

## 地学的自然としての花崗岩地帯教材化の試み

— 花崗岩類深層風化殻の場合 —

秦 明 徳\*

Akinori HADA

A Study of Teaching on the Granite Areas as Geological Environments  
— On the Case of the Deep Weathering Crusts of Granitic Rocks —

### I はじめに

花崗岩は地球上で最も広い分布を持つ岩石である。日本においても花崗岩地帯（図一）は広い分布を示し、私達の生活と密接な関わりを持ってきている。このように日常的に触れやすい花崗岩は、世界各地で教材として取り上げられてきている。日本でも花崗岩を教材として取り上げた歴史は古く、明治時代以来、小中学校の理科教材として親しまれてきている。これまでの日本の学校教育での花崗岩の扱いは、教室内で岩片試料を観察し、深成岩としての組織と造岩鉱物を学習することに主眼が置かれたものであった。しかし、これでは花崗岩をほとんどどう扱ったことにはならない。人間の生活の場であり、具体的時間・空間を占める大地を構成する岩石として花崗岩を捉えるよう、生の地学的自然の教材化が図られねばならない。

平成元年改訂の新学習指導要領理科編（文部省，1989）においては、問題解決能力・探究能力開発の一層の強化が図られる一方、学習内容と生活との結び付きを重視する指導を図ることが改訂の大きな柱の一つとなっている。また、小学校6年生での「大地の成り立ち」の学習内容が従来、地層教材一辺倒であったものが、今回の改訂により、自分たちが住んでいる地域の大地の様子を学習するように方向づけられた。これらの改訂の趣旨に答える意味においても地域の生きた地学的自然を探究でき、野外学習が可能なような「花崗岩地帯」学習の方法

を研究開発する必要がある。筆者は、花崗岩地帯特有の深層風化作用について研究を進めてきている（秦1987）。そこで、本稿では、花崗岩地帯教材化の手始めとして、花崗岩深層風化殻の実態と形成機構を明らかにし、その教材化を図る。さらに、それを用いた中学生対象の実験授業について報告する。

### II 花崗岩類風化作用教材化の意義

風化作用は今日までの理科教育においては必ずしも重要な教育素材としては扱われてきていない。そのためか、教育的立場から風化作用を取り上げた研究も極わずかしかない（合川 1981, 1982, 1983, 小森 1985）。しかし、筆者は以下の理由から極めて重要な教育素材であると考



図一 本州・四国・九州における花崗岩の分布  
（竹内・都城，1965）

\* 島根大学教育学部理科教育研究室

える。

(1) 人間環境としての地学的自然について学ぶことは理科教育の大きな目標の一つである。その際、人間生活と最も深い関わりを持ち、人間の生活の場である地表面を覆う薄層を形成しているのが岩石風化物である。そして、この全地表面を覆う薄層を形成する岩石風化物は、動植物起源の有機物と共に土壌への移行素材として重要な役割を演じている。

(2) 風化物の存在は、浸食作用や堆積作用による地形変化にも多大な影響を与えている。人間生活のベースとしての沖積地は、岩石風化物の堆積により形成されていることや土砂災害の多くが岩石風化物の崩壊・流失により発生していることなどがその例である。

(3) 地学的事象は、巨大な時間的空間的スケールの中で捉えねばならない場合が多く、児童生徒が日常生活している物理化学変化の蓄積として捉えるには困難を伴う。その点、風化現象は、日常捉えられる物理化学変化の延長として理解しやすく、地学事象理解への重要な橋渡しを果すと考えられる。

(4) 露頭観察に際しても風化現象を避けて通ることはできない。どんな露頭でも少なからず風化の影響を受けているからである。なかでも、花崗岩類地域となると、新鮮な岩石を探す出すことすら難しい場合が少なくない。このことも、野外で地学的自然を観察する際、忘れてはならない点である。

もし、この地球に風化作用が存在しなかったとしたら、地形化作用の点から、また、生命活動の点から見ても、地表付近の様子は、現在とその姿を全く異にしていたであろう。このように生物の生活圏である地表や地表付近で生じる岩石の風化現象や土壌の生成現象に関する教材は、理科教育のみならず環境教育の立場からも今後益々重要視され、学校教育の中で系統的に指導がなされることが望まれる。

ところで、風化作用には機械的風化作用と化学的風化作用があることについては異論がないようである。しかし、現に目前にある岩石の風化物が化学的作用と物理的作用のどちらが主たる作用として働いてできあがったのか、どちらの作用が先行したのか、両者の相互関連性はどうかという問題になると解釈に大きな隔たりが生じてくる。

花崗岩類は、他の岩石に比べて非常に風化の影響を受けやすい。その風化物は、一般に真砂土と呼ばれている。真砂土の力学的強度は極めて弱く砂を固めたものとほとんど変わらない。また、風化深度が極めて大きく、特に風化しやすい花崗閃緑岩となると、百数十メートルの風

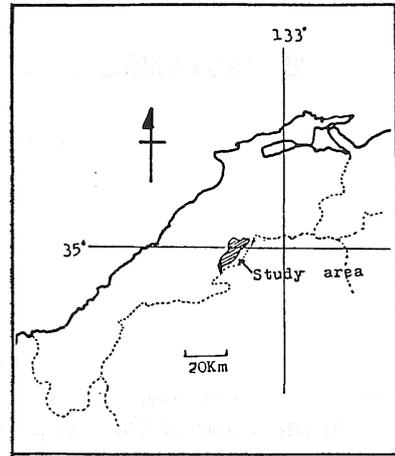


図-2 調査地域位置図

化深度となることもめづらしくない。従って、地表付近という概念をここまで拡張して考える必要がある、このような風化作用を特に深層風化作用と呼んでいる。このような真砂土化や深層風化作用がどのようにして生じるのかを究明することが、風化作用の本質を明らかにすることとなる。このように、風化作用の影響が顕著に現われる花崗岩類を素材として扱うことは花崗岩及び花崗岩地帯の特質を捉えるという意味からだけでなく、風化作用の本質を捉えるという意味からも意義深いことである。

### III 花崗岩類深層風化殻の分帯とその教材化

#### 1. 野外観察に基づく風化殻分帯

花崗岩類の風化殻が教育の素材たり得るか否かは、風化作用の本質究明につながる真砂土化や風化進行に伴う深層風化殻の変化実態を五感を通じた観察によってどの程度明らかにできるかにかかっている。

花崗岩類の風化殻分帯については、これまでにいくつかの報告がある (Ollier 1965, 松浦他 1970, 木宮 1975)。しかし、造岩鉱物に着目した分帯はほとんどなく、そのことが風化殻分帯の確立を妨げる要因となっている。そこで筆者は造岩鉱物の変化に着目しながら独自の風化殻分帯を試みた (秦 1989)。その際、島根県出雲市南方、中国脊梁山地に沿う赤色花崗閃緑岩分布地域 (図-2) を研究対象とした。本地域は地形的には中位平坦面に相当する小起伏丘陵地を形成し、赤色化を受けた深層風化殻を伴っている。本岩はセキエイ、カリチヨウセキ (セイチヨウセキ, ビシャチヨウセキ), シャチヨウセキ, クロウンモ, フツウカクセンセキを主成分鉱物とする中粒完晶質岩であり、やや優黒質の岩石である。本地

表一 野外における肉眼観察を主とする花崗閃緑岩深層風化殻分帯

風化殻分帯	野 外 で の 特 徴
VI帯 (土 壤 帯)	最上部層にあたり、移動性の風化物に有機物が混入し、土壌化している。
V帯 (含赤色酸化鉄オカリン帯)	クラウンモ周辺の褐色化、カクセンセキの黄褐色化により、風化物は、白色と黄褐色の斑紋状を示すようになる。上部に向かいその色調は次第に赤褐色化する。さらに表層近くでは花崗閃緑岩の組織が失われ、地下水によるしもふり様の模様を呈する部分もある。
IV帯 (カ オ リ ン 帯)	シャチョウセキが粘土化した。下部ではシャチョウセキを指頭でつぶすと相当な抵抗感があり、核の部分はつぶれないで残る。上部に向かい次第に粘土分が増加し、指頭でつぶしても抵抗感がなくなっている。下部では、ハンマーで軽打すると砂状に崩れるが、上部では、粘土分の増加により塊状で採取が可能となる。クラウンモは黄褐色化が進行する。カクセンセキは緑色を保ったままであるが、V帯との境界付近で黄褐色に変化する。
III帯 (パーミキュライト帯)	加水分解作用を受け、粒子間、特にシャチョウセキ粒子間の結合力が弱くなり、ハンマーで軽打すると、0.5~2cm程度の粒子となつてくずれ落ちる。しかし、シャチョウセキは、まだ粘土化していない。全体の色調は青白色が強い。
II帯 (初 期 変 色 帯)	<p>b a</p> シャチョウセキが全体に白濁し、クラウンモの劈開面での反射がにぶくなり、やや変色し始める。岩盤としての性格は残すが、ハンマーで軽打すると10cm前後の径を持つ岩塊としてとれる。 シャチョウセキはまだ劈開面での反射を残すが、透明度は減少する。クラウンモの周辺が鉄のしみ出しにより茶色になる。ハンマーでの感触は新鮮岩とほとんど変化なし。
I帯 (新 鮮 岩 帯)	新鮮な岩石で、風化作用の影響がみられない。

