

8) 徳島県勝浦川盆地に分布する泥岩の風化による物性変化

Changes of some physical properties of the Cretaceous mudstones in a hillslope,
Katsuura area, Tokushima, Japan

○吾郷裕輔（島根大学大学院）
西山賢一・石田啓祐（徳島大学）
高谷精二（南九州大学）
磯野陽子（エイトコンサルタント）
佐藤威臣・竹熊隆宏（国土防災技術）

1. はじめに

山地を構成する新第三系などの泥岩は、掘削によって露出すると、急激にスレーキングを起こすことがある¹⁾。これは、漠然とながら泥岩に含まれる膨潤性粘土鉱物が原因と考えられてきた²⁾。しかしながら、膨潤性粘土鉱物を含まない泥岩でもスレーキングを生じ、著しく劣化していることがある。ところで、こうした泥岩には黄鉄鉱の含まれるものも多いが、これの酸化は、泥岩の化学的風化の主因と考えられている³⁾。このため、スレーキングの原因をこのような化学的な風化も含めて検討してみる必要がある。

徳島県勝浦川盆地に分布する下部白亜系藤川層の泥岩は、斜面の掘削時にスレーキングを起こすことがあるが、X線回折の結果では膨潤性粘土鉱物をほとんど含まない⁴⁾。しかし、微細な黄鉄鉱を含んでいる⁵⁾。そこで、藤川層のボーリングコア試料を用いて泥岩の種々の物性値を測定し、表層から深部に向かってのそれらの変化に基づき、風化帯形成の機構を検討した。

2. 対象としたボーリングコアの風化区分

ボーリングコアは勝浦川盆地の丘陵斜面(図-1)で掘削されたもので、図-2に示すように深度25mである。掘削による泥岩の破碎は確認されたが、コア観察のみでは、顕著なスレーキングの発生は確認できなかった。しかし、地表近くのコアは著しく角レキ状～細片化しているため、スレーキングを起こした可能性がある。コアの形状、色彩の変化、含まれる方解石脈の量に基づいて泥岩コアの風化区分を行った。その結果、深部から、①灰黒色の柱状コアからなり、方解石脈を多く含む新鮮帯、②主に灰黒色ないし少し褐色化した短柱状コアからなり、方解石脈を少量含む弱風化帯、③主に褐色化した角礫状～細片状のコアからなり、方解石脈をほとんど含まない強風化帯、の3つを識別した(図-2)。

