

風化変質作用の研究

— 砂利資源の研究(1), 未利用資源の研究, その16 —

満 塩 大 洗

(理学部地学科)

I. はじめに

陸上と海底の砂利資源の枯渇のために、原料となる岩体・地層の研究が必要となってきたが、これは堆積学の応用的な課題でもある。すなわち、既存岩石類が堆積学的なサイクルを経て、最終的に堆積岩類となり、次のサイクルに入っていくことは、自然界の一つの運動形態としてみられることは次報に述べている¹⁾。これらの諸作用のうち、既存岩石類が風化作用を受けるのがまず最初の段階である。この作用は地球をとりまく層状構造のうち、上部から気圏・岩石圏・水圏の3圏および生物圏の4圏があり、特に風化作用はこれらの圏のなかでも、岩石圏と水圏・大気圏との相互作用ということになる。風化作用の最終的なものは、粘土鉱物類が形成されることはよく知られている。しかし、基盤岩類が風化し、粗粒物が細粒化されて、いわゆる砂礫質物・泥質物となっても、満塩(1985)が指摘しているように、これら粒子は取り扱う地質学会・土壌学会・土質工学会の各学会では、名称からして異なっていると言うような奇妙な現象がある²⁾。

しかし、風化作用はきわめて重要であり、土壌学や堆積学・粘土鉱物学のみならず、応用地質学でも主要な課題の1つでもある。また、これらに関しては単行本類も出版され³⁾⁴⁾、また、全体的な地球化学的取り組みから解明したものもある⁵⁾⁶⁾。さらには、速度論的な取り組みもなされている⁷⁾⁻⁹⁾。

いっぽう、筆者は未利用資源の有効利用の観点から、これらの諸問題を解明してきた。すなわち、岩石類を実験的に加熱による変化¹⁰⁾⁻¹⁴⁾や、さらに、長期間にわたって岩石類の溶脱なども常温・常圧や水熱条件下で実験的に追求してきた¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。前者は自然界では、第四紀中期更新世に発達する高位段丘の赤色クサリ礫層や中位段丘を構成する黄褐色半クサリ礫層に含有される礫の赤色風化作用を解明する手がかりを得ることであり、各種の堆積岩類・火成岩類・変成岩類を加熱変色させたものである。

また、これらは相似象学の観点からみれば、まず大きい方の地球的な規模では、大気圏・水圏・岩石圏の相互作用であり、小さな規模では固体の岩石類と、水圏の溶液類および気体である空気との相互作用ということになる。

本報では、野外露頭での観察および室内での観察により、その変化過程を検討したもので、試料は高知県南国市稲生の石灰岩採掘場・高知市円行寺、さらに、山口県防府市中の瀬海岸から採集した(表1)。そして、これらの固体試料を水熱法によって溶脱実験を行い、溶脱化学種の分析と固相部のX線回折・顕微鏡によって、それらの変化過程を解明した。

表 1. 試料の産地

No	岩石種	産 地
1	石灰岩	高知県南国市稲生
2	蛇紋岩	高知市円行寺
3	花崗閃緑岩	山口県防府市中ノ浦

表 2. 試料の産状表

	No	層 準	色 相	特 徴
石 灰 岩	C	表土	赤褐色	土壌化
	B	風化部	茶褐色	ざらざらで、軟
	A	新鮮部	灰白色	強固
	D	断層部	灰褐色	粘土化
蛇 紋 岩	E	表土	茶褐色	極めて緩い土
	D	強風化部	灰茶褐色	土壌化
	C	中風化部	灰褐色	ルーズ
	B	弱風化部	灰緑色	かなり強固
	A	新鮮部	暗緑色	強固
花 崗 閃 緑 岩	E	表土	灰褐色	土壌化
	D	強風化部	淡灰青色	ざらざらで、軟
	C	中風化部	灰青色	ルーズ
	B	弱風化部	暗灰青色	かなり強固
	A	新鮮部	暗緑色	強固

II. 分析 方法

分析方法は次のようにした。

2-1. 野外での露頭観察および試料採集

地質の相違による野外の露頭について、比較的単純な鉱物成分と複雑な構成成分を持つものを選んだ。すなわち、これらは1) 秩父帯の堆積岩類の石灰岩、2) 黒瀬川帯の変成岩類の蛇紋岩、および、3) 領家帯の火成岩類の花崗閃緑岩である。前2者は高知県内産出であり、後者は山口県の防府市から産するものである(表1)。

これらの露頭で、風化の程度による変化を観察・スケッチし、新鮮物から表土までの連続的な試料を採集した。石灰岩の大露頭では、断層粘土も採集した。

2-2. 室内実験

室内に持ち帰った試料は次のように処理した。

2-2-1. X線回折

それぞれの試料は、風化試料は固定し、新鮮物はそのままでそれぞれ薄片を作成し、偏光顕微鏡によって観察した。また、自然試料および固形物の状態で水熱処理した試料を、油粘土で固定してX線回折によって、構成鉱物の同定を行なった。