域の花崗閃緑岩深層風化殻の厚さは薄いところでも50m、厚いところでは100m以上に達している。本岩は中粒の岩石であり、造岩鉱物も大きくて観察し易い。しかも、風化程度が高くなる地表付近まで花崗閃緑岩の組織が残存したままなので、各鉱物は肉眼的には元の形をそのまま残しながら粘土鉱物などに変化し、色や硬さなどを変化させていく。従って本岩のような場合は、風化進行に伴う造岩鉱物の変化を比較観察することが可能となる。これに加え、岩石の硬度や結合度、色合い、ハンマーに対する反発度、指間での感触などの変化をもとに筆者独自の風化殻分帯の基準を設け、6層に分帯した。その結果を表一に示す。なお、風化殻各層の名称は、後述する顕微鏡観察、X線粉末回折の結果も加え、風化生成鉱物相の特徴から命名したものである。

## 2. 顕微鏡観察及びX線粉末回折による風化殻分帯の裏づけ

写真一は花崗閃緑岩中の鉱物が風化していく様子を示した顕微鏡写真である。風化物の薄片作成にあたってはシアノアクリレートを固化剤として用い、研磨に際しては潤滑剤として軽油を使用した。ただし、パーミキュライト帯に相当する風化物は粒子内・粒子間の結合力が最も弱く砂礫状化し、薄片作成可能な大きさの試料採取

ができなかった。鏡下での観察結果は次の通りである。

風化作用の影響を受けていない新鮮な岩石においても、シャチョウセキやセキエイを連続的に切る微細な割れ目が既に存在する。これらの成因は風化作用以前の岩石生成史に関わるものであり、この割れ目が酸素や二酸化炭素を含む水の通路となり風化作用促進の重要な役割を担うと考えられる。

シャチョウセキに存在する微細な割れ目は、初期変色帯において幅、数とも急激に拡大する。これがパーミキュライト帯における粒子内・粒子間結合力の喪失の伏線として働いている。カオリン帯においては粘土鉱物(カオリン)化が進行し、カオリン帯上部で完全に粘土化を完了する。

クラウンモが風化作用に対して化学的に最も鋭敏な鉱物であることは、鉄分のクラウンモ結晶周辺へのしみ出しの様子から肉眼的にも確認できる。しかし、クラウンモが風化作用によりパーミキュライトやハイドロマイカなどの粘土鉱物に変化しても2:1型のウンモ型結晶構造は維持されたままである。そこで鏡下での変化は多色性や干渉色の不鮮明さとなって表われるのみである。パーミキュライト帯から上部では2:1型構造を持つ鉱物から1:1型構造であるカオリナイトが風化進行に伴い

徐々に形成され、その量を増大させるが、2:1型のウンモ様鉱物の一部は5帯上部まで残留し続ける。

カクセンセキは風化作用を受けにくく、カオリン帯上部まで残留し続ける。カリチョウセキは極めて風化作用に強く、含赤色酸化鉄カオリン帯上部でやっと粘土化を開始する。セキエイは最も安定しているが、含赤色酸化鉄カオリン帯では機械的細片化が進行している。

以上のように鏡下での風化鉱物の観察は、野外観察の結果を支持するものであり、風化殻分帯の正しさをも証明するものである。

野外観察と顕微鏡観察に基づいて行ったマクロな視点からの風化殻分帯をよりミクロな視点から裏づけるため風化殻分帯を行った各風化段階の試料をX線粉末回折に供し、鉱物相の同定を試みた。その際次の二通りの実験方法を併用した。

(1) 試料をメノウ乳鉢中で細粉し、指頭で擦りあわせてもざらつきを感じない程度にする。この細粉をアルミニウムホルダーにつめ、全成分のX線回折像を得る。

(2) 試料を水中で分散させ、ストークス則に従い2 μm以下の粘土鉱物分を得る。この水籤物をガラス状ホルダーに載せ、半方位試料としてX線回折像を得る。さらに必要に応じ、100°C、300°C、500°C、600°C加熱（各1時間）、エチレングリコール処理、塩酸処理を併せ行い、粘土鉱物の同定を行う。

なお、本実験には島津製XD-5型、Cu-Kα線、Niフィルターを使用し、30kV-20mA、TIME CONSTANT 2、RANGE cps 2を測定条件とした。

図-3には、以上の方法で得られたX線回折像に基づき作成した風化進行に伴う鉱物相変化の概略を示す。また、図-4には、各風化段階を代表する全成分X線粉末

回折像を示す。

以上から次の結果が得られた。

(1) 新鮮岩帯における鉱物として、セキエイ、シャチョウセキ、カリチョウセキ、クローンモ、リョクデイセキ、カクセンセキが確認できる。

(2) 初期変色帯における鉱物相は新鮮岩帯と同一である。

(3) パーミキュライト帯ではリョクデイセキが消失し、パーミキュライトが出現する。微量のギブサイトを産する地点もある。他の鉱物は初期変色帯同様残存する。

(4) カオリン帯はハロイサイト、カオリナイトが上部に向かい徐々に増加する。パーミキュライトはカオリン帯中部で消失する。シャチョウセキは徐々にその量を減少させ、含赤色酸化鉄カオリン帯との境界付近でX線的に消失する。カクセンセキも含赤色酸化鉄カオリン帯との境界付近でX線的に消失する。

(5) 含赤色酸化鉄カオリン帯での生成鉱物はほとんどがカオリン鉱物で占められるが、上部に向かいハロイサイト量に比しカオリナイト量が増加する。ブロードなピークを持つウンモ様鉱物も半安定的に残留する。セキエイと共に残留していたカリチョウセキも含赤色酸化鉄カオリン帯最上部では急激に分散消失する。

これらの結果は野外観察、顕微鏡観察の結果とよく一致する。また、野外観察、顕微鏡観察では不明確な粘土鉱物の種類についても明らかにすることができた。

### 3. 花崗岩類深層風化殻の野外観察教材としての適切性

以上のように五感を用いる野外観察で赤名花崗閃緑岩深層風化殻が6層に分帯可能であることを示すとともに、その結果が顕微鏡観察やX線回折像による鉱物層の同定結果とも調和することを明らかにした。組織と造岩鉱物が類似している他の花崗岩類の風化殻にも、この分帯は適用可能である。

この野外観察に必要な前提能力として肉眼ないしルーペによる主要造岩鉱物の識別能力が要求される。この能力は中学3年生であれば少しの訓練で身につけることが十分可能である。

これらのことは花崗岩類の風化殻が中・高校生の観察素材として有効に機能しうることを示している。

風化物薄片の顕微鏡像もテレビカメラ等を利用し、指導者が解説を加えながら観察学習を進めていけば、各風化段階の残留鉱物、風化鉱物の様子や割れ目など機械的風化作用の進行状況の中・高校生にも的確に把握させることができる。

以上のように花崗岩類の深層風化殻は風化進行に伴う

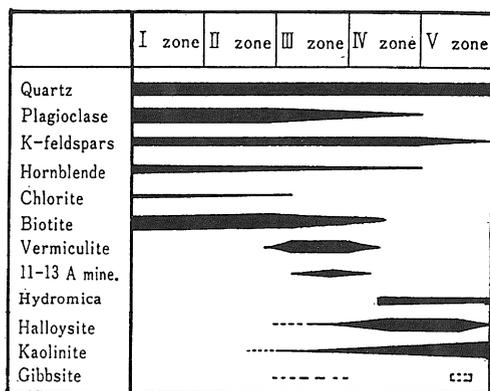
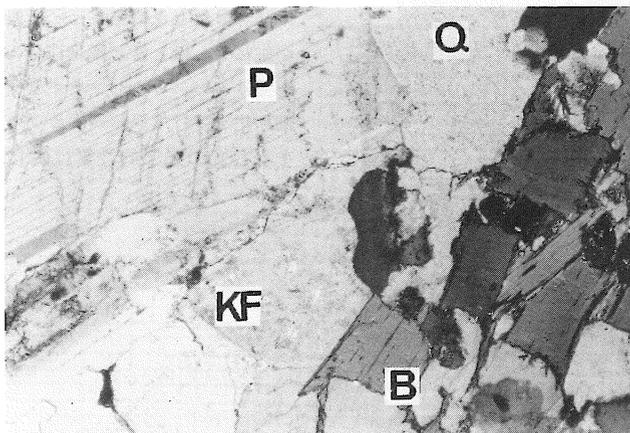


図-3 赤名花崗岩の風化進行に伴う鉱物相変化

写真-1 風化していく花崗閃緑岩の顕微鏡写真

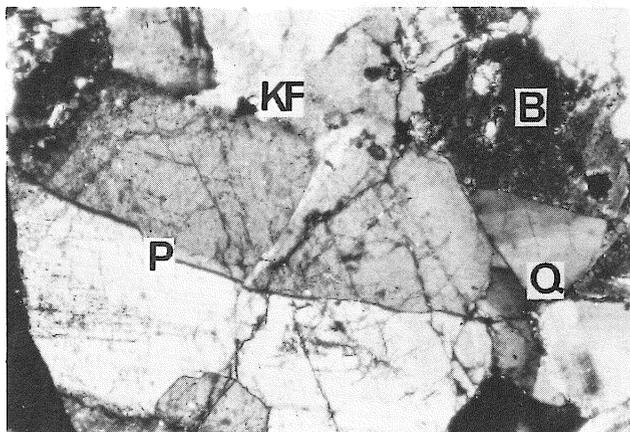
記号 Q : セキエイ P : シャチョウセキ KF : カリチョウセキ B : クロンモ  
 Ho : カクセンセキ Hm : ハイドロマイカ K : カオリナイト Go : ゲーサイト