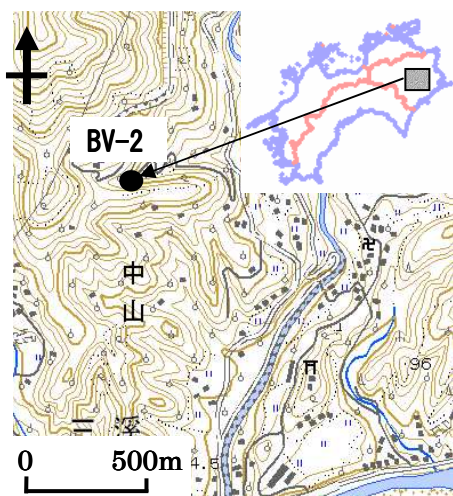


図-1 ボーリング地点の位置図

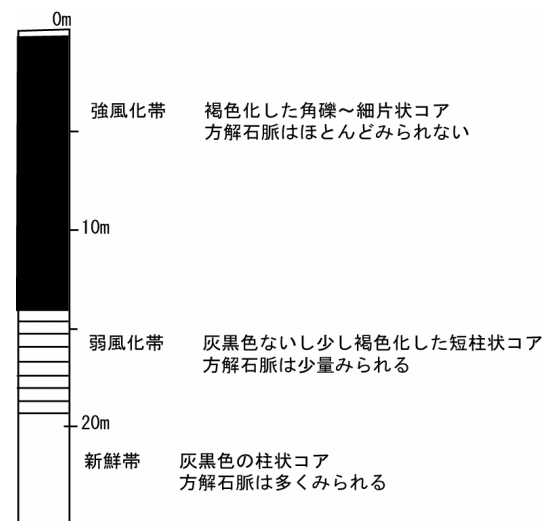


図-2 ボーリングコア(BV-2)の柱状図

3. 試験方法

膨潤性粘土鉱物をほとんど含まない泥岩が、なぜこのように風化するのかを調べるため、スレーキング試験とともに泥岩のもつ以下の物性値の深度方向への変化を調べた。

- ①新鮮な泥岩がどの程度スレーキングを起こすのか評価するために、乾湿繰り返し過程を与える道路公団基準⁶⁾のスレーキング試験を行い、スレーキング指数と吸水率の変化を測定した。
- ②水浸法⁶⁾による比重・有効間隙率を測定した。
- ③水銀圧入型ポロシメーター(Pascal240)により、間隙径 $1\mu\text{m}\sim 0.004\mu\text{m}$ 区間の間隙量を測定した。間隙径の特徴を示す指標として、1) 単位質量当たりの総間隙量、2) 間隙径 $1\sim 0.1\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}\sim 0.01$, $0.01\sim 0.004\mu\text{m}$ の各区間の単位質量当たりの間隙量、3) 間隙径別間隙量の頻度分布、で表した。また、間隙径分布の測定と同時に、水銀圧入法による密度と有効間隙率を求めた。
- ④肉眼観察により、風化に伴う岩石表面の色彩の変化がみられたことから、コニカミノルタ製の色彩計 (SPAD-503) で岩石表面の色彩値を測定し、 $L^*a^*b^*$ 表色法で表現した。
- ⑤泥岩の化学組成を求めるために CNS 元素分析 (PE2400) を行い、全炭素量、無機炭素量、有機炭素量、全硫黄量を求めた。
- ⑥岩石の可溶成分の溶解の指標として、蒸留水 50ml に粉末試料 20g を懸濁させた溶液を作成し、72 時間経過後の溶液の pH と電気伝導度を測定した。

4. 試験結果

①スレーキングのしやすさ

道路公団基準のスレーキング試験の結果、乾湿繰り返し過程において、1 サイクル目より 2 サイクル目の吸水率の増加値が大きい。すべての試料がサイクル数 3~4 で細片化する(図-3, 4)。試料はサイクル数の増加に伴い段階的に分割し、細片化する。また、サイクル数を 5~10 回と増やしても、細片化や吸水率はあまり変化しない。各風化帯の試験終了時の吸水率の平均値は新鮮帯 6.92%、弱風化帯 10.62%、強風化帯 9.70%となる。試験後の試料の割れ方を見ると、方解石脈や層理面・ラミナに沿ってクラックが入り、碎片化したものが多い。これらのことから、スレーキングは主に弱風化帯と強風化帯で活発に進行し、特に深度 3m より浅い部分で著しい。一方、新鮮帯では不活発である。なお、水浸のみを与える土木学会基準のスレーキング試験では、深度 3m 未満の試料においてのみ、明瞭なスレーキングの進行が確認できた。



図-3 スレーキング試験時の試料の変化

②比重・有効間隙率の変化

図-5 に示すように、深度が浅くなるほど比重 G_n が減少し、有効間隙率 n_e が増加する傾向が認められる。比重 G_n は深度 15m 付近で大きく減少し、さらに地表付近で急減するゾーンが認められた。これに対応して、有効間隙率 n_e は深度 15m 前後で増加し、地表付近で激増する。

