

微量な方解石セメントを持つアレナイト質砂岩の風化メカニズム

Weathering mechanism of arenite sandstone with sparse calcite cement

松澤 真

Makoto MATSUZAWA

要旨

方解石セメントを微量に含むアレナイト質砂岩の風化帯を鉱物、化学、物理学的性質の面から多面的に分析した。調査対象としたのは、白亜系和泉層群の砂岩主体の砂岩・泥岩互層である。調査の結果、風化メカニズムは連鎖的なものであり、風化初期に方解石セメントの溶解に伴って粒子間が開口することが最も重要であり、その後は粒子間の間隙が連結・拡張して砂岩の砂粒子が分離していくことが主たる風化作用であることがわかった。この初期の方解石の溶解には、砂岩中に含まれる黄鉄鉱の酸化による硫酸が重要な役割を果たす。方解石の溶解とともに緑泥石も分解するが、その鉄は、間隙水が酸性水に置き換わってから失われる。

続成作用の進んだ砂岩は、緻密で硬質であるため風化しにくく、厚い風化帯を形成することはないと考えられていたが、微量な方解石セメントを持つアレナイト質砂岩は、30 mもの深さまで風化によって粒子に分離し、また、表層部ではクリープに伴って細粒分が流失し、崩壊しやすい脆弱な土層を形成する事が明らかになった。

Abstract

Multifaceted analyses of the weathering zones of arenite, containing a minute amount of calcite cement, have been performed based on mineralogical, chemical, and physical properties. The survey targeted sandstone with mudstone interbeds belonging to the Cretaceous Izumi Group. The survey revealed that the weathering mechanism is a chain reaction; the most important process is the pore opening between the grains caused by the dissolution of calcite cement in the initial stage of weathering. Subsequently, the pores between the grains connect and widen, separating the sand grains within the sandstone. During calcite dissolution in the initial stage, sulfuric acid generated by pyrite oxidation in sandstone plays an important role. Chlorite breaks down as calcite dissolves; however, iron resulting from the breakdown disappears only after the pore water has been replaced by acid water.

Sandstones with advanced diagenesis are dense and hard, and it was previously assumed that thick weathering zones could not develop because they were less susceptible to weathering. However, this study discovered that weathering caused arenite with a minute amount of calcite cement to disintegrate into grains down to a depth of 30 m. The surface layer of the weathered arenite lost fine fractions and crept to form a fragile soil layer, which is susceptible to landslides.

論文要約

1. はじめに

砂岩には、基質の少ないアレナイト質砂岩、基質の多いワッケ質砂岩があり、また、続成作用の程度によって軟岩から硬岩まで多様な物性を持っている。さらに、セメント物質として石英、方解石を有することもあり、堆積環境も海成であることもあれば、陸成であることもある。このような多様性を持つ砂岩の風化は様々であると考えられるが、従来十分には研究されてきていない。砂岩の風化の研究には、歴史的建造物、熱帯地方のラテライト、および段丘礫を対象としたものが多いが、砂岩の風化帯の深度プロファイルの研究は少ない。堆積岩の風化帯構造の特徴と風化メカニズムを明らかにすることは、斜面移動との関係からも重要である。

日本の中古生代の堆積岩のように続成作用の進んだ硬質砂岩は緻密で硬質であるため、風化しにくく、厚い風化帯を形成することはないと考えられていた。しかしながら、白亜紀系和泉層群の砂岩泥岩互層分布域では、厚い風化帯が形成されていること、また、強風化した岩盤上の土層にて豪雨時に表層崩壊が多発することが明らかとなった。本研究は、硬質砂岩のこのように厚い風化帯の形成メカニズムを明らかにし、また、その一般性と特異性について議論することを目的とする。

2. 調査箇所

2.1 地形・地質および既往豪雨災害

調査地は、白亜系和泉層群の分布する愛媛県新居浜市東方の丘陵地である。和泉層群は中央構造線の北側におよそ幅 5~15 km、長さ約 300 km にわたって分布する地層であり、中央構造線の左横ずれ運動によって生じたプリアパート堆積盆に西から東へ堆積した海成の地層である。

