

泥質岩の風化指標としての微細黄鉄鉱抽出法*

石田啓祐^a・西山賢一^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

Extracting-method of pyrite micrograins as an indicator for mudstone weathering*

Keisuke ISHIDA^a, Ken-ichi NISHIYAMA^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, Kawauchi, Tokushima 771-0144, Japan*

^c *Department of Safety Systems Construction Engineering, Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20*

Hayashi-cho, Takamatsu, Kagawa 761-0396, Japan

Abstract

Applying to the indicator of mudstone weathering, an extracting method of pyrite micrograins and the secondary materials formed by oxidation and hydroxidation was examined using water diluted HF (3%). Based on the condition of extracted materials, the weathering grade of the drilling-cores of the Lower Cretaceous Fujikawa Shale Formation was subdivided into *Oxidized-* (weathered), *Fresh-Oxidized Coexistence-*, and *Fresh-* (non-weathered) zones in the order from the ground surface. The *Fresh Zone* is identified by only occurrence of non-altered primary pyrite micrograins that originate a bio-chemical process in sedimentary stage, and are characterized by aggregation of framboidal (raspberry-like), tubal (pellet-like), cubic and dodecahedral shapes. In the *Fresh-Oxidized Coexistence Zone*, pyrite micrograins and the secondary materials (hematite, goethite and limonitic hydrous ferric oxides) formed by oxidation and hydroxidation of pyrite co-exist, whereas the *Oxidized Zone* is characterized by the occurrence of ferric secondary materials without primary pyrites. A pyrite-alternation model was proposed in relation with the progressing of slaking. The *Extracting-method of pyrite micrograins* is useful even the case that the pyrite peak is not detected by X-ray analysis because of lower containing percentage.

Keywords: *mudstone weathering, slaking, framboidal pyrite, oxidation, hydroxidation, extracting methodology, HF-processing, biomineralization, oxygen minimum zone, anoxic event, Cretaceous, Fujikawa Shale, Monobegawa Group, non-accreted formation, Kurosegawa Terrane, environmental geology.*

Corresponding author: Keisuke ISHIDA, e-mail: Ishidak@ias.tokushima-u.ac.jp

* 日本地質学会第113年学術大会応用地質セッションにて講演(高知大会, 2006年9月17日).

1. はじめに

黄鉄鉱 (FeS_2) は海成の泥質岩などに含まれており、地表環境下で水・酸素と接触すると溶解し、硫酸を発生する (例えば、笹木, 1998). この硫酸はカルシウムやナトリウムと反応して石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 無水石膏 CaSO_4 , テナルダイト Na_2SO_4 などの塩類の結晶を生成するが、その際の結晶成長圧は 300-1300 気圧にまで達し (Gouide and Viles, 1997; 千木良, 1998), 展張応力により岩石やコンクリートを容易に破壊することがある. このため、掘削のり面の変状・崩壊や、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、これまでに各地で報告されている (例えば、関・酒井, 1987; 大山ほか, 1998; 朽津・尾崎, 1999).

このようなトラブルを引き起こすことがある泥質岩の塩類風化には、包有する黄鉄鉱などの硫化物が関与するが、計量の困難さからか、泥質岩の黄鉄鉱含有量に関する定量的な報告は少ない. 例えば、全イオウの含有量は、四国の泥質岩類で 0.003~0.86% であることから (寺島ほか, 1981), その化合物としての泥質岩中の黄鉄鉱の含有量は、一般には同程度に極微量とみなされ、X 線回折でその有無が検出困難な場合もある. Tsushima and Oho (1999) は新第三系泥質岩の風化帯を論じる中で、光学顕微鏡下での目測により、微細黄鉄鉱粒子 (平均が 20, 最大 100, 最小が 1 ミクロン未満) の含有量を 1~0.1% と推定している.

筆者らはこのような微量の場合でも、泥質岩から直接に黄鉄鉱の微細粒子の抽出を可能にし、その有無を確認する方法を試みた. またこの方法 (以下、黄鉄鉱抽出法と称する) は、黄鉄鉱の含有量が極微量でも検出可能で、抽出された黄鉄鉱とその風化生成物である酸化鉄・水酸化鉄粒子は、泥質岩の風化程度を把握する上で有効であることが、徳島県下の物部川層群下部白亜系藤川層の泥質岩 (石田, 2002) での検討により確かめられたので報告する.

2. 試料岩石の地質概要

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、海水準の変化に対応した堆積サイクルに基づき、四国東部の徳島県地域では、下位より、立川層、下部羽ノ浦層、上部羽ノ浦層、傍示層、藤川層の 5 層に区分される (石田ほか, 1996).

藤川層は、坂本断層の南縁に沿って、上勝町梅木谷入り口付近から鶯、六十部、勝浦町坂本、中山、星谷、黒岩、今山を経て、石原付近の東西地帯に分布する. 藤川層は、東西性の軸を持つ向斜構造を構成しており、下部 (約 50m) は、基底部の礫岩層に始まり、砂岩層を伴うが、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.

藤川層は黒瀬川帯の付加コンプレックスの分布域にありながら、付加コンプレックスとは全く異なり、それらを被覆するデルタ~浅海の薄い堆積物である. したがって、付加コンプレックスを構成する地層や岩体のように、プレート沈み込み付加に伴う「地層の脱水・固結」ならびに「地熱による再結晶」等の履歴は経ていない.