なお、固定用の油粘土には、もともと、カルサイト・石英が多く、黒ウンモ・長石類も少量含まれていて、これらの回折線のピークのために、結果の鑑定の妨害となったことはやむをえない。

2-2-2. 水熱処理

これら岩石の固形物試料をマイクロオートクレイブ中に封入して、蒸留水あるいはNaOHの0.1 Mと5 M溶液を使ってそれぞれ水熱処理を行い、人工的に溶脱させて、溶出する化学種および固体試料の変化をみた。

水熱処理後に、固形部については残部の重量を測定し、その重量減を測定した。さらに、偏光顕微鏡・X線回折によって、構成成分の変化も観察した。

また、溶液部の溶脱化学種の分析は、イオンクロマトグラフィによって定量した。

III. 結果および考察

以上の分析から、次のような結果が得られた(表3～5, 図1～10)。

3. 風化変質作用の研究

3-1. 石灰岩

3-1-1. 露頭観察

石灰岩の大露頭においては、新鮮部の灰白色試料のAから、Bの茶褐色風化部となり、最後に赤褐色表土のCへと、順調に風化が進んで細粒になっている。また、灰褐色の断層粘土Dも観察して、採集した。

3-1-2. X線回折

これは図1のように、Aの新鮮部の試料とCの表土、および、Dの断層粘土について検討した。

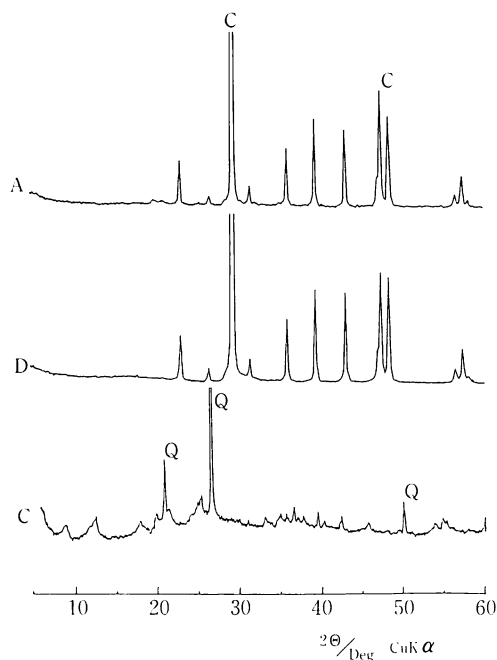


図1. 石灰岩の試料採集断面にそうX線変化。

A, 新鮮部 C, 表土 D, 断層粘土
C, A・Dのピークはすべてカルサイト
Q, 石英

AとDは明らかにカルサイトのみである。しかし、表土のCにはカルサイトはみられず、石英や粘土鉱物類がみられる。産出地点は採掘鉱山の頂上付近であり、この状況からみて、周囲の山からの供給は考え難い。周辺からの供給が困難であるにもかかわらず、粘土鉱物化しているという、極めて奇異な問題である。次に述べる蛇紋岩の場合も同様であり、既に述べたチャートの強風化物でも、頂上部であるにもかかわらず粘土鉱物が生成され、Alの供給源はチャート自身と考えざるを得ないのである(西沢・満塩, 1992)¹³⁾。

3-1-3. 水熱処理

石灰岩を水熱処理した例はみあたらない。本実験では表3のように、蒸留水のための溶媒で250℃において8時間水熱処理した。

試料を250℃で8時間にわたって水熱処理しても、固形部のカルサイトのピークは殆ど不変であったので、図示はしていない。

しかし、液相部では重量減少率は4時間までは増加するが、8時間後では減少した。また、イオン総量は1時間までは変動するが、その後はやや増加する。

また、図示はしていないが、CaとCO₃の変化がみられる。実験した8時間内では、Caは0.5時間で少し溶脱量が減少するのみで、時間と共に上昇する。また、CO₃も0.5時間で溶脱量が少し減少す

表3. 石灰岩の水熱処理結果(水のみ, 250℃)

No	sol' n	temp. (℃)	time (h)	loss (%)	total ion (mg)	Ca (x10 ⁻⁶ g/l)	CO ₃ (x10 ⁻⁶ g/l)
1	H ₂ O	250	0	0.03	0.11	0.46	0.33
2	〃	〃	0.5	0.08	0.09	0.33	0.32
3	〃	〃	1	0.45	0.13	0.05	0.35
4	〃	〃	2	0.55	0.10	0.36	0.34
5	〃	〃	4	0.60	0.12	0.46	0.36
6	〃	〃	8	0.03	0.13	0.65	0.37

