

短報 Short Report

ため池堆積物の赤色化：東広島市七ツ池の例

家成賢太郎¹・山崎博史²

Reddish weathering of reservoir sediments: A case study of Nanatsu-ike Pond in Higashihiroshima City, Hiroshima Prefecture, Japan

Kentaro YANARI¹ and Hirofumi YAMASAKI²

要旨：広島県東広島市の七ツ池では、排水時の池底で赤色風化した堆積物を観察できる。この池底堆積物の柱状試料を4本採取し、各柱状試料について層相、pH、酸化還元電位測定、色彩測定、及び赤色部の詳細観察を行った。その結果、(1) 風化層の多くは、砂層の上位に位置し、地下水面の変動帯に位置していること、(2) 赤色化メカニズムのモデルについては、砂層の間隙水中での拡散供給のプロセスが適用できたが、無機的な酸化還元反応だけではなく、硫酸還元菌や鉄酸化細菌などの微生物の関与を考慮する必要があること、(3) 色彩データのうち、彩度が化学的風化（鉄酸化物生成）の進行状況の指標として有用性があることが明らかとなった。また、これらの結果に基づいて七ツ池の堆積物の地学の学習素材としての可能性を考察した。

キーワード：ため池、堆積物、風化、色彩、土色計

Abstract: During drainage, reddish weathered sediments can be observed at the bottom of Nanatsu-ike Pond in Higashihiroshima City, Hiroshima Prefecture. Four columnar samples of this reservoir-bottom sediment were collected. Each columnar sample was subjected to facies, pH, redox potential measurement, color measurement, and detailed observation of the red part. The results showed the following: (1) most weathered layers were located above the sand layer and in the zone of groundwater-surface fluctuation; (2) for the model of the reddening mechanism, the process of diffusion-supply in the pore water of the sand layer could be applied, but it was necessary to consider the involvement of microorganisms such as sulfate-reducing bacteria and iron-oxidizing bacteria in addition to the inorganic redox reaction; and (3) among the color data, chroma was found to be a useful indicator of the progress of chemical weathering (iron oxide formation). Based on these results, the potential of the Nanatsu-ike Pond sediments for geoscience educational materials is discussed.

Keywords: reservoir, sediment, weathering, color, colorimeter

I. はじめに

ため池の水位は人間活動に合わせて変動することが特徴のひとつである。すなわち、水位は灌漑期には放水により低下し、あるいは維持管理のための排水により一定期間ほぼ干上がった状態になった後、貯水により上昇する。また、河川により流入した堆積物は池底に堆積層を形成する。それらは人為的な水位変化に起因する物理的・化学的風化作用の影響を受けることが多い。

本研究では広島県東広島市八本松の七ツ池と呼ばれるため池において、排水された後に観察可能となる池

底の堆積物の赤色化を身近な風化現象として捉え、2010年に実施した試料採取と層相記載、pHと酸化還元電位測定、色彩測定、及び赤色化部の詳細観察の結果を述べ、先行研究で提案された赤色化に関連するモデルとの比較を行う。また、風化に関する学習素材としての七ツ池の堆積物の可能性を考察する。

II. 七ツ池

東広島市八本松では、曾場ヶ城山付近の山域から東あるいは南東へ向かって白亜紀崗岩類（微量の硫化物を普遍的に含む中～細粒優白質黒雲母花崗岩や中粒角

1 福岡県立武蔵台高等学校；Musashidai Senior High School

2 広島大学大学院人間社会科学研究科；Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University

閃石黒雲母花崗閃緑岩) や非海成第四紀層で構成される丘陵地や低地が広がり (高木・水野, 1999), この丘陵地を侵食して黒瀬川水系の温井川が南流する (図1)。七ツ池はその最上流部に位置している。

