAl}$ に置換されていることを意味する。固溶体とは、原子配列のパターンを変えずに複数種の原子が自由に入れ代わることができる関係にあるものを指し、鉱物界では非常に多い。石英を除く造岩鉱物の多くが固溶体を形成している。

鉱物は化学物質であるので、さまざまな他の物質と反応をおこす。水に溶けるもの、酸（多くは希塩酸を使う）に溶け、さらに発泡、悪臭を発生するものなどがある。これらの特性を利用して、外観の似た鉱物を区別することができる。たとえば、白鉛鉱（ $\text{PbCO}_3$ ）と硫酸鉛鉱（ $\text{PbSO}_4$ ）なら、希塩酸をかけた時、前者はたちまち炭酸ガスの泡を出して溶けるが、後者はほぼ反応はない（硝酸ならゆっくり溶ける）。

## 3. 物理特性

最も重要なのは、結晶学的諸性質の特定である。レントゲンがX線を発見（1895年）する以前は、

\*国立科学博物館名誉館員・名誉研究員

内部の原子配列を推定する手段がなかったため、結晶の外形を研究することが結晶学の中心であった。1669年にステノが発見した面角一定の法則、1784年にアユイが発見した有理指数の法則（結晶が規則的な格子構造からできている）が有名である。

結晶にX線を照射すると回折現象が起こること（1912年にラウエが発見）、1913年以降ブラッグ父子による実際の原子配列の解析を経て、現在にいたっている（1914年にラウエがノーベル賞を受け、その100周年を記念して2014年に世界結晶年が制定された）。

ここでは、基本的な結晶系（晶系）について解説しよう。結晶系は6あるいは7種類に分けられる。その特徴は3次元の座標軸をとることで表すことができる（図1）。

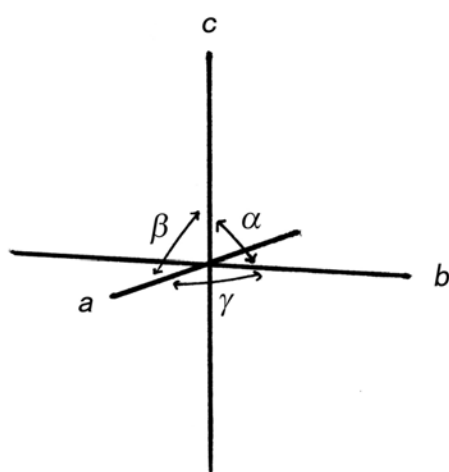


図1

ここで、 $a, b, c$  は結晶軸、 $\alpha, \beta, \gamma$  は軸角という。  
 立方（等軸）晶系： $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 正方晶系： $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 六方、三方晶系： $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$   
 直方（斜方）晶系： $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 単斜晶系： $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$   
 三斜晶系： $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$   
 なお、六方晶系と三方晶系には、別の軸の取り方がある（図2）。左は等しい3本の軸（軸角  $\gamma$  は  $120^\circ$ ）とそれらに垂直な1本の軸（軸角  $\alpha$  は  $90^\circ$ ）、右は菱面体（三方晶系に限る）の取り方で、3本の等しい軸と  $90^\circ$  でない軸角  $\alpha$  ( $90^\circ$  なら立方晶系になってしまう) で表す。

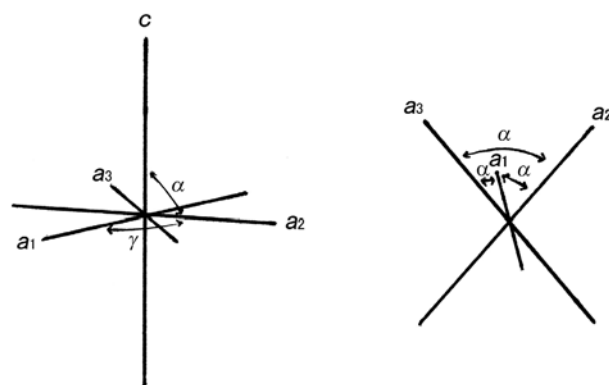


図2

実際には、対称要素（回転軸、対称心、鏡面、回反軸）の組合せなどを考慮すると、32種類のタイプ（晶族）があり、さらに同じ晶族でも形態が異なることが普通である。例えば、立方晶系を代表する正8面体結晶はダイヤモンド（図3）や蛍石であるが、同じ晶族でもふつうの石榴石は正8面体にはならず、菱形面が12個集まったものや、歪な4面体が24個集まったもの（図4）が多い。



図3（南アフリカ産ダイヤモンド）



図4（茨城県桜川市山ノ尾産鉄礬石榴石）

立方晶系でも対称の要素の少ない晶族では、正4面体になるものがある（図5）。



図5（福島県郡山市多田野産和田石）

X線回折実験から、結晶の単位格子の大きさを数字で表すことができるようになり、たとえばダイヤモンドの単位格子の形は立方体で1辺の長さは0.3567nm（ナノメートルは $10^{-9}$ m）である。鉱物の世界では伝統的にÅ（オングストローム）を使ってきたので、その場合は3.567Åと表す。このような数字を格子定数という。

密度は、構成する原子の種類と結合状態で決まり、通常は $\text{g/cm}^3$ という単位で表すが、水の密度と比較した、単位なしの比重がよく使われる。実際の細かい鉱物の密度を測るのは極めて困難なので、化学組成と格子体積から求めた計算密度が用いられる。

硬度は、標準鉱物を知りたい鉱物にこすりつけ、傷のつき方で決める相対的硬度のモース硬度がよく使われる。柔らかい方から、滑石（1）、石膏（2）、方解石（3）、螢石（4）、燐灰石（5）、長石（6）、石英（7）、トパーズ（8）、コランダム（9）、ダイヤモンド（10）の10段階の設定になっている。

鉱物の色は複雑な原因によって現れ、同じ種類の鉱物でも多様な色を持っていることがある。構成する特定原子の電子の動きを引き起こすエネルギーが可視光のある波長のエネルギーと同等であれば、その波長が抜かれた残りの波長による色がその鉱物の色ということになる。緑～紫色側の波長が抜ければ残りの波長の合成された黄色が見える。また、鉱物の内部構造において、屈折率が異なる微細な領域の繰り返しが周期的に存在すると、光の干渉によって虹のような光彩を放つ。代表的なものとしてラブラドライトがある（図6）。

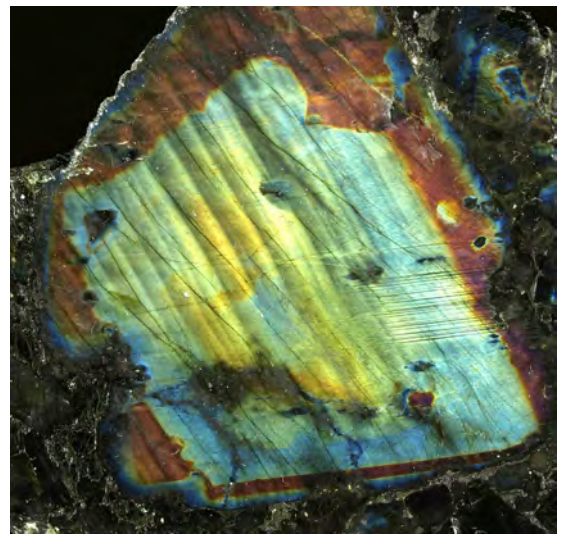


図6（フィンランド産ラブラドライト）

その他にも、構造上あるべき原子が欠損している、などでも電子の移動が行われ色づいて見える。また、無色透明な鉱物に微細な着色鉱物が多く包有されていると着色鉱物の色として見えてしまう。瑪瑙の赤色系は、石英の細かい粒子が集まった集合体の粒子間にしみ込んだ鉄水酸化物に起因する（図7）。また、粉にした時の色は条痕色と言い、結晶や塊状の時の色と異なることがある。



図7（茨城県常陸大宮市北富田産瑪瑙）

光沢は、どのような輝きかをよく知られた物質のそれにたとえて表現する。たとえば、ダイヤモンド光沢、ガラス光沢、金属光沢、樹脂光沢、油脂光沢、真珠光沢、絹糸光沢などである。1つの鉱物でも、見る方向によって2つ以上の光沢を持つものがある。閃亜鉛鉱は、劈開面では金属光沢だが、そうでない所は樹脂光沢やダイヤモンド光沢といった感じになる。屈折率、反射率、透明度、

表面の細かい凹凸などにも影響され、定量的に表すことはできない。

劈開は、結晶構造上の特性で、原子の結合が均質でない場合、弱いところからほぼ平面状に割れる現象である。典型的なのが雲母のなかまで、爪で薄く平らに剥がすことができる。石英は劈開がなく、割れ口は不規則ないし貝殻状になる。劈開の程度は、完全とか明瞭とかと言われるが、定量的な表現はない。

屈折率は化学成分と密度が大きく関与していて、非晶質や立方晶系ではどの方向も均質で屈折率は1つしかないが、その他は結晶方位によって異なり、正方、六方、三方晶系は2つ、直方、単斜、三斜晶系は3つの数字で表現する。主に偏光顕微鏡での観察において重要な要素であるが、普通に見ている場合は光沢に影響する程度である。

紫外線ライトには、短波長(254nm)のもの、いわゆるブラックライトと言われる長波長(365nm)のもの、LEDを使ったさらに長波長(375nm)のものなどが市販されている。紫外線のエネルギーによって鉱物中の特定電子が励起され、元の安定した軌道(基底状態)に戻る時に、余分なエネルギーを光として放出する。これが蛍光で鉱物種の特用に利用される。しかし、同種の鉱物で必ずしも同じ蛍光を発するとは限らないので、目安としては使えるが信用度は低い。とは言え、蛍光の幻想的な輝きは鉱物を楽しむ要素の一つであることは間違いない。なお蛍光は長短両波長で発するもの(強弱がある)、短波長でのみ発するものがある。一般的に弱い光なので、暗い場所で観察するのがよい。紫外線照射を終了した後でも、しばらく光っているものがある。この光を燐光という。内部にためこんだエネルギーをゆっくり放出するために起こる。図8は、珪亜鉛鉱の太陽光下(左)と紫外線下(右)の見え方だが、珪亜鉛鉱は燐光を持つことも多い。

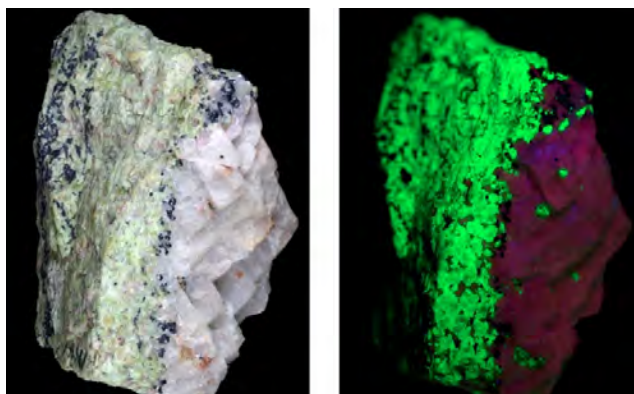


図8 (米国ニュージャージー州産珪亜鉛鉱)

放射能は、放射線を発する能力があることで、鉱物では主にウランとトリウムを多く含むものの特性である。線量計(ガイガーカウンターなど)を用いて調べることができる。このような鉱物を多量かつ身近に長時間置いておくと放射能の影響を受ける可能性がある。花崗岩は他の岩石に比べて多くの放射能鉱物を含んでいる。閃ウラン鉱、トール石、ジルコン、ゼノタイム、モナズ石などが入っているからである。しかし、花崗岩地帯で生活しても、花崗岩の石材に取り囲まれていても放射能障害を起こすほどの線量はない。ジルコン中にウランがあることで、特に古い時代の年代測定に利用でき、地質学ではありがたい存在である。

#### 4. 産状

産状は、鉱物が生成した時の地質環境から推定した鉱物のでき方とみなすことができる。基本的には、融体(マグマ)、液体(熱水、海水、湖水)、気体(火山ガス)などに溶け込んでいた化学成分が、温度や圧力の低下によって固体(鉱物)となる現象である。既存鉱物が、液体や気体との化学反応で別種の鉱物に変わることがある。同種の鉱物どうしの粒が高温高压にさらされると、再結晶してより粗い粒となることもあり、異なった鉱物どうしの場合には、化学反応によりそれらとは別種の鉱物が作られることがある。

地表下で行われている鉱物形成を直接見ることはできないが、地表では海水や湖水から沈殿してできた鉱物、火山噴気孔にできた鉱物、露頭に現れた鉱物が水や大気などとの反応で新たにできた鉱物、海底噴気孔のチムニーなどを見ることができる。地球内部でできた鉱物は、地殻変動などによって地表近くに運ばれてこそ、我々が目にするので、鉱物のできる場所と見られる場所は、必ずしも一致しない。鉱物のでき方は以下の4種類に大別できる。

##### 1) 火成作用

主にマグマが冷えていく過程でできる鉱物の集合体(火成岩など)である。深成岩は地球内部でゆっくり冷えていった岩石で、鉄苦土鉱物(オリブ石、輝石、角閃石など)の多い超苦鉄質岩(ダン岩など)から珪長鉱物(石英、長石など)の多い珪長質岩(花崗岩など)まで4大別される。間には、苦鉄質岩(斑禰岩など)、中間質岩(閃緑岩など)がある。

火山岩はマグマが地表近くで急冷されてでき、鉄苦土鉱物の多い苦鉄質岩(玄武岩)から珪長質



岩（流紋岩など）まで3大別される（超苦鉄質火山岩、たとえばコマチ岩などは20億年以前の古い時代にだけ存在する）。中間質岩には、安山岩などがある。

深成岩が固化していく最終段階に、造岩鉱物に入り難い元素や揮発性の成分が濃集して、その深成岩中や近接する他の岩石中に、脈状、レンズ状などの形になったものがペグマタイトとよばれる。結晶粒が粗くなるのが特徴で、空隙には大きな自形結晶も見られる（図9）。特に花崗岩や閃長岩では、リチウム、ベリリウム、ホウ素、フッ素、ジルコニウム、ニオブ、タンタル、希土類元素などを主成分にする鉱物が伴うこともある。



図9（岐阜県中津川市蛭川産ペグマタイト）

熱水は基本的に地表や海底から染み込んでいった水が地下で加熱されたもので、液体と気体の区別がなくなる臨界点よりも高温高压条件下では超臨界状態となり、いろいろな化学成分を溶解する能力を持つ。周囲の岩石からいろいろな化学成分を取り込んで、地表近くで鉱物として結晶化させる。金属鉱脈（図10）の多くがこのような過程で作られる。熱水は地表近くの岩石の一部を変質さ



図10（新潟県佐渡鉱山産金銀鉱石）

せ、そこに新たな鉱物が作られる。火山の噴気孔の周囲にはガスの昇華により、あるいはガスから短時間の液体状態を経て鉱物が作られている。

## 2) 堆積作用

一般的に熱くない液体（海水や湖水）から水分の蒸発などによって液体に溶け込めなくなった化学成分が鉱物として沈殿（蒸発乾固）する作用である（図11）。岩塩、ホウ砂、石膏などが代表的な鉱物である。



図11（南オーストラリア州、蒸発した湖底の石膏）

## 3) 変成作用（交代作用）

地球内部でおこる変成作用で、広域にわたってできた広域変成岩（片麻岩、結晶片岩）と局所的にできた接触変成岩に大別される。既存の鉱物集合体が熱や圧力だけを受けた場合もあるが、多くは熱源側から由来した種々の化学成分を含む熱水などと反応し、化学成分の交換（交代作用）が行われている。このような作用を交代変成作用ともよぶ。カルシウム、マグネシウムに富む岩石（石灰岩、苦灰岩）が花崗岩質マグマの接触で、カルシウムやマグネシウムを主成分とするケイ酸塩鉱物群ができる。このような鉱物群を特にスカルン鉱物（図12）と言う。そこに有用な金属鉱物が集まっていれば、それをスカルン鉱床と言う。