るのみで、これは時間と共に上昇する。

3-2. 蛇紋岩

3-2-1. 露頭観察

蛇紋岩類は Mitusio *et al.* (1985) が報告しており¹⁹⁾、また、蛇紋岩を含む塩基性岩類については数多くの結果²⁰⁻²³⁾が報告されているので、ここでは簡単に述べる。

野外の露頭では暗緑色新鮮部の A から順に風化が進み、B の灰緑色弱風化部・C の灰褐色中風化部を経て、D の灰茶褐色強風化部となり、最後に E の表土の茶褐色細粒土になっている。このように典型的な風化系列がみられる。

3-2-2. X線回折

これは図2のように、新鮮部の試料 (A) からと表土 (E) までについて検討した。

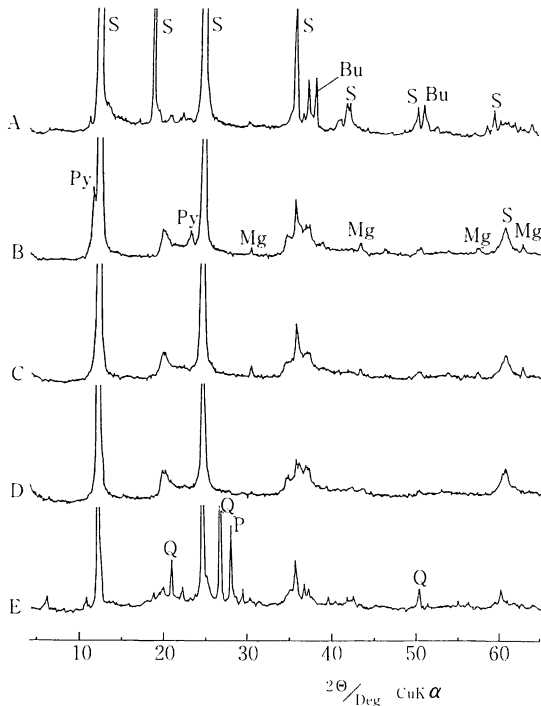


図2. 蛇紋岩試料の採集断面にそう X 線変化。

A, 新鮮部 B, 弱風化部 C, 中風化部
D, 強風化部 E, 表土 S, 蛇紋石類
Bu, ブルーサイト Py, パイロライト
Mg, 磁鉄鉱 Q, 石英 P, 斜長石類

A は蛇紋石類が主成分で、ブルーサイトが少量みられる。しかし、B ではこれらの他に、パイロライトと磁鉄鉱も少量みられる。C ではパイロライトがなくなり、磁鉄鉱も少量になる。D では蛇紋石のみである。

しかし、表土の E には蛇紋石の他に、石英や長石類・粘土鉱物類がみられる。産出地点は頂上付近であり、状況からみて周りの山からの供給は考え難い。これは前述の石灰岩の場合もそうであるが、Al の供給源が極めて興味のある問題である。

3-2-3. 水熱処理

蛇紋岩の全岩分析値 (表4), および、塩酸などによる水熱処理については前述のように、Mitusio *et al.* (1985) が既に報告している¹⁹⁾が、他には水熱実験の例はみられない。

ここでは250・300℃において、蒸留水のみで8時間水熱処理したものについて述べる (表5)。

新鮮な源岩の化学成分は表4のように、MgO は約30% 含まれているが、250℃でのMg の溶脱は0であるが、300℃での経時変化は少し変動し、最高約 0.09×10^{-6} g/l あった。

表4. 蛇紋岩の化学成分, wt (%)

成分	SiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Total
wt	38.08	30.32	0.05	17.36	1.44	0.35	100.47

3. 風化変質作用の研究

表5. 蛇紋岩の水熱処理結果(水のみ, 250/300℃)

No	sol' n	temp (°C)	time (h)	loss W (%)	total ion (mg)	Mg ($\times 10^{-6}$ g/l)	Si ($\times 10^{-6}$ g/l)
1	H ₂ O	250	0	0.08	0.05	0	0.40
2	〃	〃	0.5	0.08	0.04	0	0.28
3	〃	〃	1	0.04	0.04	0	0.32
4	〃	〃	2	0.10	0.04	0	0.33
5	〃	〃	4	0.02	0.05	0	0.14
6	〃	〃	8	0.06	0.04	0	0.13
7	H ₂ O	300	0	0.02	0.03	0.07	0.23
8	〃	〃	0.5	0.09	0.04	0.09	0.31
9	〃	〃	1	0.04	0.06	0	0.38
10	〃	〃	2	0.06	0.05	0.08	0.28
11	〃	〃	4	0.07	0.04	0	0.09
12	〃	〃	8	0.02	0.07	0	0.23

また, Si は新鮮な源岩では約38%あるが, 250℃での溶脱は最高 0.4×10^{-6} g/l で, 300℃では最高 0.38×10^{-6} g/l であった。

