

栃木県産大谷石（中新世凝灰岩石材）の塩類風化のプロセス

横山俊治¹・藤田勝代¹・加藤孝幸²

¹ 深田地質研究所

² アースサイエンス株式会社

Process of Salt Weathering of Oya Stone (Miocene Tuff) from Tochigi Prefecture, Japan

YOKOYAMA Shunji¹, FUJITA Masayo¹, KATOH Takayuki²

¹ Fukada Geological Institute

² Earth Science Co., Ltd.

要旨：大谷石の採石跡が点在する姿川流域の崖の麓には、硫酸塩鉱物の芒硝石 (Na_2SO_4) や石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) が析出し、塩類風化により侵食地形のノッチが形成されている。大谷石の塩類風化は埋没続成作用による変質鉱物である斜プチロル沸石やスメクタイト、黄鉄鉱が重要な働きをしていることが明らかになった。天水由来の酸化的な地下水が軽石中の空隙や基質の中の気孔に浸透すると、黄鉄鉱が酸化し、非晶質水酸化鉄や針鉄鉱が生成されるとともに硫酸イオンに富んだ酸性地下水を生じた。酸性地下水は斜プチロル沸石やスメクタイトと反応し、Na イオンやCa イオンを溶脱した。春季から秋季にかけては、硫酸イオン、Na イオン、Ca イオンは地下水で下方に運ばれ崖の麓に濃集した。冬季の蒸発環境下では、硫酸イオンがNa イオンやCa イオンで中和されて多量の芒硝石と少量の石膏が崖の麓の壁面に析出した。そのときの結晶成長圧で岩石は剥離し、ノッチに成長した。

キーワード：大谷石、塩類風化、埋没続成作用、芒硝石、石膏、ノッチ

Abstract: The erosion topography notches have been formed on the wall at the foot of cliffs in the Sugata River basin, where Oya Stone quarry sites are scattered, by salt weathering caused by the precipitation of sulfate minerals such as thenardite (Na_2SO_4) and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). It is clear that alteration minerals by buried diagenesis, such as clinoptilolite, smectite and pyrite, play an important role in the salt weathering of the Oya Stone. When oxidizing groundwater derived from natural water percolates into the interstitial voids in pumice and vesicles in the matrix, pyrite is first oxidized to form amorphous iron hydroxide, goethite and acidic groundwater rich in sulfate ions. This acidic groundwater reacts with clinoptilolite and smectite and leaches out Na and Ca ions. From spring to fall, most sulfate, Na, and Ca ions are transported downward by groundwater and concentrated at the foot of the cliff. During the winter evaporation, the sulfate ions are neutralized by Na and Ca ions, and large amounts of thenardite and small amounts of gypsum are deposited on the wall at the foot. The rock is exfoliated by the crystal growth pressure at that time, and notch has grown.

Keywords: Oya Stone, salt weathering, buried diagenesis, thenardite, gypsum, notch

1. はじめに

塩類風化とは、岩石中の空隙を移動している溶液が蒸発して溶存物質が析出し、その際生じる結晶成長圧によって周辺の岩石を破壊していく現象で、物理的風化作用の一つに分類されている(松倉, 2008, 2017). 塩類風化による岩石の破壊で作られた侵食地形としてタフォニやノッチが知られている(西山ほか, 2009; 西山ほか, 2017; 小林ほか, 2017; 西山, 2018).

栃木県宇都宮市の中心部から北西約 7km に位置する宇都宮市大谷町には、約 1500 万年前(中新世)に噴出した大谷層の軽石凝灰岩(高橋・吉川, 2008)が広がり、標高 100 ~ 190m の平坦な山頂を持つ丘陵を形成している. その丘陵を開析する姿川流域の急崖にも、タフォニやノッチが発達している(横山ほか, 2020). この軽石凝灰岩の石材名が大谷石である. 大谷石で特に注目されるのは崖の麓にノッチが広く分布していることと、遠くからでもその存在が分かるほど、塩類風化の証拠と考えられている白色析出物が急崖の麓に付着していることである(図 1).

本論文では、白色析出物の野外での観察、石材の実体顕微鏡観察、岩石薄片の偏光顕微鏡観察、そして XRD 分析(X 線粉末回折法)による鉱物種の同定などの結果を総合して、塩類の生成過程である化学的風化作用から塩類の結晶成長圧による岩石破壊である物理的風化作用、その結果としてノッチが形成されるまでの塩類風化のプロセスを明らかにする.

なお、実体顕微鏡は Nikon 社製 SMZ-U を用い、偏光顕微鏡は Nikon 社製 ECLIPSE LV100POL と Nikon 社製 OPTIPHOT2-POL を用いた. XRD 分析(X 線粉末回折法)では、島津製作所製 XRD6000 型 X 線回折装置を用い、X 線管球:



図 1 姿川沿いの崖の麓に発達するノッチと白色析出物の分布図.

Cu 対陰極, カウンタモノクロメータ: 使用, 管電圧: 30kV, 管電流: 20mA, スリット系: $1^{\circ} - 0.3\text{mm} - 1^{\circ}$, 走査速度: $2^{\circ}/\text{min}$, プリセットタイム: 1.5sec, 不定方位試料の走査範囲: $2\theta = 2 \sim 65^{\circ}$ で実施した.