緑色岩は、主に海洋底玄武岩あるいはその凝灰岩が変成を受け、緑色緻密な塊状岩石になったものである。緑泥石、パンペリー石、緑簾石、オンファス輝石など多くの緑色鉱物が作られているため、緑色に見えるが、なかには赤鉄鉱などが含まれて赤褐色に見えるものもある。



図 12 (岩手県釜石鉱山産スカルン, 主に灰鉄石榴石, 緑簾石, 鉄緑閃石から構成)

#### 4) 酸化作用 (風化作用)

地表近くの鉱物が、雨、地下水、大気、バクテリアなどによって分解され、別の鉱物種に変化したもので、原鉱物を構成していた元素（銅、鉄、硫黄など）の多くが酸化状態（+の電荷が増加する）になっているため、酸化作用を受けたと表現される。原鉱物である黄銅鉱、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱などを含む鉱石の割れ目には、孔雀石、赤銅鉱、白鉛鉱、緑鉛鉱、異極鉱、針鉄鉱などの鉱物ができていて、初生的にできた原鉱物に対して、これらを二次鉱物とよぶ（図 13）。また、長石の分解変質によりできた粘土鉱物もこの区分に入る。



図 13 (岐阜県神岡鉱山産緑鉛鉱)

### 5. 鉱物の利用と楽しみ

鉱物はさまざまに利用され、我々の生活には必須の物質である。どのように利用されているかを簡単に紹介しよう。

#### 1) 未加工 (粉碎, 研磨も含む)

- a 科学的研究 (地球の構成, 年代測定, 温度圧力の推定, 物性測定など)
- b 産業素材 (研磨材, 脱臭剤, 脱硫剤, 顔料, 建造物, 土状改良など)
- c 食用・薬用 (人間 (岩塩, 漢方薬石), 家畜 (褐鉄鉱) など)
- d 宝石・装飾品 (研磨, 彫刻が前提となる)
- e コレクション (知的趣味, 癒し, 鉱物パワー)

#### 2) 加工

- f 鉱石 (有用金属の抽出, 燃料など)
- g 加熱・加圧 (セラミックス, 肥料など)
- h 合成材料 (化学工業, クオーツ, ダイヤモンド薄膜, 半導体, レーザー用結晶, 人工宝石など)

一般に鉱物趣味と言えば、綺麗な結晶や稀産鉱物のコレクションが目的であるが、お金を出さないと手に入れることができないものが多い。特に宝石となるようなものは難しい。しかし、鉱物の品質を問題にしないのなら、自らが発見し、採集できれば (規制や権利の問題をクリアして)、それはそれで楽しい趣味となる。鉱物標本は、ラベルがないと価値がほとんどない。そしてラベルには必ず採集場所 (産地) を書いておく必要がある。鉱物の種類は後でも調べることができるが、産地がわからなくなるとは意味がないのである。最近各地でミネラルショーのようなものが多く開催されているので、そこで実際の鉱物を手に取って観察して目を肥やす (肉眼鑑定能力の向上) ことができるし、いろいろな情報を得て採集の参考にもなる。地球の作った究極の自然物を楽しんで人生を豊かに過ごしたいものである。

#### 〈参考文献〉

- 1) 秀和システム:「鉱物の博物学 第2版 (松原聡・宮脇律郎・門馬綱一)」, 2021
- 2) 秀和システム:「鉱物肉眼鑑定事典 第2版 (松原聡)」, 2021
- 3) 平凡社:「最新 地学事典 (地学団体研究会編)」, 2024

## 水文調査に関する基礎技術

とみもり  
富森 さとし\*

**K**ey Word 水文環境, 水循環, 地下水, 水利用, トンネル, モニタリング, 影響予測

### 1. はじめに

土木分野にて実施される、いわゆる「水文調査」といえば、各種工事に伴う水利用への影響を監視することを目的に、周辺の土地・水利用の状況を調査して、水利用に係る地表水、地下水、湧水等の水位・水量・水質を観測するといったものが大半を占めていたように思われる。

一方、水循環基本法が施行（平成26年）・改正（令和3年）された背景にみられるように、最近では水への社会的な関心が高まっており、水文調査の対象は、土木分野だけでなく、水（資源）そのものを課題（保全と利用）とするものなど、多岐に亘っている。

本稿では、主として土木分野を対象としつつ、その他の分野にも適用可能な水文調査に係る技術を概説する。

### 2. 対象となるケースと調査の流れ

「全国標準積算資料（土質調査・地質調査）」（全地連）<sup>1)</sup>での記載を引用すると、水文調査は、地下水および地表水に関する広範な情報を得ることにより、水の賦存状態・挙動・収支およびそれらの因果関係を明確にし、水資源の賦存量や開発・工事に伴う影響などを予測して、かつ発生する諸問題を最小にとどめることを目的に行われる調査技術である。また、その対象となる主なケースとして、次のものが挙げられている。

- ①地すべりなどの防災計画
- ②トンネル掘削に伴う湧水に対する安全性、施工法などの検討、および湧水問題などの環境保全に関する検討
- ③地下水の揚水量および施設などの検討

④地盤沈下対策など環境保全の一環としての地下水の状態把握

⑤適正な水資源利用の計画

本稿では、トンネル掘削に伴う環境保全に関する検討を例にとり、水文調査の計画、現地調査、調査結果の分析検討の一連のプロセスにおける各種技術を紹介したい。

トンネルを掘削するとトンネル坑内へ地下水が流出する。これに伴い、トンネル集水範囲では、**図1**に示されるように地下水位が低下するため、湧水・沢水の減少・枯渇が生じる。また、その連鎖として下流側への地表水・地下水の供給が減る。このような水循環系のバランスが変化するエリア内にて湧水・沢水・地下水の利用がある場合、その変化の程度によっては利水障害が発生し得る。

トンネル掘削による利水への影響が懸念される場合は、影響の有無を工事前・中・後に予測あるいは監視し、影響を回避または低減するための対応が求められる。そのために実施する水文調査は、**図2**に示すように、大きくは、1) 調査計画、2) 現地調査、3) 影響予測・判定等、4) 対応検討に分けられる（本稿では1)～3)を扱う）。

一般に、トンネル工事は数か月～数年間と長期に亘ること、また、その影響による水循環系のバランスの変化はさらに長期に亘ることから、上記1)～4)は順接的に一度実施すれば良いというものではなく、それぞれの結果を双方向に踏まえながら進めなくてはならない。

### 3. 調査計画

水文調査の実施に先立ち、その調査計画を抜くも

\*応用地質株式会社 防災・インフラ事業部 インフラ基盤コンサルティング部

れなく、かつ過大にならないように立てることは、とても重要である。そのため、調査計画を立てる際は、事業のフェーズ（工事前／工事中／工事後）に応じた目的・課題を踏まえなくてはならない。

### 3.1 初期調査計画

水文調査の初期段階では、4章で述べる水利用調査を、効率良く実施するための計画が求められる。そのためには、まずは調査範囲の設定が極めて重要となる。

図3に示すように、まずはトンネルにより直接影響を受ける範囲を推定する。その上で、水循環系を考慮して副次的に影響を受ける範囲を推定する。そ

の範囲内にかかる集落を包括するように調査範囲を設定するのが望ましい。

これらの範囲を推定・設定する際、まずは既往資料・文献等を参考にすることになるが、それだけでは不十分な場合、現地踏査（概査）を行う。

### 3.2 モニタリング計画

4章で述べる水利用調査、5章で述べる影響予測の結果を踏まえ、水利用箇所、水源、観測孔等においてトンネル工事による影響を監視するためのモニタリング計画を立てる。

ここで重要となるのは、観測地点、項目、頻度を過不足なく設定することである。例えば、地下水位

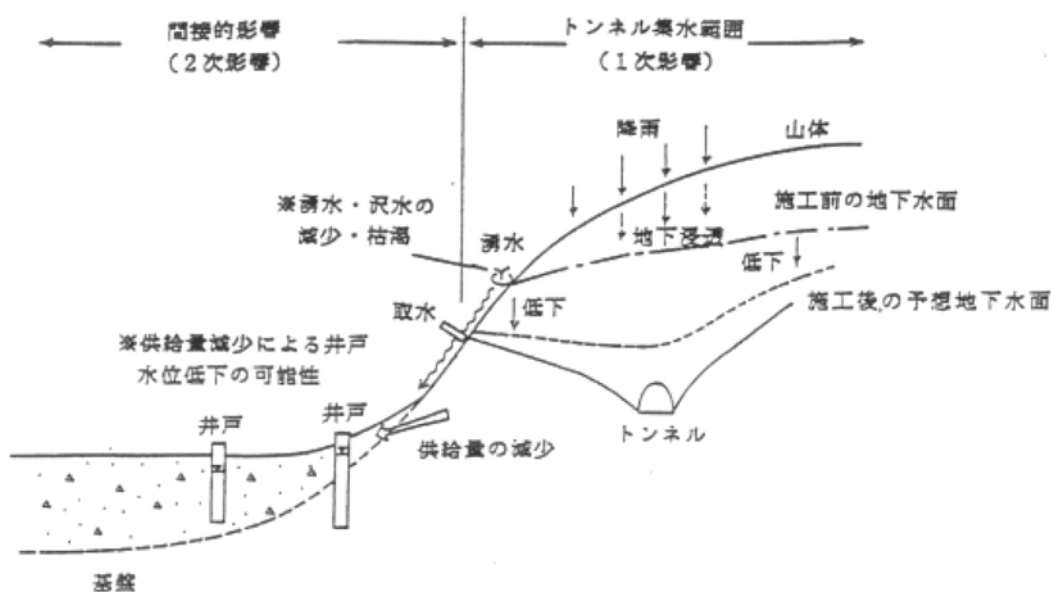


図1 トンネル掘削による水循環系への影響の概念図<sup>2)</sup>

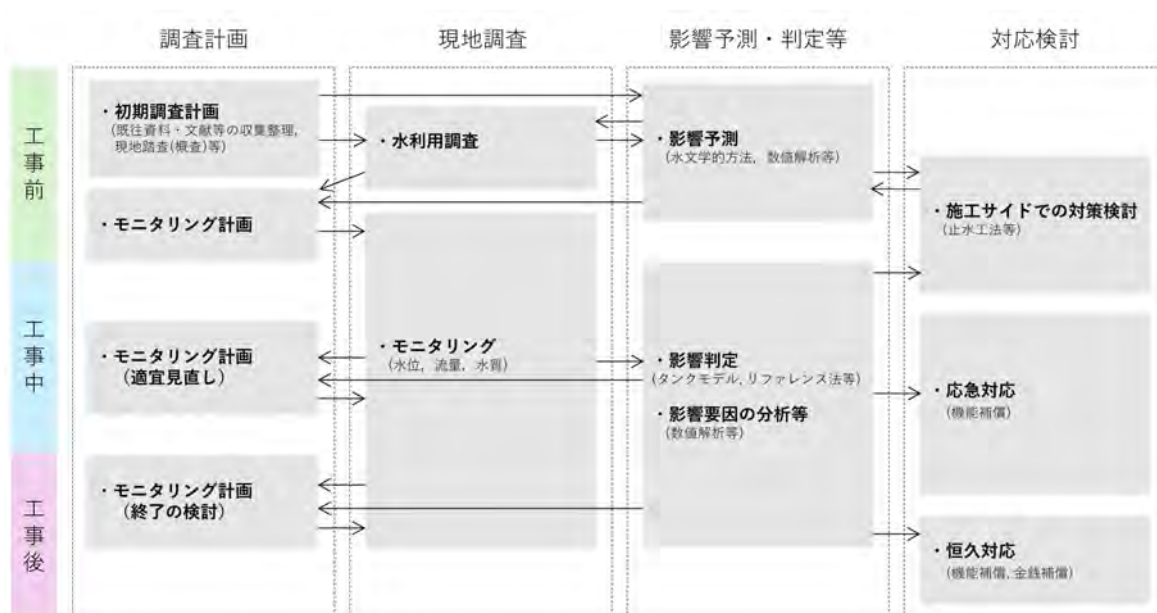


図2 水文調査のプロセス(例)  
(トンネル掘削に伴う環境保全に関する検討を想定)

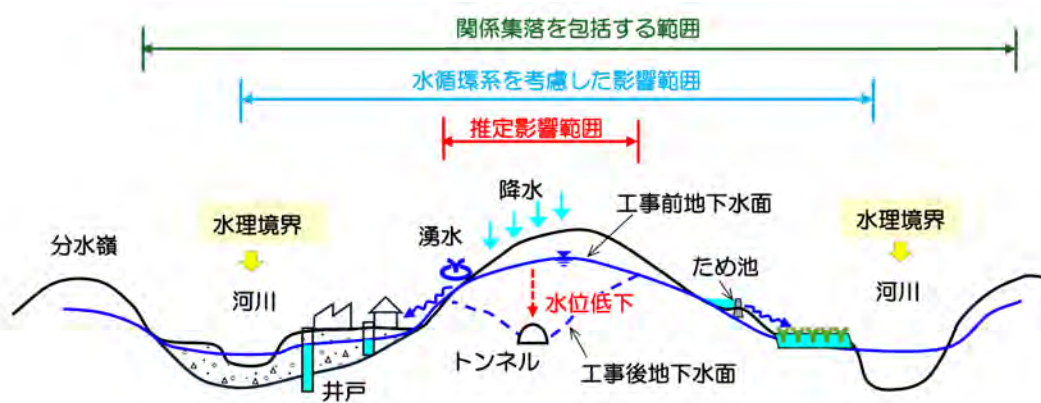


図3 調査範囲の設定イメージ



図4 影響リスク分析のイメージ

が大きく低下するエリアがあるとしても、そのエリア内に水利用箇所が無ければ特に問題にはならないことが考えられる一方、水位低下は小さくても、代替水源の無い集落ではその影響を軽視することは出来ない。こうしたことを考慮したモニタリング計画を立てる必要がある。

これを合理的に検討するためには、図4に示す「影響リスク」分析が有効である。各水源や水利用箇所について、トンネル工事による水位、水質、水量の変化が起こる可能性や程度を「工事影響度」とし、また、代替の難しさや用途の重要性（規模、地域の関心度の高さ）を「利水重要度」とする。これらを足し合わせるあるいは掛け合わせて「影響リスク」とし、これをランク分けする。そのランクに応じて選択と集中によってモニタリング計画を具体化・合理化する。地域の関心度の高さや利水の規模の大きさから、代替え水源の確保が難しい水利用がある場合には、別途、施工サイドでの対策検討も念頭において調査計画が必要となる。

なお、モニタリング計画は、調査の熟度に応じて、また、事業の進捗に合わせて適宜見直す必要がある。工事の工程や内容が変更となった際は勿論のこと、

その後のモニタリングや影響予測の結果から、当初よりも影響が懸念される地点・期間は観測の頻度を増やす等の対応が考えられる一方、明らかに影響が無いと考えられる地点では観測の頻度を減らすあるいは終了する等、経済性も考慮した計画の見直しが求められる。

## 4. 現地調査

「水文調査」の枠を広く捉えれば、水理地質構造を把握するための地質調査や、観測孔の設置など、現地調査は多くの技術分野から構成されることとなるが、ここでは、水利用箇所における影響と直接的に関わる「水利用調査」と「モニタリング」に絞って概説する。

### 4.1 水利用調査

3章で述べた初期調査として、その調査範囲において、どこで、どのような水利用がなされているのかを調査するのが、水利用調査である。

具体的には、個別民家、事業者等を訪問し、ヒアリングや現地確認を行い、その水源となっている井

戸、湧水、沢水、水路、ため池などを、土地利用状況も確認しながら一つ一つ、その場所、形態、用途等を確認して記録し、可能な地点においては、初期値（水位、水量、水質）を観測するものである。

調査の結果は、平面図にその経路等を取りまとめるとともに、地点毎に台帳に整理する。例として井戸台帳の様式を表1に示す。

ここで重要なのは、後に利水障害が懸念された場合、それが工事によるものなのか、潜在的なものなのか、代替水源の確保は可能か等といったことを判断するのに資するものとする点である。

