風化花崗岩のモードとその定量的評価*

福 士 圭 介¹ 米 田 哲 朗² 中 島 巖³

Mineral Content and its Quantitative Evaluation of Weathered Granite

by Keisuke FUKUSHI¹, Tetsuro YONEDA¹ and Iwao NAKAJIMA¹

1. Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628

Weathered granites were studied in order to understand quantitative mineralogical changes which seriously affect the engineering properties of granite. Nishinomiya granites of different weathering grades were examined by using a X-ray diffractometer (XRD), optical microscope, electron probe micro-analyzer (EPMA). In addition, modal analysis was performed for back-scattered electron images (BSEI) of the granites.

XRD and EPMA analyses suggest that Nishinomiya granite weathering can be characterized by the plagioclase and biotite alterations to clay minerals. The mineralogical alteration series in weathered granites are 1) biotite → vermiculite → smectite → kaolin mineral, and 2) plagioclase → smectite → kaolin mineral. These mineralogical changes of the constituent minerals may be one of the major factors controlling physical and chemical properties of granite under weathering environment.

Modal analysis was performed by a fitting of probability density functions and a peak decomposition for the gray level histogram of BSE image. This convenient measurement method gives relevant modal values of constituents including alteration products, approximately equivalent to those by the conventional point counting method. It is indicated that the measurement method using BSEI is applicable to highly-resolvable quantitative-analysis of the mineralogical change in granite weathering.

KEY WORDS: Weathered Granite, Mineralogical Change, Clay Minerals, Modal Analysis, BSEI Analysis

1. は じ め に

風化環境下にある花崗岩は割れ目の発達と鉱物変質の進行により、まさ化、粘土化していく。この過程で生じた形態的・鉱物学的な変化は、花崗岩地帯の斜面防災や地下開発において問題となる岩盤の力学的性質に大きな影響を与える (Beavis, 1985)。また、風化によって生じる花崗岩中の割れ目は、地表水の地下移流や地下水流動のみずみちを提供するとともに、鉱物-水反応による花崗岩への溶存化学種の吸着や鉱物の化学的変質の進行をコントロールする要因の一つとなり得る (濱崎ほか, 1999)。このように、風化による花崗岩の性状変化はその透水性さらに化学的特性に対しても大きな影響を及ぼすものであり、それらの関連性の解明は、産業廃棄物による地質汚染や放射性廃棄物地下貯蔵の長期安全性などの評価・予測にとっても重要な課題である (Murakami et al., 1997; Sammartino et al., 1999)。

これら風化花崗岩の性状変化と物理的・化学的特性との関連性を究明する上で、花崗岩構成鉱物の種類・量とその変化を知ることが必要不可欠である。通常、それら岩石の基本情報の取得は、岩石薄片の偏光顕微鏡観察による鉱物同定とモード分析によってなされることが多い。しかし、変質岩の一種である風化花崗岩の場合、鉱物変質の進行や変質鉱物の生成、さらにマイクロクラックの発達などによる花崗岩の鉱物組成や組織に複雑な変化が生じ、それらが従来の手法の適用性に影響するものと考えられ

る。したがって、この種の変質岩に対する最適なモード分析法を明らかにするためには、風化花崗岩の詳細な鉱物学的キャラクター化に基づいて、各種モード分析法の比較検討がなされる必要があるであろう。

今回、風化程度の異なる3種の西宮産花崗岩について、構成鉱物の風化変質による鉱物学的性質の変化を詳しく調べるとともに、偏光顕微鏡像および走査型電子顕微鏡 (SEM) の後方散乱電子線像 (BSE 像) を用いてモード測定を行い、2つの分析法を比較したので報告する。

2. 試 料

試料は西宮市のマンション建設現場の試錐岩芯から採取された花崗岩である。当地域の花崗岩は山陽帯に区分され、放射年齢として白亜紀相当の90~75 Maが示されている (久城ほか, 1989)。採取試料は、完晶質、中粒で、有色鉱物の含有量が少ない花崗岩であり、実験には肉眼的に風化程度の異なる3種の試錐岩芯試料 (NIS4, NIS28, NIS22) を用いた。NIS4は長石部分に薄い黄色みを含むが概ね灰白色で堅牢な試料である。NIS28は長石の多くが褐色に変色し、局所的に割れ目が認められる試料である。NIS22は岩石全体が褐色を呈し、縦横にわたる割れ目の発達が認められる。これら3種の風化花崗岩試料を、肉眼的な風化分類 (例えば陣内・向山 (1973)) を適用すると、それぞれ風化ランク A (新鮮)、B (変色を伴う)、C (容易に解砕分離) に区分することができる。

3. 風化花崗岩の鉱物組成とその変化

3・1 実験方法

全岩粉末試料 (>75 μm) および各種処理 (未処理, エチレングリコール飽和処理, Mg 飽和処理, Mg-グリセロール飽和処理) を

* 2000年2月14日受付 6月8日受理 (「掲載特例」論文)

1. 北海道大学大学院生 工学研究科環境資源工学専攻

2. 正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科環境資源工学専攻

3. 正会員 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻

【著者連絡先】FAX 011-706-6323 (北大・環境資源)