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), 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. 前田ほか (1987) によれば、藤川層の泥岩は、平行葉理がきわめて良く保存されており、底生生物による擾乱をほとんど受けていない. 黒色泥岩に含まれる生痕化石群も小型のコンドリテス (*Chondrites*) を主体とする多様性に乏しいもので、貧酸素環境に特徴的な生痕相とみなされている.

筆者のひとりである石田は、年代解析のために、藤川層の泥岩から放散虫化石を検出している (石田・橋本, 1991; 石田ほか, 1996). 抽出された化石殻は、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 (図 1). また微化石と共に、黄鉄鉱の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しばしばである. これらの事例から、藤川層泥岩の組成や含有鉱物に関して、炭質物や、同じく還元環境の生成物である黄鉄鉱 (FeS_2) が多く含まれることが予想される.

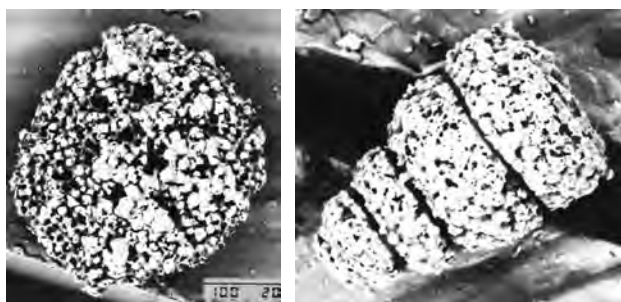


図 1. 左: フランボイダル黄鉄鉱結晶集合体で置換された放散虫殻. 藤川層泥岩産. 直径約 150 ミクロン. 右: フランボイダル黄鉄鉱結晶集合体で充填された放散虫殻の内形. 藤川層泥岩産. 長さ約 130 ミクロン.

このように、1) 堆積物が生物擾乱を受けておらず、平行葉理がよく保存されている点、2) 底生動物化石がほとんど見られない点、3) 生痕相が貧弱で、貧酸素環境に耐え得る特殊なものしか見られない点、以上の 3 点から、藤川層主体の黒色泥岩堆積当時の海域は、おそらく底層

付近に酸素極小層 (oxygen minimum zone) が広く発達していた状況が推定されている。したがって、堆積物も酸化ではなく、還元的环境で生成されることが予想される。またフランボイダル黄鉄鉱顆粒の生成には、硫酸還元菌の作用が指摘されている (古坂, 1986 など)。

3. 抽出方法

2005 年 6 月に掘削された藤川層泥岩ボーリングコア試料 (図 2) からの黄鉄鉱とその風化生成物である酸化鉄・水酸化鉄の抽出試験を 2005 年 7~8 月にかけて、以下の手順で行った。

- 1) HF (フッ化水素酸) 処理による粘土鉱物分離
コア試料 (100-200 g) を粒径 数 mm~1 cm に破碎し、ポリビーカー内で、HF 水溶液 (濃度 3%) を用いて常温で 24~36 時間溶解。残渣を分析ふるい (目開き 0.063 mm) を用いて水洗、蒸発皿に回収の後、ピロリン酸ナトリウム水溶液で数分間加熱処理により粘土鉱物を分散。再び分析ふるい (同上) を用いて水洗、蒸発皿で自然乾燥させる。泥岩試料が炭酸塩を脈状に含む場合は、HF 処理に先立って、希塩酸による脱灰処理を数時間行った。1 回の処理で溶解した試料岩石の重量は処理前後の計量により数~10 数 g であった。
- 2) 重液処理による重鉱物の分離
処理後の残渣から、テトラブロムエタン重液 (比重 2.950~2.975) を用いて重鉱物の分離を行った。
- 3) 黄鉄鉱と酸化鉄・水酸化鉄鉱物の抽出
重液処理により分離した重鉱物を実体鏡下で検鏡し、黄鉄鉱と酸化鉄・水酸化鉄鉱物を抽出した。
- 4) 走査電子顕微鏡による黄鉄鉱の結晶形状同定
検出した黄鉄鉱の結晶形状は SEM (日本電子 T-300) の反射像を用いて同定した。



