

GSJ

地球をよく知り、地球と共生する

地質ニュース

2021

11

Vol.10 No.11



11月号

-
- 269 **蛇紋岩が形作る地形と植生：朝日岳合同調査の予察報告**
伊藤 剛・栗原敏之・松岡 篤・小河原孝彦・香取拓馬・
中村佳博・吉田拓海・鈴木敬介・川口行洋
-
- 276 **—螺旋状に配列した歯を持つヘリコプリオン—**
足尾山地における産出地点をめぐって 伊藤 剛
-
- 282 **資源をつくる水のちから —その2 燃料資源・地熱資源—**
佐脇貴幸
-
- 294 **常時微動観測による地熱地域での熱水流動モニタリング**
岡本京祐・浅沼 宏・二宮 啓

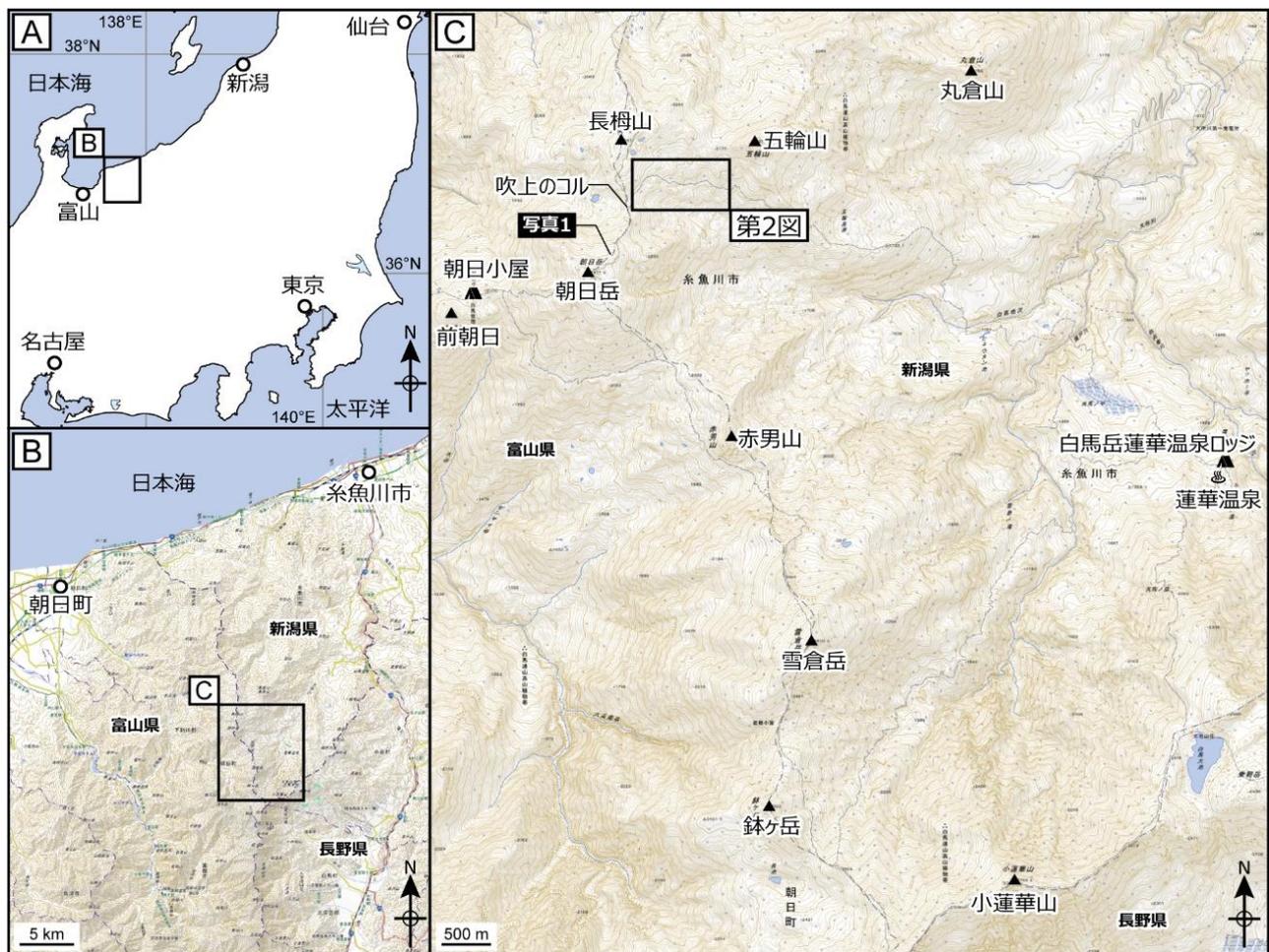
蛇紋岩が形作る地形と植生： 朝日岳合同調査の予察報告

伊藤 剛¹⁾・栗原 敏之²⁾・松岡 篤²⁾・小河原 孝彦³⁾・香取 拓馬³⁾・
中村 佳博¹⁾・吉田 拓海^{4,5)}・鈴木 敬介⁴⁾・川口 行洋⁴⁾

1. はじめに

新潟県と富山県との県境にそびえる朝日岳は、^{うしろたてやま}後立山連峰を代表する名峰として知られ、付近一帯は中部山岳国立公園に指定されている(第1図)。朝日岳周辺には蛇紋岩が広く分布し、古生代の変成岩や堆積岩(チャートや泥岩など)もみられる(例えば、伊藤, 1966; 中水ほか, 1989)。そ

うした複雑な地質の分布は富山県朝日町から新潟県糸魚川市にかけて続いており、特に蛇紋岩と変成岩からなる地質体の成り立ちに関して、最近も活発に研究が行われている(Satish-Kumar *et al.*, 2021; Yoshida *et al.*, 2021)。また、朝日岳北東側斜面の蛇紋岩分布域には貴重な高山植物が自生し(写真1)、その植物相が報告されている(例えば、嶋野・水野, 1961)。このように、朝日岳周辺は地質学的・植物学



第1図 調査地域の位置図。(A) 朝日岳周辺の位置。(B) 朝日岳周辺の広域地図。国土地理院の発行する地形図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工して作成。(C) 朝日岳周辺の地形図。国土地理院の発行する地形図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工して作成。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門
2) 新潟大学理学部
3) フォッサマグナミュージアム

4) 新潟大学大学院自然科学研究科
5) 応用地質株式会社

キーワード：蛇紋岩，地形，植生，朝日岳，新潟，富山



写真1 蛇紋岩分布域にみられる高山植物の写真。朝日岳北東斜面の蛇紋岩地帯にみられる群落で、右側には雪渓、左側には雲海が見える。奥に見えるのは、新潟県最高峰・小蓮華山へと続く稜線である。新鮮な蛇紋岩は青みがかって見えることもあり、朝日岳周辺から五輪山南方の蛇紋岩は「青ザク」とも呼ばれている。

的に重要な地域である。しかし、学術的な調査例は、一帯の急峻な地形に阻まれ、ごく少数に限られている。

糸魚川ジオパーク協議会が管理運営する「糸魚川ユネスコ世界ジオパーク」は、日本で最初に認定された世界ジオパークの1つである。上述の朝日岳周辺も、その重要性から糸魚川ジオパークの「^{つがみ} 桐海新道エリア」に指定されている。糸魚川市と新潟大学は糸魚川地域のさらなる地質学的な理解に向け、2010年より共同研究を行ってきた。2016年からは産業技術総合研究所地質調査総合センターも加わり、各種成果を公表している（例えば、伊藤ほか、2012, 2017; Ito *et al.*, 2017）。近年は、これまで研究例が乏しかった朝日岳周辺について、フォッサマグナミュージアムの学芸員を中心に共同研究の準備が進められてきた。そうした取り組みが実を結び、2021年8月3日～6日にかけて朝日岳を対象とした地質調査が実施されるに至った。なお、朝日岳周辺は、国指定の特別天然記念物「^{しろうま} 白馬連山高山植物帯」に指定されているため、通常、岩石試料の採取は不可能である。今回は各種関係機関（環境省・文化庁・森林管理署など）の許可を

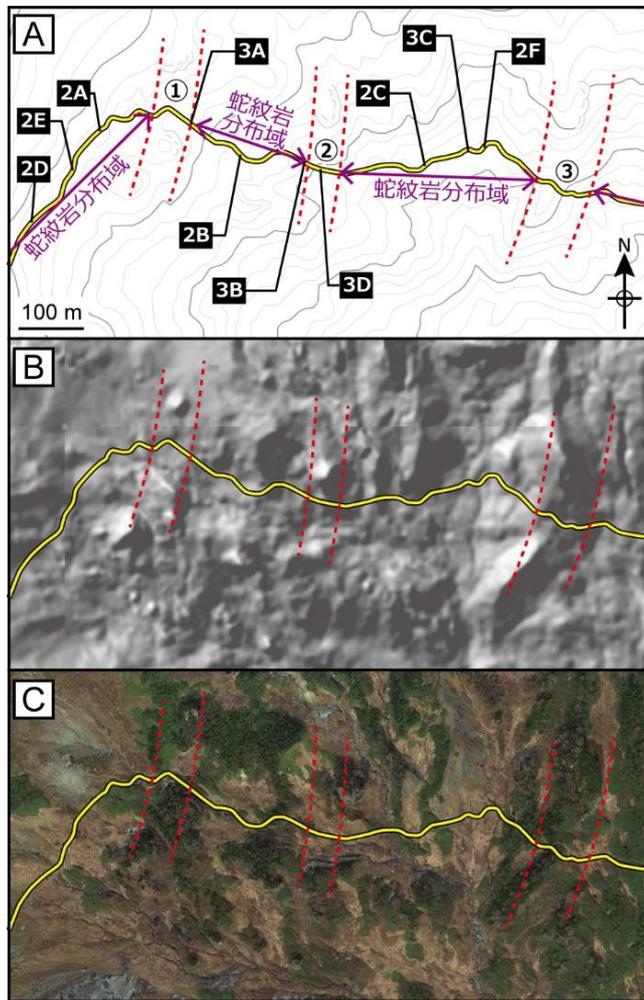
得たうえで、貴重な試料が採取された。これらの野外調査や採取した試料に基づく詳細な学術的成果については稿を改めて報告するが、その端緒として、同地域で見られた地形と地質、そしてそれらと植生との関係について紹介する。特に、朝日岳北東方の登山道では、軟質の蛇紋岩とチャートを主体とする硬質の岩石が交互に露出し、いわゆる「蛇紋岩山地」や「蛇紋岩植物」が典型的に観察できる。そのため、今回紹介するルートは、一般の登山者が地質と植生の関係を意識できるジオトレイルとして大きな価値がある。

2. 地質・地形概説

朝日岳周辺には、^{れんげ} 蓮華帯に属する蛇紋岩メランジュが分布し、このメランジュに含まれる岩体や岩塊として変成岩（蓮華変成岩類）がみられる（例えば、伊藤、1966；中水ほか、1989）。この変成岩のうち、白雲母片岩からは石炭紀を示す 323 Ma と 311 Ma の同位体年代が得られている（Shibata and Ito, 1978）。また、既存の調査研究に基づけ

ば、周辺地域には、蓮華帯の角閃岩、秋吉帯ペルム紀付加体の堆積岩類、飛騨外縁帯のペルム系堆積岩類(白馬岳層)などが分布するとされている(中野ほか, 2002;長森ほか, 2010;竹内ほか, 2017). 白馬岳層の石灰岩からは後期石炭紀を示すとされるサンゴ化石(Minato, 1975)やウミユリとコケムシの化石(高野・小松, 1984)の存在が記されているほか、デボン紀のサンゴ化石が産出している(茨木・兒子, 2012). また、泥岩や珪質凝灰岩からはペルム紀放射虫化石の産出が報告されている(滝沢ほか, 1995;竹内ほか, 2004).

地形的には、朝日岳周辺には地すべり地形が発達し、小崖地形や線状凹地群がみられる(例えば、八木・井口, 2013;刈谷・佐藤, 2016). また、これらの地すべりに関連して形成されたとみられる大小の湖沼が存在する(高岡, 2014).



第2図 朝日岳北東方(吹上のコルから五輪山南西方)の地形図・陰影起伏図・航空写真。黄色線は登山道。(A)地形図。国土地理院の発行する地形図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工して作成。白抜きの記号は写真の番号に対応。(B)陰影起伏図。国土地理院の発行する地形図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工して作成。(C)航空写真。Google Earth (<https://earth.google.com/web/>) の画像を加工して作成。

3. 朝日岳北東部の地質・地形と植生

今回紹介するルートは、朝日岳北東方、吹上のコル(コルは鞍部のことを指す)から五輪山南西の範囲である(第1図)。このルートには蛇紋岩が広く分布し、その範囲内ではほぼ南北に延びる硬質な岩石の分布域が3か所でみられる(第2図A)。これらを便宜的に西から東へ①~③とする。①については明瞭な露頭を確認していないが、周辺ではチャートの転石が確認されることから、硬質な岩石はチャートを主体とすると推測される。②と③については層状チャートが観察されることから、①と同様に硬質な岩石はチャートを主体とすると考えられる。ただし、珪質片岩とみられる転石なども存在することから、正確な岩石の分布を示すためには、より詳細な調査が必要である。

蛇紋岩分布域では、緩傾斜で滑らかな地形がみられる(写真2A-2C)。この滑らかな地形は植生に覆われているがチャートなどの硬質な岩石の小規模な露出が部分的に観察される(写真2D, 2E)。③の西側では、礫岩のような見かけを呈する蛇紋岩もみられる(写真2F)。これに対し、①~③の硬質な岩石の分布域では、地形図(第2図A)や地形陰影図(第2図B)でも、野外での観察(写真3A-3C)においても地形的な高まりが確認される。また、この地形的な高まりと交差する登山道沿いでは、チャートなどの硬質な岩石やその転石が多くみられる(写真3D)。

植物に着目すると、蛇紋岩分布域では草本類が広くみられ、樹木は少ない(写真2A-2C)。特に高山植物の花が広範囲に咲いている様子もよくみられる(写真1, 2D, 2E)。これに対し、硬質な岩石の分布域である①~③では、樹木が存在している様子が確認できる(写真3A-3C)。この植生の差は、航空写真からも判別できる(第2図C)。

4. 蛇紋岩を主体とする地質により形作られる地形と植生

地質や地形と植生の関連について示した研究はいくつか例がある(例えば、Shimizu, 1962, 1963;森定ほか, 2014;内野, 2017)。特に蛇紋岩分布域での地形や植生を示した研究例は数多く知られている(例えば、山中, 1950;村田・清水, 1956;Hattori, 1957;近・久米, 1998;藤川, 2006;前島ほか, 2014;西原・坪田, 2021)。

蛇紋岩に特有の地形は、蛇紋岩山地とも呼ばれ、緩傾斜で滑らかな斜面を持つことなどにより特徴づけられる(例えば、小松, 1999)。Suzuki(2006)は蛇紋岩体について、物性の差に基づいて深部より新鮮帯(20 m以深)・緩み帯(5~20 m)・風化帯(5 m以浅)に区分した。そして、風

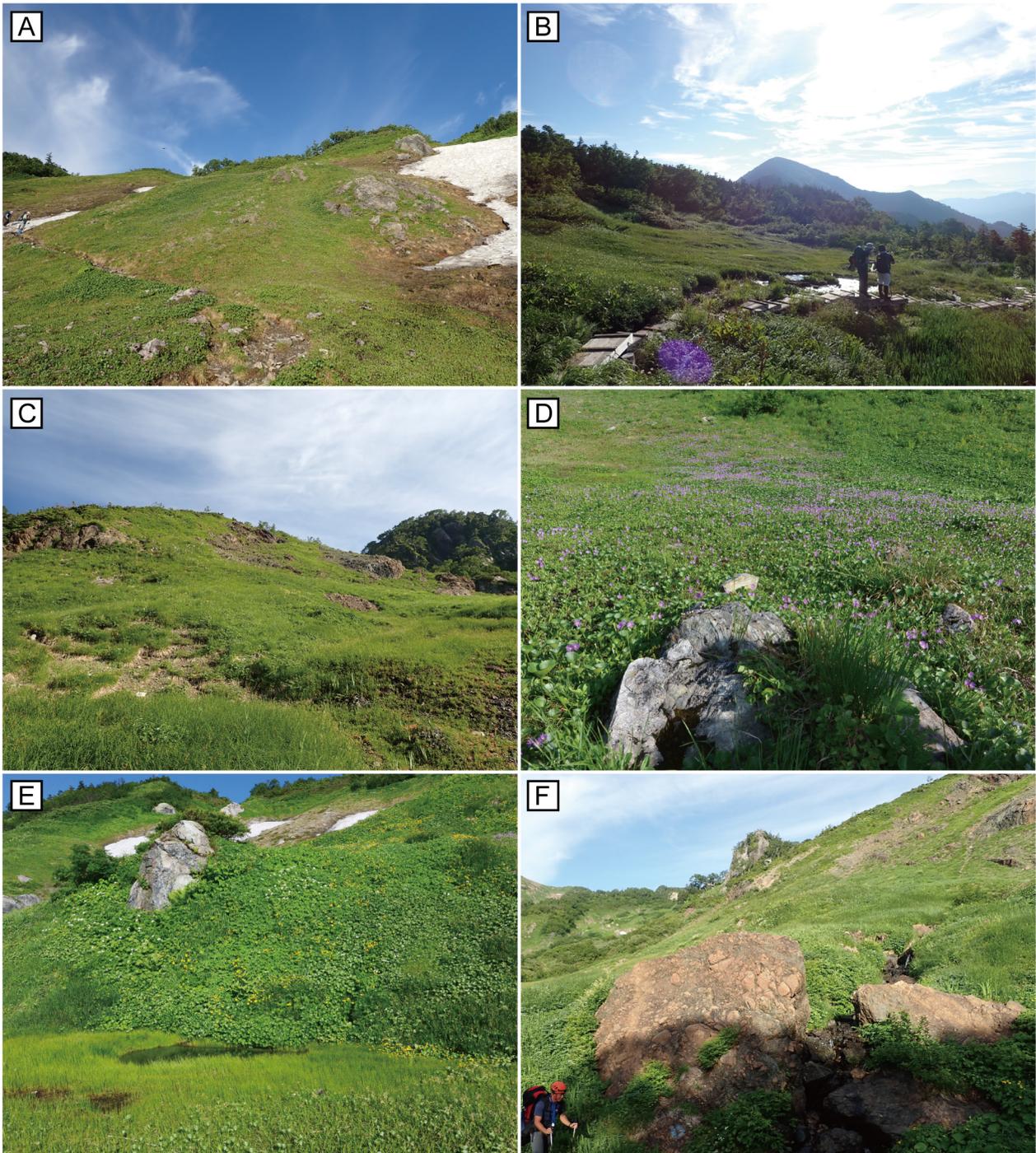


写真2 蛇紋岩分布域の写真。(A) ①の南西方。緩傾斜で滑らかな斜面がみられる。(B) ①と②の間。草本類が生い茂っており、高山植物も多くみられる。(C) ②と③の間。緩傾斜で滑らかな斜面がみられ、草本類が生い茂っている。右奥の高まりは③の硬質の岩石の分布域であり、こちらでは樹木が多い。(D, E) ①の南西方。蛇紋岩分布域の高山植物の群落中には、硬質な岩石の小規模分布がみられる。(F) ③の西方の蛇紋岩露頭。

