

赤名花崗閃緑岩深層風化殻

秦 明 徳*

Akinori HADA

THE DEEP WEATHERING CRUST OF AKANA GRANODIORITE

I. はじめに

身近な自然現象を通しての地域に即した地質営力研究とその教材化は、地学教育における最も重要な研究課題の一つである。本稿では外的地質営力の一つである風化作用の基礎的研究について報告する。

真砂土化や深層風化殻の形成に特徴づけられる花崗岩類の風化現象は古くから注目され、多岐にわたる研究が積み重ねられてきている。風化進行に伴う鉱物の変化や化学的性質の変化についての研究は、Reiche (1943, 1950), 菅野他 (1960), Kato (1964, 1965), 大八木他 (1969 a), 中川他 (1972), 三浦 (1973), 三浦・樋口 (1974) 等多数の報告がある。又、物理的力学的性質の変化については、Lumb (1962), 大八木 (1969 b) 西田・福田 (1979), 木宮 (1975) 等がある。しかしながら、これらの研究が、野外における肉眼観察を主とした観察結果と対応する形で研究が進められている場合が少なく、全風化過程を通しての研究が少ないこと、又、諸性質を総合的視点から精査したものが少ないこと等のため定説となる風化殻分帯が確立されるには至っていない。さらに、花崗岩類の生成史に着目した研究が少なく、花崗岩類が被った風化前変質がどのようなもので、風化変質が加わるとそれがどのように変化するのかも明らかになっていないことが、その確立を妨げている要因である。

これらの問題を解決するには、古い地形と厚い風化殻が残存する地域を研究対象として選定することが必要となる。そこで、島根県出雲市南方、中国脊梁山地に沿う赤名花崗閃緑岩分布地域を研究対象として用いることにした。本地域は、地形的には中位平坦面（標高400～600 m）を形成し、赤色風化を被った深層風化殻を伴っている。

筆者は、本地域において、主として鉱物学的手法を用

いながら前述の問題点を明らかにしようとしてきている。本地域の地形的地質的特質、風化前変質及び肉眼観察やX線粉末回折実験等に基づく風化殻分帯については、その一部を既に報告している（秦, 1985, 1986）。

本稿では、さらに赤名花崗閃緑岩深層風化殻について化学組成の点から検討を加えるとともに、環境変化に特に鋭敏な造岩鉱物である黒雲母について、その変質経路を追跡した結果について報告する。

なお、図-1に調査地域の地質概略と露頭位置を示す。

II. 赤名花崗閃緑岩深層風化殻分帯

本地域の花崗閃緑岩深層風化殻の厚さは、薄い所で50 m, 厚い所では100 m以上に達する。肉眼観察、顕微鏡観察、X線粉末実験等の結果から、本風化殻は、鉱物相の変化から5層に分帯できる（図-2）。各層の特徴は次の通りである。

(1) 第1層 新鮮花崗閃緑岩

造岩鉱物の色、光沢、透明度などの点から風化作用の及んでいないと判断される岩盤である。X線回折実験、顕微鏡観察からも風化作用を受けた徴候は見られない。密度は 2.68 g/cm^3 であり、非常に堅固な岩盤である。

(2) 第2層 初期変色帯（微弱風化花崗閃緑岩帯）

斜長石がやや白濁化し、黒雲母周辺が鉄のしみ出しにより褐色化するが、新鉱物の生成はない。密度は、 $2.45 \sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ 程度である。変色の度合いが低い岩盤は堅固で、ハンマーの感触は新鮮岩とあまり変わらないが、変色が進んだものでは、岩盤としての性格を残しながらも、ハンマーで軽打すると10 cm前後の径を持つ岩魂となる。原岩と比較して密度が減少していることから、微小な割れ目が生じ、空隙が生じていることが推察できる。

(3) 第3層 パーミキュライト帯（風化花崗閃緑岩帯）

個々の粒子の硬さは残っているが、ハンマーでたた

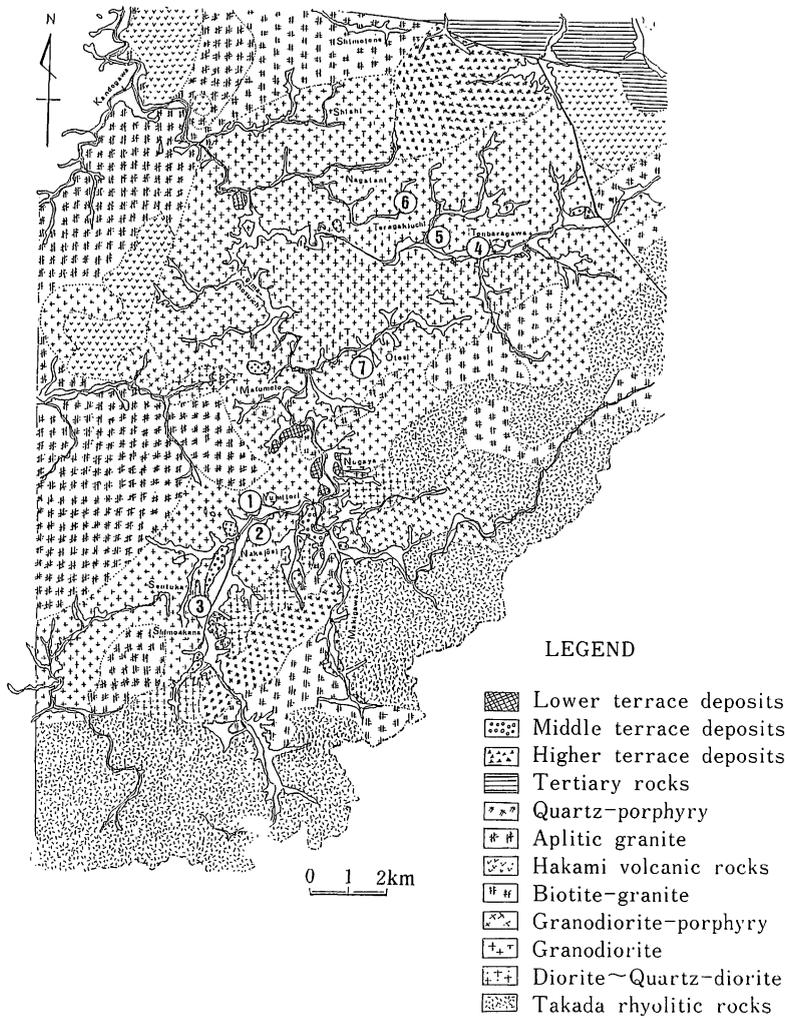


図-1 調査地域の地質概略と露頭位置

と、0.5~2 cm 程度の粒子径となりバラバラに崩れる。これは粒子界や斜長石粒子内に割れ目が生じ、これらの隙間に沿って溶脱が急速に進んだ結果であろう。この帯では、黒雲母、緑泥石から変化したパーミキュライトが特徴的であり、斜長石は溶脱を受け劣化してはいるものの、まだハロイサイトの形成には及んでいない。密度は1.70~2.40 g/cm³ の間で変化する。

(4) 第4層 カオリン帯 (マサ帯)

斜長石がハロイサイト化する。本層下部では、斜長石粒子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が、上部では完全に粘土化する。黒雲母は黄褐色化が進行し、かなりのものは、パーミキュライトとなるが、途中でパーミキュライトは消失し、カオリンが増加する。角閃石は緑色を保ったままである

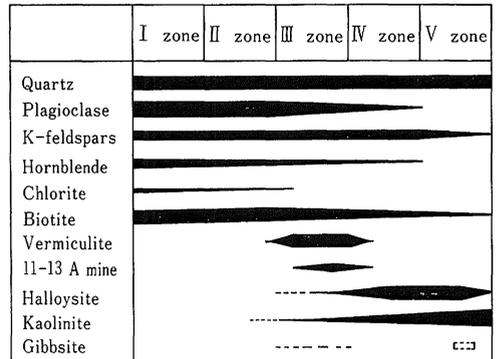


図-2 赤名花崗閃緑岩の風化進行に伴う鉱物相変化
 I zone : 新鮮岩 II zone : 初期変色帯
 III zone : パーミキュライト帯 IV zone : カオリン帯
 V zone : 含赤色酸化鉄カオリン帯

が、第5層との境界付近で褐色となる。下部では、ハンマーで軽打すると砂状にくずれるが、上部では粘土分の増加によって塊状で採取できる。密度は $1.30 \sim 1.68 \text{ g/cm}^3$ である。