2. 調査地の地質

調査地は、平和観音が建っている姿川右岸の大谷公園(採石跡地)から道路を挟んで向かいに位置する大谷寺を経て、姿川を北に遡り、姿川右岸沿いの大谷景観公園から乙女橋を渡って大谷石資料館に至る地域、および乙女橋から姿川をさらに遡って、越路岩に至る地域である(図 1).

相田・酒井(2018)による大谷石の地質学的層序によれば、調査地には、IV層が広く分布し、IV層の下位層にあたるV層の上部が一部に露

頭している。IV層は、基質が中～粗粒で、10～20mmの軽石を多く含む軽石凝灰岩で、中～大のミソと2mmの岩片を含むとされている。V層の上部は、岩片を多く混入し、全体に硬質なミソを含有する軽石凝灰岩を主体とし、一部に生物擾乱を示す生痕を挟在しているとされている。ミソとは黒褐色～茶褐色を呈する長径1～30cmの紡錘形あるいは球形の軽石である（図2）。

大谷石の岩相は塊状・無層理であるが、石工が「通し」と呼んでいる長径10～30cmのミソの集合体が層状に配列している。図2に見られるように、ミソは縦横に走る開口亀裂が発生し、亀裂に沿って崩れている。その結果、崖の露頭では、ミソの部分が失われ、孔だけの配列になっていることが少なくない。調査地では、通しは大谷層の



図2 開口亀裂が縦横に走る紡錘形のミソ。



図3 大谷石の地質構造を反映した通しの走向・傾斜。

堆積構造を反映したもので、数度から10度前後の角度で東南東方向に傾斜している（図3）。

3. 大谷石の岩相と構成鉱物

大谷石には、茶褐色軽石（ミソ）のほかに、青緑色軽石や白色軽石が含まれている（図4）。白色軽石は、単独で産するもののほかに、ミソや青緑色軽石の外側を取り巻いているものがあるが、色が異なるだけで一個の軽石であることが偏光顕微鏡観察で確認されている。

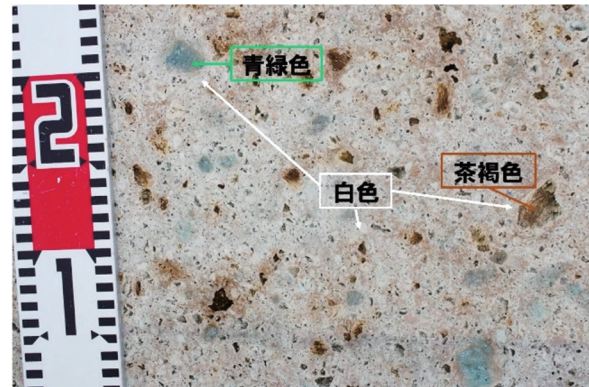


図4 大谷石中の3色の軽石(大谷石石材の近接写真)。

ミソの色の变化について、暗緑色～暗黒色の濃い色を呈しているミソでも、もっとも新鮮なミソを割ると、その内部は、目立った濃青色を呈していることが多い（安藤・岡，1967）。地下採石場の母岩から切り出した新鮮な試料のミソは青緑色から濃青色を呈するが、空气中に放置すると短時間で酸化されて黒色から褐色に変色する（神山ほか，1972）。石材の切断面（清木（2017）の図4）を見ると、採石後1週間以内の水分を含んだ湿潤状態の石材は、青色を帯びた基質の中に濃青色のミソが点在しているが、乾燥するに従って基質は青みを失い、わずかに淡褐色を帯びた灰白色を呈する基質の中に茶褐色のミソが点在している。川崎地質株式会社の大谷石地下資源研究所には、乾