(crossed nicols)

I 帯

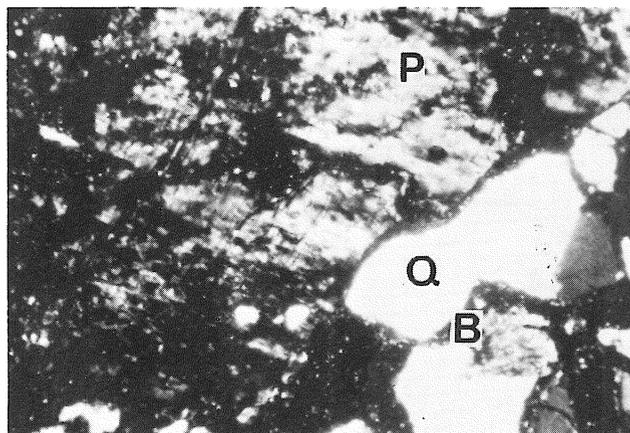
新鮮な岩石であるが、シャチョウセキやセキエイには既に微細な割れ目が存在する。



(crossed nicols)

II 帯

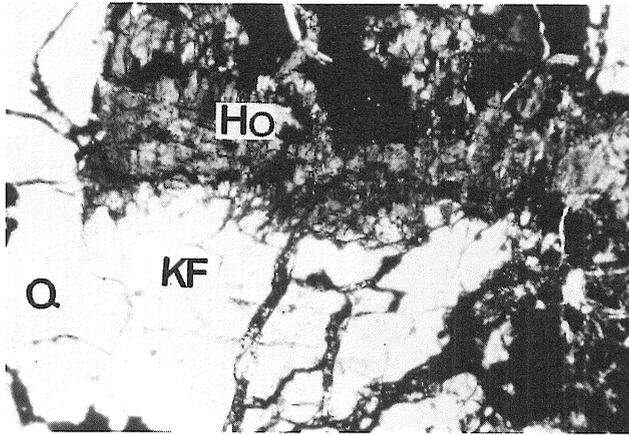
II帯ではこのような割れ目が拡大する。シャチョウセキでは劈開面などの微細な割れ目と結合して溶脱が進展する。



(crossed nicols)

IV 帯中部

シャチョウセキが、網目状に粘土(ハロイサイト)化している。セキエイは風化作用の影響がない。

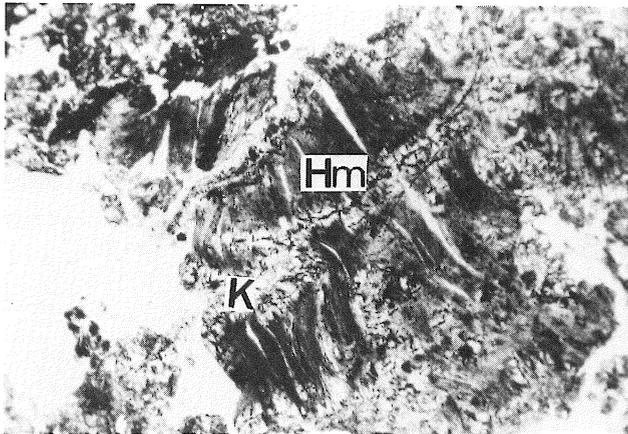


0.5mm

(crossed nicols)

## IV帯

カリチョウセキやセキエイは割れ目が生じてもほとんど風化作用の影響を受けない。カクセンセキは機械的細片化を受けているが、カクセンセキとしての光学的性質は残している。

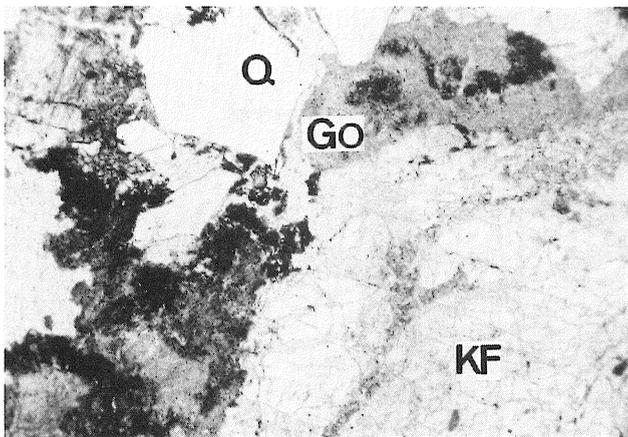


0.5mm

(polarizer only)

## V帯

クrownモがハイドロマイカとカオリナイトに変化している。カオリナイト化は割れ目や劈開面に沿って進行している。

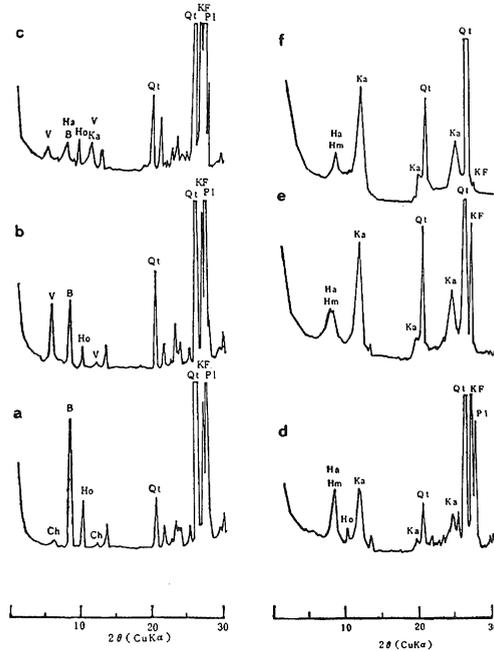


0.5mm

(polarizer only)

## V帯上部

カリチョウセキは、微細な割れ目が縦横に走り、分解しだしている。セキエイやハイドロマイカは残存している。空隙をゲーサイトがうめている。



図一四 赤名花崗閃緑岩風化物全成分のX線回折

a I帯      b III帯      c IV帯下部      d IV帯上部      e V帯下部      f V帯上部  
 記号    Q:セキエイ      KF:カリチヨウセキ    Pl:シャチヨウセキ    Ho:カクセンセキ    B:クロンモ  
          Ch:リョクデイセキ    V:ヒルイシ      Hm:ハイドロマイカ    Ha:ハロイサイト    Ka:カオリナイト

変化をマクロな視点から観察することが可能であり、学習素材として適切である。

深層風化殻の示す風化実態をしっかり把握させた上で、風化作用がどのような素因や誘因のもとに生じてきているのか、その本質を追求させることが大切であろう。

#### IV 物質収支から捉えた花崗岩類深層風化作用の特質とその教材化

ここでは、前述の風化殻分帯に基づき、各風化段階がどのような物質の収支関係にあるのかについて明らかにする。そして、化学的風化作用の風化殻形成におよぼす影響について考察を加えるとともに、その教材化の方途を探ることを目的とする。

##### 1. 試料の採取及び分析の方法

###### (1) 試料の採取

分析に供した試料は、図一五に示す露頭①、②、③から採取した。露頭①では新鮮岩からカオリン帯までの7点の試料を採取した。露頭②では地表下11m、26mのカオリン帯から各1点、地表下6mの含赤色酸化鉄カオリン帯下部から1点の試料を採取した。露頭③では本地域

内で最も風化が進行した試料として、地表下0m、3mから各1点を採取した。

###### (2) 化学分析の方法

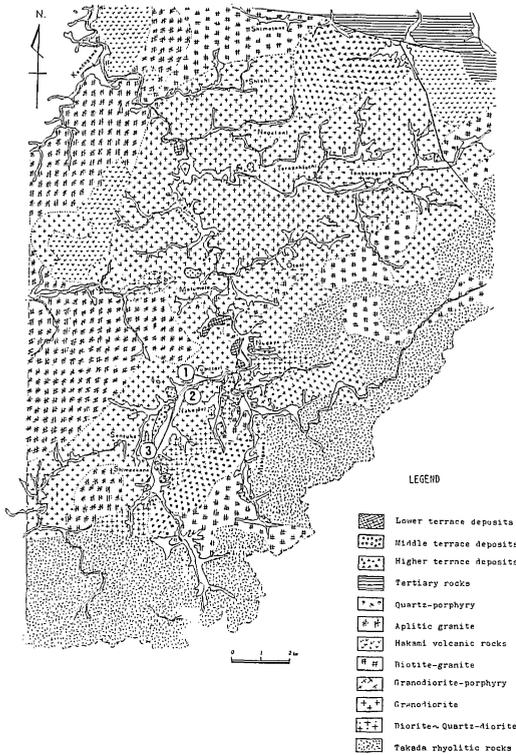
風乾した各試料をメノウ乳鉢中で微粉とし、分析試料として用いた。試料の特性からSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は重量分析法、TiO<sub>2</sub>は比色分析法、FeOはKMnO<sub>4</sub>滴定法、H<sub>2</sub>O(+)、H<sub>2</sub>O(-)は熱重量分析法、その他の成分は原子吸光分析法によった。なお、熱重量分析には、島津熱分析装置DT-30を使用した。原子吸光分析には、日立ゼーマン原子吸光分析装置180-70/80型を使用し、標準物質としてJG-1 Granodiorite及びJB-1 Basaltを用いて測定した。