(5) 第5層 含赤色酸化鉄カオリン帯 (赤マサ帯)

赤色酸化鉄により全体の色調が赤褐色化する。残留鉱物として、石英と K-長石が残っているが、K-長石は本層上部において急速に分解消失する。黒雲母は大部分がカオリナイトとなるが、一部加水雲母として残存する。密度は、 $1.1 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 程度となる。

赤名花崗閃緑岩分布地域内では、どの地点でも鉱物相の変化についてはほぼ同様な結果が得られる。しかし、その中であって黒雲母の変質物については必ずしも同一の結果とはならない。このことに関しては、IVで詳述する。

III. 風化進行に伴う花崗閃緑岩の化学組成変化

1. 試料の採取

分析に供した試料は、図-1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、露頭②では地表下 11 m, 26 m のカオリン帯から各1点、地表下 6 m から赤色酸化鉄カオリン帯下部の試料を1点採取した。露頭③からは本地域内で最も風化が進行した試料として、地表下 0 m, 3 m から各1点を採取した。

2. 分析結果と考察

各試料の分析結果を表-1に示す。なお、化学分析の方法は湊他(1982)によった。

(1) 化学組成の相対的变化

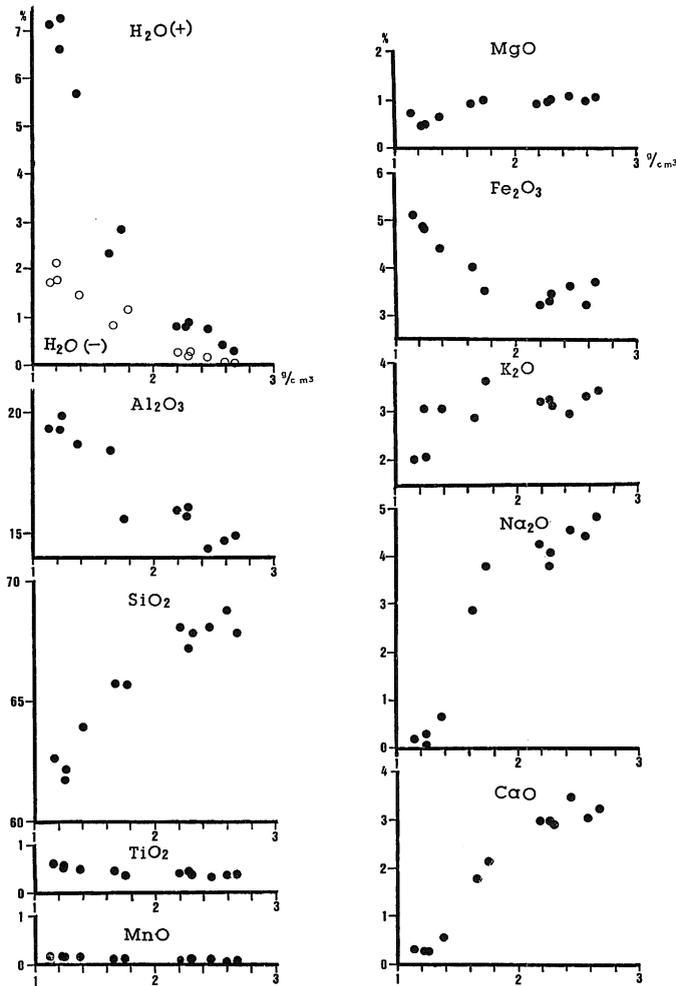


図-3 風化進行に伴う化学組成変化

表-1 花崗閃緑岩とその風化物の

| | Fresh rock zone | | First discoloration zone | | | | Vermiculite zone | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|--------------------------|------------|---------------|------------|------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | ① corestone 1 | | ① corestone 2 | | ① corestone 3 | | ① corestone 4 | | ① corestone 5 | | ① corestone 6 | |
| | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. |
| SiO ₂ | 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 ₂ | 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 ₂ O ₃ | 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 ₂ O ₃ | 3.70 | 0.023 | 3.23 | 0.020 | 3.63 | 0.023 | 3.4 | 0.022 | 3.22 | 0.020 | 3.32 | 0.021 |
| 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 ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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 | 23.0 | | 22.0 | | 21.7 | | 23.0 | | 22.1 | | 20.9 | |
| G | 0 | | 0 | | 0 | | 0.6 | | 0 | | 0 | |
| Or | 20.0 | | 19.5 | | 17.2 | | 18.4 | | 18.9 | | 19.5 | |
| Ab | 40.9 | | 37.7 | | 38.8 | | 34.6 | | 36.2 | | 36.2 | |
| An | 8.9 | | 10.3 | | 10.0 | | 14.5 | | 14.7 | | 14.2 | |
| Di | 6.1 | | 4.2 | | 6.1 | | 0 | | 0 | | 0.5 | |
| Hy | 1.4 | | 1.8 | | 1.6 | | 3.0 | | 2.6 | | 2.8 | |
| Hm | 1.3 | | 1.0 | | 1.3 | | 1.1 | | 1.0 | | 1.0 | |
| Il | 0.8 | | 0.6 | | 0.6 | | 0.8 | | 0.8 | | 0.8 | |
| Total | 102.4 | | 97.1 | | 97.3 | | 96.0 | | 96.3 | | 95.9 | |
| Bulk density (g/cm ³) | 2.68 | | 2.59 | | 2.45 | | 2.30 | | 2.20 | | 2.28 | |

化学組成とノルム鉱物

| Kaolin zone | | | | | | Kaolin-red iron oxides zone | | | | | |
|------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------------------------|------------|----------|------------|----------|------------|
| 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. |
| 65.73 | 1.094 | 65.76 | 1.095 | 63.99 | 1.065 | 61.72 | 1.028 | 62.23 | 1.036 | 62.58 | 1.042 |
| 0.33 | 0.004 | 0.42 | 0.005 | 0.48 | 0.006 | 0.51 | 0.006 | 0.52 | 0.007 | 0.54 | 0.007 |
| 15.52 | 0.152 | 18.42 | 0.181 | 18.67 | 0.183 | 19.30 | 0.189 | 19.85 | 0.195 | 19.31 | 0.189 |
| 3.50 | 0.022 | 4.02 | 0.025 | 4.44 | 0.028 | 4.88 | 0.031 | 4.81 | 0.030 | 5.11 | 0.032 |
| 0.09 | 0.001 | 0.09 | 0.001 | 0.13 | 0.002 | 0.13 | 0.002 | 0.13 | 0.002 | 0.13 | 0.002 |
| 0.96 | 0.024 | 0.89 | 0.022 | 0.69 | 0.015 | 0.43 | 0.011 | 0.50 | 0.012 | 0.72 | 0.018 |
| 2.15 | 0.038 | 1.79 | 0.032 | 0.59 | 0.011 | 0.32 | 0.006 | 0.29 | 0.005 | 0.33 | 0.006 |
| 3.80 | 0.061 | 2.90 | 0.047 | 0.68 | 0.011 | 0.43 | 0.007 | 0.08 | 0.001 | 0.22 | 0.004 |
| 3.65 | 0.039 | 2.87 | 0.030 | 3.05 | 0.032 | 3.10 | 0.033 | 2.05 | 0.022 | 2.00 | 0.021 |
| 2.90 | 0.161 | 2.35 | 0.131 | 5.73 | 0.318 | 6.63 | 0.368 | 7.30 | 0.406 | 7.02 | 0.400 |
| 1.10 | 0.061 | 0.85 | 0.047 | 1.45 | 0.081 | 2.21 | 0.118 | 1.80 | 0.100 | 1.80 | 0.100 |
| 99.73 | | 100.38 | | 99.82 | | 99.57 | | 99.56 | | 99.94 | |
| 22.2 | | 31.5 | | 45.3 | | 45.4 | | 37.9 | | 50.6 | |
| 1.4 | | 7.0 | | 13.0 | | 14.4 | | 16.8 | | 16.0 | |
| 21.7 | | 16.7 | | 17.8 | | 18.3 | | 12.2 | | 11.7 | |
| 32.0 | | 24.6 | | 0.6 | | 0.4 | | 0.5 | | 2.1 | |
| 10.6 | | 8.9 | | 3.1 | | 1.7 | | 1.4 | | 1.7 | |
| 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| 2.9 | | 2.6 | | 1.8 | | 1.3 | | 1.4 | | 2.2 | |
| 1.3 | | 1.9 | | 3.0 | | 3.8 | | 3.5 | | 3.4 | |
| 0.6 | | 0.6 | | 0.6 | | 0.6 | | 0.6 | | 0.6 | |
| 92.7 | | 93.8 | | 85.2 | | 85.9 | | 74.3 | | 88.3 | |
| 1.75 | | 1.65 | | 1.38 | | 1.23 | | 1.25 | | 1.15 | |

