

GSJ 地球をよく知り、地球と共生する

地質ニュース

2023

3

Vol.12 No.3



3月号

-
- 69 **十和田火山の巨大噴火を引き起こしたマグマの蓄積深度が明らかに**
中谷貴之・工藤 崇・鈴木敏弘
-
- 72 **愛知県瀬戸地区の窯業原料資源の成因に関する考察
—その1・その多様性を考える—**
須藤定久・宮腰久美子・高木哲一
-
- 77 **地熱発電プラントリスク評価システムを開発 —酸性熱水資源の活用を進め、地熱資源の利用促進に貢献—**
柳澤教雄・佐藤真丈・大里和己・佐倉弘持・三ヶ田 均・長田和義
-
- 83 **リール大学(フランス)での在外研究報告** 野田 篤
-
- 89 **地質標本館での日本の地名由来鉱物の展示** 佐脇貴幸
-
- 96 **書籍紹介 「天変地異の地球学 巨大地震、異常気象から大量絶滅まで」**
-

十和田火山の巨大噴火を引き起こした マグマの蓄積深度が明らかに

中谷 貴之¹⁾・工藤 崇²⁾・鈴木 敏弘¹⁾

本稿は 2022 年 5 月に産総研が行ったプレスリリース (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220512_2/pr20220512_2.html) を修正・加筆したものです。

1. はじめに

私たちは、3.6 万年前と 1.5 万年前に十和田火山で起こった巨大噴火(マグマ噴出量およそ 20 km³)の噴出物を用いて高温高压実験を行い、マグマが蓄積した温度圧力条件を精度良く推定しました。その結果、巨大噴火を引き起こしたマグマが地下 5～7 km に二度にわたって蓄積していたことが明らかになりました。そして、その深度を現在の十和田火山下で観測される地震波速度異常の深さと比べ、噴火可能なマグマの有無について議論しました。研究成果は論文としてまとめられ、Journal of Geophysical Research Solid Earth 誌に出版されました(Nakatani *et al.*, 2022)。

2. 背景

十和田火山は、秋田県と青森県の県境に位置する活火山であり、直径 8.5 km のカルデラ湖(十和田湖)を有するカルデラ火山でもあります。十和田火山は、今から 3.6 万年と 1.5 万年前に巨大噴火を起こし、カルデラを作りました。西暦 915 年には、マグマ噴出量がおおよそ 2 km³ の有史以来で最大規模の爆発的な噴火があり、巨大噴火と同様、二酸化ケイ素(SiO₂)に富んだ組成のマグマが噴出しました。このような背景から、十和田火山は今後も巨大噴火を繰り返す可能性があると考えられています。巨大噴火の発生は低頻度ですが、ひとたび起これば社会に甚大な被害をもたらすため、巨大噴火のポテンシャル評価が社会から求められています。

巨大噴火の前には、10 km³ を超えるマグマが地下に蓄積していたと考えられます。巨大噴火ポテンシャルを評価するために、地震波などを用いた地球物理観測結果に基づいて、地下にマグマが蓄えられているかどうかを検討する必要があります。しかし、地震波低速度領域が確認されたとしても、それがマグマあるいは水に富んだ流体のいずれに起因するのかを区別することは困難です。また、マグマの存在を仮定しても、流動性に富む噴火可能なマグマが局

所的に存在するのか、結晶質で通常噴火に至らないマグマ(マッシュ)が広域に存在するのか、空間解像度の問題から両者の判別は難しいのが現状です。地球物理観測データのみでは、地震波低速度領域に何が存在するのかを推定することが困難であるため、地質学的・岩石学的な知見を取り込んだ解釈が必要となります。

産総研には、採取した噴出物を用いて高温高压実験を行うための内熱式ガス圧装置が整備されています(第 1 図)。内熱式ガス圧装置は、圧縮したアルゴンガスを圧力容器内に導入し、容器内のヒーターでガスを加熱膨張させることで、高温高压を発生させます(東宮, 2022)。海外では IHPV(Internally Heated Pressure Vessel)と呼称されます。高温下で等圧的な圧力を精度よく(±数 MPa)発生可能であることが最大の特徴です。この装置を用いて噴出物に含まれる鉱物種などを高温高压下で再現することで、マグマが蓄積していた温度と圧力を精度よく推定できます。そして、推定した深度と現在観測されている地震波低速度領域の深さを比較することで、現在も噴火可能なマグマが存在するか否か、地質学的・岩石学的な知見に基づいて推測可能となります。

最近、十和田火山の地質情報が地質図にまとめられ(工



第 1 図 産総研に設置された内熱式ガス圧装置。

1) 産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門
2) 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：巨大噴火、カルデラ、軽石、内熱式ガス圧装置、十和田火山

藤ほか, 2019), 巨大噴火時の噴出物の分布域と化学組成などが明らかにされました。また, 十和田火山の地下を含む東北日本の地殻構造が, 地震波観測により明らかにされています (Chen *et al.*, 2018, 2020)。そこで, 私たちは, 地質図から判明している巨大噴火時の噴出物を用いて, 高温高压実験を実施し, 噴出物がマグマとして蓄積していたときの温度と圧力を推定しました。そして, その結果を現在の十和田火山下の地震波観測の結果と比較しました。なお, 本研究は, 原子力規制委員会原子力規制庁の「原子力施設等防災対策等委託費(巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究)事業(2019~2021年度)」の委託を受けて行いました。

3. 成果

十和田火山で起こった巨大噴火の噴出物(第2図)を用いて高温高压実験を行いました。実験は, 温度825~900℃および圧力100~350 MPa(1 MPaは約10気圧)の範囲で行い, マグマが蓄積した温度および圧力を推定しました。実験に使用した噴出物は, 流紋岩質のマグマを起源とする軽石です。軽石の大部分は多孔質のガラスですが, ガラスに対して約10%の斑晶鉱物が含まれます。斑晶鉱物の種類や量は, マグマ蓄積時の温度や圧力を反映するため, それらを再現する温度圧力条件を実験で明らかにすることで, マグマの蓄積条件を推定できます。具体的には, 軽石を全溶解して合成したガラスに飽和量の水を加えて, 任意の温度圧力条件下で最大10日間程度保持し, 急冷回収した試料に含まれる鉱物種や結晶の割合を調べました。このような実験を異なる温度圧力条件下で繰り返すことにより, 元の軽石に含まれる鉱物種や結晶の割合を再現する温度圧力条件を推定しました。

軽石に含まれる鉱物の種類は, 3.6万年前の噴火では斜長石, 直方輝石, 単斜輝石, チタン鉄鉱, 磁鉄鉱, 1.5万年前の噴火ではこれらの鉱物に加えて角閃石でした。実験の結果, 軽石中の主要な鉱物の晶出と結晶の割合を温度840~850℃および圧力150~170 MPaで再現できることがわかりました(第3図)。3.6万年前の噴火と1.5万年前の噴火で含まれる鉱物種に差がありましたが(角閃石の有無), 推定された温度圧力条件に大きな差はありませんでした。マグマの化学組成のわずかな差が, 角閃石の安定性に影響を及ぼしたと推測されます。

実験で推定された圧力は深さにしておよそ5~7 kmに相当します。つまり, 過去二回の巨大噴火を起こしたマグマは, いずれも十和田火山下において, ほぼ同じ条件で蓄



第2図 十和田火山の1.5万年前の巨大噴火を起源とする軽石。

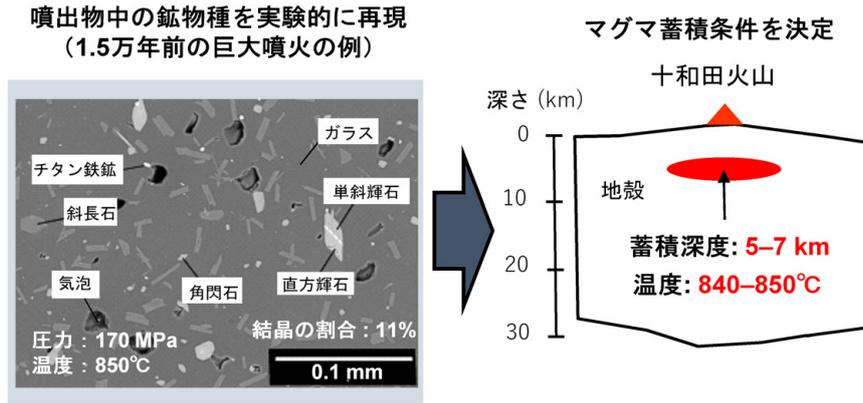
積したことがわかりました。また, 現在の十和田火山の地下約6 kmにおいて, 深さ方向に地震波速度が急激に遅くなる速度境界が確認され, マグマ(メルトに富む層)の存在が示唆されています (Chen *et al.*, 2020), その深さは本研究で推定した過去のマグマの蓄積深度とほぼ一致します(第4図)。この結果は, 現在の十和田火山下において, 過去に巨大噴火を起こしたマグマとほぼ同じ場所に噴火可能なマグマが存在していることを示唆します。ただし, 地震波トモグラフィのデータ (Chen *et al.*, 2018) や理論的に予想される噴火頻度とマグマだまりの大きさの関係 (Townsend *et al.*, 2019) から, 噴火可能なマグマが存在したとしても, カルデラ噴火を起こすほどの量は蓄積していないと推測されます。今後, 高いマグマ供給率などの条件が整えば, より大きなマグマだまりに成長するかもしれません。

4. 今後の予定

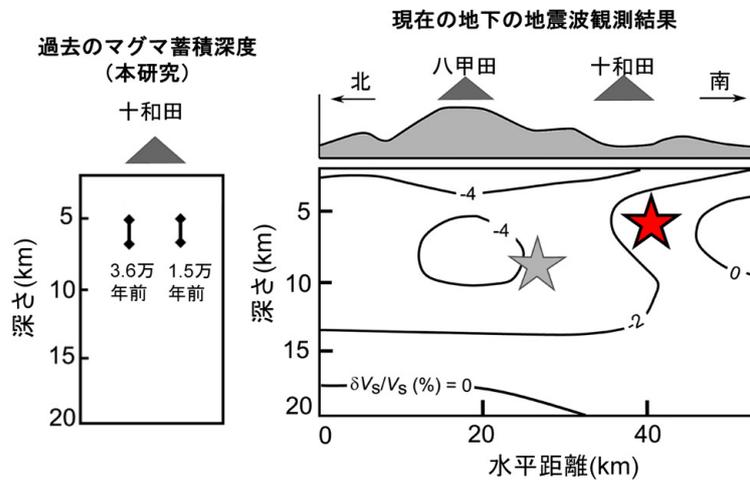
今後は, 高温高压実験の手法を用いて, 巨大噴火を起こした日本の代表的な火山, 例えば始良カルデラなどについて, 過去のマグマの蓄積深度を推定する予定です。火山毎に科学的知見の蓄積と事例研究を積み重ねることで, 巨大噴火を起こすマグマの蓄積深度が主にどのような因子によって支配されるのか, より一般的な理解を目指します。

文 献

Chen, K. -X., Gung, Y., Kuo, B. -Y. and Huang, T. -Y. (2018) Crustal magmatism and deformation fabrics in northeast Japan revealed by ambient noise tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid*



第3図 高温高圧実験で得られた試料の走査電子顕微鏡写真(左)と推定されたマグマの蓄積条件を示した模式図(右)。鉱物の周囲を埋める暗灰色の部分は、融液が急冷固化したガラスである。



第4図 今回の実験から推定された3.6万年前と1.5万年前の巨大噴火のマグマ蓄積深度(左)と、現在の十和田火山下の地震波速度観測結果(右)。右図の等値線はChen *et al.* (2018)が明らかにした横波速度の変化を示す。また、星印はChen *et al.* (2020)のレーザー干渉計解析により明らかとなった地震波速度不連続を示し、深さ方向に地震波速度が急激に遅くなる深さを表す。特に赤色の星印が今回注目する十和田火山下の地震波速度不連続を示す。地震波速度の不連続はマグマ(メルトに富む層)の存在を示唆している。

Earth, 123, 8891–8906.

Chen, K.-X., Fischer, K. M., Hua, J. and Gung, Y. (2020) Imaging crustal melt beneath northeast Japan with Ps receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 537, 116173.

工藤 崇・内野隆之・濱崎聡志 (2019) 十和田湖地域の地質. 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, 192p.

Nakatani, T., Kudo, T. and Suzuki, T. (2022) Experimental constraints on magma storage conditions of two caldera-forming eruptions at Towada volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2021JB023665.

東宮昭彦 (2022) ガス圧装置を用いたマグマの高温高圧相平衡実験. *火山*, 67, 195–205.

Townsend, M., Huber, C., Degruyter, W. and Bachmann, O. (2019) Magma chamber growth during intercaldera periods: Insights from thermo-mechanical modeling with applications to Laguna del Maule, Campi Flegrei, Santorini, and Aso. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 1574–1591, doi: 10.1029/2018gc008103.

NAKATANI Takayuki, KUDO Takashi and SUZUKI Toshihiro (2023) Magma storage depths of caldera-forming eruptions at Towada volcano.