これらの溶脱量は塩酸で水熱処理した場合より, はるかに少量である。これは蛇紋岩が超塩基性岩であるので, 酸類と反応しやすいことを示している。

また, これらの残液部以外

の固形部のX線変化は図3・4に示す。固形物で処理したので, X線回折の際に油粘土で固定せざるをえないので, このピークが多く現れていて, 変化をみるのは困難である。蛇紋石類が水熱処理時間と共に, 若干のバラツキはあるが, ピークが減少する傾向がみられる (図3・4)。

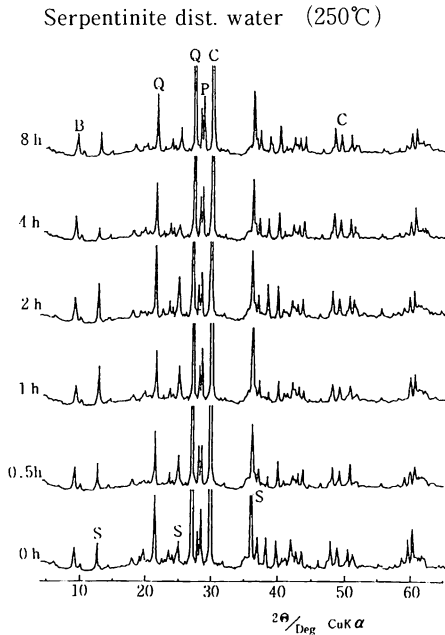


図3. 蛇紋岩の300℃での蒸留水による水熱処理結果のX線回折図.

S, 蛇紋石類 (油粘土に含まれる鉱物類も含む), Q, 石英 P, 斜長石類 B, 黒ウンモ C, カルサイト)

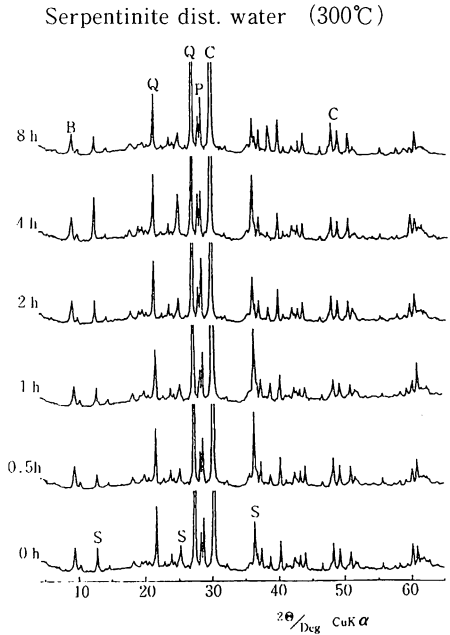


図4. 蛇紋岩の250℃での蒸留水による水熱処理結果のX線回折図.

S, 蛇紋石類 (油粘土に含まれる鉱物類も含む), Q, 石英 P, 斜長石類 B, 黒ウンモ C, カルサイト)

これらは蒸留水では十分な結果ではなく、塩酸などを使用したほうが良好である¹⁹⁾。すなわち、塩基性岩類は酸類で溶脱させるべきである。

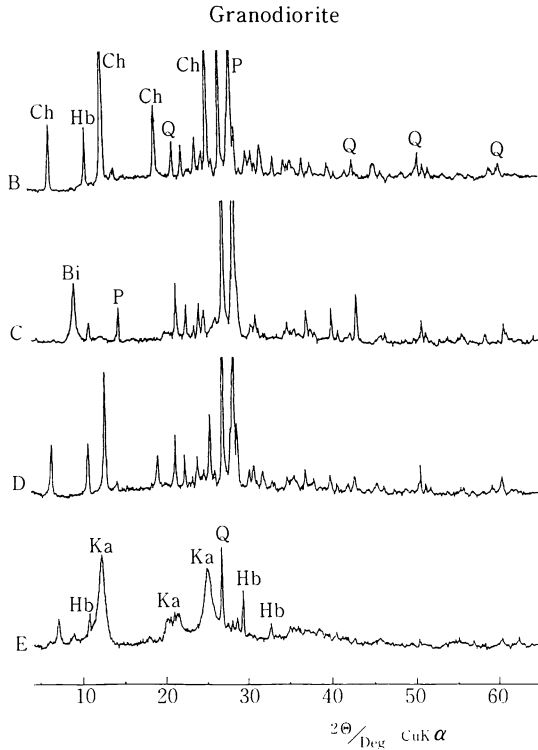


図5．花崗閃緑岩の採集断面にそうX線変化。
B, 弱風化部 C, 中風化部 D, 強風化部
E, 表土 Ch, 緑泥石類 Hb, 角閃石
Q, 石英 P, 斜長石類 Bi, 黒ウンモ
Ka, 粘土鉱物類