新居浜市では 2004 年 8 月 17~19 日の台風 15 号、9 月 28~29 日の 21 号に伴う豪雨によって多数の崩壊が発生した。四国の瀬戸内海側は、年間降雨量が 1100~1400 mm 程度と雨が少ないことが特徴的で、これまで豪雨に見舞われたことが少なく、土砂災害が少ない地域と認識されていた。このことは、従来降雨に対するせい弱性が認識されていなかった和泉層群分布域でも誘因となる降雨があれば土砂災害が多発する事を示した。崩壊が発生した斜面の基盤岩の風化程度は、弱、中、強と 3 区分され、最も崩壊が多発したのは、強風化した砂岩主体の互層を基盤とする斜面の表層崩壊であった。

2.2 採石場

調査地は、南から北に延びる尾根の西側斜面を掘削した採石場斜面であり、砂岩優勢砂岩・泥岩互層分布域である。和泉層群の砂岩の構成粒子は、和泉層群全体で類似していると指摘されている。しかし、層準が異なる砂岩層において風化による性質の変化を検討した場合、新鮮岩の初期値の違いと風化による性質の変化を区別できない可能性がある。そ

ここで、本研究では、砂岩の風化による性質の変化を追跡するため、厚さ 4.6 m の単一の中粒砂岩層から風化程度の異なる試料を採取し、鉱物・化学、物理・力学特性を検討した。調査対象とした砂岩層の両隣で合計 40 m の層厚の地層の砂岩と泥岩の層厚を測定した結果、砂岩と泥岩の比率は、砂岩が 95 %、泥岩が 5 %の割合であった。

中粒砂岩単層の風化状況を野外にて、ハンマーの打診、岩石の色を指標として、新鮮岩弱風化、中風化、強風化、の 4 つに概略区分した。新鮮岩は、灰黒色～灰色を示し、ハンマーで打撃すると金属音を示す。その割れ目の変色は認められず、しばしば厚さ数 mm 以下の方解石脈が認められる。弱風化岩は、灰黒色～灰色を示し、ハンマーで打撃すると鈍い金属音を示すが、割れ目沿いにわずかに黄褐色の変色が認められる。中風化岩は、茶色～黄土色を示し、ハンマーで打撃すると金属音はしないが硬質であり、一部では表面に数 mm の茶褐色の被膜が形成されている。強風化岩は、黄土色～淡黄色を示し、ナイフで削れるほど軟化しており、表面には厚い所では 3 cm 程度の茶褐色～黄褐色の被膜が形成されている。

3. 調査方法

3.1 試料採取

同一層準の中粒砂岩単層から、強風化岩から 2 試料、中風化岩から 4 試料、弱風化岩から 7 試料、および新鮮な岩石から 3 試料の合計 16 試料採取した。新鮮岩については、密にサンプリングした単層の他に 5 つの層準からサンプリングした。密なサンプリング対象とした砂岩層の掘削前の地表から 2 m の深さまでは切土されており、試料採取が出来なかったため、異なる層準であるが、地表部の土層と直下の風化岩を、約 60 m 離れた場所から採取した (Site 1)。ここでは、後述するように強風化した岩盤、クリープにより岩石の構造が乱れているクリープ層 (S-c)、完全に岩石の構造が無くなった残積土層 (S-r) の 3 層から試料を採取した。また、採石場と同様な砂岩優勢層が分布し、2004 年の豪雨時に表層崩壊が発生した崩壊地脇の斜面においても、S-c、S-r の 2 層から採取した (Site 2)。