(受付: 2022年9月30日)

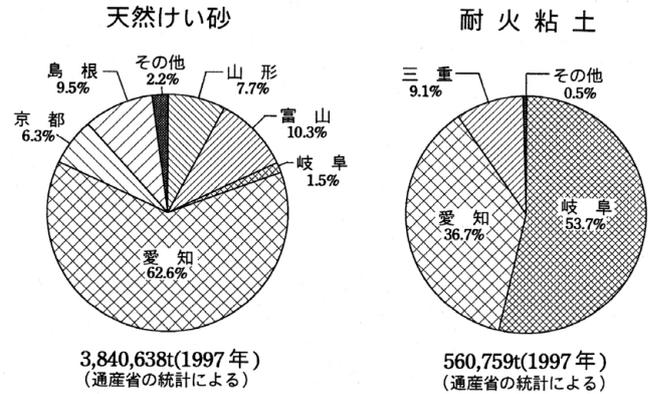
愛知県瀬戸地区の窯業原料資源の成因に関する考察 —その1・その多様性を考える—

須藤 定久¹⁾・宮腰 久美子²⁾・高木 哲一³⁾

1. 瀬戸地区の窯業原料形成の背景

愛知県瀬戸市周辺(以下、瀬戸地区)から岐阜県東部(多治見市、土岐市、瑞浪市、恵那市にわたる範囲、以下、東濃地方)にかけての地質概要と両県の産出鉱物の関係については、以前解説したことがありますが(須藤・内藤, 2000a, b), 簡単におさらいをしたいと思います(第1図)。

東濃地方の窯業原料を堆積した盆地の周囲の地質は、中古生界や新第三系が多く、花崗岩類はごく一部です。このような地質を反映して、周囲から集積された微細な粘土や木片などが静かな水域に堆積して形成された「木節粘土」などの粘土が多く産出し、珪砂の産出はごく少量です。一方、愛知県側では盆地の周辺部はほとんど花崗岩類からなっており、花崗岩から供給される石英や長石類から形成された珪砂・粘土が多く産出しました(第2図)。ただし、



第2図 天然珪砂と耐火粘土の県別産出量

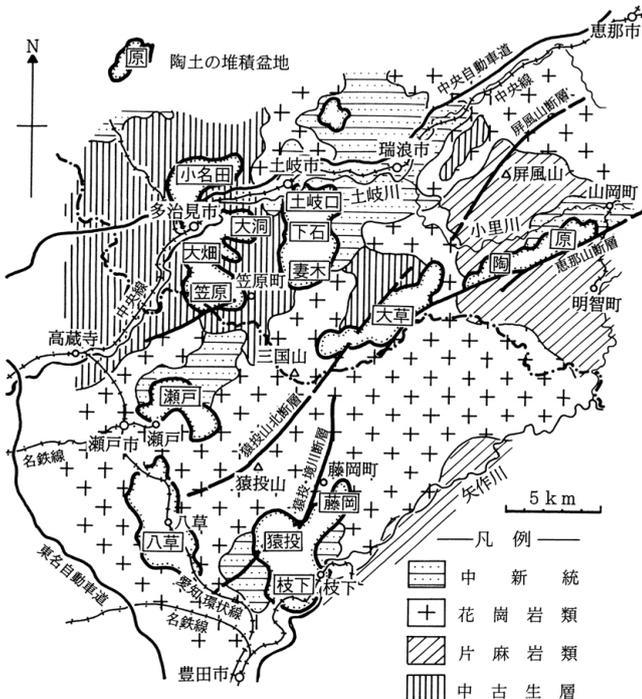
岐阜県側でも愛知県に近い土岐市大草地区、瑞浪市陶地区、恵那市山岡町原地区では周囲に花崗岩や片麻岩が分布し、愛知県側と同様、珪砂と粘土の両方を産出していました。

2. 瀬戸地区の窯業原料の多様性

瀬戸地区には様々な窯業原料資源があり、それぞれが有効活用されてきました。例えば、珪質資源としては珪砂が、粘土質資源としては木節粘土や蛙目粘土・白土等があり、珪砂と粘土が混じったシラワキもあります。これらはいずれも堆積成鉱床と考えられています(例えば、種村, 1964)。

珪砂: 石英粒が卓越するやや厚い地層として産出し、洗浄・篩い分けして利用されています。瀬戸地区の珪砂はシリカの外にカリやソーダ分を適度に含み使い勝手が良いことから、瓶ガラスの原料として重用されています。

木節粘土: 薄い地層として産出し、粘土中に木片が混じって産出するので木節粘土と呼ばれ、浅い水域～湿地のような環境で堆積したものと考えられています(第3図上)。採掘後、洗浄され木片が除去されます。次に水簸により、微砂(微粒な砂分)が除去されて可塑性の高い木節粘土に精製され、複雑な陶磁器や芸術作品を造るのに必須の原料として珍重されています。



第1図 愛知県北部～岐阜県東部の基盤岩と堆積盆地

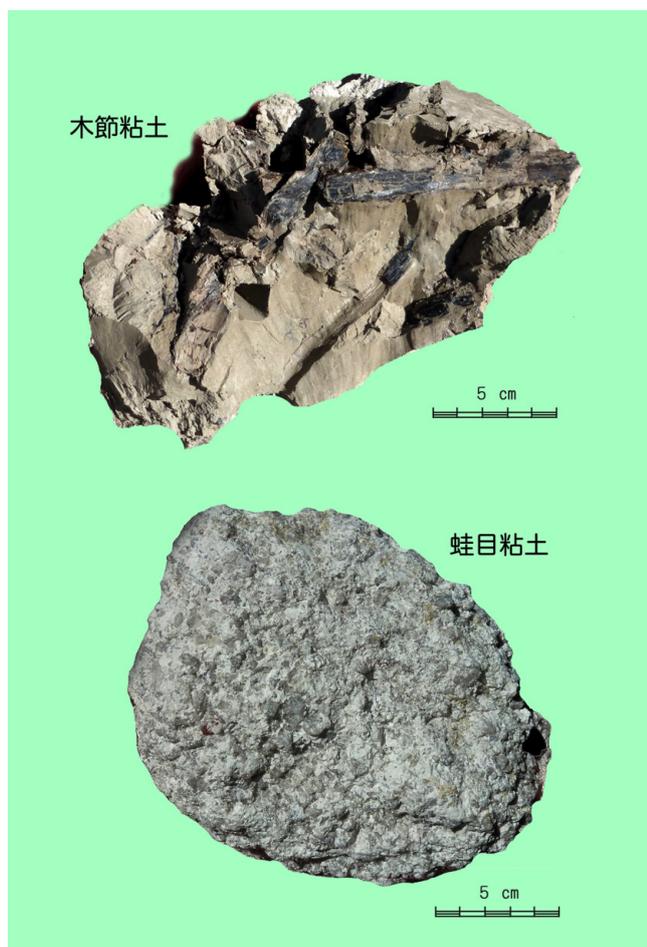
1) 産総研 地質調査総合センター元職員
2) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門
3) 産総研 地質調査総合センター連携推進室

キーワード: 蛙目粘土, 木節粘土, 珪砂, 白土, 瀬戸, 東濃, 窯業原料, 耐火粘土

白土：カオリン質粘土のみがやや厚い層をなして産出するもので、水簸により微砂を除去した後、使いやすい陶磁器用粘土として利用されています。

蛙目粘土：粘土の中に粗い石英粒が点在して産出するもので、これが雨に濡れると、粘土から突き出た丸い石英粒が、まるで蛙の目玉のように見えることから蛙目粘土と呼ばれています(第3図下)。蛙目粘土は採掘後、水簸されて泥水と石英粒に分けられます。泥水から回収されたカオリン質粘土は狭義の蛙目粘土に、石英粒は蛙目珪砂になります。蛙目粘土は、適度な可塑性を有することから、食器などの大量生産に欠くことのできない原料となっています。一方、蛙目珪砂は不純物が少ないことから高級ガラスに使われることが多く、例えば山岡町原地区の蛙目珪砂はかつてブラウン管など電気ガラスの原料として重用されていました。

筆者の一人須藤は以前、蛙目粘土などの形成プロセスについて考察し、「堆積成鉱床ではなく、続成鉱床と考えるべきではないか」との考えを示したことがあります(須藤, 2017)。本報ではこの問題について議論したいと思います。



第3図 典型的な木節粘土，蛙目粘土試料(共に岐阜県産)の写真

3. 蛙目粘土は本当に堆積成鉱床なのか？

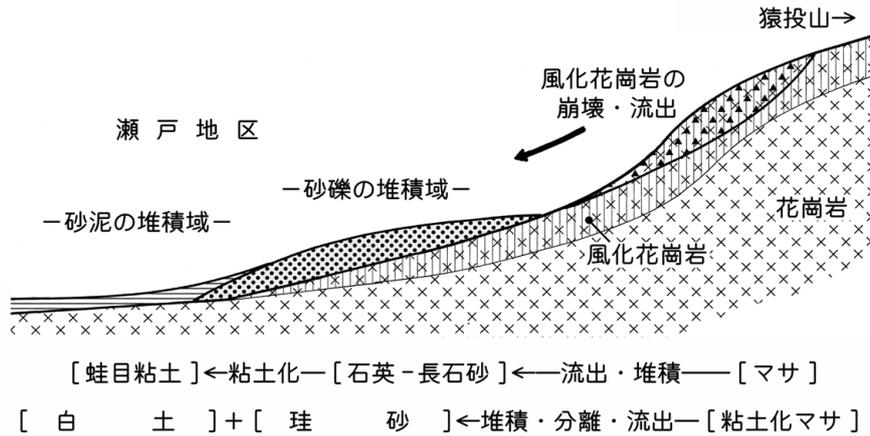
瀬戸地区に産する珪砂や粘土類は、その性状や粒度から、いずれも花崗岩に由来する原物質から形成されたと考えてよさそうです。猿投山^{さなび}から三国山へ延びる山塊を造る花崗岩から、石英や長石類が供給されたに違いありません。石英や長石から、珪砂・蛙目粘土・白土といった多様な資源が形成されるのは何故なのでしょう。

まず蛙目粘土の形成過程を中心に考えてみます。粘土と石英粒をコップの水に入れてかき混ぜれば、たちまち石英砂と泥水に分離してしまいます。蛙目粘土のように不淘汰な石英粒と粘土を均質に堆積させるにはどんな状況を考えてよいのでしょうか。不淘汰な堆積物の成因としては、乱泥流が考えられます。しかし、蛙目粘土の地層は、一般に整然とした産状を示し、乱泥流を想定するには無理があります。石英粒と粘土を均質に静々と堆積させることは、筆者らにはうまく説明できません。蛙目粘土は古くから堆積成鉱床とされ、筆者らもそれに疑いすら抱いていませんでした。しかし、より合理的な説明ができる成因はないのでしょうか。以下、まず各資源の成因について考え、それらの相互関係についても考え直してみます。

4. 花崗岩の風化を考える

花崗岩の風化についてまず考えてみます。花崗岩の風化には、物理的風化と化学的風化が知られています。花崗岩が物理的風化を受けると、温度や圧力の変化により、かみ合っていた結晶がばらばらになり、砂状の「真砂土・まさ」となります。一方、長石類や雲母などが、酸性の雨水や地下水などの影響を受け、徐々に粘土鉱物へと変化する化学的風化も重要です。

まず猿投山を中心とする花崗岩の表面で、物理的風化が進んでいた場合、大雨により、真砂が西方に流出することになります。流れ下る過程で比重の大きい雲母や鉄鉱物は分離し、物性が近い石英と長石類が混ざって流下し、山麓に砂層を形成すると予想されます(第4図)。一方、化学的風化が進んでいた場合には、石英粒を多量に含む泥水となって流下し、山麓に石英砂が、そしてより低位置に粘土が堆積すると予想されます。この場合、山麓に形成された石英砂は珪砂であり、低位置に堆積した粘土層は白土ということになります。



第4図 風化花崗岩の流出・堆積のイメージ

5. 蛙目粘土の成因を考える

石英と長石類が堆積してできた砂層は、現在どうなっているのでしょうか。窯業原料の中に石英・長石質の砂の記載は見当たりません。おそらくほとんど存在していないでしょう。一方、石英が多量に含まれる点では蛙目粘土が思い浮かびます。もし、堆積後に化学的風化が進み、長石類がカオリン質粘土に変わり、粘土中に石英粒が点在する蛙目粘土に変化したとすればどうでしょうか。石英・長石質の砂の行方がうまく説明できますし、石英と粘土が均質に堆積した問題も合理的に解決できます。

長石類の粘土化の程度は様々であり、その度合いにより、「粘土(白土)」と「石英+粘土化しなかった長石」に分離することもあるはずで、例えば、瀬戸市珪鉬山産の珪砂を水洗した場合、珪砂分(径0.15 mm以上)が約85%、残りの15%は微砂や粘土でした。同鉬山の別の珪砂では珪砂分(径0.15 mm以上)が54%、残りの46%が微砂～泥分でした。いずれも、珪砂分中に点々と白色の不規則形の長石片(ほとんどカリ長石)が見られました。原岩である猿投山の花崗岩は、石英、斜長石、カリ長石をほぼ1:1:1で含みますので、この産状は、珪砂に元々混ざっていた斜長石のほぼ全て、カリ長石も大半が、続成作用により粘土化したことを示しています。

珪砂に微砂～粘土分が多量に混ざっている場合、微砂～粘土分が緻密な状態であれば蛙目粘土、乾燥してサラサラした砂状であれば粘土混じり珪砂と呼ばれ、両者は本質的に同じものと言えます。一般に瀬戸地区では、蛙目粘土は中～東部に見られ、西部ではほとんど見られません。この違いは、中～東部と西部では堆積後の環境が異なっていた、すなわち、前者は滞水域で粘土化したのに対し、後者

は比較的乾燥した地表条件下で、地下水により粘土化したといった差があったとすれば説明が可能です。

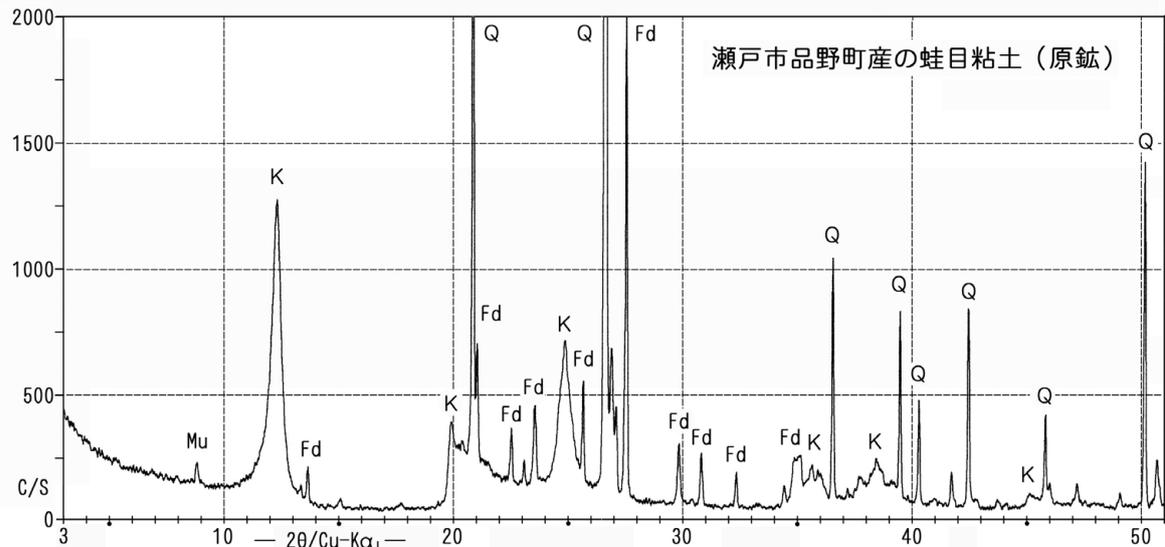
花崗岩の風化殻がそのまま残存しているものは、カオリンと石英からなる「さば」(呈色により「青さば」「黄さば」「白さば」などと呼ばれます)となり、これも蛙目粘土と似た外観を示す可能性があります(例えば、Jige *et al.*, 2018)。最近、「青さば」を研究する中で、やや詳しく露頭を観察する機会を得ましたが、すべての場合で、「さば」には花崗岩の組織が残存していました。これらの詳細については、別報で報告します。

