

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－

岡本 研

岩石の風化作用は単なる自然現象のひとつではなく、地球環境を考える上で大変重要な意味を持っており、理科教育の中でもっと大きく取り上げられるべき題材である。風化作用から何を考えさせ、何を学ばせるのか、また、どのような方法で風化作用を調べ、考察していくのかということについて検討した。

[キーワード] 地学 風化 地球環境 粘土鉱物 生態系 土壌 科学的思考力

はじめに

岩石や地層などの自然の素材を野外で観察し、それらを採取して詳しく調べていく過程を通じて大地の成り立ちを考察させていくことは、児童・生徒に自然科学を学ばせる上で、また、科学的な思考力を身につけさせていく上で大変重要である。

岩石や地層の観察は、新鮮な部分の観察が中心となるのが通例であるが、自然界で観察される岩石や地層はほとんどが風化した状態にあり、新鮮面が観察されるのはごく最近崩壊や破壊された状態の岩石や地層である。つまり、新鮮なサンプルというものは、自然界では例外的な存在なのである。教科書的には、この「例外」を観察して岩石や地層について学ぶこととなり、これほどありふれた自然現象である風化作用については、観察の際の"脇役"として扱ってしまっているのが現状ではないだろうか。

風化作用は、「いつ」「どのような」「何によって」「どんな条件で」進行してきたのかを解明することが非常に困難であり、そうした意味では風化作用はいわば「ノイズの塊」である。しかしこのノイズは、どのようにして生じ、その歴史の中で、地球環境にどのような影響を与えてきたのだろうか。こうしたことを学んでいくと、風化作用は単なるノイズではなく、地球科学の中で非常に大きな役割



図1 砂岩層中の玉ねぎ状風化。物理的風化の一種。(北海道士別市温根別)

とストーリー性を持っていることに、誰もが驚くことだろう。

近年、風化作用を調べる技術の発展とともに、地球の生態系や気候との相互作用に関して、風化作用の果たす役割が大変重要であることが認められるようになってきた。^{*1)}また、風化作用は、地質学のみならず、岩石学・鉱物学・土質工学・土壌学・化学・生物学・地形学・農学・環境工学等の各研究分野とも密接に関連し、さらに自然災害や防災教育へとつながっていく要素を持っている。風化作用は、今後は地球環境を支えるグローバルな自然現象として位置づけられ、教育現場においても総合的な視点から、より大きく取り扱われるべき題材なのである。

1 風化作用とは

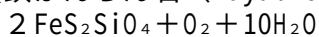
岩石の風化作用は、様々な要素が複雑に関与する作用であり、一般的には、物理的風化作用・化学的風化作用・生物的風化作用の3つに分類され、「地表（付近）で大気、地表水などの関与の下で岩石が破碎され、変質して地表において安定な状態になろうとする作用」のことである^{※2)}。

物理的風化作用は、気温変化に伴う鉱物間の熱膨張率の違いや、水の凍結による体積膨張などにより発生する割れ目（crack）により、地表に露出した岩石を破壊・細粒化する作用であり、岩石中の鉱物はほとんど変化しない。そのほかの物理的風化としては、シーティング（sheeting）という現象も重要である。これは、地下深部にあった岩石にはたらいっていた圧力が地表で解放されることによる岩石の膨張によって、割れ目が発達することである。

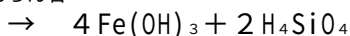
※2) トンネル掘削の際に発生する「岩はね」と呼ばれる現象がそれにあたる。

化学的風化は、岩石を構成する鉱物が、地表の環境においてより安定な化合物に変化する過程である。岩石・鉱物は地下水・地表水・空気と接触し、水和・加水分解・溶出・酸化・還元・脱水といった様々な化学反応を起こし、その際に酸素と水は中心的な役割を果たす。溶解度の高い元素は除去（溶脱）されていき、溶解度の低い元素は残留して粘土鉱物が生成されていく（図3）。