砂岩の試料採取層に隣接する泥岩層から、強風化砂岩の隣で 1 個、中風化砂岩の隣で 2 個、弱風化砂岩の隣で 2 個、最も深部の新鮮岩の隣で 2 試料を採取した。

3.2 分析・測定

野外では風化程度を 4 区分したが、採取した砂岩試料を切断・研磨したところ、後述するように風化程度が 6 つに詳細区分できることが分かったため (Zone I～VI (詳細は 4.1 の風化区分)), これらの各風化区分ごとに 1 箇所から 3 箇所の分析を行った。砂岩は、密度、間隙率、弾性波速度、および間隙径分布の測定、顕微鏡観察、X 線回折分析、蛍光 X 線分析および色彩値測定を行った。泥岩は、採取した 7 試料すべてについて、X 線回折分析、蛍光 X 線分析、色彩値分析を行った。

Site 1 では、強風化岩、クリープ層、残積土層、それぞれ 1 箇所試料を採取し、密度、間

隙率の測定, X線回折分析, 蛍光X線分析および色彩値測定を行った。Site 1 および Site 2 では, 簡易貫入試験を行い, また, 土層から採取した試料では乱さない状態で透水試験を行い, さらに粒度組成を分析した。

4. 結果

4.1 風化区分

砂岩試料の切断研磨片を作成し, 岩石の色, 岩石の硬さを指標とし, 風化程度によって風化帯を新鮮な岩石から 6 つ (I~VI) の Zone に区分した。これらの内, Zone V–Zone VI 境界以外の境界は, 色合いの違いによって明瞭に識別できる。すなわち, Zone V–Zone VI 境界は漸移的であるものの, その他のゾーンの縁は明瞭な一種の風化フロントである。各区分の岩石は次のような特徴を持っている。

Zone I:

岩石の色は暗灰色で, 変質を受けていない新鮮な岩石である。亀裂の一部には方解石脈が確認される。

Zone II:

岩石の色が灰色になる。ダイヤモンドペーストによる研磨面表面にわずかな窪みが肉眼的に見える。方解石脈が消失して開口割れ目となっている。

Zone III:

Zone II に比べてわずかに白色化しているが, それ以外 Zone II の岩石との違いはない。

Zone IV:

粒子間の基質部の一部が褐色に変化することにより, 全体的にやや褐色を帯びている。

Zone V:

岩石全体が黄褐色に変化している。軟質化により, ハンマー打撃で金属音がしなくなる。割れ目表面に数 cm 以下の厚さの褐色皮膜が形成されている。

Zone VI:

切断・研磨面表面は, 研磨してもザラザラしている。岩石全体は黄褐色で, 所々, 褐色のまだら模様が形成されている。岩石は軟質化し, 手により崩す事が可能である。割れ目表面付近に数 cm 以下の厚さの褐色皮膜が形成されている。

クリープ層 (S-c) と残積土層 (S-r)

Site 1 および Site 2 の試料採取個所とも, 下部から Zone VI の基盤岩, クリープ層 (S-c), 残積土 (s-r) から構成されていた。クリープ層では, 下部では基盤岩から小ブロックが剥離して砕けていく様子が認められ, 上部では基盤岩の薄片はまばらになる。残積土層は, クリープ層の砂岩がさらに分解して, もとの砂岩層の連続性が失われた層である。

4.2 風化に伴う性質の変化のまとめ

4.1 節に述べたように, 各風化ゾーンの境は, Zone V–VI 境界以外は色の境界として明

瞭に認識できたことから、これらの境界は一種の風化フロントである。それぞれの風化ゾーンの間で生じる性質の変化を、以下に述べる。

Zone I ⇒ Zone II :

岩石の色が暗灰色から灰色に変化する。方解石粒子および方解石脈が消失し、緑泥石も消失する。10~500 μm 程度の大間隙が増加する。

Zone II ⇒ Zone III :

岩石の色が灰色から灰白色に変化する。黄鉄鉱がわずかに減少し、鉄も減少する。小間隙 (0.01~0.1 μm)が増加し、全間隙、開放間隙ともに増加するが、開放間隙の増加率がより高くなる。これに伴い、弾性波速度も若干低下する。

Zone III ⇒ Zone IV :