###### (3) 密度の測定

岩塊状で採取可能な比較的新鮮な試料については風乾後、ニスで表面をコーティングし、空気中と水中で重量測定し密度を決定した。一方、風化度が高く岩塊状で採取不能な試料については円筒型土壌サンプラーを用い、不攪乱試料1000cm<sup>3</sup>を採取し、風乾後、重量測定し密度を求めた。

##### 2. 分析結果と考察

各試料の化学分析結果、その分析値より求めたノルム値及び密度の測定結果を表一2にまとめて示す。ノルム



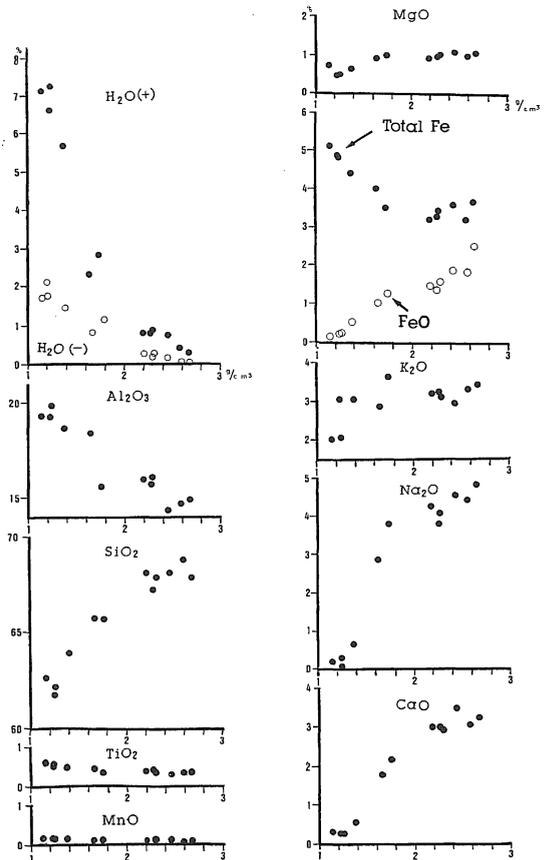
図一五 調査地域の地質概略と露頭位置

値の算出にあたっては、通常のノルム鉱物に、風化生成鉱物として出現するカオリナイトを加えた。

(1) 化学組成の相対的变化

風化作用による元素の動きを細かく論じるには、個々の岩石の風化程度を表示できる明確な指標が必要である。既に、岩石の風化程度を表示する種々の物理的・化学的風化指標が提案されている (Ruxton B. P (1957), 三浦 (1973), 木宮 (1975))。しかし、現段階では特に優れた表示法として確立されたものがあるわけではない。そこで、筆者は物理的基本量でありしかも測定が容易な密度を風化指標として用いることにする。図一六は風化の進行に伴う各酸化物の相対的増減を示す。但し、 $Fe_2O_3$  は風化過程で  $FeO$  の酸化による増加があるため  $Fe_2O_3$  の代わりに Total Fe をとって示している。相対的に減少する酸化物は、 $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $FeO$  である。一方、相対的に増加する酸化物は、 $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $H_2O (+)$ ,  $H_2O (-)$ , Total Fe ( $Fe_2O_3$ ),  $MnO$  である。 $Na_2O$ ,  $CaO$  の相対量は急激に減少するが、その一方で  $Al_2O_3$  や  $H_2O (+)$  の急激な増加がある。これらはシャチョウセキの分解とカオリン鉱物の生成に関わる現象

として理解できる。それに比し、 $MgO$  や  $K_2O$  は相対量の減少を生じにくい。 $MgO$  は密度  $1.7g/cm^3$  付近で減少傾向を示すが、風化末期まで残存し続ける。これはカクセンセキが比較的風化に強いことと、クローンモがその形を変えながらもその構造を最後まで残すことと深い関わりがある。また、 $K_2O$  は風化が進行しても、その相対量をほとんど変化させないが、密度  $1.2g/cm^3$  付近で急激にその量を減少させる。これらの結果はカリチョウセキが風化に対して強い抵抗性を示しながらも、含赤色酸化鉄カオリン帯上部で不安定となり分解していくことと、クローンモがその構造を風化末期まで残存させていることに対応していると考えられる。風化進行に伴う  $FeO$  の減少とカオリン帯から上位での、Total Fe の漸増は、 $FeO$  が風化の過程で酸化を受け、より安定な三価鉄を含むゲーサイトを形成し、溶脱を受けにくくなることに対応しているものと推定できる。



図一六 風化進行に伴う化学組成変化

表一 2 花崗閃緑岩とその風化物の化学組成とノルム鉱物

	新鮮岩帯		初期変色帯				バーミキュライト帯					
	1 Corestone 1		1 Corestone 2		1 Corestone 3		1 Corestone 4		1 Corestone 5		1 Corestone 6	
	Wt.%	Mol. prop.										
SiO <sub>2</sub>	67.97	1.132	68.87	1.147	68.06	1.133	67.97	1.132	68.20	1.136	67.27	1.120
TiO <sub>2</sub>	0.36	0.005	0.34	0.004	0.32	0.004	0.38	0.005	0.39	0.005	0.41	0.005
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.90	0.146	14.69	0.144	14.35	0.141	16.04	0.157	15.91	0.156	15.79	0.155
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.08	0.007	1.25	0.008	1.61	0.010	1.70	0.011	1.70	0.010	1.65	0.010
FeO	2.62	0.027	1.98	0.028	2.02	0.028	1.76	0.024	1.52	0.021	1.67	0.023
MnO	0.09	0.001	0.08	0.001	0.08	0.001	0.09	0.001	0.08	0.001	0.09	0.001
MgO	1.02	0.025	0.98	0.024	1.05	0.026	0.99	0.025	0.89	0.022	0.96	0.024
CaO	3.26	0.058	3.10	0.055	3.48	0.062	2.93	0.052	2.98	0.053	2.97	0.053
Na <sub>2</sub> O	4.85	0.078	4.44	0.072	4.58	0.074	4.08	0.066	4.29	0.069	4.29	0.069
K <sub>2</sub> O	3.43	0.036	3.30	0.035	2.96	0.031	3.15	0.033	3.20	0.034	3.25	0.035
H <sub>2</sub> O(+)	0.37	0.021	0.47	0.026	0.77	0.043	0.91	0.051	0.85	0.047	0.88	0.049
H <sub>2</sub> O(-)	0.03	0.002	0.08	0.004	0.23	0.013	0.40	0.022	0.28	0.016	0.32	0.018
Total	99.98		99.58		99.51		100.40		100.29		99.55	
Q	19.17		22.43		21.97		23.21		22.98		21.54	
Ka	0		0		0		1.54		0		0	
Or	20.21		19.59		17.37		18.32		18.94		19.50	
ab	41.19		37.91		39.01		34.48		36.16		36.16	
an	8.97		10.33		10.07		14.41		14.73		14.18	
Sal total	89.59		90.26		88.42		91.96		92.81		91.38	
Wo	3.04		2.10		3.03		0		0		0.23	
en	2.52		2.41		2.62		2.49		2.20		2.40	
fs	2.13		2.25		1.99		1.18		0.92		1.19	
mt	1.64		1.86		2.33		2.54		2.32		2.32	
hm	0		0		0		0		0		0	
il	0.76		0.61		0.61		0.76		0.76		0.76	
Ru	0		0		0		0		0		0	
Fem total	10.09		9.23		10.58		6.97		6.20		6.90	
total	99.63		99.49		99.00		98.93		99.01		98.28	
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	2.68		2.59		2.45		2.30		2.20		2.28	

	カ オ リ ン 帯						含 赤 色 酸 化 鉄 カ オ リ ン 帯					
	1 Corestone 7		2 26 m		2 11 m		2 6 m		3 3 m		3 0 m	
	Wt.%	Mol. prop.	Wt.%	Mol. prop.	Wt.%	Mol. prop.	Wt.%	Mol. prop.	Wt.%	Mol. prop.	Wt.%	Mol. prop.
SiO <sub>2</sub>	65.73	1.094	65.76	1.905	63.99	1.065	61.72	1.029	62.23	1.036	62.58	1.042
TiO <sub>2</sub>	0.33	0.004	0.42	0.005	0.48	0.006	0.51	0.006	0.52	0.007	0.54	0.007
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.52	0.152	18.42	0.181	18.67	0.183	19.30	0.189	19.85	0.195	19.31	0.189
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.07	0.013	2.82	0.018	3.90	0.024	4.63	0.029	4.60	0.029	4.91	0.031
FeO	1.43	0.020	1.20	0.020	0.54	0.008	0.25	0.003	0.21	0.003	0.20	0.003
MnO	0.09	0.001	0.09	0.001	0.13	0.002	0.13	0.002	0.13	0.002	0.13	0.002
MgO	0.96	0.024	0.89	0.022	0.69	0.017	0.43	0.011	0.50	0.012	0.72	0.018
CaO	2.15	0.038	1.79	0.032	0.59	0.011	0.32	0.006	0.29	0.005	0.33	0.006
Na <sub>2</sub> O	3.80	0.061	2.90	0.047	0.68	0.011	0.43	0.007	0.08	0.001	0.22	0.004
K <sub>2</sub> O	3.65	0.039	2.87	0.030	3.05	0.032	3.10	0.032	2.05	0.022	2.00	0.021
H <sub>2</sub> O(+)	2.90	0.161	2.35	0.131	5.75	0.319	6.63	0.368	7.30	0.406	7.02	0.400
H <sub>2</sub> O(-)	1.10	0.061	0.85	0.047	1.45	0.081	2.21	0.123	1.80	0.100	1.80	0.100
Total	99.73		100.38		99.82		99.57		99.56		99.94	
Q	21.72		24.18		30.60		29.04		32.52		33.24	
Ka	3.61		18.58		33.28		37.15		43.09		40.76	
Or	21.72		16.71		17.82		17.82		12.25		11.70	
ab	31.96		24.63		5.76		3.67		0.52		2.10	
an	10.56		8.90		3.06		1.67		1.39		1.67	
Sal total	89.57		93.00		90.52		89.35		89.77		89.47	
Wo	0		0		0		0		0		0	
en	0.40		2.20		1.70		1.10		1.20		1.80	
fs	3.17		0		0		0		0		0	
mt	3.02		3.71		0.46		0		0		0	
hm	0		0.32		3.52		4.64		4.64		4.96	
il	0.61		0.76		0.91		0.76		0.76		0.76	
Ru	0		0		0		0.08		0.16		0.16	
Fem total	7.20		6.99		6.59		6.58		6.76		7.68	
total	99.77		99.99		97.11		95.93		96.53		97.15	
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	1.75		1.65		1.38		1.23		1.25		1.15	