【鉄かんらん石（fayalite）の酸化】



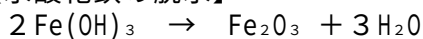
鉄かんらん石



水酸化鉄

珪酸

【水酸化鉄の脱水】



赤鉄鉱

溶脱しやすい元素やイオンは、 Cl 、 $\text{SO}_4 > \text{Na}$ 、 Ca 、 $\text{Mg} > \text{K}$ 、 $\text{Si} > \text{Fe}$ 、 Al の順となっており、 Na や Ca は溶脱しやすく、 Fe

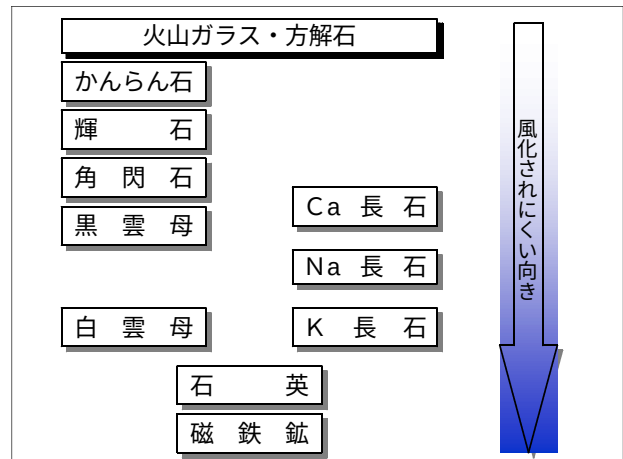


図2 鉱物の風化抵抗度

や Al は溶脱しにくい。こうした性質に伴い、鉱物の風化に対する抵抗度がそれぞれ異なり、造岩鉱物の風化抵抗度はN.L.Bowenの火成岩鉱物の晶出順序にほぼ従って増加し、^{※3)} 火山ガラス・方解石は最も小さく、磁鉄鉱は最も大きいグループである（図2）。化学的風化は、物理的風化が進行するほど活発になり、両者は互いに影響して複合的に起こる。

生物的風化作用は、主に植物と岩石との関係において認められ、植物の根が岩石の節理や割れ目に侵入して破壊を進行し、土中の空気や水分に CO_2 を与えたり、有機酸の供給などによって pH を低下させ、鉱物の化学的風化を進行させるという作用である。^{※4)} 岩石の化学的風化による生成物は、生物活動と協働して土壌をつくりだしていく。

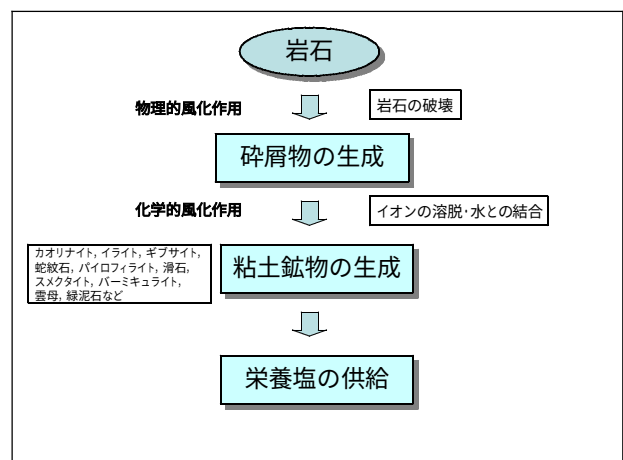
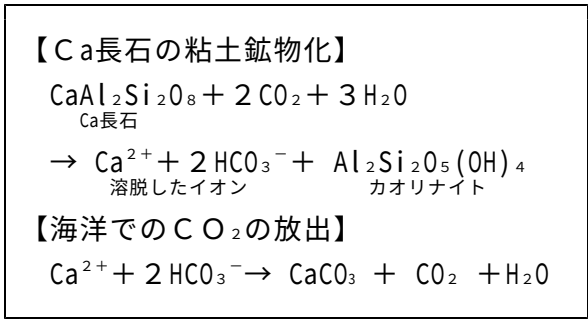


図3 風化作用の流れ

2 風化と地球環境

岩石の風化作用が地球環境に与える影響にはどのようなものがあるだろうか。物理的風化は地形を変化させ、化学的風化は生物の存在に欠かせない元素を土壌や海水などに供給するとともに、その際の化学反応によって物質循環の原動力となっている（図4）。また、生物は風化作用を促進する活動を行っており、両者の相互作用で生物的環境は保たれている。