3-3. 花崗閃緑岩

3-3-1. 露頭観察

花崗閃緑岩を含めて、酸性岩類を取り扱った報告は本報の中川ら²⁴⁾を含めて、数多い²⁵⁾⁻³²⁾。

これは露頭でも、Aの暗緑色新鮮部から、Bの暗灰青色弱風化部を経て、Cの灰青色中風化部と順調に風化が進み、Dの淡灰青色強風化部となって、最後にはEの灰褐色表土となっている。

3-3-2. X線回折

図5にX線の結果を示す。Bでは斜長石類・石英の他に緑泥石・角閃石などがある。Cでは斜長石類・石英の他に黒ウンモがみられる。DではBと変わらない成分である。

しかし、Eの表土は一変して、石英・角閃石の他は粘土鉱物のカオリン類が出現する。この場合も表土は風化物とは異なっているが、源岩からきたものと考えられる。

3-3-3. 水熱処理

酸性岩類の水熱処理例は少なく、ここで試みた。

新鮮な部分のXRFによる全岩分析値を表6に示す。また、蒸留水および0.1Mと5MのNaOH溶媒を使用し、250～350℃で水熱処理した。これらの諸結果を表7に示す。

表6．花崗閃緑岩の化学成分, wt (%)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
56.72	1.01	17.45	7.25	0.14	2.69	6.85	3.19	2.00	0.17

3-3-3-1. 固形部の変化

次に固形部のX線変化について述べる(図6～8)。造岩鉱物類では最も変化するのは斜長石類であり、これを中心に変化を検討した。

3-3-3-1-1. 蒸留水の場合

300℃で8時間の蒸留水のみでの水熱処理(図6)は斜長石類が変化するが、油粘土中のそれと

3. 風化変質作用の研究

同一なので、その変化は検出し難いが、時間と共にピーク強度が減少する。

また、350℃の場合（図7）も同様の傾向がみられる。

表7. 花崗閃緑岩の水熱処理結果(水/NaOH, 250-350℃)

No	sol' n	temp. (℃)	time (h)	loss W (%)	total ion (mg)	Na *	K *	Si *
1	H ₂ O	300	0	0.23	0.26	0.43	0.20	2.32
2	〃	〃	0.5	0.21	0.24	0.48	0.13	2.07
3	〃	〃	1	0.26	0.41	0.91	0.17	1.74
4	〃	〃	2	0.25	0.40	0.56	0.19	1.61
5	〃	〃	4	0.27	0.48	0.64	0.19	2.07
6	〃	〃	8	0.65	0.55	0.85	0.11	2.53
7	H ₂ O	350	0	0.08	0.19	0.41	0.07	1.48
8	〃	〃	0.5	0.41	0.54	1.01	0.36	2.20
9	〃	〃	1	0.39	0.55	0.83	0.19	2.46
10	〃	〃	2	0.48	0.55	0.78	0.17	2.49
11	〃	〃	4	0.17	0.62	0.67	0.07	5.92
12	〃	〃	8	0.57	0.56	0.88	0.39	2.27
N1	NaOH	250	0.5	2.91	11.43	—	0	1.14
N2	〃	〃	2	4.49	35.17	—	0	3.52
N3	〃	350	0.5	2.41	49.31	—	0	5.00
N4	〃	〃	2	6.11	168.30	—	0	8.42
N5	NaOH	300	0.5	0.90	85.57	3.67	0.10	16.8
N6	〃	〃	1	0.05	108.07	2.87	0.18	20.6
N7	〃	〃	2	3.58	112.67	3.20	0.17	22.3
N8	〃	〃	4	1.18	139.72	3.28	0.12	27.7

N1～N4, 5N-NaOH N5～N8, 0.1N-NaOH *単位は($\times 10^{-6}$ g/l)

3-3-3-1-2. NaOH の場合

図8には、4時間で0.1M-NaOHによる水熱処理の場合を示す。この場合も油粘土で経時変化は検討し難いが、長石類・石英の変化が考えられる。

なお、5Mの場合は2時間内の短時間なので、図示はしていないが、長石類の変化はさらに大きい。

3-3-3-2. 重量減少率の変化

図9には、固相部の重量減少率の経時変化を示す。

蒸留水の場合は、300℃では時間と共に減少率は増加し、8時間後では最高の0.65と $\times 10^{-6}$ g/lとなった。350℃では、4時間以内までは増加の傾向であるが、4時間で少し減少し、8時間で減少率が最大の0.57 $\times 10^{-6}$ g/lとなった。

次に、蒸留水と比較して、300℃で0.1MのNaOHを溶媒として使用した場合は、2時間で最高の3.58 $\times 10^{-6}$ g/lであるが、以後は減少した。5Mの高濃度の場合は、2時間以内であるが、250℃・350℃でも減少率は大きく増加し、それぞれ約4.5%および約6%もあった。

