

鉱物組成に基づく黄鉄鉱含有泥岩のスレーキング特性

西山賢一^a・石田啓祐^a・佐藤威臣^b・竹熊隆宏^b・長谷川修一^c

^a徳島大学総合科学部自然システム学科 〒770-8502 徳島市南常三島町 1-1

^b国土防災技術株式会社徳島支店 〒771-0144 徳島市川内町榎瀬 676-1

^c香川大学工学部安全システム建設工学科 〒761-0396 高松市林町 2217-20

Slaking characteristics of pyrite-bearing mudstone based on mineral compositions

Ken-ichi NISHIYAMA^a Keisuke ISHIDA^a, Takeomi SATO^b, Takahiro TAKEKUMA^b
and Shuichi HASEGAWA^c

^a *Laboratory of Geology, Faculty of Integrated Arts and Sciences, University of Tokushima, 1-1 Minamijosanjima, Tokushima, 770-8502, Japan*

^b *Japan Conservation Engineers & Co., LTD, Enokise 676-1, Tokushima, 771-0144, Japan*

^c *Department of Safety Systems Construction Engineering, Faculty of Engineering, Kagawa University, Hayashimachi 2217-20, Takamatsu, 761-0396, Japan*

Abstract

The X-ray diffraction analysis (XRD) and wet-dry slaking test were examined to clarify mudstone weathering and slaking characteristics using drilling cores of the Lower Cretaceous Fujikawa Formation distributed in the Katsuura-gawa area, Tokushima, Japan. The drilling cores of the Fujikawa Mudstone were subdivided into three weathering grades as in the Fresh-zone, Slightly- and Strongly-weathered zones by naked-eye observations. The peaks of quartz, feldspar, calcite, illite and chlorite were detected by XRD analysis of the mudstone. The amount of calcite decreased in relation with the progressing of weathering grade, whereas the amounts of other minerals are constant during the weathering. Pyrite micrograins were extracted by the chemical-etching process of mudstones.* The laboratory experiments and field observations revealed that the wet-dry slaking occurs in the Fujikawa Mudstone without swelling-clay minerals such as smectite. These characteristics of slaking originate from the changes of rock texture and physical properties of the mudstone with the oxidation of pyrite micrograins and dissolution of calcite under the oxidizing condition.

* The extracting-method of pyrite: Ishida, et al. (2006) in this volume.

Keywords: *slaking, mudstone, mineral compositions, clay minerals, weathering, pyrite, Fujikawa formation*

^a Corresponding author: Ken-ichi NISHIYAMA, e-mail: nishiyama@ias.tokushima-u.ac.jp

1. はじめに

第三系などの泥岩には、人工的な掘削などにより新鮮な岩体が地表に露出すると、岩石が急速に細片化・土砂化するスレーキング現象が顕著に発生するものが知られており (Matsukura and Yatsu, 1982; Yatsu, 1987 など), その風化メカニズムの解明が行われてきた (千木良, 1988; 大山ほか, 1999 など). このような急速な風化の結果, 掘削のり面の変状や斜面崩壊といった建設工事上の問題を引き起こす例がある (千木良, 1998 など). この種の泥岩には, 膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトが含まれていることが多いため, スレーキングの原因として, このスメクタイトの吸水膨張が挙げられることが多い (千木良, 1998 など). さらに, 第三系泥岩の分布域では地すべり地形が密集していることが多く, 地すべりの発生にもスメクタイトなどの膨潤性粘土鉱物が影響していることが知られている (日本地すべり学会編, 2004 など). 一方, はんれい岩や御荷銓緑色岩などの塩基性岩の風化帯で発生する地すべりには, このスメクタイトが影響するという考え (高谷, 2001) のほかに, 膨潤性を持つ緑泥石が影響している可能性も指摘されている (松倉ほか, 1979; Miyahara et al., 2005). しかしながら, こういった膨潤性粘土鉱物が X 線回折により確認されない泥岩においても, 顕著なスレーキングが発生した事例がいくつか報告されている (田中, 1980; 吉田ほか, 2003 など) が, その具体的なメカニズムは明らかにされていない.

一方, 泥岩や, 熱水変質を受けた火山岩などに含まれる黄鉄鉱は, 地表の酸化的環境下では比較的容易に溶解して硫酸となる (笹木, 1988) が, この硫酸が種々の問題を引き起こしていることが知られるようになってきている. すなわち, (1) 黄鉄鉱起源の硫酸が地表水とともに移動し, 強酸性土壌の原因となるとともに, 河川や湖沼に流入して陸水の酸性化の原因となる, (2) 硫酸から各種の硫酸塩鉱物 (石膏・テナルダイト・ミラビライト・ジャロサイト・エトリンガイトなど) が生成し, その際の結晶成長圧力により岩石やコンクリ

ートを破壊する現象 (塩類風化) が生じ, 掘削のり面の変状, 住宅基礎の盤膨れ, 石造文化財の破壊などが発生した事例が報告されている (関・酒井, 1987; Goudie and Viles, 1997; 千木良, 1998; 大山ほか, 1998; 朽津・尾崎, 1999; 川野・小坂, 2002; 鹿園ほか, 2002; 五十嵐ほか, 2003 など). このような塩類風化による岩石の破壊を検討する上では, 生成する塩類の種類によって結晶成長圧力が異なるため, その種類が問題となるとともに, 岩石の引張強度や間隙径分布などの岩石物性の影響も大きいことが指摘されている (山田ほか, 2005). しかし, 既存の研究では, 泥岩のスレーキングに塩類の結晶成長がどのように関与しているのかについては, 必ずしも明確ではない.