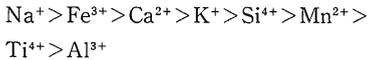
(2) 風化進行に伴う溶脱率変化

溶脱率は試料の化学分析値と密度から次のようにして求めた。まず化学分析による各酸化物の重量パーセントをそれぞれの分子量で割りモル比を算出する。次にこのモル比から陽イオン比を求める。求めた陽イオン比にそれぞれの風化物の密度を掛ければ、同体積中の陽イオン比が求められる。よって、各陽イオンの溶脱率は次式で与えられる。

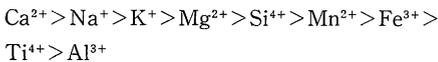
$$\text{求める陽イオンの溶脱率} = \left\{ 1 - \frac{\text{陽イオン比} \times \text{密度(風化岩)}}{\text{陽イオン比} \times \text{密度(新鮮岩)}} \right\} \times 100$$

以上の方法で求めた各風化段階での陽イオンの溶脱のしやすさは次の通りである。但し、鉄イオンについては、風化過程でのFeOからFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>への変換があるためTotal Fe (Fe<sup>3+</sup>)として表現した。

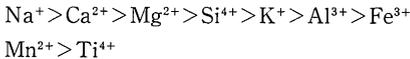
- ・パーミキュライト帯の試料 (密度2.28g/cm<sup>3</sup>)



- ・カオリン帯の試料 (密度1.65g/cm<sup>3</sup>)



- ・含赤色酸化鉄カオリン帯下部の試料 (密度1.23g/cm<sup>3</sup>)



- ・含赤色酸化鉄カオリン帯上部の試料 (密度1.15g/cm<sup>3</sup>)

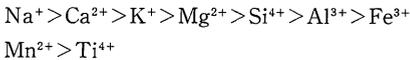


図-7は密度を風化指標とした時の溶脱率の変化を示す。

これらの結果は、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>がどの風化段階でも最も溶脱しやすく、しかも急激に溶脱が進むことを示している。逆に、Ti<sup>4+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Mn<sup>2+</sup>は溶脱しにくいイオンである。しかし、溶脱しにくいAl<sup>3+</sup>でも、含赤色酸化鉄カオリン帯では40%以上の溶脱率を示すようになる。Total Fe (Fe<sup>3+</sup>)は、風化初期にはよく溶脱を受けるが、その後半では溶脱されにくくなる。このことは二価鉄イオンの状態では溶脱を受けやすいが、ゲーサイト生成による二価鉄イオンの三価鉄イオンへの変換後は極めて溶脱を受けにくくなることを示している。K<sup>+</sup>が風化の末期に溶脱を受けやすくなるのは、カリチョウセキの分解と関わっている。

これらの溶脱率に示される傾向は必ずしもイオン化傾向に従わないで、むしろ造岩鉱物の風化分解のしやすさを反映している。

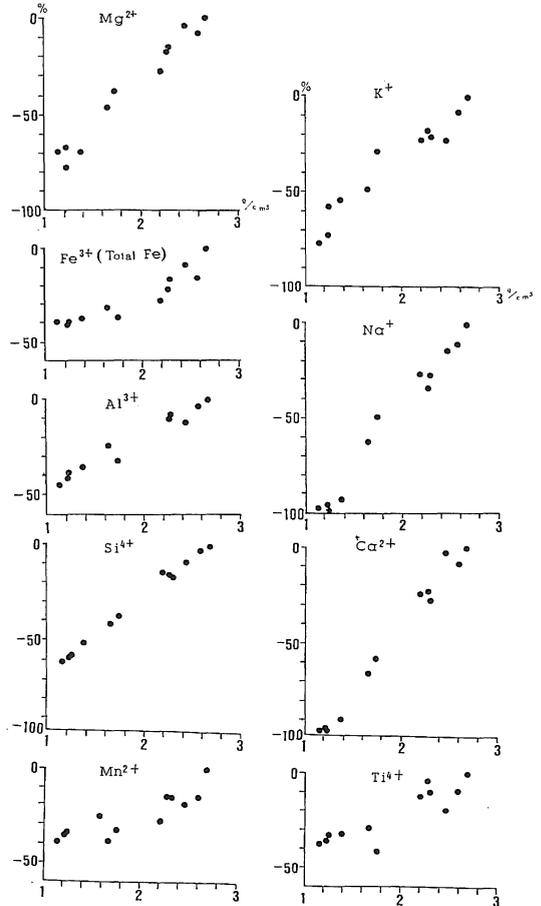


図-7 風化進行に伴う溶脱率の変化

(3) ノルム鉱物から見た鉱物相の変化

花崗閃緑岩とその風化物の化学分析値より求めたノルム鉱物(表-2)に用い、風化進行に伴う鉱物相の変化の検討を行う。

ここでは、算出されたノルム鉱物を用い、花崗閃緑岩とその風化物中に実際に存在する鉱物にできるだけ対応できる形で表現しようとした。その際、ノルム鉱物を端成分としてシャチョウセキ (Ab+An)、キセキ (wo+en+fs)、ジテッコウ (mt+il)を形成した。苦鉄質のクrownモとカクセンセキに対応するノルム鉱物としてキセキ類を用いているが、この方法ではk<sup>+</sup>イオンを含むクrownモやその風化物に対応できていない。この点に関してはさらに工夫を要する。

以上の手続きに従い、風化進行に伴うノルム鉱物相の変化をグラフ化し、図-8に示す。このグラフからシャチョウセキのカオリン帯での急激な減少とこれに対応し

たカオリナイトの増加が顕著である。カリチョウセキは含赤色酸化鉄カオリン帯上部に到ってはじめて減少傾向を示し、風化作用に対する抵抗性の強さを示している。含赤色酸化鉄カオリン帯においては、風化生成鉱物と残留鉱物との比がほぼ等しくなり、鉱物相中、カオリナイ