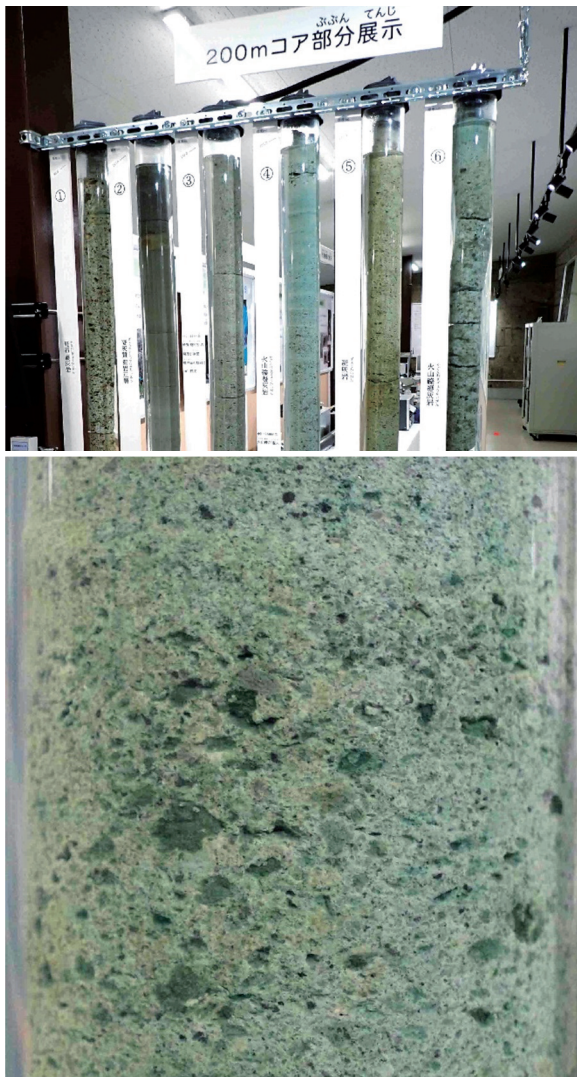


図5 水中の保管で基質が青緑色に保たれているボーリングコア（上：コア展示の様子，下：展示コア④の接写（コア径 66 mm））。

燥して灰白色を呈する多数のボーリングコアのほか、水につけて保管することで、基質が青緑色に保たれているボーリングコアが展示されている（図5）。

偏光顕微鏡で観察すると、大谷石は、石英や斜長石の斑晶の破片のほか、ごく少量の黒雲母、角閃石、単斜輝石、磁鉄鉱の微斑晶を含んでいる。石英は長径 2.0mm 以下の角形～円形の結晶破片で、顕著な波動消光を示す結晶や融食形の結晶がある。斜長石は長径 2.2mm 以下の角形の結晶破

片で、結晶の多くは累帯構造が顕著である。黒雲母は長径 0.2mm 以下の角形結晶で、X' = 淡褐色、Z' = 濃褐色である。角閃石は長径 0.2mm の角形結晶で、X' = 淡褐色、Y' = 緑色である。単斜輝石は長径 0.4mm 以下の角形結晶、磁鉄鉱は長径 0.2mm 以下の角形～亜角形結晶である。

マグマ起源の鉱物のほかに、変質鉱物として、短柱状結晶の斜プチロル沸石や淡褐色～黄褐色の微細なスメクタイト、極微細な黄鉄鉱のほか、クリストバライトや石英などのケイ酸鉱物や、極微細の炭酸塩鉱物、鮮緑色の緑泥石が認められる。なお、不透明鉱物の同定は、薄片の上から光をあて、反射光の色で判断している。磁鉄鉱は灰褐色、黄鉄鉱は黄色（図6）を呈する。軽石においては、斜プチロル沸石は、軽石のガラスを交代するほか、

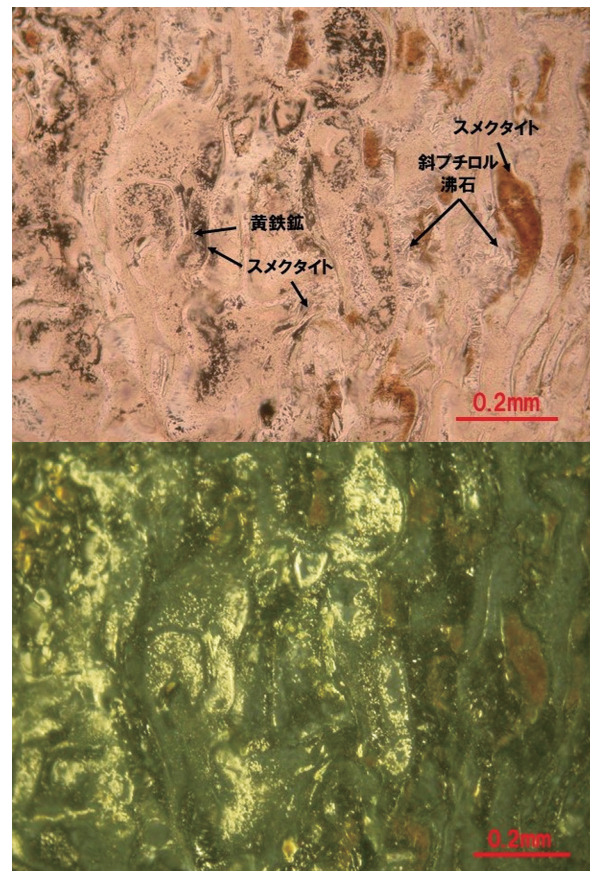


図6 反射光で黄色を呈する黄鉄鉱（上：オープンニコルで撮影した偏光顕微鏡写真，下：反射光で撮影）。

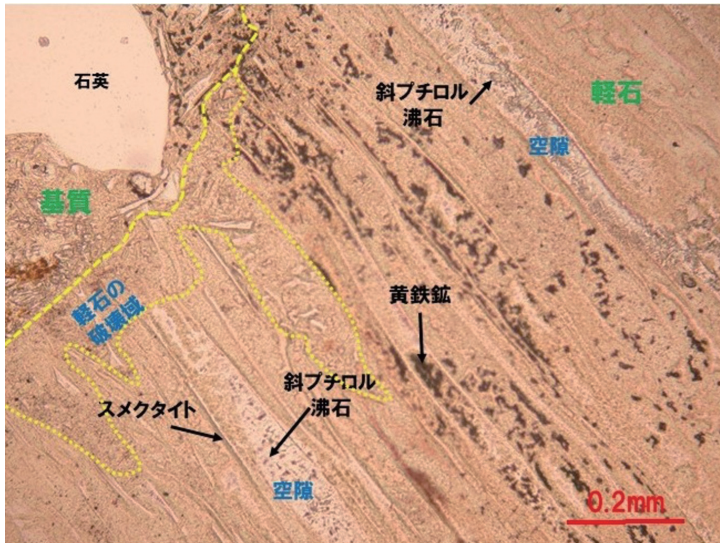


図7 軽石中の変質鉱物の産状（オープンニコルで撮影した偏光顕微鏡写真）.