図 2. 藤川層泥岩のコア試料 (BH-1)。

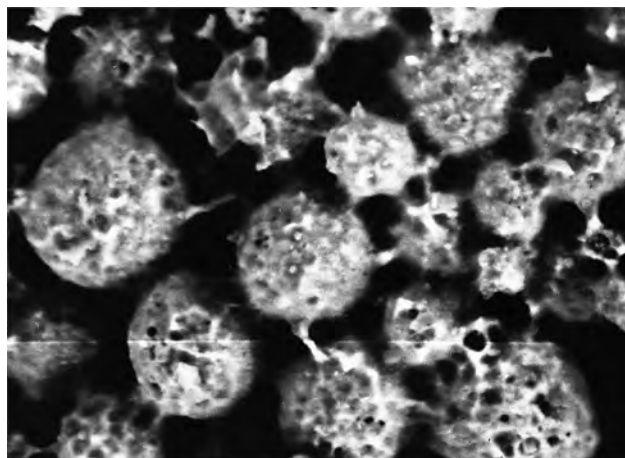
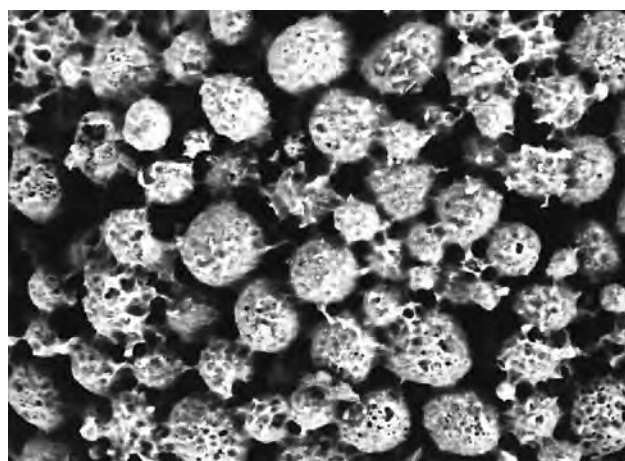
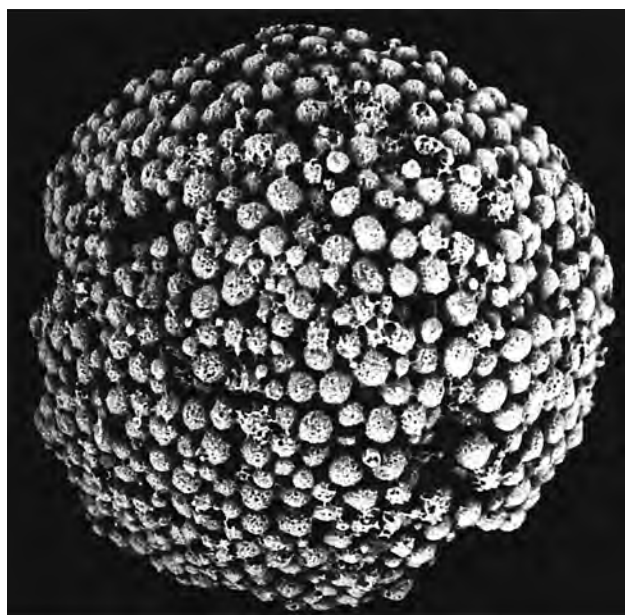


図 3. 上: 木イチゴ状外形のフランボイダル黄鉄鉱結晶集合体, 直径 128 ミクロン. BH-1 (-4.83/-4.90m). 中・下: 同上拡大. 基本単位が直径 5 ミクロン前後の顆粒状結晶体が集合。

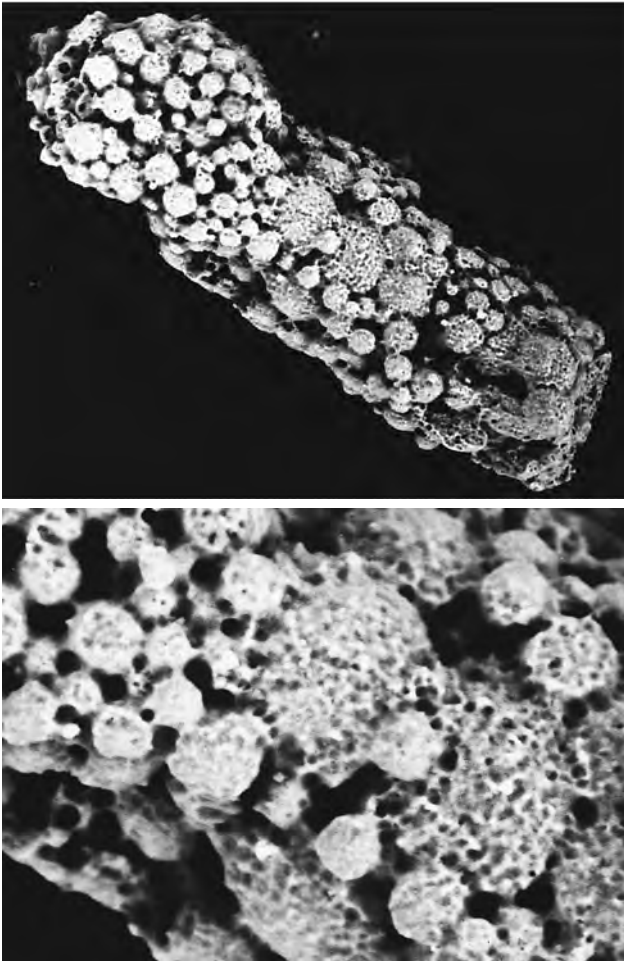


図4. 上：チューブ状の外形をしたフランボイダル黄鉄鉱結晶集合体。外形から生物のペレット起源と推測される。長さ 125 ミクロン。BH-1(-4.83/-4.90m)。下：同上拡大。黄鉄鉱顆粒状結晶は大きいもので粒径 10 ミクロン。