岩石の色が灰白色から灰褐色に変化する。黄鉄鉱が消失し、ゲーサイトが生成されると推定される。肉眼の観察においても、色がわずかに褐色化していることがわかる。弾性波速度は、引き続き低下する。

Zone IV ⇒ Zone V :

岩石の色が灰褐色から黄灰色に大きく変化する。小間隙が拡大したことにより 0.1~1 μm の中間隙が増加する。これに伴い、ほぼ全ての間隙が開放間隙となる。弾性波速度も急激に減少する。V 以降の割れ目付近には褐色の被膜が形成される。露頭における砂岩と泥岩の位置関係から、泥岩では、砂岩の Zone IV と V の境界付近で硫黄が消失する。

Zone V ⇒ Zone VI :

岩石の色の変化は少ないが、指先で崩す事ができるようになる。弾性波速度、かさ密度が急激に低下するなど、岩石の劣化程度が大きい。これは、中間隙 (0.1~10 μm)、大間隙 (10 μm~)の増加に伴うものと推定される。Zone VI の中では、地表に向けて間隙がさらに増加し、かさ密度が著しく減少し、全間隙率も増加する。このゾーンの表層近くの岩石のかさ密度は大きく変わらないので、ほぼこの Zone VI の中で砂粒子への分離が終了するものと推定される。粘土鉱物としてパーミキュライトが生成される。また、カオリナイトは新鮮な岩石にもわずかに含まれているが、Zone VI の中で増加する。

Zone VI ⇒ S-c :

岩片が岩盤上面からはがれてクリープする。それによって岩石の元の構造が失われ、風化岩石が砂に移り変わる。わずかなかさ密度の減少と全間隙率の増加が起こる。雲母が減少し、パーミキュライトが増加する。場合によっては、土から細粒分が失われ、土の骨格構造が脆弱化するものと推定される。土の骨格構造が脆弱化した層では、水の透水に伴って著しい体積減少がおこる。

S-c ⇒ S-r:

岩石の元の構造が完全に失われ、かさ密度が減少する。雲母が消失し、パーミキュライトがさらに増加する。

5. 議論

5.1 方解石の溶解の量的検討

砂岩中の黄鉄鉱が酸化して硫酸が生成し、それが砂岩中の方解石を溶解するとして、その硫酸がどの程度の方解石を溶かし得るのか計算した。新鮮な Zone I 砂岩の CaO 含有率は 0.54 % であり、方解石が消失する Zone II 砂岩の CaO 含有率は 0.17 % であることから、方解石の CaO 含有率は Zone I 砂岩と Zone II 砂岩の差分の 0.37 % と想定される。また、Zone I~III 砂岩の S 含有率の平均値は 0.16 % であることから、それぞれの 1 kg に含まれる CaCO₃ と FeS₂ の含有量を計算した。

計算の結果、1 kg の砂岩に含まれる CaCO₃ の含有量は 6.6 g、FeS₂ は 6.0 g である。本研究の砂岩 1 kg に含まれる FeS₂ によって溶解することのできる CaCO₃ は 10.4 g となり、実際に 1 kg の砂岩に含まれる CaCO₃ は 6.6 g である。すなわち、岩石基質中の方解石のみであれば砂岩中の黄鉄鉱由来の硫酸によって溶解することが可能であることが示唆される。しかし、この砂岩には基質のセメントの約 10 % に相当する方解石脈も含まれていると推定される。そうすると、1 kg の砂岩に含まれる CaCO₃ は、セメントに 6.6 g、方解石脈に 0.7 g の合計 7.3 g となるが、この方解石の量でも砂岩中の黄鉄鉱由来の硫酸のみによって溶解することが可能であることが示唆される。

5.2 間隙構造の変化と岩石の分解

間隙には、外部に繋がった開放間隙と、外部に繋がっていない閉鎖間隙があるが、風化の進行に対しては外部との物質のやり取りを可能にする開放間隙の全間隙に占める割合が重要となる。本研究では、まず Zone II で方解石が溶解してわずかに間隙が増え、さらに Zone II から Zone III に変わるところで開放間隙の割合が急激に増加していた。