泥岩は日本に広く分布する代表的な堆積岩であり, 泥岩のスレーキングの発生メカニズムを検討することは, 岩石の風化に関する理学的見地のみならず, 建設・環境保全・防災といった社会的なニーズの面からも重要な課題のひとつといえる. 以上を踏まえて, 今回筆者等は, 徳島県勝浦川盆地に分布する下部白亜系藤川層 (石田, 2002) の泥岩を用いて, スレーキング特性に及ぼす鉱物組成の影響について予察的な検討を行ったので, 以下に報告する. なお, 泥岩の詳細な岩石記載・風化区分と岩石物性に基づく議論は別稿に譲る.

2. ボーリングコアの風化区分

掘削された藤川層のボーリングコアを用いて, 肉眼観察による風化区分, スレーキング試験, X 線回折による主要鉱物組成の分析を実施した. また, 石田ほか (2006) では, 同じ泥岩試料を用いて, 酸処理による黄鉄鉱抽出法が行われた. ボーリングコアは全部で 4 孔あり, BH-1 (掘進長 15m) のみが水平ボーリング, 他の BV-1~3 (掘進長: BV-1 が 15m, BV-2 が 25m, BV-3 が 20m) は鉛直ボーリングである. コアの掘削は 2005 年 6 月に行われた. なお, 藤川層を含めた勝浦川盆地の下部白亜系の層序・年代・産出化石については, 石田ほか (1996) に詳しい.

肉眼観察に基づけば, コア試料は主に塊状泥岩

からなり、しばしば砂質分に富む薄層を挟在し、層理面が観察できる部分もある。層理面に大局的に調和的な節理が多く認められ、掘削深度が深い部分ではそのほとんどが方解石脈(幅数 mm 程度)で充填されている。一方、掘削深度の浅い部分では、方解石脈が認められない場合が多く、節理面が開口している。地表に近い部分は風化により軟質化・角礫化した部分が多いが、深い部分では比較的新鮮かつ硬質である。

肉眼観察に基づいて、泥岩の風化程度を3ランクに区分した。新鮮なものから順に、新鮮帯(暗灰色で硬質、節理面に沿った方解石脈を多く含む)、弱風化帯(褐色化するが、岩片は比較的硬質)、強風化帯(黄褐色を呈し、軟質化・土砂化)である。ここで、「新鮮帯」は、節理面を充填する方解石脈の大半が残存するとともに、コアも硬質で、変色しておらず、最も風化程度が弱いゾーンである(第1図)。「弱風化帯」は、コアはある程度硬く、変色や碎片化の程度も弱い、節理面を充填していた方解石脈の大半が溶解しており、クラックが開口し、礫状を呈する部分もある(第2図)。「強風化帯」は岩片が水酸化鉄などにより褐色化するとともに、軟質化・角礫化が進行した最も風化が進んだゾーンである(第3図)。強風化帯のコアの表面には、しばしば白色の微細な粉末が付着している。コアはいずれも、地表下数 m までが強風化帯であり、深度-10m 程度になると新鮮帯に移化する。

それぞれのコアにおける強風化帯、弱風化帯の基底深度(すなわち「強風化フロント」、「弱風化フロント」)の深度は次の通りである。BH-1の強風化フロントは-4.25m、弱風化フロントは-7.45m、BV-1の強風化フロントは-0.4m、弱風化フロントは-5.65m、BV-2の強風化フロントは-3.5m、弱風化フロントは-14.5m、BV-3の強風化フロントは-6.3m、弱風化フロントは-14.15mとなった。強風化フロントの深度は、BV-1だけ顕著に浅いものの、他のコアでは-4~-6m程度である。弱風化フロントもBV-1とBH-1が-5~-7m程度と浅く、BV-2とBV-3はともに-14m程度となった。

藤川層の露頭でも、基本的に上記の風化区分が

適用できるが、露頭オーダーでは、特に径数 m 程度のコアストーン(未風化核岩)構造の発達が顕著である。コアストーンを伴う泥岩の風化プロセスについては、別稿に譲る。



第1図 新鮮帯のコア写真。高角の層理面および節理面が発達しており、白色を呈する方解石脈により充填されている。コアは暗灰色を呈し、硬質である。BV-2の深度-20m付近。



第2図 弱風化帯のコア写真。方解石脈が大半が消失してクラックが開口するとともに、コアは岩片状~礫状を呈する。岩片そのものは硬質だが、開口したクラックに沿って褐色化する。BV-2の深度-6m付近。



第3図 強風化帯のコア写真。方解石脈は消失している。コアは礫状～土砂状を呈し、褐色化が進行している。深度0m～-0.1mの白色コアはモルタル。BV-2の深度0～-3m付近。

3. 分析方法

泥岩のスレーキング程度を把握するため、下記の2種類のスレーキング試験を実施した。(1) 土木学会基準のスレーキング試験。自然乾燥状態の岩石試料を水浸させ、1時間後、2時間後、3時間後、24時間後の試料の状態を観察する。変化の程度は0～4のスレーキング指数で表す(0は変化なし、1は亀裂が入る、2は碎片化するが、泥状化しない、3は碎片化および部分的に泥状化、4は完全に泥状化)。その後、水から上げ、乾燥炉で24時間乾燥させ、乾燥後の形状でスレーキング指数を求める。この方法では、水浸状態でのスレーキング特性が把握できる。(2) 道路公団基準の乾湿繰り返し試験。自然含水状態の岩石試料の重量を測定したのち、24時間水浸させる。水から上げて水切りを行い表面の水分をふき取ったあと、重量を測定する。その後、乾燥炉内で90℃で48時間乾燥させ、室温まで自然冷却したのちに重量を測定する。その後再び水浸させ、この操作を10回繰り返す。この場合も、スレーキングによる岩塊の破壊程度はスレーキング指数(0～4)で表す。この方法では、乾湿繰り返しを与えたときのスレーキング特性が把握できる。なお、これらの試験方法は、地盤工学会(1989)を参考とした。