風化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-3は、風化の進行に伴う各酸化物の相対的増減を示す。相対的に減少する酸化物は、SiO₂, MgO, K₂O, Na₂O, CaO である。一方、相対的に増加する酸化物は、Al₂O₃, TiO₂, H₂O(+), H₂O(-), Fe₂O₃(Total Fe), MnO である。Na₂O, CaO の相対量は急激に減少するが、その一方で Al₂O₃ や H₂O(+)の急激な増加がある。これらは斜長石の分解とカオリン鉱物の生成にかかわる現象として理解できる。それに比し、MgO や K₂O は、相対量の減少を生じにくい。MgO は、密度 1.7 g/cm³ 付近で減少傾向を示すが、風化末期まで残存し続ける。これは角閃石が比較的風化に強いことと、黒雲母が形を変えな

がらもその構造を最後まで残すことと深いかわりがある。又、K₂O 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 1.2 g/cm³ 付近で急激にその量を減少させる。これらの結果は、K-長石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、黒雲母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。Fe₂O₃ (Total Fe) の漸増は、含水酸化鉄の生成により、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。

(2) ノルム鉱物からみた鉱物相変化

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を用い、風化進行に伴う鉱物相の変化に検討を加える。

図-4は、曹長石、灰長石、正長石成分で示されるノルム鉱物による三角ダイアグラムである。この図から斜長石成分である曹長石や灰長石は、風化の初期から減少するのに対し、K-長石は風化に対して強い抵抗性を示すことが読み取れる。このことはX線回折実験や顕微鏡観察の結果との一致を示す。

図-5は、長石類、ギブサイト、石英成分で示されるノルム鉱物による三角ダイアグラムである。長石成分が風化の進行に伴い減少し、次第にカオリン成分に近づくことを示している。

(3) 風化進行に伴う溶脱率の変化

花崗閃緑岩風化物の化学分析値と密度から次のようにして溶脱率を求めた。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求められる。

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

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。

- バーミキュライト帯の試料 (密度 2.28 g/cm³)
Na⁺ > Fe³⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Si⁴⁺ > Mn²⁺ > Ti⁴⁺ > Al³⁺
- カオリン帯の試料 (密度 1.65 g/cm³)
Ca²⁺ > Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺ > Si⁴⁺ > Mn²⁺ > Fe³⁺ > Ti⁴⁺ > Al³⁺
- 含赤色酸化鉄カオリン帯下部の試料 (密度 1.23 g/cm³)
Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > Si⁴⁺ > K⁺ > Al³⁺ > Fe³⁺ >

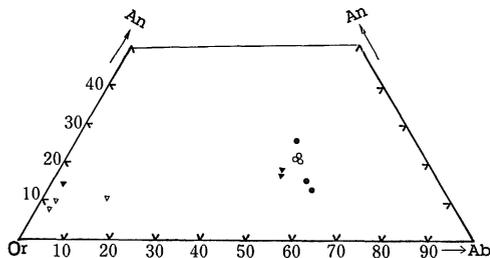


図-4 An-Ab-Or 三角ダイアグラムによる風化進行に伴う鉱物相変化

- : 新鮮岩 (I zone) と初期変色帯 (II zone) の試料
- : バーミキュライト帯 (III zone) の試料
- ▼: カオリン帯 (IV zone) の試料
- ▽: 含赤色酸化鉄カオリン帯 (V zone) の試料

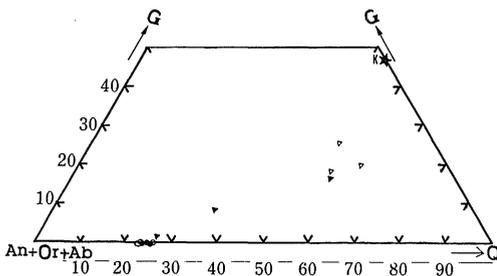


図-5 An+Or+Ab-G-Q 三角ダイアグラムによる風化進行に伴う鉱物相変化

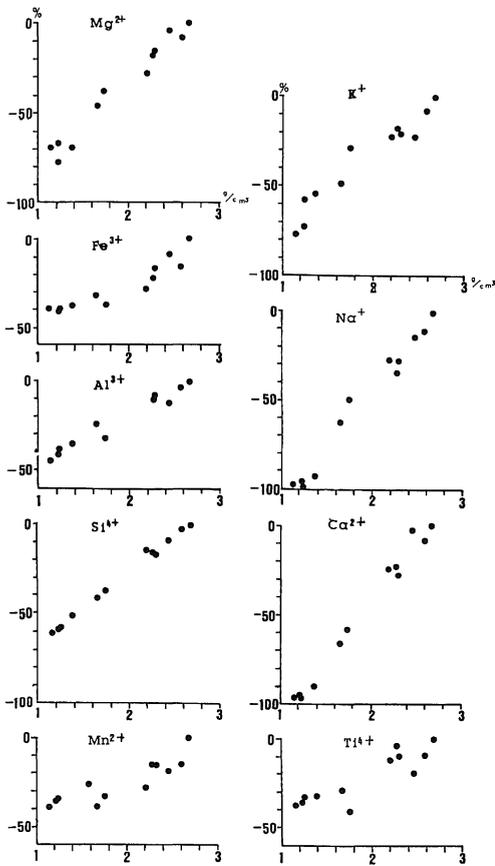
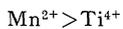


図-6 風化進行に伴う溶脱率の変化



- ・含赤色酸化鉄カオリン帯上部の試料 (密度 1.15 g/cm³)

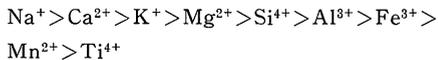


図-6は密度を風化指標とした時の溶脱率の変化を示す。

これらの結果は、 Na^+ 、 Ca^{2+} 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^{4+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} は溶脱しにくいイオンである。しかし、溶脱しにくい Al^{3+} 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。 Fe^{3+} (Total Fe) は、風化初期には溶脱をよく受けるが、その後半では溶脱されにくくなる。このことは2価鉄の3価鉄への変換にかかわっていると考えられる。 K^+ が風化の末期に溶脱を受けやすくなるのは、カリ長石の分解とかわっている。

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。以上のことは、風化作用が風化鉱物の生成とともに溶脱現象によって特徴づけられることを如実に示している。

IV. 風化進行に伴う造岩鉱物の変化

本岩中で風化作用に対して特に鋭敏な鉱物は黒雲母、斜長石である。そこで、この2種の鉱物のうち黒雲母とその変質物について、鉱物学的に検討した。

赤名花崗閃緑岩においては、肉眼的に新鮮な岩石でも程度の差こそあれ黒雲母から変質した緑泥石が含まれている。又、風化系列の中で黒雲母は他の鉱物の風化変質の動きに対して対応しないかのように見える特異な動きをすることについても既に述べた。

黒雲母の風化変質については古くから興味を持たれ、野外室内両面から多数の研究がなされてきた。特に黒雲母のパーミキュライト化については、種々の条件が明らかにされつつある (Norrish (1972), 長沢 (1972), 井上他 (1981))。しかし、野外における黒雲母の変質の研究結果は、研究地域によって異なることが多い。これは、黒雲母が鋭敏な鉱物であり、風化環境、風化作用を被る以前の変質、化学組成等のちがいが黒雲母の変質経路を多様化させているためだと考えられる。そこで本岩中の黒雲母の変質物の多様性についても、その産状とのかかわりを明らかにしていくことが必要となる。

1. X線粉末回折法による黒雲母とその変質物の同定
水洗した試料中から黒雲母とその変質物をピンセットで拾い出し、さらに実体顕微鏡下で不純物を除去した後、メノールの乳鉢ですりつぶし、X線粉末回折実験に供した。粘土鉱物同定のため、必要に応じ次の処理を施した。

- ① エチレングリコール処理
- ② 塩化マグネシウム処理→グリセロール処理
- ③ 硝酸アンモニウム処理
- ④ 塩化カリウム+水酸化カリウム処理
- ⑤ クエン酸ナトリウム処理→塩化カルシウム処理→グリセロール処理
- ⑥ 塩酸処理
- ⑦ 加熱処理 (150℃, 300℃, 500℃, 600℃)