陸上の岩石が風化・削剥されて海洋へと運搬される際、岩石に含まれる Ca^{2+} や Mg^{2+} が化学的風化によって溶出し、河川水と共に運搬されて海水に供給され、さらにこれらのイオンは CO_2 と反応し、炭酸塩となって固定される。大気中の CO_2 のレベルコントロールに関しては、このような作用の他に、化学的風化によって粘土鉱物中に CO_2 が取り込まれることが知られている。例えば、Ca長石がカオリナイトに変質（粘土鉱物化）する際と、海洋での CO_2 の放出の化学反応式は以下のようになる。



近年、様々な観点からこのような CO_2 の除去メカニズムに関して研究が進められており、 CO_2 の増大による気温の上昇と、それに伴っ

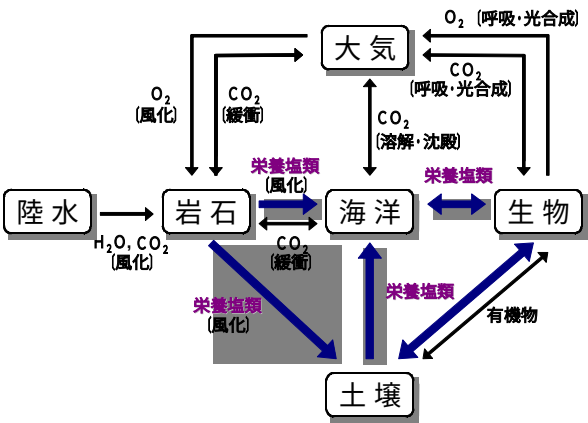


図4 風化作用と地球環境

た風化作用の促進、緩衝メカニズムによる負のフィードバック作用による気温の上昇抑制など、風化に関連した地球環境問題は、重要な今日的課題となっている。^{※5) 6)}

河川水及び海水中の溶存イオンについて見てみると、表1、2に示すように、海水中に多く含まれる金属イオンは、風化した岩石から溶脱しやすいイオンが多く、生物の生存に欠かせない元素は岩石から供給されていることがわかる。また、このことは原始地球の大気や海水の組成変化を推定する上でも重要であり、大陸の成長や O_2 の増加により岩石の風化・侵食が進行し、多量のイオンが海水中に溶け込んでいったことが推定される。約6億年前に O_2 濃度がパストール点に達し、生物が爆発的に進化したことは良く知られているが、当時 O_2 の増加に伴って化学的風化作用もまた爆発的に進行し、地球環境に大きな変化を与えたことが関係していることは容易に想像できる。

表1 海水中の主な含有元素濃度（理科年表環境編より）

溶存元素(イオン)	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	SiO ₂	Fe
溶存濃度(mg/ ㍻)	10800	390	410	1300	19400	8980	2.5	0.00006

表2 陸地を構成する主な火成岩の化学組成（理科年表より）

化学組成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO + Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
島弧玄武岩	51.9	16.0	9.56	6.77	11.8	2.42	0.44
カルクアルカリ安山岩	59.2	17.1	7.10	3.70	7.10	3.20	1.30
カルクアルカリ流紋岩	75.2	13.5	2.10	0.50	1.60	4.20	2.70
花崗岩	72.2	14.6	2.40	1.00	1.70	2.90	4.50

※単位：重量%

3 学習指導要領における風化作用の扱い

学習指導要領や教科書では、岩石の風化作用はどのように取り扱われているのだろうか。

小学校では、地層の形成や岩石についての学習を行っているが、風化作用については全く取り扱われておらず、中学校では教科書に風化作用についての簡単な記述はあるものの、学習指導要領には現れない言葉である。高等学校では、地学Ⅰと理科総合Bにおいて、「岩

石がもろくなり、侵食・運搬によって地形が変化する」「生物活動を支える場としての土壌の形成」という観点を中心として風化作用が取り扱われており、化学Ⅰや理科総合Aでもセラミックスの材料として粘土が取り扱われているが、風化作用が地球環境と深く関わりを持つグローバルな自然現象という位置づけはなされていない（表3）。