泥岩中に含まれる鉱物種を同定するため、粉末X線回折分析(XRD)を行った。測定には香川大学工学部のX線回折装置を用いた。分析は、粉末試料の定方位分析(9試料)と、水ひ試料の定方位分析(8試料およびエチレングリコール処理2試料)の2タイプを実施した。粉末試料は、ステンレス乳鉢とめのう乳鉢で試料を粉末にし、アルミホルダーに詰め、粉末試料にスライドガラスを押しつけて一方向へせん断して定方位試料とした。

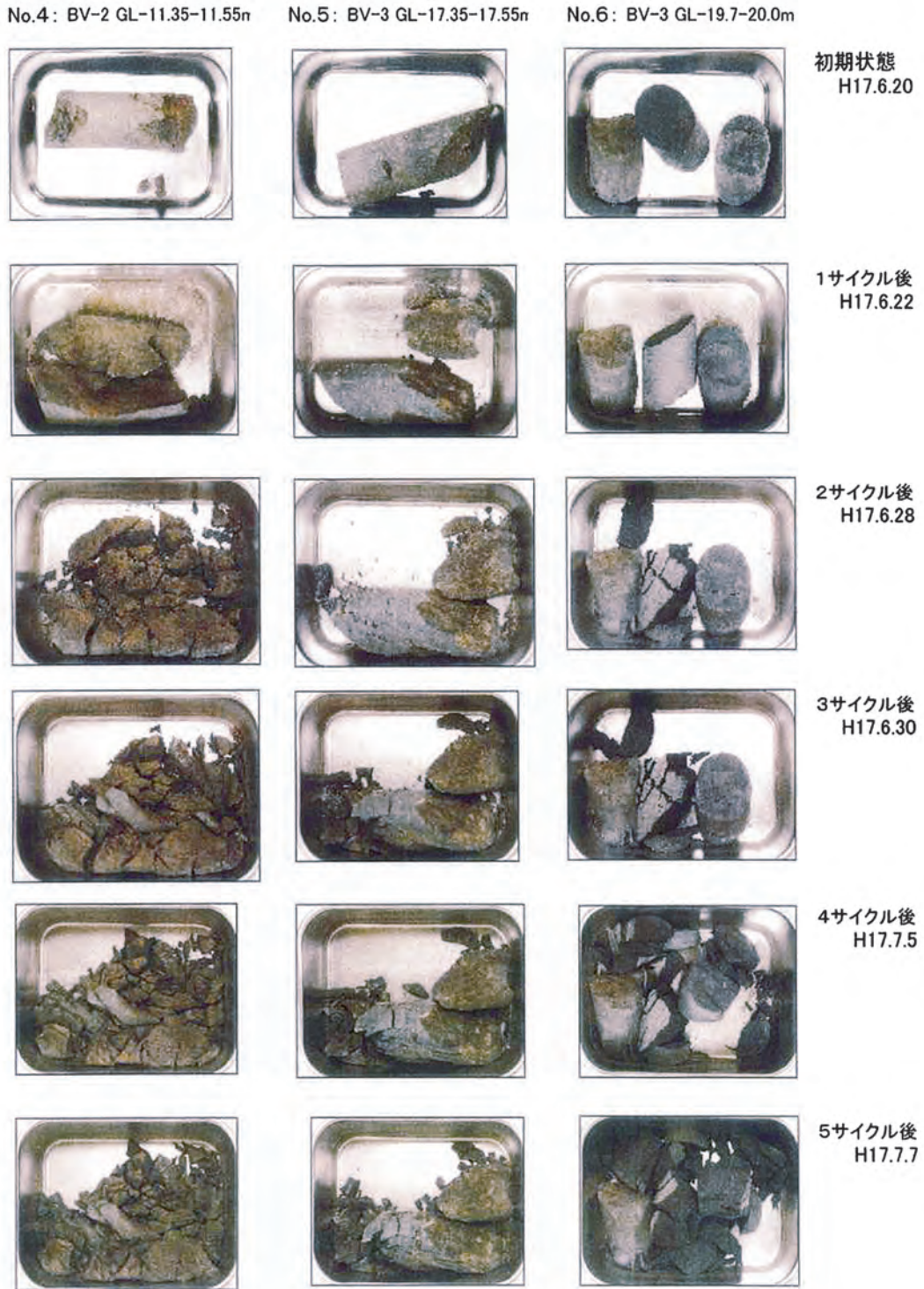
水ひ試料の作成には、沈降法と遠心分離法を併用した。具体的な手順は下記の通りである。(1) ステンレス乳鉢を用いて粉末にした試料をイオン交換水で満たしたビーカーに入れて分散沈降させる。(2) ストークスの法則に基づく放置時間後、ビーカー上端から10cmの深度にある懸濁液を回収する(懸濁液の粒子は10 μ m)、(3) 懸濁液を遠心分離器にかけ、2 μ m以下の粘土粒子を集める。(4) 懸濁液をスライドガラスに塗布し、1日乾燥させる。また、水ひ試料のうちの2試料(BV-3-1とBV-3-5)については、試験終了後、試料にエチレングリコールを塗布したのちに再度X線回折を行い、膨潤性粘土鉱物の有無について確認した。なお、粘土鉱物の分析法および同定法は、白水(1988)、須藤談話会編(2000)、吉村(2001)を参考とした。

4-1. スレーキング試験

土木学会基準でのスレーキング試験では、主に水浸状態での試料の変化を検討でき、地盤工学会(1989)では「浸水崩壊度試験」と呼んでいる。一方、道路公団基準のスレーキング試験では、乾湿繰り返しを与えた際の試料の変化を検討でき、地盤工学会(1989)では、こちらを「スレーキング試験」と呼んでいる。

道路公団基準の方法で行った試験の際の試料の写真を図4に示す。初期状態では短柱状をなす試料が、数サイクル後にはいずれも細片化しており、顕著なスレーキングが発生していることが分かる。より浅い深度の試料(より風化した試料)ほど、繰り返しサイクルが少ない段階で破壊している。