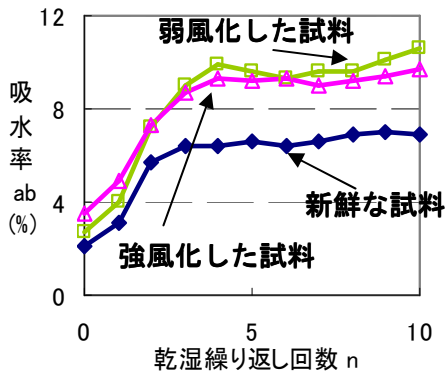


図-4 乾湿繰り返し回数 n と吸水率 ab の変化

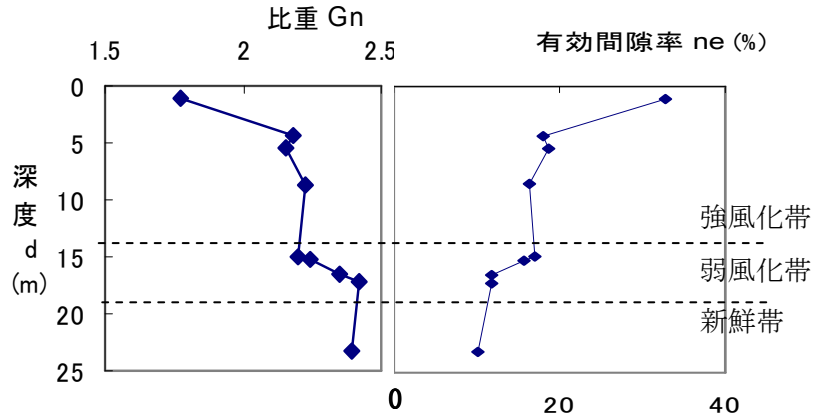


図-5 比重 G_n ・有効間隙率 ne の深度変化

③間隙径分布の変化

総間隙量 V は深度が浅くなるほど増加し、強風化帯下部(深度 10m)と強風化帯上部(深度 3m)で急増する(図-6). 各間隙径の間隙量では、間隙半径 $1.0\sim 0.1\mu m$ の間隙はどの深度でもほとんど確認されず、間隙半径 $0.1\mu m\sim 0.01$, 間隙半径 $0.01\sim 0.004\mu m$ の間隙が間隙量のほとんどを占めている. 間隙径別間隙量の頻度分布では、強風化帯上部の深度 4m で $0.01\mu m$ 程度の微小な間隙の増加がみられた(図-7). さらに、深度 0.5m では、 $0.01\mu m$ と $0.05\sim 0.1\mu m$ の間隙が増加した. なお、スレーキング試験後の試料では、それぞれの深度で間隙径 $0.01\mu m$ 前後の間隙が増加している(図-8).