化帯の低い透水性や膨張性粘土を含む基質の存在が、蛇紋岩山地の緩傾斜で滑らかな斜面を形作るとしている。

蛇紋岩の分布域にみられる独特の植物相は「蛇紋岩植物」と呼ばれ、朝日岳を含む白馬山系の蛇紋岩地帯においても認められている(大場, 1968; 小泉, 1979; 波多野・増沢, 2008)。小泉(1979)は、土壌の凍結・融凍作用によ

る表層の礫の移動が物理的に植物の生育を抑制する可能性を指摘している。また、波多野・増沢(2008)は、蛇紋岩土壌中の高いニッケルイオンとマグネシウムイオンの含有率が蛇紋岩植物の成立要因となる可能性を指摘している。

今回紹介した朝日岳北東方の地質・地形・植生をみると、蛇紋岩分布域では「蛇紋岩山地」に典型的な緩傾斜で滑

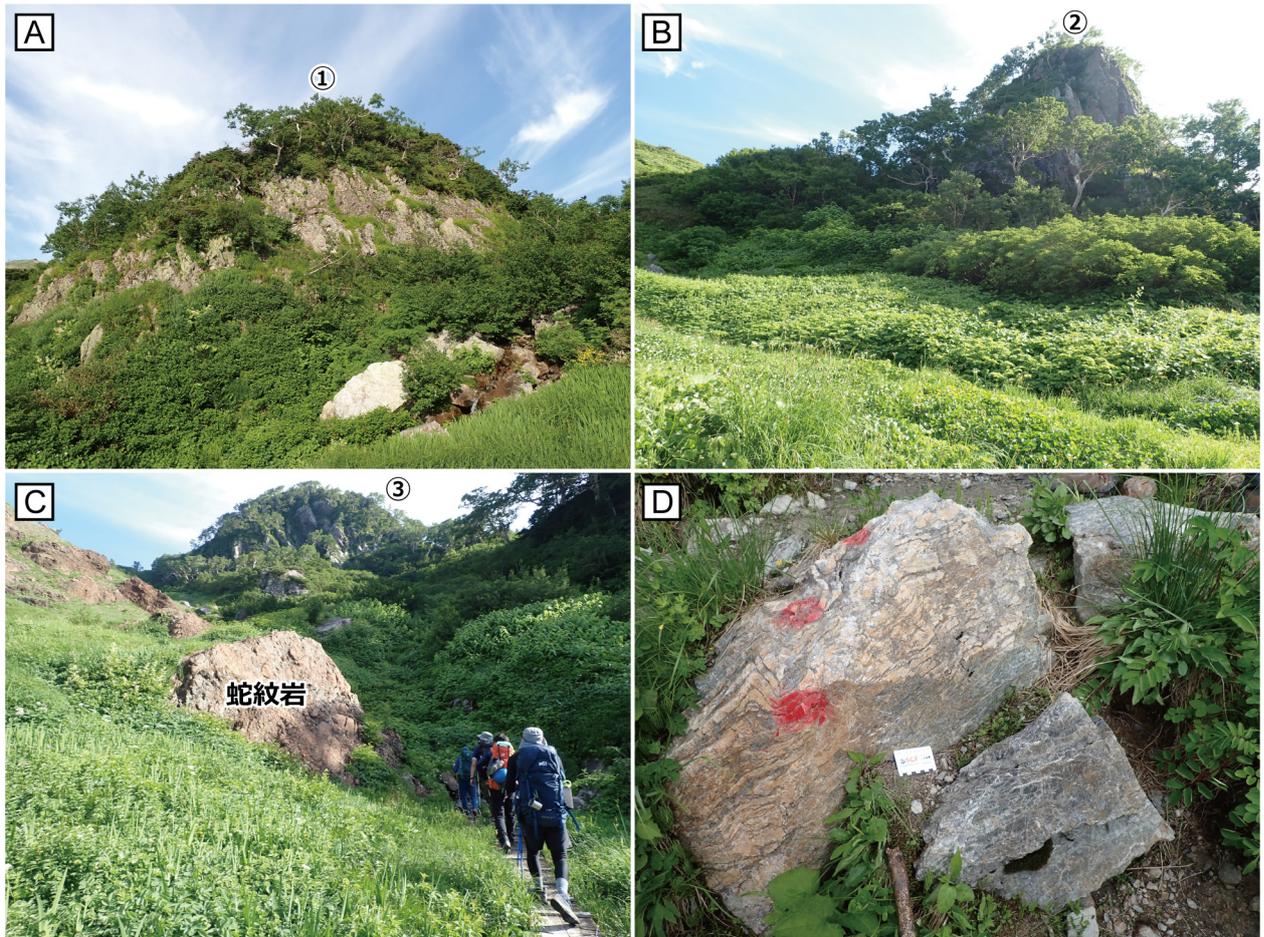


写真3 硬質岩分布域の写真。(A) ①の硬質岩。(B) ②の硬質岩。(C) ③の西端部。中央の蛇紋岩は写真2Fと同一。(D) ②の分布域上の登山道にみられる層状チャート。

らかな地形がみられ、また「蛇紋岩植物」を含む草本類が生い茂っている(写真2)。これに対し、挟在する硬質岩部では、地形的に突出部をつくり、また蛇紋岩分布域では稀な樹木が多くみられる(写真3)。すなわち、第2図で示すように、軟質な蛇紋岩とチャートに代表される硬質岩の繰り返し、地形にも植生にもよく反映されている。白馬山系では八方尾根中部における大規模蛇紋岩地帯の高山植物が有名であるが、狭い範囲でありながら地質のコントラストが明瞭という点で、朝日岳周辺は蛇紋岩と植生の関係を認識するのに好適な地域と言える。

朝日岳周辺は、前述のように、特別天然記念物「白馬連山高山植物帯」の一部であり、現在も多くの登山者でにぎわっている。また、日本海から吹上のコルに繋がる柵海新道は、今年で開通50年を迎えた。フォッサマグナミュージアムでは特別展「アルプスと海をつなぐ柵海新道～大縦走路の軌跡～」が開催され、人々の耳目に触れる機会も増えている。本稿で紹介したように、朝日岳へ至る長い道のり

において、樹林帯を抜けては度々現れるお花畑が見せる景観は、古生代に遡る地質の長い歴史に根ざしている。多くの登山者にこうした背景を知ってもらえれば、朝日岳の魅力はさらに深まることであろう。今後、継続的に調査を行うことで、その地質学的な特徴を検討し、ユネスコ世界ジオパークとしての観点からもその価値を論じていきたい。

謝辞：調査に当たり、柵海岳友会会長の齋本修一氏、同副会長の長野隆一氏、糸魚川消防本部の弓矢弘毅氏、丸山優氏、若松洋平氏に同行いただき、安全な調査が行うことができた。調査の宿泊には朝日小屋と白馬岳蓮華温泉ロッジを利用した。朝日小屋管理人の清水ゆかり氏と蓮華温泉ロッジ支配人の田原伸男氏ならびに両施設のスタッフにはお世話になった。記して感謝申し上げます。調査の一部に、文化庁の令和3年度文化芸術振興費補助金「地域と共働した博物館創造活動支援事業」を使用した。

文 献

- 藤川和美 (2006) 高知県の蛇紋岩地の植物と高知県立牧野植物園. 地質学雑誌, 112(supplement), S161-S168.
- 波多野 肇・増沢武弘 (2008) 白馬山系蛇紋岩地の土壌特性と高山植物群落. 日本生態学会誌, 58, 199-204.
- Hattori, S. (1957) Hepaticae of Hayachine Mountains with special reference to Hepaticae occurring on serpentine rocks. *The Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, no. 18, 106-118.
- 茨木洋介・兒子修司 (2012) 新潟県糸魚川市蓮華地域から産出したデボン紀サンゴ化石群. 広島大学大学院総合科学研究科紀要 II, 環境科学研究, 7, 105-110.
- 伊藤正裕 (1966) 白馬岳北方朝日岳北西部の変成岩. 地質学雑誌, 72, 287-297.
- 伊藤 剛・酒井佑輔・茨木洋介・吉野恒平・石田直人・梅津 暢・中田健太郎・松本明日香・日野原達哉・松本健・松岡 篤 (2012) 新潟県糸魚川地域手取層群水上谷層の礫岩中の珪質岩礫から産出した放散虫化石. 糸魚川市博物館研究報告, no. 3, 13-25.
- Ito, T., Kurihara, T., Hakoïwa, H., Ibaraki, Y. and Matsuoka, A. (2017) Late Silurian radiolarians from a radiolarite pebble within a conglomerate, Kotaki, Itoigawa, Niigata Prefecture, central Japan. *Science Reports of Niigata University (Geology)*, no. 32, 1-14.
- 伊藤 剛・栗原敏之・箱岩寛晶・茨木洋介・松岡 篤 (2017) 新潟県小滝地域における県内最古の化石の発見: 糸魚川市・新潟大学・地質調査総合センターの共同研究成果報告. 糸魚川市博物館研究報告, no. 4, 23-31.
- 刈谷愛彦・佐藤 剛 (2016) 飛騨山地北部・朝日池圏谷における完新世の地すべり活動. 2016 年度日本地理学会春季学術大会講演要旨集, P025.
- 小泉武栄 (1979) 高山の寒冷気候下における岩屑の生産・移動と植物群落 II, 北アルプス北部鉢ヶ岳付近における蛇紋岩強風地の植物群落. 日本生態学会誌, 29, 281-287.
- 小松陽介 (1999) 谷密度からみた蛇紋岩山地の特性—2 種類の谷の定義による評価—. 地理学評論 Ser. A, 72, 30-42.
- 近 禅・久米 篤 (1998) 谷川連峰の蛇紋岩植生について. 早稲田生物, no. 31, 15-18.
- 前島勇治・大倉利明・楠本良延・高田裕介 (2014) 南房
- 総嶺岡山系における蛇紋岩および玄武岩に由来する土壌の生成・分類学的考察. ペトロジスト, 58, 2-16.
- Minato, M. (1975) Japanese Palaeozoic corals. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 81, 103-126.
- 森定 伸・山崎道敬・能美洋介・波田善夫 (2014) 開析溶岩台地における斜面上側の地質が花崗岩域の植生に及ぼす影響. 植生学会誌, 31, 19-35.
- 村田 源・清水建美 (1956) 長野縣下伊那郡大鹿村蛇紋岩地の植生. 植物分類, 地理, 16, 173.
- 長森英明・竹内 誠・古川竜太・中澤 努・中野 俊 (2010) 小滝地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 130p.
- 中水 勝・岡田昌治・山崎哲夫・小松正幸 (1989) 飛騨外縁帯, 青海 - 蓮華メランジの変成岩類. 地質学論集, no. 33, 21-35.
- 中野 俊・竹内 誠・吉川敏之・長森英明・苅谷愛彦・奥村晃史・田口雄作 (2002) 白馬岳地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 105p.
- 西原寿明・坪田幸徳 (2021) 四国固有種イシヅチザクラの分布と遺伝的多様性・集団遺伝構造. 森林遺伝育種, 10, 1-12.
- 大場達之 (1968) 日本の高山寒冷気候下における超塩基性岩地の植生. 神奈川県立博物館研究報告, 1, 37-64.
- Satish-Kumar, M., Kurihara, T., Shishido, R., Yoshida, T., Takahashi, T. and Nohara-Imanaka, R. (2021) Geochemistry and Sr-Nd isotopic composition of meta-gabbros from the Omi serpentinite mélange, Niigata, SW Japan: Evidence for subduction erosion in an immature early Paleozoic arc-trench system in proto-Japan. *Lithos*, 398-399, 106260.
- Shibata, K. and Ito, M. (1978) Isotopic ages of schist from the Asahidake-Shiroumadake area, Hida Mountains. *The Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*, 73, 1-4.
- 嶋野 武・水野瑞夫 (1961) 岐阜薬科大学腊葉目録 (1): 日本アルプスの植物目録. 岐阜薬科大学紀要, no. 11, 139-146.
- Shimizu, T. (1962) Studies on the limestone flora of Japan and Taiwan Part I. *Journal of the Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Series A*,

- 11, 1-105.
- Shimizu, T. (1963) Studies on the limestone flora of Japan and Taiwan Part II. *Journal of the Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Series A*, **12**, 1-88.
- Suzuki, T. (2006) Formative Processes of Specific Features of Serpentinite Mountains. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **27**, 417-460.
- 高野道夫・小松正幸 (1984) 白馬岳オリストストローム. 総合研究「上越帯・足尾帯」, no. 1, 89-92.
- 高岡貞夫 (2014) 日本アルプスの高山帯および亜高山帯上部に分布する湖沼の成因:地すべり地形に着目して. 日本地理学会発表要旨集, 100239.
- 竹内 誠・河合政岐・野田 篤・杉本憲彦・横田秀晴・小嶋 智・大野研也・丹羽正和・大場穂高 (2004) 飛騨外縁帯白馬岳地域のペルム系白馬岳層の層序および蛇紋岩との関係. *地質学雑誌*, **110**, 715-730.
- 竹内 誠・古川竜太・長森英明・及川輝樹 (2017) 泊地域の地質. *地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅)*. 産総研地質調査総合センター, 121p.
- 滝沢文教・原山 智・桑原希世子 (1995) 飛騨外縁帯白馬岳メランジの微化石年代. *日本地質学会第102年学術大会講演要旨集*, 77.
- 内野隆之 (2017) チャートを好むシダ植物ヒトツバー三重県志摩半島の鳥羽地域を例として一. *GSJ地質ニュース*, **6**, 283-288.
- 八木浩司・井口 隆 (2013) 空から見る日本の地すべり地形シリーズ-32-飛騨山脈北部・朝日岳南面に認められる重力性山体変形. *日本地すべり学会誌*, **50**, 288-290.
- 山中二男 (1950) 錦山蛇紋岩地植群の研究. *植物分類, 地理*, **12**, 188-192.
- Yoshida, T., Taguchi, T., Ueda, H., Horie, K. and Satish-Kumar, M. (2021) Early Carboniferous HP metamorphism in the Hida Gaien Belt, Japan: Implications for the Paleozoic tectonic history of proto-Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **39**, 77-100.

ITO Tsuyoshi, KURIHARA Toshiyuki, MATSUOKA Atsushi, OGAWARA Takahiko, KATORI Takuma, NAKAMURA Yoshihiro, YOSHIDA Takumi, SUZUKI Keisuke, KAWAGUCHI Yukihiro (2021) Geography and vegetation formed by serpentinite: Preliminary report on collaboration research around Mt. Asahi-dake, boundary between Niigata and Toyama prefectures, central Japan.