トの占める割合が最も高くなっている。

図-9は、風化進行に伴う溶脱量及び鉱物相の変化を表現したものである。この図は、風化作用が風化鉱物の生成と溶脱減少によって特徴づけられることを如実に示している。

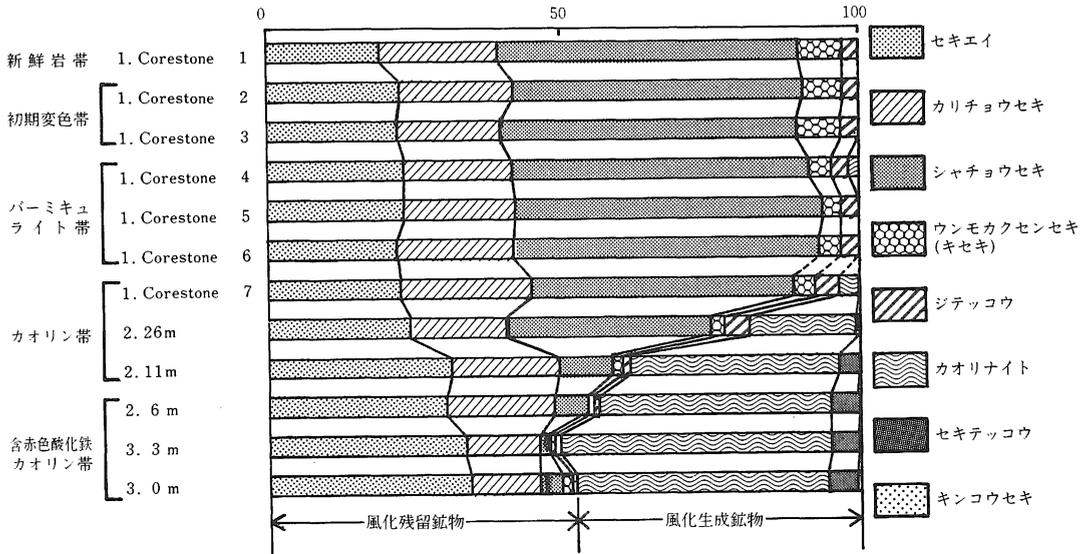


図-8 ノルム鉱物による風化鉱物相の変化

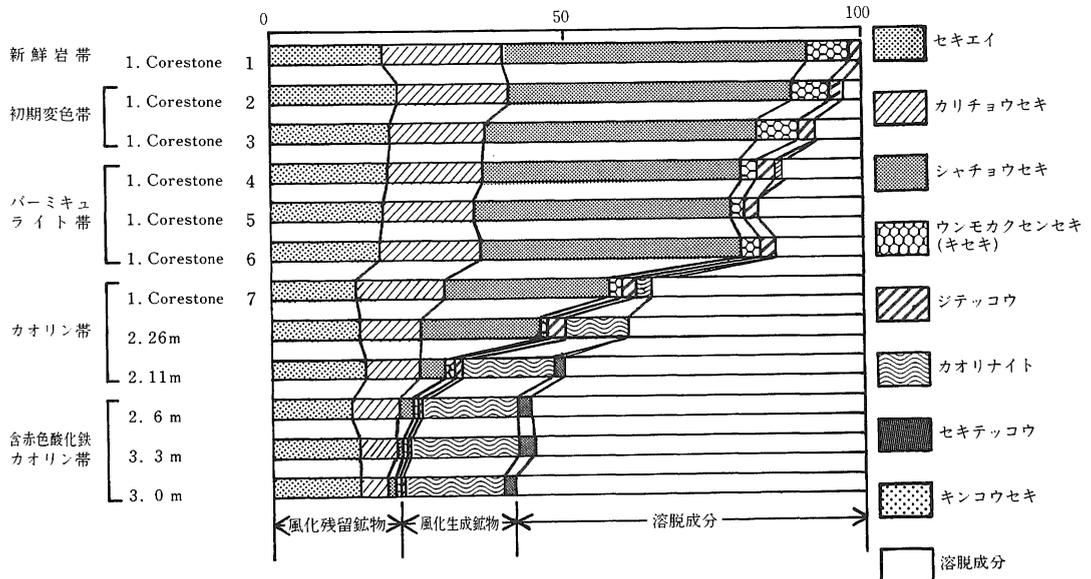


図-9 ノルム鉱物による鉱物相と溶脱率の変化

(4) 真砂土化や深層風化殻の形成機構

以上のように、花崗岩類の風化作用の特徴はセキエイ、カリチョウセキ、クセキがほとんど風化されないのにシャチョウセキとクローンモが成分を奪われ、化学

変化を被り、新しい粘土鉱物となっていくことである。この過程でのシャチョウセキの細片化が造岩鉱物の結合を緩め、真砂土化へと進めさせるものである。このように化学変化を岩石やその造岩鉱物にもたらずものは気

圈、水圏からもたらされる水+二酸化炭素+酸素で示されると考えられる。風化作用の基本様式を式に表わすと、  
新鮮岩+水+二酸化炭素+酸素→風化残留鉱物+粘土鉱物+溶脱成分となる。

従って、風化進行に伴い減少する成分が水に溶脱されたものであり、(風化残留鉱物+粘土鉱物)が風化岩となると考えられる。このように見ていくと、花崗岩類の風化作用は、溶脱作用と粘土鉱物形成作用に代表される化学的風化作用であり、その結果としての機械的風化作用であるといえることができる。

ところで、花崗岩類の風化作用の特徴は、その風化殻が非常に厚いことにあったが、風化作用の進行に必要な水+二酸化炭素+酸素はどのようにして地下深部まで到達するのであろうか。図-10からわかるように、風化作用は花崗岩類の断裂系に沿って進行している。即ち、水

の循環路としての断裂系が役割を担うのである。この断裂系の成因については、この断裂に発達する粘土鉱物やゼオライト鉱物から、花崗岩マグマ固結時に生成されたものと推定された(三浦, 秦 1970)。風化作用は、このような割れ目に沿って進行するのである。

以上のように、花崗岩類の化学的風化作用は、基本的にその風化作用の主役であるが、それに先行する構造的な割れ目の存在が必要である。化学的風化作用は、このようにして形成された微細な割れ目で進行する。このような構造的割れ目は本来花崗岩体内部に普遍的に存在するが、その存在密度は不均一で、それが高い場所ほど風化を受けやすい。

### 3. 花崗岩類風化作用の教材化

化学分析値及び各試料の密度測定値から物質の収支関係を明らかにし、化学的風化作用が溶脱作用と粘土鉱物形成作用に特徴づけられる風化作用であることを導き出すことは、高校生段階では十分可能であるし、図-8や図-9を使用しての風化進行に伴う溶脱量、風化残留鉱物相、風化生成鉱物相の変化を捉えることも興味を引く方法であろう。しかし、これらの手法は中学生にはまだ理解困難である。そこで、この化学的風化作用の事実を化学分析値を用いないで理解させ、実感させる必要が生じてくる。その一つがメチレンブルーによる粘土鉱物の染色である。この方法は風化進行に伴う粘土量の増加を粘土鉱物の染色により視覚的に把握できると同時に、粘土鉱物への選択的吸着が風化作用の結果生じた新しい物質の存在を示すことになる。粘土鉱物の染色問題については、稿を改めて詳述するつもりである。

溶脱現象については、同体積の風化物を採取し、その重量の違いから密度を算出することにより、溶脱量を推定することは、中学生にも可能である。

花崗岩内に初期的に存在する微細な割れ目の存在は試料に赤インクを染み込ませることにより、明確な観察が可能となる。ルーペの使用により、粒子内、粒子間に存在する割れ目をはっきりと観察できる。

これらの手法は、中学生にも使用可能であり、中学生にも化学的風化作用の学習が可能であることを示している。

## V 花崗岩類風化作用の実験授業

### 1. 風化作用の中学校用教科書での取り上げ方

従来の教科書は、各社とも物理的風化作用に力点を置き、しかも、地表であったとしても自然条件では考えられない、花崗岩をガスバーナーで熱し水中に入れるとい

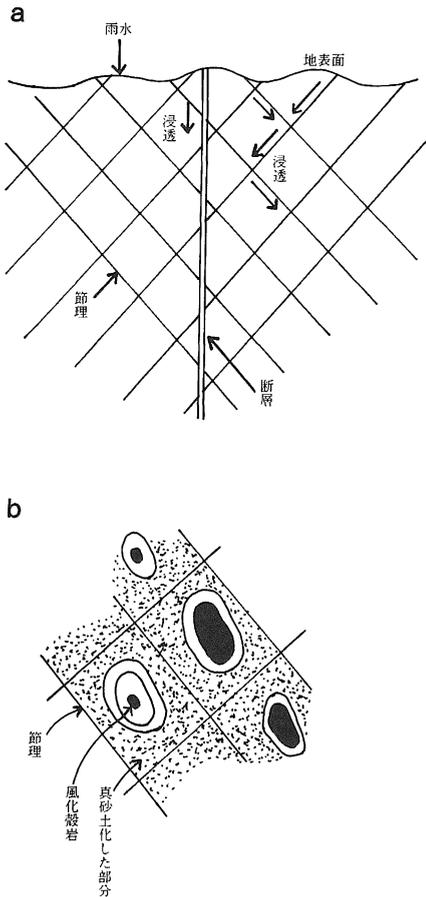


図-10 地下への水の浸透と風化核岩の形成  
a : 節理や断層が地下水の通路となる。  
b : 風化は節理系にそって進行し、その中心部分に風化殻岩を残す。

う急加熱～急冷却実験を用い、風化作用のメカニズムを説明しようとしてきた。現行指導要領では、「地表の変化と流水のはたらき」を直接扱う単元が省略されたため、風化作用の教材も縮小されることとなったが、風化作用の内容記述においては、かなり改められてきた。東書、啓林、学図の各社とも、機械的風化作用と化学的風化作用を併記している。化学的風化作用については、水と岩石との反応を取り上げている点は評価できる。しかし、各社とも、機械的風化作用と化学的風化作用の相互関係や化学的風化作用をどのような観察事実から捉えるのかについて十分な説明がなされていない。そこで、筆者は、花崗岩類の風化作用の本質にせまり、しかも地域に根ざした授業を行いたいと考え、以下の指導計画をたてた。実験授業は、島根大学教育学部附属中学校3年3組を対象として実施したものである。

## 2. 授業計画

### 1. 小单元名 花崗岩の風化

#### 2. 小单元の目標

- (1) 花崗岩の風化露頭を観察し、岩石の変質が、地表から地下へ、割れ目の面から内部へと進んでいることをスケッチとことばで表現できる。
- (2) 岩石の風化とは、岩石の粘土化の過程であり、花崗岩の造岩鉱物のうち、他の鉱物との比較から斜長石と黒雲母が特に変質しやすいことを観察事実から説明できる。
- (3) 深層風化作用の原因は、花崗岩の割れ目を伝わって下降する水と、その中に含まれる酸素、二酸化炭素が長い時間をかけて岩石に働きかける化学作用であることを推論し、説明できる。
- (4) 風化現象に興味を持ち、集中して観察や話し合いに取り組むことができる。

#### 3. 学習計画 4時間

- (1) 野外に出て「真砂土」化した花崗岩の露頭を観察しまとめる。……………2時間
- (2) 野外観察で生じた疑問を、持ち帰った試料を中心に観察実験し解決する。……………1時間
- (3) 風化作用はどのようにして生じるか推論する。……………1時間