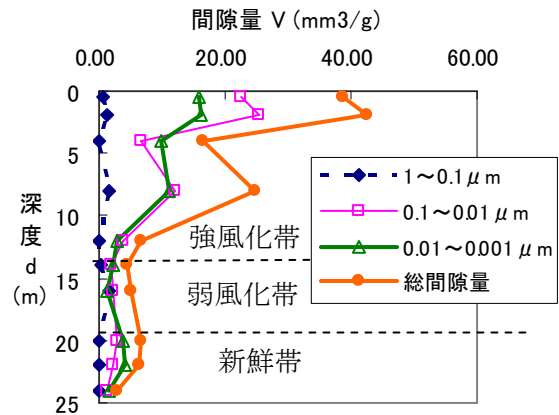


図-6 間隙量 V の深度変化

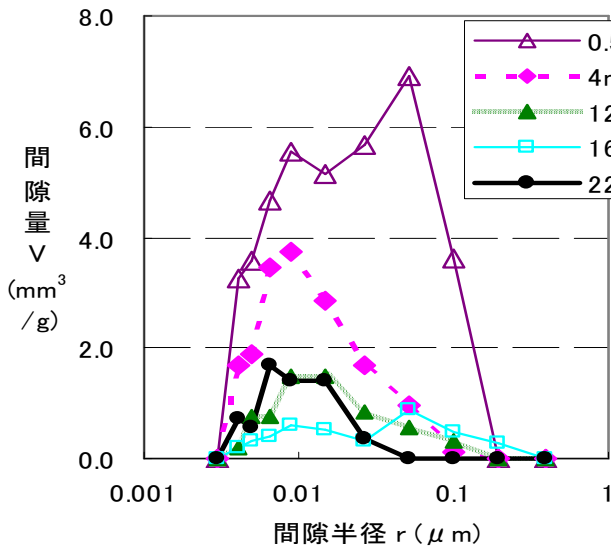


図-7 間隙半径 r 別にみた間隙量 V の頻度分布 (スレーキング試験前)

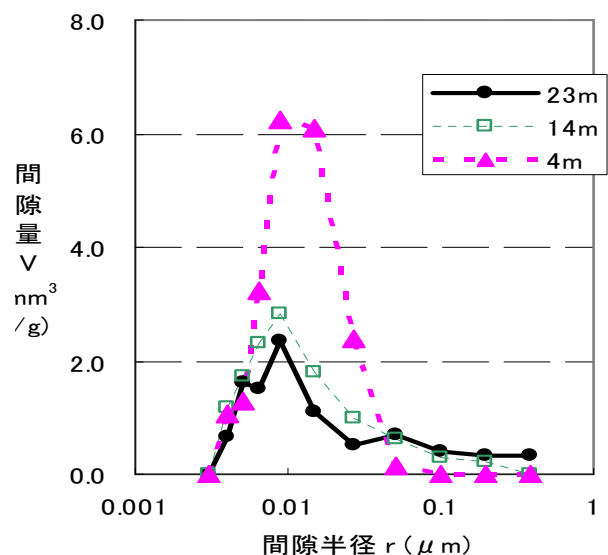


図-8 間隙半径 r 別にみた間隙量 V の頻度分布 (スレーキング試験後)

④色彩値の変化

a*値, b*値はともに浅部ほど値が増加する(図-9). b*値の変化はa*値より大きく, 深度dと高い相関をもって変化している. また, b*値は, 弱風化帯上部(深度15m付近)および強風化帯上部(深度3m以浅)で値が急増している. この深度は比重や有効間隙率が急変したゾーンと一致する.

⑤CNS分析による硫黄・炭素の深度変化

硫黄・有機炭素・無機炭素の深度変化を図-10に示す. 測定値のばらつきが大きい, 風化帯ごとに平均値をとると, 硫黄Sは新鮮帯0.096%, 弱風化帯0.045%, 強風化帯0.047%となり, 新鮮帯に多く, 弱風化帯およびそれ以浅では減少している. 無機炭素Cは新鮮帯0.43%, 弱風化帯0.20%, 強風化帯0.064%となり, 新鮮帯でやや多く, 弱風化帯で減少し, 強風化帯になると激減する.

⑥pH・電気伝導度ECの深度変化

pHは, 新鮮帯から弱風化帯・強風化帯上部にかけて, すなわち深度が浅くなるほど増加し, 強風化帯の最上部ではやや低下した(図-11). 電気伝導度ECは, 新鮮帯で最も高い値となり, 深度が浅くなるにつれ減少したが, 強風化帯の最上部では増加した.

5. 藤川層泥岩の風化機構

測定値・分析値の深度変化の傾向を図-12にまとめた. 新鮮帯と弱風化帯の境界付近(深度20m)で硫黄が減少しているが, 石田ほか³⁾の結果とあわせると, この深度が黄鉄鉱の消失フロントと見なすことができる. 弱風化帯上部から強風化帯下部にかけて, 比重の減少, 間隙量の増加, 無機炭素の減少が認められるが, これから, 強風化帯の基底付近が, 方解石の消失フロントとみなすことができる. 地表付近(深度3m以浅)では, 比重の激減・微小な間隙の激増・色彩値の増加が認められる. これらはスレーキング試験による吸水率の増加と調和的である. 従って, 地表3m以浅が顕著なスレーキングを起こすゾーン(強スレーキング帯と呼ぶ)とみなせる. 上記のような岩石物性の一連の変化は, 次のようなプロセスによると推定できる.