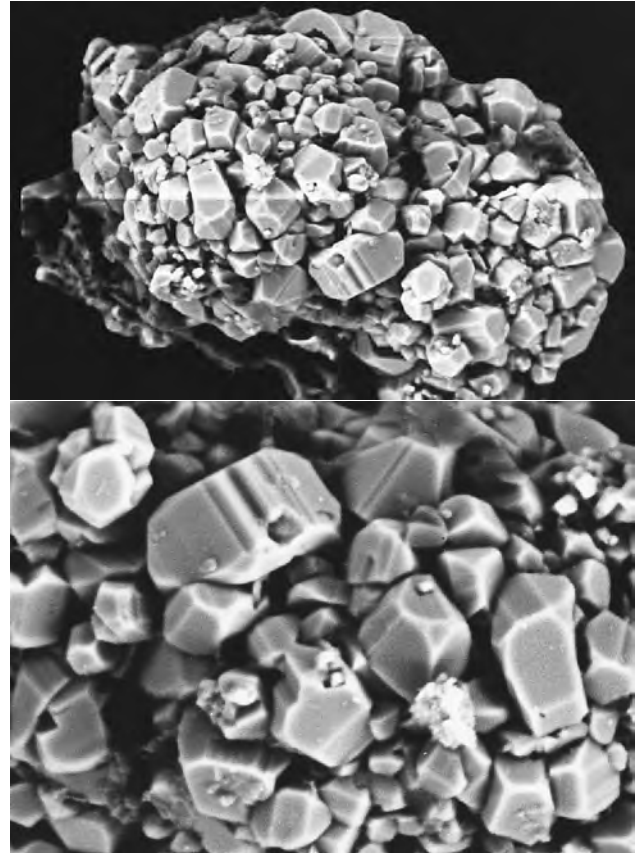


図5. 上：黄鉄鉱の 12 面体に近い多面体結晶粒子の集合体。長径 65 ミクロン。BH-1(-7.40/-7.45m)。下：同上拡大。各多面体黄鉄鉱単結晶の最大長径（中央上）は 10 ミクロン。

4. 結果

黄鉄鉱の微細粒子は X 線粉末回折法では黄鉄鉱結晶のピークが検出できなかったすべてのコア試料の新鮮岩から抽出された（表 1）。また酸化鉄・水酸化鉄に変質した黄鉄鉱の仮像は新鮮岩よりも浅い深度の風化岩に存在した。具体的には、酸化鉄・水酸化鉄に変質した仮像が検出された深度（）内も含めると、BH-1 では -4.25 m 以深、(BV-1 では -13.3m 以深)、BV-2 では -18.3m(-15.3m) 以深、BV-3 では -17.1m (-8.6m) 以深の試料に黄鉄鉱が存在した（表 1）。抽出された黄鉄鉱粒子は、通常直径 0.2mm 以下であるが、最大は長さ 5 mm を超える。

抽出された黄鉄鉱粒子の形状は、仮像も含めて、以下のものであった。

a) 基本単位が 5 ミクロン前後の顆粒状結晶が集合してできたフランボイダル集合体。集合体の外形が木イチゴ状（図 3）、ペレット状、

- 卵状、あるいはチューブ状の粒子（図 4）。
 b) 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（図 5）。
 c) 一辺が 0.1~0.3mm の立方体単結晶（図 10）。

いずれも、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。これらの黄鉄鉱粒子は未変質の新鮮なものは金色に近い金属光沢を発するが（図 6-8）、結晶の形状を留めながら、酸化鉄・水酸化鉄の集合体に変質しているものは、実体鏡下で、褐~茶の鉄錆色であった（図 9-11）。また酸化による変質の進行段階に応じて、表面に青~緑色のラスタ光沢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（図 7）。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 9-11）、黄鉄鉱の仮像を有する場合も見られた（図 10-11）。化学処理により溶解した試料岩石（数~10 数 g）から抽出した黄鉄鉱粒子および酸化鉄・水酸化鉄の粒子は一般に数~10 数個であったが、母岩 17 g の溶解で数百個を超える数が得られた試料もある（表 1）。

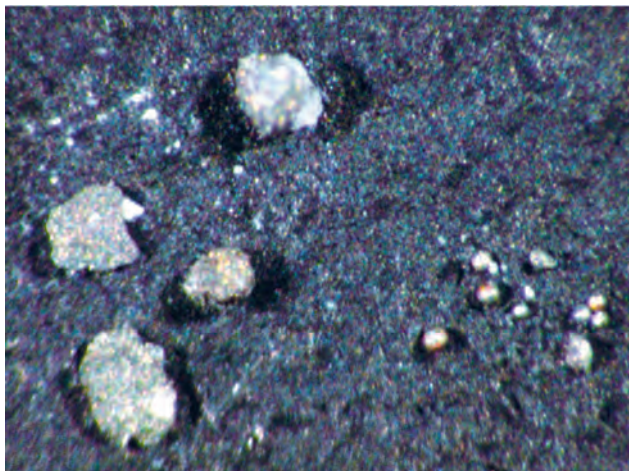


図 6. 黄鉄鉱の塊状集合体 (左) とフランボイダル (木イチゴ状) 集合体 (右). 画面の横幅約 2 mm. BV-2(-22.0/-22.1m).

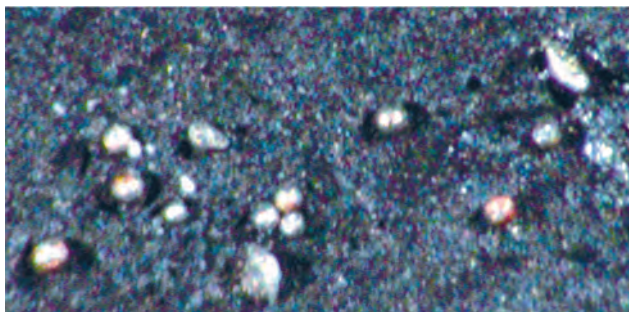


図 7. 黄鉄鉱のフランボイダル (木イチゴ状) およびペレット状 (右上端) 集合体. 表面に酸化皮膜 (茶色) のある球状体有り. 画面の横幅約 1.5 mm. BV-2(-22.0/-22.1m).