また、水利用状況や初期観測結果から、当該地域の水循環系を推定し、5章で述べる影響予測に資することも重要である。

## 4.2 モニタリング

トンネル工事による影響の有無を監視するために、水利用箇所やその水源となっている井戸、湧水、沢水、水路、ため池等において、水位、流量、水質の観測を行う。各種の観測方法があるが、ここでは代表的な方法を紹介する（図5参照）。

### (1) 水位観測

水位観測の方法としては、いわゆる「手測り」観

測と、自記録式の水圧センサー等を用いた自動観測がある。

手測り観測は、触針式水位計によって、井戸や観測孔内の孔口から水面までの長さを測定するものである。この手測り観測は、自動観測地点においても、自記録式の水圧センサーのデータを回収する際に併せて実施し、水圧センサーが正常な水位を測定しているかどうかのチェックをする上でも重要である。

自動観測は、データロガーが内蔵された水圧センサーを水面の下方の位置に設置し、一定時間間隔で水圧を自動測定する。時間間隔の設定は可変であるが、1時間ピッチとすることが多い。定期的（月1回の頻度とするケースが多い）にセンサーを引き上げて、データを回収する。回収した水圧データからセンサー設置位置から水面までの長さに換算し、その換算値をセンサーの設置深度から差し引くことにより、水面の深度を算出する。

### (2) 簡易水質測定

ポータブルな水質計を用いて、井戸、観測孔内の地下水、沢水、湧水の簡易水質を定期的に測定する。簡易水質とは、水温、EC（電気伝導度）、pHである。

井戸や観測孔内の地下水は、ポンプやベアラーによって汲み上げた水を容器に入れて測定する。

表1 井戸台帳の様式例<sup>3)</sup>

井戸番号	調査年月日	平成	年	月	日	井戸型式	1.掘ぬき井戸(密閉井戸・開放井戸) 3.打込み井戸 2.ボーリング井戸 4.湧水(横井戸)				
項目	内容及び実態					井戸構造	①井戸内径	cm	②井戸外径	cm	
住所	番地						③井戸高	cm	④地盤高	m	
(ふりがな) 氏名	電話	( )				⑤井戸深度	m	⑥実測水位	m		
職業	1.農業 2.自営業 3.会社員 4.公務員 5.その他( )					調査時の可能性	探水	1.可能 2.不可能			
井戸 利用 状況	井戸所在地	番地				井戸諸元	揚水機種類	1.手押ポンプ 4.自噴 2.電動ポンプ(地上、水中) 5.その他 3.つるべ ( )			
	種類	1.個人 2.共同(世帯宅)						その他	①推定井戸年数 _____年 ②深井戸 _____ a.有 b.無		
	用途	1.飲料用 2.雑用 3.不使用 4.その他 1の時、他の利用状況( )				現況見取図	備考				
	使用人員	名(大人名、小人名、乳児名)				地下水の状況					
	地下水位の状況	1.水量は多く溜れたことがない 2.季節によって溜れることがある 3.最近溜れやすくなった 4.その他( )									
	地下水質の状況	1.生水で利用している 2.沸騰してから利用している 3.水質が悪く利用していない 4.その他( )									
	上水道の普及状況	1.上水道は入っていない 2.上水道と並用 a上水道が主 b地下水が主									
下水道の普及状況	1.下水施設あり 2.し尿類の自家処理あり 3.普及していない aくみ取り b堆肥利用 cその他( )										
井戸周辺の地形	1.沖積地 2.河川に近い(30m以内)沖積地又は 洪積地 3.段丘 4.扇状地 5.丘陵 6.山地 7.山間低地 8.その他( )										



図5 モニタリング（水位、流量、簡易水質）の実施状況と機器例

### (3) 流量観測

流量観測の方法は、水量が少ない沢や水路では容器法により、水量が多い沢や水路では断面法により観測するのが一般的である。この他にも、沢や水路の状況に応じて、浮子法、塩分希釈法、三角堰法などを採用することもあるが、ここでは紹介を割愛する。

容器法は、一定時間内の水流を容器にて捕捉し、それを計量するものである。可能な限り漏れなく流水を捕捉する必要があるため、水量に合致した容器を選定することが重要である。

断面法は、河川・水路内の流下断面積と流速から流量を測定するものである。流水の安定した位置に観測測線を設定し、測定断面を複数に分割して各断面の面積と流速の積から沢水流量を算定する。観測断面の面積測定は、スタッフ・コンベックス・巻尺等を使用する。また、流速測定には可搬式の電磁流速計を使用する。

### (4) 観測データ分析

観測結果は、観測地点毎あるいはエリア毎に、図6に示すように、降水量や気温と併せて時系列グラ

フに整理する。表示期間は、測定開始時から現在までの全期間とし、工事開始などのイベントの時期や、工事前の最低値等を併記すると分かりやすい。また、各値の降雨応答特性を分析する上では、降水量は日単位の値のみでなく、月単位の値も併記するのが望ましい。

これらのグラフから変動傾向を読み取り、気象、地形・地質、工事との因果関係について分析する。

## 5. 影響予測・判定等

トンネル工事による影響については、事業フェーズ（進捗）に応じて、様々な方法により予測、判定、分析を行う。ここでは、その手法を幾つか紹介する。

ただし、これらの手法はあくまでも方法論であり、これらの手法の採用は、現地調査により確認された地形・地質の状況、モニタリング結果等を、平面図や断面図、グラフにより図解することによって、「何が起きているのか」ということを定性的に分析・考察することを前提とするものであることに留意されたい。

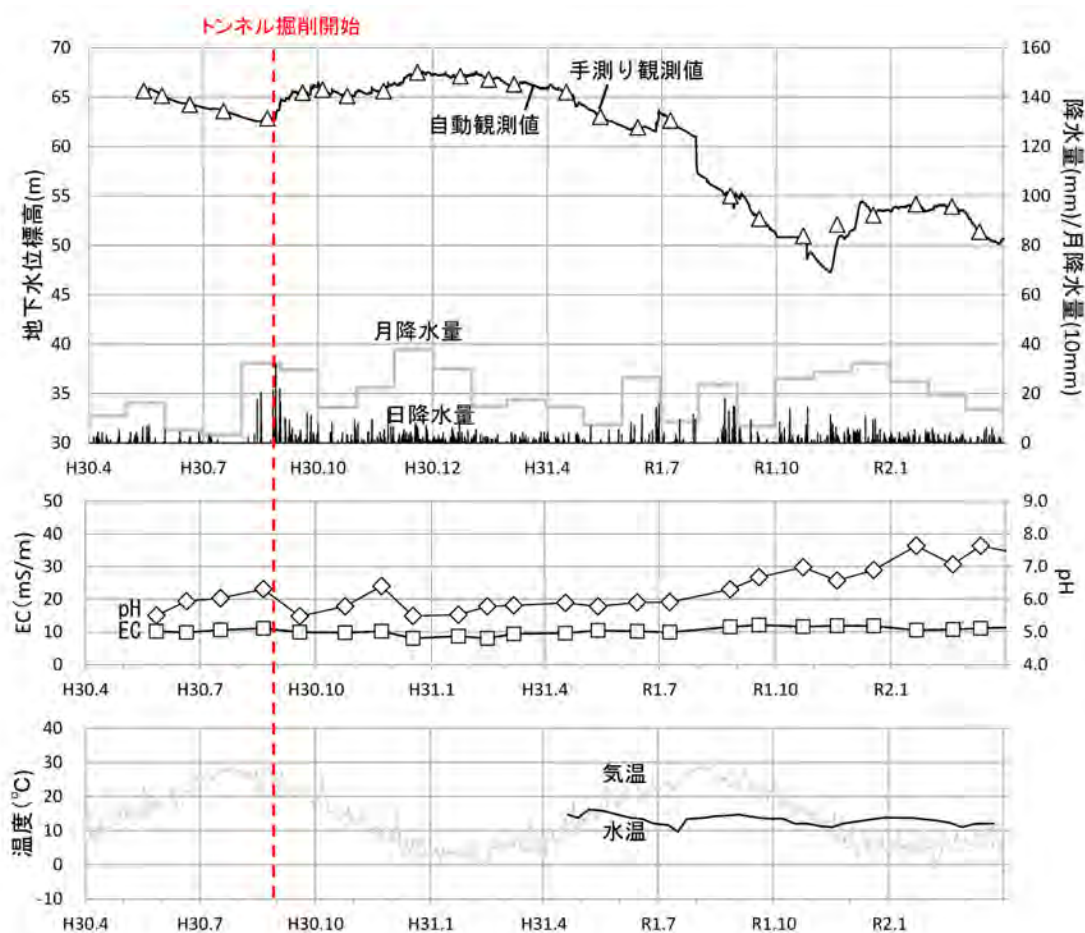


図6 モニタリング結果の整理例

### 5.1 影響予測

影響予測は、事業フェーズ（進捗）に応じて、特にその時点にて得られている情報量とバランスするように、簡易な手法から高度な手法へと、採用する手法を使い分けて実施するのが望ましい。

初期調査（水利用調査）の範囲を設定する際には、対象地域における情報が少ない中で、その範囲を暫定的に設定しなくてはならない。その際には、Sichardt（ジハルト）式等の経験式や理論式により、トンネルによる影響圏を推定することが多い。その他、類似事例や近隣の既工事区間での影響実績などを参考にすることもある。

これよりもやや高度な手法として、水文学的手法（「高橋の方法」）を採用することもしばしばある。この手法は、図7に示されるように、谷の形状が地山の透水性の影響を受けて形成された集水地形であると想定し、地形データから地山の透水性を推定してトンネルの集水範囲やトンネル坑内（恒常）湧水量を推定するものである。（具体的な算出方法については、引用図書等を参照されたい）。

この手法を用いる際に最も留意すべきことは、

地形と透水性にある一定の関係性がみられることを前提としているということである。よって、現地地形とはさほど関係なく帯水層が分布する火山地帯においてこの手法を用いると、トンネル集水範囲を狭く見積もってしまうことがある。

さらに調査が進むことによって水理地質構造に関する情報が増えてくると、より高度な手法として、図9に示す数値解析（浸透流解析）を用いてトンネル工事による水位低下量や流量の減少量を面的かつ定量的に予測する場合がある。

浸透流解析は、断面二次元、平面二次元、準三次元、三次元と空間モデルの切り出し方は様々であり、また解析手法も、計算工学の発達とともに様々なものが開発されている（詳細については浸透流解析に関する専門図書を参照されたい）。

なお、数値解析（浸透流解析）を適用する際に最も留意すべきことは、各事業フェーズ（進捗）における目的、課題に対して、何の情報をもとに何をアウトプットするのかということを確認することである。これが不明確なまま闇雲に（例えば三次元浸透流解析）を実施すると、目的に合致



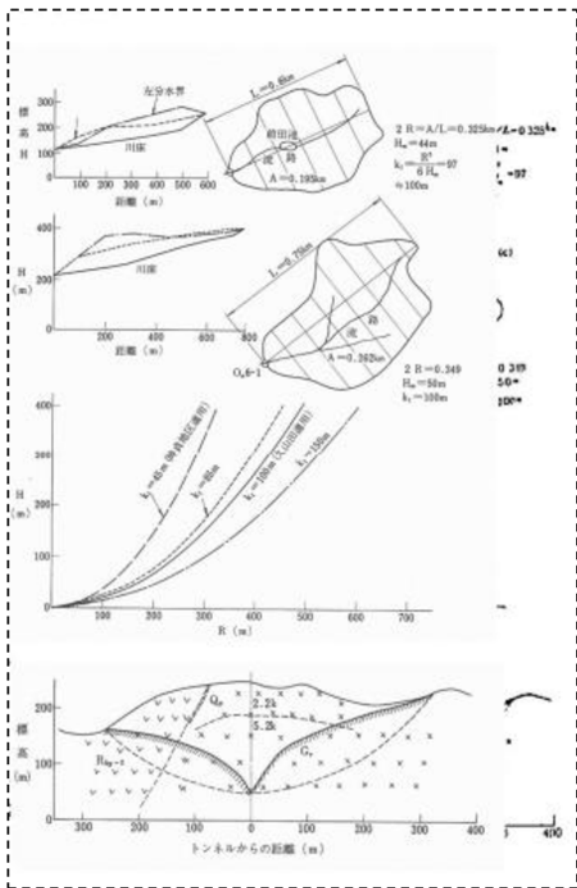


図7 高橋の方法の概念図<sup>4)</sup>

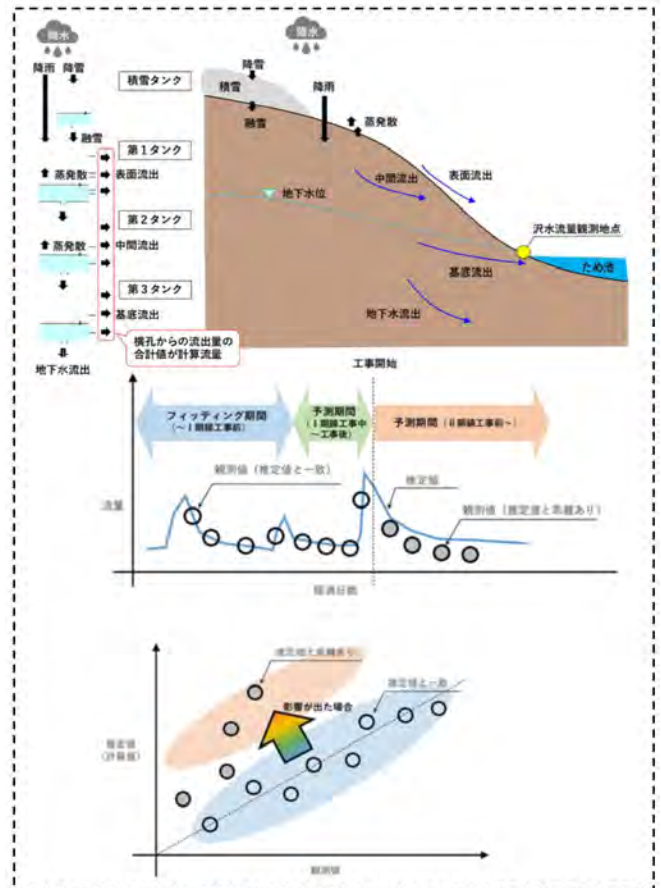


図8 タンクモデル解析、リファレンスの概念図

しない精度・分解能の予測結果が得られて、費用対効果が得られないことに加えて、予測結果が思わぬ方向へ独り歩きしはじめることとなる。

## 5.2 影響判定

工事が進む中で、利水障害の報告があると、それが工事の影響なのかどうかを判定しなくてはならない。これは、事業損失対応として機能補償あるいは金銭補償を行うかどうかを判断する上で重要となる。この影響有無の判定に資するのは、基本的には観測結果である。つまり、工事前のモニタリング結果と工事中～工事後のモニタリング結果を比較し、水位・水質・水量に変化があったかどうかを分析しなくてはならない。この分析に広く用いられている方法として、タンクモデル解析とリファレンス法がある。

### (1) タンクモデル解析

タンクモデルは、菅原正巳氏により提案されたモデルであり、図8に示すように、側方および底部に流出口を有するタンクを複数個、組み合わせることにより、降雨の表層流出・地盤内への浸透流出などの挙動を表現する降雨応答解析モデルで

ある。このモデルを用いることによって、観測値の変動傾向が、降雨応答によるものなのか、それ以外によるものなのかを視覚化することが出来る。

具体的には、まず工事前の気象データを入力し、タンクの段数、流出孔の数や高さを設定して、工事前の観測値（水位、流量）を再現する解析を行う。工事影響が懸念された時点で、降雨データを追加入力した解析を行う。解析値と観測値に乖離が見られる場合、降雨応答ではない何か別の要因（つまり工事影響）が考えられるわけである。