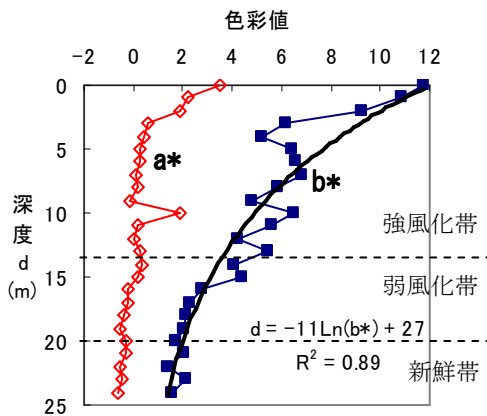


図-9 色彩値の深度変化

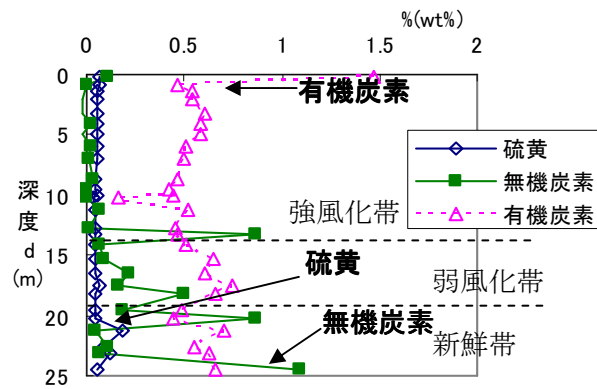


図-10 各成分の深度変化

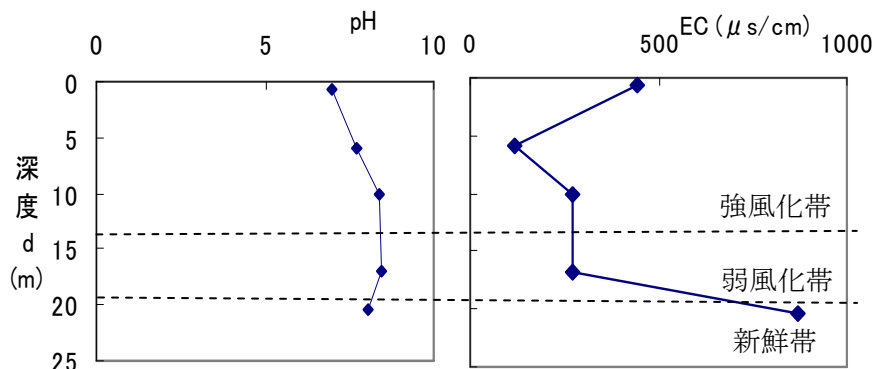


図-11 pH, ECの深度変化

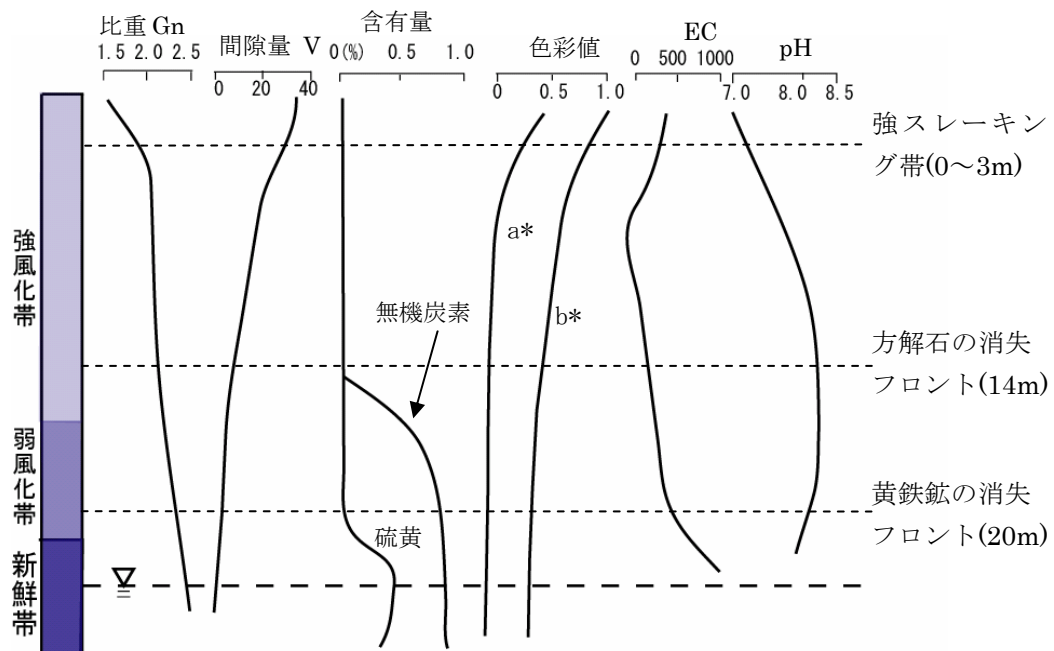


図-12 各指標の深度方向への変化

①地表付近での物性の変化

地表付近での比重の急減と間隙率の急増は、地表付近では岩石が乾湿繰り返しを受けやすい環境下におかれることで、スレーキングを起こし、細片化したためと考えられる。同一深度の試料のスレーキング試験前後の試料の間隙量を比較すると、スレーキング試験後では $0.01\mu\text{m}$ 程度の微小な間隙が増加している。今回対象とした泥岩には膨潤性粘土鉱物が含まれていないこと、 $0.01\mu\text{m}$ 付近以外の間隙量の急増が認められないことから、泥岩のスレーキングの原因は、膨潤性粘土鉱物の膨潤や、含まれる鉱物の急激な溶解とは考えにくい。スレーキングの詳細な機構は今後さらに検討が必要であるが、スレーキング試験時の割れ方、吸水率の増加傾向や間隙径分布を考慮すると、層理面・ラミナや方解石脈など、初生的に物性の異なる境界付近に存在する微細なクラックに、雨水および空気の浸透による膨張と、乾燥による収縮の繰り返しが作用することで、急速にクラックが伸長したことが考えられる。

