

## P-6 鉱物組成に基づく黄鉄鉱含有泥岩（下部白亜系藤川層）

### のスレーキング特性

Slaking characteristics of pyrite-bearing mudstone (Lower Cretaceous Fujikawa formation)  
based on mineral compositions

- 徳島大学総合科学部 西山賢一
- 徳島大学総合科学部 石田啓祐
- 国土防災技術株式会社 佐藤威臣
- 国土防災技術株式会社 竹熊隆宏
- 香川大学工学部 長谷川修一

#### 1. はじめに

第三系などの泥岩にはスレーキングが顕著に発生するものが知られており、掘削のり面の変状といった建設工事上の問題を引き起こす例がある。スレーキングの原因として、泥岩に含まれるスメクタイトの吸水膨張が挙げられることが多い。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確になっていない。

一方、泥岩などに含まれる黄鉄鉱は、地表の酸化的環境下では溶解して硫酸となるが、水分の蒸発などに伴って硫酸起源の各種の塩類（石膏・テナルダイト・ジャロサイトなど）が生成し、そ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（Goudie and Viles, 1997；大山ほか，1998など）。しかし、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、既存の研究では必ずしも明確ではない。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。

#### 2. 藤川層の地質概要

藤川層は、四国東部の北部黒瀬川帯（正木帯）ペルム紀付加コンプレックスを不整合に覆う下部白亜系物部川層群に属する（石田，2002）。物部川層群は白亜紀前期のデルタ～浅海の堆積物で構成され、徳島県の勝浦川盆地周辺に分布する。藤川層は下部（約50m）の基底礫岩に始まり、砂岩を伴うが、中～上部は黒色の泥岩および泥岩勝ち互層（150～500m）を主とする。藤川層の泥岩は、白亜紀の無酸素事変に関わる還元環境で生成した特異な堆積物とみなされており（前田ほか，1987）、特定層準の黒色の泥岩からは、浮遊生のアンモナイトやプランクトンの放散虫殻を例外的に産する他は、底生生物の生活の痕跡は乏しい（石田ほか，1996）。抽出された放散虫殻は、本来は珪酸の殻で構成されるが、殻自体やその内部が黄鉄鉱の結晶、とくにフランボイダルな結

晶集合体で置き換えられている事例が普通に見られる。また微化石と共に、黄鉄鉱のフランボイダルな結晶集合体（直径 0.1mm 程度）が抽出されることも多い。

### 3. 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を行った。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する。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。方解石脈は激減）、強風化帯（黄褐色を呈し、軟質化・土砂化。方解石脈はほぼ消失。コア表面には、しばしば白色の微細な粉末が付着）である。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。

### 4. コア試料の分析方法

コア試料を用いて、スレーキング試験、酸処理による微細黄鉄鉱の抽出、X 線回折による主要鉱物組成の分析を実施した。スレーキング試験は、(1) 土木学会基準のスレーキング試験（浸水状態でのスレーキング特性）、(2) 道路公団基準の乾湿繰り返し試験（乾湿繰り返しを与えた際のスレーキング特性）、の両方を実施した。酸処理による微細黄鉄鉱の抽出法は次の手順による。1) HF（フッ化水素酸）処理による粘土鉱物の分離、2) 重液処理による重鉱物の分離、3) 黄鉄鉱と酸化鉄・水酸化鉄鉱物の抽出・検鏡、4) 走査電子顕微鏡による黄鉄鉱の結晶形状同定、である。粉末 X 線回折分析（XRD）の測定には、香川大学工学部の X 線回折装置を用い、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）を実施した。

### 5. 分析結果

表-1 に、土木学会基準による水浸状態での試験結果を示す。ここで、スレーキング指数は、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、をそれぞれ表す。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図-1 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。5 サイクルを越えると、吸水率の増加はほぼ頭打ちとなる。