表3 学習指導要領の風化関連事項

小学校	風化は取り扱われていない
中学校	第二分野 (2)大地の変化 大地の活動の様子や身近な地形、地層、岩石などの観察を通して、地表に見られる様々な事物・現象を大地の変化と関連付けてみる見方や考え方を養う。 ア 地層と過去の様子 野外観察を行い、観察記録を基に、<u>地層の成り方</u>を考察し、重なり方の規則性を見いだすとともに、地層をつくる岩石とその中の化石を手掛かりとして過去の環境と年代を推定すること。
高等学校	理科総合A (3)物質と人間生活 イ 物質の利用 (7) 日常生活と物質 人間生活とかかわりの深い物質の特性と、利用及び物質の製造にエネルギーが必要であることについて理解させる。 【内容の取り扱い】 半導体、磁性体、金属、<u>セラミックス</u>、プラスチックの中から二つまたは三つの事例を選び扱うこと。 理科総合B (1)自然の探究 ア 自然の見方 自然を多様性と共通性、変化と平衡などでとらえ、自然に対する総合的な見方や考え方を養う。 【内容の取り扱い】 <u>大地の変動</u>、<u>大気と水の循環</u>、<u>生態系</u>などに関連した身近な自然の事物・現象の中から適宜事例を取り上げ、観察、実験などを基にして扱うこと。 化学Ⅱ (2)生活と物質 イ 材料の化学 (イ) 金属、<u>セラミックス</u> 日常生活と関係の深い食料や衣料、プラスチック、金属、<u>セラミックス</u>を観察、実験などを通して探究し、それらの性質や反応を理解させ、身の回りの物質について科学的な見方ができるようにする。 地学Ⅰ (1)地球の構成 惑星としての地球の特徴及び地球表層や内部に見られる地学的事象を観察、実験などを通して探究し、<u>地球表層や内部を相互に関連させ、地球の歴史の経過の中でとらえることができるようにする。</u> イ 地球の内部 (7) 地球の内部構造と構成物質 【内容の取り扱い】 構成物質については岩石を中心に扱い、鉱物については主要なものにとどめること。 ウ 地球の歴史 (7) 野外観察と地形・地質 (イ) <u>地層の形成と地殻変動</u> 【内容の取り扱い】 (イ)については、<u>岩石の相互関係や変形</u>、現在及び地質時代の<u>地殻の変動</u>を中心に扱うこと。

「地球環境」には様々な要素があるが、教科書等においては、地形の変化や地層の形成といった観点が主体となっており、風化作用が果たしている役割として非常に重要な部分である、「物質（イオン）の供給や循環」「生態系の維持」という概念が欠けている。生態系を支えているのは有機物の合成や窒素・炭素・水等の循環だけではなく、無機物の供給や循環も同様に重要な要素である。

高等学校の生物Ⅰや理科総合Bで扱われている「窒素固定」は、生態系の物質循環の原動力であり、生態系を支える重要な作用として学習しているが、風化作用はさらにその下層の要素として物質循環を支えており、非生物的環境と生物的環境を結ぶ橋渡しの存在と考えられ、特に高等学校ではそうした観点で風化について学ぶ必要がある。

4 風化作用から何を学ぶか

簡単な観察実験で内部の微細な割れ目（マイクロクラック）の状態や粘土鉱物の生成等を調べたり、野外での露頭観察によって風化の状態を調べることは教育現場でも可能である。そのような学習活動を通して、風化作用がどのような原因で起きているのかを考察したり、今後どのような影響を周囲の環境に与えていくのかを総合的に推定していくプロセスは、教育現場では大切である。

「岩石の変化と時間的概念」に着目してみよう。地球科学は地球の過去を探り、時間的概念を学ぶという一面を持ち、そのために取り扱われる代表的な題材が化石である。しかし、化石の示す時間の流れは断片的であり、発生した事象の時間的変化を立証することは困難である。しかし、風化は連続した時間の経過を同時に観察することができる現象であり、実感しにくい時間概念を学習する題材としても適している。^{※7)}例えば、岩石が段階的に風化している状態を観察することによって、岩石の時間経過による変化を知ることが