#### 4. 学習過程 表一3に示す。

## 3. 授業の実際

### (1) 花崗岩類風化殻の観察

花崗岩地帯の地表付近がどのようになっているかを予想し討論した後野外に出かけ、次に示す2露頭について観察を行った。

#### ・ 露頭 A

松江市忌部町千本ダム南側、山砂採取場にある中粒黒雲母花崗岩の露頭。高さが約30メートルあり、風化殻の新鮮岩帯～含赤色酸化鉄カオリン帯までが観察できる。断裂系がよく発達し、新鮮岩は、最下部に風化殻として露出するのみである。地表から地下への風化作用がどのように進行するのかを観察するのに好適地である。

#### ・ 露頭 B

松江市忌部町千本ダム北側、道路わきにある花崗閃緑岩の露頭。タマネギ状風化がよく発達し、断裂系が風化に果たす役割について観察するのに好適地である。

観察にあたっては、まず新鮮岩の組織、造岩鉱物の種類や大きさ、量比をよく観察させた。露頭観察では、まず露頭全体の様子をスケッチさせ、色調の変化や断裂系の発達の様子などの概観を捉えさせた。次に、露頭に近づき、岩石風化物を手に取り五感を用いて観察させた。その際、色、粒度、硬度、岩石組織、鉱物等が風化進行に伴いどのように変化していくのかをよく観察するように指示した。また、必要に応じ試料を教室に持ち帰らせた。野外観察の結果は、レポートにまとめさせた。

露頭Aでは、下部、中部、上部と3ヶ所の観察点を取り、比較観察させた。下部では初期変色帯が中心となり、部分的にはパーミキュライト帯に移行した部分を含む。大部分が岩盤としての性格をまだ残しているものの、ハンマーで軽打すると数～10センチメートル前後の岩塊となりくずれる。シャチョウセキはすでに劈開面で光を反射しなくなり白濁し、細片化した部分も含まれる。クロウンモも光沢が鈍くなり変色し始めている。

中部は典型的なカオリン帯の特徴を示す。タマネギ状風化の跡がよく保存されているが、既に内部まで真砂土化が進んでいる。岩石の組織は保存されているものの、風化物を露頭から取り出そうとするとばらばらに砕けてしまう。シャチョウセキは指間で簡単にくずれてしまい、粘土化の進行が著しい。クロウンモも変色が激しく、金色の光沢を持つ。

最上部は含赤色酸化鉄カオリン帯の特徴を示す。全体が赤褐色をしており、岩石の組織もかなり乱されている。風化物を取り出して指間でもむと小粒化した石英が抵抗を示すだけである。

露頭Bでは、断裂系から風化殻岩への変化が明瞭に観察できた。また、岩石を切る断裂系の密度の差が風化作用の速度に影響を与えていることもよく観察できた。クロウンモの周辺が溶脱された酸化鉄により次第に茶色化していくようすや、クロウンモ全体の色調の変化もよく

表一 小单元「花崗岩の風化」の学習過程

時間	学 習 活 動	留 意 事 項	
(2)	はじめ		
	花崗岩地帯の地表付近はどのようなになっているかを想像してみよう。(図・討議)	○事前にアンケートをもとに討議し、地表付近の想像をふくらませる。	
	松江市忌部町付近の花崗岩露頭を観察し、地表付近がどのようなになっているかを明らかにしよう。(露頭Aの観察)	○新鮮な花崗岩を取り出し、造岩鉱物の種類、大きさに注目させる。露頭全体が見える位置にたちその大まかな変化のようすを把握した後に近づいてみさせる。	
	CH ヒント	CH 新鮮な岩石が風化していくのにどんな変化をするか。断裂系に注目しているか。殻の変化、横の変化に注目しているか。	
	露頭Aでの観察をもとに、岩石を切る断裂系と風化との関係をさらに詳しく観察しよう。(露頭Bの観察)	○たまねぎ状風化のようすを風化構造と鉱物の変質の両視点で観察させる。 ○さらに追究したい箇所については、試料採取させる。	
	CH ヒント	CH ①断裂系にそって風化作用が進行していることが認められたか。(鉱物の変化に注目しているか。 ②風化の度合いと割れ目系の密度に注目できたか。	
	野外観察をまとめ、レポートしよう。そしてさらに追究したい問題を明らかにしよう。	○①ねらい、②予想、③観察結果、④考察、⑤疑問点と次時での追究方法、⑥感想を書くように指示する。	
	CH ヒント	CH スケッチを用いて正確に観察結果を記述しているか。風化の実態をとらえているか。疑問点と解決方法はどのように考えているか。	
	(1)	追究したい問題ごとに分かれ、解決しよう。	○問題とその解決方法を明確にして取り組むようにさせる。解決方法については、必要に応じて指導をする。
		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">A CH ヒント</div> <div style="text-align: center;">B CH ヒント</div> <div style="text-align: center;">C CH ヒント</div> <div style="text-align: center;">D CH ヒント</div> </div>	CH 問題の取り上げ方、解決方法は適切か。
各グループの追究内容を発表しよう。		○各グループの発表が風化作用全体の中で、どのような意味を持つか位置づけてやる。	
野外と室内の観察・実験を通し、明らかにした風化花崗岩の事実から、花崗岩が風化する原因や選択について推論しよう。		○風化に対する割れ目(断裂)系のはたす役割、深層風化作用、鉱物の化学的風化に注目させる。 ○河川水や海水の成分について助言し、溶脱現象についてもふれる。	
CH ヒント		CH 観察事実に基づいた推論活動ができたか。	
(1) もし、風化作用の原因が、水と水に溶けた空気にあるとすれば、新鮮な花崗岩にも小さな割れ目があるはずだ。赤インクの中に花崗岩をつけ毛管現象が短時間でおきるか赤インクの動きを観察しよう。		○事前に用意しておいた観察試料をくばる。 ○花崗岩の中には風化作用を受ける以前から微小な割れ目が存在することに注目させる。	
花崗岩やその風化物の顕微鏡写真のスライドを見て、鉱物を通る割れ目とその風化の過程について説明を聞く。			
島根県の実砂土の分布と地形との関係、さらに石見と出雲の地域性について、話を聞く。		○島根県花崗岩分布図を配布する。 ○環境の基礎としての地質に興味を持たせる。	
おわり			

観察でき、風化が化学変化であることを生徒に気付かせる重要なポイントとなった。

## (2) 野外観察で生じた疑問点の追求

野外観察を終えてさらに追求したい点として、レポートの中で生徒が述べているものを分類すると次のようになった。

### A 断裂系について

○断裂系は、いつどのようにしてできたか。断裂系がすでに存在していて風化しやすいのか。風化の結果断裂系が生じたのか。

○われ目の方から内部へ向かって風化が進むのはなぜだろう。

### B 化学的風化作用について

○風化するとなぜ赤茶色に変色するのだろうか。又、黒雲母が金色になったり、石英や長石が茶色になるのはなぜだろう。

○風化が進んだ上部の方では、石英は見えるが、斜長石が見えなくなっている。風化を受けやすい鉱物と受けにくい鉱物があるのだろうか。又、斜長石はどうなったのだろうか。

○真砂土を還元したら、もとの色にかえるだろうか。

### C 機械的風化作用について

○風化するとかたい岩石がボロボロになってくずれてしまうのが不思議でたまらない。真砂土がやわらかくなるのは、粘土質の部分が多くなるからだろう。粘土質の部分は、どのようにしてつくられるのだろうか。

### D たまねぎ状風化について

○核岩から周囲の層状の風化岩へと何が変化しているのか。又、なぜたまねぎ状になるのか。

### E 水の作用と風化について

○万年筆のインクが岩石に染み込んでいった。岩石の中に、ほんとうに水ははいるのか。ほんとうにはいるとすれば、どれくらいの量の水が浸透するのか。又、岩石は水によって、どのような作用を受けるのか。

### F 熱の作用と風化について

○温度変化によって岩石は、どのくらいもろくなるだろう。

以上のA～Fの疑問のうち、断裂系の成因については、授業者が説明することにし、熱の作用については、深層風化作用の説明にならないとの意見により追求の対象から外した。また水の作用については、後で学級全員で追求することとし、残りの問題で問題別グループを作り解決を図ることとした。各グループの追求課題とその結果

を表一4に示す。

## (3) 風化作用の原因の追求

野外観察と室内での疑問点の追求をまとめた後、その事実から風化の原因について推論した。風化の原因については水、空気（酸素・二酸化炭素）、温度変化が上がってきたが、このうち、今まで調べた風化作用の事実と照らし合わせ、主な原因を探ることとした。深層風化すること、風化作用が一種の化学変化であること、造岩鉱物が選択的に風化することなどを説明するのは、水や空気が地下深くまで浸透し、化学変化を起こさねばならない。温度変化や水の三態変化は、地表近くでの機械的風化作用を引き起こすことはできるが、風化作用の観察事実から考えると、その役割は極めて少ないと考えた方がよいという意見が多数を占めた。地下深くまで水や空気が侵入するには、どうしてもその通り道が岩石内に必要になってくる。割れ目から風化作用が開始する事実から割れ目としての断裂系が水や水に溶解した空気等を運ぶパイプであろうと推論できた。その断裂系の成因については授業者から補足した。しかし、断裂系に達した水や空気がさらに岩石内に入らねばならない。そのための通路はどうかという問題になり、新鮮な岩石内に割れ目があるか、岩石に赤インクを染み込ませて観察することにした。観察の結果、赤インクは岩石内に染み込んでいくが、その速度が場所によって相当異なること、そして赤インクに染まった岩石を割って観察すると、石英や長石の中や境界に既に割れ目が存在し、そこに赤インクが侵入していることが明らかとなった。岩石内の割れ目とその働きを顕微鏡写真のスライドで見せた後、これらの割れ目の成因についても授業者が補足した。この授業を通して花崗岩類の風化作用の本質は化学的風化作用であること、そして化学的風化作用が生じるための物理的条件が既に地下深くで準備されていることが確認できた。