(受付：2021年8月26日)

—螺旋状に配列した歯を持つヘリコプリオン— 足尾山地における産出地点をめぐって

伊藤 剛¹⁾

1. はじめに

ヘリコプリオン—螺旋状に配列した歯(写真1)を持つ軟骨魚綱である。その特異な形状から、専門家以外からの関心も高い化石であり、専門書以外の書籍でもしばしば紹介される(例えば、Taylor and O'Dea, 2014; 土屋, 2014, 2016, 2019; 大橋ほか, 2020)。世界的にも産出が稀であり(Tapanila and Pruitt, 2013)、日本においても3例の報告しか知られていない。

そのうちの1つ、最初の報告例は群馬県東部の足尾山地からである(Yabe, 1903)。一方で、その産出地点については当初の記載とその後の見解の変遷がみられる。岩相の分布などから、現在ではその産出地点は群馬県桐生市黒保根町八木原とされている(例えば、林, 1997)。この地点は筆者が調査している「桐生及足利」地域の北西端にあたる。世界的に貴重な化石の産出地点であるが、この産出地点に対する見解の変遷について、詳細に記した例は少ない。ここでは産出の経緯や記載に関する主要な文献での記述(第1表)とともに、産出地点に関する筆者の見解を述べる。

2. ヘリコプリオンの特徴

ヘリコプリオン属(*Helicoprion* Karpinsky 1899)は軟骨魚綱に属し、下顎正中に螺旋状に巻いた接合歯列を持つことによって特徴づけられる(Karpinsky, 1899; Tapanila *et al.*, 2013)。その特異な形状をした歯の位置については、様々な復元図が提案され、上顎あるいは下顎に配置されたほか、尾や鱗に配置される復元図も存在した(Tapanila *et al.*, 2013)。CT スキャンを用いた研究により、下顎の後方に位置していたことが明らかとなった(Tapanila *et al.*, 2013; Ramsay *et al.*, 2015)。

化石は古生界石炭系から中生界三畳系から産出するが、その多くはペルム系からの産出に集中している。日本からの産出のほかには、ロシアやオーストラリア、中国、ア



写真1 ヘリコプリオンの写真。Yabe (1903) から転載(© 日本地質学会)。記述に基づいてスケールを追加。

メリカなどから産出している(例えば、Karpinsky, 1899; Wheeler, 1939; Larson and Scott, 1955; Chen *et al.*, 2007)。日本では、1903年に最初の記載が行われ(Yabe, 1903)、その他には宮城県気仙沼市からの2例(荒木, 1980; 後藤ほか, 2010)のみである。Yabe (1903)による報告は、80年近く日本最古の脊椎動物化石記録であった(高桑, 2021)。

3. 足尾山地からの産出の経緯

Yabe(1903)は、フズリナ石灰岩からヘリコプリオンを発見し、1899年にロシアで記載された*Helicoprion bessonowi* Karpinskyに同定した。化石として記載された

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード：ヘリコプリオン、石灰岩、ジュラ紀付加体、足尾山地、八木原

第1表 先行研究におけるヘリコプリオンの産出に関する記述. *Yabe (1903) で記載された標本の写真が掲載.

文献	記述
神保(1900)	一見アンモン介の如くにして實は然らざる者下野國足尾銅山に近き ^{ヘナワ} 花輪村 ^{ゴード} 神戸に出でし事ありて
佐川(1900)	三年前下野國足尾銅山近傍に於て同鉱山にて溶劑剤として使用する暗鼠色の稍粗き古生紀石灰岩中にクリノイドの茎と共伴して一箇の珍奇なる化石出でたり、其大さ最大徑七寸余に達し極めて薄く平くしてらせん状に三卷余巻き色黒く一見アンモン貝に似たるを以て或は古生紀のノーチルスならんとの評ありし、其化石は三箇に分たれ大學地質學教室、農商務省地質調査所及足尾銅山に各一片を藏す(後略)
Yabe (1903)	Particularly interesting is the fact that the limestone of Hanawa, containing <i>Helocoprion</i> as mentioned by Mr. E. Sagawa, belongs to the same horizon as that containing <i>Fusulina japonica</i> Guembel.
矢部(1903)	花輪に出でたるヘリコプリオンに付ては佐川學士の記事あり
横山(1920)	ヘリコプリオン <i>Helicoprion</i> (第二百九十五圖). 螺旋狀の器で、是は口頭に着いてみた劍狀防禦器が魚の死後巻いたものと見られてゐる. 石炭乃至二疊. ヘリコプリオン・ベツソノフイ下野花輪の二疊(縮圖)*
藤本(1932)	又花輪では紡錘蟲石灰岩の中から <i>Helicoprion</i> と言ふ魚の化石が発見されてゐる。
藤本(1951)	特に足尾線花輪驛に近い八木原からは、古く矢部博士によつて紡錘蟲と共に <i>Helicoprion bessonowi</i> Karpinskyという珍しい魚の化石が報告されている。
鹿間(1964)	鍋山統(群馬県足尾地方)
益富・浜田(1966)	1903年に矢部長克博士によつて、栃木県の足尾銅山に近い花輪というところから報告された例が唯一である
後藤(1975)	軟骨魚類についてはジュラ紀以前のは2種(うち1種は鍋山相当層から発見された <i>Helicoprion bessonowi</i> (佐川, 1900; Yabe, 1903)である)だけ知られているにすぎず
森下編(1977)	群馬県足尾地方、二疊紀前期(鍋山統)
野村編(1978)	古生代のものであるが、勢多郡黒保根村八木原の二疊系石灰岩から産出したヘリコプリオンがあり、わが国最古の魚類化石として知られています。
荒木・後藤(1979)	古生代後期の軟骨魚類 <i>Helicoprion</i> は、成長に伴つて歯が脱落せず渦巻状の歯列をもつ特徴があり、日本からは1897年に発見され、Yabe (1903) によつて報告された群馬県花輪から産出したものが唯一の標本であった。
荒木(1980)	本邦では、1897年に発見され(佐川, 1900), Yabe (1903) によつて報告された群馬県勢多郡東村花輪から産したものが唯一の発見例であった。
後藤(1981)	佐川(1900)は、日本の足尾銅山付近(現在の群馬県勢多郡東村花輪)の古生代の石灰岩(現在では下部ペルム系の鍋山統)からクリノイドと共産した直径26 cmの <i>Helicoprion</i> を報告し、この標本は日本からの第1号化石として、Yabe (1903) によつて <i>Helicoprion bessonowi</i> であると記載された
林ほか(1990)	黒保根村地域では、フズリナ石灰岩は規模としては厚さ約1 mのレンズ状岩体が多いが、 <i>Helicoprion</i> を産出した厚さ50 mをこえる層状岩体までみられる。
日本古生物学会編(1991)	日本では群馬県の花輪から採取されたものにヘリコプリオン・ベツソノウイ[<i>Helicoprion bessonowi</i>]という学名が適用されている
地学団体研究会編(1996)	日本からは、群馬県勢多郡東村の八木原石灰岩(中部ペルム系)産の <i>H. bessonowi</i> (H. Yabe, 1903)と宮城県気仙沼市の叶倉-登米層(中部ペルム系)産の <i>H. sp.</i> (荒木英夫, 1980)が知られている。
大間々町誌編さん室(1996)	ヘリコプリオンは、フズリナ石灰岩の中から発見されたのである。(中略)八木原石灰岩は銅の溶剤として足尾銅山へ運ばれた。ヘリコプリオンは、八木原ではなく、足尾銅山で発見された。(中略)母岩は3つに割れていたもので、足尾銅山、地質調査所、及び東京大学に分散して保管された。足尾銅山標本は行方不明、地質調査所標本は空襲で焼失、現存するのは東京大学標本のみである
林(1997)	矢部長克の報告には、産出地点も発見者もない。産地は「花輪に近い八木原」とだけ書かれている。従つて、その後のヘリコプリオンの紹介記事もいろいろで、「花輪から産する」とか、「栃木県から」とか、不確定的なものであった。花輪付近には採掘された石灰岩がないので、黒保根村八木原で採掘された石灰質岩に、化石が含まれていたということには、まちがいはない。ただし、化石は現地で見られたものではなく、金属鉱物の溶剤として、八木原で採掘され、足尾まで運ばれて、足尾銅山で発見されたいと考えられる。
林(1998)	黒保根村八木原に分布する八木原石灰岩は厚く広く、大規模に採掘されましたが、八木原石灰岩はヘリコプリオンというサメの祖先の化石が発見されて有名です。
群馬県立自然史博物館(1999)	かつて足尾銅山で発見されたヘリコプリオン化石は、本県勢多郡黒保根村八木原付近で採掘されたものとされている。
後藤ほか(2010)	本標本は、1987年に群馬県みどり市花輪の八木原石灰岩から発見された第1標本 <i>Helicoprion bessonowi</i> Karpinsky (Yabe, 1903), 1979年5月13日に荒木によつて宮城県気仙沼市黒沢の黒沢層から発見された第2標本 <i>Helicoprion sp.</i> (荒木, 1980)につぐ、日本産ヘリコプリオンの第3標本である。
日本古生物学会編(2010)	日本からは、群馬県みどり市の八木原石灰岩(中部ペルム系)から <i>H. bessonowi</i> が、宮城県気仙沼市の黒沢層(中部ペルム系)から <i>H. sp.</i> が記載されている
高菜・岡部(2011)	1900年、佐川榮次郎(明治31年に東京帝國大學地質學教室を卒業;群馬県内の榛名山、妙義山や荒船山などを調査した)によつて、群馬県東部に分布する足尾帯に由来するペルム系石灰岩から、その3年前に発見された軟骨魚類ヘリコプリオン・ベツソノウイ <i>Helicoprion bessonowi</i> (板鯉亜綱エウゲネオドゥス目)の産出が報告され(佐川, 1900; 神保, 1900), 後に矢部長克はその標本を英文記載すると共に、共産化石や産出層準の層序や岩相について論じた(Yabe, 1903)。
桐生地質の会編(2012)	地質学者の佐川栄次郎は、明治30年(1897)に足尾銅山で銅の精錬に使うために持ち込まれた石灰岩の中からこのヘリコプリオン化石を発見した、といわれている。この化石を記載した古生物学者の矢部長克の報告(1903)では現在のみどり市東町花輪からの産出となっているが、当時、足尾への石灰岩を採掘し搬出していたのは、桐生市黒保根町八木原(口絵-18)であろう、というのが現在の定説である。
土屋(2019)	ヘリコプリオンの良質な化石はアメリカ産のものがよく知られているが、日本でも宮城県と群馬県からの報告がある。
高菜(2021)	佐川(1900)やYabe (1903) は、群馬県東部に分布する足尾帯のペルム系石灰岩からヘリコプリオン属の化石 <i>Helicoprion bessonowi</i> を報告し(図1), その後80年近く日本最古の脊椎動物化石の地位にあった。



第2図 花輪周辺の石灰岩の分布。Yabe (1903) から転載 (© 日本地質学会)。黒い太線が石灰岩の分布域であり、Yagihara (八木原) から、Hanawa (花輪) の対岸を通して Gōto (神戸) 南方に至る石灰岩体の存在を認識していたことがわかる。

編, 1991)。その一方で、確認した範囲では藤本 (1951) が、初めて産出地点として「八木原」を用いた。以降の文献ではしばしばこの地名が使われ (野村編, 1978)、「八木原石灰岩」という言葉も登場するようになる (地学団体研究会編, 1996; 大間々町誌編さん室, 1996; 林, 1998; 群馬県立自然史博物館, 1999; 日本古生物学会編, 2010)。

この「花輪」から「八木原」への変遷について、比較的詳細にその理由が書いてあるのは林 (1997) 及び桐生地質の会編 (2012) である。両者とも、花輪では石灰岩の採掘が行われていなかったことを主な根拠としている。

ここで、最初の記載報告である Yabe (1903) や同時期の記述に遡ってみる。Yabe (1903) では本文中では「Hanawa」と記しているが、その付図では石灰岩は八木原から神戸周辺に分布しており、花輪には石灰岩の分布を示していない (第2図)。また同年、矢部 (1903) は栃木県周辺の石灰岩の分布をまとめており、その中で「渡良瀬河に沿ひ神戸、水沼間に一帯の石灰岩層あり」と記述している。さらに矢部 (1903) は、「花輪に於て直接石灰岩の下部には角岩、上には粘板岩あり而して水沼及花輪の対岸には曾て足尾古河鑛業所が採掘したる遺跡あり」と、花輪の対岸に採掘所が存在したことを記している。これらのことから、Yabe (1903) ではヘリコプリオンの産出地点を「Hanawa」と記載しているものの、それは花輪の対岸側の石灰岩分布域にあたりと判断していたと思われる。

実際に、地質図上でも花輪周辺には石灰岩を含む炭酸塩岩類は分布しておらず (例えば、須藤ほか, 1991; Kamata, 1996)、筆者が周辺を踏査した限りでも、少なくとも大規模な石灰岩の分布は認められない。一方、黒保根町八木原には石灰岩の転石が多数存在する (写真 2A) (伊藤, 2021)。これらの転石の中にはフズリナ石灰岩が認められ (写真 2B, 2C)、Yabe (1903) の記載とも一致する。

上記の通り、岩相分布や Yabe (1903) の地層や地名の捉え方を踏まえると、ヘリコプリオンの産出地点は黒保根町八木原とみるのが妥当であると考えられる。なお、冒頭に記述した通り、群馬県桐生市の黒保根町八木原は、筆者が調査している「桐生及足利」地域の北西端にあたる (第1図)。また、黒保根町八木原に分布する石灰岩は、ジュラ系付加体の^{おおま}大間々コンプレックスに属する (伊藤, 2021)。

5. まとめ

群馬県東部の足尾山地は、世界でも産出例が少ないヘリコプリオンの産出地点の1つである。最初期の報告では、その産出地点は「花輪」と記されていたが (神保, 1990; Yabe, 1903)、下記の4点から「八木原」とみるのが妥当である。

- (1) 花輪には採掘可能な規模の石灰岩が分布していない。
- (2) 花輪の対岸の南西方に位置する八木原には、採掘可

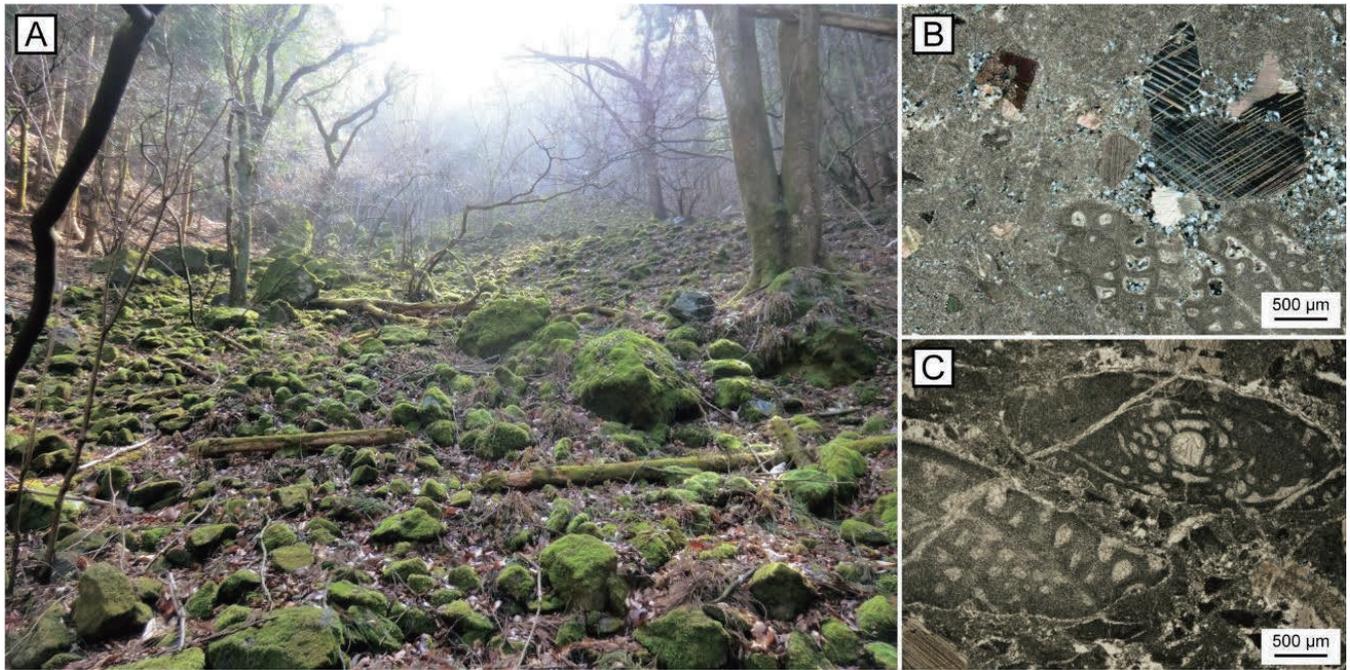


写真2 群馬県桐生市黒保根町八木原。(A) 八木原の写真。苔が生した転石がみられ、その多くが石灰岩である。(B, C) フズリナ石灰岩転石の薄片写真。Bはクロスニコル, Cはオープンニコル。

能な規模の石灰岩が露出する。

- (3) 矢部の同年の論文(矢部, 1903)でも, 石灰岩の主要分布域は花輪の対岸とみなしていた。
- (4) 八木原に分布する石灰岩はフズリナを含むものであり, これは Yabe(1903) の記述と一致する。

謝辞: ヘリコプリオンの特徴や産出報告に関して, 群馬県立自然史博物館の高栗祐司博士にご教示いただいた。

文 献

荒木英夫 (1980) 宮城県気仙沼市より軟骨魚類ヘリコプリオン属化石の発見。地質学雑誌, **86**, 135-137.

荒木英夫・後藤仁敏 (1979) 宮城県気仙沼市のペルム素より発見された *Helicoprion* 属化石について: 古生物。日本地質学会第 86 年学術大会 (秋田) 講演要旨集, 227.

Chen, X. H., Cheng, L. and Yin, K. G. (2007) The first record of *Helicoprion* Karpinsky (*Helicoprionidae*) from China. *Chinese Science Bulletin*, **52**, 2246-2251.

地学団体研究会編 (1996) 新版地学事典。平凡社, 東京, 1443p.