軽石内に定向配列する空隙(発泡痕)中に晶出している(図7). スメクタイトは、軽石のガラスを交代するほか、軽石内の空隙に平行な割れ目を充填している(図7). 黄鉄鉱は極細粒結晶が集合し軽石のガラスや空隙内に晶出している(図7). 希ではあるが、軽石内の空隙を埋めて、クリストバライトの球状集合体とその周辺に石英が晶出し、さらに球状のクリストバライトの中に斜プチロル沸石、黄鉄鉱が晶出している(図

8). 基質においては、斜プチロル沸石やスメクタイト、黄鉄鉱、ケイ酸鉱物が、それぞれが層をな

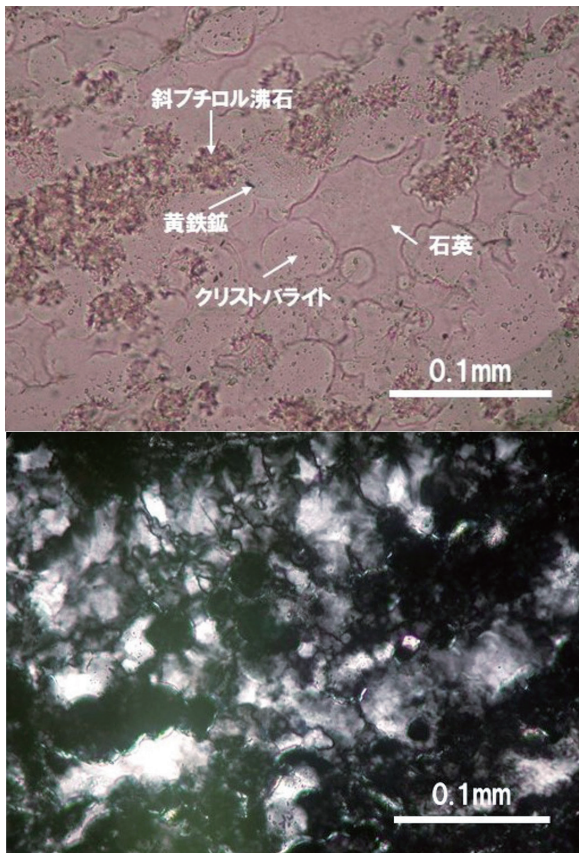


図8 軽石の空隙を充填する球状のクリストバライトほかの変質鉱物（偏光顕微鏡写真, 上: オープンニコル, 下: クロスニコル）.

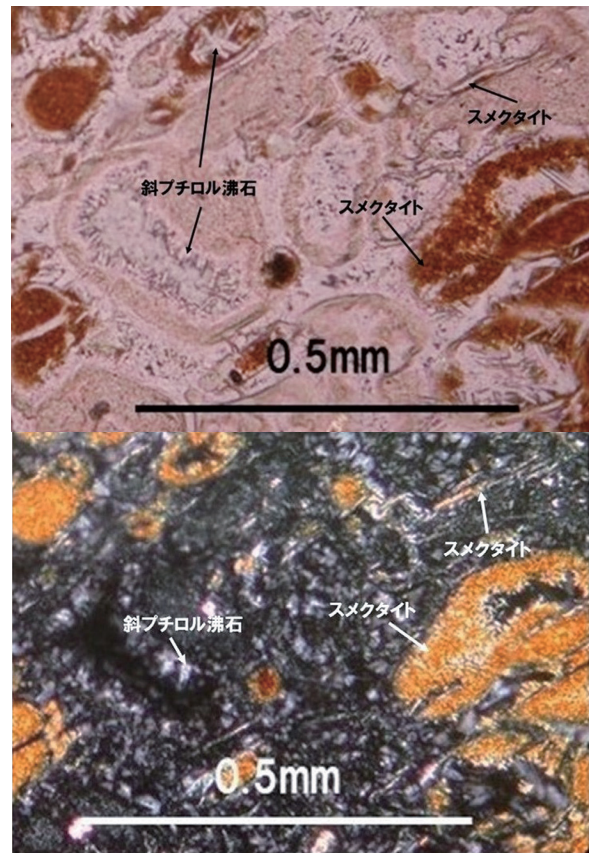


図9 基質の気孔中の変質鉱物の産状（偏光顕微鏡写真, 上: オープンニコル, 下: クロスニコル）.



図 10 球状集合体を形成する鱗珪石.

して気孔（空隙）内を充填している（図 9）. 図 8 と図 9 の変質鉱物の産状は、これらの変質鉱物がほぼ同時に晶出したことを示すとともに、近傍でも地下水の成分が不均質であったことを示している. また、崖の壁面に球状に付着した結晶（図 10）は XRD 分析によって鱗珪石であることが分かった.