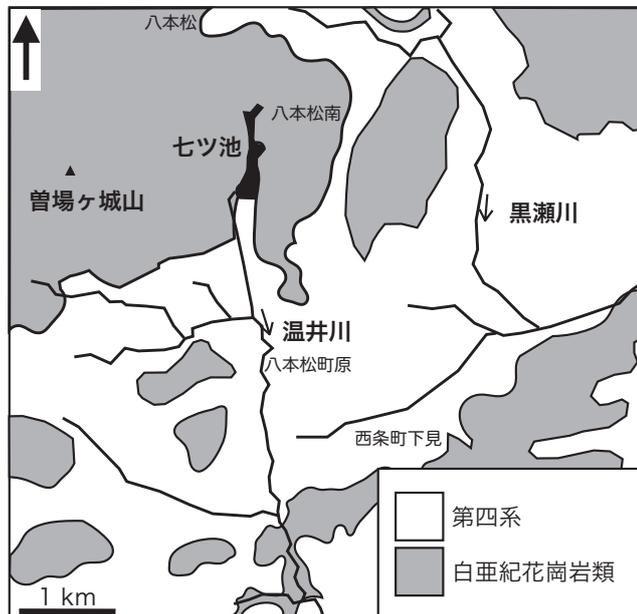


図1 七ツ池の位置と周辺の地形・地質概要

七ツ池は古くは7つの池があったとされるが, 2010年頃はほぼ南北に並ぶ3つの池 (R1, R2, R3; 図2) からなり, さらにその南に湿地が連なっていた。2022年現在, R1は埋め立てられてR2に流入する小川川となっている。

七ツ池は維持管理のため秋～冬期の一定期間排水される。その間, 管理者の許可を得ることにより排水後の池に入り, 池底を観察することが可能である (山崎ほか, 2005)。排水後の池に流入した水は池底を流れる小流路により流出している (図2)。

池底の堆積物は小川川や道路の側溝から流れ込む碎屑物を主体とし, 生物の遺体や人工物を伴う。それらは基盤の花崗岩類を覆って元の谷地形にほぼ調和的に分布し, その表層は, 池の縁辺部では比較的粗粒の砂礫質堆積物が, 縁辺から離れたところでは泥質物が主体となる (図2)。池底全体での堆積物の層厚分布は不明であるが, 厚さ1 m以上の堆積物が確認される場所がある。R2 (堤高7.5 m) は比較的幅が広い。それに比べてR3 (堤高10.3 m) は全体的に幅が狭くて深い谷状の地形を呈している。なお, 排水後の池底の水溜まりにはバイオマットとみられる赤褐色綿状の沈殿物が認められる (図3)。