できるなどである。

新鮮な岩石と風化した岩石との比較は最も大切な観察であり、岩石が自然状態においてどのような変容を遂げていくのかを観察させ、風化によってどこが変化し、どこが変化していないのかを調べ、その原因を考察することで、科学的思考力を身につけることができる。また、土壌を処理して残存鉱物を観察し、風化岩の残存鉱物と比較することで、土壌の成因と岩石の風化との関連を考えることもできる。洪水後の泥水を鏡下観察することにより、流水によって運搬されている細粒な碎屑物は、風化した岩石を起源とすることを推定することができる。野外観察においても、崖崩れなどの地形変化に風化作用が関わっているかどうかを調べ、風化による崩壊やひび割れが起きている部分について、なぜその場所の風化が進行しているのかを考察し、今後の崩壊の様子を予想することができる。

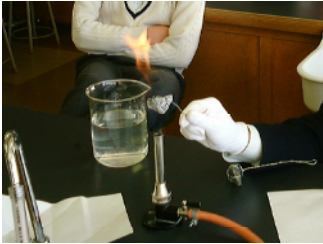
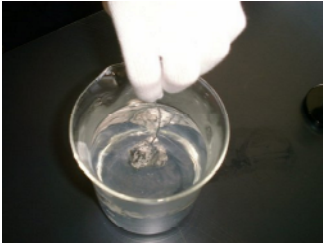
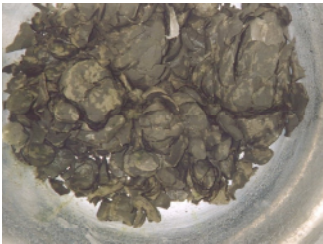
さらに視野を広げて、地球環境との関連についても、化学的風化作用での粘土鉱物の形成等に関しての化学反応を学んだり、海水組成や大気組成等のデータから、風化作用がどのように関連しているのかを考察することができる。

5 風化作用に関する観察実験

野外で風化を観察して、地形変化や地層の形成という大きな目でこの現象をとらえたり、室内での観察実験によって、岩石の風化とはどのような現象なのかをとらえ、さらにその現象の再現を試みる実験を行うことによって、風化という現象の実態を理解することができ、生態系や地球環境に与える影響などについて考察することが可能になる。

風化の様子を観察し、その状態を調べ、風化の原因を考察したり、今後の進行とその結果を総合的に考察することで、科学的思考力を育成するために、有効と思われる観察実験の方法や研究課題を以下に示す。

野外観察の活動内容	考 察
1 岩石の風化を野外で観察する ○ 露頭の中で、最も風化が進行しているのはどのような場所であるかを観察する。 ○ 同じ露頭で観察される、風化の進行度の違いを観察する。 断層付近の風化が進行している花崗岩 風化が進行した露頭で突出した安山岩	○ なぜ風化の進行度に差異が生じるのかを考察し、風化を進める要素を推定する（水の浸透など）。 ○ 崖崩れを起こしている場所と風化との関連を考察し、今後崖崩れが起きそうなところを予想する。
2 岩石と植物の関係を観察する ○ 植物が岩石をどのように風化を進行させているかを観察する。 ○ 岩石の表面に生育する地衣類等の植物を観察する。 岩石の表面に生育している地衣類 樹木の根の成長により破壊される安山岩	○ 根が岩盤を破壊している様子を観察し、生物的風化を学ぶ。 ○ 風化による岩石からの栄養の供給と、植物の一次遷移の始まりを考察する。
3 風景写真を観察する ○ 風景写真の観察から、崩壊地形、地層や岩石の色、植物の生育状態、水の存在、節理、断層などを探す。	○ 観察から、どの場所でどのような風化が起きており、その原因となっているものは何かを推定する。