表-1 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

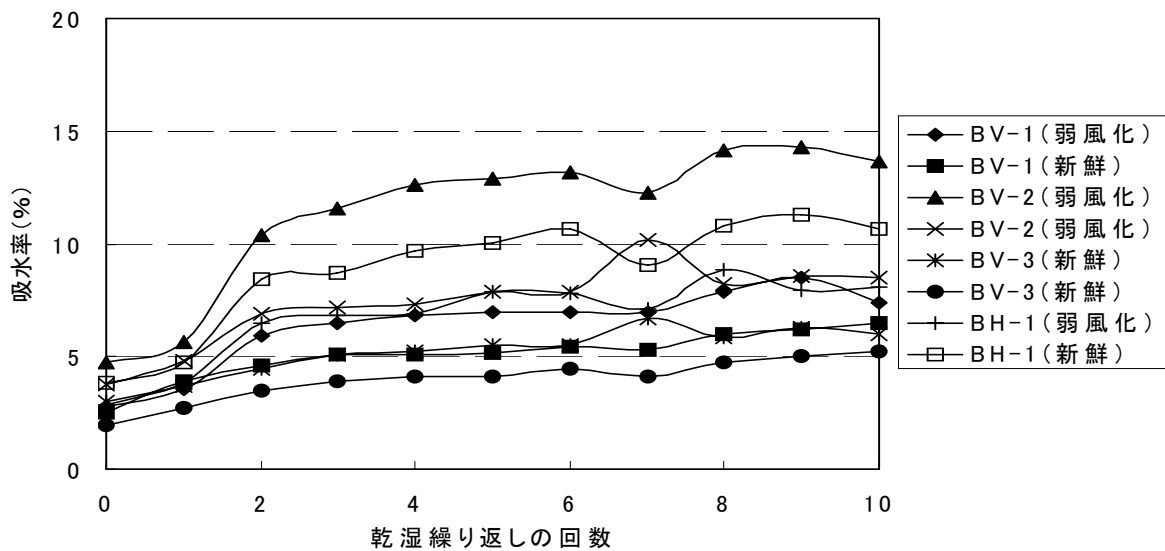


図-1 乾湿繰り返しによる吸水率の変化

黄鉄鉱の微細粒子はすべてのコア試料の新鮮岩から抽出された。また酸化鉄・水酸化鉄に変質した黄鉄鉱の仮像は弱風化帯・強風化帯に存在した。抽出された黄鉄鉱粒子の大きさは、直径 2mm 以下であるが、最大は長さ 5mm を超える。抽出された黄鉄鉱粒子の形状は、仮像も含めて、以下のような黄鉄鉱の単結晶や結晶集合体に特徴的な形状のものであった。すなわち、(1) 基本単位が 5 ミクロン前後の球状結晶体が集合してできた木イチゴ状外形のフランボイダル集合体 (図-2)、(2) 基本単位が 5 ミクロン前後の球状結晶集合体の外形がペレット状、卵状、あるいはチューブ状の粒子、(3) 基本単位が 5~10 ミクロンの立方体や 12 面体に準ずる多面体結晶の集合体、(4) 1 辺が 0.5~1 mm の立方体単結晶、である。実体顕微鏡下での黄鉄鉱粒子の色彩は、新鮮なものは金色に近い金属光沢を発するが (図-3)、酸化鉄・水

酸化鉄の集合体に変質しているものは褐～茶の鉄錆色であった (図-4, 5). また酸化による変質の進行段階に応じて, 表面に青～緑色のラスター光彩を放つ皮膜の生じた粒子や, いぶし銀色の光沢を示すものがある. とくに風化が進行したコア試料に含まれる鉄鉱物は, フレーク状や塊状で褐～茶の鉄錆色を呈する酸化鉄・水酸化鉄に変質しており (図-5), 黄鉄鉱の仮像を有する場合も見られた.

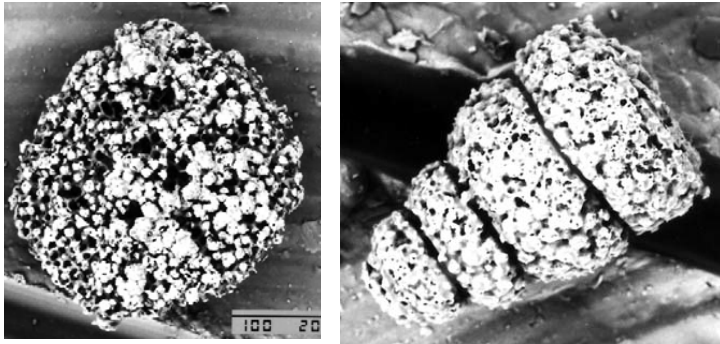


図-2. 左: フランボイダル黄鉄鉱結晶集合体で置換された放射虫殻. 直径約 150 ミクロン. 右: フランボイダル黄鉄鉱結晶集合体で充填された放射虫殻の内形. 長さ約 130 ミクロン.