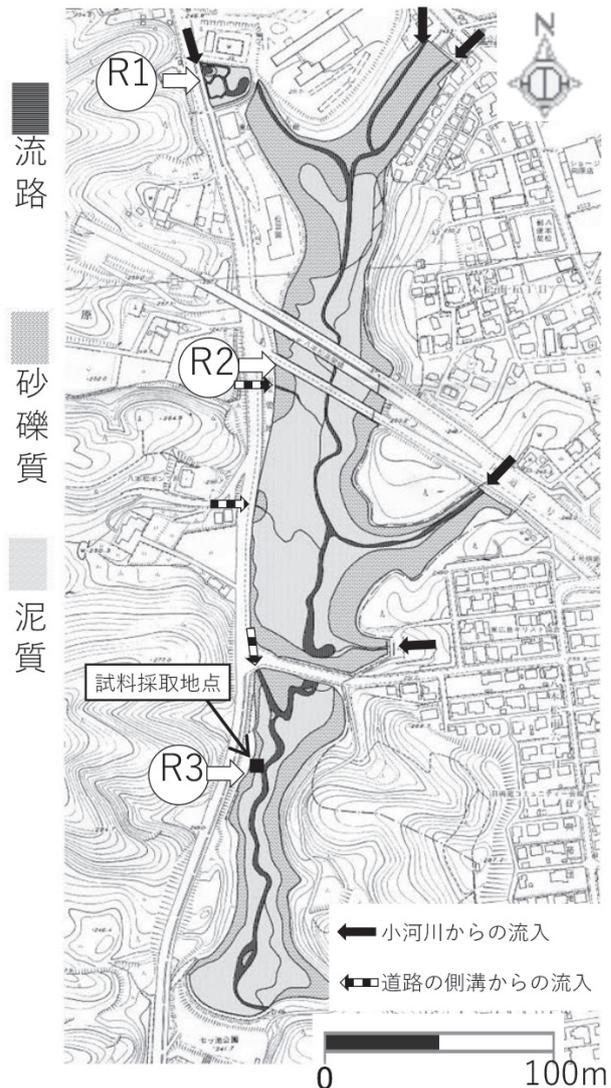


図2 七ツ池の形状, 池底の表層堆積物の分布状況, 及び試料採取地点

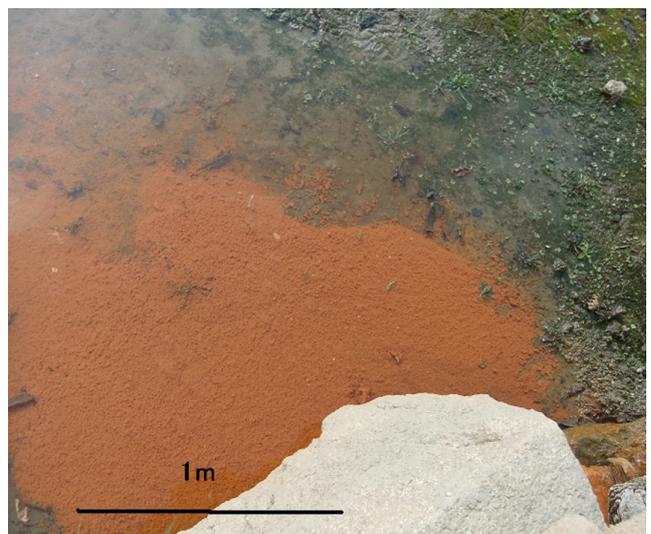


図3 池底の水溜まりに認められる赤褐色バイオマット

Ⅲ. 風化作用と土色

1. 風化作用

風化とは、岩石圏の様々な深度で平衡状態にあった鉱物からなる岩石が地表付近に置かれ、そこでの条件の下で気圏、水圏、生物圏と相互作用することにより岩石が変化する現象であり、物理的、化学的、生物学的風化の3つの過程が相互に関連して進行する（例えば、関，1998）。日本の堆積性軟岩（新生代の軟質な泥岩や砂岩）の風化では化学的風化作用、特に黄鉄鉱の酸化による硫酸酸性水の生成の重要性が指摘され、モデル化されている（千木良，1988）。このモデルでは、風化帯は表層から深部に向かって表層酸化帯、酸化帯、溶解帯、溶解漸移帯に分けられ、顕著な化学的風化は酸化帯基底で起こり、この部分は酸化フロントと呼ばれる。酸化フロントでは黄鉄鉱が消失し、2価鉄の3価鉄への酸化が起こる。また、酸化フロントは平均的な地下水面付近に位置することが多く、この風化過程の地下の水理との関連が指摘されている（千木良・大山，1992）。

2. 風化と土色

一般に堆積物の赤色化の原因は鉄の酸化還元反応と二次的な物質移動による鉄酸化物の濃集によると考えられ（例えば、吉田・松岡，2004）、風化の進行具合によってその色彩が微妙に変化する。そのため、土色は堆積物の酸化還元環境の指標として重要である。

堆積物の酸化還元状態の表示には酸化還元電位が用いられる。酸化還元電位には多くの反応系が関与するが、本研究では鉄の酸化に着目する。鉄の酸化還元は土色に大きな影響を与え、一般に酸化状態では黄～赤褐色、還元状態では暗灰～青色を示す。よって、土色は鉄の酸化還元状態、ひいては堆積物の風化状態の指標となりうる（関，1998）。

Ⅳ. 方法

排水後に採取可能となる谷の幅が狭いR3の池底の堆積物を対象とした。また、堆積物採取地点近傍で認められるバイオマットも観察対象とした。

1. 柱状試料の採取と層相区分

試料採取は池底の平坦面上において（図2）、流路から谷の斜面に向かう直線上の4地点（1 m 間隔）で行った。採取には60 cm ハンディジオスライサー（高田ほか，2002）を用いた。試料は採取後直ちに赤色化の状況を肉眼で確認してスケッチと写真で記録した後、層相毎にチャック付き透明ポリ袋に入れて実験室

に持ち帰り、その日のうちに以下の2～4の測定等を行った。

2. pH, 酸化還元電位測定

pHと酸化還元電位は地盤工学会基準「土懸濁液のpH試験方法」（地盤工学会基準部，1998）に従い、試料：蒸留水＝1：5で30分放置した後に攪拌して測定試料液とした。測定はハンディpHメーター（Horiba D-51s）で全ての試料について行った。

3. 色彩測定

ポリ袋の上からコニカミノルタ製土色計（SPAD-503）を各試料に密着させ、マンセル表色系の色相・明度・彩度を測定した。測定範囲は直径8 mmである。1試料（約10 cm × 10 cm）につき30箇所測定し、その平均を色彩値とした。