X線粉末回折の結果、赤名花崗閃緑岩とその風化物中に含まれる黒雲母とその変質鉱物は、次の7種の基本型に分類できる。

- ① 黒雲母 (Biotite) (記号 B)

(001)面の反射が他の面に比し特に強く、鉄質黒雲母と推定できる。塩化マグネシウム処理で(001)面は、 10Å から 14.5Å へ移動し、パーミキュライト様鉱物となる。

② 加水雲母 (Hydromica) (記号 Hm)

(001)面の反射の半幅は黒雲母に比し拡大する。

(001)面の反射は、一般に $10.3\sim 11.0\text{Å}$ になり、黒雲母の(001)面の反射よりやや膨潤する。しかし、含赤色酸化鉄カオリン帯上部において、(001)面の反射は再び 10Å に近づき、結晶度も高まる。塩化マグネシウム処理で

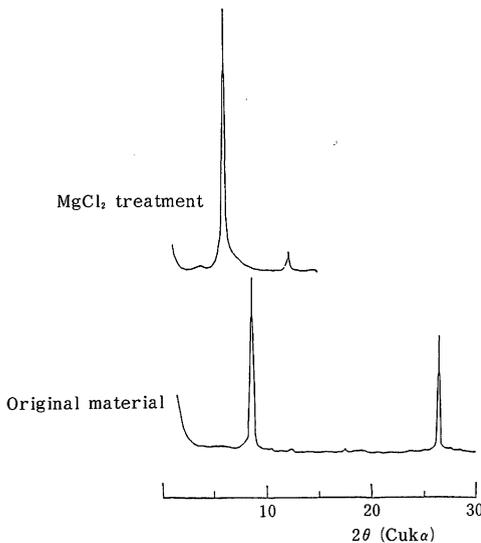


図-7 Biotite のX線回折

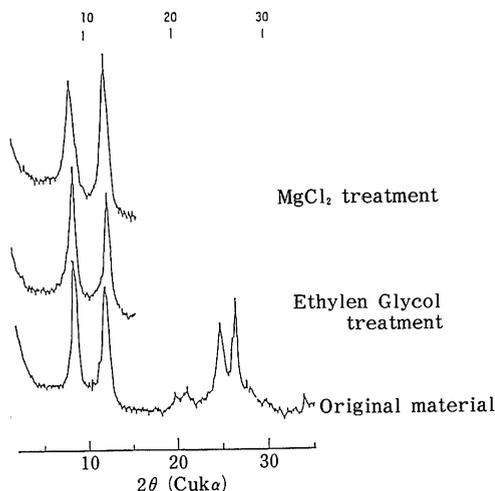


図-8 Hydromica のX線回折

(001)面は移動せず、黒雲母と異なる性質を帯びる。この鉱物を後述する化学分析の結果も加味して、“加水雲母 (Hydromica)”と名づける。この鉱物については、さらに詳細な研究を要する。

③ カオリナイト (Kaolinite) (記号 K)

④ 緑泥岩 (Chlorite) (記号 Ch)

(001)(003)面の反射に比し、(002)(004)面の反射が高いことから鉄質緑泥岩と推定できる。

⑤ クロライト様パーミキュライト (Chlorite-Vermiculite intergrade) (記号 Ch-V)

無処理試料では、パーミキュライトのX線反射を示す。硝酸アンモニウム処理、塩化カリウム+水酸化カリウム処理、エチレングリコール処理、塩化マグネシウム→グリセロール処理のいずれにも、 14.5Å の反射は移動し

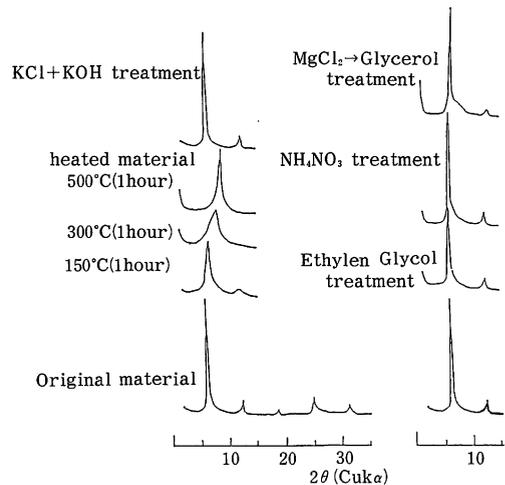


図-9 Chlorite Vermiculite intergrade のX線回折

ない。この点では緑泥石的性格を持つが加熱には弱く、 $300\sim 500\text{°C}$ の加熱で 14.5Å の反射は 10Å へ移動する。

⑥ 低電荷型パーミキュライト (low charged Vermiculite) (記号 low V)

硝酸アンモニウム処理で(001)面の反射が 10Å へ移動する。エチレングリコール処理では(001)面の反射は、 $15\sim 16\text{Å}$ へ移動する。しかし、塩化マグネシウム処理→グリセロール処理で(001)面の反射は 14.5Å を示す。又、加熱処理では、 $300\sim 500\text{°C}$ で(001)面の反射は 10Å へ移行する。これらの性質は、Brindley (1966)の低電荷型パーミキュライトに相当する。

⑦ Al 層間パーミキュライト (Al intercalated Vermiculite) (記号 Al-V)

硝酸アンモニウム処理、エチレングリコール処理、塩

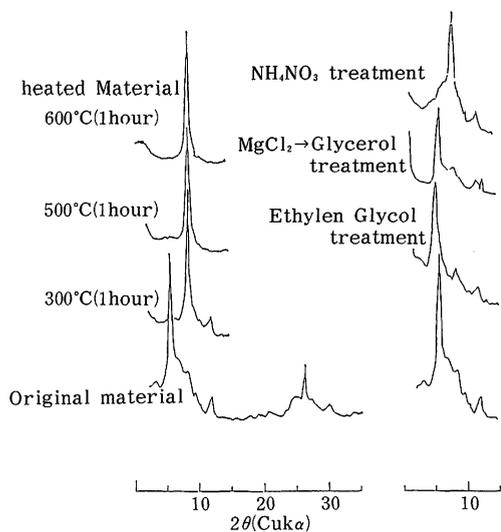


図-10 low charged Vermiculite のX線回折

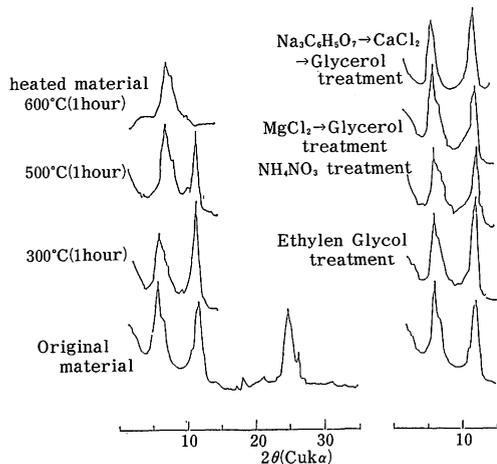


図-11 Al intercalated Vermiculite のX線回折

化マグネシウム処理→グリセロール処理で、14.5Åの反射は移動しない。クエン酸ナトリウム→塩化カルシウム処理→グリセロール処理でも14.5Åの反射を示す。加熱処理により、14.5Åの反射は徐々に移動し、600°Cでは11.5Åに位置する。後述する化学分析の結果もあわせ、この鉱物をAl層間パーミキュライトとする。

本岩体中の黒雲母とその変質物は、X線回折の結果、上記の7種の基本型に分類できる。さらに、これらの7種間で種々の混合層が形成されている。

2. 花崗閃緑岩の産状と黒雲母の変質型

花崗閃緑岩の産状と変質鉱物の種類との対応から、黒

| Zone | I | II | III | IV |
|------------------------------------|-------------------|----|-----|--------|
| Vertical distance from the base(m) | 0 | 2 | 4 | 6 8 10 |
| Biotite | [Solid black bar] | | | |
| Chlorite | [Solid black bar] | | | |
| Chlorite Vermiculite intergrade | [Solid black bar] | | | |
| low charged Vermiculite | [Solid black bar] | | | |