藤本治義 (1932) 関東の地質。中興館, 東京。

藤本治義 (1951) 日本地方地質誌 関東地方。朝倉書店,

東京, 315p.

後藤仁敏 (1975) 本邦のペルム系および三畳系からの魚類化石群の発見—栃木県葛生町唐沢より産出したサメ類の皮歯および魚類の歯について—。地球科学, **29**, 72-74.

後藤仁敏 (1981) ヘリコプリオンの復元について。化石研究会会誌, **13**, 25-46.

後藤仁敏・高泉幸浩・庄子 裕・荒木英夫・永広昌之 (2010) 宮城県気仙沼市の黒沢層 (ペルム紀) から発見されたヘリコプリオン *Helicoprion* の正中歯列化石について。日本古生物学会第 159 回例会講演予稿集, 21.

群馬県立自然史博物館 (1999) 群馬県天然記念物 (地質・鉱物) 緊急調査報告書。群馬県教育委員会, 162p.

林 信悟 (1997) 第一章 地形・地質, 二 化石, (一) ヘリコプリオン。黒保根村誌編纂室編, 黒保根村誌 1 総論・自然・原始古代・中世・近世編, 朝日印刷工業株式会社, 前橋, 126-128.

林 信悟 (1998) 第 II 章地質。勢多郡東村誌 自然編。朝日印刷工業株式会社, 前橋, 41-74.

伊藤 剛 (2021) 足尾山地のジュラ紀付加体の地質と対比: 5 万分の 1 地質図幅「桐生及足利」地域の検討。地質調査研究報告, **72**, 201-285.

神保小虎 (1900) 「ヘリコプリオン」魚の化石。地質学雑誌, **7**, 26-29.

Kamata, Y. (1996) Tectonostratigraphy of sedimentary

- complex in the southern part of the Ashio Terrane, central Japan. *Science reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba. Section B, Geological Sciences*, **17**, 71–107.
- Karpinsky, A. P. (1899) Ueber die Reste von Edestiden und die neue Gattung *Helicoprion*. *Verhdlungen der Kaiserlichen Russischen Mineralogischen Gesellschaft zu St. Petersburg*, **36**, 1–111.
- 桐生地質の会編 (2012) 桐生の地誌. 桐生市教育委員会, 137p.
- Kobayashi, F. (2006) Middle Permian foraminifers of the Izuru and Nabeyama Formations in the Kuzu area, Tochigi Prefecture, Japan Part 1. Schwagerinid, neoschwagerinid, and verbeekinid fusulinoideans. *Paleontological Research*, **10**, 37–59.
- Larson, E. R. and Scott, J. B. (1955) *Helicoprion* from Elko County, Nevada. *Journal of Paleontology*, **29**, 918–919.
- 益富壽之助・浜田隆士 (1966) 原色化石図鑑. 保育社, 大阪, 268p.
- 森下 晶編 (1977) 日本標準化石図譜. 朝倉書店, 東京, 242p.
- 日本古生物学会編 (1991) 古生物学事典. 朝倉書店, 東京, 410p.
- 日本古生物学会編 (2010) 古生物学事典 (第2版). 朝倉書店, 東京, 576p.
- 野村 哲編 (1978) 日曜の地学5 群馬の地質をめぐって(改訂版). 築地書館, 東京, 199p.
- 大橋智之・泉 賢太郎・伊藤 剛・奥村よほ子・木村由莉・ジェンキンズ ロバート・高桑祐司・辻野泰之・中島礼・宮田真也 (2020) 眠れなくなるほど面白い 図解古生物. 日本文芸社, 東京, 127p.
- 大間々町誌編さん室 (1996) 大間々町誌「基礎資料 VIII」大間々町の地形・地質. 大間々町誌刊行委員会, 群馬県大間々町 (現 桐生市), 148p.
- Ramsey, J. B., Wilga, C. D., Tapanila, L., Pruitt, J., Pradel, A., Schlader, R. and Didier, D. A. (2015) Eating with a Saw for a Jaw: Functional Morphology of the Jaws and Tooth-Whorl in *Helicoprion davisii*. *Journal of Morphology*, **276**, 47–64.
- 佐川栄次郎 (1900) 日本及ロシアに出でし最古魚類遺歯, **12**, 290.
- 鹿間時夫 (1964) 日本化石図譜. 朝倉書店, 東京, 287p.
- 須藤定久・牧本 博・秦 光男・宇野沢 昭・滝沢文教・坂本 亨・駒澤正夫・広島俊男 (1991) 20万分の1地質図幅「宇都宮」, 地質調査所.
- 高桑祐司 (2021) 日本における軟骨魚類化石研究—現状と展望—. 化石, **109**, 5–17.
- 高桑祐司・岡部 勇 (2011) 群馬県桐生市の足尾帯のペルム系からクテナカントゥス科サメ類の新産出. 群馬県立自然史博物館研究報告, **15**, 153–159.
- Tapanila, L. and Pruitt, J. (2013) Unraveling species concepts for the *Helicoprion* tooth whorl. *Journal of Paleontology*, **87**, 965–983.
- Tapanila, L., Pruitt, J., Pradel, A., Wilga, C. D., Ramsay, J. B., Schlader, R. and Didier, D. A. (2013) Jaws for a spiral-tooth whorl: CT images reveal novel adaptation and phylogeny in fossil *Helicoprion*. *Biological Letters*, **9**, 20130057. doi: 10.1098/rsbl.2013.0057
- Taylor, P. D. and O’Dea, A. (2014) *A History of Life in 100 Fossils*. Natural History Museum, London, Smithsonian Books, 224p.
- 土屋 健 (2014) 石炭紀・ペルム紀の生物. 技術評論社, 東京, 152p.
- 土屋 健 (2016) 楽しい動物化石. 河出書房新社, 東京, 111p.
- 土屋 健 (2019) 日本の古生物たち. 笠倉出版社, 東京, 192p.
- Wheeler, H. E. (1939) *Helicoprion* in the Anthracolithic (Late Paleozoic) of Nevada and California, and Its Stratigraphic Significance. *Journal of Paleontology*, **13**, 103–114.
- Yabe, H. (1903) A fusulina-limestone with *Helicoprion* in Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **10**, 1–13.
- 矢部長克 (1903) 下野國北部古生代石灰岩層(第二及三版). 地質学雑誌, **10**, 62–71.
- 横山又二郎 (1920) 古生物学要綱, 早稲田大学出版部, 東京, 657p.
- Zhang, Y. C. and Wang, Y. (2018) Permian fusuline biostratigraphy. In Lucas, S. G. and Shen, S. Z., eds., *The Permian Time Scale*, Geological Society, London, Special Publication, **450**, 253–288.
-
- ITO Tsuyoshi (2021)—*Helicoprion* having spirally-arranged tooth— The occurrence site in the Ashio Mountains, central Japan.
-

(受付: 2021年8月2日)

資源をつくる水のちから

—その2 燃料資源・地熱資源—

佐脇 貴幸¹⁾

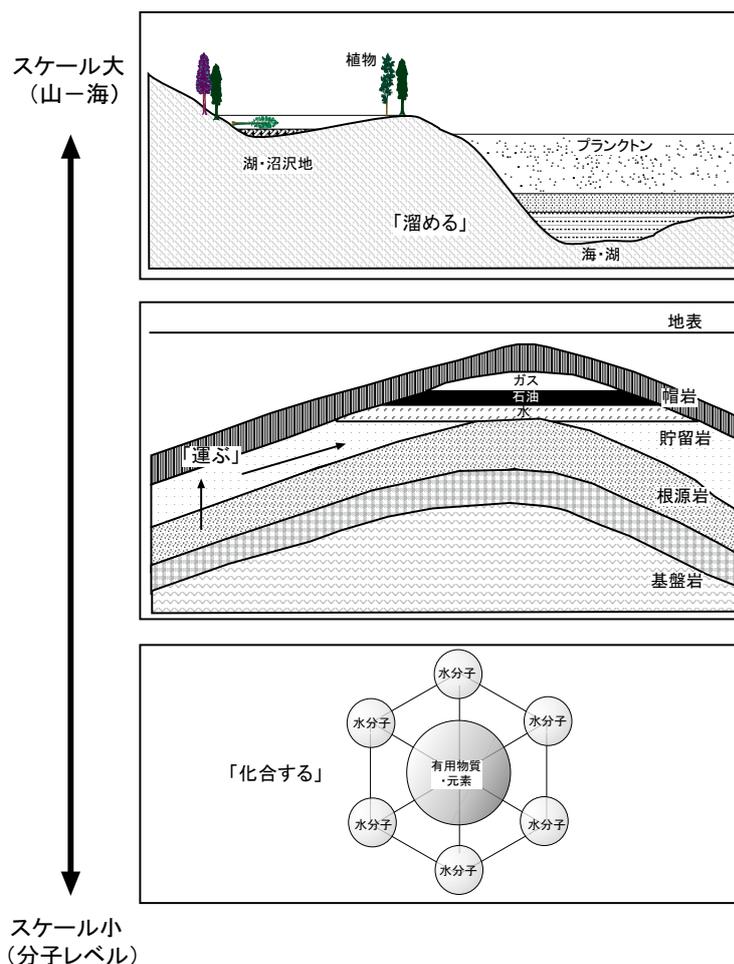
1. はじめに

産業技術総合研究所(産総研)の地質標本館には、様々な岩石・鉱物・化石標本が展示されています。佐脇(2021)では、これらの展示標本の内の鉱物資源に関わるものを基に、鉱物資源をつくる「水のちから(機能, 能力)」を解説しましたが、小論ではその続編として、同じく展示標本・展示物を使い、燃料資源, 地熱資源をつくる「水のちから」に関して解説します。今回関係する「水のちから」は、「溜める」, 「運ぶ」, 「化合する」(第1図), 「熱を持つ」です。

2. 燃料資源をつくる「水のちから」

2.1 鉱床の分類

燃料資源の鉱床の代表的なものは、石油, 石炭, 天然ガスの鉱床です。これらは、どれも生物の遺骸(化石)に関連しているため、化石燃料(fossil fuel), 有機燃料(organic fuel)と呼ばれることもあります。さらにこれらは、物性, 化学組成, 原材料物質などに基づいて細分されます(第1表)。ただし、第1表の分類は人為的なものであって、実際には石油—天然ガス—石炭の間の中間的な性質を持つものも存在します(氏家, 1990)。



第1図 燃料資源に関係する様々な「水のちから」

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード：水, 燃料資源, 地熱資源, 地質標本館, 展示

第1表 化石燃料の分類（氏家，1990）
 なお，不燃性天然ガスは，正式には化石燃料に含まれない。

	気体	油田ガス	乾性ガス
			湿性ガス
石油	液体	原油	
	半固体	アスファルト	
	固体	アスファルト鉱、パラフィンワックスなど	
天然ガス	可燃性	C, Hを主にするもの	炭田ガス
		H ₂ Sを主にするもの	水溶性天然ガス
	不燃性	N ₂ を主にするもの	
		CO ₂ を主にするもの	
		H ₂ Oを主にするもの	
石炭	腐植炭（陸植炭）	陸上植物を原材料とするもの	
	残留炭	樹脂、孢子、花粉などを原材料とするもの	
	腐泥炭	水中植物を原材料とするもの	

乾性ガス：1,000 ft³（約 28.3m³）のガスに含まれる液体成分が 0.1 ガロン（約 0.45 リットル）以下の天然ガス。
 湿性ガス：1,000 ft³ のガスに含まれる液体成分が 0.1 ガロン以上の天然ガス。

なお，ウラン，トリウムなどの放射性元素からなる核燃料物質も燃料資源（エネルギー資源）といえます（スキナー〔松尾訳〕，1971；番場，1990）が，今回は化石燃料に分類されるものに絞っての話といたします。

2.2 石油鉱床

石油や天然ガスの鉱床が形成される過程は、「生成→移動→集積」という三段階からなる「石油システム」というモデルで解釈されています。その中の重要な地質学的要素としては，堆積盆地（堆積盆），石油根源岩，貯留岩（貯留層），トラップなどがあります（森田・鈴木，2006；佐脇，2021，第1表）。それぞれ簡単に説明すると，堆積盆地（堆積盆）とは，多量の堆積物が溜まる盆地状の地形（場）のことです。石油根源岩とは，有機物を多量に含む堆積岩のことです，例えば珪質泥岩（森田・兼子，2020）があります。貯留岩とは，隙間が多く（多孔質），石油を内部に溜める能力を持った岩石のことです。貯留岩の岩種としては砂岩，炭酸塩岩などがありますが，東北地方日本海沿岸地域では火山砕屑岩も貯留岩として重要です（氏家，1990）。トラップとは，貯留岩から石油が逃げ出せない（逸失しない）ように閉じ込める地質構造のことです。例えば，地層が褶曲して背斜構造をなし，帽岩と呼ばれる浸透率の低い岩石が，ドームの屋根のように貯留岩の上を覆っている背斜構造が代表的なもので（第1図中段），そのほかに断層によるもの，不整合によるものなどがあります（木下，1973）。石油鉱床は，このような「原料」，「入れ物」としての地質学的要素があつて

つくられるわけですが，「原料をつくり入れ物に入れる」（＝石油システム）ためには，「水のちから」が必要です。それは，石油の原料を「溜め」，できた石油を「運ぶ」という「ちから」です（第1図上段，中段）。

石油の起源物質は有機物の集合体，具体的には植物プランクトンや植物片などの生物の遺骸だと考えられています。すなわち，海中に発生したプランクトンや陸から運ばれてきた生物の遺骸が水中で沈下し，水底（海底，湖底などの堆積盆地）に大量に溜まり，有機物を多量に含んだ堆積物が形成されることが石油の生成の始まりと考えられます。第2図Aは，地質標本館2階第2展示室に示してある石油・天然ガス・石炭の形成過程を簡潔に示した説明図ですが，図右において，海中に発生した植物プランクトンが死んで海中を沈下し，酸素が乏しい条件下（嫌気的環境といえます）で海底に溜まっていく様子を示しています。すなわち，水は，石油の「原料」となる多量の有機物を堆積盆地内に「溜める」働きをしていることとなります。

この堆積物が続成作用によって固結して堆積岩になったものが石油根源岩です。その例として，地質標本館には，先述の珪質泥岩が展示されています（第2図B左；森田・兼子，2020）。これに含まれているのが元の有機物から変化して形成されたケロジェン（第2図B右；森田・谷田部，2021）です。このケロジェンを含む石油根源岩が地中で熱を受け続けることによって，次第に石油が生成しやすい状態に近づいていきます。この過程を熟成，またその程度を熟成度といい，この熟成度が上がっていくとケロジェンが



第2図 A: 石油・天然ガス・石炭の形成過程の模式図, B: 珪質泥岩 (左) とケロジェン (右) の標本, C: 秋田県申川油田の貯留岩 (全て2階第2展示室)

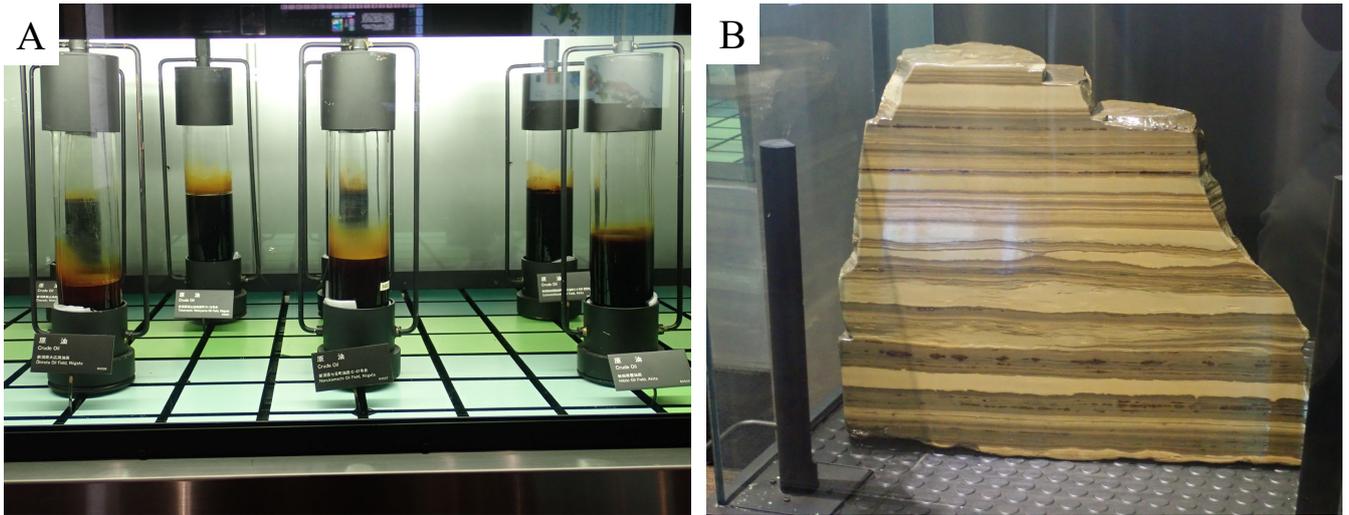
分解し始め、石油の生成につながっていきます (ただし、地温が上がりすぎると、石油を通り越してガス化してしまいます)。これが石油システムでの「生成」の過程です。このように、生物の遺骸から石油が形成されるという考え方のことを「有機成因説」といいます。なお、生物の遺骸に依存しないとする「無機起源説」もあります (中島, 2015)。