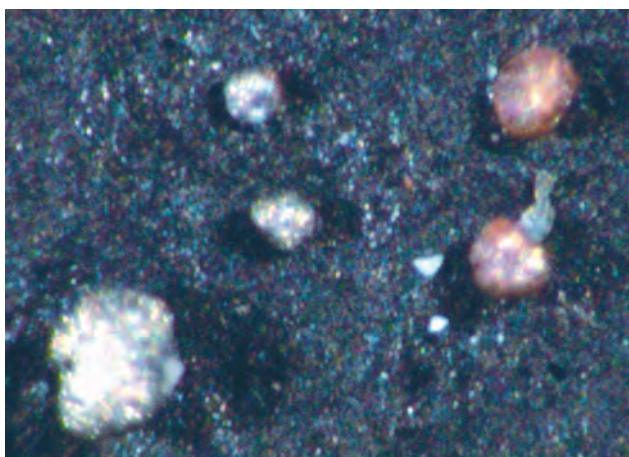


図 8. 黄鉄鉱のフランボイダル (木イチゴ状) 集合体 (左: 金属光沢). 黄鉄鉱のフランボイダル (木イチゴ状) 状集合体仮像を留めた酸化鉄・水酸化鉄変質体 (右: 茶色). 画面の横幅 1 mm. BV-3(-17.1/17.2m).



図 9. 塊状の酸化鉄・水酸化鉄 (左: 立方体黄鉄鉱結晶集合体から変質した仮像). フランボイダル黄鉄鉱集合体 (木イチゴ状) から変質した酸化鉄・水酸化鉄 (右). 画面の横幅約 2 mm. BV-2(-18.3/-18.35m).

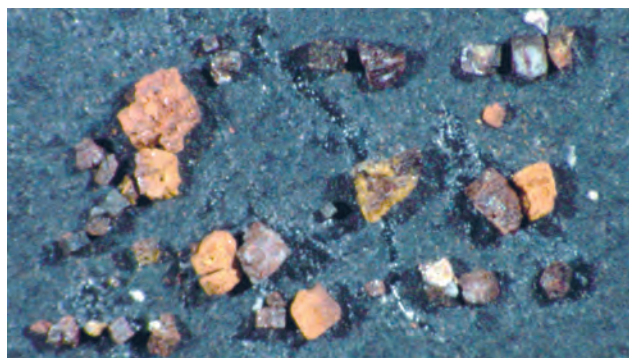


図 10. 酸化鉄・水酸化鉄の粒子 (黄鉄鉱から変質したことを示す立方体仮像を留めている). 画面の横幅約 4 mm. BV-1(-13.3/-13.4m).

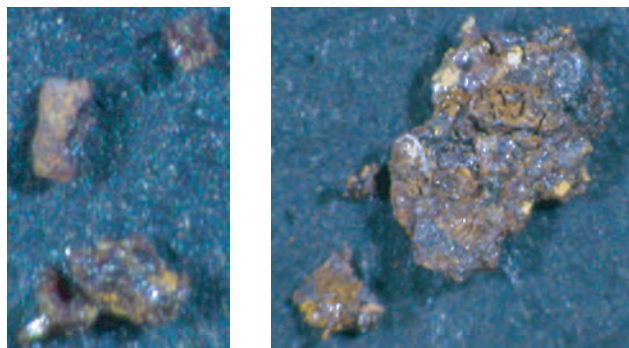


図 11. 左: 酸化鉄・水酸化鉄の塊状および立方体粒子. 立方体粒子 (右上) は黄鉄鉱から変質した仮像. 画面の横幅約 0.5 mm. BV-3(-14.7/-14.8m). 右: フレーク状の酸化鉄・水酸化鉄粒子. 画面の横幅約 2 mm. BV-3(-11.8/-11.9 m).

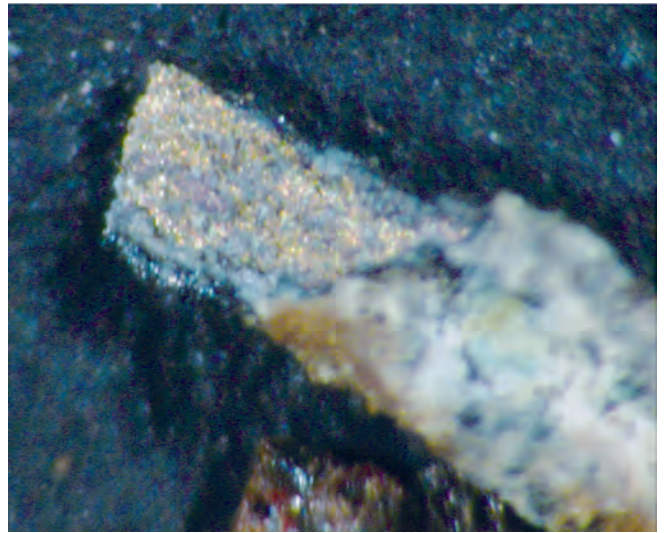
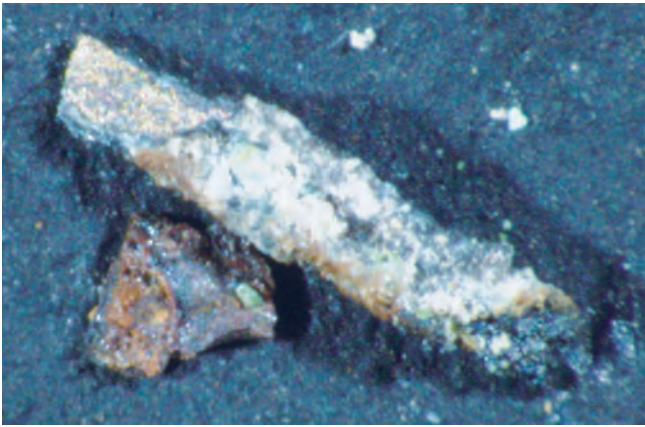