## 4. 実験授業の評価

地域の自然に触れさせ、自然のほんとうの姿を少しでも生徒達に知らせたいと願い、この授業に取り組んできた。生徒たちにとって、授業後の感想をいくつか引用してみる。

表一 野外観察で生じた追求課題とその結果

	①風化物の還元 (12人)	②鉱物の垂直変化 (15人)	③たまねぎ状風化と鉱物 (10人)	④風化と粒度の変化 (18人)
課 題	風化岩が赤茶色になるのはどうしてだろう。	新鮮であった造岩鉱物は下層から上層へと風化が進むにつれて、それぞれどのように変化したのだろう。	たまねぎ状風化において核岩からわれ目までどのように鉱物が変化するのか。	風化につれて粒度はどのように変化するのだろうか。粘土は最初の鉱物が小さくなっただけのものか、それとも化学変化して生じた新しい物質か。
追 究 方 法	もし赤茶色が、岩石中の鉄分が酸化され酸化鉄となったならば還元すれば黒色になるはずである。そこで、赤茶色になった試料を加熱しながら水素を通し、還元実験する。	○下層・中層・上層の真砂土を採取し、何回も水洗いし、粘土分を洗い流す。残った鉱物を探す。先のするどいピンセット、ルーペ、磁石を用意する。	○課題②と同じ方法を用いる。	○メチレンブルーを溶かした水中で、風化段階の異なる花崗岩を攪拌後、放置したものについて観察し、粒度の比較をする。また、メチレンブルーがどの部分に吸着するかを見る。
結 果 と 考 察	○赤茶色であった真砂土がしだいに黒ずんできた。中にあった金色に変化していたクロウンモも、新鮮なクロウンモのように黒色に戻った。従って、赤茶色の真砂土は、 $O_2$ により酸化された結果の変色であり、クロウンモの変色も酸化と関係していると考えられる。	○下層 { シャチョウセキはピンセットの先でつくつくずれる。クロウンモは部分的に変色 } ○中層 { シャチョウセキの量が激減し、しかも下層よりさらにもろくなる。クロウンモは金色となり薄くはげやすい。セキエイ、セイチョウセキは新鮮 } ○上層 { すべての鉱物が細片化しやすく、セキエイ、ジテッコウは新鮮である。セイチョウセキもたまにみつかる。金色に変化したクロウンモは少量含む。シャチョウセキはみあたらない。 } セキエイ、セイチョウセキ、ジテッコウは風化を受けにくい鉱物であり、シャチョウセキ、クロウンモは激しく変化する。上層ではセキエイでさえ細片化する。	○花崗閃緑岩の新鮮度 シャチョウセキ>セキエイ>セイチョウセキ>クロウンモ>カクセンセキ>ジテッコウ まず変化を示すのは、クロウンモで、周囲の鉱物を茶色にそめながら、金色に変化をはじめ。シャチョウセキもしだいにやわらかくなり、われ目近くでは、消えてしまう。セキエイ、セイチョウセキ、シャチョウセキ、ジテッコウは、安定である。カクセンセキは風化がすすむと細片化を受けやすい。	○下層では、ほとんど粘土分がなく粒度も大きい。メチレンブルーに着色されない。中層、上層へと粘土分が急激にふえ、その部分がメチレンブルーにより薄く着色される。上層では、各鉱物粒の細片化が目立つ。従って粘土は風化の過程でできた新しい物質である。

松江にあんな大きなマグマだまりがあって驚いた。自分たちが地下深くにあったマグマだまりのど真中に今立っていると思うと実に不思議な気がする。自然はとてもし論に忠実でわかりやすく観察しやすかった。人間の生み出した科学の力のすばらしさがわかったような気持ちになっている。

忌部には何度も行ったことがあるが、あんなにきれいな花崗岩があるとは思わなかった。いたるところに岩石に割れ目がはいつていたが、どうしてこんなものができるか実に不思議だった。(中略)最初なぜ風化すると赤っぽくなるのかわからなかったが放課後、還元の実験をやった鉄色がでてきたので、やっと推理ができとても嬉しかった。

現場についてみると自然の大きさに圧倒されてしまい、どこから手をつけていいかなかなかわからなかった。もっと予備知識をつけておけばよかったと思う。また、観察時間がたった1時間くらいではよくわからなかった。一つの露頭に一日でもしがみついていたかった。それほどあの美しい花崗岩がぼろぼろにくずれるのは不思議でたまらなかった。

このような感想を大多数の生徒が寄せており、五感を通して地域の自然を科学することに喜びを見出し、風化現象の不思議を追求しようとしている姿勢は評価できると考えている。風化作用の主役が化学的風化作用であることを中心とした授業としては、ほぼ今回の流れで良いと考える。

今後の課題としては次のことがあげられる。生徒の中には、十分な露頭観察ができなかった者もあり、観察の視点をさらに明確にしたり、個々の生徒の実態に即した野外観察のさせ方を検討する必要がある。また、風化作用の粘土量の定量化など実験開発も必要である。

## VI ま と め

「花崗岩地帯」の教材化を図ることを目的とし、その第一歩として、花崗閃緑岩深層風化殻の風化実態と形成機構を明らかにし、それに基づく教材化及び実験授業を行い、その結果を検討した。その結果、つぎの点が明らかとなった。

1. 赤名花崗閃緑岩深層風化殻は、五感による観察及び顕微鏡観察、X線粉末回折の結果より、次の6層に分帯

できる。(1)新鮮岩帯、(2)初期変色帯、(3)パーミキュライト帯、(4)カオリン帯、(5)含赤色酸化鉄カオリン帯、(6)土壤帯

2. 風化物の化学分析の結果は次の通りである。風化進行に伴い、 $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $H_2O(+)$ 、 $H_2O(-)$ 、Total Fe は増加するが、他の元素は減少する。 $CaO$  と  $Na_2O$  の急激な減少と  $Al_2O_3$ 、 $H_2O$  の増加はシャチョウセキのハロイサイト化に対応する Total Fe の増加はゲーサイトの生成による。一方、 $K_2O$  と  $MgO$  は風化段階の初期には徐々に減少するが、風化段階末期には急激な減少を示す。これはカリチョウセキやカクセンセキが比較的風化作用に抵抗性を示すことに対応している。また、風化進行に伴い溶脱率は増加し、含赤色酸化鉄カオリン帯では約60%の溶脱率を示す。

3. 深層風化殻の分帯については、中学生以上であれば、五感による観察活動で識別可能であり、優れた観察教材となりうる。

4. 化学的風化作用については、風化物の化学分析値、密度、ノルム値等を使用することにより、高校生以上では動的な風化作用の把握が可能となる。中学生以下では、粘土鉱物の染色等の五感に訴える教材開発が望まれる。

5. 実験授業では、風化露頭の観察が、認知、情意両面にわたり有効であった。また、メチレンブルーによる粘土鉱物の染色、赤インクによるミクロクラック系の顕在化は有効に機能した。

## 引用文献

合川 功 (1981) 風化花崗岩に関する実験・観察法の研究 (I) —風化分帯と風化分帯別の粒度組成—: 愛知県教育センター研究紀要, 理科特集第17号, 69—76.  
 合川 功 (1982) 風化花崗岩に関する実験・観察法の研究 (II) —風化色の決定・表示法—: 愛知県教育センター研究紀要, 理科特集第18号, 57—60.  
 合川 功 (1984) 風化花崗岩に関する実験・観察法の研究 (III) —風化分帯別化学組成—: 愛知県教育センター研究紀要, 理科特集第20号, 55—58.  
 秦 明德 (1987) 赤名花崗閃緑岩深層風化殻: 島根大学教育学部紀要 (自然科学), 第21巻, 147—162.  
 秦 明德 (1989) 風化作用観察学習のための基礎的研究—花崗閃緑岩深層風化殻を例として—: 地学教育, 第42巻, 第4号, 139—146.  
 木宮一邦 (1975) 花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度—花こう岩の風化・第一報—: 地質学雑誌, 第81巻, 第6号, 349—364.

小森信男 (1985) 水の乾燥湿潤の繰り返しによる新第三系泥質岩の風化について: 地学教育, 第38巻, 第5号, 151—156.

松浦 誠, 柿谷 悟, 椋代仁朗 (1976) マサ地帯における災害防止に関する類型化とその適用に関する研究: 昭和50年度文部省自然災害特別研究報告, 1—36.

三浦 清, 秦 明德 (1970) 風化花崗岩の節理型崩壊と節理粘土: 応用地質, 11巻, 2号, 6—38.

三浦 清 (1973) 深成出類の風化に関する研究, 第一報—第三紀末の赤色風化作用による江津深成岩体の風化—: 応用地質, 14巻, 3号, 1—16.

文部省 (1989) 小学校指導書, 理科編.

文部省 (1989) 中学校指導書, 理科編.

Ollier, C. D. (1969) Weathering: Olliver & Boyd, 120—134.

Ruxton, B. P. and Berr, L. (1957) The weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong: Bull. Geol. Soc. Amer., 68, 1263—92.

竹内 均, 都城秋穂 (1965) 地球の歴史: 日本放送出版協会, 101.