深度 3m より浅い「強スレーキング帯」では、スレーキングによる細片化に伴い、岩石中の間隙が増加するため、間隙内に空気や雨水が侵入しやすと考えられる。このため、泥岩中の酸化反応により鉄鉱物が析出し、 a^* 値と b^* 値が増加したと推定できる。

②方解石の消失

弱風化帯上部～強風化帯下部の比重の減少と無機炭素の減少は、方解石の消失と対応し、方解石脈の消失ともあわせて考えると、深度 14m 付近が方解石の消失フロントと見なされる。千木良³⁾では、方解石の溶解は黄鉄鉱の溶解により発生する酸性水によるものと考えられている。しかし、本泥岩では、泥岩の硫黄の大半が黄鉄鉱であるとしても、黄鉄鉱の量に対する無機炭素(方解石)が非常に多いことや、pH が 7 より高い値をとること、電気伝導度が浅部になるほど小さい値をとることから、無機炭素の減少は地表から浸透した弱酸性の地下水により溶解したためと考えられる。方解石の消失は、長期的には泥岩の岩石組織を変化させ、強度低下をもたらす要因と考えられる。

③黄鉄鉱の消失

新鮮帯～弱風化帯下部で顕著な硫黄の現象は、泥岩中の黄鉄鉱の消失に由来すると考えられる。黄鉄鉱の消失フロントは深度 20m 付近であり、ボーリングの坑内水位とほぼ一致している。このため、黄鉄鉱の消失が起こる深度は地下水位に影響されており、地下水位直上の不飽和な環境条