道路公団基準 岩の乾湿繰り返し吸水率試験



第4図 乾湿繰り返し試験による泥岩のスレーキング

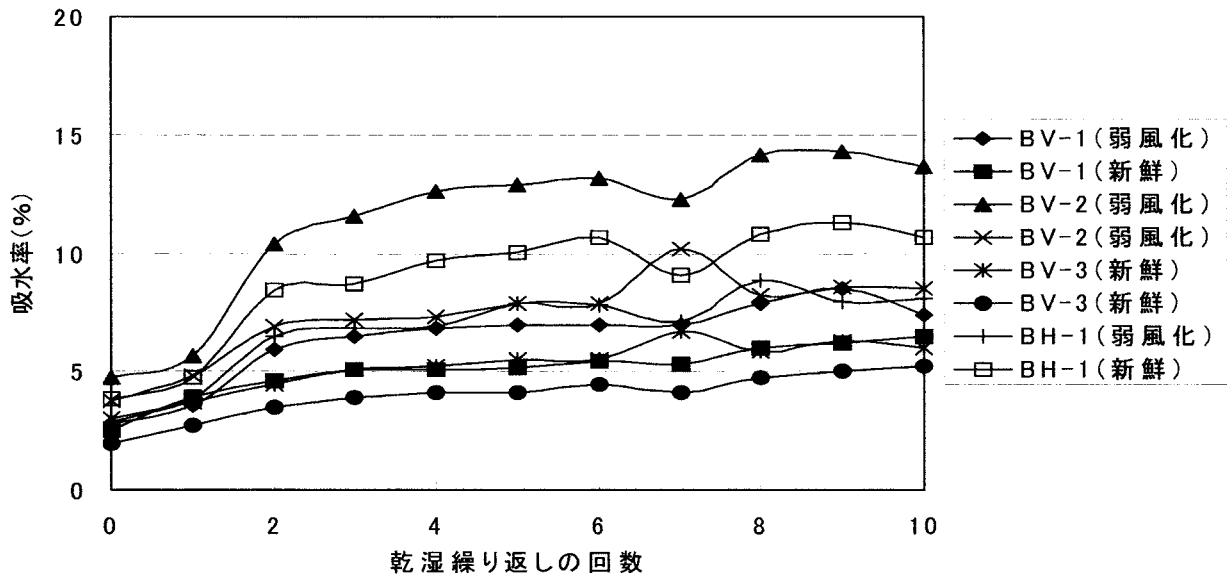
土木学会基準による水浸状態での試験結果を第1表に示す。この試験では特に弱風化帯で顕著なスレーキングが発生し、1時間の水浸でスレーキング指数が1.5にまで上昇したものがある。一方、新鮮帯のコアでは、水浸だけではコア形状に変化が認められず、スレーキングが生じていないものもある。

乾湿繰り返しを与える道路公団基準の試験による

吸水率の変化を第5図に示す。風化帯・新鮮帯のいずれの試料も吸水率(%)が増加傾向にあり、特に2サイクル目で急増しているものが多い。10サイクル終了後のスレーキング指数はほとんどの試料で3となった。乾湿繰り返しを与えると、浸水法ではスレーキングが起こりにくかった新鮮帯でも顕著なスレーキングが発生したことが明らかになった。

第1表 浸水法によるスレーキング指数の変化

採取位置	風化区分	スレーキング指数				
		浸水直後	1時間後	2時間後	3時間後	24時間後
BV-1(深度 4.3-4.45m)	弱風化	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
BV-1(深度 12.6-12.8m)	新鮮	0	0	0	0	0
BV-2(深度 7.7-8.0m)	弱風化	1	1.5	1.5	1.5	1.5
BV-2(深度 11.35-17.55m)	弱風化	0	0.5	0.5	0.5	0.5
BV-3(深度 17.35-17.55m)	新鮮	0	0	0	0	0
BV-3(深度 19.7-20.0m)	新鮮	0	0	0	0	0
BH-1(深度 5.1-5.2m)	弱風化	0	1	1	1	2
BH-1(深度 12.4-12.5m)	新鮮	0	1	1	1	1



第5図 乾湿繰り返しによる吸水率の変化

4-2. X線回折分析

粉末試料、水ひ試料の分析ともに、含まれる鉱物の種類は、後述のように方解石を除くとほぼ同一となった。ただし、 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土粒子を集めた水ひ試料の方が、含まれる粘土鉱物の回折ピークが高く検出された。新鮮帯と弱風化帯それぞれの水ひ試料のX線回折ピークの例(BV-1)を第6図に示す。検出された鉱物は、主要造岩鉱物である石英と長石、粘土鉱物であるイライトと緑泥石、ならびに炭酸塩鉱物である方解石である。このうち、方解石は、新鮮帯の試料の一部に明瞭なピークが認められ、強風化帯・弱風化帯ではピークが顕著に低下ないし完全に消失することが多い。方解石以外の鉱物は、新鮮帯と強風化帯の試料とで回折ピーク強度に明瞭な差異は認められない。

エチレングリコール処理を行った試料のX線回折ピークをみると、緑泥石とイライトの回折ピークの低角側へのシフトはほとんど確認できなかった(第7図)。未処理の試料のイライトの回折ピークの形状は、ピークの幅が広めでかつ左右非対称となっていることから、イライトは混合層鉱物である可能性も考えられたが、エチレングリコール処理による回折ピークの移動はほとんど認められない。また、典型的な膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの明瞭なピークは、いずれの試料からも検出されなかった。また、黄鉄鉱抽出法により確認された黄鉄鉱ならびにその風化生成物と思われる水酸化鉄(石田ほか, 2006)の回折ピークも、XRDでは確認されなかった。また、強風化帯のコア表面にしばしば付着している微細な白色粉末も同定できなかった。