図 12. 左：チューブ状の黄鉄鉱集合体。巣穴状生痕化石の内部を充填。表面付近は黒く酸化・炭化し，表面の一部は褐色に酸化・水酸化。隣下はフレーク状の酸化鉄・水酸化鉄。画面の横幅約 4 mm。BV-3(-8.6/-8.7m)。右：同上拡大。

表 1. 藤川層泥岩コア試料からの黄鉄鉱微細粒子の検出結果と分帯。

コア番号	深度(-m)	黄鉄鉱の有無と形状	酸化・水酸化鉄の有無と形状	黄鉄鉱分帯	溶解重量g
BH-1	4.25/4.30	集合体 (立方体/12面体)	フレーク状/塊状	新鮮・酸化	8
	4.83/4.90	集合体 (木イチゴ状/ペレット状)	フレーク状/塊状	新鮮・酸化	6
	7.40/7.45	集合体 (木イチゴ状/ペレット状/12面体塊状)	フレーク状/ペレット状	新鮮・酸化	9
	14.65/14.70	集合体 (木イチゴ状)	無	新鮮	8
BV-1	0.4/0.5	無	フレーク状/塊状	酸化	10
	5.2/5.3	無	フレーク状/塊状	酸化	18
	13.3/13.4	単体 (立方体仮像)	塊状/立方体 (黄鉄鉱仮像)	酸化	17
BV-2	4.1/4.15	無	フレーク状/塊状	酸化	9
	15.3/15.4	集合体 (木イチゴ状仮像)	フレーク状/木イチゴ状 (黄鉄鉱仮像)	酸化	14
	18.3/18.35	集合体 (木イチゴ状) 表面酸化皮膜	フレーク状/木イチゴ状 (黄鉄鉱仮像)	新鮮・酸化	4
	22.0/22.1	集合体 (12面体塊状/木イチゴ状/ペレット状)	無	新鮮	11
BV-3	8.6/8.7	集合体 (管状の中心のみ, 周囲は酸化)	フレーク状	酸化	7
	11.8/11.9	無	フレーク状	酸化	11
	14.7/14.8	単体 (立方体仮像)	フレーク状/立方体 (黄鉄鉱仮像)	酸化	6
	17.1/17.2	集合体 (木イチゴ状, 一部仮像)	木イチゴ状 (黄鉄鉱仮像)	新鮮・酸化	8