偏光顕微鏡観察で確認された大谷石に含まれている岩片は、長径 0.5mm 程度の凝灰岩、玄武岩、片理の発達した泥質岩などであるが、露頭では、長径 10～20cm を越える凝灰質泥岩の岩塊が局所的に含まれている.



図 11 冬季に崖の壁面に析出した白色析出物.

4. 白色析出物の正体

冬季に現地を訪れると、場所によっては、2～3cm の針状結晶が絡み合った白色析出物（図 11）が崖の麓に沿って付着している. 母岩の混入を避けて針状結晶の部分だけを採取し、XRD 分析を行うと、硫酸塩鉱物として極多量の芒硝石 (Na_2SO_4) と少量の石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) に加えて、中量の斜プチロル沸石 ($(\text{Na},\text{K})_6(\text{Al}_8\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) \cdot$

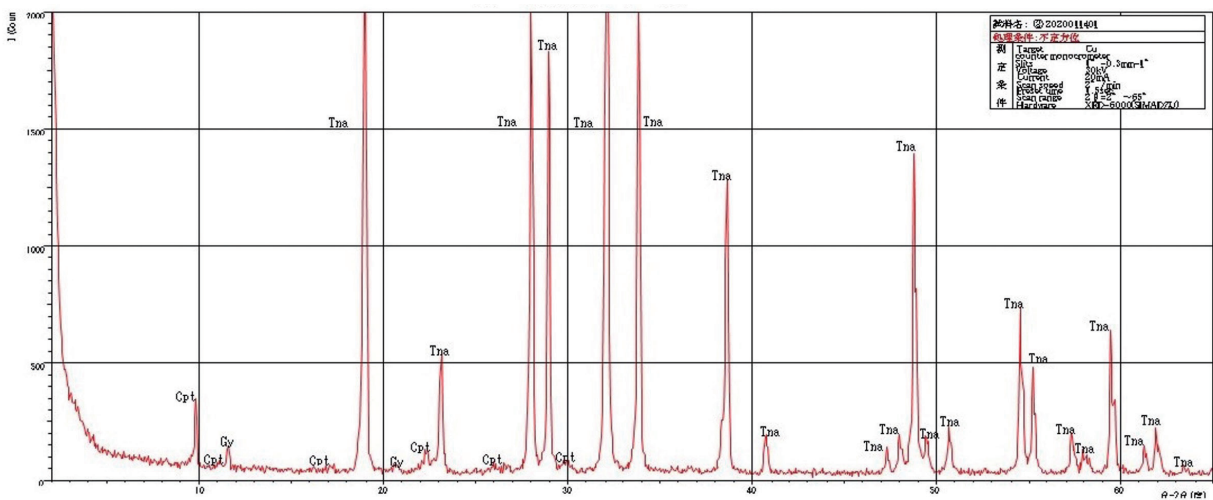


図 12 冬季に析出した白色析出物の XRD チャート Tna : 芒硝石, Gy : 石膏, Cpt : 斜プチロル沸石.

20H₂O) が検出された (図 12). 44℃以上の晶出温度が必要な斜ブチロル沸石 (大久保・洲崎, 2005) が冬季に析出した白色析出物に含まれていた理由は不明である. 硫酸塩鉱物は冬季の乾燥環境のもとで析出するが, 析出量が多い芒硝石が水に溶けやすいために, 春になると芒硝石は溶解し, 白色析出物の量は著しく減少する. このような白色析出物の季節的消長は地元住民によって毎年観察されている.

塩類風化のプロセスを解明するには, 硫酸塩鉱物を構成する硫酸イオン (SO₄²⁻), Na イオン, Ca イオンの発生源の鉱物を明らかにする必要がある.

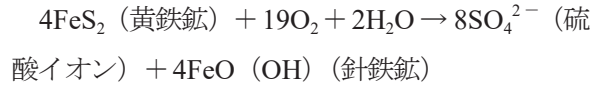
5. 硫酸イオンの発生に関わった鉱物

まず硫酸イオンの発生に関わった鉱物の特定が必要である. これまでも硫酸イオンの発生源として黄鉄鉱に期待している論文はあるが, 黄鉄鉱の産状や成因に関する記載はない. 大谷石の軽石の空隙や基質の気孔には多量の黄鉄鉱が晶出している. 空隙や気孔に沿って浸透した地下水によって黄鉄鉱が酸化すると, 硫酸イオンが発生する. XRD 分析によって, 崖を流れた表流水の跡



図 13 崖の上部から壁面に沿って付着する黒い物質の産状.