4. 赤色化部及びバイオマットの詳細観察

赤色化部の断面を双眼実体顕微鏡で、またバイオマットを生物顕微鏡で観察した。

Ⅴ. 結果

1. 試料採取及び採取試料の層相と赤色化

試料採取地点の表層泥質堆積物にはマッドクラックが認められた（図4）。4箇所全てで、幅約10 cm、厚



図4 ハンディジオスライサーによる試料採取作業
A：マッドクラックが発達する堆積物表面からハンディジオスライサーをハンマーで打ち込む，B：採取された堆積物。

さ約 2 cm, 長さ約 50 cm の柱状試料が採取された。

各柱状試料は粘土, 砂, 砂混じり粘土で構成される (図 5)。全体として粘土が主体であるが, 柱状試料 1 では 2 層準で, 柱状試料 2 ~ 4 では 1 層準で厚さ約 10 cm の砂の挟在が確認された。柱状試料 2 ~ 4 では砂の下位に砂混じり粘土を伴う。最上位の粘土とその直下の砂は側方への連続性がよく, それぞれ同一の粘土層と砂層に対比される。

堆積物の赤色化は斑状で, 柱状試料 1 ~ 3 では表層から約 10 ~ 30 cm と約 35 ~ 50 cm の 2 層準で, また柱状試料 4 では同じく約 30 ~ 40 cm の 1 層準で確認された。柱状試料 1 ~ 3 の上位と柱状試料 4 の赤色化は, 砂層の直上の最上位粘土層の最下部付近に位置し, 同一の赤色化帯 (以下, 上位の赤色化帯) と捉えられる。下位の赤色化は, 柱状試料 1 では最下部の砂の直上の粘土, 柱状試料 2 では最下部の粘土, 柱状試料 3 では最下部の砂混じり粘土で確認された。

2. pH と酸化還元電位

4 本の柱状試料から得た 34 試料を分析試料とした (図 5)。各柱状試料において, pH と酸化還元電位の値は負の相関を示し, 全体的には地表に近いほど酸性・酸化環境であった (図 6)。しかし, 柱状試料 1 と 2 の深さ 10 ~ 20 cm, 柱状試料 2 と 4 の深さ 30

~ 40 cm の層準では全体的な傾向と異なり, 両値が酸性・酸化的なピークを示した。

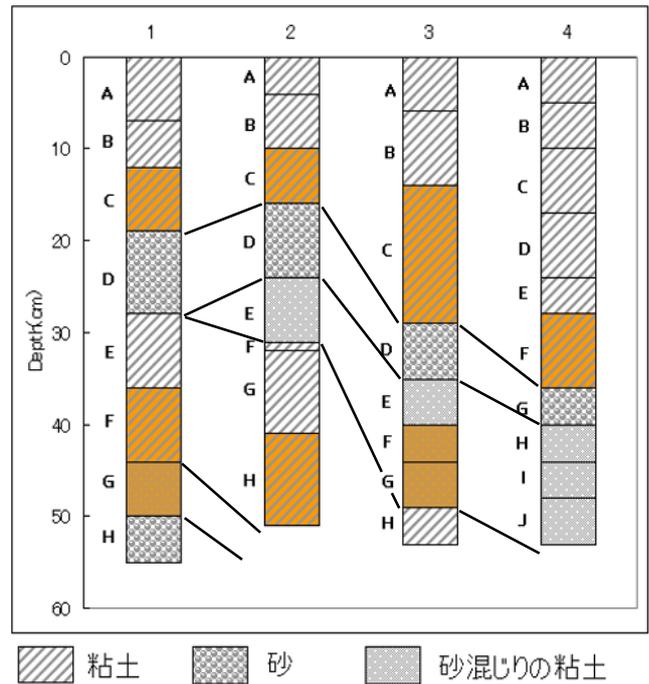


図 5 柱状試料の層相と測定試料採取位置

各柱状図のオレンジ色で示した部分は斑状の赤色化層を, またアルファベットを付した部分 (1-A~H, 2-A~H, 3-A~H, 4-A~J) は測定試料番号を示す。柱状図間の実線は地層の対比を示す。