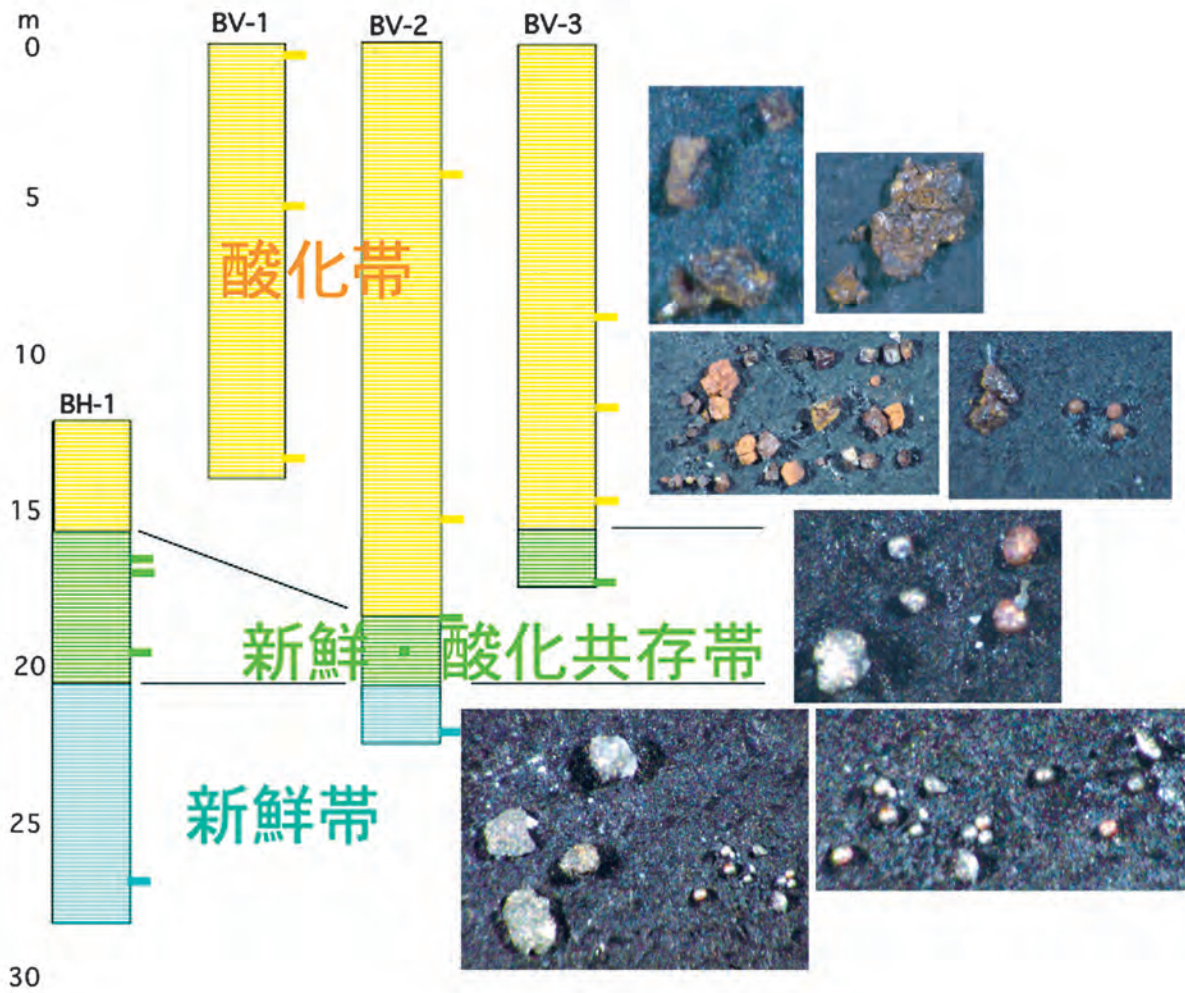


図 13. 黄鉄鉱抽出法による藤川層泥岩コアの分帯. BH-1 は水平孔, BV-1~3 は垂直孔. BH-1 は表層部の掘削のため, 推定される新鮮帯と新鮮・酸化共存帯の境界にレベルを合わせている.

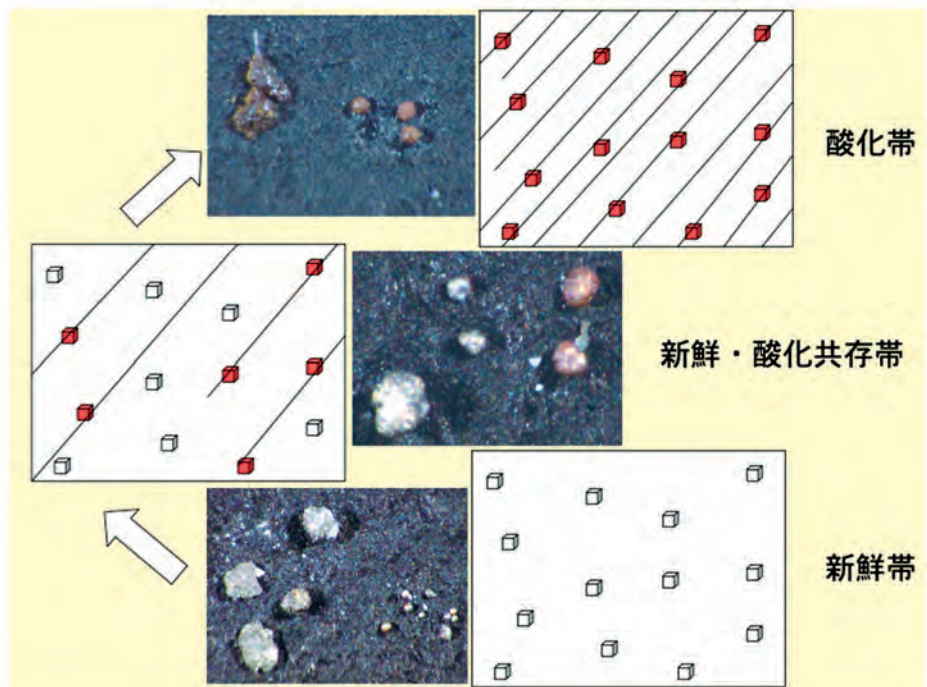


図 14. 藤川層における黄鉄鉱含有泥岩のスレーキング形成に伴う黄鉄鉱微細粒子の風化・変質モデル.

5. 微細黄鉄鉱の風化変質に基づく分帯

抽出された微細黄鉄鉱粒子の“新鮮度”，すなわち未変質な状態から風化に伴う酸化・水酸化鉄への変化の度合いにより，藤川層泥岩のコア試料は，地表から「酸化帯」，「新鮮・酸化共存帯」，「新鮮帯」の3分帯に区分可能である（表1）．未風化な状態から順に説明すると，「新鮮帯」では，黄鉄鉱粒子が未変質であり，まれにフランボイダル黄鉄鉱の表面にラスター光彩を帯びた酸化被膜が見られるものがある．「新鮮・酸化共存帯」では，未変質の黄鉄鉱粒子と黄鉄鉱から変質した酸化鉄・水酸化鉄粒子が共存しており，フランボイダル黄鉄鉱の表面にラスター光彩を帯びた酸化被膜が見られることは普通である．「酸化帯」では，検出された標準的な微細黄鉄鉱粒子（粒径0.1mm前後）はいずれも酸化鉄・水酸化鉄粒子に変質している．

藤川層泥岩の各コア試料に含まれる微細黄鉄鉱粒子の変質による分帯境界は，「酸化帯」と「新鮮・酸化共存帯」の境界が，BH-1では-4.25m以浅，BV-1では-13.4m以深，BV-2では-15.4m / -18.3m間に，BV-3では-14.8m / -17.1m間に位置する．「新鮮・酸化共存帯」と「新鮮帯」の境界が，BH-1では，7.45m / 14.65m間に，BV-2では18.35m / 22.0m間に，BV-3では，17.2m以深に位置する（図13）．

BV-3は-14.8m以深まで「酸化帯」に属するが，BV-3（-8.6 / -8.7m）には，唯一巨大なチューブ状の黄鉄鉱結晶集合体（図12）が中心部のみ未変質で残存していた．その理由として，検出された標準的な微細黄鉄鉱粒子（粒径0.1mm前後）に比べて 1.5×10^4 巨大な粒子（全長4mm，直径0.5mm）が含まれる場合，体積当たりの反応面積が相対的に少ない巨大な粒子は，表面からの接触反応の進行が遅れる結果，中心部が未変質の状態に残存していること，ならびに，生痕起源で巣穴が炭化した皮膜で覆われていることが考えられる．