件下特に卓越している可能性がある。地下水位より上方では、岩盤中のクラックを通じた酸素の侵入が起こりうることから、この酸素と黄鉄鉱との反応が生じているのであろう。一般には、黄鉄鉱は酸化して硫酸が発生し、これが方解石を溶解させると考えられている³⁾。また、黄鉄鉱の消失フロント付近での岩石物性の変化が明瞭でない理由として、黄鉄鉱の含有量が方解石の含有量に対して少ないことが考えられる。

以上のことをもとにした風化過程を図-13 に示す。

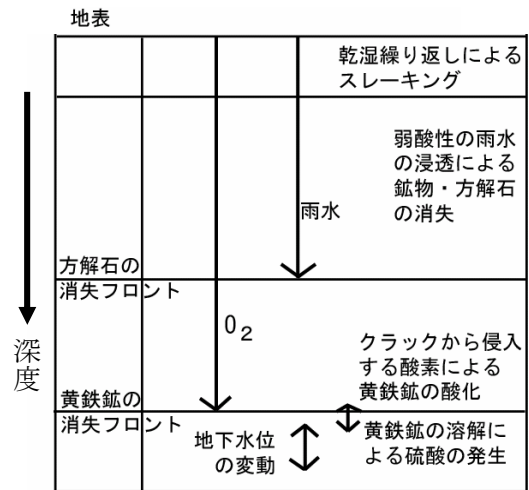


図-13 推定された藤川層泥岩の風化過程

6. まとめ

膨潤性粘土鉱物をほとんど含まない泥岩でも地表近くでは細片状に劣化していることから、深度 25m の白亜系泥岩ボーリングコアを用いて深度方向へのいくつかの物理指標と化学指標の変化を調べてみた。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 深度 25m のコアは見かけ上、いくつかの風化帯に区分することができ、比重、間隙率、間隙径分布などの物理的指標値は、いずれもこの区分に対応して変化している。
- (2) 化学的变化として、深度 20m の黄鉄鉱消失フロント、深度 14m の方解石消失フロントが識別でき、方解石は物性値変化と対応している。色彩値変化は酸化過程を表すと考えられる。
- (3) 地表直下 3m までの範囲では角礫状～細片状コアであり、これは、スレーキング試験や間隙径分布の変化から乾湿繰り返しによるスレーキングの進行と鉱物の溶解によるものと考えられる。
- (4) 膨潤性粘土鉱物をほとんど含まない本コアの新鮮部分を使用した室内スレーキング試験でも明瞭なスレーキングの進行が確認できた。
- (5) 深度 20m の黄鉄鉱消失フロントは現在の地下水位に近く、したがって、これら一連の化学変化とそれに対応した物理性質の変化は現在の丘陵斜面における地下水位に大きく支配されたものと考えられる。

引用文献

- 1) Ganesh D. Yoneda, T. Kato, M. and Kaneko, K. (2002): Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks, *Engineering Geology*, Vol. 65, pp.31-45.
- 2) Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1982): Wet-dry slaking of tertiary shale and tuff. *Transactions Japanese Geomorphological Union*, Vol. 3, pp.25-39.
- 3) 千木良雅弘(1988): 泥岩の化学的風化—新潟県更新統灰爪層の例—, *地質学雑誌*, Vol.94, pp.419-431.
- 4) 西山賢一・石田啓祐・佐藤威臣・竹熊隆宏・長谷川修一(2006): 鉱物組成に基づく黄鉄鉱含有泥岩のスレーキング特性, *徳島大学総合科学部自然科学研究*, no.20, pp.43-54.
- 5) 石田啓祐・西山賢一・伊藤威臣・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*, no.20, pp.25-33.
- 6) 地盤工学会編(1989): 岩の調査と試験, *地盤工学会*, pp.372-415.