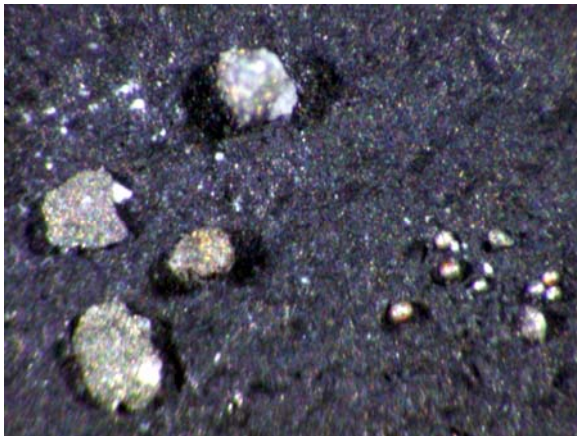


図-3. 黄鉄鉱の塊状集合体 (左) と, フランボイダル集合体 (右). 画面の横幅約 2mm. BV-2 (-22.0~22.1m)

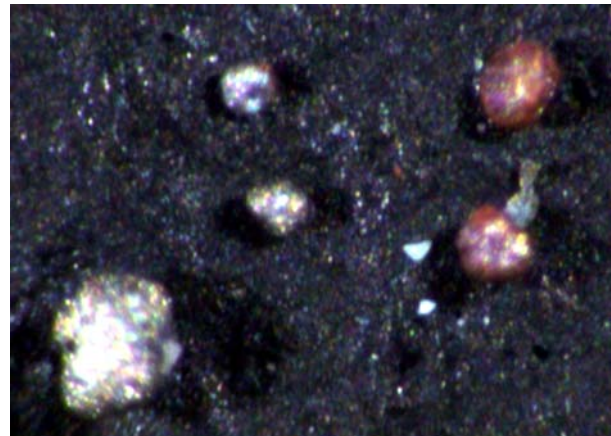


図-4. 黄鉄鉱のフランボイダル集合体 (左: 金属光沢). 黄鉄鉱のフランボイダル状集合体仮像をとどめた酸化鉄・水酸化鉄変質体 (右: 茶色). 画面の横幅約 1mm. BV-3 (-17.1~17.2m).

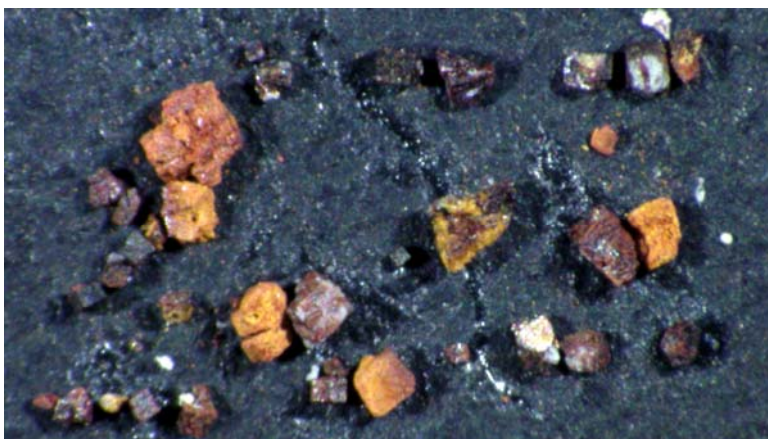


図-5. 酸化鉄・水酸化鉄の粒子. 黄鉄鉱から変質してできたことを示す立方体状仮像をとどめている. 画面の横幅約 4mm. BV-1 (-13.3~13.4m)

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) を図-6 に示す。検出された鉱物は、石英、長石、イライト、緑泥石、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水ひ試料の 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 (図-7)。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。典型的な膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトは、いずれの試料からも検出されなかった。また、黄鉄鉱、水酸化鉄、硫酸塩鉱物の回折ピークも確認されなかった。