さて、上記の過程で形成された石油分は、石油根源岩から貯留岩 (第2図C) 内に移動します。これを第一次移動といいます (第1図中段)。第一次移動においては、水が媒体として働く、水以外の媒体 (岩石中の割れ目、ガスなど) が利用されるなどの説があります (氏家, 1990)。それに続いて、石油が貯留岩内を上方へ移動していき、トラップまで移動することを第二次移動といいます (第1図中段)。第二次移動は、基本的には水と石油との間の密度差による浮力がその原動力となりますが、時には水圧の高い方から低い方へと動く流れ (水力流) も関与します (相場, 1979; 氏家, 1990; 田口, 1998)。このように、石油の移動・集積過程では、直接的もしくは間接的に水の「運ぶちから」が関

与することになります。

トラップ内では、模式的には下位から水相 (油田水)、石油相、ガス相という順に重なります。しかし、実際にはプールのような広々とした開放空間に集積しているわけではなく、貯留岩の隙間に押し込まれたように集積しています。このため、3つの相の間がスパッと明確に区切られているわけではなく、漸移的な部分もあります (手塚, 1990)。このトラップに十分な石油が集積すれば石油鉱床と呼ばれることになります。

第3図Aには、新潟県、秋田県の石油鉱床から採取された石油 (原油) 標本を示します。日本の産油地域 (過去に石油を産した地域) は、北海道道央から新潟県にかけての日本海側及び静岡県ですが、比較的大規模な石油鉱床は秋田県、新潟県に集中しています (氏家, 1990)。秋田県から新潟県にかけて比較的大規模な石油鉱床が多いのは、日本海の形成と関係があると考えられています。すなわち、新第三紀中新世にユーラシア大陸の縁が割れ始めることで海 (古日本海) が形成され始めました (およそ2,000万年前～



第3図 A：秋田県，新潟県産の石油の標本，B：アメリカの始新世の湖成層から採取されたオイルシェール（ともに2階第2展示室）

1,500 万年前：高橋，2017）。この時，古日本海の東部分で陥没が起きて地溝帯（＝堆積盆地）が形成され，そこに有機物を多く含む堆積物，砂質の堆積物あるいは火山砕屑岩などが溜まることで，石油根源岩と貯留岩の元が形成され，これが時を経て石油鉱床を形成していったと考えられています（島津，2000）。世界的にみると，大規模な石油鉱床（大規模な油田）は中東，メキシコ湾岸などに存在します（氏家，1990）が，これらは特に大規模な堆積の場（堆積盆地），多量の有機物の集積，熟成，トラップ内への石油の保存，地質構造の非破壊などの条件が全てそろったところだと言えます。

一方，第3図Bはオイルシェールの標本です。オイルシェールとは，ケロジェンを大量に含む緻密な堆積岩のことで，油母頁岩^{ゆぼけつがん}，油頁岩と呼ばれることもあります（手塚，1990）。これがさらに熟成が進むと，中に石油分やガス分を含むようになります。1990年代以前は，この地下深くにある岩石から石油分を取り出すことは困難と考えられていましたが，1990年代の回収技術の進展，2000年代の石油高価格時代を背景にして，2006年以降は，「シェール革命」と呼ばれる，シェールオイル・シェールガスの爆発的な生産が始まりました（熊坂，2014；<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/1-1-1.html> 閲覧日：2021年7月21日）。なお，この生産においては，高圧の水を地下に押し込んで石油・ガスを絞り出すためにフラッキング（水圧破砕法）という手法が使われており，これまでとは違った意味で，人為的に「水のちから」を利用していることとなります。ただし，現在では，環境汚染を防ぐためにフラッキングを規制・禁止しようとする動きがあります（大場，2014；<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/>

05/0fe3059721f524c5.html 閲覧日：2021年7月21日）。

以上の石油をつくる「水のちから」を再度確認しますと，まず石油の起源物質である有機物を「溜める」，次に石油分ができた後には，それを移動させるための媒体として，「運ぶ」という「ちから」が関与していることとなります。

2.3 石炭鉱床

近年は，石炭を日常生活の中で使うことは極めてまれになりましたが，昭和30年代～40年代前半までは，学校や公共施設での暖房の主役（石炭ストーブ）として，冬場には当たり前のように目にしているものでした。今でも，火力発電，鉄鋼生産には欠かせないものとして使われています。一方で，石炭の燃焼はCO₂の大規模排出源であることが問題視され，地球温暖化対策の観点からその使用を大幅に削減することが，社会的課題となっています。

このように，現在は肩身の狭い立場になってしまった石炭ですが，18世紀の産業革命以降，社会を支える重要なエネルギー源として利用されてきたことは揺るぎない事実です。日本にも，釧路，石狩，常磐，宇部，筑豊などの多数の炭田が存在し（地質調査所（編），1960），日本の高度経済成長を支えてきました。ここでは，「黒いダイヤモンド」とも呼ばれた石炭のでき方と，地質標本館の展示物について紹介します。

石炭は，言ってみれば，今から数億年前～数千万年前の湿地帯に繁茂していた陸上植物の化石です。地球上に陸上植物が最初に現れたのはシルル紀（およそ4.4億年前～4.2億年前）です（赤木ほか，1984）が，陸上植物が繁茂し始めたデボン紀（およそ4.2億年前～3.6億年前）以降の様々な地質時代に石炭が形成されるようになりました。最も代表的

といえるのは、ヨーロッパやアメリカ東部に産する石炭紀（およそ 3.6 億年前～3 億年前）のもので（相原，1979）。石炭が多く形成された地質時代だから石炭紀，ということですね。一方，日本の炭田は古第三紀（およそ 6,600 万年前～2,300 万年前）の間に形成されたものが多く，この時代のものは主として北海道と九州北西部に分布しています（相原，1981；藤田ほか，2009）。

石炭の元となる植物がどのようにして集積したかに関して，従来は，湿地帯に繁茂している陸上植物が瀉，沼沢地，湖，内湾，河口の三角州などの，比較的水の流れが穏やか，あるいは滞留する場所で，微生物や水による様々な作用を受けつつも，完全に酸化分解することなく水中に堆積する，という過程が考えられていました（徳永，1967）。すなわち，植物の遺骸を「溜める」という「水のちから」が石炭の形成にとって重要となるわけです。一方，1980 年代後半以降には，湿原でミズゴケの群生による高位泥炭地あるいは高層湿原で泥炭が形成されることを始まりとする，という考えが現れました（藤田ほか，2009；日本エネルギー学会（編），2013）。ただ，いずれの説でも，植物の遺骸が空気（酸素）から遮断されることで酸化分解を免れることが重要という点は変わりません。次いで，この地表近くにあった植物の遺骸の上に砂・泥などが溜まって地中に埋もれていき，地下深く（地下数百 m～数 km）まで埋没することで地圧・地熱の影響を受け，石炭が形成されると考えられています（鈴木ほか，2008；藤田ほか，2009）。

このようにしてできた石炭は，その原植物の種類によって，腐植炭，残留炭，腐泥炭に分類されます（第 1 表）。また，その中に含まれる炭素の量によって泥炭・亜炭，褐炭，^あれきせい 亜瀝青炭，瀝青炭，無煙炭に分けられます（第 2 表）が，粘結性による分類，燃焼法による分類もあります（鈴木ほか，2008）。粘結性とは，石炭を，^{かんりゆう}酸素を遮断して強熱し熱分解させたとき（乾留といいます），石炭が一旦軟らかくどろけてから再び固まる性質のことで，その程度の差が分類の基準となっています（藤田ほか，2009）。

第 4 図には，日本産の石炭の標本を示します。第 4 図 A は

釧路市太平洋炭礦^{たんこう}の垂瀝青炭の標本，B はすでに閉山してしまった日本各地の炭鉱の石炭の標本です。先述の通り，かつては北海道から九州まで日本にも多数の炭鉱がありましたが，1960 年代のエネルギー革命を経てエネルギー源の主役が石炭から石油に代わり，さらに安い海外の石炭の輸入が増加すると，日本各地の炭鉱は次々と閉山しました（藤田ほか，2009）。現在唯一残っている坑内掘りの炭鉱が，太平洋炭礦を引き継いだ釧路コールマインで，そのほか，2017 年度時点では，6 カ所の露天掘りの炭鉱があります（石炭エネルギーセンター，2018）。石炭は，きらきら光る金属鉱物とは違い，見た目は黒く地味ではありますが，日本の産業を支えてきた重要な資源であることに思いを馳せて，標本をご覧いただきたいと思います。

なお，第 4 図 C には，石炭鉱床に関連あるものとして珪化木^{けいか}の標本を示します。珪化木とは，樹木が地中に埋もれたものの石炭にはならず，木質部に珪酸分（ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）を含む水がしみ込み，中の成分を置換してできたものです。九州の炭田では，「松岩」と呼ばれることもあります（巨理，1966）。地質標本館前に展示してある標本は三点ありますが，どれも北海道美唄炭田^{びばい}から採取された，約 4,000 万年前の針葉樹です（澤田，2010；辻野，2017）。

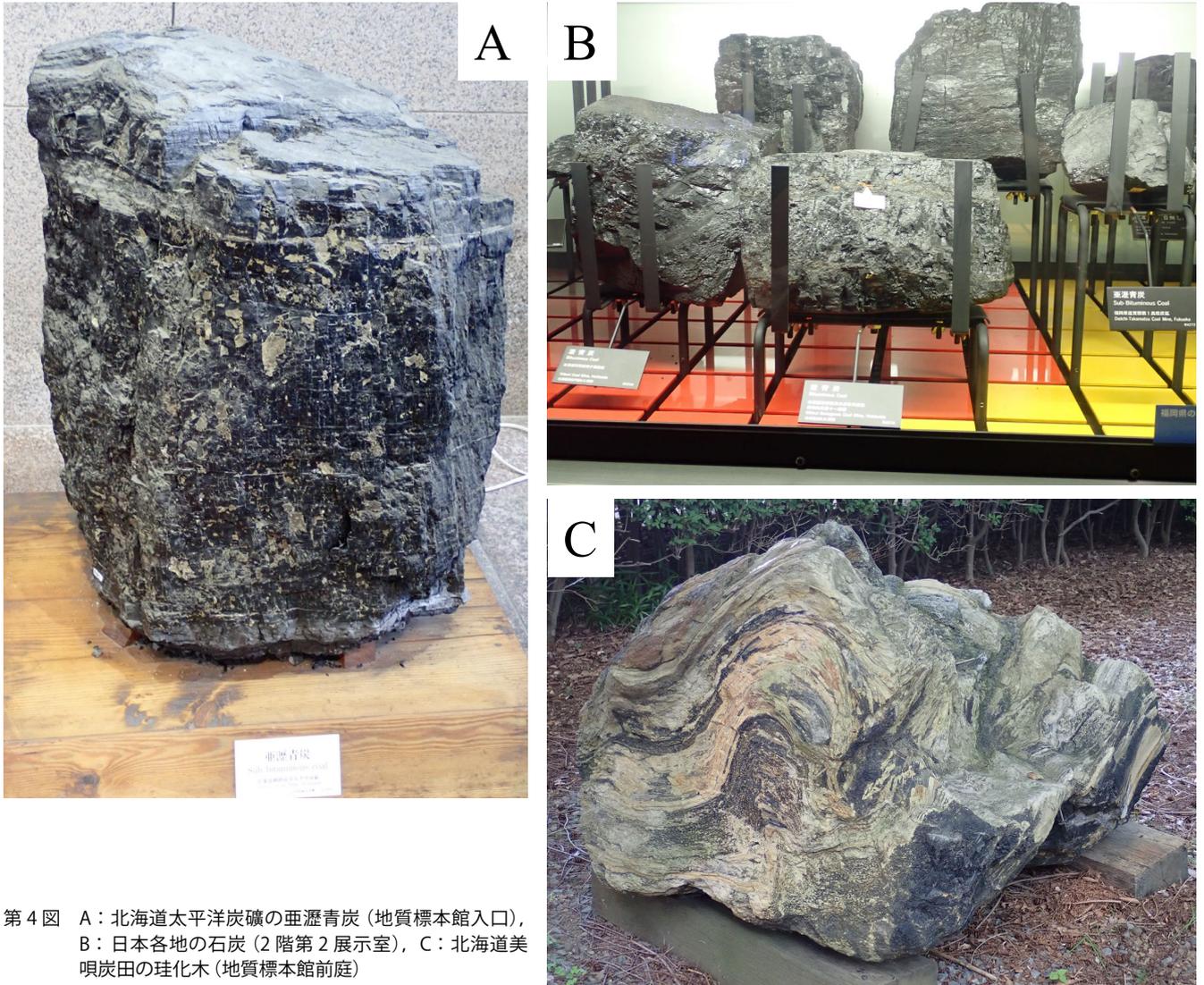
2.4 天然ガス鉱床

天然ガスには可燃性と不燃性のものがあります（第 1 表）が，燃料資源として利用されるのは，当然ながら可燃性の天然ガスです。可燃性天然ガスは，一般に油田に伴って産出しますが，その組成，成因，物性，産状・開発状況によってさらに分類されます（第 3 表）。特に，生物有機物および生物活動に由来する生物起源ガス（有機起源ガス）に関しては，その原材料は主として生物の遺骸であり，起源は石油，石炭と同根ということになります。すなわち，原材料である生物の遺骸が溜まる段階で，「水のちから」が働いたことになります。

第 3 表の中で，特に水が関与していることが明らかなのは，水溶性ガスとメタンハイドレートです。水溶性ガス

第 2 表 炭素量による石炭の分類（鈴木ほか，2008）

炭素(%)	石炭化度による分類	粘結性による分類	燃焼法による分類
～70	泥炭(草炭)、亜炭	-	-
70～78	褐炭	非粘結炭	-
78～80	亜瀝青炭	ガス用炭	非粘結炭、微粘結炭
80～83	瀝青炭	(低度) 弱粘結炭	ガス用炭、コークス炭
83～87		(中度) 粘結炭	コークス炭
87～91		(高度) 強粘結炭	コークス炭
91～	無煙炭	非粘結炭	無煙炭



第4図 A：北海道太平洋炭礦の亜瀝青炭（地質標本館入口），
B：日本各地の石炭（2階第2展示室），C：北海道美
唄炭田の珪化木（地質標本館前庭）

は、微生物が海底堆積物を分解して作り出したメタンを主成分とするもので、地下深くの地下水（^{かんすい}鹹水）に溶け込んでいます。代表的なものとしては南関東ガス田、宮崎ガス田、新潟ガス田があります（氏家，1990）。このうち、新潟ガス田は石油鉱床と近い位置関係にはありますが、成因は異なると考えられています（島津，2000）。このような水溶性天然ガス鉱床の形成には、メタンを溶け込ませるといふ「水のちから」が働いていることになります。なお、水溶性天然ガスを含む鹹水はヨウ素に富んでいるということも特徴となっています（<http://www.godoshigen.co.jp/learn/iodine/base.html> 閲覧日：2021年8月10日）。

もう一つのメタンハイドレートですが、これは現在日本で最も注目されている天然ガスです。これまで述べてきたように、石油、石炭、天然ガスは日本にも産しますが、現在その自給率は非常に低く、ほとんどを輸入に頼っています。しかし、近年の海底調査によって、日本の周辺の海底にはメタンハイドレートという新しい形の天然ガスが存在

することが明らかとなってきました。ハイドレート（ガスハイドレート）とは、^{ほうせつ}包摂（^{ほうせつ}包接）化合物（クラスレート）の一種で、結晶の内部に大きな空間があって^{かご}籠状の構造をなしており、そこにガス分子が閉じ込められているものです。様々なガスに応じたハイドレートがありますが、閉じ込められているガスがメタンの場合、これをメタンハイドレートと呼びます。低温・高圧条件下では氷のような固体物質であり、可燃性のメタンを含んでいるために「燃える氷」とも呼ばれています。化学組成は、 $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ と表されます（松本ほか，1994；森田，2006）。すなわち、水の「化合する」といふ「ちから」が働くことでメタンハイドレートが形成されるわけです（第1図下段）。

ガスが水と化合して氷状の固体物質をつくることは19世紀初めから知られていましたが、あくまで実験室や工場といった、人間のコントロール下にある場合のみの存在と考えられていました。しかしながら、1930年代になると、高圧ガスを搬送するパイプラインにガスハイドレートが

第3表 可燃性天然ガスの分類

氏家 (1990), 天然ガス鉱業会 (1998), 日本エネルギー学会天然ガス部会 (編) (1999, 2008), 鈴木ほか (2008), 日本エネルギー学会天然ガス部会資源分科会 CBM・SG 研究会・GH 研究会 (2014) の内容に基づいて作成

分類基準	分類	特徴等	
組成による分類	C, Hを主にするもの		
	H ₂ Sを主にするもの		
成因による分類	非生物起源ガス(無機起源ガス)	地球創生期に地球内部に閉じ込められたもの	
	生物起源ガス(有機起源ガス)	微生物起源ガス	微生物活動に伴って生成したもの
		熱分解起源ガス	有機物の熱分解によって生成したもの
物性による分類	乾性ガス(ドライガス)	ほとんどメタンからなり、常温常圧下で気体状態のもの	
	湿性ガス(ウェットガス)	メタンのほかに常温常圧下で液化するペンタン、ヘキサンを含むもの	
産状、開発状況による分類	在来型天然ガス	油田ガス	石油に伴って産出するもの
		水溶性ガス	深さ1,000mほどの地下水に溶存しているもの 日本以外では水溶性ガスを非在来型とする場合もあり
		随伴ガス 非随伴ガス(構造的ガス、遊離型ガス)	石油をほとんど伴わずに産出するもの
	非在来型天然ガス	シェールガス	石油根源岩から回収されるガス
		タイトサンドガス	低浸透性の硬質砂岩に閉じ込められている天然ガス
		コールベッドメタン(コールシームガス)	石炭層中のメタンガスで、産出状況により炭田ガス、石炭ガス、炭鉱ガス、炭層ガスなどと呼ばれる
		メタンハイドレート(天然ガスハイドレート)	軽炭化水素(メタン等)と水の水和物
		地球深層ガス	地球深部にあると主張されている無機起源ガス