図-12 風化進行に伴う黒雲母とその仮晶の変化(露頭①)

| Zone | IV | | | V | |
|---------------------------------------|-------------------|----|----|----|---|
| Vertical distance from the surface(m) | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
| Biotite | [Solid black bar] | | | | |
| Hydromica | [Solid black bar] | | | | |
| Ch-V/low V | [Solid black bar] | | | | |
| low charged Vermiculite | [Solid black bar] | | | | |
| Kaolinite | [Solid black bar] | | | | |

図-13 風化進行に伴う黒雲母とその仮晶の変化(露頭②)

雲母の変質型を次の3タイプに分類した。

<正常型>節理塊が大きく熱水作用の影響が弱い型
赤来町来島周辺に典型的に出現する。この地域の風化断面における黒雲母の変質の代表例を図-12、図-13に示す。

<熱水型>節理塊が小さく熱水作用の影響が強い型
頓原町寺垣内、古城稲荷周辺に典型的に出現する。頓原川にそって東西に伸びるこの地域は、節理の発達が著しい。その節理を熱水性脈物質であるローモンタイト、セリサイト、モンモリナイト等が網目状にうめている(秦, 1985)。この地域の黒雲母の変質の代表例を図-14、図-15に示す。

<中間型>正常型と熱水型の中間的性格を示す型
頓原町大年、城東周辺に典型的に出現する。この地域の黒雲母の変質の代表例を図-16、図-17に示す。

3. X線粉末回折実験に基づく考察

本岩体風化殻の黒雲母の変質を、上記の3タイプに分けて考察する。

<正常型>

新鮮岩中の黒雲母はほとんど変質を受けず、わずかに緑泥石を伴うだけである。この黒雲母は、カオリン帯下部まで変質を示さない。緑泥石は、パーミキュライト帯でCh→Ch-V→low Vへと変化する(図-12)。又、カオリン帯上部付近から黒雲母が風化環境で準安定な加水雲母に移行する(図-13)。図-18は、風化進行に伴い、黒雲母が(001)面反射の半幅幅を拡大しながら加水雲母

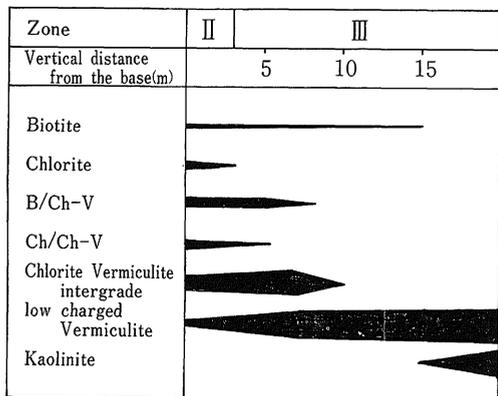


図-14 風化進行に伴う黒雲母とその仮晶の変化 (露頭④)

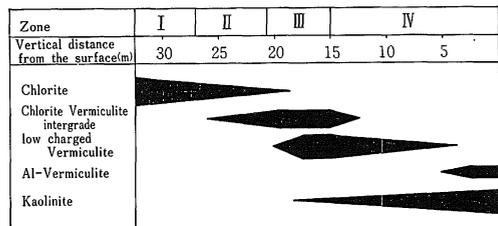


図-15 風化進行に伴う黒雲母とその仮晶の変化 (露頭⑤)

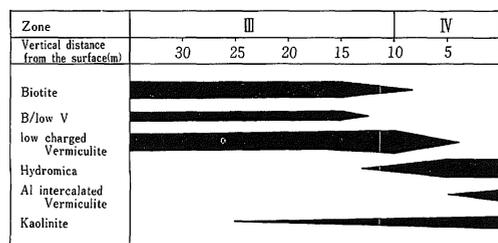


図-16 風化進行に伴う黒雲母とその仮晶の変化 (露頭⑥)

へ移行する様子を示している。ところが、含赤色酸化鉄カオリン帯上部で、その半価幅が再び縮小する。これは、この層準で K-長石が不安定となり分解するので、そこから加水雲母の層間に K イオンが供給され、その K イオンによって層間が再び引き締められるためと推定できる。含赤色酸化鉄カオリン帯では、カオリナイトが風化進行に伴い、徐々に増加することを示しており、その時共生する鉱物が主に加水雲母であることにより、加水雲母のカオリナイト化への経路があることが確認できる。以上の考察から正常型の変質経路は、次の図式で示され

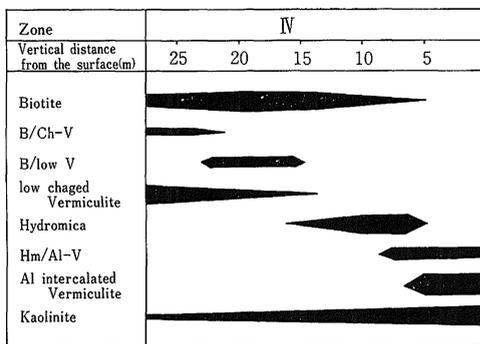
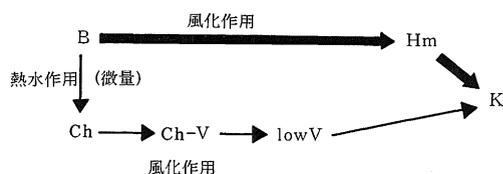


図-17 風化進行に伴う黒雲母とその仮晶の変化 (露頭⑦)

る。



<熱水型>

新鮮岩帯から初期変色帯までの岩石に含まれる黒雲母仮晶は緑泥石に変質している。緑泥石から変化したパーミキュライト類は不安定で、簡単にカオリナイト化する傾向にある(図-14)。一方、露頭⑤では緑泥石脈が発達しており、相当強い熱水作用を受けている。その為か、この黒雲母仮晶中の緑泥石は、風化作用に対し、初期段階では抵抗性が大きく、緑泥石的性格をパーミキュライト帯まで残存させている。しかし、パーミキュライト化した後は変化しやすく、カオリナイト化し、黒雲母仮晶も消失する。又、地表付近のカオリン帯では、Al 層間パーミキュライトが確認でき、低電荷型パーミキュライ

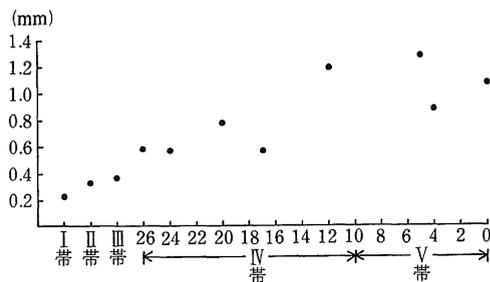
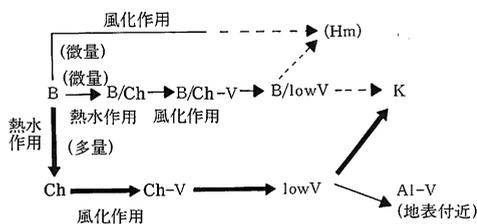


図-18 風化進行に伴う黒雲母の (001) 面反射の半価幅の変化

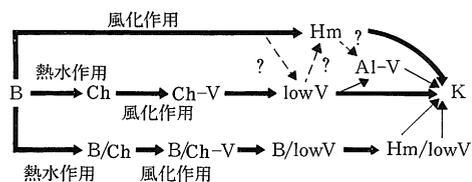
トからの変質が推定できる(図-15)。以上のことから、熱水型変質経路の概要は、次の図式で示される。



(3) 中間型

正常型と熱水型の中間的性質を示す。露頭⑥では、黒雲母と低電荷型パーミキュライトの混合層 (Hydrobiotite) が顕著である(図-16)。地表付近では、Al 層間パーミキュライトが存在するが、この場合の変質経路は明確でない。

以上3タイプの考察から、黒雲母の変質経路は、次の図式にまとめられる。



各風化断面における黒雲母の変質経路は、主として風化段階前の熱水作用に強く影響される。本岩体風化殻においては、黒雲母の直接的なパーミキュライト化、及びパーミキュライトの加水雲母化は、黒雲母仮晶鉱物の量的関係から見ると可能性が低い。

4. 黒雲母とその変質物の化学分析

試料を水洗し風乾後、黒雲母とその仮晶を拾い出し、実体顕微鏡下にて不純物を除去した後、メノールの乳鉢ですりつぶす。その試料から磁鉄鉱を除去した後、電磁分離機でさらに不純物を除去し、化学分析に供した。分析結果は表-3に示す。

5. 化学分析に基づく考察

化学分析に供したほとんどの試料は、2種以上の鉱物が混在して存在していることがX線粉末回折実験から明らかである(表-2)。これらの混合物から、一つの鉱物を差し引いてしまうことが定量的にできるならば、風化変質物について、もっと厳密な研究ができるはずである。