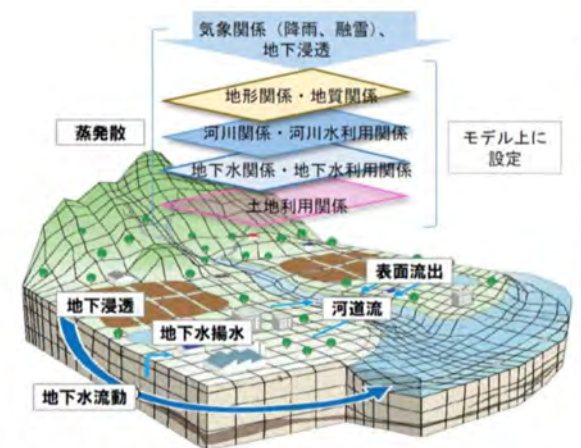
### (2) リファレンス法

リファレンス法は、図8に示すように、工事影響が懸念される地点の観測値と、工事箇所から十分な離隔があり、工事の影響は無いと考えられる別の地点における観測値との相関性から、工事影響の有無を分析する手法である。

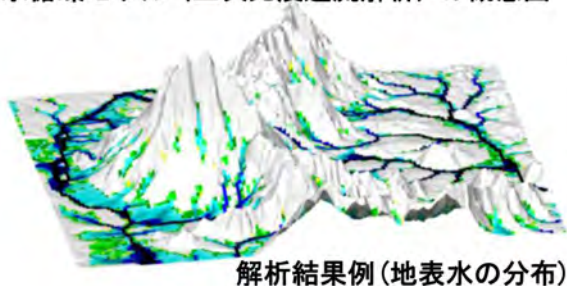
具体的には、2地点における観測データの相関性に、工事前と工事後で違いがみられた場合、何らかの影響があったと考えられるわけである。

## 5.3 影響分析

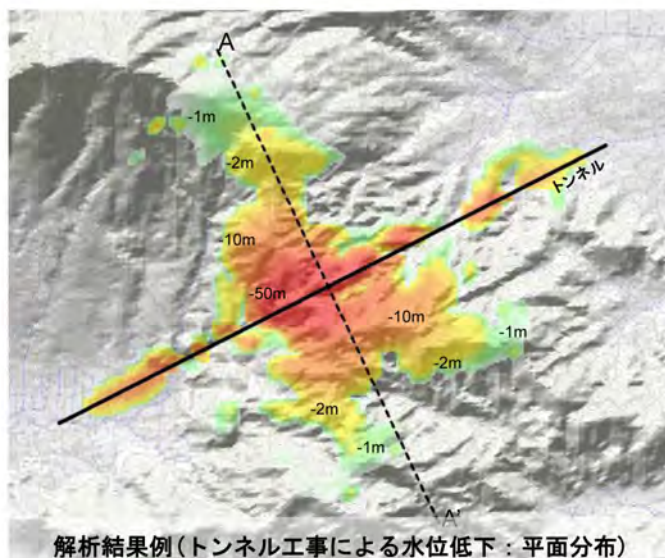
影響リスク分析（3.2節）により、施工サイドで



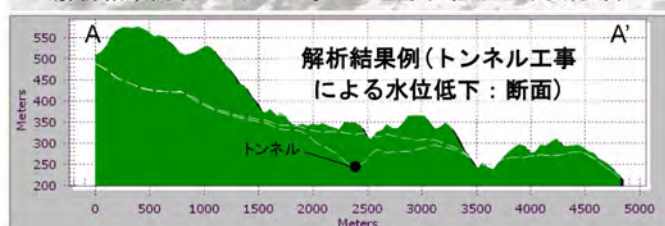
水循環モデル（三次元浸透流解析）の概念図<sup>5)</sup>



解析結果例(地表水の分布)



解析結果例(トンネル工事による水位低下：平面分布)



解析結果例(トンネル工事による水位低下：断面)

図9 三次元浸透流解析のモデル概念、解析結果例

の対策が必要と考えられる場合は、その対策方法を検討することになる。また、モニタリングによる影響判定(5.2節)の結果、工事の影響有りと考えられた場合は、補償対応を行うことになる。その際、対策工法の効果確認や、補償に向けた関係者への説明のために、その影響メカニズムを分析して示すことが求められる。

そのような場合、5.1節にて触れた数値解析(浸透流解析)が有効である。対象地域の水理地質構造を三次元モデルに表現し、数値解析によって水循環系を再現した上で、対策工も考慮したトンネル工事を条件に与えたシミュレーションを行う。地表水や地下水の流れと、その変化を任意の地点にて推定することが出来るため、対策効果の確認、代替水源の適地検討や、工事による水利用箇所への影響の分布傾向の説明等に有効な情報を提示することが出来る。

## 6. おわりに

本稿では、土木分野(トンネル掘削)における環境保全に関する検討を例にとり、水文調査における各種技術を紹介した。これらの技術は全て、水資源そのものを課題とする「水循環の健全化」や「地下

水マネジメント」の分野にも適用可能である。

様々な分野において本稿が参考になれば幸いである。

### 〈参考文献〉

- 1) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会：「全国標準積算資料(土質調査・地質調査)令和2年度改定歩掛版」, 2020.9
- 2) 環境省：平成13年度第1回水環境分科会資料2-2 [http://assess.env.go.jp/files/0\\_db/contents/0582\\_02/mizu\\_13\\_1\\_siryou2-2.html](http://assess.env.go.jp/files/0_db/contents/0582_02/mizu_13_1_siryou2-2.html) (2024年9月20日現在)
- 3) (財)国土開発技術研究センター：「地下水調査および観測指針(案)(3班)」, (株)山海堂, 1996.3
- 4) 改定地下水ハンドブック編集委員会：「改定 地下水ハンドブック」, 建設産業協会, 1998.8
- 5) 西村宗倫, 川崎将生：「水循環解析に関する技術資料～地表水と地下水の一体的な解析に向けて～」, 国土技術政策総合研究所資料, No.883, 2016.3

## 沖縄県における不発弾探査とボーリング調査について

ひが だいき\*  
比嘉 大樹\*

K  
ey Word

ボーリング調査, 磁気探査, 地下水の判別

### 1. はじめに

私は沖縄で生まれ育ち、この地で地質調査の経験を積みました。そのため、ボーリング調査の前に不発弾探査（磁気探査）を実施することは至極当然であると定着し、それに基づいて業務に従事してきました。本稿では、沖縄県での不発弾探査の背景と概要、ボーリング調査に伴う磁気探査方法をご紹介します。磁気探査とボーリング調査の実施事例、そこで直面した事象および対処した方法について説明します。

### 2. 沖縄県における不発弾探査の経緯と概要

沖縄県では、昭和49年那覇市の市街地で発生した不発弾爆発事故（死傷者38名）の影響を受け、不発弾探査の取り組みが強化されました。今も尚、不発弾は発見され続けており、その年間発見件数は500件に達します。

沖縄不発弾等対策協議会によって策定された、「埋没不発弾等の磁気探査要領<sup>1)</sup>」にて、ボーリングなど掘削を伴う工事（調査）に対して、事前に磁気探査を実施することが義務付けられました。その後、この取り組みは民間の業務でも行われるようになります。

不発弾探査（磁気探査）は、地中に埋没している不発弾が鉄製であることから、不発弾周囲に発生する微弱な磁気異常を検出するものです。この方法は、使用する磁気傾度計（両コイル）を動かすことによって生じる微弱電流を発生させ、地球の磁場と異なる磁気異常を感知する仕組みを利用します。

### 3. ボーリング調査に伴う磁気探査方法

ボーリング調査に伴う磁気探査方法<sup>2)</sup>を以下に示します。

- ①水平探査：平坦地などにおいて、平面的に探査を実施したのち、解析を行い不発弾等の有無や埋没位置を把握する方法（写真-1）。



写真-1 水平探査状況

- ②鉛直探査：ボーリングマシンを使用し、鉛直方向に削孔・探査して地下解析を行い、不発弾等の有無、埋没深度を特定する方法（写真-2）。不発弾の大きさで探査可能範囲や想定貫入深度が異なり



写真-2 鉛直探査状況

\*株式会社東京ソイルリサーチ 沖縄営業所

ます。想定不発弾に対する探査有効範囲は次のとおりです。

- ・ 5 インチ砲弾仕様：探査有効範囲 半径 0.5m
- ・ 50kg爆弾仕様：探査有効範囲 半径 1.0m
- ・ 250kg爆弾仕様：探査有効範囲 半径 2.0m

ロータリーボーリングで削孔を行う場合、一定の深度ごとに下方の安全を確認しながら削孔します。下方安全確認の有効距離は以下のとおりです。

- ・ 5 インチ砲弾仕様：探査時の有効距離 0.3m
- ・ 50kg爆弾仕様：探査時の有効距離 0.5m
- ・ 250kg爆弾仕様：探査時の有効距離 1.0m

- ③確認探査：①、②で磁気異常が認められた場合、不発弾か他の鉄類かを判断するため、磁気異常点を掘り起こしてその物体を確認します。磁気異常物が不発弾以外の場合、磁気異常物を撤去・回収し、再度、磁気異常反応の有無を確認します。これらの探査を組み合わせることで調査前の安全性を確保したのち、ボーリング調査を着工します。

#### 4. 磁気探査とのボーリング調査の実施事例

ここから、現場での実施事例について述べます。

調査地：沖縄県の北部に位置する中頭郡金武町地内

地 形：周辺地形は、沖縄本島の島軸に沿って延びる山地の山麓部に広がる丘陵地および台地。

地 質：新生代第三紀始新世の砂岩、頁岩およびその互層、礫岩などからなる嘉陽層を実質的な基盤とし、これを第四紀更新世の琉球層群（琉球石灰岩および国頭礫層）が覆い、上位に造成盛土が施された層序をなします。

- ①調査孔の位置出し後、鉛直探査有効範囲（5インチ砲弾仕様）半径 0.5m（弱）の距離をあけて、磁気探査孔を設置しました。その後、探査孔を中心に 1.0m × 1.0m (1.0m<sup>2</sup>) の水平探査範囲を設定しました（別孔調査位置も範囲内に含めました 図 -1）。

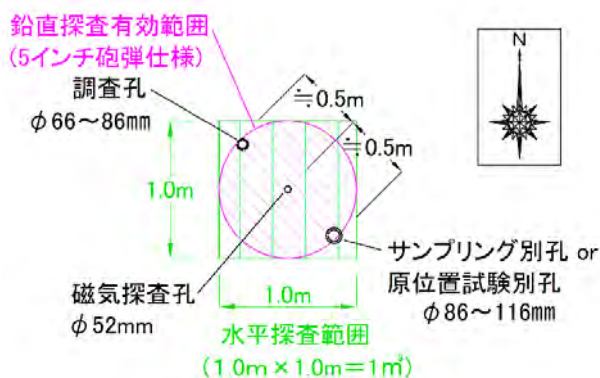


図-1 各孔の配置 (例) 概略図

- ②水平探査を実施。地表付近で磁気異常点が認められたため、確認探査を行い異常物の形状特定に努めました。異常物は鉄屑であったため、手掘りで回収し再探査を実施、磁気異常の消滅を確認しました。

- ③水平探査で深度 0.5m まで安全を確認。磁気探査孔でボーリングマシンを用いた鉛直探査を実施しました。

- ④戦後の盛土（不発弾の混入の恐れが少ない地盤）の層厚が不明であることから、鉛直探査の最短有効距離（5インチ砲弾仕様）0.3m ごとに、下方の安全確認を行い、想定岩盤まで鉛直探査を繰り返しました。

- ④想定岩盤の出現深度は不明であるため、削孔中は、機械に伝わる手ごたえや、削孔用水（真水）の色調変化に留意しました。その後、想定岩盤と思われる深度に到達し、そこから 1 m 程連続性を確認。下方に磁気異常がないことを確認して、探査を終了しました。

その後、ボーリング調査（1m ごとに標準貫入試験を実施）を実施、その結果を基に柱状図を作成し、不発爆弾貫入深度計算式<sup>3) 4)</sup>に情報を入力し、不発弾の貫入深さを導き出しました。

#### 4.1 ボーリング調査時に直面した事象

磁気探査で、調査地点の安全が確保され、ようやくボーリング調査の着工となりました。しかし、ボーリングマシンを設置し、無水掘りを行った際、探査時の削孔用水らしき泥水（実際は調泥剤などを使用しない清水掘り）が、調査孔に染み出してきました。

#### 4.2 対処方法

地下水の判別に支障をきたす恐れがあったため、ベラーを用いて泥水を汲上げてみることにしました<sup>5)</sup>。手順は以下のとおりです。

- ①汲上げ前水位を測定。水位深度 1.5m、孔底深度 2.0m。
- ②汲上げ開始。直後は元の水位まで回復をみせたが、減衰し、水位は孔底付近で落ち着いた。深度 1.9m。
- ③ 30 分ほど放置→再測定。深度 1.9m で変化なし。
- ④水頭の変位がないことから、無水掘りを再開。
- ⑤深度 3m で無水掘りが困難となったが、泥水水位も削孔と共に低下をみせた。泥水水位深度 2.9m 付近。
- ⑥その後、泥水（清水）掘りに切り替えて削孔。毎朝作業前水位を測定した。削孔とともに水位

も低下し、最終的に安定する位置（深度9.1m）を測定しました（図-2）。

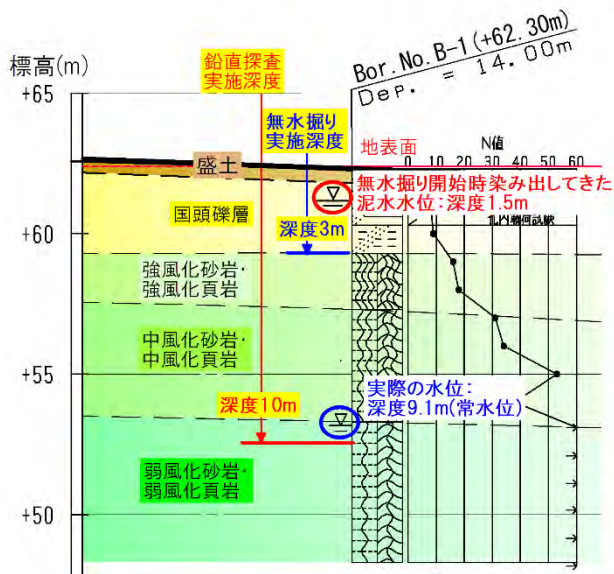


図-2 調査地点の柱状図および実施事例概要

## 5. あとがき

沖縄において、調査対象となる地表、地中、また海底面に最初に接触するのは、他にもない磁気探査です。悲惨な地上戦の経験もあり、「自然な沖縄」に近づくためには、不発弾探査の知識も深めることで、より精度の高い成果を得ることができると考えます。

### 〈参考文献〉

- 1) 沖縄不発弾等対策協議会：「埋没不発弾等の磁気探査要領」, 1974.5, 改定 2009.4
- 2) 沖縄不発弾等対策協議会決定：「磁気探査指針」, 2009.3
- 3) 内閣府沖縄総合事務局開発建設部：「磁気探査実施要領（案）」, 2012.10
- 4) 沖縄県土木建築部：「磁気探査実施要領」, 2020.1
- 5) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会：「ボーリングポケットブック 第6版」, オーム社, 2023

# 各地の博物館巡り

北海道大学

## 北海道大学総合博物館



外観

### はじめに

北海道大学総合博物館は1999年旧理学部学舎に北海道大学（農学部、理学部、工学部、医学部、水産学部、獣医学部など）の130年に渡る研究成果を展示紹介するために開館したもので、大人から子供までが十分に楽しめ、最近では外国人客も訪れるほどの観光スポットにもなっています。

旧理学部校舎は昭和4年（1929年）に建設され、昭和時代初期の古き良き景観を残していますが、現在も教室として使用されているのも珍しいかと思えます。

### 展示内容

#### ○北大の歴史

北大の前身である札幌農学校から受け継がれるクラーク博士の想いが、また、それを引き継ぎ後世に伝えた新渡戸稲造や内村鑑三、有島武郎、大島正建らの活躍、それを引き継ぎ発展した北大の今の役割が紹介展示されています。