に付着した黒い物質 (図 13) から針鉄鉱が検出されている. 硫酸イオンと針鉄鉱が黄鉄鉱の酸化で形成されたとすると, このときの化学反応は次のように考えられる:



6. Na イオンと Ca イオンの発生に関わった鉱物

Na イオンや Ca イオンの発生源となった鉱物を特定することは難しいが, 石材表面の実体鏡観察で観察された青緑色軽石やミソの表面が, 硫酸

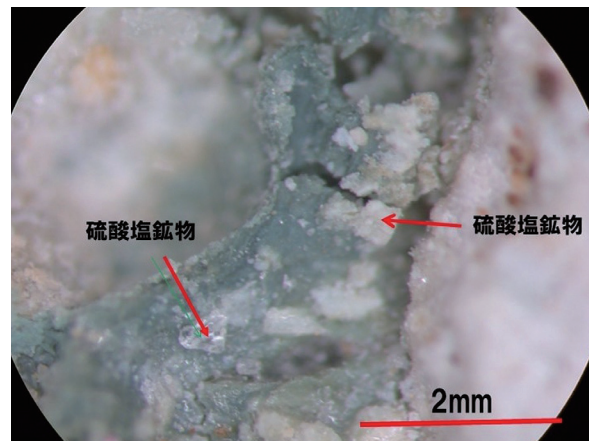


図 14 溶食された青緑色軽石の孔とそこに析出する硫酸塩鉱物.

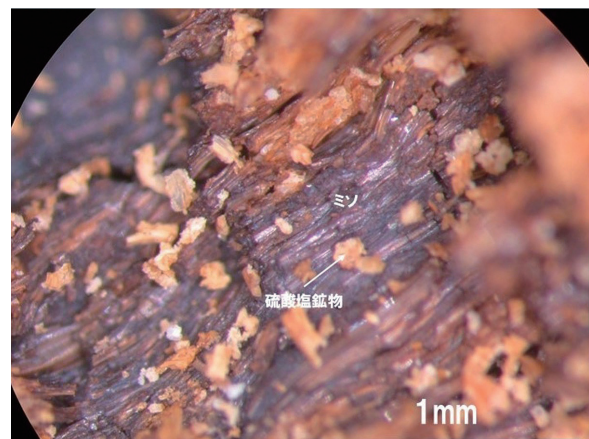
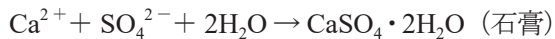
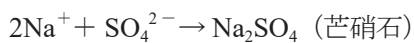


図 15 溶食されたミソの表面に析出する硫酸塩鉱物.

イオンを含む地下水によって溶食され、そこに塩類風化による硫酸塩鉱物と思われる白色鉱物が生じている事実（図 14, 15）から、軽石中に発生源の鉱物が存在すると予想される。その際、黄鉄鉱の近傍に存在した斜プチロル沸石やスメクタイトが発生源になる可能性が高いと考えられる。Na イオンや Ca イオンと硫酸イオンとの化学反応による硫酸塩鉱物の析出は次のように考えられる：



7. 考察

7.1 大谷石の変質鉱物の生成と風化作用による変化

大谷石の変質鉱物の生成は、グリーンタフ変動のマグマ活動による熱水変質時、それに続く埋没続成作用時、隆起後の地表付近の風化作用の 3 時期が想定される。

熱水変質後、軽石凝灰岩は、温度の低下とともに、アルカリ性環境の下で進行した埋没続成作用によって、斜プチロル沸石やスメクタイト、黄鉄鉱、ケイ酸鉱物（クリストバライトや石英など）、炭酸塩鉱物を生成した。論文によって異なるが、それらをまとめると、斜プチロル沸石の生成温度は低温側が 44～69℃、高温側が 76～117℃である（大久保・洲崎, 2005）。埋没続成作用の過程で高温化するようなことがあれば、緑泥石が生成されるが、大谷石には高温化の証拠はない。そこで緑泥石はマグマ活動直後の熱水変質期に生成したと考えた。緑泥石の多くは、埋没続成作用の過程でスメクタイト化したために、現在ではほとんど観察されない。

酸性環境の下で進行した風化作用で、黄鉄鉱

は酸化し、斜プチロル沸石やスメクタイトは溶脱・分解した。軽石の外縁部では斜プチロル沸石は消滅し、スメクタイトや炭酸塩鉱物は減少している。そして冬季には芒硝石や石膏の硫酸塩鉱物が析出した。

露頭の大谷石は酸化して淡褐色を帯びた灰白色になっている。筆者らが行ったミソの XRD 分析では極多量の斜プチロル沸石と中量のスメクタイトが確認されているが、神山ほか（1972）は、主要構成鉱物がモンモリロナイトであるミソを研究対象に、ミソの色の変化とその原因について次のように述べている：酸素との接触を断たれていると考えられる地下の母岩から採集した新鮮な青緑色の試料では、Fe 成分はほとんど Fe²⁺ であるが、空気中に放置すると短時間のうちに酸化が起きて Fe³⁺ に変化し、青緑色から褐色へと変色する。モンモリロナイトには鉄に富む部分と Al に富む部分があり、Fe²⁺ が Fe³⁺ に変化するのは鉄に富む部分であるとしている。

大谷石はミソだけではなく、石材全体も酸化によって青みを失っている。偏光顕微鏡観察では検出されていないが、軽石のガラスや基質にもスメクタイトの微細な結晶が分布していると推察される。