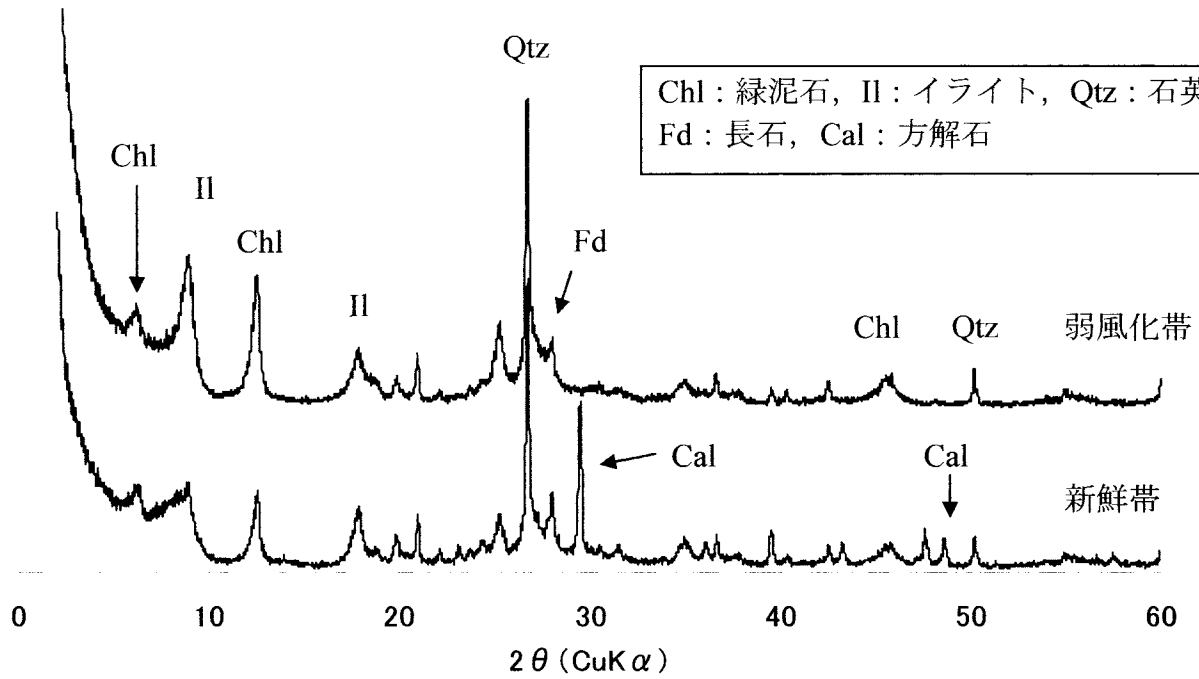
4. 泥岩コアのスレーキングに関する考察

スレーキング試験の結果から、藤川層泥岩ではスレーキングが起りやすいことが明らかとなった。これは、藤川層からの産出化石を室内で保管しているだけで細片化した事例(石田ほか, 2006)とも調和的といえる。このスレーキングの発生メカニズムについて、以下に検討を行う。

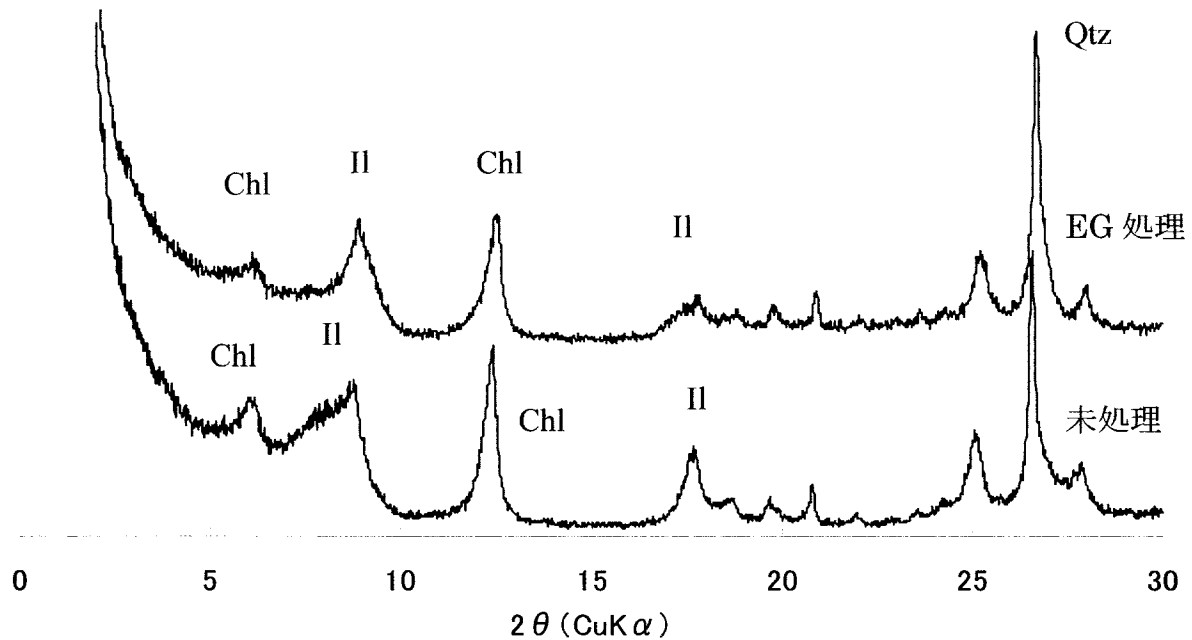
X線回折の結果から、藤川層泥岩には明瞭な膨潤性粘土鉱物の回折ピークが確認されなかった。したがって、スレーキングの原因は、従来、第三系の泥岩で定説となっているスメクタイトなどの膨潤性粘土鉱物によるものではないと考えられる。また、泥岩の化学的風化プロセスでは、緑泥石がスメクタイトに変化あるいは消失(千木良, 1988)したり、緑泥石が部分的に緑泥石-バーミキュライト混合層やバーミキュライト、さらにはカオリナイトに変化(水谷, 1976; Tsushima and Oho, 1999など)する事例が知られているが、今回の藤川層泥岩ではそのような変化は明瞭ではない。