クラーク博士の紹介

#### ○展示室

展示は、学術研究成果のほか、北海道に関する歴史、宇宙開発等、その時々で特別展示が企画されることもあります。

個人的には以下の展示が目を引きました。



地球46億年の歴史が紹介されています。



先人達から現在にいたる地質調査道具。



旧樺太に設置された国境標石

## 旧理学部校舎について

旧理学部本館の建物では以下の見どころがあります。

○外壁が茶褐色のスクラッチタイルおよびテラコッタ張りのモダン・ゴシック風の建物（本稿表題写真）。昭和4年（1929年）11月に完成し北大構内にある鉄筋コンクリートの本格的建築としては最も古い建物。

○特に目を引くのが、正面玄関から入ってすぐの中央階段で三階まで吹き抜けの愛称「アインシュタイン・ドーム」。この吹き抜けを取り囲むように、三階の天井近くの白壁にはめ込まれたかなり大きな陶板製のレリーフも楽しめます。



○地質関係者にはお勧めの石碑があります。北海道幌満産のカンラン岩です。美しい黄緑色の綺麗な岩肌に魅かれます。



## カフェ、売店

博物館内では軽食等を飲食できるミュージアムカフェ・ボラスが営業しており、北大試験農場産の牛乳や道内産のアイスクリームや野菜等を楽しむことができるほか、宴会等も引き受けていただけます。また、売店が営業しており、鉱物標本・化石レプリカ・恐竜人形等が販売されており、子供の興味を引きそうな物が多数陳列されていて、ウインドウショッピングをするのも楽しいです。

なお、カフェ、売店の設置にあたっては当北海道地質調査業協会も微力ながら協賛しております。



## ご利用案内

### ●所在地・連絡先

〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目  
TEL: 011-706-2658

### ●開館時間

10:00 ~ 17:00

### ●休館日

月曜日（※祝日は開館し、週明けの平日を休館）  
年末年始 12/28 ~ 1/4

### ●入館料

無料

### ●ホームページ

<https://www.museum.hokudai.ac.jp/>

[北海道地質調査業協会技術顧問 渡部 靖]

# 大地の恵み

## 東海地方の焼物文化 ～今は存在しない巨大な湖～

### 1. 焼物の産地，東海地方

東海地方には美濃焼（岐阜県）、瀬戸焼（愛知県）、常滑焼（愛知県）、伊賀焼（三重県）、四日市萬古焼（三重県）といった数多くの焼物文化が発達している。特に日本六古窯（ろっこよう）と呼ばれる中世から現代まで生産が続く代表的な6つの窯（瀬戸・常滑・越前・信楽・丹波・備前）の内、瀬戸焼と常滑焼の2つも入っており、古くから東海地方で焼物文化が発達していた証である。



写真1 常滑やきもの散歩道「土管坂」  
(とこなめ観光ナビ)

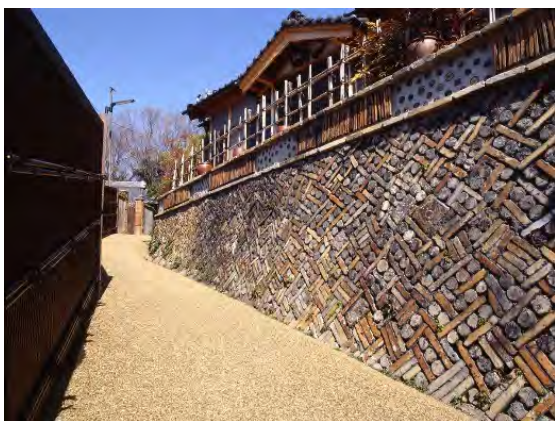


写真2 瀬戸市人気スポット「窯垣の小路」  
(AichiNow)

なぜ東海地方で焼物文化が発達したのか。それは「今は存在していない巨大な湖」が関係している。

新第三紀鮮新世（533万2千年前から258万8千年前）に古瀬戸内海（第二瀬戸内海）と呼ばれる沈降帯が形成された。第二瀬戸内海は淡水湖が一系列に連なるような形状をしており、海水の浸入はなかったとされている。淡水湖はそれぞれ、東海湖・古琵琶湖・奈良湖・菖蒲谷湖と名付けられており、東海地方にはこの内の東海湖と古琵琶湖が存在していた。



図1 第二瀬戸内海（名古屋地域地質断面図集 解説）

東海地方で焼物文化が発達したのは、これらの淡水湖底に溜まった粘土が焼物の原料として適していたからであり、特に瀬戸では瀬戸陶土層と呼ばれる良質な陶土が採取され、瀬戸焼の特徴である白く美しい焼物を作り出している。

### 2. 東海湖

東海湖は約650年前（第三紀中新世末期）に現在の知多半島南部に誕生したと考えられており、その



後北へ拡大して、約 400～500 万年前（新第三紀鮮新世前期）に現在の伊勢湾、名古屋市、濃尾平野南部、伊勢平野北部を含めた巨大な湖へと成長した。なお、この頃が東海湖の最大期と言われている。その後縮小しつつ北西へ移動し、約 120 万年前（第四紀更新世）に消滅したとされている。東海湖に堆積した土砂は東海層群と呼ばれ、最も厚い所は濃尾平野の西部地下で 1000m 以上の層厚を有している。焼物の産地である瀬戸・常滑・美濃・四日市はこの東海層群が地表に露出している地域である。

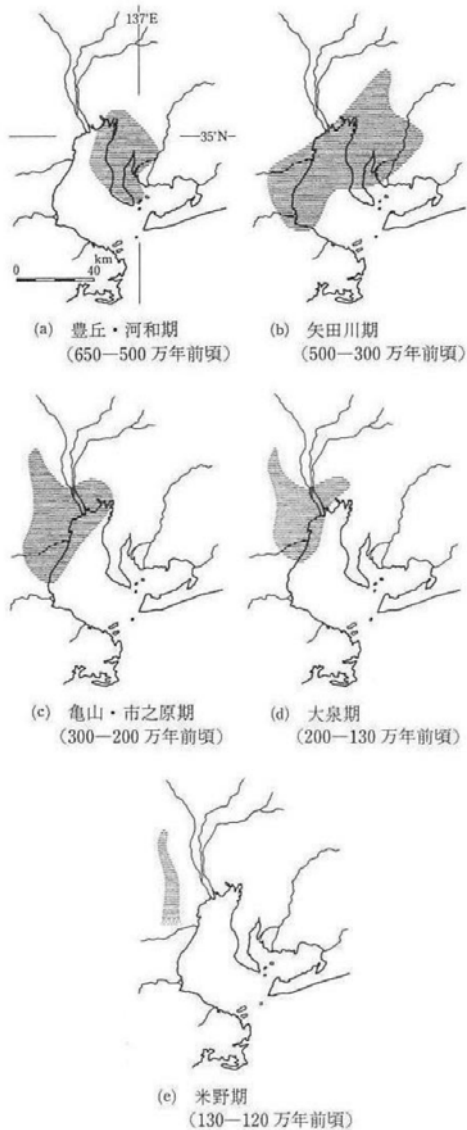


図2 東海湖の変遷（日本の地質5 中部地方Ⅱ）

### 3. 古琵琶湖

古琵琶湖は約 400 年前（新第三紀鮮新世中期）に伊賀盆地の東部に誕生したと考えられており、約 300 年前（鮮新世工期）には甲賀地方に広がり広大で深い湖となった。その後、伊賀盆地の隆起と近江

盆地在沈降したことにより北へ移動し、約 30～40 万年前（第四紀更新世）に概ね現在の琵琶湖の位置と形になったと考えられている。古琵琶湖に堆積した土砂は古琵琶湖層群と呼ばれ、伊賀盆地に分布するものが最も古く、古琵琶湖の移動と共に、北へ行くほど新しい堆積物となっている。伊賀焼はこの古琵琶湖層群に分類される陶土を原料としており、日本六古窯に数えられる信楽焼も伊賀焼と同様、古琵琶湖層群の陶土を原料としている。

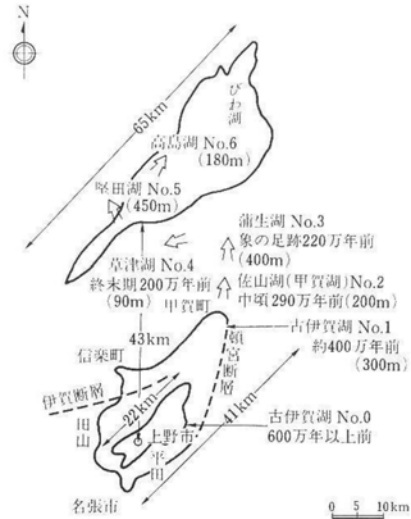


図3 古琵琶湖の移動（三重 自然の歴史）

### 4. おわりに

近年、瀬戸や常滑では焼物の販売だけではなく、古い窯跡や歴史、町並みを観光資源として保存・整備しているため、観光地としての側面もある。もし訪れる機会があれば、散策を楽しみつつ、人類の誕生より以前に存在した巨大な湖に思いを馳せてみてはいかがでしょうか。

[小島 慎一郎：青葉工業株式会社]

#### 〈参考文献〉

- 山下昇・粕野義夫・糸魚川淳二（1988）：日本の地質5 中部地方Ⅱ
- 中沢圭二・市川浩一郎・市原実（1987）：日本の地質6 近畿地方
- 磯部克（1991）：三重 自然の歴史
- 名古屋地盤図委員会（1987）：名古屋地域地質断面図集 解説
- 常滑市：とこなめ観光ナビ  
<https://www.tokoname-kankou.net/>
- 愛知県：AichiNow  
<https://www.aichi-now.jp/>

## 各地に残すべき

## 地形・地質

## 和泉層群基底礫岩と松山城 (愛媛県)

## 1. はじめに

JR松山駅に降り立ちますと伊予の青石（緑泥石片岩）に刻まれた正岡子規の「春や昔15万石の城下かな」の句碑が迎えてくれます（写真1）。この城下の中心となるお城は松山城です。ここでは、松山城が立つ城山（正式名：勝山）の地形・地質を紹介します。



写真1 JR松山駅前に立つ正岡子規の句碑

## 2. 地形概要

司馬遼太郎は長編作品「坂の上の雲」の冒頭で城山の地形を次のように記述しています。「城は、松山城という。城下の人口は士族を含めて三万。その市街の中央に釜を伏せたような丘があり、丘は赤松でおおわれ、・・・」。城山は、松山市の市街地に立つ比高100m程度の小さな独立峰で、山頂の本丸に天守が立ち、麓の三之丸は広い公園として整備されています。三之丸公園から城山の優美な姿を眺めることができます（写真2）。

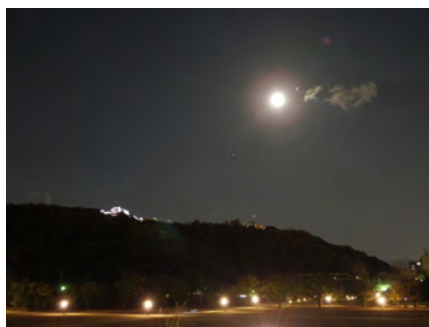


写真2 「釜を伏せた丘」と言われた城山と坂の上の雲

## 3. 地質とお城の概要

四国の地質は、主要な地質帯が東西方向に分布することで特徴付けられます（図1）。城山は領家帯の花崗岩類と和泉層群からなり、和泉層群の基底礫岩も露出します。お城は全国で3～4万程度存在するとされています。この内、特に規模が大きく歴史的・文化的に価値の高いお城は、日本100名城、続日本100名城に指定されています。これらの200名城の中で、城山が日本列島の主要な2つの地質帯からなり、基底礫岩も存在するお城は、松山城と同一層準の湯築城（松山市）及び引田城（香川県東かがわ市）の3城しか無いかと思います（筆者が200名城を完城しての印象ですが）。この3城で現存天守があるのは松山城のみです。



図1 四国の地質分布とお城の位置 4) に追記

## 4. 城山の地質探訪

## (1) 地質概要

城山の北側を領家帯の花崗閃緑岩が、南側を和泉層群の砂岩優勢層が分布し、基底礫岩が東西方向に帯状に伸びます（図2）。地質観察は、城山自体が国指定の史跡公園であるため立入が制限されるものの、山裾部の市道沿い、4ルートある登城道の所々や天守のある本丸等で可能です。

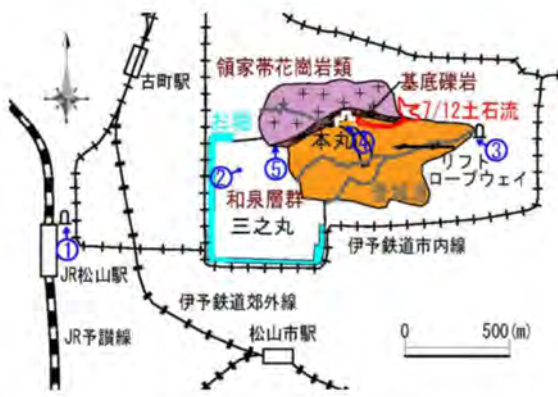


図2 城山の地質と周辺位置図

全国のお城の多くは桜の名所となっています。松山城も全国のさくら名所100選に選定されています。この桜の一部も併せて紹介します。

## (2) 和泉層群

4ルートの登城道の内、東側の東雲口にはリフトとロープウェイも設置されています。この近くに、初代城主の加藤嘉明公の騎馬像が立ちます。騎馬像の周囲は、擁壁で覆われている箇所もありますが、和泉層群の硬質な砂岩を確認できます(写真3)。所によっては、泥岩を挟み南傾斜であることが分かります。



写真3 登城道の1つ東雲口に立つ初代城主・加藤嘉明公の騎馬像と和泉層群の砂岩

## (3) 基底礫岩

基底礫岩は、西側山裾部や西側の登城道である古町(こまち)口、本丸の本壇周辺で広く確認できます。基底礫岩には、花崗閃緑岩、チャート、泥岩等の亜円礫程度の礫が含まれています(写真4)。礫径はφ5~10cm程度が主体ですが、場所によってはφ20~30cmの巨礫も認められます。



写真4 現存天守の下、本丸に露出する基底礫岩

## (4) 不整合面

基底礫岩と下位の花崗閃緑岩との不整合面は、1m程度までは追跡できますが、後は表土剥ぎが必要となります。史跡公園内であるため、表土剥ぎは諦め、落葉を払って良しとします(写真5)。



写真5 花崗閃緑岩と礫岩との不整合面付近(ポールの中央付近)

## 5. おわりに

1602年、加藤嘉明公の築城に先立ち、3箇所の候補地の内、城下の運営に最も適した場所として、今の城山が選定されました。これは、現在の土木建築事業と同様に、如何に地形を見ること(背後の地質を知ること)が重要であるかを示しているかと思います。

本稿執筆中の7/12に城山の東斜面で土石流が発生し、麓にお住まいの3名の方が亡くなるという大変痛ましい災害が発生しました(図2)。謹んでお悔やみ・お見舞いを申し上げますと共に、原因究明の後、十分な対策が取られ、日頃の管理が適切に成されることを切に願う次第です。

〔株アースコンサルタント 高柳 朝一〕

### 〈参考文献〉

- 1) 司馬遼太郎: 坂の上の雲(一), 文春文庫
- 2) 日本城郭協会: 日本100名城と続日本100名城に行く
- 3) 松山市教育委員会: 松山城, 創元社
- 4) 四国地質調査業協会: HP

# 地層処分事業と地質調査の展望 (前編)

にしぎ あきら\*  
西崎 耀\*

K

ey Word

地層処分, 放射性廃棄物, 地下深部, リスク, 地質環境特性, 地質調査,  
物理探査, 地表踏査, ボーリング調査

## 1. はじめに

私たちが日々生活し、経済活動を行うためには安定した電力供給が不可欠だが、我が国はエネルギー資源に乏しく、発電のためのエネルギー源のほとんどを輸入に依存している。そのため、我が国は他国の情勢にエネルギー源の供給が左右されやすいという脆弱性を抱えている。この脆弱性に対処すべく、現在に至るまで国と電気事業者は、エネルギー源供給国の地政学的リスクをはじめとした様々な点に配慮しつつ、特徴の異なる発電方法を組み合わせて電気を生み出してきている。