室内実験観察の活動内容	結果と考察
1 岩石の物理的風化を再現する ○ 花崗岩に加熱・急冷を繰り返し、破壊させる実験（物理的風化）を行い、他の岩石とも比較する。 ○ 水の白濁も観察する。   花崗岩を加熱 加熱した花崗岩を急冷	○ 鉱物による膨張率や収縮率の差による破壊が発生する事を学ぶ。 ○ 岩石の構造と温度差による物理的風化の関係を学ぶ。 ○ ミネラルウォーターとは何かを学ぶ。
○ 乾燥させた泥玉を水に入れ、吸水膨張（膨潤）によってオニオンクラックを生成する実験。 ○ オニオンクラックは、どのような地層や岩石に発達しているのかを観察する。   実験でつくったオニオンクラック 地層中のオニオンクラックの産状	○ なぜ玉ネギのように割れていくのかを考察し、水の浸透による物理的風化を学ぶ。
2 岩石の化学的風化を再現する ○ 石灰岩などの堆積岩を酸と反応させ、続成物質（炭酸塩鉱物）の溶解を観察する。 ○ 酸素の溶存した水と、沸騰させて無酸素に近い状態にした水の中に鉄粉を入れ、酸化（変色）の様子を比較観察する。  左：有酸素 右：無酸素	○ 化学的風化の溶解による破壊を学ぶ。 ○ 有酸素の方はすぐに変色し始め、酸化反応は非常に短時間で進行していくことを学ぶ。 ○ 酸化について学び、風化した岩石の色との関係を考察する。 ○ 古代の地球の大気組成の変化について考察する。

3 岩石の風化の進行度を調べる

- 風化した岩石と新鮮な岩石を比較し、どこが変化し、どこが変化していないのかを観察する。
- ハンマーで叩いて音を調べたり、割ってもろさを調べるとともに内部を観察し、どのように風化しているかを調べる。
- 風化進行度の異なる同種の岩石の、ネオジム磁石への反応を調べる。



表面が風化した安山岩



風化進行度の比較

- 風化したものから、元の岩石を見分けることができるようになる。
- 表面やクラック沿いなど、水や空気と触れ合った場所が風化していることがわかる。
- 風化が礫や砂の形成の原動力となっていることを学ぶ。
- 火成岩は磁性を示すことが多いが、風化が進行すると磁性が弱くなり、進行度を判断できる(野外観察でも利用できる)。

- 著しく風化した岩石(クサリ礫など)を砕き、水に入れて攪拌して泥水を捨てる作業を繰り返す。
- 風化によって変化した鉱物、変化しなかった鉱物の種類を調べる。



風化で軟化した安山岩礫



風化安山岩中のザクロ石

- 残りやすい鉱物、残りにくい鉱物を知ると同時に、水に流されたものが粘土であることを学ぶ。
- 石英や磁鉄鉱は風化に対する抵抗力が大きく、ほとんどの岩石で、容器の底にこれらの鉱物が残る。