6. 蛙目粘土の特徴を調べる

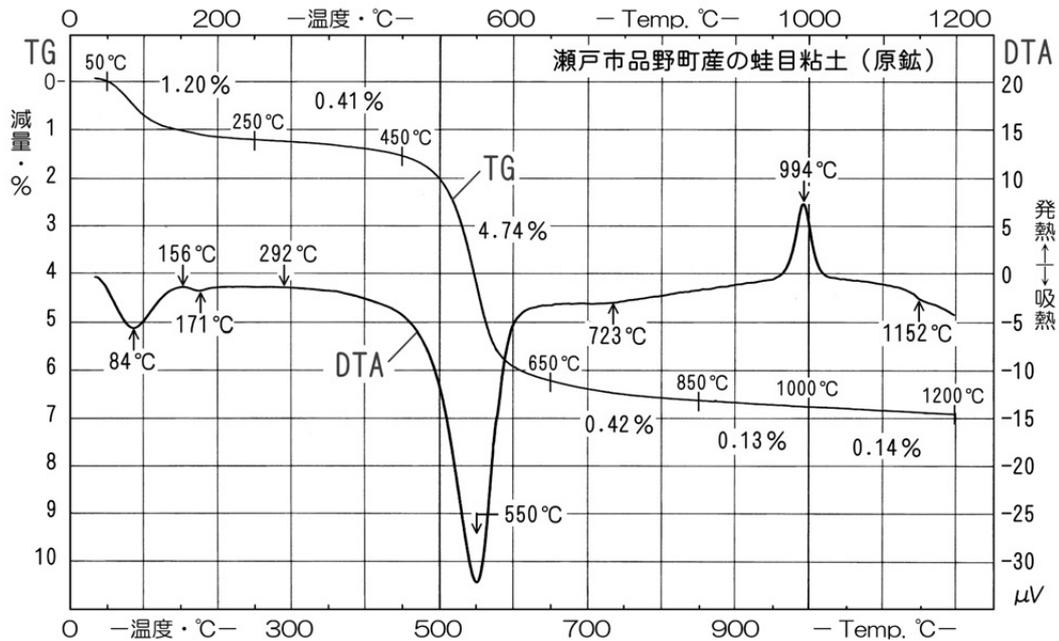
産業技術総合研究所中部センター・瀬戸分室(現在は閉鎖)に保管されていた試料に、典型的な木節粘土や白土・蛙目粘土がありましたので、これについてのX線回折試験や示差熱-重量分析を行い、鉱物学的特徴を調べてみました。

X線回折試験: X線回折パターン(第5図)は、蛙目粘土が石英と比較的結晶度の良いカオリナイトを主体とし、少量の長石類・雲母を含むことを示しています。この結果は、続成作用による長石類のカオリン化が進行中であったと解釈することができます。

示差熱-重量分析: 示差熱-重量分析パターンから、蛙目粘土は、カオリンの含有量が50%前後で、一部にハロイサイトが混じる低温型のカオリナイトであると推定されます(第6図)。長石類が堆積後に続成作用によってカオリン鉱物に変化するとすれば、一般にハロイサイトをを経て、カオリナイトへと変化するのが普通です(例えば、清水, 1972)。この試験結果は、カオリンが長石類から続成作用により生成されたという考えに調和的です。



第5図 瀬戸市品野町産の蛙目粘土のX線回折パターン
 鉱物名略号はQ:石英, K:カオリン, Fd:長石, Mu:白雲母



第6図 瀬戸市品野町産蛙目粘土(原鉱)の示差熱-重量分析パターン
 試料重量 50 mg, 昇温速度 20 °C / 分. TG: Thermalgravimetry (熱重量分析), DTA: Differential Thermal Analysis (示差熱分析)

7. 今後の課題

本報では、瀬戸地区～東濃地方に見られる様々な窯業原料について見直し、その成因について花崗岩の風化、花崗岩風化物の流出・堆積の観点から考えてみました。そして、蛙目粘土については、堆積成鉱床ではなく、続成鉱床であると推論しました。

最近、蛙目粘土に関する詳細な研究が少しずつ行われるようになってきました(例えば、葉田野ほか, 2021; Takagi

et al., 2021)。今後、珪砂・粘土鉱床の後背地や供給経路、続成作用における粘土鉱物の変化プロセスなど、多く課題が解明されることを期待します。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、愛知県陶磁器工業協同組合、愛知県珪砂鉱業協同組合、岐阜県窯業原料協同組合、合資会社丸藤鉱山の皆様には大変お世話になりました。ここに深く御礼申し上げます。

文 献

- 葉田野 希・吉田孝紀・笹尾英嗣 (2021) 中新統～更新統瀬戸層群の陸成層と陶土. 地質学雑誌, **127**, 345-362.
- Jige, M., Takagi, T., Takahashi, Y., Kurisu, M., Tsunazawa, Y., Morimoto, K., Hoshino, M. and Tsukimura, K. (2018) Fe-kaolinite in granite saprolite beneath sedimentary kaolin deposits: A mode of Fe substitution for Al in kaolinite. *American Mineralogist*, **103**, 1126-1135.
- 清水 洋 (1972) 風化および続成過程におけるカオリン鉱物の変化. 粘土科学, **12**, 63-73.
- 須藤定久 (2017) 瀬戸の土, 美濃の土, あれこれ. 東洋陶磁学会第 45 回大会研究発表要旨, 2p.
- 須藤定久・内藤一樹 (2000a) 瀬戸市周辺の陶磁器と窯業原料資源. 地質ニュース, no. 552, 30-41.
- 須藤定久・内藤一樹 (2000b) 東濃の陶磁器産業と原料資源. 地質ニュース, no. 553, 33-41.
- Takagi, T., Shin, K. -C., Jige, M., Hoshino, M. and Tsukimura, K. (2021) Microbial nitrification and acidification of lacustrine sediments deduced from the nature of a sedimentary kaolin deposit in central Japan. *Scientific Reports*, **11**, 3471.
- 種村光郎 (1964) 愛知県瀬戸地域の粘土および珪砂鋳床の地質学的鉱物学的研究. 地質調査所報告, no. 203, 42p.
-
- SUDO Sadahisa, MIYAKOSHI Kumiko and TAKAGI Tetsuichi (2023) Discussion on the genesis of kaolin deposits in the Seto district, Aichi Prefecture -Part 1, Considering its variety-.
-

(受付：2023 年 1 月 6 日)

地熱発電プラントリスク評価システムを開発 —酸性熱水資源の活用を進め、地熱資源の 利用促進に貢献—

柳澤 教雄¹⁾・佐藤 真丈²⁾・大里 和己²⁾・佐倉 弘持²⁾・三ヶ田 均³⁾・長田 和義⁴⁾

1. はじめに

現在、2050年のカーボンニュートラル達成に向け、再生可能エネルギーの1つであり、日本が世界第3位のポテンシャルを有する地熱発電の発電量拡大に向けての研究開発が進められています。筆者らは、地熱発電での利用率向上に向けた技術的な課題として、地熱発電プラントにおけるスケールの付着や配管材料の腐食に着目しました。そこで、2014～2020年度にかけて、地熱技術開発株式会社(GERD)、エヌケーケーシームレス鋼管株式会社および京都大学と共同で国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「地熱発電技術研究開発」プロジェクトの1テーマとして、地熱プラントにおける材料腐食対策の指針を作成するとともに、地熱発電を行う上で高いポテンシャルがある高温の酸性熱水の利用を促進するための研究に取り組んできました。

2014～2017年度は「地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール/腐食等予測・対策管理)」のテーマで、1970年代以後に当時の工業技術院東北工業技術試験所(現在の産業技術総合研究所(産総研)東北センター)で実施されたサンシャイン計画の成果報告書「地熱用材料の開発に関する研究」をレビューするとともに、短時間で材料腐食挙動を測定可能なシステムを設計し、国内で酸性熱水を生じる2つの地熱地域で单相流および二相流のケースで材料腐食試験などを実施しました。その過程で、東北工業技術試験所の成果である材料腐食予測式(倉田, 1992)の検証を行いました。この予測式は流体の温度、pHおよび使用材料のCr当量(材料耐食性の指標)を用いたものですが、本プロジェクトで同一温度、pH条件では材料の腐食速度とCr当量に対応することが確認されました。

2018～2020年度は、「未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発(在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発)」のテーマで、2017年度までの成果をふまえ、より高温(350℃程度まで)で酸性(室温pH3程度)の地熱流体での材料腐食評価を目標としました。ただ、この試験が国内で困難であったことから、室内試験をニュージーランドの研究機関であるGNSサイエンスで、フィールド試験をアメリカカリフォルニア州のガイザーズ地熱発電地域で行いました。この試験においても上記の材料腐食予測式の検証を行っています。さらに、酸性熱水での腐食を抑制する薬剤(インヒビター)の検討や海外での材料腐食事例の情報収集、材料の寿命を考慮した経済性評価などを行いました。

この7年間のプロジェクトの成果のうち、今後地熱開発や操業を実施する地熱事業者に向けて酸性熱水の利用を拡大できるように、材料腐食速度の予測、経済性評価、腐食データベースが「地熱発電プラントリスク評価システム(酸性熱水対応版)」の形で取りまとめられました。そのシステムは2022年10月20日に、本プロジェクトの代表機関である地熱技術開発株式会社からリリースされるとともに、NEDO、地熱技術開発株式会社、産総研、京都大学の連名でプレスリリースがされました。その内容は各機関のホームページで紹介されるとともにいくつかの新聞でも取り上げられています。

本稿では、そのプレスリリースの内容、プレスリリース本文からリンク先の地熱技術開発株式会社のホームページ https://www.gerd.co.jp/image/pdf/Explanation_of_functions.pdf (閲覧日:2022年10月20日)において説明されている各機能について紹介します。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

2) 地熱技術開発株式会社 〒104-0033 東京都中央区新川1丁目22-4

3) 京都大学大学院工学研究科 〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂

4) 新エネルギー産業技術総合開発機構 〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番

キーワード: 地熱発電, 酸性熱水, 材料腐食, プラントリスク評価システム, Cr当量

2. 概要

2.1 プレスリリースの内容

地熱発電プラントリスク評価システムを開発－酸性熱水資源の活用を進め、地熱資源の利用促進に貢献－

NEDO は「地熱発電技術研究開発」において、地熱資源の利用拡大につながる技術開発を進めてきました。この成果として、地熱技術開発株式会社と産総研、エヌケーケーシームレス鋼管株式会社、京都大学は、地熱発電用の熱水が酸性であると判明した際に、発電所の建設において最適な材料の検討を支援するソフトウェア(システム)「地熱発電プラントリスク評価システム(酸性熱水対応版)」を開発しました。

従来、坑井ケーシングなどの腐食による金属材料の損傷が、地熱発電所の利用率低下や開発の断念などの要因になっています。本システムの利用により、各金属材料の腐食速度や経済性の評価が可能になり、耐腐食性能・コスト面を含めた最適な材料を選定できます。また、対象となる金属材料の腐食に関する試験データおよび関連論文から、各金属材料の事前検討を簡便に行えます。これにより酸性熱水資源の活用が進み、地熱発電所の利用率向上および設備容量の増加につながることを期待されます。

2.2 背景と実施内容

2050年のカーボンニュートラル達成に向け、再生可能エネルギーの導入拡大が望まれる中、世界第3位の地熱資源量を有する日本では、ベース電源としての地熱発電が注目を集めています。しかし、地熱開発に伴い酸性熱水(水素イオン指数[pH]5以下を想定)が生じる事例では、坑井のケーシングや地表配管、発電設備の材料が腐食・損傷し、これが地熱発電所の利用率の低下や開発の断念などの要因となっています。

1992年度にNEDOが行った「酸性熱水の対策技術等に関する調査研究」によると、日本における地熱発電に利用できる地下の熱水(高温熱水対流型資源)のうち、約13%(地熱開発会社へのアンケート)が酸性熱水である可能性があります。日本の地熱資源量は約2300万kW(村岡ほか、2008)であることから、酸性熱水資源は約300万kWとなり、この値は2021年時点での日本の地熱発電の設備容量59.3万kWの約5倍に相当します。このことから、今後の地熱資源の利用促進には、酸性熱水資源の活用に向けた技術開発が重要になると見られています。

このような背景から、NEDOは「地熱発電技術研究開発」(2013年度～2021年度)において、地熱資源の利用拡大

につながる技術開発を実施しました。その中のテーマの一つとして、地熱技術開発株式会社と産総研、エヌケーケーシームレス鋼管株式会社、国立大学法人京都大学は、「未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発(在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発)」(2018年度～2020年度、以下本テーマ)を推進し、地熱エネルギーのさらなる高度利用を目指した技術開発に取り組んできました。

今回、本テーマの成果を活用し、地熱開発で酸性熱水が生じた場合、最適な発電設備の材料の検討に役立つシステム「地熱発電プラントリスク評価システム(酸性熱水対応版)」を開発しました。

地熱開発を目指す事業者は、このシステムに備わった材料腐食に関する過去の知見や腐食速度の予測技術を利用することにより、地熱発電所の開発前に坑井ケーシングなどの腐食発生リスクを予見し、対策を講じる手掛かりをつかめます。また、既存の発電所においても、利用率の向上に役立つデータを得ることが可能です。

3. 今回の開発成果

3.1 機能

地熱発電プラントリスク評価システム(酸性熱水対応版)には、下記の五つの機能があります(第1図参照)。

(1) 目的とする材料の腐食速度を計算する「金属材料腐食速度試算」

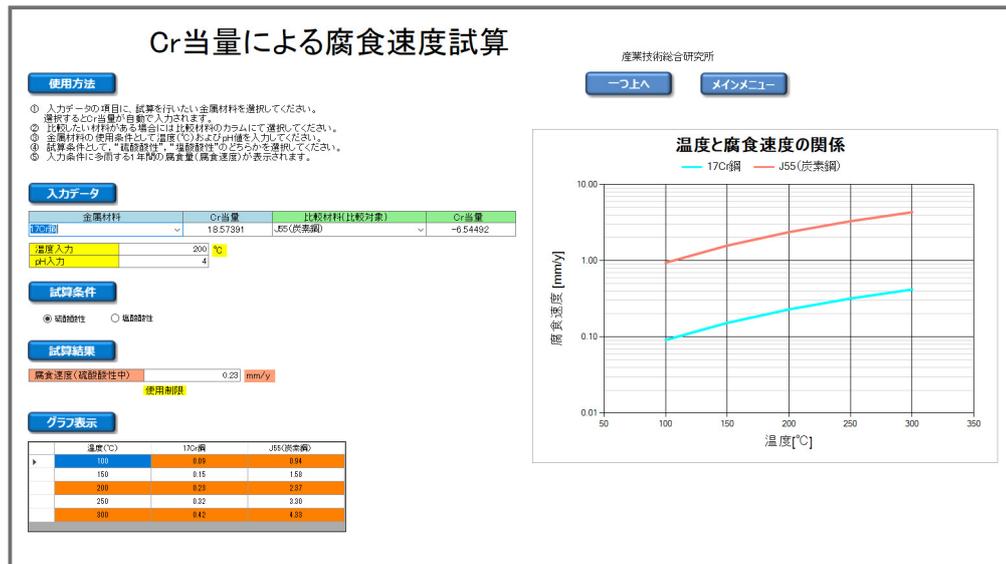
本機能は、地表での熱水分析データ、例えば、熱水の温度、pH(この他に、データがあればCl濃度、CO₂・H₂S分圧等)を入力すると、各鋼種(金属材料)に対する1年間当たりの腐食量を試算することができます。腐食速度の予測には、後述の材料腐食速度データベースに基づいた鋼種のCr当量に基づく予測式(開発:産総研、第2図参照)を用いるものと、主に本事業で取得した金属材料の腐食試験データを基に開発した実験式(開発:エヌケーケーシームレス鋼管株式会社、第3図参照)の2種類を使用することができます。前者は、Cr当量に基づくため多様な鋼種に対する試算が可能であり、後者は対象鋼種が限定されるものの、実験データに基づいた予測式であることから、式の適用範囲内では、より実際に即した試算結果が得られると期待されます。

(2) 使用可能な金属材料を示す「金属材料選定チャート」

地表で実測された、あるいは予測される熱水の温度・pHから適用可能な金属材料をチャート上で簡易に表示します。本機能では、温度とpHに対する各材料の適用範囲を



第1図 「地熱発電プラントリスク評価システム (酸性熱水対応版)」基本画面



第2図 Cr当量による腐食速度試算画面

示した材料選定ダイアグラム(第4図参照), ならびに pH, 温度, H₂S・CO₂分圧から材料を選定する材料選定フローチャートを提供します(第5図参照).