以上のように、酸性岩の場合はアルカリを使えば重量減少率も大であり、また、後述のように溶脱イオン量も大きくなる。

3-3-3-3. 液相部の変化

次に液相部へ溶脱するイオン総量の経時変化を検討する。

Granodiorite dist. water (300℃)

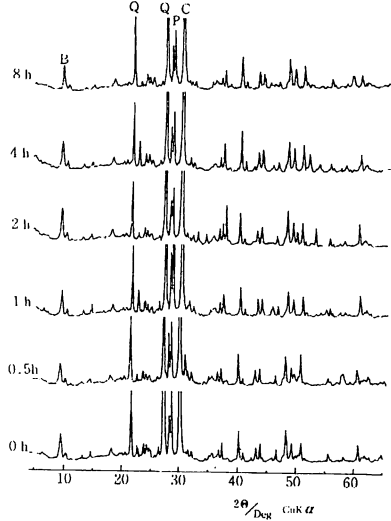


図 6. 花崗閃緑岩の300℃での蒸留水による水熱処理結果のX線回折図.

(油粘土に含まれる鉱物類も含む, Q, 石英 P, 斜長石類 B, 黒ウンモ C, カルサイト)

Granodiorite dist. water (350℃)

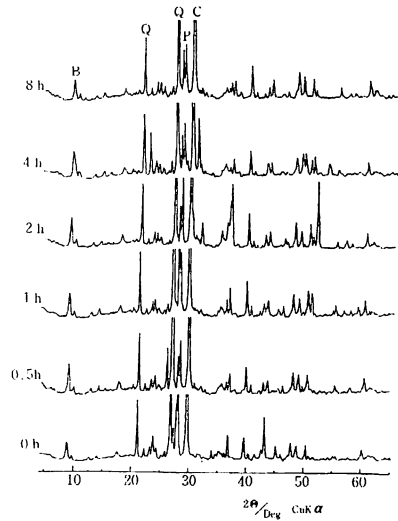


図 7. 花崗閃緑岩の350℃での蒸留水による水熱処理結果のX線回折図.

(油粘土に含まれる鉱物類も含む, Q, 石英 P, 斜長石類 B, 黒ウンモ C, カルサイト)

Granodiorite NaOH-0.1M (300℃)

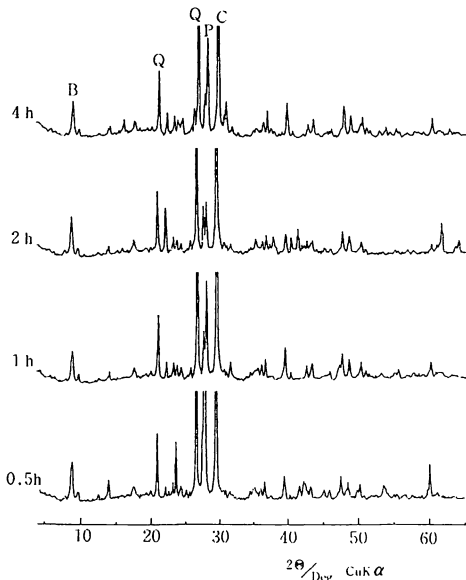


図 8. 1M-NaOH による300℃での花崗閃緑岩の水熱処理結果のX線回折図.

(油粘土に含まれる鉱物類も含む, Q, 石英 P, 斜長石類 B, 黒ウンモ C, カルサイト)

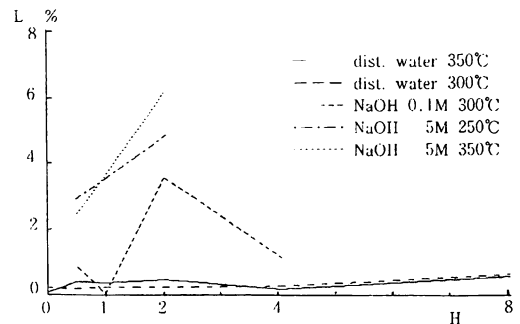


図 9. 各種条件の溶媒による花崗閃緑岩の重量減少率.