自然に発生することが知られ、その後 1970 年代にはシベリア、カナダ北方の凍土層内にメタンハイドレート層が存在することが発見されました。さらに、深海底の探査によって、ガスハイドレートが深海底の海底下に存在することが確認されるようになりました(松本ほか, 1994)。以上を踏まえて、日本近海の海底でのメタンハイドレート調査が行われるようになり、次々とメタンハイドレートが存在することが確認されるようになりました。日本近海のメタンハイドレートの賦存形態には、砂層型メタンハイドレート、表層型メタンハイドレートの二種類があり(https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/oil_and_gas/ 閲覧日: 2021 年 8 月 2 日)、それぞれについての資源量調査、開発方法に関する調査・研究が進められています。

メタンハイドレートが安定に存在するには常時低温・高圧条件に保つ必要があるため、地質標本館内でメタンハイドレートそのものを常時展示することはできませんが、2階第2展示室にはメタンハイドレートの結晶模型(第5図A)と天然での試料の様子(第5図B)が展示されています。結晶模型では、メタン(白い球)を、水分子(黒い小さい球)が籠かごのように取り囲んでいることでメタンハイドレートが

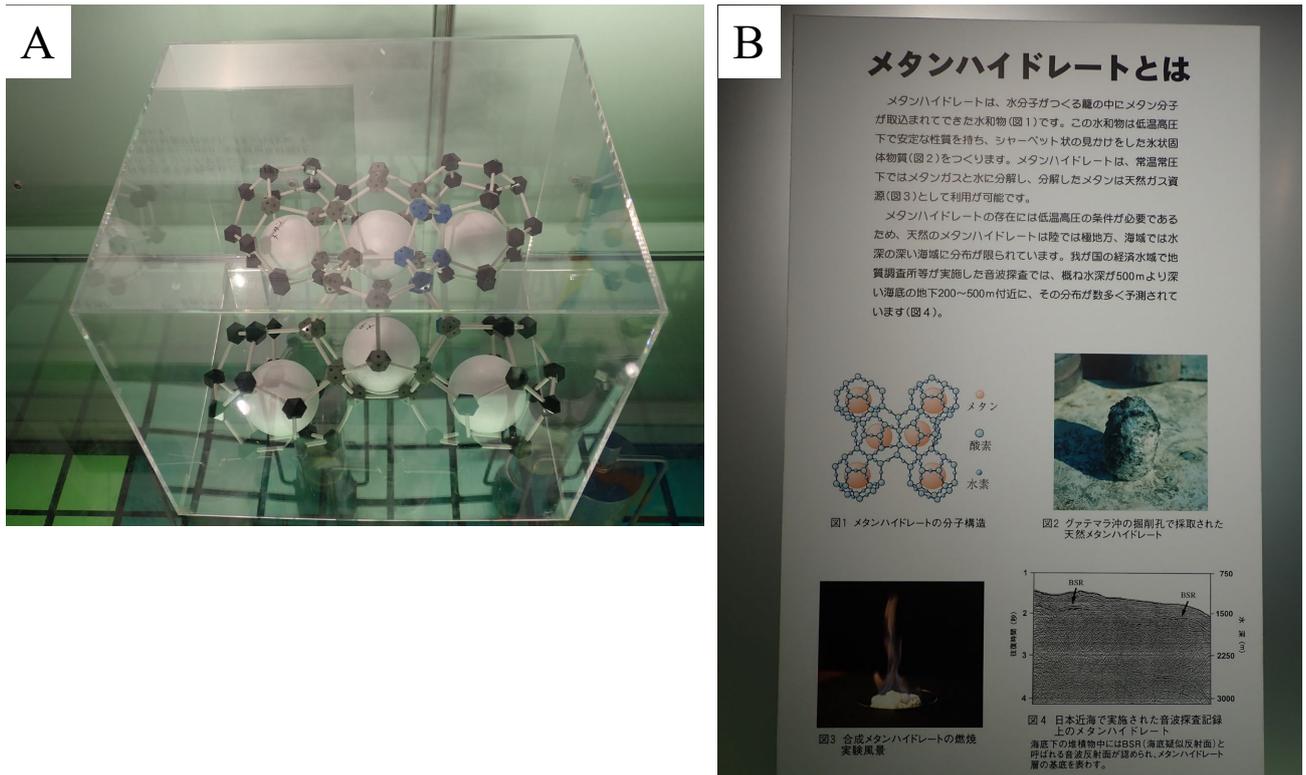
形成されることを示しています。もし中に入っているメタンが抜けてしまうと、この籠状の構造(包摂化合物)そのものが崩壊してしまいます(松本ほか, 1994)。

メタンハイドレートに関する解説については、例えば産総研の「サイエンスタウン」(https://www.aist.go.jp/science_town/reading/15/ 閲覧日: 2021 年 8 月 2 日)、MH21-S 研究開発コンソーシアムの解説ページ(<https://www.mh21japan.gr.jp/search.html> 閲覧日: 2021 年 8 月 2 日)なども併せてご覧ください。

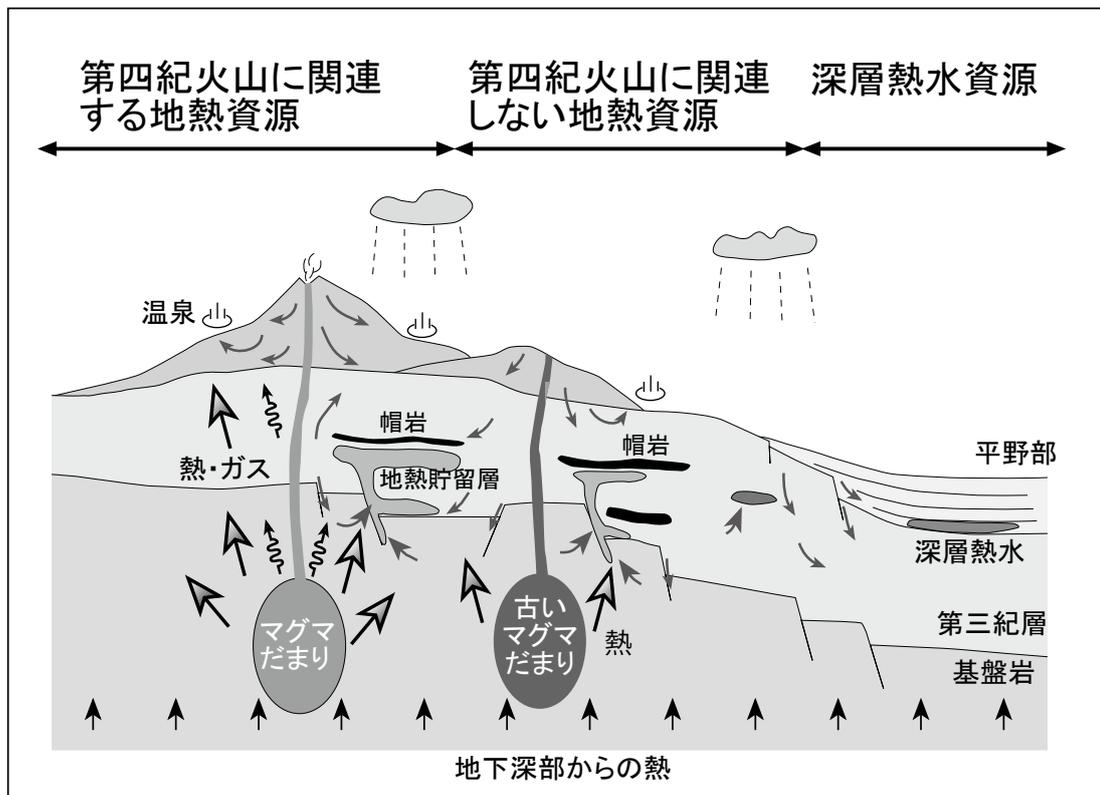
3. 地熱資源をつくる「水のちから」

地熱資源は、端的に言えば水の持つ熱エネルギー、即ち「熱を持つ」という「水のちから」によるものです。地層中の割れ目を通じて地表から浸み込んだ天水は、火山の下にあるマグマ溜まりあるいは地球内部から伝わってくる熱で熱せられ熱水となります。このような熱水が地下の割れ目に溜まっているところを「地熱貯留層」(佐脇, 2021, 第1表)と呼びます。地熱資源とは、このような熱エネルギーを蓄えた熱水のことを指します(第6図)。

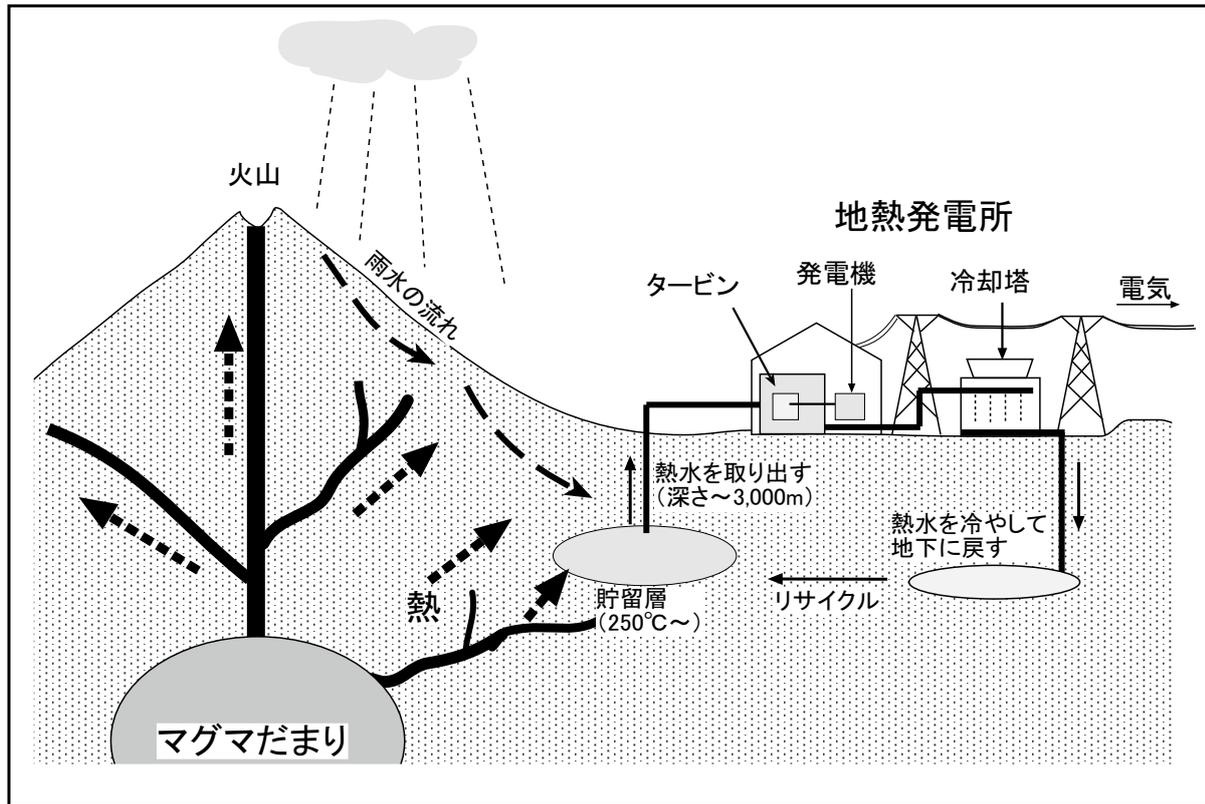
第6図に示したように、地熱資源には、火山に關係す



第5図 A：メタンハイドレートの立体模型，B：メタンハイドレートの産状，特徴などの説明パネル(ともに2階第2展示室)



第6図 地熱系の概念図(佐脇・水垣, 2005; 水垣ほか, 2007)



第7図 地熱発電の概念図(佐脇ほか, 2001)

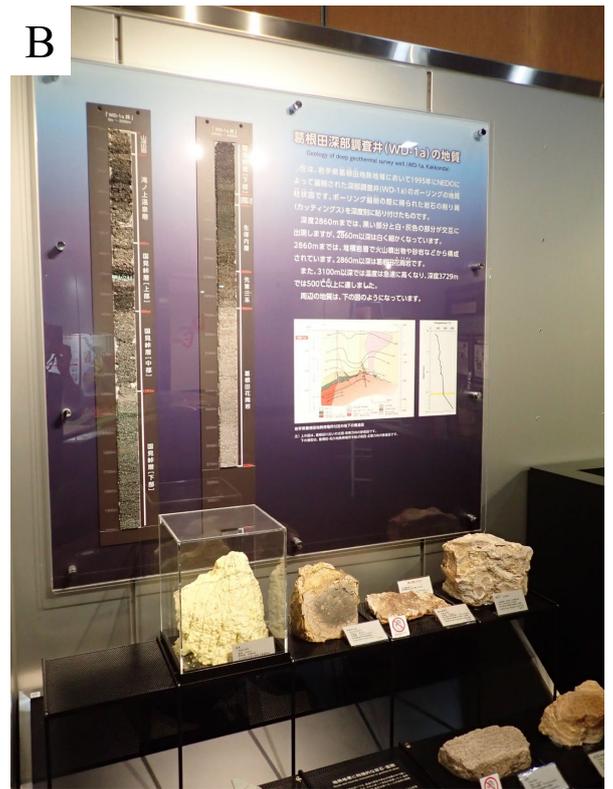
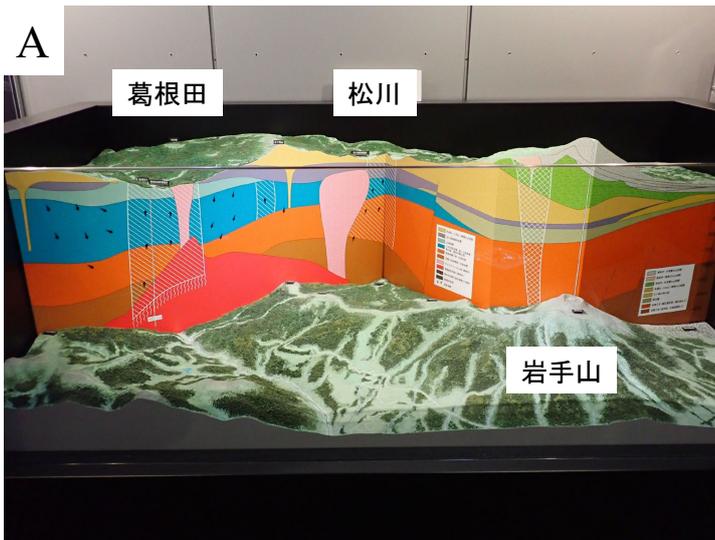
るものとそうでないものがあります。火山の近くが熱いのは、すぐ近くにマグマだまりがあって、その熱で熱せられるために温度が高くなっているわけですが、火山から遠く離れた場所でも地下は深いところほど温度が高くなっています。これは地球の深部からじわじわと伝わってくる熱のためで、日本付近での平均的な地下の温度の上昇率(地温勾配)は約 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ です。したがって地下1,000mにある地下水の温度は、地表近くの地下水に比べて約 30°C 高くなります。近年では、都市・平野部の、火山が無いところでも温泉施設がつくられています。これは1,000m以上の深さまで穴を掘り(ボーリングといいます)、地下深くの地下水を温泉水として採取しているもので、このような温められた地下水を「深層熱水」といいます(水垣ほか, 2007)。なお、前節の水溶性天然ガスを溶存させている鹹水も、実はこの深層熱水に当たります。

そのほか、特に熱いわけではありませんが、地下10～20mよりも深いところでは一年中一定の温度になっており、そこに流れている地下水と地表との温度差を利用して冷暖房に利用する技術があります。この技術は「地中熱利用」と呼ばれ、省エネルギー技術として注目されています。

このように、地熱資源となるものは、低温から高温まで様々な温度の地下水ということになりますが、そのうちの

特に高温の熱水を利用して発電する技術を、地熱発電と呼びます(第7図)。地熱発電では、地下500～3,000m程度の深さまで掘削した井戸を使って、地熱貯留層から 250°C 以上の熱水を取り出します。地下深くでは圧力が高いため液体状態ですが、地表近くになると圧力が下がることで蒸気が発生(沸騰)します。この蒸気を熱水から分離し、それを使って発電機のタービンを回して発電します。発電に使った蒸気や分離したお湯は還元井と呼ばれる井戸から地下に戻します。このように、地熱発電では一度使った熱水は捨てずに地下に戻し、再度加熱されて戻ってくるものをリサイクルできるようにしています。火力発電も原子力発電も、蒸気でタービンを回して発電するという点では同じですが、そのために化石燃料や核燃料が必要とされます。一方、地熱発電は自然界(地球内部)にある熱水そのものを利用する点が異なります。このため地熱資源は、太陽、風力、水力などと同じく自然エネルギー・再生可能エネルギーに位置付けられています。特に、世界有数の火山国である日本にとって地熱資源は豊富に存在する自然エネルギーであり、 CO_2 をほとんど排出しないクリーンエネルギーでもあります。