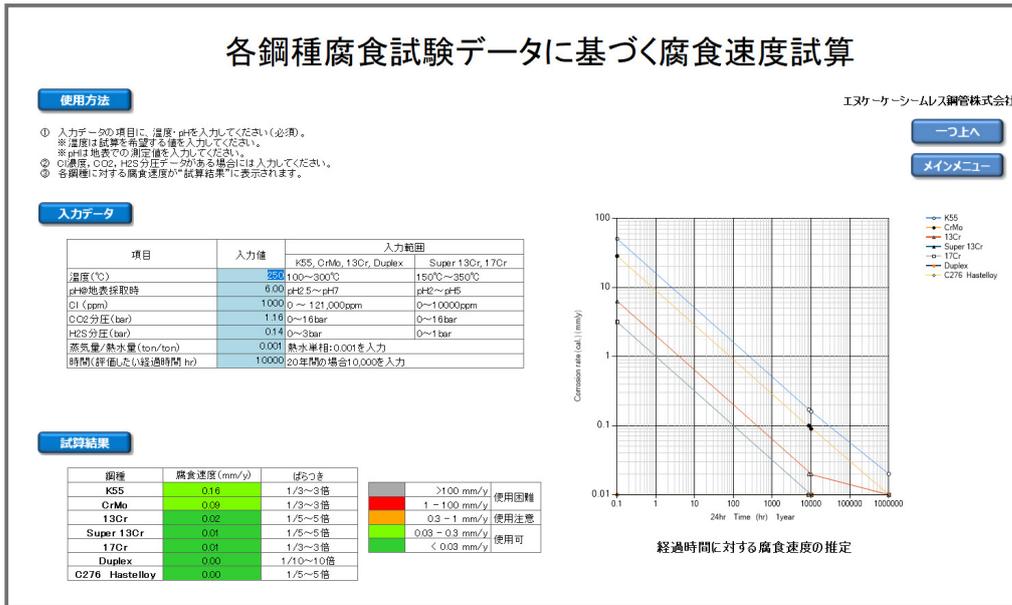
(3) 1 kW 当たりの掘削単価を計算する「金属材料による経済性評価」

本機能では, 腐食速度予測式から推定した腐食速度により材料の減肉量からケーシングの耐用年数を試算します. ケーシングの耐用年数あるいは一定期間の想定生産量に対して, ケーシングに使用する鋼材の違い(坑井単価の違い)

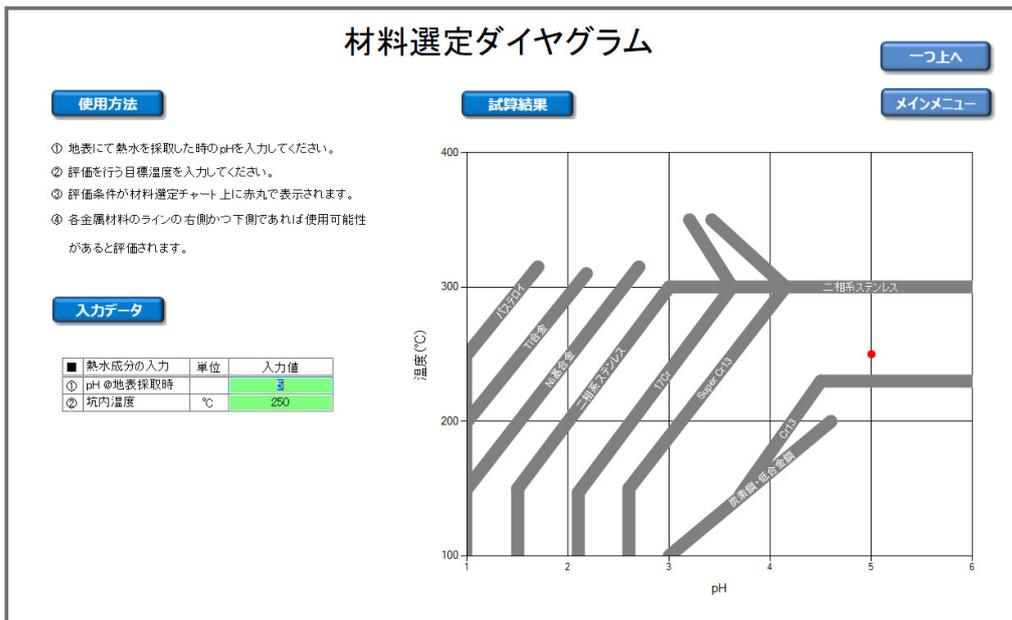
による 1 kWh 当たりの掘削コストを試算します(第6図参照).

(4) 材料腐食試験を基にグラフ化した「材料腐食速度データベース」

工業技術院東北工業技術試験所で実施されたサンシャイン計画の成果報告書「地熱用材料の開発に関する研究, 1986」(工業技術院東北工業技術試験所, 1986)における腐食試験データ(公開データ)のデータベース化を行い, 各鋼材における腐食速度の pH や温度の依存性をグラフ化し



第3図 各鋼種の腐食試験データに基づく腐食速度試算画面



第4図 材料選定ダイアグラム画面

ます(第7図参照)。検索条件として、温度、pH、Cl⁻濃度、CO₂分圧、H₂S分圧が選択できます。また、腐食環境として酸性熱水、および酸性熱水に非凝縮性ガス(飽和 H₂S)を加えた条件、あるいは NaCl を加えた条件を選択することができます。

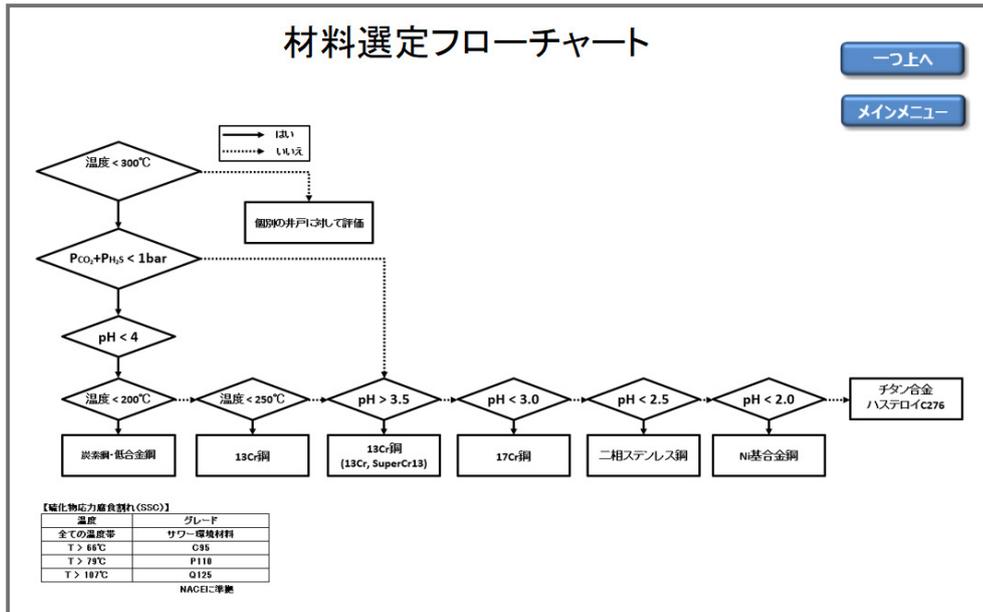
(5) 文献検索用の「腐食に係る文献データベース」

本機能は、地熱における腐食に関する公開文献(国内・海外を含む約 300 文献: 2020 年度中頃までが対象)について、キーワードや著者名、腐食試験条件(温度、pH、金属

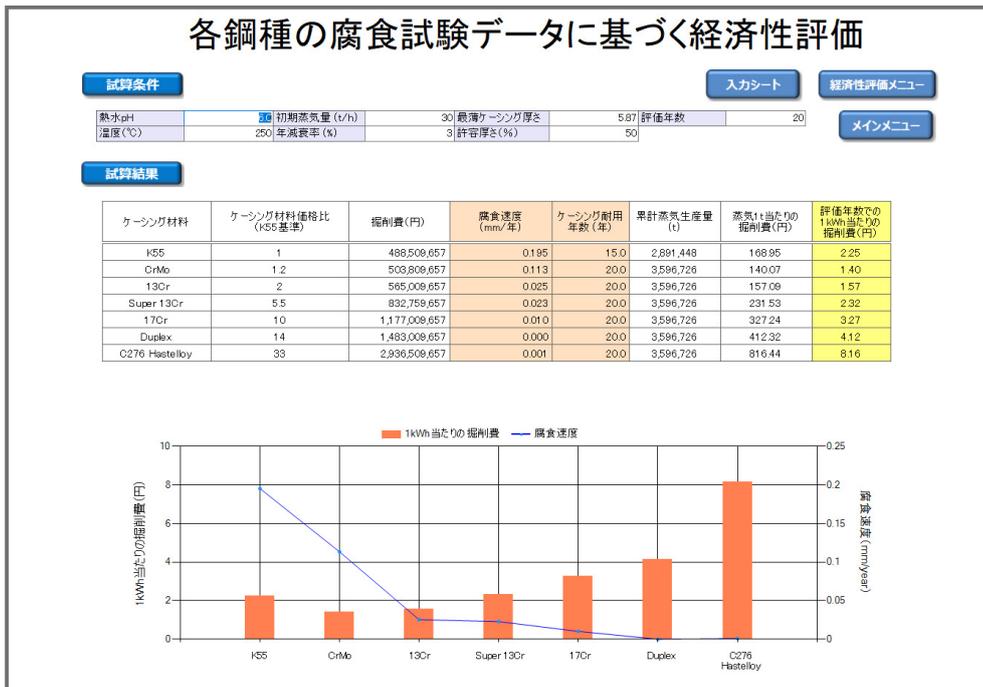
の設定)等により検索し、書誌情報を表示するためのデータベースです(第8図参照)。

4. システム活用の方向性

地熱資源の開発事業者は酸性熱水が生じると、従来はその地域での開発や坑井の利用を断念する事例が見られました。しかし、本システムを用いることにより、地熱設備に使用する金属材料の耐用年数とコストを計算し、適用可否



第5図 材料選定フローチャート画面



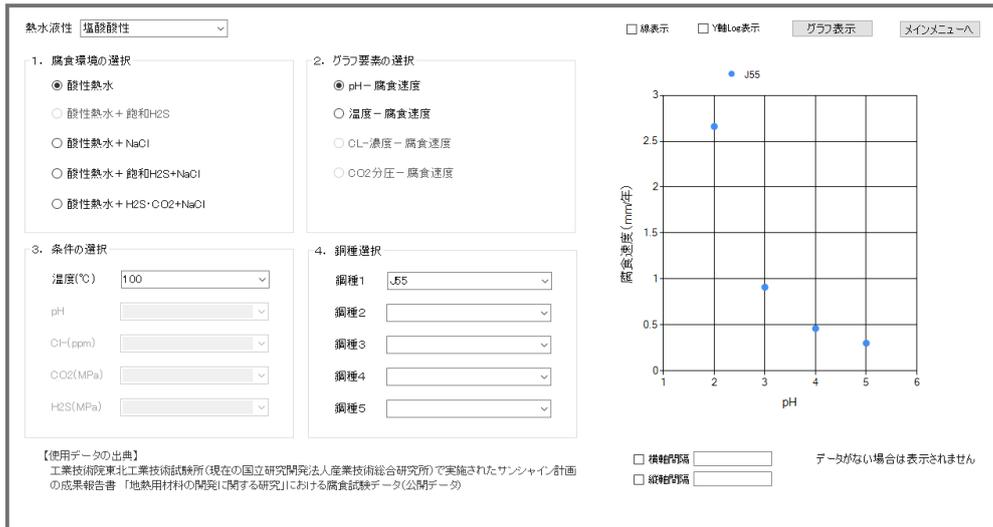
第6図 経済性評価試算結果画面

を予測することができます。これにより事業者は、酸性熱水が生じた場合も、腐食実験なしに安価で適用可能な材料を検討することができます。

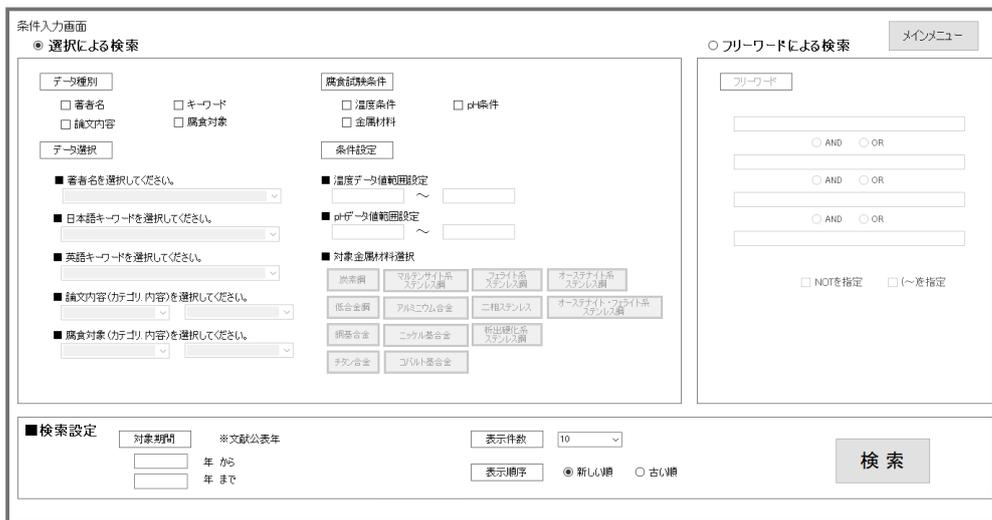
この予測結果に基づき、現地で実際に腐食試験を実施することで、耐腐食性能やコスト面で最適な材料を効率よく選定できます。これにより、酸性熱水資源の活用が進み、地熱発電所の利用率や設備容量の増加が期待できます。

5. 今後の予定

地熱技術開発株式会社は、「地熱発電プラントリスク評価システム(酸性熱水対応版)」と本システムの操作マニュアルを無償配布します。また参画機関である地熱技術開発株式会社や産総研(筆者ら)は学会・講演会などを通じて本システムの広報を行い、新たな腐食試験データや実際の坑井による腐食データなどの知見が得られた際には、腐食速度



第7図 材料腐食速度データベース画面



第8図 腐食に係る文献データベース画面

予測式の改良などを行う予定です。

文献

工業技術院東北工業技術試験所(1986)地熱用材料の開発に関する研究. 東北工業技術試験所, 235p.
 倉田良明(1992)地熱材料用腐食データベースの開発. 東北工業技術試験所報告, no. 25, 7-14.
 村岡洋文・阪口圭一・駒澤正夫・佐々木 進(2008)日本の熱水系資源量評価. 日本地熱学会学術講演会講演要旨集, B01.