間隙径ごとの変化傾向をみると、Zone I から Zone II では、中間隙 (0.1~10 μm) と大間隙 (10 μm~) がわずかに増加していた。これは基質中に含まれる方解石の溶解によるものと推定される。Zone II から Zone III では、小間隙が急増しており、これにより小間隙が連結し、開放間隙の割合が急増したと言える。Zone III 以降は小間隙の増加は認められないが、Zone III から Zone IV では中間隙が増加し、Zone IV から Zone V では、中間隙が急増し、大間隙が微増する。さらに、Zone V から Zone VI では中間隙と大間隙ともに増加している。このように、Zone III 以降は、小間隙の変化は少ないが、中間隙が増加した後に大間隙が増加し、岩石の分解が進むことが分かった。

開放間隙率 (N_o) と比表面積との関係から Zone III で比表面積が急激に増加しており、それ以降では、開放間隙率は増加するが比表面積はほとんど変化しないことが分かる。これより、Zone III 以降のゾーンでは新たな間隙が生ずるというよりも、既に開いた間隙がさらにその径あるいは容積を増大させていったことが示唆される。

5.3 脆弱な土層構造の形成

風化が進行した Zone VI の砂岩では、まだ元の構造を残しているが、その後、S-c でソイルクリーブにより砂岩の構造が失われ、最終的に表層に分布する残積土層である S-r となる。Site 1 (採石場) と Site 2 の S-c (崩壊地の脇) および S-r の粒度分布から明らかなように、砂岩の粒子への分解により、砂岩土層の粒径は小さくなる。

Site 1 と Site 2 での粒度分布と空隙率の比較から、崩壊発生前に細粒分が流出していたことが示唆される。Site 2 の土層の粒径は、Site 1 よりも小さく、土層の空隙率は、崩壊地脇の Site 2 で約 60 % であり、Site 1 の 40~50 % より大きかった。さらに、Site 2 の土層は、透水試験に伴って試料の陥没により 18 % の体積減少が生じた。これは、Site 2 の土層は既に細粒分が流出しており崩壊しやすい脆弱な土層構造を持っていたことが要因と推定される。この脆弱な土層は、表層崩壊のすべり面が位置する S-c の N_{p10} 値が低い箇所に位置する。母岩となる砂岩は 2 つのサイトで異なるものの、上記より、アレナイト砂岩では、崩壊の発生前に土層の細粒分が流出することにより、脆弱な土層が形成されると推定される。

5.4 アレナイト質砂岩の風化メカニズム

今までの議論に基づいて、微量な方解石セメントを持つアレナイト質砂岩の風化メカニズムを以下にまとめる。最も深いところで生じている性質の変化は Zone I-II 境界で起こる方解石セメントの溶解であり、これがこの新鮮なアレナイト質砂岩が経験する最も初期の風化である。そして、この方解石の溶解は、前述したように Zone III-IV 境界で生成された硫酸が下方浸透して引き起こしたと解釈される。Zone II では、方解石の溶解とともに、緑泥石の消失も起こっていた。本研究の砂岩に含まれる緑泥石は鉄に富むと推定され、緑泥石の分解時には鉄が放出されたはずである。しかしながら、鉄が大きく減少するのは、Zone I-II 境界よりも浅い Zone II-III 境界であった。本研究場所の Zone II よりも硫酸の供給源に近い部分では間隙水はおそらく酸性状態にあり、そのために、そこで鉄が溶脱されるものと考えられる。これが Zone II-III 境界であり、言い換えれば、Zone II-III 境界は硫酸によって岩石が“洗われて”鉄が失われたフロントであり、Zone III は、Iron-depleted zone である。