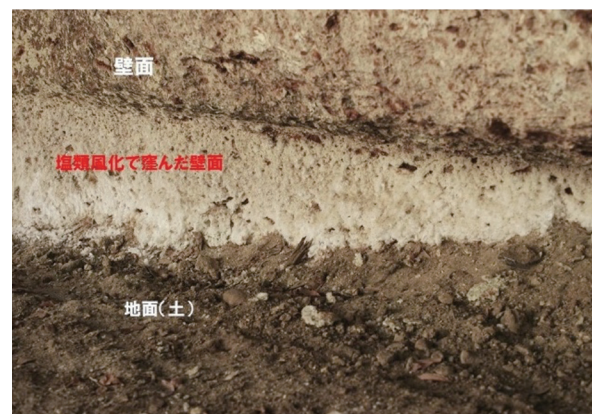


図 16 崖の麓の窪みに析出する多量の白色析出物。

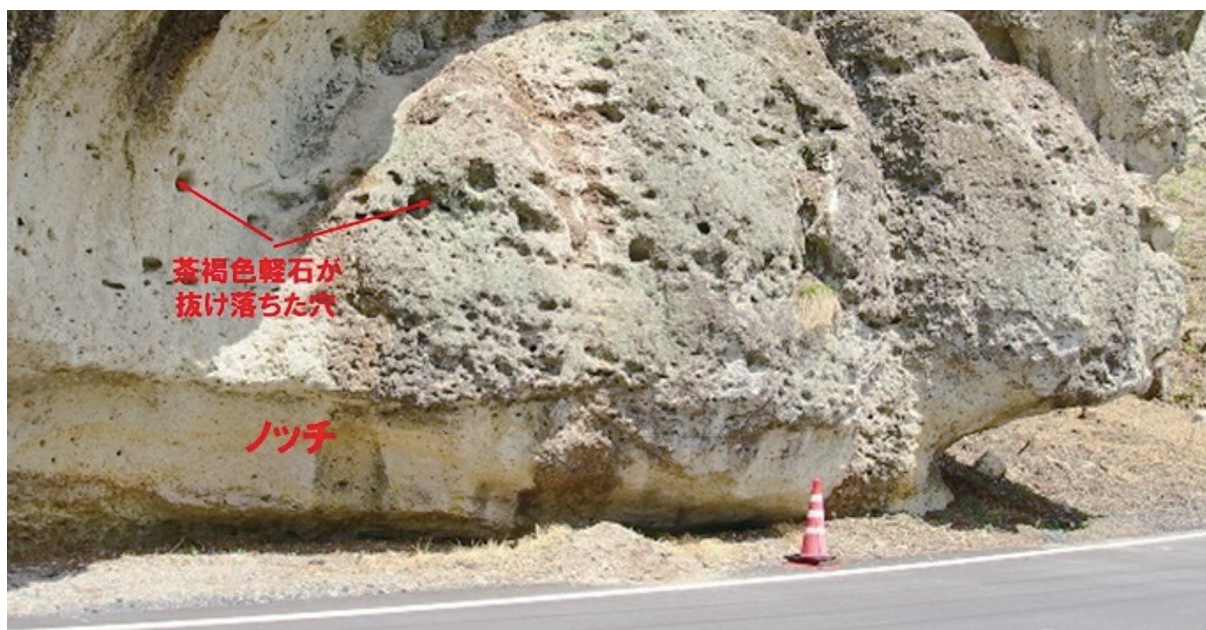


図 17 ノッチに成長した崖の麓の窪み。

7.2 大谷石のノッチ形成に至るまでの塩類風化の全プロセス

天水由来の酸化的な地下水が軽石の空隙や基質の気孔に浸透すると、まず黄鉄鉱は酸化され、非晶質水酸化鉄や針鉄鉱を生成するとともに、硫酸イオンに富んだ酸性地下水を生じた。この酸性地下水は、斜プチロル沸石やスメクタイトと反応して、Na イオンや Ca イオンを溶脱した。

春季から秋季には、ほとんどの硫酸イオン、Na イオン、Ca イオンは地下水によって下方に運ばれ、崖の麓に濃集していった。冬季の蒸発環境に置かれると、硫酸イオンは Na イオンや Ca イオンで中和され、多量の芒硝石 (Na_2SO_4) と少量の石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) の硫酸塩鉱物が崖の麓の壁面に析出した。多量に析出した塩類が結晶成長圧による破壊力が大きい芒硝石 (山田ほか, 2005) であったために、岩石は容易に剥離して壁面に窪みを生じた (図 16)。この窪みは次第に大きくなり、ノッチに成長した。しかし、成長したノッチの内壁には白色析出物がほとんど観察さ

れない (図 17)。これはある段階で塩類風化に必要なイオンの供給が減少あるいは停止したことを示している。

大谷石の塩類風化では、最終的な物理学的風化作用に先行して、掘削以前の岩石内部で化学的風化作用が進行した。それによって、変質鉱物の酸化や溶脱が起こり、さらに溶脱時には軽石を溶食した。その結果、岩石の強度は低下し、硫酸塩鉱物の結晶成長圧による崖の壁面での剥離を促進した。

8. まとめ

大谷石を特徴づける侵食地形は塩類風化によるノッチである。本論文では、硫酸塩鉱物の生成過程である化学的風化作用から硫酸塩鉱物の結晶成長圧による岩石破壊である物理的風化作用、その結果としてノッチが形成されるまでの塩類風化の全プロセスを明らかにした。