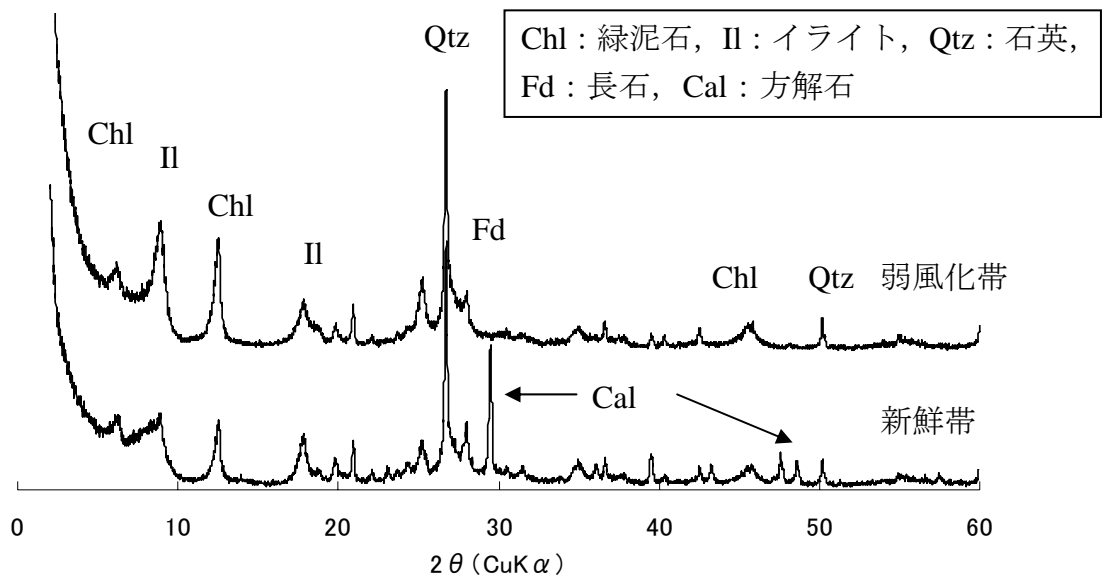


図-6 水ひ試料の X 線回折チャート (BV-1: 上は弱風化帯の深度-5.25m, 下が新鮮帯の深度-13m)

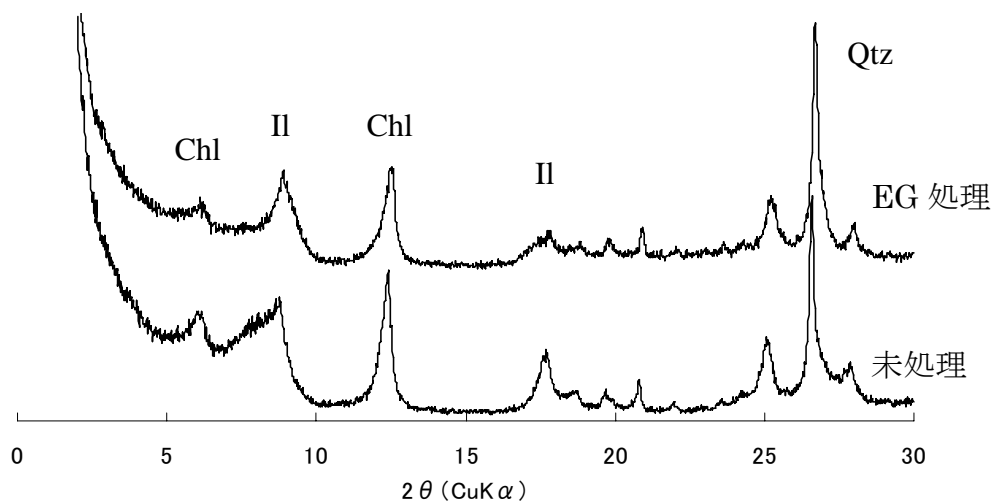


図-7 エチレングリコール (EG) 処理と未処理の試料の X 線回折パターン (BV-3 の深度-18m. 水ひ試料. 下は未処理, 上は EG 処理後)

## 6. 考察

X線回折の結果に基づけば、スレーキングの原因は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、今回の分析では塩類の回折ピークが確認されなかったため、塩類風化が主因とも考えにくい。一方、黄鉄鉱抽出法の結果、泥岩の新鮮帯からは黄鉄鉱が確認されるとともに、風化した泥岩では黄鉄鉱の仮像や、風化生成物と思われる水酸化鉄の微粒子が確認された。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（フェリハイドライト）ないし結晶度が低い鉄鉱物（ゲータイト、ヘマタイト）と考えられる。また、肉眼およびX線回折で確認される方解石は新鮮帯で多く、強風化帯では消失している。これは、黄鉄鉱の酸化起源の硫酸イオンにより方解石が溶解された可能性を強く示唆する。

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、泥岩に含まれる黄鉄鉱は、のり面掘削等により表層の風化部が削剥されることで酸化環境におかれ、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、非晶質ないし低結晶度の水酸化鉄を形成する一方で、硫酸は泥岩の節理面を充填していた方解石脈の溶解を促進させた。さらに、泥岩基質中の微細な方解石の溶解による岩石組織の変化がスレーキングを促進したと考えられる。

藤川層泥岩などの先第三系の泥岩は、一般に硬岩であり、膨潤性粘土鉱物が含まれていないものが多いが、スレーキングによる岩盤の風化が問題となっ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）、このうち、塩類がXRDで確認された事例（林田，1977）は少数である。田中（1985）は、方解石の溶出による泥岩の強度特性の変化を検討し、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、を報告した。藤川層泥岩の場合、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未検討である。しかしながら、方解石の溶解が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。今後、より詳細な検討を行う予定である。

## 文献

GOUDIE, A. and VILES, H., 1997, *Salt Weathering Hazards*, John Wiley & Sons, 241p.

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.

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.

前田晴良・宮田憲一・川路芳弘, 1987, 徳島県勝浦川地域に分布する下部白亜系藤川層の堆積環境について. 高知大学学術研報, **36**, 1-15.

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回発表会予稿集, 5-8.

大山隆弘・千木良雅弘・大村直也, 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.

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.

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.