YANAGISAWA Norio, SATO Masatake, OSATO Kazumi, SAKURA Koji, MIKATA Hitoshi and OSADA Kazuyoshi (2023) Development of the risk evaluation system of geothermal power plant -Promoting the utilization of acidic hydrothermal resources and contributing to the promotion of geothermal resource utilization-.

(受付: 2022年12月21日)

リール大学（フランス）での在外研究報告

野田 篤¹⁾

1. はじめに

2022年3月27日から2022年12月1日までの約8ヶ月間、フランスのリール大学(Université de Lille)の海洋学・地球科学研究室(Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, 略称LOG)において在外研究を行う機会を得ましたので、現地での研究や日々の生活などについて報告します。私にとっては、2013年9月～2014年8月までの1年間、アメリカのワイオミング大学に滞在して以来の2度目の在外研究になります。

2. 経緯

そもそもの経緯は、2017年の秋、リール大学のCésar Witt博士が私の研究に興味を持ち、日本で研究するためにフランス政府の研究予算へ応募するから協力してくれないか、と問い合わせがあったのがきっかけでした。その時は、残念ながら不採択になりましたが、フランスは伝統的にモデル実験の研究が盛んで、リール大学にも大きな実験室が整備されていることから、今度は私がフランスで研究するために日本学術振興会(JSPS: Japan Society for the Promotion of Science)の予算に応募することにしました。丁度、申請書を作成するタイミングで、リール大学に大型アナログ実験装置を新規に導入する計画が進んでおり、これを使用して沈み込み帯における付加体と前弧堆積盆を形成する実験計画を立てました。リール大学の装置は幅2mほどになりますが、当時の日本国内にこれに匹敵するサイズの装置はありませんでした(その後、産総研にも同規模の実験装置が導入されています)。

3. 出発

本研究課題は、2019年1月末にJSPSから採択内定の連絡があり、採択直後の2019年2月上旬に交付申請をして、リール大学のCésarと2020年10月から渡航する日程で調整を進めていました。しかし、交付申請の直後から新型コロナウイルスによる感染が日本国内でも急速に拡

大したために、産総研の海外渡航が原則禁止となり、計画を延期せざるを得ませんでした。状況がなかなか改善しない中、予算最終年度の2022年度を迎える前年(予算の使用ルール上、交付申請をした2019年度から3年度目の2022年度内に通算6ヶ月以上の渡航期間を終了することになっていた)、何回目かのコロナ感染者数ピークを過ぎたあたりの2021年10月27日に、新たに2022年3月1日からの渡航を計画し、荒井地質情報研究部門長と光畑研究戦略部長(当時)を通して総務本部と協議を開始しました。協議において本渡航の目的・必要性・緊急性を説明したところ、渡航予定日を翌週に控えた2022年2月24日に「渡航準備を止めることはしないが、感染状況が悪化している場合は、柔軟に出張中止の対応が出来るようにしておくこと」とのコメント付きで出張の承認を得ることができました。そして、その日、ロシアがウクライナに侵攻しました。

侵攻直後から各航空会社は欧州線の大部分を欠航にしていたものの、一部は便数を減らした上でロシア上空を迂回するルートで運行を再開するとの情報もあり、また航空会社も航空券の販売を続けていたため、3月7日に3月27日発パリ行き航空券(JAL)を購入しました。しかし、JALは迂回ルートでの運行をなかなか開始せず、1週間ごとに欠航の発表を繰り返していました。本当に飛ぶのだろうかという不安の中、購入した航空券の払い戻しもできず、出発もできないと思い、とりあえず既に迂回ルートでの運行を再開していたエールフランスのパリ便を3月17日に購入しました。結局、JALが3月27日のパリ便の欠航を発表したのは23日の夜で、翌24日にキャンセルの連絡を入れ、航空券の払い戻しを受けました。そして、予定通り3月27日に成田空港からパリへ飛び立ちました。

4. 到着

同27日夜にパリに到着し、空港で1泊後、翌28日に鉄道でリールへ移動しました。リールはフランス北部の国境近くに位置する中規模の街で、電車でブリュッセルまで40分、ロンドンまで100分で行くことのできる交通

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：在外研究報告、フランス、リール、モデル実験

の要所です。中世以前からの長い歴史を持ち、フランダース国の首都でもあり、その後は繊維業や石炭業を中心として栄えた街でもあります。リール大学は、学生数7万人を超えるフランスでも有数の規模を持つ大学です。リール市内と近郊に複数のキャンパスを持ち、私が滞在した Cité Scientifique キャンパスには科学技術系の学部が集まっています。

リール駅に着いて、César と無事に会うことができ、ようやくほっとしました。その日は、大学構内の宿舎へ行って荷物を整理し、事前に大学宛に送っておいた荷物も車で宿舎に運んでもらいました。この宿舎(写真1, 2)は、海外からの学生や研究者が利用できるもので、1ルーム(23 m²)で699ユーロ/月(約10万円/月)です(2022年現在)。家具・食器・電気・水道・暖房・インターネットのすべてが料金に含まれているので、値段はともかく、手間がかからないのは良かったです。大学構内なので、治安も良く、静かで、学部の建物(写真3左)まで徒歩10分、スーパーまでも徒歩約10分という恵まれた環境でした。到着して1週間は、時差に慣れるのと、生活の基盤を整えるので結構大変でした。

5. 研究

到着して数日後に、César が関係者を集めたミーティングを設定してくれました。これからどんな研究を、どのようなスケジュールで進めていくのかについて、ラボの主なメンバー (Bruno Vendeville, Frank Chanier, Fabien Graveleau, César Witt) と相談しました。この時は、Fabien が中心となって導入した新実験装置 (SUBDUCTOR と命名された) を用いた実験と、César が進めているエクアドル沖



写真1 今回、滞在した宿舎 (REEFLEX résidence internationale)。筆者の部屋は2階(フランスでいう1階)の右から2番目の部屋。フランスらしいデザインの外観。

の音波探査記録の解釈の2つのテーマをやろうということになりました。実際には、実験の結果をまとめることで精一杯で、音波探査記録の解釈の方は時間切れになってしまいましたが、この4名は共同研究者として私の実験に密接に関わってくれました。

実験では、ガラス板で仕切られた容器に砂を敷き、底面のシートをモーターで巻き取ることで、付加体様の地質構造を実験装置内に再現します(写真3右)。その時、使用する材料の種類、材料を重ねる順番、さらには層の数を変えることで、複数の実験条件を設定し、地質構造や断層の活動状況、断層変位の時空間変化を比較します。今回は、8種類の実験条件を設定し、4月から6月にかけて、計15回の実験を行いました。

実験中には、決められた時間ごとに変形の様子をカメラ

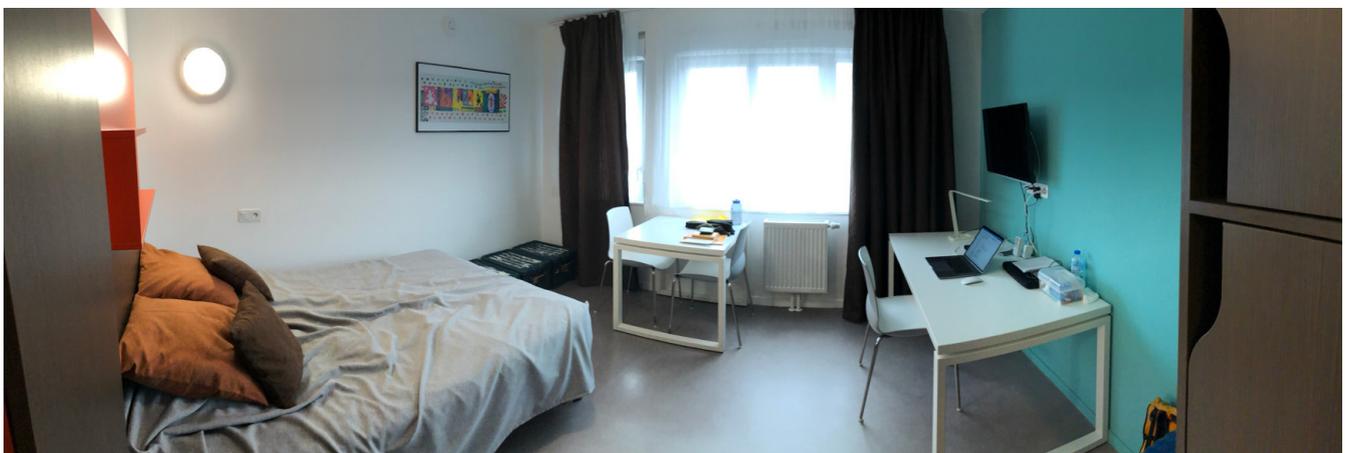


写真2 宿舎内部の様子。窓側に机やベッドがあり、手前のドア側にキッチンとシャワールームがある。



写真3 (左) 地球科学部の建物。トラディショナルなレンガとモダンなタイルを組み合わせたフランスらしい外観。(右) SUBDUCTORを使った付加体形成実験。左から, Fabien Graveleau, Bruno Vendeville, Romain Abraham, César Witt. 右端の Frank Chanier は顔が隠れてしまっている。Bruno は、夏休み明けから体調を崩して休養していたが、残念ながら11月6日に永眠された。

で撮影するのですが、1回の実験で撮影する写真は200枚程に及びます。7月から9月にかけて、これらの全ての写真を画像解析して、変形の変位速度やせん断歪みを定量化し、その結果を図にまとめました。そして、残りの10月と11月に論文を執筆し、帰国前に共同研究者らと草稿を共有しました。滞在中は基本的に2週間に1回のペースで共同研究者らとミーティングを行い、進捗状況や結果の解釈などを議論しました。このミーティングは、実験結果を論文化する上で、非常に有益でした。

研究の具体的な成果は、現在執筆中の論文にまとめているところですが、要点を簡単に紹介すると、(1) 通常の付加作用は一定の波長を持つ周期的なプロセスであり、その過程では付加体下のプレート境界における上盤と下盤のカップリングの割合が時空間的に変化すること、(2) 付加する堆積物内に含まれる弱層の数が増えても付加周期の波長は保たれるが、付加体内の地質構造や断層ネットワークは複雑になること、(3) 弱層に不連続がある場合、付加周期の波長は乱れ、順序外衝上断層(out-of-sequence thrust)の活動が顕著になること、などがあります。

6. その他

私がお世話になったラボ(LOG)は、フランス西海岸のWimereuxという小さな街にもキャンパスがあります。広大なビーチを持つWimereuxは、バカンスを過ごす観光地として有名ですが、そこで7月4日に行われたラボの総会に参加しました。総会後には、北フランスの代表的な露頭であるCap Gris-Nez(写真4左, Cape Grey Nose)とCap

Blanc-Nez(写真4右, Cape White Nose)を案内してもらいました。前者は、ジュラ紀の砂岩や礫岩、後者はそれを覆う白亜紀のチョークから構成されています。これらの露頭は、ドーバー海峡に面しており、目をこらすとイギリス側の海食崖も見ることができます。白亜紀のチョークはリール市の地下を支える基盤岩であるとともに、地下水の胎児層にもなっています。

7月12日から7月14日には、アメリカのシアトルで開催されたSEG-AGU workshop: Geophysics of Convergent Marginsに参加しました。初日の12日は、Modeling of Subduction Zone Dynamics と Geophysical Imaging of Convergent Margins at Different Scales の2つのセッションがありました。様々な観測記録の可視化技術が進み、沈み込み帯の内部構造(特に速度分布)がかなり詳しく分かるようになってきたことが印象的でした。2日目の13日は、午前中にUniversity of Washingtonを訪問し、ここ数年で急速に整備が進んだアメリカ西海岸の地震観測網と緊急地震速報システムのデモを見学しました(写真5左)。午後は、3つのグループに分かれてのグループディスカッションとTectonics and Geologyのセッションがあり、私はForearc basinについてのレビューを発表しました。3日目の14日は、Natural Hazards and Resourcesのテーマで、各地の沈み込み帯における地震・津波についての研究発表、その後、昨日のグループディスカッションのまとめと全体ディスカッションを行い、解散となりました。全体の参加者は60名ほどで、ほとんどがアメリカ国内からの参加者でしたが、参加者の3分の1を占めたポスドクや博士課程の学生の国籍は多様でした。今回のワークショップは沈み



写真4 (左) Cap Griz-Nez と筆者. (右) Cap Blanc-Nez へ続くチョークの海食崖.
イノセラムスなどの海生二枚貝化石の破片が多く含まれる.

込み帯に関する興味深い発表が多く、非常に刺激を受け、有意義な時間を過ごすことができました。

また、11月7日には、パリの高等師範学校(École Normale Supérieure, 以下 ENS)でセミナー発表をしてきました(写真5右)。ENSのMatthias Delescluse博士が私の研究に興味を持ち、声をかけてくれたのがきっかけです。このセミナーは、もともと10月18日に開催される予定でしたが、鉄道会社のストライキにより、11月に延期されたものです。フランスの国技とも言われるProtestingを実際に体験するとは思っていませんでした。セミナーでは、私の前弧堆積盆に関する研究とリール大学で実施中の実験について発表しました。ENSの地球科学系の教員に加え、近隣のソルボンヌ大学の研究者にも発表を聞いて頂き、

様々な意見交換をすることができました。特に、深部地震発生領域における地震活動が沿岸域の地形形成や隆起作用を担っているといった最近話題のテーマについて、Jean-Arthur Olive博士と議論することができたのは面白かったです。

7. 生活

フランスで生活するためには、フランス語を話せた方がいいのは当然です。街中はもちろん、大学の事務連絡も基本的に全てフランス語です。私が通っていた近所の床屋も英語が全く通じず、いつもおまかせで切ってもらっていました。フランスに到着後、週に1回2時間のフランス語の

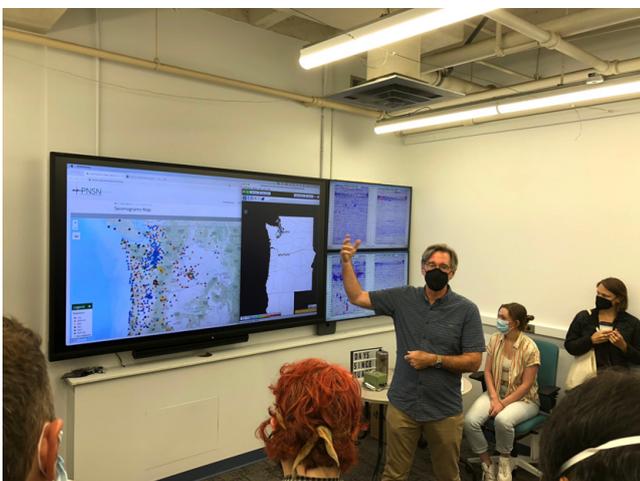


写真5 (左) ワシントン大学・USGSなどの共同開発による地震観測ネットワークと緊急地震速報システムの説明をするHarold Tobin博士。(右) パリ高等師範学校の正面入口と筆者。この学校はフランス革命の3年後、1708年に設立された歴史ある学校の1つ。