Zone III では、比表面積の変化に現れたように、ほとんどすべての粒子表面が間隙に面するようになる。このような間隙の形成には、硫酸による鉄の溶脱だけでなく、他の鉱物表面の溶解も寄与している可能性があるが、現時点では、その程度は明らかではない。その後、Zone III-IV 境界で黄鉄鉱も消失し、酸化帯である Zone IV が形成される。Zone IV 以降の酸化帯では、浅部に向けて間隙量の増大とともに岩石の機械的分解が急激に進む。岩石の密度が低下し、弾性波速度も著しく低下する。そして、ようやく地表付近で、鉱物学的変化や化学成分の溶脱が激しくなる。そこではクリーブによって岩石が砂粒子に分離し、さらに一部の土層では細粒分が流失して構造が脆弱な土層が形成され、豪雨による崩壊の発生の素因となる土層の沈下および構造の破壊が発生しやすい状態が形作られる。

本研究地域では、風化帯最下部の Zone I-II 境界は、採石のための掘削前の地表から 40 m という深さにあった。また、粒子間が連続的な間隙となり物性が低下し始める Zone II-III 境界も 30 m という深さにあった。一方、方解石、黄鉄鉱、緑泥石という鉱物を除くと、大きな鉱物学的変化、つまり、雲母粘土鉱物のバーミキュライト化や斜長石のカオリナイト化や化学成分の溶脱は、ほんの地表数 m の間で生じていただけである。つまり、本研究対象とした砂岩の風化は、間隙の成長が鉱物学的変化に先行して著しく深くまで到達しているという特徴を有している。これは、本研究地域のアレナイト質砂岩の風化において、初期に方解石セメントが溶解し、さらに間隙が生成・連結・拡大していくことが重要な要因であったことに起因している。また、地表付近での鉱物学的変化やクリープと溶脱による脆弱な土層の形成は、地表付近での現象であるとしても、それ以前に進行していた間隙の成長と岩石の劣化という背景のもとに生じたものであり、本研究で対象としたアレナイト質砂岩に特有のものである。

6. 結論

方解石セメントを微量に含むアレナイト質砂岩の風化帯を鉱物、化学、物理学的性質の面から多面的に分析した。その結果、風化メカニズムは連鎖的なものであり、初期の方解石セメントの溶解によって粒子間が開くことが最も重要であり、その後は粒子間の間隙が生成・連結・拡幅して砂岩砂粒子が分離していくことが主たる風化作用であることがわかった。これは、基質に含まれる粘土鉱物が溶脱することにより風化が進行するワッケ質砂岩と大きく異なる点である。

微量な方解石セメントを含む砂岩の風化帯は、深部から Zone I (新鮮)、Zone II (方解石脈および微量な方解石セメントが溶解、緑泥石が消失)、Zone III (鉄が溶脱)、Zone IV (黄鉄鉱が消失)、Zone V~V I (砂粒子の分離)に分帯される。このような帯状構造の形成は、砂岩に含まれる黄鉄鉱の酸化による硫酸の形成と、その深部への浸透によって始まる。硫酸は砂岩内を浸透し、方解石脈を溶解して割れ目を開口させるとともに、岩石基質の方解石を溶解する。方解石の溶解した部分では、緑泥石もともに消失するが、方解石の溶解に起因するアルカリ状態のために鉄はまだ溶脱されない。この Zone II の上の Zone III では、浸透してくる酸性の水によって鉄が溶脱される。ここで、ほぼすべての砂粒子間が間隙となる。その後、鉄の溶脱帯よりも浅部で砂岩中の黄鉄鉱も消失し、酸化帯が形成され、間隙が広がり、岩石の機械的分解が急激に進む。岩石の間隙率は増加し、密度が低下し、弾性波速度も著しく低下する。さらに一部の土層では細粒分が流失して構造が脆弱な土層が形成され、豪雨による崩壊の発生の素因となる土層の沈下および構造の破壊が発生しやすい状態が形作られる。

上記の風化メカニズムは、日本の多雨地帯で生じた風化研究事例から明らかになったものであるが、アレナイト質砂岩に方解石セメント、緑泥石、黄鉄鉱が含まれている場合に湿潤地域で起こる風化メカニズムに共通したものと想定することができる。