そこで、各鉱物の脱水温度の差に着目し、熱重量分析法を用い、混合物中の一鉱物の定量化を検討した。図-19は、黒雲母(試料番号1)、パーミキュライト(試料番号2)、加水雲母とカオリナイトの混合物(試料番号13)の3試料のTG・DTG曲線である。この3試料の測定結果を比較すると、DTG曲線に示される500℃付近の重

表-2 黒雲母とその仮晶の化学分析試料とその構成鉱物

| sample No. | locality | minerals |
|------------|----------|--|
| 1 | ① | Biotite |
| 2 | ⑥ | Chlorite Vermiculite intergrade > low charged Vermiculite |
| 3 | ④ 2 m | Chlorite Vermiculite intergrade > lowcharged Vermiculite » Biotite |
| 4 | 15 m | low charged Vermiculite » Biotite + Kaolinite |
| 5 | ⑦ 20 m | low charged Vermiculite, Biotite » < B/l-V + Kaolinite |
| 6 | 14 m | Biotite, Hydromica + Kaolinite |
| 7 | 8 m | Biotite, Hydromica + Kaolinite |
| 8 | 2 m | Kaolinite + Al intercalated Vermiculite |
| 9 | ② 26 m | Chlorite Vermiculite intergrade, Biotite + Kaolinite |
| 10 | 22 m | Biotite + Kaolinite |
| 11 | 10 m | Hydromica + Kaolinite |
| 12 | 0.5 m | Hydromica + Kaolinite |
| 13 | ③ 0 m | Hydromica + Kaolinite |
| 14 | ⑤ 30 m | Chlorite |

表-3 黒雲母とその仮晶の化学組成

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 35.28 | 34.14 | | | | | | 38.24 | | | 38.77 | | 39.43 | |
| TiO ₂ | 3.64 | 2.90 | | | | | | 2.61 | | | 2.39 | | 2.06 | |
| Al ₂ O ₃ | 12.77 | 14.72 | | | | | | 25.73 | | | 25.42 | | 26.72 | |
| Fe ₂ O ₃ | 4.65 | 24.20 | 19.30 | 17.86 | 17.63 | 15.17 | 14.97 | 13.63 | 15.58 | 15.74 | 12.33 | 11.76 | 9.36 | 27.45 |
| FeO | 17.60 | 0.56 | 2.07 | 0.84 | 0.89 | 1.38 | 1.00 | 1.16 | 1.51 | 0.85 | 0.59 | 0.68 | 1.06 | |
| MnO | 0.68 | 0.44 | 0.37 | 0.35 | 0.25 | 0.24 | 0.21 | 0.19 | 0.36 | 0.32 | 0.24 | 0.23 | 0.18 | 0.60 |
| MgO | 8.70 | 5.20 | 7.05 | 5.70 | 4.25 | 4.23 | 4.05 | 3.50 | 5.80 | 5.25 | 3.60 | 4.40 | 3.05 | 8.55 |
| CaO | 0.82 | 2.60 | 2.87 | 1.64 | 1.76 | 0.61 | 0.76 | 0.52 | 1.10 | 1.01 | 0.28 | 0.27 | 0.32 | 3.53 |
| Na ₂ O | 0.36 | 0.46 | 0.52 | 1.65 | 0.43 | 0.18 | 0.37 | 0.21 | 0.41 | 0.48 | 0.12 | 0.19 | 0.14 | 0.50 |
| K ₂ O | 10.72 | 2.16 | 3.66 | 3.73 | 2.57 | 3.46 | 3.07 | 1.40 | 3.18 | 4.27 | 3.36 | 3.59 | 3.16 | 2.31 |
| H ₂ O(+) | 1.82 | 7.75 | 7.33 | 7.83 | 8.05 | 9.01 | 9.27 | 10.91 | 8.17 | 8.17 | 9.84 | 9.75 | 10.65 | |
| H ₂ O(-) | 3.15 | 5.81 | 5.43 | 4.69 | 3.70 | 3.59 | 3.04 | 2.66 | 4.25 | 3.69 | 3.47 | 2.93 | 3.37 | |
| Total | 100.19 | 100.94 | | | | | | 100.75 | | | 100.41 | | 99.50 | |

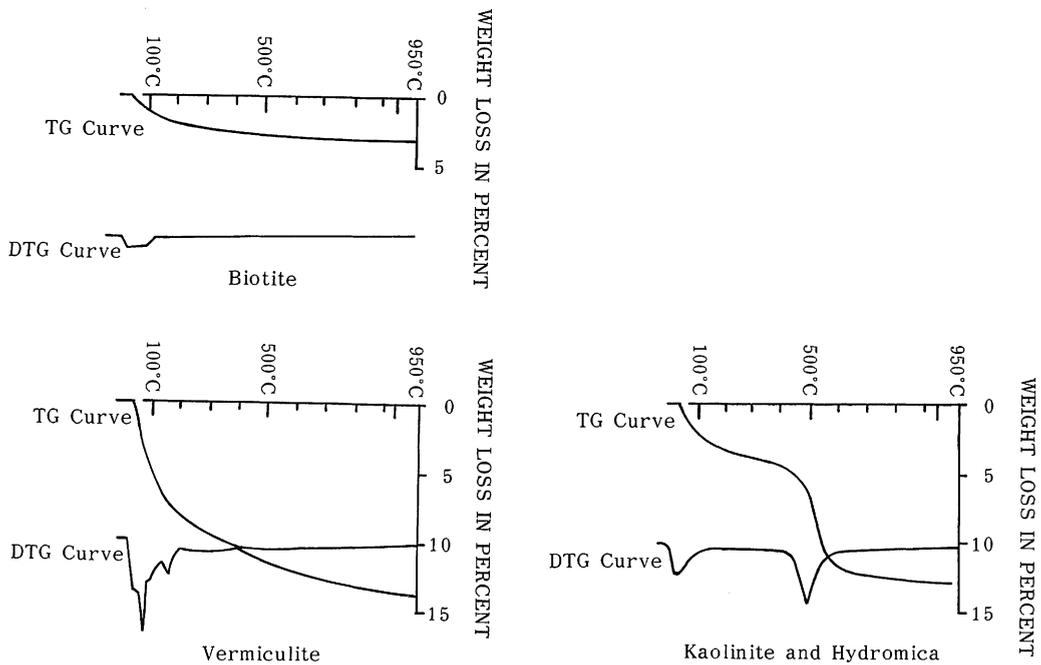


図-19 黒雲母とその変質物の TG DTG 曲線

量減は、加水雲母とカオリナイトの試料のみに表われる。さらに500°C付近の脱水は、カオリナイト特有のものである。従って、DTG曲線に示される500°C付近の重量減は、カオリナイトによるものと考えられる。