8.1 化学的風化作用による硫酸塩鉱物の生成

グリーンタフ変動のマグマ活動による熱水変質後、軽石凝灰岩は、温度の低下とともに、アルカリ性環境の下で進行した埋没続成作用によって、斜プチロル沸石やスメクタイト、黄鉄鉱、ケイ酸鉱物（クリストバライトや石英など）、炭酸塩鉱物からなる変質鉱物を生成した。その後、隆起した軽石凝灰岩は、地表付近の酸性環境の下での化学的風化作用が進行した。硫酸塩鉱物を析出した塩類風化においては、斜プチロル沸石やモンモリロナイト、黄鉄鉱が重要な働きをした。

天水由来の酸化的な地下水が軽石中の空隙や基質の中の気孔に浸透すると、まず黄鉄鉱は酸化され、針鉄鉱が生成されるとともに、硫酸イオンに富んだ酸性地下水を生じた。次にこの酸性地下水は、斜プチロル沸石やモンモリロナイトと反応して、Na イオンやCa イオンを溶脱した。

春季から秋季には、ほとんどの硫酸イオンやNa イオン、Ca イオンは地下水によって下方に運ばれ崖の麓に濃集していった。冬季の蒸発環境に置かれると、硫酸イオンはNa イオンやCa イオンで中和され、極多量の芒硝石 (Na_2SO_4) と少量の石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) の硫酸塩鉱物を析出して、崖の麓の壁面に多量の白色析出物を生じた。

8.2 硫酸塩鉱物の結晶成長圧によると物理的風化作用とノッチの形成

芒硝石や石膏の析出時の結晶成長圧が岩石を破壊した。結晶成長圧による破壊力が大きい芒硝石が白色析出物の主体であったために、壁面は容易に剥離して窪みを生じた。この窪みは深くえぐられてノッチに成長した。しかし、成長したノッチの内壁には白色析出物がほとんど観察されない。これはある段階で塩類風化に必要なイオンの供給が減少あるいは停止したことを示している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、現地にお住まいの福田公生御夫妻には、自宅敷地内の白色析出物の季節的消長について有益な情報提供をいただき、白色析出物の採取にご協力をいただいた。宇都宮大学名誉教授の相田吉昭氏、宇都宮大学大学院生（元宇都宮美術館専門学芸員）の橋本優子氏には、現地を案内していただき、大谷石の地質と石材について有益なご意見をいただいた。川崎地質株式会社の大谷石地下資源研究所の所長大村猛氏と技師長野口静雄氏には、多数のボーリングコアを案内していただき、大谷石の岩相についてご教授していただいた。アースサイエンス株式会社の斉藤晃生氏と飯田友章氏には、XRD 分析で、日本薄片株式会社の佐々木克久氏には岩石薄片の作製でご協力を頂いた。以上の方々に感謝いたします。

文献

- 相田吉昭・酒井豊三郎 (2018) : 大谷石の作る景観と地質 大谷層の成り立ちを探访する。石の街うつのみや 一大谷石をめぐる近代建築と地域文化一 (改訂版), 宇都宮美術館, 14–23.
- 安藤武・岡重文 (1967) : 大谷石の地質と採掘に 関連する破壊状況。地質調査所月報, **18**(1), 1–37.
- 神山宣彦・下田 右・須藤俊男 (1972) : Ferrus および ferric モンモリロナイト鉱物の問題。鉱物学雑誌, **10**(6), 517–527.
- 小林 航・浜田昌明・山口弘幸・高山陶子・石神慎太郎・平松良浩 (2017) : 能登半島沿岸の海食崖に分布するタフォニ。地形, **38**(3), 213–233.
- 松倉公憲 (2008) : 地形変化の科学 一風化と侵

食一. 朝倉書店, 242p.

松倉公憲 (2017) : 地形学からみた風化研究の問題点と今後の課題. 地学雑誌, **126**(3), 271–296.

西山賢一 (2018) : 日本における岩石の風化研究の進展と課題. 地質学雑誌, **124**(11), 877–888.

西山賢一・吉田 顕・横田修一郎 (2009) : 和歌山県に分布する中新世凝灰岩の急崖に発達するタフォニの分布と形状. 自然科学研究 徳島大学総合科学部, **23**(3), 44–60.

西山賢一・横田修一郎・長谷川修一・菅原大介 (2017) : 火山角礫岩からなる急崖に発達するノッチ・タフォニの形成プロセスと岩盤崩壊との関係. 地学雑誌, **126**(4), 425–437.

大久保 進・洲崎照夫 (2005) : 石油探鉱の視点からみた碎屑岩の続成作用, 鉱物温度計および孔隙の変化. 地球科学, **59**, 237–246.

清木隆文 (2017) : 大谷石の紹介. 材料, **66**(11), 793–798.

高橋雅紀・吉川敏之 (2008) : 第三系 宇都宮地域. 日本地質学会編, 日本地方地質誌 3 関東地方, 朝倉書店, 234–241.

山田 剛・青木 久・高橋 学・松倉公憲 (2005) : 塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験. 応用地質, **46**(2), 72–78.

横山俊治・藤田勝代・加藤孝幸・斉藤晃生 (2020) : 大谷石の塩類風化の特徴とタフォニ・ノッチ・壁面崩壊の形成機構, 日本応用地質学会令和2年度研究発表会講演論文集, 171–172.