我が国の商業用原子力発電は1966年に開始し、これまでに原子力を利用して多くの電力を生み出し、消費してきた。原子力発電を利用する際には放射性物質を含む廃棄物が発生する。現在、我が国においては、このような放射性廃棄物のうち、後述する高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の一部を最終処分する方法として地下300m以深の安定した岩盤に廃棄物を埋設する「地層処分」が実現可能性の高い方法であると評価し、地層処分を進めることとしている。

現在の処分概念である地層処分について、我が国では1976年以来、動力炉・核燃料開発事業団（現在の国立研究開発法人日本原子力研究開発機構。以下、「JAEA」という。）を中心に研究開発が進められてきた。この成果を技術的な基盤とし、2000年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」という。）が制定され、地層処分事業の実施主体として原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）（以下、「NUMO」という。）が設立された。

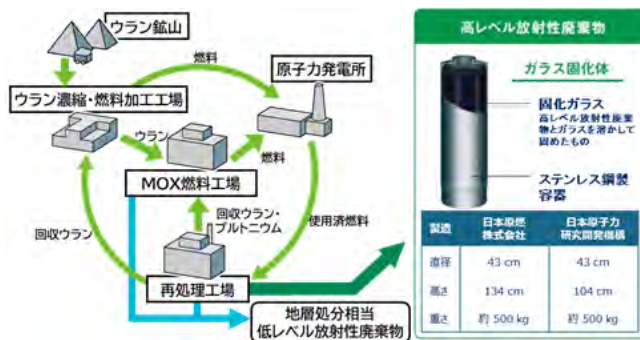


図1 原子燃料サイクルと地層処分対象の放射性廃棄物

## 2. 地層処分の対象となる放射性廃棄物

我が国で原子力発電により発生した使用済燃料は、青森県六ヶ所村に立地する原子燃料サイクル施設において、ウランとプルトニウムといった再び燃料として利用可能な物質を回収するため再処理される（図1）。回収後に残る放射性廃液については高温のガラス原料と溶かし合わせ、ステンレス容器の中で冷やし固める。これを「ガラス固化体」と呼び、「高レベル放射性廃棄物」とは、このガラス固化体のことをいう。図1にはその緒元を示した。ガラス固化体は極めて高い放射能を持ち、放射能の減衰に長い時間を要する。製造した直後のガラス固化体の表面温度は200℃を超えるため、冷却のため30年から50年程度貯蔵・管理して冷却した後に最終処分する。

一方、使用済燃料を再処理する過程において、ガラス固化体にする放射性廃液以外にも、燃料被覆管のせん断片や廃銀吸着剤などの低レベル放射性廃棄物が発生する。これらには放射能レベルが

\*原子力発電環境整備機構 技術部

比較的高く半減期の長い放射性物質を含むものもあり、このような廃棄物についてもガラス固化体と同様に地層処分の対象とし、これを「TRU 廃棄物」と呼ぶ。TRU 廃棄物はその種類によってキャニスタ・ドラム缶・角形容器などに収納し、処分に適した廃棄体に加工される。

### 3. 地層処分検討の歴史

我が国で原子力発電の利用を始めてから 50 年以上が経過した現在、未処理の使用済燃料をガラス固化体に換算し、現存するガラス固化体の本数と合算すると、我が国には約 27,000 本分の高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）が存在することになる。この高レベル放射性廃棄物の最終処分方法として、地層処分が選択された理由を振り返る。1950 年代に米国において岩塩層への処分が考えられたのち、1970 年代後半には各国において地層処分の研究が本格化した。この時点では、岩塩層に限らず様々な地層における放射性物質の閉じ込めに必要な条件について検討が行われた。また、1980 年代には天然の地層が有する閉じ込め機能に人工的な対策を組み合わせ放射性物質を閉じ込める概念が提示され、現在の地層処分システムの基本となる考え方が確立された。地層処分以外の方法についても各国で検討が行われ、「海洋投棄」「氷床処分」「宇宙処分」の 3 つが主に検討されたが、国際条約上の問題や技術的信頼性への懸念などの理由から選択されなかった。

我が国では 1962 年に最終処分の方法について議論が開始された当初、「深海投棄」と「天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れる」という方式が挙げられた（原子力委員会、1962）。しかし、深海投棄は 1975 年にロンドン条約によって国際的に禁止され、原子力委員会は諸外国の高レベル放射性廃棄物対策を調査し、地層処分に重点を置き検討することとなった。

以降、動力炉・核燃料開発事業団（現 JAEA）を中心として、地層処分の実現可能性について調査・研究が進められた。そして 1999 年、後身である核燃料サイクル開発機構（現 JAEA）は「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－」と題する技術報告書を公表し、「地層処分を事業化へと進めるための、信頼性のある技術的基盤が整備された」と総括した（JAEA、1999）。この時点を目に我が国の地層処分は調査・研究から事業を実施する段階へと移行した。

2000 年頃までには、各国においても我が国と同

様に地層処分が技術的に実現可能であるという結論が示された。その科学的根拠は技術報告書の形で報告され、国際機関のレビューにより信頼性が確認されている。近年、フィンランドとスウェーデンは処分場サイトが決定され、フランスでは処分場候補地としての許認可取得の段階に進んでいる。一方で、日本を含めたほかの国々においては技術的信頼性が示されながらも、社会的な合意が障壁となって、サイトの選定が完了できていない（経産省・原環センター、2024）。

### 4. 地層処分の仕組み

「地層処分」とは、その名のとおおり、深い「地層」に放射性廃棄物を「処分」する方式である。地下深部は自然環境や人間の活動による影響を受けにくい。このことは、我々人間の生活圏から放射性廃棄物の危険性を「隔離」することにつながる。また、地下深部では岩盤の透水性や動水勾配が小さく、岩盤には放射性物質を吸着する性質があるため、放射性物質を長期間留まらせることができる。加えて地下深部の地下水は酸素濃度が低く還元性であるため、放射性廃棄物を格納する金属容器などの腐食を抑えることができる。これらのことは放射性物質を地下に「閉じ込め」ることにつながる。この「隔離」、「閉じ込め」に関して、地下深部の持つ特徴を図 2 に示した。

これらの性質を持つ岩盤（以下、「天然バリア」という。）に加え、人工物からなるバリア（以下、「人工バリア」という。）を合わせて図 3 に示す「多重バリアシステム」とし、これにより放射性廃棄物の長期にわたる隔離と閉じ込めを実現する。

人工バリアは 3 層で構成することを考えている。高レベル放射性廃棄物の場合は、ガラス固化体そのものが 1 層目の人工バリアであり、極めて水に溶け

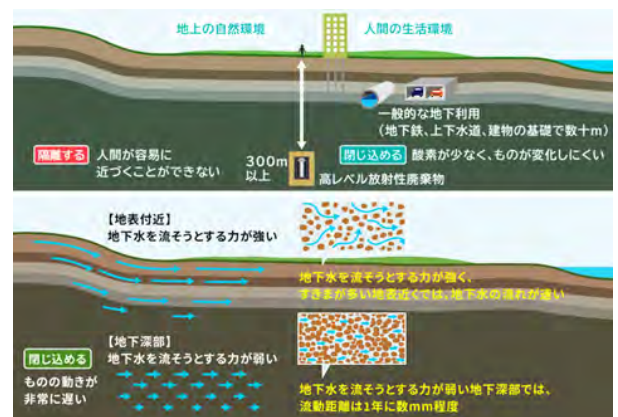


図 2 地下深部の「隔離」「閉じ込め」に関する特徴



図3 高レベル放射性廃棄物に対する多重バリアシステム

にくい特徴を持つガラスの分子構造の中に放射性物質を取り込むことで、放射性物質の溶出を抑える。2層目の人工バリアはオーバーパックと呼ばれ、金属製の容器にガラス固化体を格納することで地下水とガラス固化体の接触を遮断し、地下水による放射性物質の流出を防ぐ。3層目の人工バリアはオーバーパック周囲の緩衝材であり、吸水により膨潤する性質を持つベントナイトを主材料とする。膨潤した緩衝材は地下水の流動に伴う放射性物質の移動を抑えることができ、また粒子表面に放射性物質を吸着する働きを持つ。

## 5. 地層処分のリスクとその対策

### 5.1 サイトの選定

前述の多重バリアシステムの考え方に基づいて放射性廃棄物の処分を検討するにあたっては、安全性に影響を与えるリスク要因を網羅的に抽出したうえで、火山の影響を回避するなどさまざまな要件を考慮して処分場を立地するサイトの選定と施設設計を行い、これらの方策によって長期にわたる処分場の安全性を確保できるか確認する必要がある。

サイト選定においては、地質環境特性の変動幅が放射性廃棄物の閉じ込めと隔離を行ううえで適切な範囲に維持されている地質環境かどうか、ということについて考慮する。考慮すべき地下深部の環境としては、火山や活断層の有無、地温の高低、地下水の水質・動きなど多岐にわたる。

例えば火山活動については、マグマが処分場を直撃すると処分場の隔離機能が失われること、火山近傍の高い地熱や酸性地下水が人工バリアの閉じ込め機能の低下をもたらす可能性があることから、これらの影響を避けられる地質環境であることを考慮する。我が国では、図4に示すように火山の位置は過去数百万年の間ほとんど変化しておらず、プレートの運動傾向が大きく変わらなければ、今後10万年程度はほぼ変化しないと考えられている (JAEA, 1999)。これらの知見等を踏まえながら、第四紀に

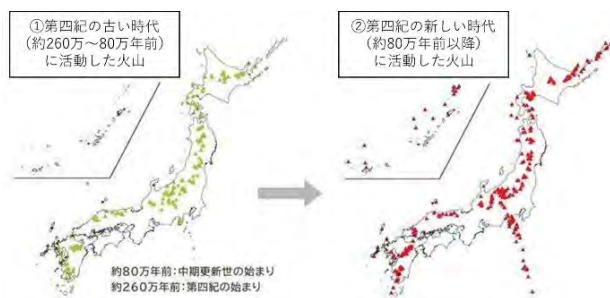


図4 過去数百万年に活動した火山の分布 (産業技術総合研究所地質環境総合センター, 2013に基づいて作成)

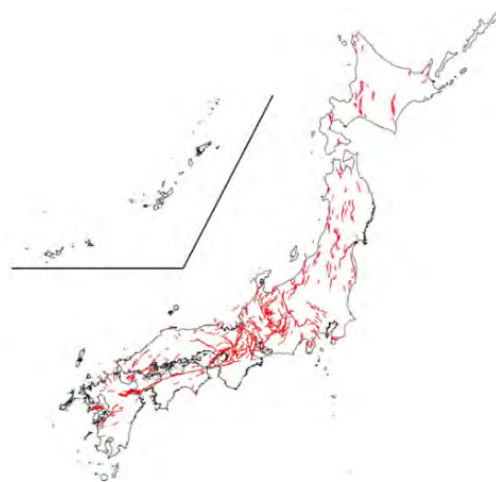


図5 活断層の分布 (出典: 活断層データベース)

活動した火山の活動中心から半径15km以内を避けてサイトを選定する。

活断層については、処分場内で断層が活動すると処分場の閉じ込め機能が損なわれる恐れがあるため、活断層を避ける必要がある。図5に示す我が国の活断層については、繰返し同じ場所で活動すると考えられるため、すでに活断層が確認されている場所は避ける。これに加え、まだ検知されていない活断層が存在するという前提として、物理探査、ボーリング調査、トレンチ調査などを行い、活断層の有無を調査する。

地温については、緩衝材の温度が100℃を大きく超える期間が長期にわたって継続する場合、緩衝材の熱変質 (ベントナイトのイライト化など) による閉じ込め機能低下の恐れがあるため、そうならない地温の地域を選定する。

地下水については、地下施設周囲の地下水の流れが速い場合、仮に放射性物質が地下施設外に漏れ出た際に放射性物質が生活圏に早く到達してしまう。このことから地下深部に期待する閉じ込め機能が低

下する恐れがあるため、地下水の流れが緩慢な地域を選定する（図6）。

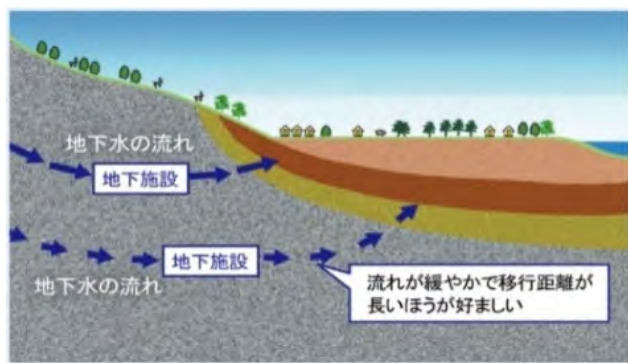


図6 地下水の流れを考慮した地下施設配置

## 5.2 処分場の設計

処分場の設計においては、サイトの地質環境データをもとに、周辺環境への影響を最小限に抑え、放射線学的安全性や一般労働安全を確保して建設・操業できるように、また処分場閉鎖後には、放射性廃棄物を長期間にわたり隔離し、閉じ込めるという安全機能を備えるように工学的な対策を施した処分場の仕様を提示する。安全機能が実際に機能するかどうかについては、様々な状況を考慮して後述する安全評価を実施し確認する。所要の安全性の確保が困難と判断されれば、設計の見直しを行う。

設計を行う処分場は人工バリア、地上施設、地下施設から構成される。高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの構成要素は前述したとおりである。図7に示した高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの例は、ブロック状に成形した緩衝材を処分孔に積み上げる方法であり、北欧の国々などでも採用されている地層処分的人工バリアの方式である。TRU 廃棄物はガラス固化体よりも発熱量が小さいことから、図7に示すように処分坑道内に集積して定置する方法を考えている（NUMO, 2021）。この方法による人工バリアは、廃棄体パッケージ、廃棄体パッケージ間充填材、緩衝材から構成される。地上施設は廃棄体を受け入れ、処分場の建設・操業・閉鎖までの作業を支援する一群の施設であり、建設時の掘削土を閉鎖時まで保管する掘削土置場も含まれる。地下施設はさまざまな用途の坑道群で構成され、地上から地下へのアクセス坑道、ガラス固化体などの廃棄体をほかの人工バリアと共に埋設するための処分坑道、アクセス坑道から処分坑道までの通路となる連絡坑道などがある（図8）。地下施設は40,000本以上のガラス固化体及び19,000m<sup>3</sup>以上のTRU 廃棄物を埋設可能なものとし、処分坑道の総延長は200km程度に及ぶ。

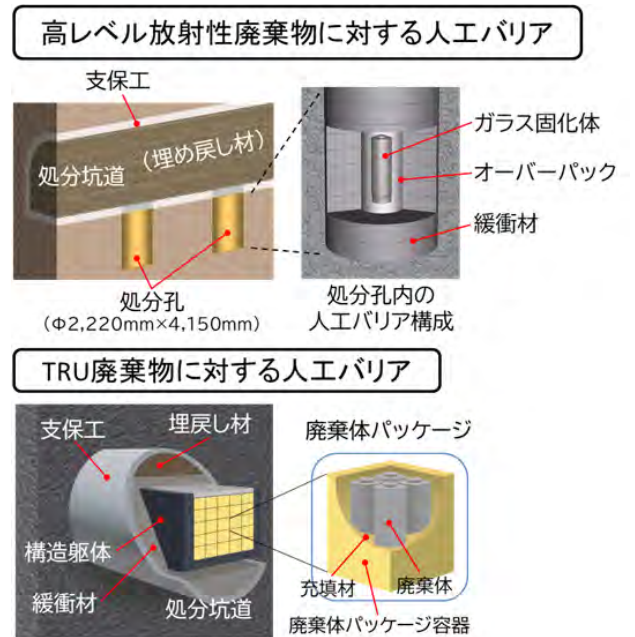


図7 人工バリアの例

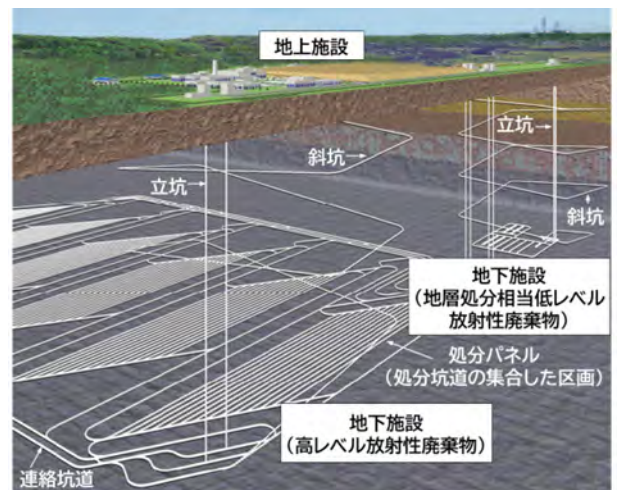


図8 地上施設・地下施設のイメージ

## 5.3 安全評価

安全評価では、処分場閉鎖前・閉鎖後の安全性について扱う。

閉鎖前の安全確保は、既存の放射性廃棄物処分に関する規則や国際機関の示す指針をもとに、操業中に操業中の放射線防護及び一般労働安全を脅かす可能性のある条件や事象の一連のつながりをシナリオとして作成し、これらが生じたと仮定した場合の影響について評価を行う。