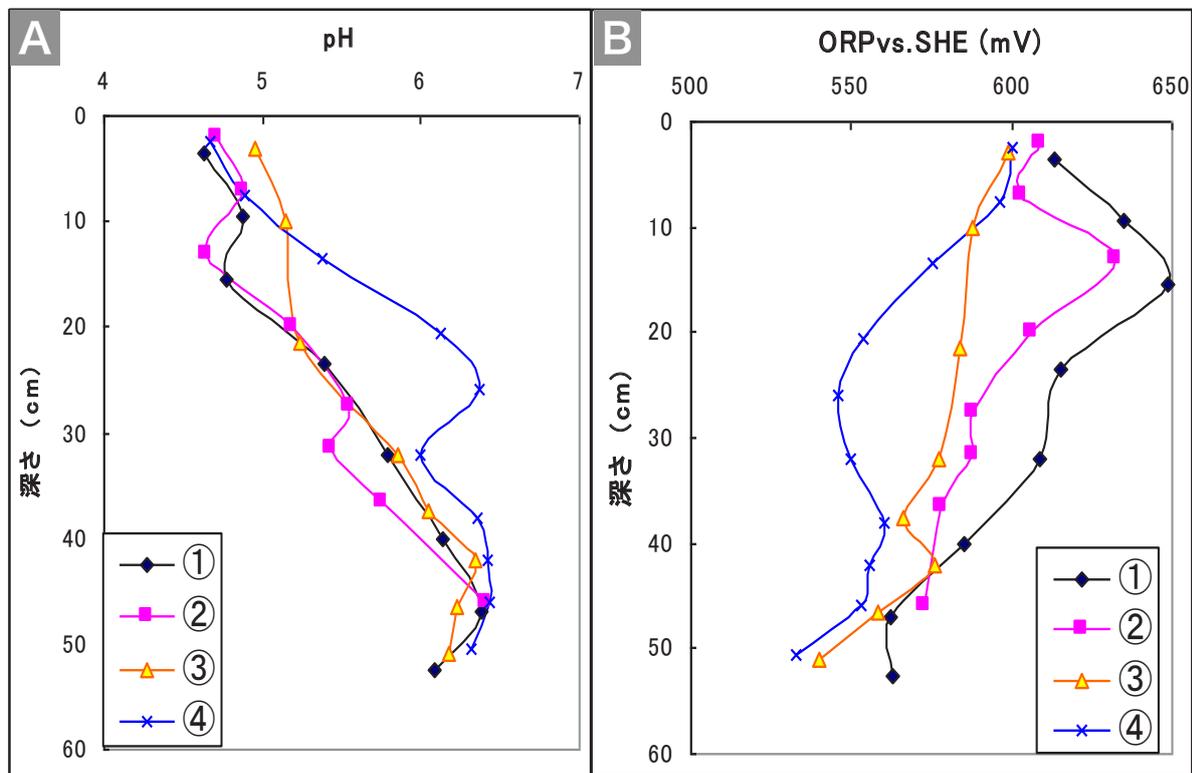


図 6 各柱状試料の pH (A) と酸化還元電位 (B) の測定結果

①~④は柱状試料番号を示す。

3. 色彩測定

各柱状試料の色相，明度，彩度のうち，彩度で特徴的な結果が得られた（図7）。彩度は多少のばらつきはあるが，柱状試料1，2では深さ10～20 cm，柱状試料3では深さ40～50 cm，柱状試料4では深さ10～20 cmと20～30 cmでピークを示し，その値は約20であった。なお，図7ではマンセル表色系で計測した値を変換表によりL*a*b*表色系に変換し，彩度としてメトリック彩度 $[C = (a^2 + b^2)^{1/2}]$ を示した。