そこでまず、TG曲線に示されるカオリナイトの脱水による500°C付近の重量減を読みとり、その値からカオリナイト量を計算で求める。次に全重量から計算で求め

たカオリナイト量を引き去れば、黒雲母仮晶中のカオリナイト以外の鉱物量が得られる。

以上の方法でカオリナイトを除いた成分の化学分析値を再計算した結果を表-4に示す。

次に全分析を行った試料については、この分析値からモル比を求めた。その結果は表-5に示す。

求めたモル比から陽イオン比を出し、さらに陽イオン

表-4 カオリナイトを除いた黒雲母とその仮晶の化学組成

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 35.28 | 34.14 | | | | | | 33.31 | | | 34.62 | | 33.58 | |
| TiO ₂ | 3.64 | 2.90 | | | | | | 4.16 | | | 3.64 | | 3.76 | |
| Al ₂ O ₃ | 12.77 | 14.72 | | | | | | 17.53 | | | 18.05 | | 16.37 | |
| FeO | 17.60 | 0.50 | 2.07 | 1.01 | 1.18 | 2.04 | 1.52 | 1.85 | 2.00 | 1.19 | 0.90 | 1.12 | 1.93 | |
| Fe ₂ O ₃ | 4.65 | 24.20 | 19.30 | 21.48 | 23.53 | 22.39 | 22.82 | 21.72 | 20.60 | 22.06 | 18.79 | 19.41 | 17.06 | 27.45 |
| MnO | 0.68 | 0.44 | 0.37 | 0.42 | 0.33 | 0.35 | 0.32 | 0.30 | 0.48 | 0.45 | 0.37 | 0.38 | 0.33 | 0.60 |
| MgO | 8.70 | 5.20 | 7.05 | 6.85 | 5.67 | 6.24 | 6.17 | 5.58 | 7.67 | 7.36 | 5.49 | 7.26 | 5.56 | 8.55 |
| CaO | 0.82 | 2.60 | 2.87 | 1.97 | 2.35 | 0.90 | 1.16 | 0.83 | 1.45 | 1.42 | 0.43 | 0.45 | 0.58 | 3.53 |
| Na ₂ O | 0.36 | 0.46 | 0.52 | 1.98 | 0.57 | 0.27 | 0.56 | 0.33 | 0.54 | 0.67 | 0.18 | 0.31 | 0.26 | 0.50 |
| K ₂ O | 10.72 | 2.16 | 3.66 | 4.49 | 3.43 | 5.11 | 4.68 | 2.23 | 4.20 | 5.99 | 5.12 | 5.92 | 5.76 | 2.31 |
| H ₂ O(+) | 1.82 | 7.75 | 7.33 | 6.59 | 6.07 | 6.66 | 6.81 | 9.10 | 6.30 | 5.85 | 7.68 | 4.83 | 5.92 | |
| H ₂ O(-) | 3.15 | 5.81 | 5.43 | 5.64 | 4.94 | 5.30 | 4.63 | 4.24 | 5.62 | 5.17 | 5.29 | 7.01 | 7.93 | |
| Total | 100.19 | 100.94 | | | | | | 101.18 | | | 100.50 | | 99.04 | |
| Kaolinite (Wt. %) | 0 | 0 | 0 | 16.8 | 25.1 | 32.2 | 34.4 | 37.3 | 24.4 | 28.7 | 34.4 | 39.4 | 45.1 | 0 |

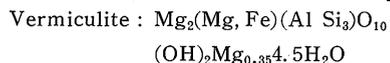
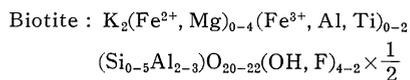
表-5 カオリナイトを除いた黒雲母とその仮晶の化学組成とモル比

| | Biotite | | Vermiculite | | Al-Vermiculite | | Hydromica | | Hydromica | |
|--------------------------------|---------|------------|-------------|------------|----------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 1 | 2 | 8 | 11 | 13 | | | | | |
| | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. | Wt. % | Mol. prop. |
| SiO ₂ | 35.28 | 0.5872 | 34.14 | 0.5683 | 33.31 | 0.5544 | 34.62 | 0.5763 | 33.58 | 0.5597 |
| TiO ₂ | 3.64 | 0.0450 | 2.90 | 0.0303 | 4.16 | 0.0521 | 3.64 | 0.0456 | 3.76 | 0.0471 |
| Al ₂ O ₃ | 12.77 | 0.1252 | 14.72 | 0.1444 | 17.53 | 0.1719 | 18.05 | 0.1770 | 16.37 | 0.1605 |
| FeO | 4.65 | 0.0291 | 24.20 | 0.1516 | 21.72 | 0.1360 | 18.80 | 0.1177 | 17.06 | 0.1069 |
| Fe ₂ O ₃ | 17.60 | 0.2450 | 0.56 | 0.0076 | 1.85 | 0.0257 | 0.90 | 0.0125 | 1.93 | 0.0269 |
| MnO | 0.68 | 0.0096 | 0.44 | 0.0062 | 0.30 | 0.0042 | 0.37 | 0.0052 | 0.33 | 0.0047 |
| MgO | 8.70 | 0.2159 | 5.20 | 0.1290 | 5.58 | 0.1384 | 5.49 | 0.1362 | 5.56 | 0.1380 |
| CaO | 0.82 | 0.0146 | 2.60 | 0.0464 | 0.83 | 0.0148 | 0.43 | 0.0077 | 0.58 | 0.0103 |
| Na ₂ O | 0.36 | 0.0030 | 0.40 | 0.0039 | 0.33 | 0.0028 | 0.18 | 0.0015 | 0.26 | 0.0022 |
| K ₂ O | 10.72 | 0.1138 | 2.16 | 0.0229 | 2.23 | 0.0247 | 5.12 | 0.0544 | 5.76 | 0.0611 |
| H ₂ O(+) | 1.82 | 0.1010 | 7.75 | 0.4302 | 9.10 | 0.5051 | 7.68 | 0.4263 | 5.92 | 0.3286 |
| H ₂ O(-) | 3.15 | 0.1748 | 5.81 | 0.3224 | 4.24 | 0.2353 | 5.29 | 0.2936 | 7.39 | 0.4402 |
| Total | 100.19 | | 100.94 | | 101.18 | | 100.56 | | 99.04 | |

Vermiculite=Chloririte Vermiculite in tevgrade+ low charged vermiculite

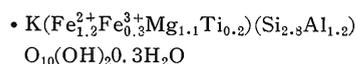
比の合計を求めた。

黒雲母とパーミキュライトの一般式は次式で与えられる。尚、黒雲母の式に2分の1を乗じたのは、パーミキュライトの式のイオン数と合わせるためである。

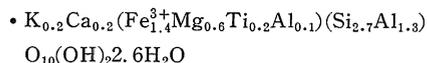


これらを基準式として、求めた陽イオン数比を割り振って求めた化学式を次に示す。

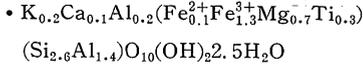
Biotite



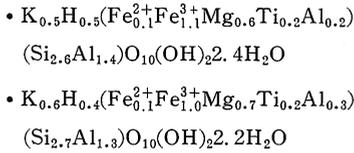
Vermiculite



Al intercalated Vermiculite



Hydromica



これらの算出された化学式から次のことがわかる。黒雲母の式を見ると、鉄が多く、鉄質黒雲母であることがわかる。このことはX線実験の結果と一致する。又、含赤色酸化鉄カオリン帯に特徴的な雲母は層間イオンの不足を H_3O^+ の形で補っていると考えられ、その意味で加水雲母 (Hydromica) と呼ぶことにする。これは黒雲母からパーミキュライトへ移行する段階で生じるとされている黒雲母とパーミキュライトの混合層である加水黒雲母 (Hydrobiotite) とは異なるものであり、さらに詳細な研究を要する。黒雲母と加水雲母の化学組成を比較してみると、黒雲母に比し加水雲母は K_2O , MgO , Total Fe が減少すること、 Fe^{2+} から Fe^{3+} へ変化すること、 Al_2O_3 と H_2O が増加することがわかる。化学組成上からは、黒雲母が Trioctahedral 型に対し、加水雲母は Dioctahedral 型に近づいていることがわかる。

一方風化初期に出現するパーミキュライト類に共通することは Ca^{2+} の存在である。この Ca^{2+} が層間で水酸イオンを引きつけることにより、パーミキュライトの膨潤を導き出していると考えられる。

又、地表近くで出現する Vermiculite-Chlorite intergrade は Al^{3+} が 0.2 だけ層間にはいることが化学式に示されている。従ってこの鉱物は、従来から知られている Al 層間パーミキュライトと同種と考えられる。

次に、化学分析の結果に基づき、黒雲母の変質経路に検討を加える。図-20はカオリナイトの変化量に伴う黒雲母とその変質物中のアルカリ・アルカリ土類の変化を示すものである。尚、この場合、カオリナイト量を除いた残量成分の分析値を用いている。

図中に示される各酸化物の変化で、パーミキュライト類と雲母類の間で差が認められるのは、 K_2O , CaO の動きである。ただし Al intercalated Vermiculite については、他のパーミキュライト類と産状を異にするので、同一の議論の対象とはしない。

K_2O は、新鮮な黒雲母では、10.72%の値を示し、風化の進行に伴い次第にその値を減少させてくるが、加水雲母に至っても5%以上の値を示している。これに対し、緑泥石、パーミキュライトでは2~3%の量を示している。 K_2O が4%程度のやや高い値を示すのは、黒雲母との混合による影響と考えられる。 CaO は緑泥石、パーミキュライトでは2~3%の値をとるのに対し、雲母類では1%以下の値をとるものが多い。 MgO , Na_2O については両者にあまり大きな差はない。

図-21は、アルカリ、アルカリ土類成分のうち黒雲母仮晶の構成鉱物種によって変化がみられた CaO と K_2O の関係を表現したものである。この図は K_2O の増加に