閉鎖後の安全評価については、適切にサイト選定し設計した処分場が数万年以上の長期にわたって隔離・閉じ込め機能を発揮し、生活圏に有意な影響を与えないことを評価する。この評価は実験等によ

る直接の確認は不可能であるため、主にシミュレーション等の解析によって確認を行う。不確実性を考慮して将来の処分場の状態変遷をシナリオとして作成し、これに基づいて処分場の状態や放射性物質の移行挙動のモデル化、並びに室内試験や原位置試験等によるデータの取得を行い、解析によって人間の生活環境への影響を線量として算出する。これを安全規制などで示される基準値との比較によって安全性の確認を行う。これにより安全性が確保できないと判断される場合はサイト選定や設計の見直しを行い、改善のためのフィードバックとする。

このように、サイト選定による対応、設計による対応、安全性の確認を繰り返し行っていくことで、都度それぞれの対応を見直し、処分場の安全性を確保する。

## 6. サイト選定プロセス

地層処分を行う処分地の選定は、市町村から文献調査の実施に対して応募、または国からの申し入れを自治体が受諾した後、文献調査、概要調査、精密調査の順で図9に示すように段階的に進めていく。調査区域の絞り込みにあたっては、最終処分法により規定される、実施すべき調査と次の段階に進むために満足すべき要件（以下、「法定要件」という。）を満たす必要がある。NUMOは法定要件や規制機関の指針に基づき、地質環境の調査結果が適合するか確認する。

各調査段階においては法定要件に基づいてサイト選定による対応、設計による対応、安全性の確認を繰り返し実施する。また、それぞれの調査で得られた結果は地域の自治体や住民の皆様に対し提供・説明し、広く一般に向けて公表する。調査を次の段階に移行する際には、当該市町村長・都道県知事の意見を聴取し、反対の意見が示された場合には次の段

表1 文献調査段階における評価 (NUMO, 2020 を編集)

文献調査で評価する要件	評価に用いる情報	
地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと 将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずる恐れが少ないと見込まれること	火山・火成活動等	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 第四紀の火山・火口の存在</li> <li>✓ 火山噴出物や貫入岩の分布・年代</li> <li>✓ 火山周辺の地温</li> <li>✓ 地下水の酸性度 etc..</li> </ul>
	断層活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 活断層の存在・形状</li> <li>✓ 断層破砕帯の幅、変形の及ぶ場所</li> <li>✓ 活褶曲、活換曲の存在、変形の及ぶ場所</li> </ul>
	隆起・浸食	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 段丘面の分布と年代</li> <li>✓ 侵食の規模</li> </ul>
経済的価値のある鉱物資源の存在に関する記録がないこと	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 鉱物資源の種類・分布・規模・品質</li> <li>✓ 権利関係</li> </ul>	
最終処分を行おうとする地層が、未固結堆積物であるとの記録がないこと	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 未固結堆積物の分布・形状</li> </ul>	

階には進まない。

文献調査の段階では実地の調査は実施せず、調査対象地区に関する公開されている地質図や学術論文など、品質が確保され、一般的に入手可能な文献・データを収集し、必要な情報を抽出する。検討の際には火山、活断層、隆起、侵食などの「地層の著しい変動」について評価し(表1)、将来の人間侵入の動機となりうる鉱物資源や、地下施設建設が困難となりうる未固結堆積物を回避する。

概要調査の段階では、地層処分の候補となる地域とその周辺の地層に対して、空中、地表、水上、水中からの物理探査、地表の踏査、ボーリング調査などを実施する(図10)。これらの一連の地質環境調査は段階的かつ体系的に進められ、精密調査実施について検討を行うためのデータを収集する。データの評価では、火山や活断層など、地層処分を行うにあたり問題のある恐れのある場所が避けられていることを確認する。また、これらの評価をもとに精密調査地区の選定を行い、精密調査に向けて地下調査施設を設置することが可能な深度及び設置環境とし

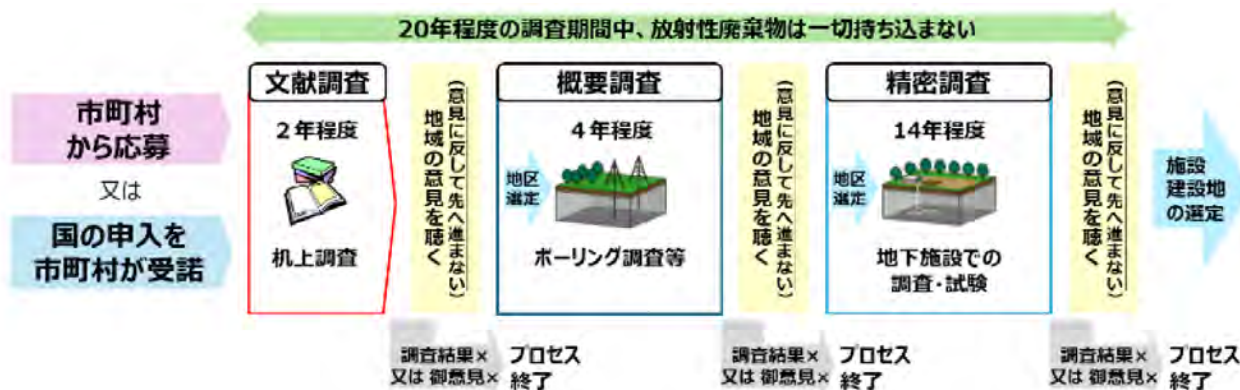


図9 段階的なサイト選定プロセス





図 10 概要調査で用いられる調査手法の例 (NUMO, 2018 を編集)

て好ましい範囲について見通しを示す。

精密調査の段階では、調査は二つのフェーズに分けて行うことを予定している (NUMO, 2021)。

まず、処分場候補地周辺の候補母岩の詳細な地質環境特性を取得する。次に、地下調査施設を建設し、地下深部の地質環境特性や建設に伴う地質環境特性の変化を詳細に把握する。処分施設の建設地を選定する際には、岩石の強度や酸性・塩基性などの物理的・化学的性質を調査し、地下水の性質や岩盤の特性が地層処分に適している場所を特定する。

NUMO が 2020 年 11 月から開始した北海道の寿都町及び神恵内村の文献調査においては、これまでに蓄積してきた技術基盤を活用して調査を行うとともに、「文献調査段階の評価の考え方 (案)」を作成した。本案が国の審議会および意見公募を経て、国の資料として公表 (2023 年 11 月) された「文献調査段階の評価の考え方」に基づき、文献調査報告書 (案) を取りまとめ公表し (2024 年 2 月)、数回の審議会の審議の意見を反映して修正しとりまとめた (2024 年 8 月)。また、2024 年 6 月には新たに佐賀県玄海町にて文献調査を開始している。

## 7. 後編に向けて

以上、前編では地層処分が選択された経緯や地層処分における多重バリアの概念、地層処分に付随するリスクと安全確保のための考え方など、地層処分全体の概要を述べてきた。後編においては、地質環境や実施する調査にフォーカスしたトピックをピッ

クアップし、地層処分事業からみた地質調査業界への期待などについて触れていく。

### 〈引用文献〉

- 原子力委員会：「廃棄物処理専門部会中間報告書を提出」, 「原子力委員会月報」第 7 巻第 5 号, 原子力委員会ホームページ, 1962  
<https://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V07/N05/19620506V07N05.html> (2024 年 7 月 22 日現在)
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO)：「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—」, NUMO-TR-20-03, 2021
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO)：「地層処分、安全確保の考え方」, NUMO ホームページ, 2018  
[https://www.numo.or.jp/kagakutekitokusei\\_map/pdf/anzen\\_a4.pdf](https://www.numo.or.jp/kagakutekitokusei_map/pdf/anzen_a4.pdf) (2024 年 7 月 22 日現在)
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO)：「地層処分に関する文献調査について」, NUMO ホームページ, 2020  
[https://www.numo.or.jp/government/oubo/pdf/literature\\_survey\\_202306.pdf](https://www.numo.or.jp/government/oubo/pdf/literature_survey_202306.pdf) (2024 年 7 月 22 日現在)
- 経済産業省 資源エネルギー庁, 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について」, 原子力環境整備促進・資金管理センターホームページ <https://www2.rwmc.or.jp/publications:hlwkj2024> (2024 年 7 月 22 日現在)
- 日本原子力研究開発機構 (JAEA)：「TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—」, JAEA ホームページ, 1999  
[https://www.jaea.go.jp/04/be/documents/doc\\_01.html](https://www.jaea.go.jp/04/be/documents/doc_01.html) (2024 年 7 月 22 日現在)
- 日本原子力研究開発機構 (JAEA)：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」, JAEA ホームページ, 1999  
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JNC-TN1400-99-020.pdf> (2024 年 7 月 22 日現在)
- 産業技術総合研究所：「活断層データベース」, 産業技術総合研究所ホームページ <https://gbank.gsj.jp/activefault/> (2024 年 7 月 22 日現在)
- 産業技術総合研究所地質環境総合センター：「日本と火山」, 2013

## 令和6年度 全地連資格検定試験の実施結果について

今年度の全地連資格検定試験（地質調査技士，地質情報管理士）は，7月に全国10会場で実施し，9月には合格発表を行いました。各検定試験の実施結果は次の通りです。

### 全地連資格検定試験 実施結果 概要

- 試験日：令和6年7月13日（土）
- 試験会場：全国10会場 札幌，仙台，新潟，東京，名古屋，大阪，広島，高松，福岡，沖縄
- 受験者数及び合格者数：

資格検定試験		受験者数	合格者数
①地質調査技士	現場調査部門	397名	146名
	現場技術・管理部門	936名	260名
	(合計)	1333名	406名
②地質情報管理士		113名	37名

全地連資格検定試験（応用地形判読士）および地質リスク・エンジニア認定試験は，下記の日程で試験を実施し，来年2月以降に合格発表を行う予定です。

#### 応用地形判読士資格検定試験：

- 試験日：令和6年10月19日（土）
- 試験会場：連合会館（東京都千代田区）
- 受験者数：（申込人数）54人
- 合格発表：令和7年2月25日

#### 地質リスク・エンジニア認定試験：

- 試験日：令和6年10月18日（金）
- 試験会場：飯田橋レインボービル（東京都新宿区）
- 受験者数：（申込人数）22人
- 合格発表：令和7年2月28日

（ご参考：令和7年度の試験日程（予定））

- ・地質調査技士，地質情報管理士 7月12日 全国10会場にて実施予定
- ・応用地形判読士 10月11日 東京にて実施予定
- ・地質リスク・エンジニア 10月17日 東京にて実施予定

## 全地連 『安全手帳』の公開

全地連では、労働安全衛生の重要性に鑑み、『安全手帳』を作成し、令和6年4月よりHPで公開しております。

『安全手帳』は、現場で活用しやすいよう「基礎編」、「基礎編 参考資料」、「応用編・危険物取扱編」、「事故対応・一般的事項編」の4編構成とし、PDFファイルで公開し、利用する企業等の事情に応じ適宜編集できるようにしています。

この安全手帳は、全地連への加盟の有無に関わらず、利用可能です。利用には特に制限を設けていませんので、現場での安全管理への活用の他、社内外での安全教育での活用、業務計画書への転用などに広くご利用できます。

なお、今後は全地連のWGにより、随時内容のブラッシュアップや法規・規則の改正に伴う更新を行い、バージョンアップしていく予定です。



全地連HP トップページ

## 『発注者・若手技術者が知っておきたい 「地質調査実施要領」』の発行

今回発刊する「発注者・若手技術者が知っておきたい 地質調査実施要領（以下、「新・地質調査要領」と称す）」は、タイトルの示す通り、主に官公庁や民間の発注者と地質調査に携わる若手技術者をターゲットとしています。業務の仕様・積算・技術課題を俯瞰できるこの「新・地質調査要領」は、発注者のみならず地質調査を担当する経験の浅い若手技術者にとっても有用であり、分厚い技術的な説明図書を読み解かなくとも、地質調査に関する実務全体の流れを理解できるように作成しています。

令和6年12月頃より販売受付開始、令和7年1月発刊予定です。



### 目次

- 第1章 地質調査の計画と積算
- 第2章 建設事業のための地質調査
- 第3章 維持管理・防災のための地質調査
- 第4章 地盤環境保全のための地質調査
- 第5章 地質リスクマネジメント
- 第6章 2050年カーボンニュートラルに資する地質調査

【編集】 一社）全国地質調査業協会連合会

【発行】 一財）経済調査会

B5判 約550頁

定価6,600円（本体6,000円＋税）

# 全地連「技術フォーラム2024」の開催結果について

毎年、多くの方々にご参加を頂いております全地連技術フォーラムにつきまして、令和6年度は下記のとおり開催しました。

## 第35回 全地連「技術フォーラム2024」新潟 開催概要

- 主 催：一般社団法人全国地質調査業協会連合会
- 協 力：北陸地質調査業協会
- 協 賛：国立研究開発法人 土木研究所
- 開催日程：令和6年9月26日（水）～9月27日（木） 2日間
- 開催場所：朱鷺メッセ（新潟市中央区万代島6番1号）

今回のフォーラムでは、「国土強靱化に向けた地質データの利活用」をメインテーマに、地元「北陸地質調査業協会」の全面的な協力と、国土交通省北陸地方整備局、新潟県、新潟市の後援および国立研究開発法人土木研究所の協賛を得て、多くの方々にご参加いただきました。

初日の特別講演会は、山田邦博氏（日本建設情報総合センター [JACIC]）に「国土交通行政に関する最近の動向について」というテーマで、最近頻発する自然災害とその対応を中心に、GX、DX、建設産業対策をはじめ、地域公共交通、観光などの運輸関係も含め、官と民の新しい関係や公共事業関係予算の新たな方向性など、国土交通省としての最近の動向について紹介がありました。

技術発表会には、土木研究所、産業技術総合研究所からの2件の基調講演のほか、若手技術者を中心に全国から143編の発表があり、活発な情報の共有・交換が行われました。今回の優秀技術発表者賞には、別表に示す、各セッションから選抜された25名が受賞されました。