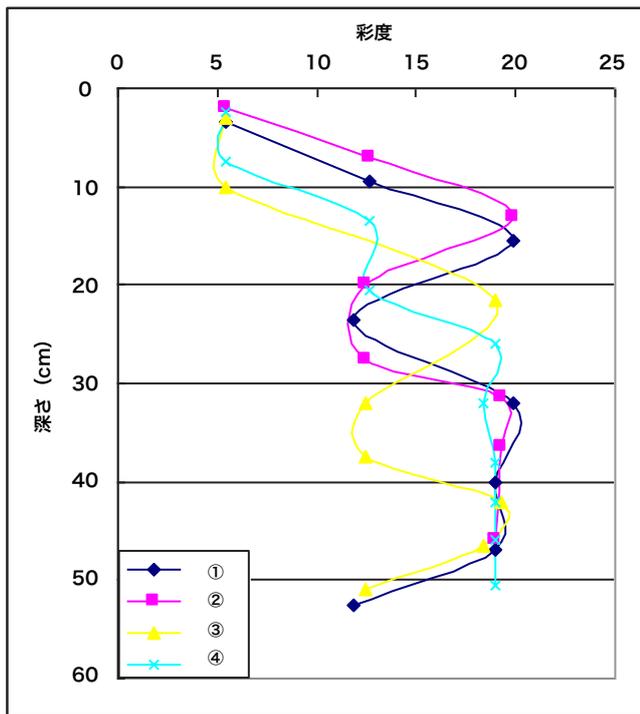


図7 各柱状試料の彩度測定結果
①～④は柱状試料番号を示す。

4. 赤色化部の詳細観察

上位の赤色化帯の粘土には幅約1 mmの割れ目や直径約1 mmの円筒状空洞が複数あり，空洞表面に沿って同心円状縞模様の鉄酸化物と考えられる物質の濃集帯が確認された。割れ目は幅数mm～3 cmで，明瞭な方向性は認められず（図8A），割れ目に沿って縞状に赤色化している部分の確認された（図8B）。円筒状空洞も一定の方向を持たず，空洞表面から外側に向かってハロー状に赤色化が広がっている部分の確認された（図8C）。空洞内部に植物片等の異物は認められなかった。

採取地点に接する水溜まりに認められた赤褐色綿状バイオマット（図3）において，コロニーの形態から中空鞘状のレプトスリックス属と螺旋状のガリオネラ属とみられる鉄酸化細菌が確認された（図9）。