- 風乾試料にメチレンブルー水溶液を滴下し、粘土鉱物の有無を調べる。^{※8)}



メチレンブルーで染色した花崗岩



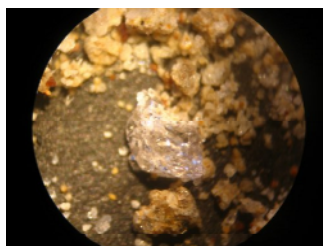
メチレンブルーで染色した風化安山岩

- メチレンブルーは粘土鉱物表面に吸着し、その部分だけが着色されるため、風化の進行度がわかる。
- 肉眼では見分けられない風化の進行度の差がわかる。

○ 花崗岩に赤インクを染み込ませ、浸透の様子を調べる。 ○ 様々な風化段階の花崗岩を比較観察する。 ○ 深成岩以外の岩石も染色して、比較する。	○ マイクロクラックの存在がわかる。 ○ クラックとシーティングの関係を考察する。
4 土壌を調べる ○ 土壌を水に入れて攪拌し、泥水を捨てる作業を繰り返して、鉱物を観察し、風化岩の残存鉱物と比較する。 ○ 洪水後の川原の氾濫原の泥の構成物を顕微鏡で観察する。	○ 土壌の構成物から、土壌のでき方を学ぶ。 ○ 流水中の細粒碎屑物は、風化した岩石を起源とすることが想像される。
○ 風化岩を粉碎して水に入れて攪拌し、濁り水をすくって放置する作業を行う。	○ 風化岩や土壌からは粘土を抽出することができ、焼き物やクレヨンをつくることできる。 ○ 粘土鉱物の性質を理解する。
5 風化した岩石を還元する ○ 岩石の風化殻を削り取り、薬品（ヒドロサルファイトNa、クエン酸Na等）によって還元処理を行う。 ○ 土や泥についても同様の実験を行ってみる。	○ 還元するとFeイオンによって緑色に変化する。 ○ 風化による褐色はFeイオンの色であることを学ぶ。



インクで染色した花崗岩



土壌中の石英



抽出した粘土で作ったクレヨン（北海道立理科教育センターのHPより）※9)



左：処理前 右：処理後

研究課題のテーマ	課題の考察
1 海水組成と風化作用 ○ 岩石から溶脱しやすい成分と、海水の組成とを比較してみる。 ○ 古代の地球の大気や海水は、風化作用と関連してどのように変化していったかを考察する。	○ 海水中に多く含まれる金属イオンは、風化した岩石から溶脱しやすい成分が多いことがわかる（表1，2）。 ○ 大陸の成長や遊離酸素の増加によって化学的風化が進行し、多量の金属イオンが海水中に溶け込んだことが考えられる。
2 他の惑星における風化 ○ 他の惑星の表面の様子を写真で観察し、風化が起きているかどうかを推定する。 ○ 他の惑星（衛星）の大気組成や水の存在などについてデータを調べ、どのような風化が起きているのか、あるいは起きていないのかを考察する。 ○ 原始地球における風化作用を考察する。	○ 赤茶けた大地や破壊された岩石など、他の惑星や衛星でも風化作用が起きていることがわかる。 ○ 原始地球の大気組成変化との関係から推定する。

おわりに

本論において、岩石の風化作用という、教育現場ではあまり大きく取り上げられないことのない題材について、その重要性を強調し、どのようにして取り扱うべきかを論じてきた。風化作用が地球環境に関わるメカニズムはあまりにも複雑すぎるために、教育現場では敬遠されがちであるが、今後の解明が進むにつれて、風化作用は地球環境に関わる極めて重要な役割を担う存在として、大きく扱われていくことを強く願っている。

なお、本研究は平成17年度日本学術振興会科学研究費補助金（奨励研究）の一部を使用した。

参考文献

- 1) White, A.F. and Brantley, S.L. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. Reviews in Mineralogy 131, Mineralogical Society of America. 1995
- 2) 木宮一邦 応用地質32巻3号 地質学から見た岩石風化

- 1991
- 3) Goldich, S.S. A study in rock-weathering. Journal of Geology, 46, pp.17-58 1938
- 4) Dorothy Carroll 岩石の風化 ラティス社 1974
- 5) 鹿園直建 地学雑誌111号 化学的風化作用による大気からのCO₂の除去フラックス推定上の問題点 pp.360-373 2002
- 6) Berner, R.A. Weathering, plants, and the long-term carbon cycle. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56 pp.3225-3231 1992
- 7) 下野 洋 身近な自然を調べる 岩石の風化した様子を調べよう 東洋館出版 pp.172-173 1997
- 8) 秦 明德 地学教育43号 化学的風化作用とその教材化 1990
- 9) 北海道立理科教育センターホームページ <http://www.ricen.hokkaido-c.ed.jp/>
- 10) Julian, E. Andrews et.al. 地球環境化学入門 シュプリンガー・フェアラーク東京 2005
- 11) 岡本 研 平成17年度都道府県政令指定都市教育センター 所長協議会地学部会研究集録 pp.1-4 岩石の風化現象の教材化 2005
- 12) 住 明正他 岩波講座 地球惑星科学3 地球環境論 pp.183-207 1996
- 13) 地学団体研究会 自然を調べる地学シリーズ3 土と岩石 東海大学出版会 1982
- 14) 理科年表環境編 国立天文台編

（おかもと きわむ 地学研究室研究員）