参加者人数は、関係者含め、約650名、うち県外からの参加者が約500名となりました。

## 全地連「技術フォーラム2024」新潟 優秀技術発表者賞 受賞者一覧

セッション名	論文No.	発表者氏名	所属機関	地区	題 目
A-1 特別セッション	CO04	非川風木	株式会社 ホクコク地水	北陸	奥能登群発地震における斜面崩壊の調査・設計事例
A-2 地質リスク マネジメント	GR03	山口剛史	基礎地盤コンサルタンツ株式会社	九州	埋没谷の分布するトンネルにおける地質リスク評価事例
A-3 BIM/CIM・3次元 地盤モデル	CO08	白井杏実	株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング	関西	トンネル施工データを基にした三次元地盤モデルの作成
A-4 ボーリングの オートメーション化	CO14	宮本哲臣	株式会社クリステンセン・マイカイ	関東	全自動ボーリングマシンの開発 ワイヤーライン用固定ピストンサンブラーの開発
A-5 デジタルデータの活用 (地滑り予測)	CO18	阿部淳一	応用地質株式会社	関東	CIMモデルとビジュアルプログラミングを用いた地すべり対策工の半自動設計と業務効率化
B-1 道路盛土・宅地盛土	CO24	本杉ななね	中央開発株式会社	関東	軟弱地盤上の道路盛土における複数工法を併用した地盤対策設計事例
B-2 地すべり	CO33	神田淳	中央開発株式会社	関東	地すべりブロック末端部における変状原因の究明と対策工設計事例
B-3 のり面・斜面安定(1)	CO39	村上卓矢	大日本ダイヤコンサルタント株式会社	九州	変質安山岩の膨張性地山に起因した道路のり面変状の予測と対策工提案
B-4 のり面・斜面安定(2)	CO42	阿南春平	大日本ダイヤコンサルタント株式会社	東北	新第三紀層炭灰岩において発生した切土のり面崩壊の変状要因の考察
B-5 メンテナンス	CO47	土屋香織	株式会社潤和	北陸	極限面摩擦抵抗値の設定について、地質調査結果と引き抜き試験結果の比較事例
C-1 計測機器開発	CO53	鈴木匠	日本物理探査株式会社	関東	セシウム磁力計センサを用いた海上磁気探査の取り組み
C-2 地質調査事例	CO60	岡田謙也	株式会社キタック	北陸	斜めボーリングを活用した断層調査の事例
C-3 特殊土	CO65	伊藤瑞生	株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング	関東	関東地域の沖積粘性土の含水比と圧密特性の一考察
C-4 原位試験適用事例	CO68	加納秀斗	興亜開発株式会社	中部	ボアホールカメラを用いた切土法面の安定性検討事例
C-5 地盤調査事例	CO79	山岸山佳	株式会社キタック	北陸	液状化検討にともなう調査事例
D-1 地山評価	CO81	大場悠希	明治コンサルタント株式会社	北海道	針入試験を用いた風化区分の評価について
D-2 地質調査のDX	CO92	伏木秀奇	株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング	関東	斜面点検調査におけるMR技術の利用
D-3 解析	CO99	小林優起	川崎地質株式会社	関東	縦向き荷重をかけるモノパイル基礎の三次元FEM解析事例
D-4 地下水	CO105	北見志保	株式会社キタック	中部	砂礫地盤を流れる排水路の改修工事に伴う周辺地下水への影響事例
D-5 アウトリーチ	CO108	澤 昊	北海道土質コンサルタント	北海道	地盤技術者のボランティア活動
E-1 室内試験(1)	CO110	栗林正樹	川崎地質株式会社	北陸	一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の使い分けに関する一考察
E-2 室内試験(2)	CO121	米永佳祐	基礎地盤コンサルタンツ株式会社	関東	GPサンプリング試料を用いた液状化試験結果による強度評価事例
E-3 物理探査適用事例(1)	CO125	田中悠輝	応用地質株式会社	北海道	牽引式電気探査による堤体及び基礎地盤の効率的な調査
E-4 物理探査適用事例(2)	CO129	中静英波	応用地質株式会社	関東	レーザ探査を活用した城郭石垣の健全度評価
E-5 現場調査技術	FE07	今村陽太	大日本ダイヤコンサルタント株式会社	関東	地下水の流向流速測定において、ボアホールカメラと食紅を用いて測定した事例

(ご参考：次年度の開催予定)

「技術フォーラム2025」 開催地：山形県山形市 開催日：令和7年9月11日～12日

## スキルアップ講習会(BIM/CIM, 地質リスクマネジメント)の開催について

全地連では、地質調査の新たな業務として注目されている BIM/CIM や地質リスクマネジメントをテーマに、下記の4会場で講習会を開催いたします。また、講演では、土木研究所のご協力の下、本研究所の研究員を講師としてお招きし、特別セッションとしてご講演を頂く予定です。

開催地、日程

開催地	開催日	会場
高松	11月11日(月)	サンメッセ香川
仙台	11月22日(金)	フォレスト仙台
広島	11月27日(水)	広島国際会議場
名古屋	12月5日(木)	名古屋国際会議場

プログラム

プログラム	講師
14:25～15:10 第1部 地盤情報の活用と今後の展開 国土交通省が進める BIM/CIM のうち地質調査業務に関わる分野について、ガイドラインや地質・地盤3次元モデルの活用事例、作成の手順などを紹介します。	全地連 情報化委員会
15:25～16:10 第2部 地質リスクマネジメント 国土交通省が発注を始めている「地質リスク調査検討業務」について、この業務の役割や発注、業務の進め方、積算などに関するポイントを、全地連が令和3年度に作成した「地質リスク調査検討業務の手引き」を用いて紹介します。	全地連 地質リスクマネジメント委員会
16:10～16:40 第3部 特別セッション 「地質・地盤リスクマネジメントの必要性について」	(国研) 土木研究所

## 小冊子「地質リスクマネジメント技術支援業務発注ガイド(案)」の発行

国土交通省直轄事業において「事業促進 PPP」が急速に普及しつつあります。これは、官民が協調して調査～施工までのすべての段階を一気通貫で実施するもので、地質リスクマネジメントが事業の成否に大きな影響を及ぼすことが容易に想像できます。

そこで、全地連では事業促進 PPP に併せて地質リスクマネジメントを行う地質リスクマネジメント技術支援業務を新たに提案し、その発注を促進するための発注ガイド(案)を令和6年12月の完成に向けて作成中です。完成しましたら、全地連のホームページに掲載する予定です。地質リスクの新たな展開としてご活用いただければと存じます。

# 令和 6 年度改訂版「地質調査業務発注ガイド」の発行

好評をいただいております。地質調査業務を発注する方を対象とした「地質調査業務発注ガイド」の令和 6 年度版を 11 月に発行し、全地連 HP にて公開する予定です。

このガイドは、地質調査の基本的な考え方、調査計画や積算の留意点などを簡潔にまとめたもので、地質調査業務発注の経験の少ない方にも分かり易い内容となるようにまとめています。地質調査業務の発注に関わる多くの方に活用していただき、適切な地質調査業務発注時の参考としていただければ幸いです。

## 《目次》

- |                        |                |
|------------------------|----------------|
| 1. 建設事業における地質情報の重要性    | 4. 地質調査委託金額の積算 |
| 2. 地質リスクマネジメントの有効性について | 5. 地質調査の品質確保   |
| 3. 地質調査計画の立案           | 6. 地質調査成果の電子化  |

## 編集後記

近年、地形や地質に興味（関心）をひくテレビ番組の放送や書籍が発行され、多くの方々の関心が高まっていると思います。身の回りを見渡せば、石、岩、山が目にとまる機会も多いと思います。身近にある石、岩、山を構成するものが鉱物であり、鉱物の一部は資源として利用され、我々の生活を豊かなものにしてきており、また希少価値の高いものが宝石として重宝されており、多くの方に関心があると思われる「鉱物と宝石」に関する話題を本小特集として取り上げました。

あまりにも身近に存在すると、当たり前のように感じすぎると探求心が湧いてこないことになるかと思えます。このようなことから、鉱物、宝石、資源に焦点をあてて、これまでのヒトと鉱物のかかわり方、宝石の代表ともいえるダイヤモンドの特徴、様々な製品の材料として利用されているベントナイトの製

造方法や利用用途、近年新たに発見された有機物からなる鉱物“北海道石”、鉱物が持つ魅力、海底の資源について話題を提供していただきました。本特集号を一通り読んでいただくことで、身近にある鉱物や資源に対してより興味（関心）を持つことができたり、限りある資源をどう利用していくかを考える一助になれば幸いです。また、執筆者の方には、鉱物や宝石の魅力でもあるカラフルな図や写真を提供していただき、紙面の都合上、集約して掲載しておりますが、楽しんで閲覧いただければと思います。

最後になりましたが、お忙しいところ本号の執筆に協力していただいた執筆者の方々にはこころから感謝の意を表します。

(2024年11月 堀尾 淳 記)

## 機関誌「地質と調査」編集委員会

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

委員長 鹿野 浩司

委員 尾高 潤一郎、谷川 正志、堀尾 淳、細矢 卓志、山田 茂治、杉田 健

各地区地質調査業協会

委員 北海道：舟田 幸太郎 東北：庄子 夕里絵 北陸：津嶋 剣星 関東：赤坂 幸洋 中部：今井 良則  
関西：甲斐 誠士 中国：西田 宣一 四国：大岡 和俊 九州：原田 克之 沖縄県：井上 英将

一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階 TEL. (03) 3518-8873 FAX. (03) 3518-8876

北海道地質調査業協会	〒060-0003	北海道札幌市中央区北 3 条西 7 丁目 1 (第 1 水産ビル 5 階)	TEL. (011) 251-5766
東北地質調査業協会	〒983-0852	宮城県仙台市宮城野区榴岡 4-1-8 (パルシティ仙台 1 階)	TEL. (022) 299-9470
北陸地質調査業協会	〒951-8051	新潟県新潟市中央区新島町通 1 ノ町 1977 番地 2 (ロイヤル礎 406)	TEL. (025) 225-8360
関東地質調査業協会	〒101-0047	東京都千代田区内神田 2-6-8 (内神田クレストビル)	TEL. (03) 3252-2961
中部地質調査業協会	〒461-0004	愛知県名古屋市中区葵 3-25-20 (ニューコーポ千種橋 403)	TEL. (052) 937-4606
関西地質調査業協会	〒550-0004	大阪府大阪市西区靱本町 1-14-15 (本町クィーパービル)	TEL. (06) 6441-0056
中国地質調査業協会	〒730-0017	広島県広島市中区鉄砲町 1-18 (佐々木ビル)	TEL. (082) 221-2666
四国地質調査業協会	〒761-8056	香川県高松市上天神町 231-1 (マリッチ F1 101)	TEL. (087) 899-5410
九州地質調査業協会	〒812-0013	福岡県福岡市博多区博多駅東 2-4-30 (いわきビル)	TEL. (092) 471-0059
沖縄県地質調査業協会	〒903-0128	沖縄県中頭郡西原町森川 143-2 (森川 106)	TEL. (098) 988-8350

機関誌 「地質と調査」 '24 年 2 号 No.164

2024 年 11 月 10 日 印刷

2024 年 11 月 20 日 発行

編集 一般社団法人全国地質調査業協会連合会

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-5-13 内神田 TK ビル 3 階

発行所 株式会社ワコー

〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-11-6 TEL. (03) 3230-2511 FAX. (03) 3230-1381

印刷所 株式会社 高山

無断転載厳禁

印刷物・Web 上等に本誌記事を掲載する場合は、一般社団法人全国地質調査業協会連合会に許可を受けてください。

# Hybrid表面波探査に先進のGeoSEIS

# geo5

GeoSEIS-24、-48は、浅層反射法探査、屈折法探査、表面波探査に加え、テークアウトケーブルを用いて**最大48成分の微動アレイ探査にも適用可能な先進のサイスマグラフィックです。**



GeoSEIS-24



GeoSEIS-48

- ☑ 微動アレイ探査時の連続収録時間は60分/2msecサンプリング時
- ☑ 微動アレイ探査時、全成分の波形(波動)をリアルタイムにLCD上で確認可能
- ☑ SDカードに収録されたデータはPC上で任意の時間長に分割後、SEG-2に変換
- ☑ 既にご使用のGeoSEISにファームウェアの追加で微動アレイ探査機能を付加可能
- ☑ リアルタイム感覚の高速応答性を実現した快適なノイズモニター
- ☑ 直射日光下でも鮮明な超高輝度カラーLCDを採用
- ☑ 24bit、50KHz(20 $\mu$ sec)の高速・高分解能AD変換機能を搭載
- ☑ 消費電流は僅か0.6A(スタンバイ時)、1.3A(収録時)、かつ小型軽量(4.3Kg)

**株式会社 ジオファイブ**

URL <http://www.geo5.co.jp/>

〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-453-2

TEL 048-662-9175 FAX 048-662-9176

Email [sales@geo5.co.jp](mailto:sales@geo5.co.jp)

#### ■業務内容■

計測機器販売 : 地質調査機器・非破壊検査機器

計測機器レンタル : 地質調査機器・非破壊検査機器

計測業務 : 3D-RADAR計測業務 他

計測機器設計製作 : 各種計測機器の設計製作





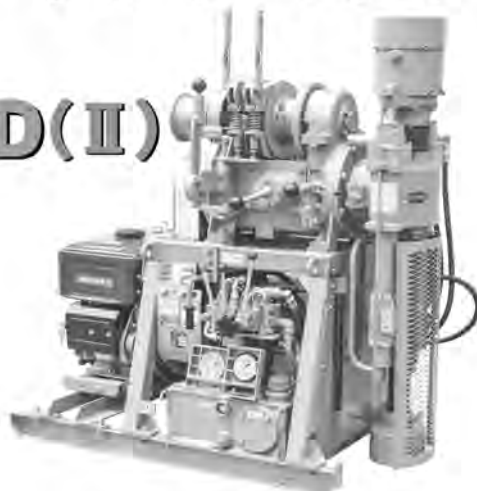
**TOHO**  
DRILLING EQUIPMENT

# 小型ボーリングマシン

**DM-03**

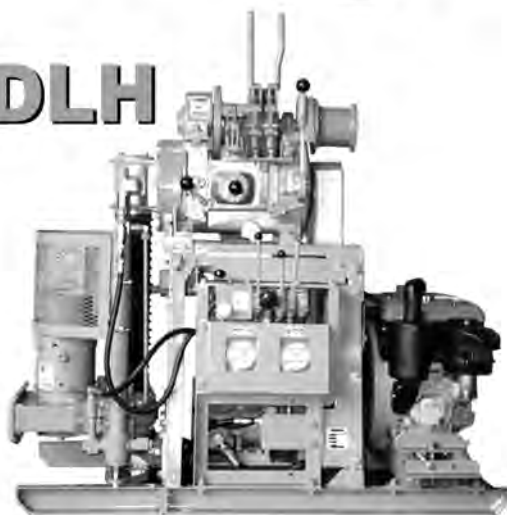


**D0-D(Ⅱ)**



**D1-C**

**D0-DLH**



試錐機には小型ボーリングポンプが内蔵できます。(DM-03を除く)

機種名		DM-03	D0-D(Ⅱ)	D0-DLH	D1-C
穿孔能力	m	30	100	100	280
回転数	min <sup>-1</sup>	65,125,370	(A)60,170,330	(A)60,170,330	(A)65,130,170,370
			(B)110,320,625※	(B)110,320,625※	(B)90,170,320,490※
スピンドル内径	mm	47	43	43	48,58
ストローク	mm	400	500	500	500
巻上げ力	kN(kgf)	3.9(400)	5.9(600)	5.9(600)	10.8(1100)
スライド	mm		油圧式300※	油圧式300※	油圧式300
動力	kW/HP	3.7/5	3.7/5	3.7/5	5.5/8
質量	kg	180	350(油圧チャック装着時)	475	550
寸法	H×W×L mm	960×550×1115	1225×655×1285	1440×890×1415	1390×735×1580

右操作、左操作をご用意しております。 ※はオプションです。



**東邦地下工機株式会社**

東京都品川区東品川 3-15-8 TEL 03 (3474) 4141  
福岡市博多区西月隈 5-19-53 TEL 092 (581) 3031  
URL: <http://www.tohochikakoki.co.jp>

福岡 ☎ 092(581)3031  
東京 ☎ 03(3474)4141  
札幌 ☎ 011(376)1156  
仙台 ☎ 022(235)0821  
新潟 ☎ 025(284)5164  
金沢 ☎ 076(235)3235

名古屋 ☎ 052(798)6667  
大阪 ☎ 072(924)5022  
山松 ☎ 089(953)2301  
広島 ☎ 082(533)7377  
熊本 ☎ 096(232)4763

# 地質調査

通巻164号