6. 関連研究による風化帯との比較

検出した微細黄鉄鉱粒子の変質状況に着目して，千木良（1998）による堆積岩の化学的風化メカニズムとの対比を試みると，「新鮮帯」は「新鮮岩体」（千木良，1998）に，「新鮮・酸化共存帯」は「溶解帯」（千木良，1998）に，「酸化帯」は千木良（1998）の「酸化帯」および「表層酸化帯」に相当する．

Tsushima and Oho（1999）は新第三系泥質岩の風化帯を色と硬さにより，I～III帯に区分した．各風化帯の鉱物学的特徴は，I帯では緑泥石と黄鉄鉱が未変質，II帯では緑泥石が部分的に緑泥石-バーミキュライト混合層（Ch-V）に，黄鉄鉱が部分的に鉄の水酸化物または酸化物に変質，III帯では緑泥石のほとんどがCh-Vやバーミキュライトに，黄鉄鉱のほとんどが鉄の水酸化物または酸化物に変質しているとした．ま

た緑泥石と黄鉄鉱の変質は，泥質岩の色と硬さを変化させ，風化帯の形成に重要な役割を果たしているとした．黄鉄鉱の風化変質状況に着目して，同著の風化帯との対比を試みると，筆者らの「新鮮帯」はTsushima and Oho（1999）のI帯に，「新鮮・酸化共存帯」は同著のII帯に，「酸化帯」は同著のIII帯に相当する．ただし，藤川層泥岩のコア試料検討結果からは，目視観察で母岩の色や硬さが，Tsushima and Oho（1999）のI帯に類似の暗灰色であっても，黄鉄鉱の風化変質の状態はすでに「酸化帯」に属している場合がある．

7. まとめ

- 1) 微細黄鉄鉱粒子の抽出法は，粒径が0.5mmに満たない黄鉄鉱とその変質粒子を抽出し，泥質岩の風化の程度を判別する指標とするもので，X線分析で結晶ピークの検出が困難な極微量の場合でも有効である．
- 2) 抽出された微細黄鉄鉱粒子の風化に伴う酸化・水酸化変質の度合いにより，泥質岩は，地表より「酸化帯」，「新鮮・酸化共存帯」，「新鮮帯」の3分帯が可能である．
- 3) 検出された標準的な微細黄鉄鉱粒子（粒径0.1mm前後）に比べて，格段に巨大な粒子（例えば直径0.5mm，全長4mm，体積で 1.5×10^4 倍）は，「酸化帯」においても粒子の中心部が未変質のまま残存することがある．
- 4) 「新鮮・酸化共存帯」では，新鮮で未変質な黄鉄鉱粒子と酸化鉄・水酸化鉄に変質した黄鉄鉱の仮像粒子が共存することから，千木良（1998）の「溶解帯」で黄鉄鉱が硫酸+鉄の酸化物/水酸化物に分解する反応が進行しつつある状況と推測される．
- 5) 抽出された微細黄鉄鉱粒子の変質状態による風化帯の区分・分帯は，肉眼観察に基づく風化区分と組み合わせることで用いることにより，岩石の化学的風化の進行状況を判定する上で有効である．
- 6) 藤川層泥岩はスレーキングを生じやすいことが，掘削露頭の変化状況の観察や，化石標本を伴う母岩の室内での経年変化の観察からも予想されており，地表環境下でのスレーキングの進行に伴い，形成されたヘアークラックに沿って，黄鉄鉱が水・酸素と接触して溶解し，硫酸を発生しながら酸化鉄・水酸化鉄に変化していく過程が推測される（図14）．

なお，スレーキング特性を中心とした藤川層泥質岩の風化に関する検討事例は，西山ほか（2006）を併せて参照されたい．

謝辞 本研究には，奨学寄付金「付加体被覆岩相の岩盤特性の研究」（国土防災技術株式会社）の一部を使用した．分析に使用した藤川層泥岩のボーリングコア試料は国土防災技術株式会社

から提供を受けた。藤川層泥岩の風化状況の確認に関して、徳島県農林事務所の百合野靖宏氏、ならびに西日本テックスの阿部隆久・上田博司両氏には、現地調査に同行いただいた。検出した黄鉄鉱および変質鉱物の光学撮影には、徳島県立博物館 中尾賢一主任学芸員に協力いただいた。記して厚くお礼申し上げます。

文献

- 千木良雅弘, 1998, 災害地質学入門. 近未来社, p. 74.
- Goudie, A. and Viles, H., 1997, *Salt weathering hazards*. John Wiley & Sons, New York, 235p.
- 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, 1991, 四国東部秩父累帯下部白亜系の放散虫群集とそのアンモナイトによる年代. 徳島大学教養部紀要 (自然科学), **25**, 23-67.
- 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.
- 古坂澄石, 1986, 硫酸還元菌. アーバンクボタ, no. 25, 32-41.
- 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.
- 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.
- 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, **20**, (印刷中).
- 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・渡辺良明, 1998, 泥岩の科学的風化による住宅基礎の盤膨れ. 応用地質, **39**, 261-272.
- 笹木圭子, 1988, 黄鉄鉱の常温酸化溶解に関する実験地球科学的研究. 鉱物学雑誌, **27**, 93-103.
- 関 陽太郎・酒井 均, 1987, 千葉県館山市舟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.
- 寺島 滋・稲積章生・石原舜三, 1981, 中国・四国地方の泥質岩中の炭素と硫黄. 地質調査所月報, **32**, 167-181.
- Tsushima, A. and Oho, Y., 1999, Mineralogical weathering of mudstone in western Shimane Peninsula, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **105**, 852-865.