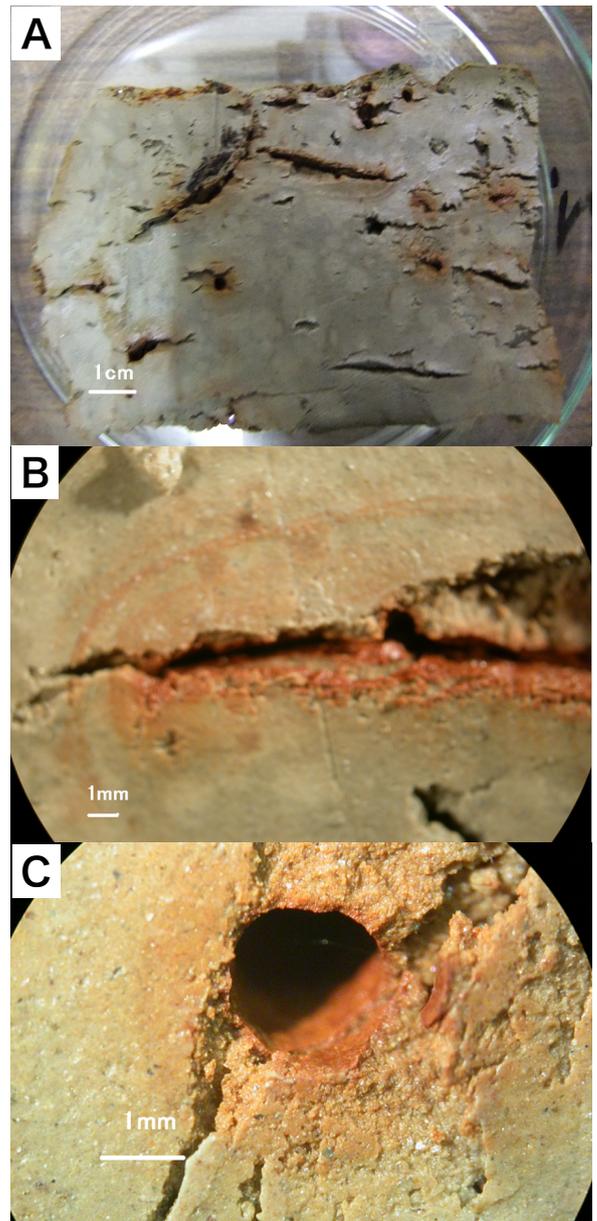


図8 赤色化帯粘土層中の赤色化部分

A：複数認められる割れ目と赤色化，B：割れ目に沿う縞状赤色化，
C：円筒状空洞とハロー状赤色化。

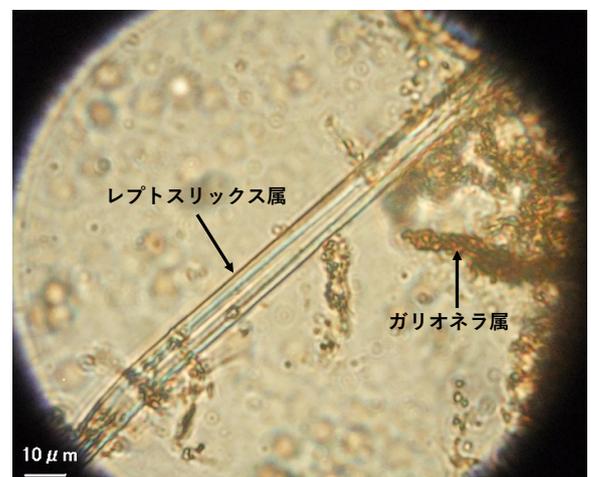


図9 赤褐色バイオマット中の鉄酸化細菌

VI. 考察

1. 赤色化と層相

堆積物の赤色化と層相との関連について、全ての柱状試料で確認された上位の赤色化帯について考察する。上位の赤色化帯は連続性のよい同一の砂層を直接覆う粘土層で認められた。砂層は間隙が多くその上部が地下水面になっていることが予想され、地下水とそこに溶解した鉄イオンの供給路の役割をもつと考えられる。このことは、酸化フロントは平均的な地下水面付近に位置することが多いという指摘（千木良・大山, 1992）と整合的である。また、砂層間隙中の地下水は還元的事であることが期待され、そうであれば2価鉄の溶解に適している。

2. 粘土層中の割れ目・空洞形成

酸化フロントに相当する上位の赤色化帯を形成する最上部粘土層中には、数 mm ~ 3 cm の幅で割れ目が多数発達していた。七ツ池は定期的に排水されており、排水時、堆積物は乾湿を繰り返しており、その影響は地表面に近い最上部層ほど大きいことが予想される（例えば、図 4A）。粘土層の乾湿の繰り返しは、物理的風化の一種であるスレーキング現象を引き起こし、その結果として粘土層中の割れ目が生じた可能性がある。

粘土層中の円筒状空洞については植物の根の痕と推測された例がある（吉田・松岡, 2004）。しかし本研究では空洞内部に植物片等は観察されなかった。また、根痕であれば、現状、空洞が粘土層のみに限定されるという産状との整合性がとれない。そのため根痕の可能性は低いと考える。他の可能性として、堆積物中での硫酸還元菌の活動による気泡の発生による空洞形成が考えられる（例えば、天野ほか, 2007）。硫酸還元菌は還元環境中で活動が活発化する偏性嫌気性細菌で、硫酸イオンを電子受容体として利用し、最終的に硫化水素を発生させる。七ツ池の堤高は R2 で 7.5 m, R3 で 10.3 m であり、夏季には貯留水の成層により底質が還元状態になると予想され、硫酸還元菌の活動に適している。この活動で使われる硫酸イオンが酸化フロントでの黄鉄鉱の溶脱により供給されるという堆積性軟岩の化学的風化モデル（千木良, 1988）が適用できると硫酸還元菌による気泡の発生メカニズムが考えやすい。ただし、このモデルでは日本の堆積性軟岩には普遍的に黄鉄鉱を含有することを前提とし、その硫黄の起源として海成層が想定されている（千木良, 1988）が、七ツ池周辺には海成層は存在しない。この点については、池底堆積物の後背地である花崗岩

類に由来する硫化物が黄鉄鉱に代わる可能性が考えられる。今後、堆積物中の硫化物の検討の必要がある。

3. 鉄酸化物濃集帯形成

空洞表面の鉄酸化物の濃集過程については、還元的な砂層間隙水を介して拡散移動した2価鉄が粘土層側で酸化され、3価鉄として沈殿されたものと考えられる。この場合、移動した2価鉄を3価鉄へと酸化させる何らかの酸化剤の役割を担うものが必要になる。試料採集地に接する水溜りでは鉄酸化細菌（レプトスリックス属と螺旋状のガリオネラ属）が確認されており（図9）、粘土層中でこれらの鉄酸化細菌が鉄酸化に寄与するならば、基質内部での縞模様状の濃集（図8）も微生物関与の可能性が考えられる。

考察1~2と合わせると、人為的な乾湿変動に起因するスレーキング現象による粘土層中の割れ目形成や粘土層中の硫酸還元菌の活動による空洞発生という物理的風化が、地下水浸透や鉄酸化細菌による化学的風化の場を生み出し、池底の堆積物を含めたため池全体が一つのシステムとして堆積物の風化を促進していると考えられる。この考え方については、硫酸還元菌とあわせて今後、微生物に関する分析により検証される必要がある。

また色彩に注目すると、深さ10~20 cmの層準で、酸化還元電位の値が大きい酸化的環境において彩度の値が高くなっていることが指摘される（図6, 7の①と②）。このことは、彩度が鉄酸化物の生成度合い、すなわち化学的風化の進行状況を反映している可能性がある。