次に、酸処理により存在が確認された黄鉄鉱が、地表環境下で酸化されて硫酸イオンとなり、石膏などの硫酸塩鉱物として結晶成長することで岩石が引張破壊を起こして破壊する、いわゆる塩類風化の可能性について検討する。今回分析を行ったボーリングコア試料からは、石膏などの塩類の回折ピークは確認されなかった。したがって、泥岩の細片化が塩類風化を主因とする可能性は考えにくい。ただし、生成塩類が微量な場合、XRDでは検出されにくいことも十分考えられる。ボーリングコアでは明瞭ではなかったが、露頭観察では、風化した泥岩の表面やコアストーンの剥離面に、しばしば白色の微細な粉末が付着している。したがって、泥岩試料を用いて乾湿繰り返し試験を行って塩類析出の有無を継続的に観察することや、露頭で認められる白色粉末を用いた分析などを行い、今後より詳細に検討する必要がある。

XRDでは確認されなかったが、石田ほか(2006)による黄鉄鉱抽出法の結果、泥岩の新鮮帯からは、しばしば黄鉄鉱が確認された。この黄鉄鉱は、立方体状の結晶形が明瞭なものや、木イチゴ状の集合体(フランボイダル黄鉄鉱)をなすものなどが認められる。一方、掘削深度が浅い風化した泥岩部分においては、微細黄鉄鉱は消失しており、代わりに黄鉄鉱の仮像や、風化生成物と思われる水酸化鉄の微粒子が確認された(石田ほか, 2006)。XRDでは鉄鉱物の回折ピークは確認されなかったため、この鉄鉱物は非晶質ないし結晶度が低い鉱物と考えられ、赤色を呈する岩石の風化部や土



第6図 水ひ試料の X 線回折チャート (BV-1: 上は弱風化帯の深度-5.25m, 下が新鮮帯の深度-13m)



第7図 エチレングリコール (EG) 処理と未処理の試料の X 線回折パターン (BV-3 の深度-18m. 下は未処理, 上は EG 処理後)

壤中に普遍的に含まれるフェリハイドライト ($\text{Fe}_3\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) などの水和酸化物, あるいは結晶度の低いゲータイトやヘマタイトである可能性がある。これらのことから, 水酸化鉄は, 黄鉄鉱が酸化して硫酸イオンと鉄イオンとなったあと, 鉄イオンが水と結合・沈殿して形成された鉱物と推定される。

黄鉄鉱の酸化・溶解によりもたらされた硫酸イオンは, 間隙水に溶解して移動し, 泥岩中の成分と反応すると考えられる。ボーリングコアの肉眼観察ならびに XRD の結果, 泥岩中にはしばしば方解石が脈状をなして含まれており, 特に新鮮帯ではその含有量が多い。一方, 風化帯では減少しており, 初性的に方解石でシールされていたと考えられるクラックはほとんどが開口している。これらのことから, 方解石の溶解には, 黄鉄鉱の酸化によりもたらされた硫酸イオンが関与している可能性が高い。

以上のことから, 藤川層泥岩のスレーキングは, 次のようなプロセスで発生したと考えられる。すなわち, 泥岩に初性的に含まれる黄鉄鉱は, 還元状態で安定な鉱物であるため, 斜面崩壊やのり面掘削等により表層の風化部が削剥されることでより酸化的な環境におかれ, 雨水による溶解が促進し, 鉄イオンと硫酸イオンとに解離しやすい。三価の鉄イオンは水に対する溶解度が低いため, 水和してフェリハイドライトなどの非晶質の水酸化鉄を形成して岩石中に残存する一方で, 硫酸は水に溶解して泥岩の節理面を移動し, 節理面を充填していた方解石脈の溶解を促進させた。これにより, 岩盤表層部の透水性が増加した。その結果, 泥岩と水との接触・反応が促進されたため, スレーキング現象が生じたと考えられる。スレーキングを引き起こした鉱物学的プロセスは, (1) 硫酸イオンに起因する塩類の結晶成長, (2) 泥岩中に含まれる微細な方解石の溶解による岩石組織の変化と強度低下, などが想定される。しかしながら, 具体的には, 泥岩の岩石組織・化学組成・間隙径分布などに基づいたより詳細な検討が必要である。

今回の検討対象の藤川層泥岩をはじめとする先第三系の泥岩は, 一般に硬岩であるとともに, 膨

潤性粘土鉱物がほとんど含まれていないため, スレーキングによる岩盤の風化が問題となる事例がこれまであまり知られていない。しかしながら, スレーキングのメカニズムはまだ明確にされていないものの, いくつか類似の事例が報告されているので, 以下にまとめる。

今回の藤川層泥岩の事例と類似したものとして, 四国の和泉層群の泥岩のスレーキングに関する検討例が報告されている (吉田ほか, 2003)。これによると, スレーキングを起こした和泉層群の泥岩の分析結果, 泥岩中には膨潤性粘土鉱物が確認されなかった。XRD・電子顕微鏡観察の結果に基づけば, スレーキング試験後の泥岩試料では斜長石およびイライトの含有量が低下すること, 泥岩の膠結物質 (おそらく非晶質) が溶出することが明らかにされた (吉田ほか, 2003)。このことから, 泥岩のスレーキングには, イライトと斜長石の溶解および非晶質の膠結物質の溶解が影響する可能性が示唆された (吉田ほか, 2003)。一方, 同じ和泉層群の泥岩について, 石膏やジャロサイトなどの塩類の結晶成長によるスレーキングの事例が林田 (1977) で報告されている。