写真6 (左)大学から少し離れたところにあるエロン湖。週末には散歩やピクニックをする人で賑う。筆者も宿舎からのランニングでよく訪れた。(右) Louise Watremez 博士(左手前)の自宅に招かれたときの様子。Raclette と呼ばれるチーズを溶かして、焼いたじゃがいもやマッシュルームと一緒に食べる料理。奥は Frank Chanier 教授とその奥さま。Frank はフランスだけでなく、ギリシア・トルコなどの地中海沿岸やニュージーランド東海岸の地質にも詳しく、調査経験も豊富。右手前は数値モデルを専門とする Laetitia Le Pourhiet 教授(ソルボンヌ大学)。

オンライン講座を3ヶ月間受講して、ようやくパン屋と魚屋で欲しいものを一方的に伝えることができるようになりましたが、このまま講座を続けても会話のやりとりができるようになることは絶望的であると認識し、その段階でフランス語の習得はあきらめてしまいました。

フランスの学校には、国民の祝日に加え、春(4月)・秋(10月)・ノエル(12月)・冬(2月)に1~2週間、さらに夏には6週間程の休暇があります。フランス人は長期休暇や夏休みにはバカンスへ出かける、というのは本当でした。その代わりに、平日は朝8時から働き、夕方アメリカよりは残業する人が多かった印象です。しっかり休んで、働いて、また休むという国民性なのかなと思いました。

ほとんどの商店やショッピングモールは日曜日に閉まるため、買物に行くのは必然的に土曜日になり、そのため非常に混雑します。逆に、日曜日には公園や広場などが賑います。私も、週末には近くのエロン公園まで、よくランニングに行っていました(写真6左)。また、宿舎のジムで、毎日1時間程度は汗をかくようにしていました。

北フランスは、夏でも気温30度を超える日は数えるくらいしかないようなところでしたが、ここ数年は南からの熱波の影響で気温40度を超える日も珍しくなくなりました。2022年は数回にわたって熱波に襲われ、特に8月中旬には最高気温40度近い日が1週間程度続きました。大学にも宿舎にもエアコンがないため、ひたすら扇風機の風を浴びて耐えるしかありませんでしたが、日本よりも湿度が低いことに救われました。秋になると、今度は戦争の影響でエネルギー関係費が高騰したことで、暖房がなかな

か入らないといった状況になりました。大学では居室へのヒーターの持ち込み禁止令も出て、みな服を着込んで仕事をしていました。結局、11月上旬になって、ようやく暖房が入りました。

円安や物価高の影響は身に染みて感じました。レストランで外食すれば25~35ユーロ(3500~5000円)は当たり前です。スーパーでも鶏胸肉が100gで180円程度と、物価は決して安くなかったため、基本的に3食とも自炊でした。しかし、日本では手に入らない様々な種類のパン・果物・チーズ・ハムを食べ比べるのは楽しかったです。

私の印象では、フランス人は先まわりして気を利かせてくれるようなことはほぼないです。何も言わなければ、ずっと放っておかれますが、逆にそれが楽でもありました。しかし、困っていると言えば助けてくれるし、アメリカ人よりも控え目で、日本人に近く、私にとってはなじみやすかったです。ラボの何人かは非常に親切にしてくれ、時には自宅での夕食に招待してくれることもあり、一人暮らしの生活の息抜きになりました(写真6右)。

8. おわりに

在外研究の意義については、多くのところで触れられていますが、私にとっては研究に集中できること、異なる研究文化や多様な研究者に触れられること、心身のリフレッシュができることの3点が大きなメリットとなっています。大学でいろいろな研究者と雑談したり、議論したりといった経験は研究に対する考え方や姿勢を知る良い機会で

した。また、研究以外の時間を確保して、ジムや英会話教室に通ったことも、リフレッシュに有効でした。この8ヶ月間という期間は、これまでの私の人生の2%にも満たない短い時間ですが、きっと忘れられない貴重な時間になるのだらうと思います。

若手研究者がキャリアを積む上でも在外研究は大きなステップになります。海外に行かないと見られない様々な種類の地層や地質体を観察すること、最先端の分析機器や実験装置に触れること、新しい分野へチャレンジすること、海外の研究者ネットワークに加わることで、自らの得意分野を究めることなど、在外研究は普段とは異なる経験を積む良い機会になります。研究者としてのキャリアを積む過程で、在外研究をうまく活用し、自身の研究の種をたくさん撒くことができれば、それらのうちのいくつかは芽を出

し、いずれ大きく成長することと思います。若手研究者の方々には、よし行ってみようという気持ちで、積極的に挑戦して頂きたいと思います。

謝辞：本研究は JSPS 科研費、国際共同研究加速基金（国際共同研究強化（A））、課題番号 19KK0356 によります。光畑副総合センター長と荒井地質情報研究部門長には、渡航許可を得る際に、多大なるご尽力を頂きました。リール大学の César Witt 博士、Fabien Graveleau 博士、Frank Chanier 教授、Bruno Vendeville 教授には、実験室と実験装置の使用にあたって、いろいろと便宜を図って頂きました。また、LOG のメンバー及び博士研究員の方々には、滞在中の様々な場面で支援を頂きました。以上の方々に厚く御礼を申し上げます。

NODA Atsushi (2023) Report of overseas research at University of Lille (France).

(受付：2023 年 1 月 4 日)

地質標本館での日本の地名由来鉱物の展示

佐脇 貴幸¹⁾

1. はじめに

佐脇(2021a, b)では、日本人の名前に由来する鉱物について紹介しましたが、そこで記したように、鉱物の名前は、それを構成する元素名、その見た目(色、形など)、発見された場所の地名、鉱物学の発展に貢献した人名などに由来するものがほとんどです。

産業技術総合研究所(産総研)の地質標本館には、多数の岩石・鉱物・化石標本が展示されています。その中には、人名に由来する鉱物標本と同様に、発見された地名に由来する鉱物標本もあります。本稿では、地質標本館に展示されている鉱物標本の中で、特に日本の地名が付けられている鉱物について紹介します。

2. 鉱物の命名

鉱物名は自由に付けていいものではなく、現在は、国際的な学術組織である「国際鉱物学連合(International Mineralogical Association, IMA)」により承認されたものだけが正式な鉱物名とされています(佐脇, 2021a)。一方、IMAでは、既存の鉱物名の妥当性の確認、分類し直し等の審議も行っており、その過程で、それまで使われていた鉱物名が取り消されてしまう場合もあります。このような新規登録と取り消しの結果として、IMAのウェブサイトの“The New IMA List of Minerals - A Work in Progress - (Updated January 2023)”(http://cnmnc.units.it/master_list/IMA_Master_List_%282023-01%29.pdf, 閲覧日: 2023年1月31日)を参照すると、現在正式に認められている鉱物名は約5,900種類あることになっており、2016年以降では、毎年約100種類の新鉱物が、上記のリストに付け加わっているようです。

3. 日本の地名に由来する鉱物

さて、上記のIMAのリストに載っている、日本の地名が付けられている鉱物は64種類あります(第1表, 2023年1月31時点)。ただし、例えば Editorial Committee

for “Introduction to Japanese Minerals” (1970)で「取り消された」とされている38種の鉱物の中の石川石(Ishikawaite)、雲水峰石(Uduminelite)については、存在に疑義があるという評価の下でIMAのリストに載っています。

第1表では、その由来に従って、都道府県名、市町村名、鉱山名、旧国名(令制国名)等の順に並べていますが、特に市町村名由来のものについては、平成の大合併によって命名時の市町村名が消滅してしまったものがあるため、旧地名と現地名を表示しています。また、取り消しを受けた鉱物の一部について、松原(2018)に注記されているものだけを、通番65以降に示しました。

これらのうち、地質標本館では7種(1種は現在有効ではないもの)の鉱物が展示されており、全て1階第4展示室にあります。また「第一文献」とは、前述のIMAのリストにおいて、第一文献として挙げられているものを指しています。

3.1 備中石 (Bicchulite) びっちゅうせき



模式地：岡山県川上郡備中町(現高梁市)布賀

産状、特徴など：備中石は、布賀のスカルンから、岡山大学の逸見千代子らによって、1973年に報告されました(Henmi *et al.*, 1973)。ゲーレン石(Gehlenite: $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{SiAl})\text{O}_7$)の水和物としてCarlson(1964)により合成されていたものが自然界で見つかり、鉱物として命名されたものです。備中石は、白色もしくは灰色を呈し、非常に細かい粉体状で産します。また、ほぼ同時期に同質のものが北アイルランドの接触変成岩から見つかったことから、Henmi *et al.* (1973)では、北アイルランド産のものについても記され、その発見者と共著での論文発表となっています。

布賀のスカルンは、高温型の交代作用とそれに伴うスカルン鉱物が観察される場であり、様々な新鉱物が発見された場所としても有名です。例えば、佐脇(2021a)に紹介した人名鉱物である逸見石(Henmilite)、千代子石(Chiyokoite)、草地鉱(Kusachiite)などや、第1表に示した岡山石、布賀石などがあります。

なお、地質標本館に展示しているものは、岩手県江刺市

1) 産総研 地質調査総合センター

キーワード：鉱物名、日本、地名、IMA、地質標本館、展示標本

第1表 日本の地名に由来する鉱物一覧

松原 (2009) を基に、宮島 (2001)、松原 (2018)、「日本から発見された新鉱物たち (一覧)」(https://mdcl.iissp.u-tokyo.ac.jp/denken/、閲覧日: 2023年1月31日)、「The New IMA List of Minerals - A Work in Progress - (Updated January 2023)」(http://cnmnc.units.it/master_list/IMA_Master_List_%282023-01%29.pdf、閲覧日: 2023年1月31日)などを参考に作成。●が付いている鉱物については、「地質標本鑑賞会」(https://www.gsj.jp/Muse/hyohon/)、閲覧日: 2023年1月31日)に登録されている標本写真が見られます。通番 65 以降の「現在有効でない鉱物名」については、松原 (2018) に掲載されているものだけを掲載しました。

通番	展示標本	鉱物名(日本語名)	鉱物名(英語名)	由来の地名	化学組成	発表年	備考
都道府県名							
1		千葉石	Chibaite	千葉県南房総市	$\text{SiO}_2 \cdot n(\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10})$ ($n_{\text{max}} = 3/17$)	2011	
2		群馬石	Gunmaite	群馬県桐生市	$(\text{Na}_2\text{Sr})\text{Sr}_2\text{Al}_{10}(\text{PO}_4)_4\text{F}_{14}(\text{OH})_{12}$	2022	
3		岩手石	Iwateite	岩手県田野畑村	$\text{Na}_2\text{BaMn}(\text{PO}_4)_2$	2014	
4		イットリウム三重石	Mieite-(Y)	三重県菟野町	$\text{Y}_4\text{Ti}(\text{SiO}_4)_2\text{O}(\text{F}, \text{OH})_6$	2015	
5		新潟石	Niigataite	新潟県糸魚川市	$\text{CaSrAl}_3(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$	2003	
6		岡山石	Okayamalite	岡山県高梁市	$\text{Ca}_2\text{B}_2\text{SiO}_7$	1998	
7		大阪石	Osakaite	大阪府箕面市	$\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2007	
8		滋賀石	Shigaite	滋賀県栗東市	$\text{Mn}_6\text{Al}_3(\text{OH})_{18}[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1985	
9		東京石	Tokyoite	東京都奥多摩町	$\text{Ba}_2\text{Mn}^{3+}(\text{VO}_4)_2(\text{OH})$	2004	
市町村名							
10		阿武石	Abuite	山口県阿武町	$\text{CaAl}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_2$	2017	
11	●	備中石	Bicchulite	岡山県備中町(現 高梁市)	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_6(\text{OH})_2$	1973	展示標本は、岩手県江刺市(現 奥州市)赤金鉱山栄鉱床産
12		イットリウム肥前石	Hizenite-(Y)	佐賀県肥前町(現 唐津市)	$\text{Ca}_2\text{Y}_6(\text{CO}_3)_{11} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	2013	
13		伊勢鉱	Iseite	三重県伊勢市	$\text{Mn}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$	2013	
14		石川石	Ishikawaite	福島県石川町	$(\text{U}, \text{Fe}, \text{Y})\text{NbO}_4$	1922	IMAのリストには載っているが、その存在が疑われている
15		糸魚川石	Itoigawaite	新潟県糸魚川市	$\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1999	
16		桐生石	Kiryuite	群馬県桐生市	$\text{NaMn}^{2+}\text{Al}(\text{PO}_4)\text{F}_3$	2021	
17		イットリウム河辺石	Kobeite-(Y)	京都府河邊村(現 大宮町)	$(\text{Y}, \text{U})(\text{Ti}, \text{Nb})_2(\text{O}, \text{OH})_6$ (?)	1950	
18		三笠石	Mikasaite	北海道三笠市	$\text{Fe}^{3+}_2(\text{SO}_4)_3$	1994	
19		箕面石	Minohlite	大阪府箕面市	$(\text{Cu}, \text{Zn})_7(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{10} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2013	
20		宗像石	Munakataite	福岡県宗像市	$\text{Pb}_2\text{Cu}_2(\text{Se}^{4+}\text{O}_3)(\text{SO}_3)(\text{OH})_4$	2008	
21		青海石	Ohmilite	新潟県青海町(現 糸魚川市)	$\text{Sr}_3(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})(\text{Si}_2\text{O}_6)_2(\text{O}, \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1973	
22		留萌鉱	Rumoiite	北海道初山別村	AuSn_2	2021	初山別鉱とともに発見
23		様似鉱	Samaniite	北海道様似町	$\text{Cu}_2\text{Fe}_3\text{Ni}_2\text{S}_8$	1998	幌満鉱とともに発見
24		初山別鉱	Shosanbetsuite	北海道初山別村	Ag_3Sn	2021	留萌鉱とともに発見
25		田野畑石	Tanohataite	岩手県田野畑村	$\text{LiMn}_2\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})$	2012	
26		砥部雲母	Tobelite	愛媛県砥部町	$(\text{NH}_4)\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	1982	
27		苫前鉱	Tomamaeite	北海道苫前町	Cu_3Pt	2022	
28	●	湯原原沸石	Yugawaralite	神奈川県湯原町	$\text{Ca}(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1952	展示標本は静岡県土肥町(現 伊豆市)大洞林道産
鉱山名							
29		赤金鉱	Akaganeite	岩手県赤金鉱山	$(\text{Fe}^{3+}, \text{Ni}^{2+})_8(\text{OH}, \text{O})_{16}\text{Cl}_{1.25} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	1962	
30		阿仁鉱	Anilite	秋田県阿仁鉱山	Cu_7S_4	1969	
31		古遠部鉱	Furutobeite	秋田県古遠部鉱山	$(\text{Cu}, \text{Ag})_6\text{PbS}_4$	1981	
32		日立鉱	Hitachiite	茨城県日立鉱山	$\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}_6$	2018	
33		生野鉱	Ikunolite	兵庫県生野鉱山	Bi_4S_3	1959	
34		上国石	Jōkokuite	北海道上国鉱山	$\text{Mn}^{2+}(\text{SO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1978	
35		釜石石	Kamaishilite	岩手県釜石鉱山	$\text{Ca}_2(\text{SiAl}_2)\text{O}_6(\text{OH})_2$	1981	
36	●	神岡鉱	Kamiokite	岐阜県神岡鉱山	$\text{Fe}^{2+}_2\text{Mo}^{4+}_3\text{O}_8$	1985	
37		河津鉱	Kawazulite	静岡県河津鉱山	$\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$	1970	
38		三原鉱	Miharaite	岡山県三原鉱山	$\text{PbCu}_4\text{FeBiS}_6$	1980	
39		中宇利石	Nakauriite	愛知県中宇利鉱山	$\text{Cu}_8(\text{SO}_4)_4(\text{CO}_3)(\text{OH})_6 \cdot 48\text{H}_2\text{O}$	1976	最初に報告された化学組成に疑問点ありとみられている(松原, 2009)