4. 風化教材としての七ツ池の池底堆積物の活用可能性

風化作用は人間生活環境における身近な現象であり土砂災害の要因でもあるため、理科教育のみならず環境教育や防災教育の観点からも重要である（岡本, 2006）。しかし、学校教育では、例えば高等学校学習指導要領の中で「科学と人間生活」では風化という用語が使用され、「地学」では風化作用は岩石が碎屑物に変化すること（文部科学省, 2019）と簡単に扱いに止まっている。実際、地層の学習では、未風化な状態の露頭や岩石標本の観察が中心となり、風化作用は単なるノイズとしてみなされがちである。

地層や岩石は形成されて以降現在においても引き続いて風化作用を受けている。一方、地学の学習における風化現象に関する内容は、上述のように地表の変化に関わる現象という地学的な時間スケールを前提とし

での扱いとなっている。このような長い時間スケールは学習の重要な要素である一方、生徒が日常生活の中で経験する物理的・化学的変化の概念との隔たりは否めない。また、すでに風化した試料を教室で提示する場合、岩石が塊状態から碎屑状態になった「結果」としての認識のみになり、自然環境中でその碎屑物が水や空気とどのように反応していくのかという「過程」の考察に結びつきにくく、敏感に相互作用する自然のシステムとしての機能を理解するまでには至らない可能性がある。その他、風化に関する学習では風化作用を受けた岩石や地層に視点が置かれるが、一方で、風化現象、特に化学的風化については介在する物質を水溶液という形で運搬する水の働きから考えることも必要であろう。

これらの問題を補う教材開発のためには、現在も風化過程の途上にあり、周辺環境と関連づけて考察できる現世堆積物の風化モデルが必要である。その際、対象とする現世堆積物は、岩石が「どんな条件で」「何によって」「どのように」風化されたかという要素がある程度コントロールされた環境下にあることが望ましい。この点に関して、七ツ池の池底堆積物の赤色化過程は、年周期の水位変化や大気との接触に加えて微生物の関与も無視できないことが本研究で示唆された。また、鉄酸化物が沈殿していることは、地下水中の鉄イオンが除去されたことを示す。さらに、化学的風化の進行状況の指標として彩度の有用性が示唆された。これらのことは、堆積物の赤色化という風化現象を素材として、風化作用について岩石が碎屑物に変化することだけでなく、そのことに関連する周辺環境や微生物の観察と組み合わせることで、地球システムを構成する気圏、水圏、固体地球圏、生物圏の4つのサブシステム間での物質循環と相互作用の学習に発展させることが期待できる。

【謝辞】

本研究は科学研究費補助金基盤研究（25242015, 25350202, 26350235）及びJSPS 科研費JP22K02946の助成を受けたものです。

【文献】

- 天野由記・岩月輝希・井岡聖一郎・笹尾英嗣（2007）：講演再録 微生物が地下の酸化還元環境形成に及ぼす影響. 原子力バックエンド研究, 14 (1), 61-67.
- 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, 94, 419-431.
- 千木良雅弘・大山隆弘（1992）：堆積性軟岩の風化過程の工学的的重要性. 電力土木, no. 241, 1-6.
- 地盤工学会基準部（1998）：533 地盤工学会基準「JGS T 211 土懸濁液の pH 試験方法」, 「JGS T 211 土の強熱減量試験方法」, 「JGS T 241 土の水溶性成分試験方法」, 「JGS T 251 粘土鉱物判定のための試験調整方法」の一部改定案について. 土と基礎, 46 (1), 73-78.
- 文部科学省（2019）：高等学校学習指導要領（平成 30 年告示）解説 理科編 理数編. 実教出版, 東京, 368p.
- 岡本 研（2006）：岩石の風化作用から何を学ぶか－岩石の風化作用と地球環境とのかかわりを考える－. 北海道立理科教育センター研究紀要, no.18, 85-94.
- 関 陽児（1998）：土壌・風化帯の形成と水質変化. 地質調査所月報, 49, 639-667.
- 高田圭太・中田 高・宮城豊彦（2002）：沖積層調査のための小型ジオスライサー（Handy Geoslicer）の開発. 地質ニュース, no. 579, 12-18.
- 高木哲一・水野清秀（1999）：海田市地域の地質. 地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）, 地質調査所, 49p.
- 山崎博史・竹下俊治・佐藤高晴（2005）：ため池の底を歩いてみよう. 環境教育, 15, 55-61.
- 吉田英一・松岡敬二（2004）：愛知県豊橋市高師原台地から産する「高師小僧」. 名古屋大学博物館報告, no. 20, 25-34.
- （2022 年 8 月 31 日受付）
（2022 年 12 月 6 日受理）