今回の藤川層と年代・岩相が類似した地質体である上部白亜系姫浦層群の泥岩優勢層の上に建設された石打ダム (熊本県) の例では, 硬質の泥岩が掘削後に急激にスレーキングを起こしたため, 岩盤掘削面が乾燥しないようにスプリンクラーで散水しながら施工が行われた (宮崎, 1992)。この泥岩の XRD 結果によれば, 構成鉱物は石英, 斜長石, イライト, カオリナイトであり, 膨潤性粘土鉱物は確認されなかったため, スレーキングのメカニズムは明らかにされていない (宮崎, 1992)。谷本ほか (2004) では, 紀伊半島に分布する古第三系四万十帯の頁岩で生じたスレーキング特性が報告されており, この頁岩にも膨潤性粘土鉱物は確認されていない。田中 (1980) では, スメクタイトが認められない泥岩試料でも明瞭な乾燥収縮が生じた例が紹介されているが, その鉱物学的メカニズムは説明されていない。

これらのことから, 古第三系あるいはそれ以前の泥岩・頁岩のスレーキングは, 必ずしもスメク

タイトなどの膨潤性粘土鉱物が XRD で確認されるだけの量が含まれていない場合でも、しばしば発生していることがわかる。また、これらの事例では、塩類の析出が XRD で確認された事例はまだ少数である。このため、この種の泥岩の風化プロセスは、膨潤性粘土鉱物の有無と塩類の析出だけでなく、それ以外のプロセスも検討する必要がある。

ところで、泥岩中にはしばしば方解石が含まれるが、方解石の溶出が強度低下やスレーキングに与える影響については、これまであまり注目されていない。田中（1985）は、方解石の溶出による泥岩の強度特性の変化について検討しており、興味深い結果を得ている。すなわち、方解石の溶出により泥岩の強度低下が生じること、強度低下の程度は、泥岩中での方解石の存在状態の違い（方解石が泥岩の構成粒子の骨格を支えているか、単なる間隙充填物として存在するか）に依存すること、が示されている。同様に、林ほか（2005）でも、古第三系泥岩の風化プロセスに、黄鉄鉱の溶解によりもたらされた硫酸が方解石を溶解する現象が影響する可能性が指摘されている。

今回分析を行った藤川層泥岩の場合、新鮮帯では多量の方解石脈が肉眼で確認されるが、新鮮な泥岩の基質に分布する微細な方解石の存在状態ならびに風化帯におけるそれらの溶解の実態は明確ではない。しかしながら、風化帯ほど方解石の溶解が進行し、クラックが明瞭に開口しているため、泥岩の強度低下に影響している可能性が十分考えられる。このメカニズムは、今後より詳細な検討が必要である。

露頭での観察に基づけば、藤川層泥岩には、しばしば径数 m 程度のコアストーン構造が発達するとともに、玉ねぎ状構造をなすコアストーンの剥離面に白色の粉末が付着しているのが認められることがある。コアストーンは、花崗岩や砂岩をはじめ、塊状の泥岩などでもよく見られる。泥岩の場合、白亜系でも第三系でも普遍的に見られるようである（林田，1991）。横田・家村（1994）では、天草の古第三系泥岩を対象として、節理面に規制されたコアストーン構造の形態と強度特性が

議論されているが、コアストーン構造形成に及ぼす鉱物学的プロセスは明らかになっていない。これらを踏まえて、今後、泥岩のスレーキング特性とコアストーンの形成の関連性に関する検討も行う予定である。

6. まとめ

1. ボーリングコアの肉眼観察に基づいて泥岩の風化区分を行い、強風化帯・弱風化帯・新鮮帯に区分した。いずれも、地表下数 m までが強風化帯であり、深度 -10m 程度になると新鮮帯に移化する。
2. スレーキング試験の結果、ならびにボーリングコアの観察結果から、今回対象とした泥岩はスレーキングを起こしやすいことが明らかになった。浸水試験では弱風化帯でスレーキングが生じ、乾湿繰り返し履歴を与えると、新鮮帯でも顕著なスレーキングが発生した。
3. 泥岩の風化区分に基づいて複数の試料の X 線回折分析を行って含有鉱物の種類を判定した。その結果、含まれる鉱物は石英、長石、イライト、緑泥石、方解石であることが分かった。方解石は新鮮帯に含まれる例が多い。その他の鉱物は、新鮮部と風化部とで組成に明瞭な差異は認められなかった。なお、イライトと緑泥石は、エチレングリコール処理で回折ピークがほとんど移動しないことから、膨潤性を持たないと判断される。
4. 表層付近の強風化帯のコア表面には、しばしば白色の粉末が付着しているのが確認されるが、鉱物種の同定はできなかった。また、黄鉄鉱ならびに水酸化鉄は XRD では確認されなかったが、酸処理では抽出された。
5. 泥岩のスレーキングの原因は、(1) 新鮮な泥岩が斜面に露出した結果、含まれていた黄鉄鉱の酸化的環境下での溶解が進行、(2) 黄鉄鉱の溶解により硫酸が発生し、泥岩のクラックを充填していた方解石を溶解し、岩盤斜面の透水性が増大、(3) クラックの開口による透水性の増大の結果、岩石と水との接触が増すことにより、

スレーキングが促進，というプロセスが考え得る。

6. スレーキングの鉱物学的原因として，(a) 黄鉄鉱起源の硫酸に起因する硫酸塩鉱物の結晶成長，(b) 泥岩基質に含まれる微細な方解石の溶解による泥岩組織の変化と強度低下，などが考えられ，特に(b)の効果が大い可能性がある。今後は，泥岩の岩石物性に基づいて，より詳細な検討を行う予定である。