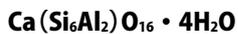
第1表 (続き)

通番	展示標本	鉱物名(日本語名)	鉱物名(英語名)	由来の地名	化学組成	発表年	備考
40		人形石	Ningyosite	鳥取県人形峠鉱山	(U,Ca,Ce) ₂ (PO ₄) ₂ ·1-2H ₂ O	1959	
41	●	尾去沢石	Osarizawaite	秋田県尾去沢鉱山	Pb(Al ₂ Cu ²⁺)(SO ₄) ₂ (OH) ₆	1961	
42		園石	Sonolite	京都府園鉱山	Mn ²⁺ ₉ (SiO ₄) ₄ (OH) ₂	1963	
43		種山石	Taneyamalite	熊本県種山鉱山	(Na,Ca)Mn ²⁺ ₁₂ (Si,Al) ₁₂ (O,OH) ₄₄	1981	
44		手稲石	Teineite	北海道手稲鉱山	Cu ²⁺ (Te ⁴⁺ O ₃)·2H ₂ O	1939	
45	●	轟石	Todorokite	北海道轟鉱山	(Na,Ca,K,Ba,Sr) ₁₋₃ (Mn,Mg,Al) ₆ O ₁₂ ·3-4H ₂ O	1934	展示標本は、静岡県松崎町池代鉱山産
46		豊羽鉱	Toyohaite	北海道豊羽鉱山	Ag ₂ FeSn ₃ S ₈	1991	
47		都茂鉱	Tsumoite	鳥根県都茂鉱山	BiTe	1978	都茂鉱に似ていることから名づけられた Sulphotsumoite (Bi ₃ Te ₂ S)というものもある。
旧国名(令制国名)、その他							
48		房総石	Bosoite	千葉県南房総市	SiO ₂ ·nCxH _{2x+2}	2014	
49		蝦夷地鉱	Ezochiite	北海道苫前町	Cu ¹⁺ (Rh ³⁺ Pt ⁴⁺) ₄ S ₄	2022	
50		布賀石	Fukalite	岡山県高梁市布賀	Ca ₄ Si ₂ O ₆ (CO ₃)(OH) ₂	1977	
51		幌満鉱	Horomanite	北海道様似町幌満	Fe ₆ Ni ₃ S ₈	1998	様似鉱とともに発見
52		イトトリウム岩代石	Iwashiroite-(Y)	福島県川俣町	YTaO ₄	2006	
53		伊予石	Iyoite	愛媛県佐田岬半島	MnCuCl(OH) ₃	2017	三崎石とともに発見
54		神南石	Kannanite	愛媛県神南山	Ca ₄ Al ₄ (MgAl)(VO ₄)(SiO ₄) ₂ (Si ₃ O ₁₀)(OH) ₆	2016	
55		三崎石	Misakiite	愛媛県佐田岬半島	Cu ₃ Mn(OH) ₆ Cl ₂	2017	伊予石とともに発見
56		オホーツク石	Okhotskite	北海道常呂町	Ca ₂ (Mn,Mg)(Mn ³⁺ ,Al,Fe ³⁺) ₂ (Si ₂ O ₇)(SiO ₄)(OH) ₂ ·H ₂ O	1987	
57		大峰石	Ominelite	奈良県天川村	Fe ²⁺ Al ₃ O ₂ (BO ₃)(SiO ₄)	2002	
58	●	大隈石	Osumilite	鹿児島県垂水市	KFe ₂ Al ₃ (Al ₂ Si ₁₀)O ₃₀	1956	展示標本は、鹿児島県隼人町(現霧島市)浜ノ市産
59		苦土大隈石	Osumilite-(Mg)	鹿児島県垂水市	KMg ₂ Al ₃ (Al ₂ Si ₁₀)O ₃₀	2013	ドイツの試料から発見
60		蓮華石	Rengeite	新潟県糸魚川市	Sr ₄ Ti ₄ ZrO ₈ (Si ₂ O ₇) ₂	2001	
61		イトトリウム高縄石	Takanawaite-(Y)	愛媛県高縄山	YTaO ₄	2013	
62		多摩石	Tamaite	東京都奥多摩町	(Ca,K,Na) _x Mn ₆ (Si,Al) ₁₀ O ₂₄ (OH) ₄ ·nH ₂ O (X=1-2; n=7-11)	2000	
63		津軽鉱	Tsugaruite	青森県碓ヶ関村	Pb ₄ As ₂ S ₇	1998	
64		雲水峰石	Uduminelite	福島県須賀川市雲水峰	Ca ₃ Al ₈ (PO ₄) ₂ O ₁₂ ·2H ₂ O	1950	IMAのリストには載っているが、その存在が疑われている
現在有効ではない鉱物名(松原, 2018)							
65		阿武隈石	Abukumalite	福島県石川町	(Y,Ca) ₂ (SiO ₄) ₃ (OH)	1938	現在はBritholite-(Y)
66	●	荒川石	Arakawaite	秋田県荒川鉱山	(Cu,Zn) ₂ Zn(PO ₄)(OH) ₃ ·2H ₂ O	1921	現在はVeszelyite
67		愛媛閃石	Ehimeite	愛媛県新居浜市	NaCa ₂ (Mg ₄ Cr)(Si ₆ Al ₂)O ₂₂ (OH) ₂	2012	現在はChromio-pargasite
68		幌別鉱	Horobetsuite	北海道幌別鉱山	(Bi,Sb) ₂ S ₃	1955	SibniteとBismuthiniteの中間物
69		磐城鉱	Iwakiite	福島県いわき市	Mn ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄	1979	現在はJacobsite-Q
70		中瀬鉱	Nakascite	兵庫県中瀬鉱山	Pb ₄ Ag ₃ CuSb ₁₂ S ₂₄	1960	中瀬鉱の結晶構造はAndorite-VIを基本として、Andorite-IVが混じって構成されていることが判明
71		奴奈川石	Nunakawaite	新潟県糸魚川市の古名	NaSr ₄ Fe ³⁺ Ti ₂ Si ₆ O ₂₄ (OH) ₄	1974	正式名称は、Strontio-orthojoaquinite
72		吉川石	Yoshikawaite	愛知県新城市吉川	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·8H ₂ O	1973	結晶水のやや多いDypingite

(現奥州市)の赤金鉱山のもので(第1図a)。

第一文献: Henmi *et al.* (1973)

3.2 湯河原沸石 (Yugawaralite) ゆがわらふっせき



模式地: 神奈川県足柄下郡湯河原町

産状, 特徴など: 湯河原沸石は、アマチュアの鉱物コレ

クターとして著名な櫻井欽一らによって、湯河原町の不動の滝近くの道路際から発見されました(Sakurai and Hayashi, 1952)。この付近には新第三紀の湯ヶ島層に属する安山岩質凝灰岩が分布し、その中をネットワーク状に広がっている石英、濁沸石(Laumontite)、菱沸石(Chabazite)、プチロル沸石(Ptilolite)などからなる鉱物脈中に、無色・透明～半透明の板状鉱物として湯河原沸石



第1図 地質標本館第4展示室に展示している標本
 a: 備中石, b: 湯河原沸石, c: 神岡鉱, d: 尾去沢石, e: 轟石, f: 大隅石, g: 荒川石.

が産するとのこと。また、湯河原沸石は、日本地質学会が選定した「県の石」で、神奈川県「県の鉱物」に選定されています (<http://geosociety.jp/name/content0144.html>, 閲覧日: 2023年2月6日)。

なお、地質標本館に展示しているものは、静岡県田方郡土肥町(現伊豆市)のもので(第1図b)。

第一文献: Sakurai and Hayashi (1952)

3.3 神岡鉱 (Kamiokite) かみおかこう



模式地: 岐阜県吉城郡神岡町(現飛騨市)神岡鉱山

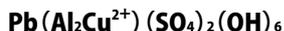
産状, 特徴など: 神岡鉱山は、岐阜県神岡町にあった、日本最大の鉛・亜鉛鉱山です。鉱床は、飛騨片麻岩中の石灰岩が交代作用を被ったスカルン鉱床で、鉛、亜鉛、銀などを産出していましたが、2001年6月に採掘が終了しました(地学団体研究会地学事典編集委員会(編), 1983; <https://www.mitsui-kinzoku.com/nobel/page-01/>, 閲覧日: 2023年2月7日)。現在は、ニュートリーノ観測のための施設であるカミオカンデ、スーパーカミオカンデが設置されていることでも有名です (<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>, 閲覧日: 2023年2月8日)。

神岡鉱は、地質調査所の佐々木昭ほかによって、神岡鉱山の中の小規模な輝水鉛鉱(Molybdenite, MoS_2)を含む、石英を主体とする鉱脈から発見されました(Sasaki *et al.*, 1985)。最大で3mmの大きさで、六角形の外形を持つ、粒状から卓状の、黒い不透明鉱物として産します(第1図c)。

なお、櫻井ほか(1952)によって報告された、神岡石(Kamiokalite)は、後に亜鉛に富むベゼリ石(Veszelyite)であることがわかっており、神岡鉱とは別のものです(Sasaki *et al.*, 1985)。

第一文献: Sasaki *et al.* (1985)

3.4 尾去沢石 (Osarizawaite) おさざわせき



模式地: 秋田県鹿角市尾去沢鉱山

産状, 特徴など: 尾去沢鉱山は、秋田県鹿角市にあり、和銅年間(708-715年)に発見されたともいわれている鉱脈型の銅鉱床を採掘していた鉱山で、別子銅山、足尾銅山と並ぶ日本屈指の銅山でしたが、1978年に閉山となり、現在は観光施設となっています(日本地質学会(編), 2017; <http://www.osarizawa.jp/>, 閲覧日: 2023年2月8日)。

尾去沢石は、三菱金属鉱業中央研究所の田口靖郎によって、尾去沢鉱山の酸化帯の鉛-亜鉛-銅を含む鉱脈から発見されました(Taguchi, 1961; 宮島, 2001)。酸化帯は主

として硫酸鉛鉱(Anglesite)、褐鉄鉱(Limonite)からなり、様々な二次鉱物を伴います。尾去沢石は、これらの鉱物の間の表面を覆って、あるいは割れ目や空洞部に、粉体状あるいは土壌状に産します。このため、尾去沢石だけで鉱脈をなしたり集合体をなしたりすることはありませんが、特徴的な黄緑色を呈することで見分けることができます(第1図d)。

第一文献: Taguchi (1961)

3.5 轟石 (Todorokite) とどろきせき



模式地: 北海道余市郡赤井川村轟鉱山

産状, 特徴など: 轟鉱山は、北海道の小樽市南に位置する赤井川村にかつてあった、鉱脈型の金・銀鉱床を採掘していた鉱山で、比較的多量の方解石、マンガン鉱物及び若干の銅、鉛、亜鉛の硫化鉱物を伴います(米田, 1981)。浦島(1993)によれば、1992年3月31日時点で金5.9トンを生産していました。

轟石は、北海道大学の吉村豊文によって、轟鉱山内の鉱脈の一つである秀越鍾しゅうえつしゅうから発見されました(Yoshimura, 1934)。この鉱脈は、様々なマンガン鉱物に富んでいることが特徴で、その中に、轟石は非常に細かな繊維状(長さ0.05mm以下)の鉱物として産し、スポンジとっていいような集合体をなしています。

なお、地質標本館に展示しているのは、静岡県賀茂郡松崎町の池城鉱山のもので(第1図e)。

第一文献: Yoshimura (1934)

3.6 大隅石 (Osumilite) おおすみせき



模式地: 鹿児島県垂水市咲花平さくかへら

産状, 特徴など: 大隅石は、桜島の東側に位置する、垂水市に分布する火山岩中から、東京大学の都城秋穂によって発見されました(Miyashiro, 1956)。この火山岩は、含黒雲母流紋岩-デイサイト(rhyodacite)で、斜長石、石英、直方輝石、黒雲母、磁鉄鉱などを斑晶として含んでいます。大隅石は、火山岩中の空隙が多いところでは自形結晶として産し、鱗珪石(Tridymite)、石英などを伴い、数mm以下の大きさで、黒く柱状もしくは卓状の結晶で産します。また、他形結晶が火山岩の石基部に産します。ちなみに、咲花平は、現在桜島・錦江湾ジオパークエリアの名所の一つとして位置付けられています (<https://www.sakurajima-kinkowan-geo.jp/topics/6964/>, 閲覧日: 2023年2月8日)。

Miyashiro (1956) 以前から、一軸性正の光学性を示す「堇青石 (Cordierite)」が火山岩中に産することが知られており(普通の堇青石は二軸性負の光学性)、それについて詳細に調べた結果、まったく別の鉱物である大隅石の発見につながったものです。ただし、宮島(2001)によれば、日本地学研究会代表の益富寿之助は、以前からこれが堇青石ではないことを指摘していたとのこと。

なお、地質標本館に展示されているのは、鹿児島県隼人町(現霧島市)浜ノ市産のもので(第1図f)。

第一文献: Miyashiro (1956)

3.7 荒川石 (Arakawaite) あらかわせき



模式地: 秋田県仙北郡荒川村(現大仙市協和荒川)荒川鉱山

産状, 特徴など: 荒川鉱山は、1700年(元禄13年)に発見されて以来開採が進められ、1896年には三菱合資会社(のちの三菱鉱山株式会社)の経営となりました。1908年には産銅量が約750トンに達し、1910-1935年ごろ全盛期を迎え、本邦有数の銅鉱山となりましたが、1940年に休山となりました(吉川・土谷, 1994; https://www.city.daisen.lg.jp/docs/2020122100042/file_contents/kyouwa.pdf, 閲覧日: 2023年2月8日)。

荒川石は、1921年に三菱合資会社の若林彌一郎らによって、荒川鉱山の支山であった日三市^{ひさいち}鉱山から発見された、青緑色の磷酸亜鉛銅鉱物に対して名づけられたものです(若林・駒田, 1921)。この時点でもすでにべゼリ石との類似性には気が付いていたようですが、大橋(1924)は明確に同一物であることを指摘しており、Veszelyiteの和名として荒川石を充てることを提案しています。IMAのリストでもArakawaiteの項はなく、現在では有効ではない鉱物名となっていますが、過去の発見・命名の経緯を踏まえた上で、地質標本館の展示では旧名が併記されています(第1図g)。偶然ということなのか、神岡石も荒川石も、その正体はべゼリ石だったことになります。