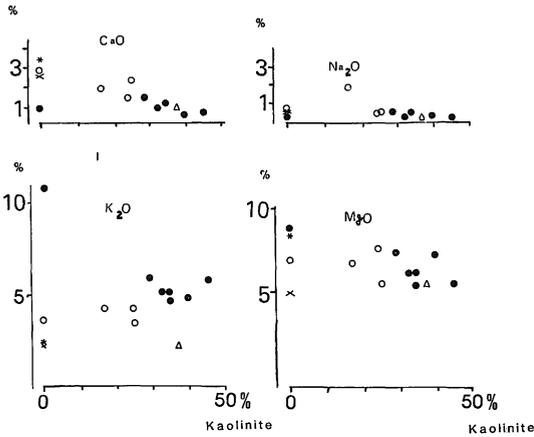


図-20 カオリナイト量の変化に伴う黒雲母 (仮晶) の化学組成変化

- Biotite and Hydromica
- Vermiculite (+Mica)
- × Vermiculite
- △ Al intercalated Vermiculite
- * Chlorite

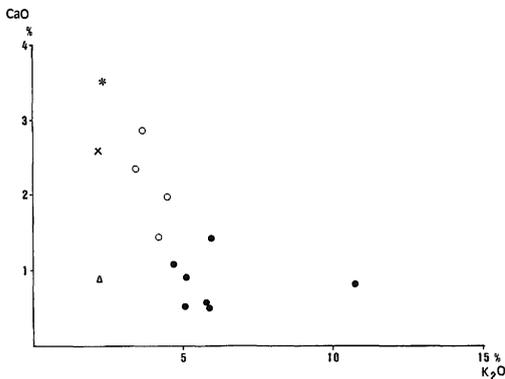


図-21 黒雲母 (仮晶) 中の K_2O と CaO の関係

- Biotite and Hydromica
- Vermiculite (+Mica)
- × Vermiculite
- △ Al-intercalated Vermiculite
- * Chlorite

つれて、CaO が減少し、逆に CaO が増加するにつれて K₂O が減少することを示しており、両者には負の相関が成り立つ。この図からも緑泥石、パーミキュライト類と黒雲母・加水雲母類は、別のグループに分類できる。パーミキュライトの成因を考える場合、黒雲母が風化過程初期に K₂O を放出しながら CaO を受けとる反応が進行したとするよりも、黒雲母が Ca 系の熱水変質を受け、CaO が付加され、緑泥石やその類似鉱物に変化したものが、風化過程でパーミキュライト化したと考える方が可能性が高いことをこの図は示している。しかし、風化過程で斜長石の溶脱により持たせられる Ca イオンが、風化しはじめた黒雲母の層間に選択的に取り込まれる可能性も残されている。

以上黒雲母の変質について産状に基づきながら、X線回折と化学分析の結果について考察を加えてきた。その結果、赤名花崗閃緑岩体において、黒雲母がパーミキュライト化するのには、黒雲母が緑泥石化ないしその類似鉱物化する過程を経ている可能性が大きいことが推定できた。又、含赤色酸化鉄カオリン帯を中心に、黒雲母が半安定的な加水雲母に変化していることも確認できた。

しかし、風化過程で黒雲母が直接パーミキュライト化する可能性も残されている。この場合、熱水変質を経て生成されたパーミキュライトとどこがどうちがうかを明確にすることが今後の課題となる。又、風化過程での加水雲母の生成についても、直接黒雲母が加水雲母化するのみでなく、一度パーミキュライト化したものが、Kイオン付加を受け、加水雲母化する可能性も否定できない。これらの問題について、さらに詳細な研究を要する。

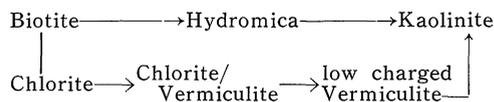
V. ま と め

1. 赤名花崗閃緑岩深層風化殻は、風化生成鉱物相により次の5層に分帯できる。(1) 新鮮岩、(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

2. 風化進行に伴い、Al₂O₃、TiO₂、H₂O(+), H₂O(-)、Fe₂O₃(Total Fe)、MnO は増加するが、他の元素は減少する。CaO、Na₂O の急激な減少と Al₂O₃、H₂O の増加は、斜長石のハロイサイト化に対応する。Total Fe の増加はゲサイトの生成による。一方、K₂O 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、K-長石や角閃石が比較的風化作用に抵抗性を示すことに対応している。

3. 黒雲母は化学的環境に対し鋭敏に反応する。赤名

花崗閃緑岩体においては、熱水作用により、Kイオンが取り去られ、Caイオンが付加された。その結果、緑泥石ないし緑泥石類似鉱物が生成された。黒雲母の変質経路は、次の図のように推定される。



黒雲母は、半安定状態の加水雲母を経て、最終的にはカオリナイトとなる。

謝辞

本論文は、兵庫教育大学学校教育研究科における修士論文の一部をまとめたものである。研究をすすめるにあたり、兵庫教育大学徳山明教授および兵庫教育大学湊秀雄教授には、研究の全般にわたり、終始親切な御指導を賜わった。島根大学教育学部三浦清教授には、風化作用における基本問題について御教示いただくと共に、野外調査の御指導を賜わった。以上の方々へ深く感謝の意を表する。

引用文献

- Brindley, G. W. (1966) Ethylen glycol and glycerol complexes of Smectites and Vermiculites: Claymineral, 6, 237-259.
- 秦 明徳 (1985) 風化作用の研究 (I) — 赤名花崗閃緑岩分布地域の特質と風化前変質 — : 島大附中紀要第27号, 51~62.
- 秦 明徳 (1986) 風化作用の研究 (II) — 赤名花崗閃緑岩深層風化殻の風化分帯 — : 島大附中紀要第28号, 59~72.
- 井上厚行・清水系子・湊 秀雄 (1981) フロゴパイトの変質機構と反応経路: 鉱物学雑誌, 15, 特別号, 61-84.
- Kato, Y. (1964) Mineralogical study of weathering products of granodiorite at Shinshiro city (II), Weathering of primary minerals - stability of primary minerals: Soil Sci. and Plant Nutrition, 10, 264-269.
- Kato, Y. (1965) Mineralogical study of weathering products of granodiorite at Shinshiro city (III), Weathering of primary minerals (2) mineralogical characteristics of weathered mineral grains: Soil Sci. and Plant Nutrition, 11, 30-40.
- 菅野一郎・本荘吉男・有村玄洋 (1960) 花コウ岩に由来する赤黄色土中の黒雲母の風化: 粘土科学の進歩(2), 217-228.
- 木宮一邦 (1975) 花崗岩類の物理的風化指標としての引

- 張強度—花崗岩の風化・第1報—：地質学雑誌，81，341-364.
- Lumb, P. (1962) The properties of decomposed granite : *Geotechnique*, 12, 226-243.
- Minato, H, etal (1982) Occurrence of Halloysite in the Deep Weathering Crust in the Eastern Chugoku Region : *Hyogo University of Teacher Educational Journal*, Vol 2.
- 三浦 清 (1973) 深成岩類の風化に関する研究, 第1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*, 14-3, 1-16.
- 三浦 清・樋口和之 (1974) 深成岩類の風化に関する研究, 第2報, 鳥取県日野閃緑岩体の赤色風化 : *応用地質*, 15-1, 23-34.
- 中川善兵衛・小坂丈予・浦部和順・山田久夫 (1972) 岩手県千厩地方における石英閃緑岩の風化について : *岩鉱*, 67, 283-290.
- 長沢敬之助 (1972) 風化過程におけるウンモの変質 : *鉱物学雑誌*, 10, 6, 528-539.
- 西田一彦・青山千彰 (1979) 花こう岩風化層の間ゲキ径と水分吸着特性について : *応用地質*, 20, 3-12.
- Norrish, K. (1972) Factors in the weathering of Mica to Vermiculite: *Proc. Inter. Clay Conf., Madrid*, 417-431.
- 大八木規夫・内田哲男・鈴木宏芳 (1969 a) 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 : *防災科学技術センター研究報告*, 第2号, 21-44.
- 大八木規夫・熊谷貞治・内田哲男 (1969 b) 花崗岩類風化帯におけるP波速度 : *応用地質*, 10-2, 17-24.
- Reiche, P. (1943) Graphic representation of chemical weathering : *J. Sed. Pet.*, 13, 58-68.
- Reiche, P. (1950) A survey of weathering processes and products : *New Mexico Univ. Publ. Geology*, 3.
- 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.