H, 水熱処理時間 L, 重量減少率 (%)

3. 風化変質作用の研究

蒸留水で300℃の場合は少しの変動はあるが、8時間ではほぼ飽和に達し、約 0.5×10^{-6} g/lとなり、350℃の場合も約1時間内で飽和に達する（図10）。

また、0.1M - NaOH の場合は、4時間内では時間と共にイオン総量は増加し、約 140×10^{-6} g/lとなる。5 Mの場合は250℃・350℃でも、2時間内では増加が著しい（図10）。

いっぽう、Si 溶脱量については図10のように、0.1M - NaOH の場合は4時間内では時間と共に増加し、4時間では 27×10^{-6} g/lになる。5 M - NaOH の2時間では、250℃で少ないが、350℃で多くて約 8×10^{-6} g/lである。蒸留水の場合は図示していないが、表7のように、300℃では最高約 2.5×10^{-6} g/lで、350℃では4時間が最高で約 6×10^{-6} g/lである。

また、Na は蒸留水では300℃で途中の若干の増減はあるが、最大は 1×10^{-6} g/l以下である。350℃では、0.5時間で最高の値で、以後は若干の増減を示す。NaOH の場合では、5 Mは当然大きすぎるので測定せず、0.1Mの300℃では、約 4×10^{-6} g/l以下である。

K の場合は、蒸留水で300℃・350℃でも溶脱量は変動がかなり大きい、Na より小さい。NaOH の場合では、5 Mの高濃度の場合は0で、0.1Mでは少量の溶脱で、最高は 0.18×10^{-6} g/lである。

以上のように、アルカリの場合は蒸留水の場合より減少率が大きく、かつ、溶脱イオン総量もはるかに大きい。また、Si なども多く溶脱した。このように、酸性岩類はアルカリによる水熱処理が有力である。

なお、砂岩・頁岩もアルカリ水溶液でよく溶脱し、固相部にはアナルサイトが生成した（満塩ら、1987）³³⁾。

IV. ま と め

以上の結果をまとめれば、次に要約される。

- 1) 野外においては、石灰岩は一連の風化系列はみられず、表土は全く異なる鉱物組成である。蛇紋岩も一連の風化系列がみられるが、表土は全く異なっている。花崗閃緑岩は露頭では一連の風化系列がみられるが、表土は粘土化が進んでいる。
- 2) 固形物を水熱処理すれば、重量減少率や溶脱するイオン総量が異なり、Si や Na・K も変化する

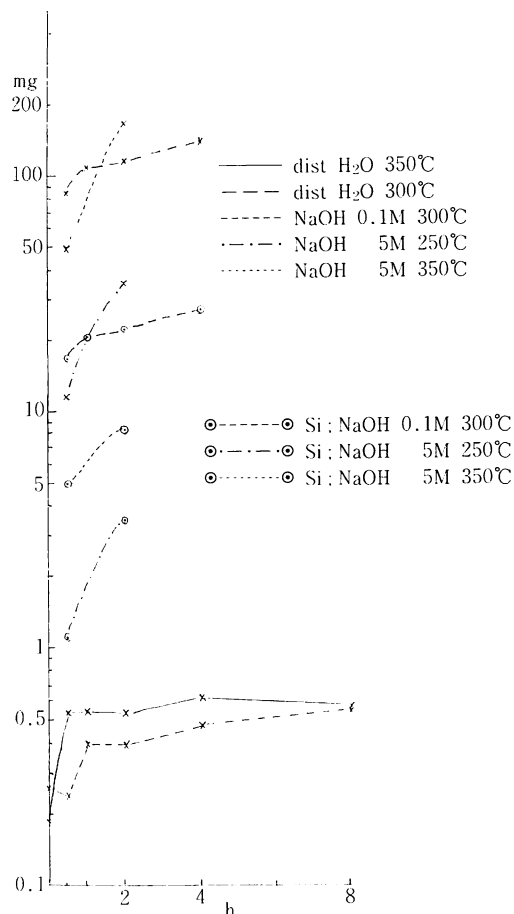


図10. 各種条件の溶媒による花崗閃緑岩からの溶脱した総イオン量およびSi量。
h, 水熱処理時間 縦軸, 溶脱量 (mg)