4. おわりに

以上挙げた鉱物は、地質標本館の展示スペースに展示されている鉱物標本のほんの一部です。地質標本館には、それ以外にも多数の鉱物、さらには岩石・化石標本や最新の研究の成果物・解説が展示されています。これらは、すべて産総研地質調査総合センターの研究成果を示すものと言えます。

地質標本館所蔵・展示の標本に関しては、これまでも佐脇(2021a, b)及びそこに引用した各種文献によって、たびたび解説・紹介されてきました。また、「地質標本鑑賞会」(<https://www.gsj.jp/Muse/hyohon/>, 閲覧日: 2023年1月31日)でも標本画像の一部を見ることができます。展示方法は随時変わっていますので、過去の資料公表時の状況とは違っていることもありますが、できれば各資料を事前に読んでいただき、そのうえで地質標本館の展示を見ていただければ、より深く理解していただけるかと思えます。

文 献

- Carlson, E. T. (1964) Hydrothermal preparation of a gehlenite hydrate. *Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry*, **68A**, 449-452.
- 地学団体研究会地学事典編集委員会(編)(1983)増補改訂 地学事典(改訂版第3刷). 平凡社, 東京, 1612p.
- Editorial Committee for "Introduction to Japanese Minerals" (1970) *Introduction to Japanese Minerals*. Geological Survey of Japan, 208p.
- Henmi, C., Kusachi, I., Henmi, K., Sabine, P. A. and Young, B. R. (1973) A new mineral bicchulite, the natural analogue of gehlenite hydrate, from Fuka, Okayama Prefecture, Japan and Carneal, County Antrim, Northern Ireland. *Mineralogical Journal*, **7**, 243-251.
- 松原 聡(2009)日本の鉱物. 増補改訂フィールドベスト図鑑14, 学習研究社, 東京, 268p.
- 松原 聡(2018)日本産鉱物種 第7版, 鉱物情報. 東京, 155p.
- 宮島 宏(2001)日本の新鉱物 1934-2000. 松原 聡監修, フォッサマグナミュージアム, 糸魚川市, 124p.
- Miyashiro, A. (1956) Osumilite, a new silicate mineral, and its crystal structure. *American Mineralogist*, **41**, 104-116.
- 日本地質学会(編)(2017)日本地方地質誌2 東北地方. 朝倉書店, 東京, 693p.
- 大橋良一(1924)大屯硫黄・荒川石・及び石川石に就て. *地質学雑誌*, **31**, 166-170.
- Sakurai, K. and Hayashi, A. (1952) "Yugawaralite", a new zeolite. *Science Reports of the Yokohama National University, Sec. II*, no. 1, 69-77.
- 櫻井欽一・長島秀夫・反田栄一(1952)本邦産鉱物の研究

47. 岐阜県神岡鉱山産：磷酸亜鉛銅鉱物（神岡石）。
趣味の地学, 5, 170-175.
- Sasaki, A., Yui, S. and Yamaguchi, M. (1985) Kamiokite, $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$, a new mineral. *Mineralogical Journal*, 12, 393-399.
- 佐脇貴幸 (2021a) 地質標本館での日本人名由来鉱物の展示. GSJ 地質ニュース, 10, 179-193.
- 佐脇貴幸 (2021b) 地質標本館での日本人名由来鉱物の展示 (補遺). GSJ 地質ニュース, 10, 306.
- Taguchi, Y. (1961) On osarizawaite, a new mineral of the alunite group, from the Osarizawa mine, Japan. *Mineralogical Journal*, 3, 181-194.
- 浦島幸世 (1993) 金山 鹿児島は日本一. 春苑堂出版, 鹿児島市, 227p.
- 若林彌一郎・駒田亥久雄 (1921) 秋田縣^{ヒサイチ}三菱日三市鑛山の磷酸亜鉛銅鑛物. 地質学雑誌, 28, 191-211.
- 米田哲朗 (1981) 北海道轟鉱山の金銀鉱床の鉱石. 日本鉱業会誌, 97, 71-76.
- 吉川敏之・土谷信之 (1994) 刈和野地域の地質, VII. 応用地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 61-65.
- Yoshimura, T. (1934) "Todorokite", a new manganese mineral from the Todoroki mine, Hokkaido, Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido Imperial University, Series IV, Geology and Mineralogy*, 2, 289-297.
- 追記:** 小論投稿後に, 北海道石 (Hokkaidoite, $\text{C}_{22}\text{H}_{12}$) が発見されていたことがわかった (IMA 2022-104, CNMNC Newsletter 71, 2023).

SAWAKI Takayuki (2023) Minerals named after places in Japan, exhibited in the Geological Museum.

(受付: 2023 年 2 月 10 日)

天変地異の地球学 巨大地震、異常気象から大量絶滅まで

藤岡換太郎 [著]

講談社ブルーバックス
発売日：2022年8月18日
定価：1,100円（税込み価格）
ISBN：978-4065290989
11.2 cm x 17.3 cm x 1.2 cm
240 ページ



日本の地球物理学の創始者であり随筆家でもあった寺田寅彦は、「天災は忘れた頃にやってくる。」という有名な言葉を残している。この言葉は2つの意味を持つと考えられる。一つは、文字通り天災は繰り返して起こること、もう一つは“天災は忘れた頃、即ち人の一生に一度ほどのタイムスパン(概ね50～100年)で発生し、この間に人は忘却してしまうので注意喚起が必要だ。”という警鐘の意図であろう。

近年、台風やハリケーンの巨大化、洪水もしくは干ばつといった異常気象が世界各地で多発している。その原因の多くは、人類が大気に放出し続けた二酸化炭素等による地球規模の温室効果(温暖化)の影響と見るのが一般的な見方であろう。我が国においても、台風等の豪雨による洪水災害や土砂災害は毎年のように場所を変えながら各地で頻発しており、この状況が今後も続くとなると、最早国家として存亡の危機にあるようにすら思える。それに加え、元来我が国は4枚のプレートが会合する変動地域に位置するため、世界有数の地震津波災害や火山災害の発生リスクの高い点も留意すべきであろう。しかしながら、何故日本列島にはこれほど多様な自然災害が集中して発生するのだろうか？

一方、地球誕生後の46億年に渡る地球史を紐解いてみると、我々人類が経験したことの無い大規模な地殻変動や地球規模の異常気象が繰り返して起こっていたことが知られている。例えば、白亜紀には大量の玄武岩が洪水のように一挙に噴き出し南太平洋に巨大海台ができ、海洋無酸素事変が起こったことが知られている。また原生代の初期と末

期には地球全体が凍りつき全球凍結(スノーボールアース)になったことも判明している。この間に、地球に生息していた生物は何度も大量絶滅を繰り返してきたのである。もちろん、これらの事象は我々人類が誕生する遙か昔の話なので厳密には天災とも自然災害とも言いがたいが、地球環境を大きく変えるような大規模な天変地異であったことは間違いない。藤岡換太郎さん(元海洋研究開発機構)は、このような地球史に刻まれる代表的な天変地異について、まずこれまでの研究を丁寧にレビューした上で、特にその要因とサイクルに関して著者の提唱する空想地球科学の手法を用いて謎解きを試みた。今回出版された藤岡さんの新書は「天変地異の地球学 巨大地震、異常気象から大量絶滅まで」と題されており、目次は以下の通りである。本文は6章からなり、各章末に4つのキーワードを解説するコラムが添付されている。

はじめに

序章 天変地異とは何か

第1章 人類が経験した天変地異

第2章 空、海、陸と天変地異

第3章 生物を襲った天変地異

第4章 究極の天変地異

終章 銀河と天変地異

おわりに

参考図書

索引

本書を通じて、藤岡さんは地球上で発生する天変地異の発生要因を、内因的過程(内因)と外因的過程(外因)の2つに大きく分けて解説している。内因とは「地球システム」の中に潜む要因である。内因に伴う天変地異は、主に超大陸の離合集散、即ち、大陸を載せたプレート運動に起因するとされる。そしてプレート運動はマントルに起こるスーパープルームに由来することから、プルームテクトニクスこそが「地球システム」の天変地異の根本的な要因であると論じている。その発生サイクルについても、超大陸の離合集散、海洋無酸素事変、氷室期と温室期の繰り返し、スノーボールアース等の地質時代の大規模な天変地異を個々にレビューした上で、ウィルソン・サイクル(超大陸の離合集散サイクル)と同じ3億年と見積もっている。

一方外因とは、地球外の天の川銀河と太陽系から構成される「宇宙システム」の中に潜む要因とされる。地球を含めた太陽系は円盤状の天の川銀河を約2億5000万年かけて公転している。天の川銀河は恒星が密集する4本の腕からなるが、太陽系がこの中を通過する際に、地球を含む太陽系の惑星が受ける影響はとて大きいと推測されるのである。例えば、地球史における巨大隕石や彗星の地球への落下はその代表例である。著者はこのような外因による天変地異の発生サイクルを約3千万年と見積もっている。藤岡さんの空想地球科学はさらに発展していくのだが、それについてはぜひ本書を読んでご確認頂きたい。

藤岡さんはこれまで講談社ブルーバックスに6冊の新書を発表されてきたが、そのうち4冊を私がGSJ地質ニュースの読者向けに紹介してきた経緯がある(七山, 2015, 2018a, b, 2020)。これらの新書にも共通して、プルーム仮説、即ち“マントルの対流→スーパープルームの発生→中央海嶺からの大量のマグマの噴出→プレートの移動→超大陸の離合集散→生物の大量絶滅や海洋無酸素事変などの天変地異”という地球システムに関する記述があり、本書で示された内因に関する主張は、これまでのプルーム仮説の延長上にあると思う。

私がこの新書を完読したうえで、少し疑問に感じたことが一点ある。本書の冒頭に触れられているように、近年、地球的な規模で台風やハリケーンの巨大化、洪水もしくは干ばつといった自然災害が世界各地で多発している。その原因の多くは、“地球規模の温暖化の影響、即ち人類が二酸化炭素を人為的に大気へ放出したことにより地球システムに異常をきたしている為”と考えられている。もちろん悠久の地球史を振り返ってみると、大規模な火山噴火によって大気中の二酸化炭素濃度が高くなり、海洋無酸素事

変や生物の大量絶滅などが何度も繰り返し起こってきたことはよく知られてはいる。しかし現況の地球温暖化によって引き起こされている諸々の現象の根本原因は内因・外因とは関わらない我々人類によって引き起こされた不可逆な事象であって、この視点からは純然たる自然災害とは言いがたい。むしろ「人因」と見るのが正しいと私は思う。

例えば、2021年7月3日に静岡県熱海市の伊豆山地区で発生した土石流災害について振り返ってみても、まず土石流発生のトリガーとなった集中豪雨は、地球温暖化によって引き起こされた現象である。それと同時に、そもそも逢初川の谷頭に人工的な盛り土を異常な高さにまで盛ったこと、それを行政がちゃんと管理してこなかったことが、下流域に更なる大きな被害をもたらした要因であったことが静岡大学ほか各機関の調査報告で明らかになっている。この視点から判断するならば、熱海市の土石流災害は、かなりの部分で「人因」によるものと判断されよう。

ここで藤岡さんを見習って、私も少しだけ「人因」に関する空想地球科学を実践してみたいと思う。藤岡さんが巻末にもお書きになっているように、約2000年後には次の氷期が訪れ、かつての石器時代のような激寒の時代となることも予想されている。その頃には現況の温暖化の影響は相殺されるとの考え方もあり得るが、それまでの間に地表は人類の滅亡が避けがたいほどの厳しい環境に成り果てていると私は思う。但し、もし仮にこの過酷な時代まで人類が生き延びられたとした場合には、内因である異常気象現象の回避や地震や火山の活動などの予測や制御など地球環境のコントロールが可能になり、その一方で、外因である隕石や彗星の大気圏突入を事前に阻止できる様々なハイテクが確立された画期的な時代を迎えているのかも知れないし、その時代の人類が内因や外因による災害発生をコントロールできているのであれば、もはや天変地異(自然災害)が起こらない静穏な時代が訪れていると思う。

本稿の結びとして、今回のこの新書のタイトルには、天変地異、巨大地震、異常気象という自然災害をイメージするキーワードが並べられてはいるが、元来藤岡さんは自然災害や防災・減災分野の研究者ではないし、本書でも自然災害や防災・減災について論じているのは僅かである。むしろ地球史における自然災害や地質イベントの要因とその発生サイクルに関する独自の地球科学的な解説が主要な論旨と言える。この際、藤岡さんが既存の研究成果を検証して、空想の中で謎解きを行っていくストーリー展開が面白く、読者を引きつける独自の世界観がある。これについては、著者が前回ブルーバックスシリーズの新書として発表



された「見えない絶景 深海底巨大地形」の記述にも通じるものがあり、著者の豊富な深海調査の経験に基づく独自の視点があるように思える。全文を通して解りやすく優しい語り口で書かれており、一般の方にとって読みやすい文章と思う。ぜひGSJ地質ニュースの読者の皆さまにも、地球科学or地質学の一般普及書(解説書)として、この新書の購読をお薦めしたい。

文 献

七山 太 (2015) <新刊紹介>「川はどうしてできるのか」地形のミステリーツアーによろこそ 藤岡換太郎 著. GSJ地質ニュース, 4, 92-93.

七山 太 (2018a) <書籍紹介>三つの石で地球が分かる—岩石がひもとくこの星のなりたち— 藤岡換太郎 [著]. GSJ地質ニュース, 7, 86.

七山 太 (2018b) <新刊紹介>フォッサマグナ 日本列島を分断する巨大地溝の正体 藤岡換太郎 [著]. GSJ地質ニュース, 7, 332-333.

七山 太 (2020) <新刊紹介>見えない絶景 深海底巨大地形 藤岡換太郎 [著]. GSJ地質ニュース, 9, 265-266.

(産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター /ふじのくに地球環境史ミュージアム 七山 太)

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 宮地良典
副委員長 小松原純子
委員 竹原孝
児玉信介
戸崎裕貴
草野有紀
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 12 巻 第 3 号
令和 5 年 3 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 : TAKEHARA Takashi
KODAMA Shinsuke
TOSAKI Yuki
KUSANO Yuki
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. 12 No. 3
March 15, 2023

Geological Survey of Japan, AIST

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

静岡県最南端, 御前崎の岬先端から見た駿河湾と富士火山

[cover photo](#)



御前崎は南東方向へ突き出る形で伸張した岬であり、東方に駿河湾を、南方に遠州灘を望み、島嶼を除いた静岡県の最南端をなす。駿河湾は御前崎と伊豆半島南端の石廊崎を結んだ線から北側と定義されており、その湾奥には富士火山が立地している。湾の水深は 2500 m にも達し、地形的には駿河トラフ（南海トラフ）の陸側延長部と見てとれる。御前崎一帯は、過去に起こった南海トラフ巨大地震によって地殻変動を繰り返していたことが知られている。岬周辺の浅海域には相良層群（上部中新統）の波食棚が、台地には明瞭な海成段丘が認められており、総じて隆起傾向が継続していることが読み取れる。

（写真・文：七山 太 産総研地質調査総合センター 地質情報基盤センター / ふじのくに地球環境史ミュージアム）

Suruga Bay and Fuji Volcano seen from the tip of Cape Omaezaki in the southernmost tip of Shizuoka Prefecture. Photo and caption by NANAYAMA Futoshi