謝辞 本研究には，奨学寄付金「岩石の風化による岩盤物性変化に関する研究」（国土防災技術株式会社）の一部を使用した。徳島県徳島農林事務所の百合野靖宏氏，ならびに株式会社西日本テクスの阿部隆久氏と上田博司氏には，現地調査の際にお世話になった。筑波大学地球科学系の松倉公憲教授，ならびに南九州大学の高谷精二教授には，泥岩のスレーキングに関してご教示頂いた。以上の方々に，記して感謝申し上げます。

文献

千木良雅弘，1988，泥岩の化学的風化－更新統灰爪層の例－。地質学雑誌，**94**，419-431。
 千木良雅弘，1998，災害地質学入門。近未来社，206p。
 Andrew GOUDIE and Heather VILES, 1997, *Salt Weathering Hazards*, John Wiley & Sons, 241p。
 林 謙二・山 真典・米田哲朗，2005，幌内層泥岩の風化変質と劣化。応用地質，**46**，198-206。
 林田精郎，1977，和泉層群（白亜紀）の珪化していない泥岩の風化についての二，三の研究。応用地質，**18**，125-130。
 林田精郎，1991，神戸層群と和泉層群の泥質岩の耐久性について。日本応用地質学会関西支部創立20周年記念論文集「地球環境と応用地質」，221-230。
 五十嵐敏文・丸山 悠・朝倉国臣・服部修一，2003，黄鉄鉱起源酸性水の抑制のための方解石含有岩石の利用に関する実験的研究。応用地質，**44**，234-242。

石田啓祐，2002，徳島県の地盤（日本の地盤38）。地質と調査，2002年3号，28-35。
 石田啓祐・橋本寿夫・香西 武，1996，四国東部，下部白亜系羽ノ浦層の岩相層序と生層序－その2。羽ノ浦丘陵下部白亜系の再検討－。徳島大学総合科学部自然科学研究，**9**，23-47。
 石田啓祐・西山賢一・佐藤威臣・竹熊隆宏・長谷川修一，2006，泥質岩の風化指標としての微細黄鉄鉱抽出法。徳島大学総合科学部自然科学研究，**20**，印刷中。
 川野辰康・小坂和夫，2002，中世石窟遺構の塩類風化－鎌倉のやぐらの例－。応用地質，**43**，124-133。
 朽津信明・尾崎哲二，1999，史跡・吉見百穴における蒸発岩。地質学雑誌，**105**，266-272。
 松倉公憲・木股三善・谷津栄壽，1979，柿岡盆地北部，東山におけるハンレイ岩の風化と地すべり粘土の生成。地理学評論，**52**，30-39。
 Yukinori MATSUKURA and Eiju YATSU, 1982, Wet-dry slaking of tertiary shale and tuff. Transactions, Japanese Geomorphological Union, **3**, 25-39。
 Masaaki MIYAHARA, Yohei UNO, Ryuji KITAGAWA and Ryuichi YATABE, 2005, Chlorite exhibits a little swelling property formed in green rock distributed in the Nishinotani landslide area, Ehime, SW Japan. Journal of the Japan Landslide Society, **42**, 69-73。
 宮崎仁司，1992，ダム基礎岩盤の風化とその対応の事例。日本応用地質学会九州支部第9回研究発表会予稿集，5-8。
 水谷伸治郎，1976，頁岩の風化－その変質過程の速度論的考察－。新潟大学地質研究報告，**4**，445-457。
 日本地すべり学会 地すべりに関する地形地質用語委員会編，2004，地すべり－地形地質的認識と用語。日本地すべり学会，318p。
 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・渡部良朋，1998，泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ。応用地質，**39**，261-272。
 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・佐々木和裕・

- 長岡 亨, 1999, 不飽和領域での堆積岩の化学的風化作用. 応用地質, **39**, 511-523.
- 笹木圭子, 1988, 黄鉄鉱の常温酸化溶解に関する実験地球化学的研究. 鉱物学雑誌, **27**, 93-103.
- 関 陽太郎・酒井 均, 1987, 千葉県館山市船形磨崖仏十一面観音像の劣化と水・岩石相互作用. 岩石鉱物鉱床学会誌, **82**, 230-238.
- 鹿園直建・木村進一・岩井修平, 2002, 化学的風化作用に伴う石膏の生成と原岩鉱物組成との関係. 応用地質, **43**, 134-142.
- 白水晴雄, 1988, 粘土鉱物学. 朝倉書店, 185p.
- 須藤談話会編, 2000, 粘土科学への招待. 三共出版, 292p.
- 高谷精二, 2001, みかぶ帯地すべりの粘土鉱物の特徴. 日本応用地質学会平成 13 年度研究発表会講演論文集, 175-178.
- 田中芳則, 1980, 水分ポテンシャルからみた泥岩の乾燥収縮と湿潤膨張. 応用地質, **21**, 123-131.
- 田中芳則, 1985, 方解石の溶出に伴う泥岩の組織と物性の変化. 応用地質, **26**, 129-135.
- 谷本親伯・青木俊彦・田島裕樹・岩田修一・舩屋直・津坂仁和, 2004, 南紀地区頁岩のスレーキング特性とトンネル施工. 材料, **53**, 447-453.
- 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**, 72-78.
- Atsuo TSUSHIMA and Yukimasa OHO, 1999, Mineralogical weathering of mudstone in western Shimane Peninsula, Japan. Jour. Geol. Soc. Japan, **105**, 852-865.
- Eiju YATSU, 1987, *The Nature of Weathering -An Introduction*. Sozosya, 624p.
- 横田修一郎・家村克敏, 1994, 天草古第三系泥岩中のコアストーン構造. 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学), **27**, 157-171.
- 吉田幸信・高田修三・横田公忠・谷田部龍一, 2003, 和泉層群の頁岩のスレーキング特性とメカニズムに関する一考察. 土木学会論文集, **750/III-65**, 15-25.
- 吉村尚久, 2001, 粘土鉱物と変質作用. 地学団体研究会, 293p.
- 地盤工学会編, 1989, 岩の調査と試験. 地盤工学会, 410-418.