る。

- 3) 酸性岩はアルカリ溶液類で、また、塩基性岩は酸性溶液類で処理すれば、その変質は大きい。今後もさらに岩石の風化変質使用の解明が必要である。

謝 辞

本報告をなすに当り、大学当局および高知大学理学部化学教室の西沢 均助教授に感謝する。また、環境変動研究会のメンバーにも協力いただき、重ねて感謝する。

引用文献

- 1) 満塩大洗, 1992. 岩石類の破壊実験による堆積学的研究, 砂利資源の研究(2), 未利用資源の有効利用, その17. くろしお, 特別号(7):29-43.
- 2) 満塩大洗, 1985. 地質学・土壌学・土質工学における粒径区分の比較. 堆積報, (22/23):117-121.
- 3) 松尾新一郎, 訳 (Ollier, C. D 著), 1972. 風化-その理論と実態. 417pp. ラテイス.
- 4) 松尾新一郎, 訳 (Carroll, D. 著), 1974. 岩石の風化. 428pp. ラテイス.
- 5) 平山次郎・市川輝夫・盛谷智之・水野篤行, 訳 (Сtopaxob. H. M 著) 堆積岩の生成—そのタイプと進化—(I), 235pp. ラテイス.
- 6) 松井義人・一国雅巳, 訳 (Mason, B. 著), 1978. 一般地球化学. 402pp.
- 7) 水谷伸次郎, 1976. 頁岩の風化—その変質過程の速度論的考察—. 西田教授退官記念論集:445-457.
- 8) 塚本 斉・水谷伸次郎, 1988. 風化粘土の生成と変遷. 応用地質, 29:231-241.
- 9) 都築芳郎, 1985. 風化, 熱水変質の化学平衡論・反応速度的考察. 地質雑, 91(10):699-718.
- 10) 満塩大洗, 1985. 未利用資源の有効利用, その4, 腐植質火山灰の加熱による色の変化と第四系の色との比較. 海洋・資源, (13):25-32.
- 11) 満塩大洗・山下修司・大山道也・木村壮一郎, 1990. 未利用岩石の有効利用, その2, 加熱による風化. ウェイストリソース, (22):13-20.
- 12) 満塩大洗, 1992. 赤色クサリ礫風化の実験的研究, —防災に関する基礎的研究(1)—. くろしお, 特別号, (6):3-10.
- 13) 西沢 均・満塩大洗, 1992. 風化鉱物のキャラクターゼイション, —防災に関する基礎的研究(2)—. くろしお, 特別号, (6):11-17.
- 14) 満塩大洗・加賀美英雄, 1992. 四国の第四系. 第四紀研究, 31(5):297-311.
- 15) 西沢 均・島内理恵・満塩大洗, 1988. 堆積物と水との相互反応—海洋牧場造成の基礎的研究. くろしお, 高大黒潮研報, 特別号, (2):25-33.
- 16) 満塩大洗, 1989. 未利用資源の有効利用, その9, ヘドロの基礎的研究. ウェイストリソース, (20):19-24.
- 17) 満塩大洗・木村莊一郎・太田俊之, 1991. 岩石圏と水圏の相互反応, その6-未利用岩石類の有効作用. ウェイストリソース, (24):19-24.
- 18) 満塩大洗・山崎伸道・柳沢和道, 1987. 河川水に及ぼす岩石類の影響, 特に水熱溶脱による分

3. 風化変質作用の研究

- 解. くろしお, 特別号, (1): 5-12.
- 19) Mitsushio, T., Kanahara, S., Imai, Y., Yamasaki, N., Yanagisawa, K., Matsuoka, K. 1983. Interaction of water and serpentinite. *Forth International Symposium on Water-Rock Interaction*, 337-339.
- 20) Shigesawa K. 1960. On the Weathering Products of Ultrabasic Rock from Fukui Pref., Japan. 滋大紀要, (10): 105-108.
- 21) Shigesawa K. 1958. On the Weathering Products and the Process of Weathering of Gabbro from Nara Prefecture. 滋大紀要, (8): 53-69.
- 22) Campbel, I. H. 1975. Direct evidence of present-day serpentinization in the Jimberlana Intrusion, Western Australia. *Geol. Mag.*, 112(1): 77-80.
- 23) 奥村 滋, 1982. 名張斑れい岩体の風化過程(1)—風化殻の分帯—. 岩鉱, 77: 191-202.
- 24) 中川昌治・津田隆幸, 1993. 小豆島の花崗岩の風化. くろしお, 特別号, (7): 11-15.
- 25) Kato, Y. 1965. Mineralogical study of weathering products of granodiorite at Shinshiro city (Ⅲ). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 11: 30-40.
- 26) 大八木規夫・内田哲男・鈴木宏芳, 1969. 加茂・大東地方花崗閃緑岩地帯における風化帯の粘土鉱物(第1報)—風化生成粘土鉱物とその生成系列—. 国立防災科学センター報, 2: 21-44.
- 27) 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, 42: 139-146.
- 28) Shigesawa K. 1961. On the Weathered Biotite from Tanakami Granite and Granite Pegmatite, Shiga Prefecture, Japan. 滋大要紀, (11): 35-38.
- 29) 三浦 清, 1966. 島根県加茂町付近の花崗岩類とその崩壊について(Ⅰ). 岩鉱床, 56: 256-283.
- 30) 三浦 清, 1967. 島根県加茂町付近の花崗岩類とその崩壊について, (Ⅱ)岩鉱床, 57: 11-24.
- 31) 三浦 清, 1985. 深成岩類の風化に関する研究(第1報)応用地質, 14: 87-102.
- 32) 竹野節夫・北川隆司・小沢哲史・船越貴美子・田中清美・東尾 淳・柿谷 悟, 1986. サマ土斜面に見られる花崗岩の風化変質過程の鉱物化学的研究. 科研究自然災害特研報告書: 23-31.
- 33) 満塩大洗・山崎仲道・柳沢和道, 1987. 河川水に及ぼす岩石類の影響, 特に水熱溶脱による分解. くろしお, 特別号, (1): 5-12.