世界的にみると、世界最初の地熱発電は1904年にイタリアで実験が行われ、その後世界各地の火山を有する国で



第8図 A：岩手県の岩手山周辺に位置する葛根田地熱系，松川地熱系の立体模型，B：葛根田地熱系WD-1a製の説明パネルと関連する岩石標本

広まりました。日本では、2019年度現在、比較的大型の地熱発電所は20カ所建設されており、日本の電力の0.2%を賄っています。詳しくは、例えば <https://geothermal.jogmec.go.jp/information/> (閲覧日：2021年8月8日)をご覧ください。

地質標本館の地熱資源にかかわる展示は、2階第3展示室にあります。第8図Aは岩手県の岩手山周辺にある、葛根田地熱系、松川地熱系の立体模型です。地下深部にあるマグマの熱によって熱せられた熱水を使って、地熱発電所が稼働している様子が示されています。また第8図Bは、葛根田地熱系に掘削された地熱調査井WD-1aの説明パネルと、地熱地帯に産する岩石標本を展示したものです。このWD-1a井は、地熱系の深部に存在している、固結しつつある花崗岩体を掘りぬいたもので、この井戸の最深部の温度は500℃を超えていました。この研究成果は、今後の高温地熱系開発の指針となるだけでなく、地球科学的に非常に意義あるものとして評価されます(例えば、茂野ほか、2000)。

地中熱利用システムに関する展示も、同じく第3展示室内にあります(第9図A)。この模型では、地下100m程度まで掘削した井戸の中を、熱交換用の液体を循環させることで、夏は冷房、冬は暖房に利用できることを示してい

ます。また、実際に地質標本館に設置されている地中熱利用システムの坑井設備も、地質標本館前で見るができます(第9図B)。むろん地下にある坑井自体を目にすることはできませんが、これを使った地中熱利用システムのデモ機は、地質標本館内の1階映像室で実際に利用されています(内田・吉岡、2013)。

4. おわりに

以上、2回にわたって、地質標本館の展示標本・展示物を使って、「資源をつくる水のちから」を解説しました。地球は水の惑星とも言われますが、水は常に人間にとって欠かすことのできない重要な物質です。さらに、人間の生活を支える様々な資源は、水がなければ、その大半は形成されてこなかったことをご理解いただければと思います。今一度「水のちから」に感謝し、大切に扱っていくことをお考えいただければ幸いです。

また、コロナ禍が続く中、なかなか地質標本館においでいただくことも難しかろうと思います。一刻も早くコロナ禍が終息し、再び地質標本館の様々な展示物を自由に見学して地質学をより深く学んでいただける日が来ることを切に願っています。



第9図 A: 地中熱利用の模型(2階第3展示室), B: 地中熱利用のための坑井設備(地質標本館前庭)

謝辞: 小論を執筆するにあたり、森田澄人博士(地質情報基盤センター)には粗稿を読んでいただき、貴重なコメントをいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

文献

- 相場惇一(1979) 石油の移動と集積. 地学雑誌, **88**, 369-382.
- 相原安津夫(1979) §3.10 石炭鉱床. 第3章 地球の進化と鉱床の形成, 佐々木 昭・石原舜三・関陽太郎(編) 岩波講座 地球科学 14 地球の資源/地表の開発. 岩波書店, 東京, 135-143.
- 相原安津夫(1981) 石炭の起源と地質的变化. 鉄と鋼, **67**, 35-46.
- 赤木三郎・清水大吉郎・中井 均(1984) 双書地球の歴史 2 無脊椎動物群の海 オルドビス紀・シルル紀. 共立出版, 東京, 131p.
- 番場猛夫(1990) いま地球の財産を診る — 鉱床学と鉱物資源 —. 教育出版センター, 東京, 286p.
- 地質調査所(編)(1960) 日本鉱産誌 B V-a 主として燃料となる鉱石 — 石炭 —. 工業技術院地質調査所, 774p (本文), 87p (附表).
- 藤田和男(監修)・松本明光・島田荘平・島村常男・鷹背利公・藤岡昌司・牧野英一郎(編著)(2009) 今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしい石炭の本. 日刊工業新聞, 東京, 159p.
- 木下浩二(1973) 石油資源の科学. 共立出版, 東京, 173p.
- 熊坂敏彦(2014) 「シェール革命」のインパクト — 「ガスの時代」の到来 —. 筑波経済月報, 2014年3月号, 14-17. (https://www.tsukubabank.co.jp/corporate/info/monthlyreport/pdf/2014/03/201403_10.pdf 閲覧日: 2021年7月23日)
- 松本 良・奥田義久・青木 豊(1994) メタンハイドレート 21世紀の巨大天然ガス資源. 日経サイエンス社, 東京, 253p.
- 水垣桂子・佐脇貴幸・川畑 晶(2007) 地質情報展 2006 こうち 地熱資源と四国の温泉. 地質ニュース, no. 638, 10-13.
- 森田澄人(2006) 1-8 メタンハイドレート. 地質標本館(編) 地球 図説アースサイエンス, 誠文堂新光社, 東京, 134-135.
- 森田澄人・兼子尚知(2020) 珪質泥岩(硬質頁岩). 地質標本館おすすめ標本ストーリー. (<https://www.gsj>

- jp/Muse/story/src/story_036.pdf 閲覧日:2021年7月19日)
- 森田澄人・鈴木祐一郎(2006)1-7 燃料資源. 地質標本館(編)地球 図説アースサイエンス, 誠文堂新光社, 東京, 132-133.
- 森田澄人・谷田部信郎(2021)ケロジェン. 地質標本館おすすめストーリー. (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_038.pdf 閲覧日:2021年6月4日)
- 中島敬史(2015)石油の無機起源説に関する最近の進展. 石油技術協会誌, **80**, 275-282.
- 日本エネルギー学会(編)(2013)石炭の科学と技術 ~未来につなぐエネルギー~. コロナ社, 東京, 388p.
- 日本エネルギー学会天然ガス部会(編)(1999)よくわかる天然ガス—新しいエネルギー資源のすべて—. 日本エネルギー学会, 東京, 222p.
- 日本エネルギー学会天然ガス部会(編)(2008)天然ガスのすべて—その資源開発から利用技術まで—. コロナ社, 東京, 231p.
- 日本エネルギー学会天然ガス部会資源分科会CBM・SG研究会・GH研究会(2014)非在来型天然ガスのすべて エネルギー資源の新たな主役(コールベッドメタン・シェールガス・メタンハイドレート). 日本工業出版, 東京, 270p.
- 大場紀章(2014)第3編第6章第1節シェールガス開発に伴う環境問題の現状. シェール革命—経済動向から開発・生産・石油化学—, エヌ・ティー・エス, 東京, 193-200.
- 澤田結基(2010)珪化木の屋外展示. GSJニュースレター, no. 66, 7.
- 佐脇貴幸(2021)資源をつくる水のちから—その1 鉱物資源—. GSJ地質ニュース, **10**, 251-266.
- 佐脇貴幸・水垣桂子(2005)大地の贈り物:地熱資源と温泉. 地質ニュース, no. 615, 60-62.
- 佐脇貴幸・大谷具幸・水垣桂子(2001)大地の恵み 地熱資源を求めて. 地質ニュース, no. 560, 43-45.
- 石炭エネルギーセンター(2018)石炭データブック. 石炭エネルギーセンター, 東京, 274p.
- 茂野 博・村岡洋文・石戸経士・金原啓司(2000)「深部地熱資源に関する研究—葛根田地域の深部地熱系の解析・評価を中心に—」の概要. 地質調査所報告, no. 284, 1-15.
- 島津光夫(2000)新潟の石油・天然ガス 開発の130年. 野島出版, 三条市, 284p.
- スキナー, B. J. [松尾禎士訳](1971)第7章エネルギー—化石燃料の系譜. 地球科学入門シリーズ7 地球資源学入門, 共立出版, 東京, 123-145.
- 鈴木庸一・真下 清・山口達明(2008)有機資源化学(初版第5刷). 三共出版, 東京, 236p.
- 田口一雄(1998)地学ワンポイント6 石油の成因—起源・移動・集積. 共立出版, 東京, 140p.
- 高橋雅紀(2017)東西日本の地質学的境界【第六話】日本海の拡大. GSJ地質ニュース, **6**, 113-120.
- 天然ガス鉱業会(1998)日本の石油と天然ガス. 天然ガス鉱業会, 東京, 436p.
- 手塚真知子(1990)ポピュラーサイエンス 素顔の石油. 裳華房, 東京, 227p.
- 徳永重元(1967)地下の科学シリーズ10 石炭のはなし. ラティス, 東京, 156p.
- 辻野 匠(2017)珪化木. 地質標本館おすすめ標本ストーリー. (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_019.pdf 閲覧日:2021年7月28日)
- 内田洋平・吉岡真弓(2013)地質標本館の地中熱システム. 産総研TODAY, **13**, no. 9, 9.
- 氏家良博(1990)石油地質学概論. 東海大学出版会, 東京, 128p.
- 巨理俊次(1966)九州の松岩の樹種—昭和41年11月12日 石炭学会会議講演—. 燃料協会誌, **45**, 833-838.

SAWAKI Takayuki (2021) Water's function that produces geo-resources: (2) Fuel and geothermal resources.

(受付:2021年8月19日)

常時微動観測による地熱地域での 熱水流動モニタリング

岡本 京祐¹⁾・浅沼 宏¹⁾・二宮 啓²⁾

※本稿は 2021 年 4 月に、産業技術総合研究所が行ったプレス発表を修正・加筆したものです。

1. はじめに

再生可能エネルギーはわが国にとって貴重な国産エネルギー源であるとともに、脱炭素社会の実現にも不可欠なため、早期大量導入が期待されています。再生可能エネルギーの一つである地熱発電は、天候や時間帯に左右されずに安定した発電ができるメリットがあります。しかし、長年操業している国内外の地熱発電所では、雨水などを起源として地下に浸透し、地熱貯留層に滞留する熱水の量が徐々に減衰し、発電に必要な蒸気を得るための熱水量が減少することが問題となる場合があります。

このような問題の解決策の一つとして、地下へ人工的に注水し熱水量を回復させる涵養注水^{かんよう}という方法があります。この方法では、地熱貯留層へ効率的に注水するとともに、貯留層を冷却することや、断層を刺激して地震を惹起^{じやくき}することなどに注意を払う必要があります。直接目で見ることのできない地下の熱水の流れ(熱水流動)の把握は困難ですが、持続的な地熱発電のためには、地下の熱水流動をリアルタイムに把握し、地熱資源を適正に利用することが重要です。

産総研は、地熱発電に利用可能な地下の熱水流動をリアルタイムに把握することを目的として、奥会津地熱地域(福島県柳津町)で、世界でもトップクラスの精度を持つ高感度地震観測網を 2015 年から運用してきました。この観測網は高感度振動センサーを備えた 9 観測点から構成されており、熱水の流動により岩盤内の亀裂^{きれつ}が刺激される現象(微小地震)を捉えることで、地下の熱水流動を明らかにしてきました。

この微小地震から熱水流動を捉える手法は、地下数 km の深さにおいても、数十 m オーダーの分解能で熱水流動の経路を可視化できる強みがあります。しかし、もともと熱水の流れやすい場所(例えば、断層や割れ目の発達した部分)や、既に微小地震が発生して流動性が増加した場所では、熱水が流れても微小地震が発生しない場合があります。現在、そのような場所の熱水流動をリアルタイムに検

出する手法は存在せず(第 1 図 a)、熱水流動の全容把握への課題となっていました。

そこで今回、微小地震のような熱水流動により直接的に生成する揺れではなく、海の波浪や風といった自然現象や、日常の人間活動によって絶えず生じているごく小さな揺れ、すなわち常時微動に着目しました。それらのごく小さな揺れは足し合わされ、地下構造に応じて固有の横揺れと縦揺れの振幅スペクトル比(H/V スペクトル比)を持つ常時微動を形成します。今回、地下で熱水が流れることによって、疑似的に地下構造が変化し、一時的に H/V スペクトル比が変化することを期待して観測を行いました(第 1 図 b)。ここで紹介する内容は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術開発」の一環として行われた、貯留層モニタリングに関する研究成果(Okamoto *et al.*, 2021)を紹介するものです。

2. H/V スペクトル比の変化を用いたモニタリングシステムの基礎検討

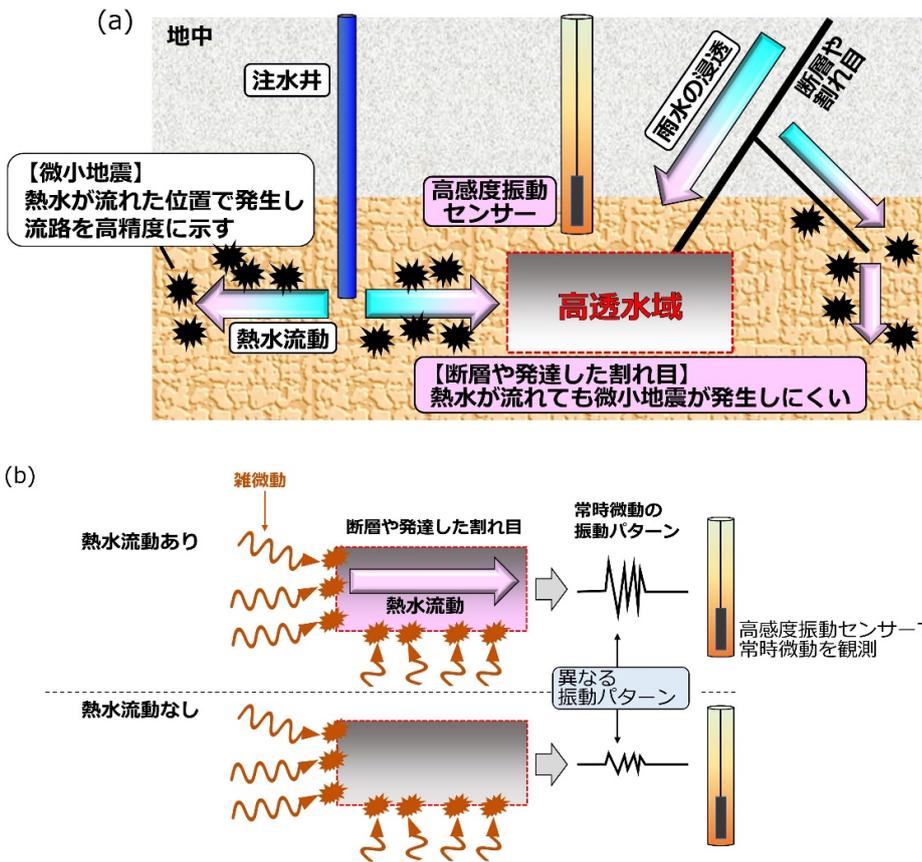
今回、複数設置している観測点のうち、熱水が貯えられ、活発な微小地震活動が生じている地熱貯留層領域に隣接した井戸内の地下約 400 m に設置されている観測点を常時微動モニタリングに利用しました(第 2 図)。この対象観測点付近では、微小地震の発生頻度は低く、従来の微小地震を追跡する手法では十分に熱水の流れを把握できていませんでした。

対象観測点での常時微動の H/V スペクトル比は、通常は横揺れの方が大きいため 1 より大きい値を示しますが、時折縦揺れが大きくなり、H/V スペクトル比が大幅に 1 を下回る場合があることを発見しました(第 3 図 a)。この H/V スペクトル比が低下する(以下、「揺れ方の変化」という)要因を、数値計算で検証しました。その結果、観測点の直下で熱水流動が発生した場合に、観測された揺れ方の変化が生じ得ることが分かりました(第 3 図 b, c)。

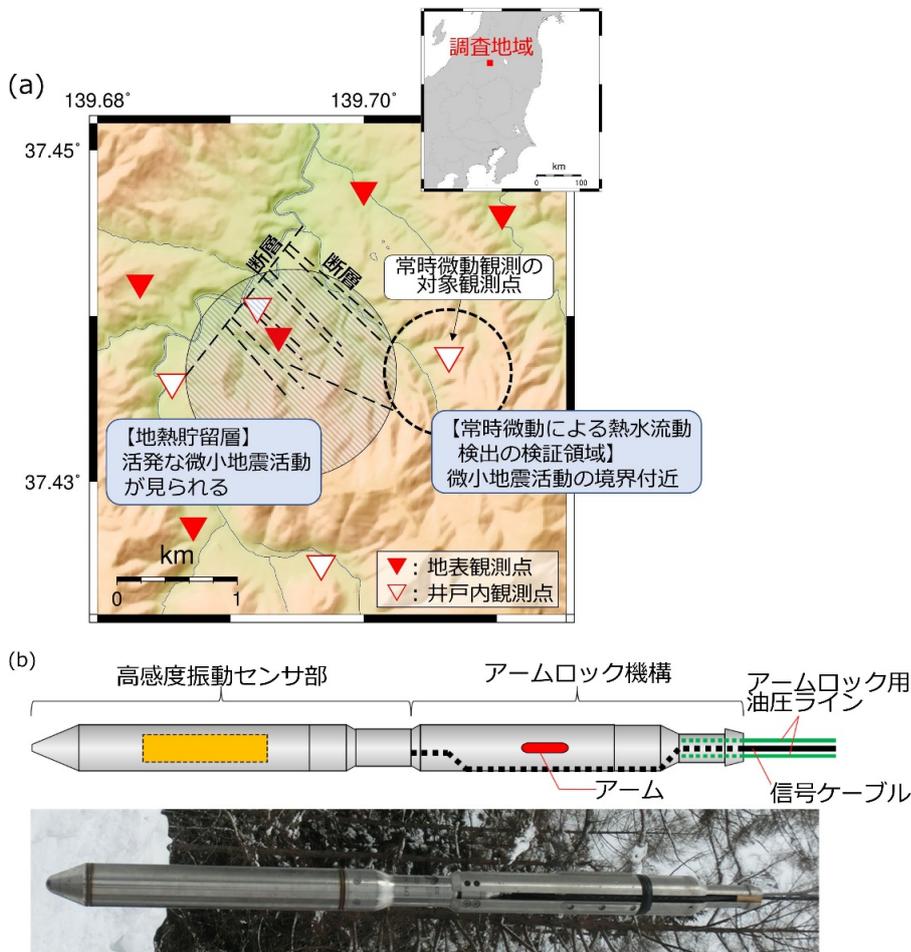
1) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター

2) 産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

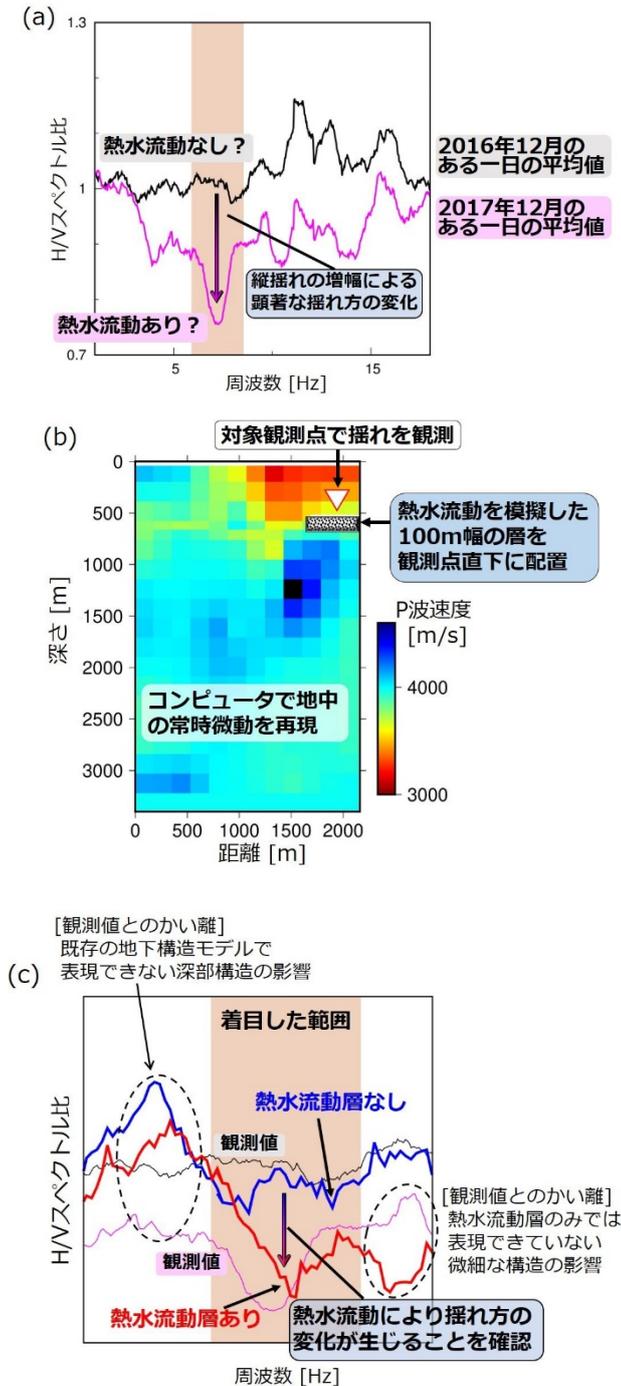
キーワード：地熱発電、熱水流動モニタリング、微小地震、常時微動



第1図 地中の熱水流動と熱水流動を検出する手法のイメージ
 (a) 熱水の流動に伴って岩盤が刺激される現象(微小地震)が、流動経路に対応します。しかし、もともと流動性が高い場所(高透水域)では、微小地震が発生しにくいいため、流動の全容把握ができませんでした。(b) 高感度振動センサーを使用して、熱水流動が存在する場合としない場合でそれぞれ異なる常時微動のパターンを検出します。



第2図 奥会津地熱地域での高感度地震観測網の概要
 (a) 通常は全9点の観測点を用いて、地下の微小地震の震源位置を高精度に追跡し、熱水流動を検出しています。今回は、井戸内に設置した1観測点で常時微動を観測し、熱水流動の検出を試みました。
 (b) 井戸内に設置した高感度振動センサー(全長約1.5m、直径約9cm)の模式図と写真です。アームを井戸の壁に押し付けて固定します(写真左側が下方向)。



第3図 (a) ある2期間に対象観測点で観測された常時微動のH/Vスペクトル比 (b) コンピュータシミュレーションに用いた地下構造モデル (c) コンピュータシミュレーションにより計算された常時微動のH/Vスペクトル比 (a) 日によって、縦揺れが増幅することで、H/Vスペクトル比が大幅に1を下回ることがあり、地中で何らかの変化が生じている可能性を示唆します。(b) このモデル内の常時微動を再現しています。既存の研究 (Okamoto et al., 2020) で提示された地下構造に加え、新たに熱水流動を模擬した層を観測点直下に考慮しました。(c) 観測点直下に熱水流動層がある場合、実際に観測された揺れ方の変化が生じることが示されました。

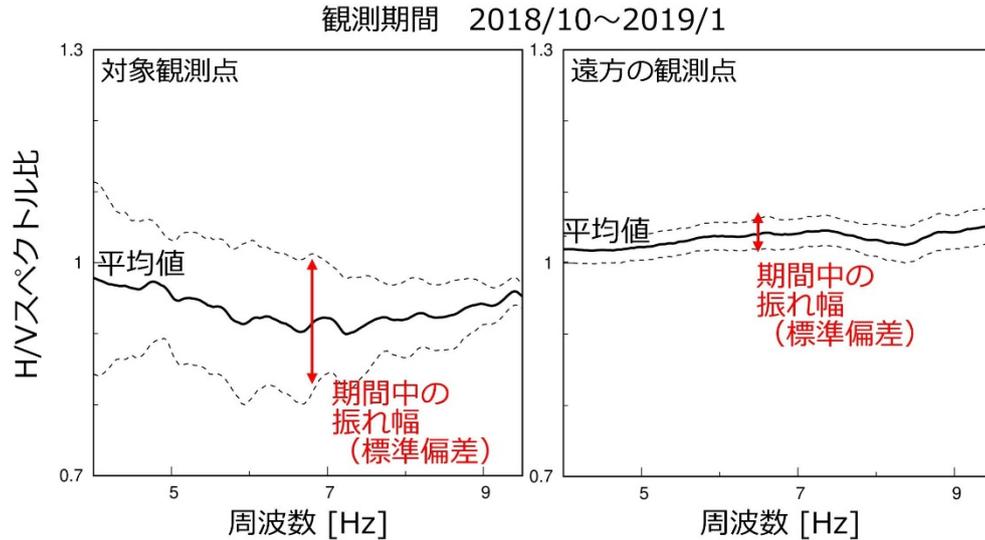
第4図は、実際に観測された対象観測点でのH/Vスペクトル比の揺れ幅を示したものです(2018年10月~2019年1月の期間を表示)。比較のため、地熱貯留層から遠く離れ、微小地震が発生していない、つまり従来手法で熱水流動が検出されていない点(第2図aで最も南の観測点)の記録も表示しています。対象観測点では、H/Vスペクトル比が大きな揺れ幅を持っています(第4図左)。一方、地熱貯留層から遠く離れ、熱水流動がないと考えられる点では、H/Vスペクトル比はほとんど変化していないことが確認されました(第4図右)。

2016年4月から2020年10月の期間で、対象観測点の近くで発生した「注水由来と思われる微小地震数の高まり(ETAS解析(Ogata, 1988)と呼ばれる統計解析で検出)」,つまり、従来手法で検出された熱水流動の発生日数は184日でした。このうち、約40%の72日で、常時微動の揺れ方の変化からも熱水流動を検出しました。一方で、従来手法では熱水流動を検出していない残りの期間(約1,500日)では、常時微動の揺れ方の変化が生じた日数は20%に至りませんでした。つまり、従来手法で熱水流動を検出した期間を対象にすると、本方法で検出される熱水流動の発生確率は2倍以上となります。2群間のデータの差を統計的に検定するフィッシャーの正確検定(両側検定)を行うと、従来手法と本手法で検出した熱水流動の間には、有意な関係があることが認められました。

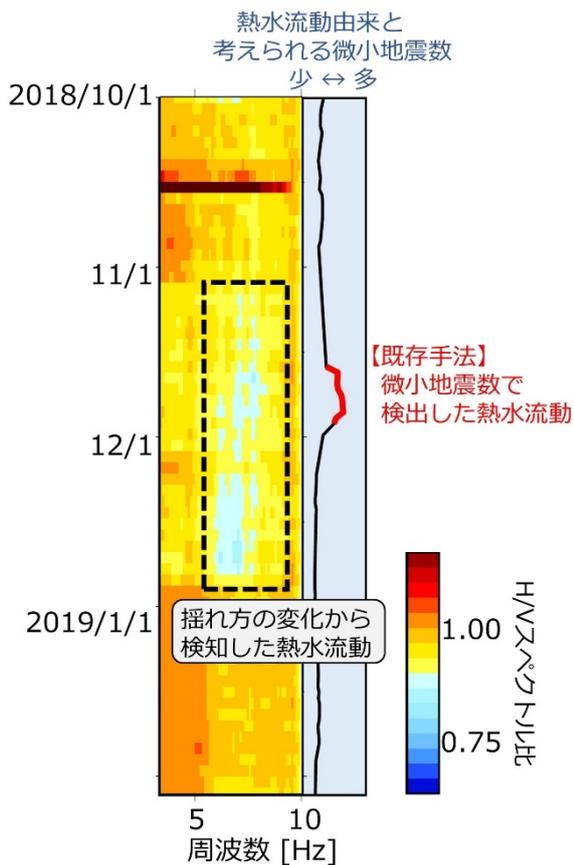
これらの結果から、コンピュータシミュレーションに加え、実際の観測データからも揺れ方の変化と熱水流動の間に相関が存在することが確認されました。第5図に、2018年10月~2019年1月の期間を例に、H/Vスペクトル比の変化と従来の手法である微小地震数の変化の比較を示しています。H/Vスペクトル比変化は、微小地震数の高まりにより検出した熱水流動の期間を同様に検出できています(第5図)。また、H/Vスペクトル比の変化は、微小地震が増加した期間の前後でも続いていることから、微小地震を発生させないような熱水の流れも検出していると考えられます。

3. 実際の涵養注水のモニタリングへの適用

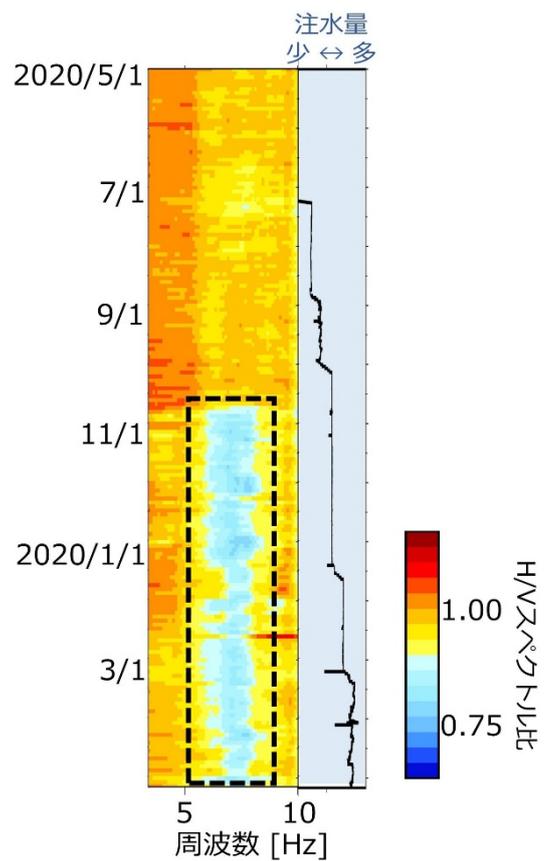
奥会津地熱地域では人工涵養技術開発の実証試験として、連続的な涵養を開始した2020年7月から2021年6月現在も地熱貯留層への涵養注水を継続して実施しています。涵養注水に用いた井戸(涵養井)の位置は、第2図に示した地熱貯留層領域の中心付近に位置しています。注水開始後のH/Vスペクトル比の変化を、注水量の推移とともに



第4図 対象観測点(左)と、地熱貯留層から遠く離れた観測点(右)での常時微動のH/Vスペクトル比
 2018年10月~2019年1月の期間の振れ幅を示しています(11月から12月にかけて常時微動の揺れ方の変化を観測)。対象観測点(左)では、熱水流動に由来すると考えられる揺れ方の変化が発生し、振れ幅が大きいです。地熱貯留層から遠く離れた観測点(右)では、振れ幅は小さいです。



第5図 H/Vスペクトル比と従来手法の微小地震数の変化(線グラフで表現)を比較した図
 前者では、黒破線で囲んだ部分が熱水流動を示し、後者では、微小地震が多発する赤線で示した期間が熱水流動を示します。



第6図 2020年7月から実施している長期涵養注水試験中のH/Vスペクトル比と日々の注水量を示した図
 長期間の涵養注水に対応するような、継続的な常時微動の揺れ方の変化が見られ、熱水流動を示唆します。

第6図に示しています。H/V スペクトル比は、注水開始の数か月後から、継続的に揺れ方の変化を示しており、長期的な流動の存在を示唆しています。過去に実施したトレーサー試験(トレーサー物質を注水し、地下での水の流動を測定する試験)によると、涵養井と今回のモニタリング領域との間では、水の流動に数か月程度の期間を要し得ることが示されており、H/V スペクトル比の反応が遅れたことを説明できます。また、今回検出された揺れ方の変化は、モニタリング開始以来、最も長い継続期間を示しており、長期の涵養注水との関係性が示唆されます。現在も涵養注水は継続されているため、詳細な解析や解釈は今後行う予定ですが、H/V スペクトル比の変化をモニタリングすることで、微小地震の発生に依存せず、涵養注水効果をリアルタイムに確認できる可能性を示すことができました。

4. まとめと今後の展望

今回、微小地震の発生に依存する従来の地下熱水流動モニタリング手法の枠組みを超えた、常時微動の揺れ方の変化に基づく新たなモニタリング手法の可能性を示しました。

奥会津地熱地域での観測を今後も継続し、より長期間のデータを用いて常時微動観測に基づいた熱水流動モニタリング手法の確立を目指す予定です。さらに、他の地熱地域や、CO₂ 地中貯留サイトなどでのモニタリング手法の適用実験を実施し、この手法の一般化を図りたいと考えています。将来的には、地震・火山活動域での地下水流動の監視などへの適用方法についても検討していきたいと考えています。

謝辞：本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術」で実施されました。地熱技術開発株式会社、および奥会津地熱株式会社から現地観測に関して多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- Ogata, Y. (1988) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical Association*, **83**, 9-27.
- Okamoto, K., Yi, L., Asanuma, H., Okabe, T., Abe, Y. and Tsuzuki, M. (2020) Activation and inactivation of seismicity: The terminations of two injection tests in Okuaizu geothermal field, Japan. *Seismological Research Letters*, **91**, 2730-2743.
- Okamoto, K., Asanuma, H. and Nimiya, H. (2021) Fluid activity detection in geothermal areas using a single seismic station by monitoring horizontal-to-vertical spectral ratios. *Scientific Reports*, **11**, 8372.

OKAMOTO Kyosuke, ASANUMA Hiroshi and NIMIYA Hiro (2021) Fluid flow monitoring based on microtremor observation in geothermal area.

(受付：2021年8月6日)

GSJ 地質ニュース編集委員会

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

事務局

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

GSJ 地質ニュース 第 10 巻 第 11 号
令和 3 年 11 月 15 日 発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター

〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7

印刷所

GSJ Chishitsu News Editorial Board

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

Secretariat Office

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

GSJ Chishitsu News Vol. 10 No. 11
November 15, 2021

Geological Survey of Japan, AIST

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



新潟県と富山県との県境にそびえる朝日岳（標高 2,418 m）は、中部山岳国立公園の一部である。2021年8月上旬に、新潟県糸魚川市・新潟大学・産業技術総合研究所地質調査総合センターでの共同研究として朝日岳周辺の地質調査を行った。ドローンを使って上空から北に向かって朝日岳周辺を撮影した。雲海の中に見える朝日岳の山頂付近には、8月上旬にもかかわらず雪渓が残る。

（写真：小河原孝彦 フォッサマグナミュージアム・
文：伊藤 剛 産総研地質調査総合センター 地質情報研究部門）

Drone's view of Mt. Asahi-dake, boundary between Niigata and Toyama prefectures, central Japan.
Photo by OGAWARA Takahiko, Caption by ITO Tsuyoshi