キーワード: 風化花崗岩, 鉱物学的変化, 粘土鉱物, モード分析, BSE 像解析

Table 1 Chemical compositions of clay minerals of the Nishinomiya granites. Total Fe is expressed as Feo. The cation numbers of clay minerals without chlorite are calculated based on $O_{10}(OH)_2$. These of chlorite are based on $O_{10}(OH)_8$

Anal.No	K-Mica		Chlorite		Biotite		Vermiculite		Smectite		Kaolin	
	NIS4	NIS28	NIS4	NIS28	NIS4	NIS28	NIS28	NIS22	NIS28	NIS22	NIS28	NIS22
Si	46.91	46.53	21.27	35.45	34.83	36.56	36.41	37.25	49.51	51.25	48.43	48.62
TiO ₂	0.00	0.02	0.04	2.84	3.77	3.28	2.77	1.35	1.92	0.07	0.06	0.01
Al ₂ O ₃	34.17	39.36	19.72	16.16	15.72	16.66	15.90	17.89	23.06	25.96	17.74	35.37
FeO	2.51	0.61	41.57	28.45	28.12	22.32	25.02	23.88	10.07	2.77	12.93	2.30
MnO	0.33	0.01	2.16	0.66	0.88	0.91	0.88	0.97	0.47	0.13	0.05	0.12
MgO	0.24	0.01	1.91	2.33	2.59	1.94	2.12	1.24	0.68	0.92	0.90	0.15
CaO	0.03	0.01	0.06	0.04	0.00	0.18	0.14	0.29	1.41	1.54	1.19	0.47
Na ₂ O	0.21	0.18	0.00	0.06	0.13	0.04	0.04	0.07	0.02	0.03	0.12	0.02
K ₂ O	11.66	11.79	0.00	9.81	9.74	5.51	6.90	5.92	0.91	0.00	1.32	0.00
Total	96.05	96.05	86.73	95.80	95.78	87.40	90.18	88.85	88.05	82.66	82.74	87.06
Si	3.11	2.99	2.55	2.60	2.57	2.81	2.76	2.83	3.43	3.63	3.60	2.08
Ti	0.00	0.00	0.00	0.16	0.21	0.19	0.16	0.08	0.10	0.00	0.00	0.00
Al tet	0.89	1.01	1.45	1.24	1.23	1.00	1.08	1.10	0.47	0.36	0.40	0.00
Al oct	1.79	1.97	1.33	0.16	0.14	0.52	0.34	0.50	1.41	1.81	1.15	1.78
Fe ²⁺	-	-	4.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	0.14	0.03	-	1.75	1.73	1.44	1.59	1.52	0.58	0.16	0.80	0.08
Mn	0.02	0.00	0.22	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00
Mg	0.02	0.00	0.34	0.25	0.28	0.22	0.24	0.14	0.07	0.10	0.10	0.01
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.10	0.12	0.09	0.02
Na	0.03	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
K	0.99	0.97	0.00	0.92	0.92	0.54	0.67	0.57	0.08	0.00	0.13	0.00

施した粘土分定方位試料 (>2 μm) の XRD 分析を行い、主成分鉱物および粘土鉱物の同定を行った。なお、特にスメクタイトとパーミキュライトの同定については白水 (1988) の判定法によっている。

さらに、各試料の研磨薄片および研磨片を作成し、偏光顕微鏡観察を行うとともに、EPMA (日本電子 JXA-8800 / 8900) により構成鉱物の SEM 像観察、定性・定量化学分析および元素マップ (主要元素の特性 X 線像) 測定を行った。

3・2 風化花崗岩の鉱物組成

3・2・1 主成分鉱物 いずれの試料とも石英、カリ長石、斜長石が主成分鉱物である (Fig.1)。カリ長石はパーサイトとして産するものも広く観察される。斜長石は鏡下で微細な雲母鉱物などの変質物により汚濁しているものが多い。とくに、NIS28 および NIS22 に見られる斜長石は、亀裂が発達し、汚濁の程度が著しいことが特徴的である。

有色鉱物として NIS28 および NIS22 中に黒雲母が少量認められる。黒雲母は、3・2・2 で述べるように、風化変質によりパーミキュライト化しているものが多い。なお、NIS4 には著量の Fe 緑泥石 (Table 1) が鏡下で認められる。それら緑色を呈する緑泥石について、その鉄分をおおよそ Fe^{2+} の状態にあるとみなすことができるため、鉄の酸化を伴う風化環境における産物ではなく、花崗岩生成以降の還元的な熱水環境における黒雲母変質の生成物と考えることができる。

微量鉱物としてカリウム雲母および、黒雲母・緑泥石に随伴する不透明鉱物がすべての試料から見出される。特に、カリウム雲母は、細粒結晶や微細結晶集合体が斜長石に包有されるもので、いずれの試料とも広く認められる。それらカリウム雲母は白雲母に近い組成を示す場合が多い (Table 1)。

3・2・2 風化変質鉱物 風化花崗岩の変質鉱物としてパーミキュライト、スメクタイト、カオリン、雲母鉱物そして水酸化鉄鉱物が認められる。ここではとくに粘土鉱物について、鏡下における産状と鉱物学的性質を試料ごとに述べる。

(1) NIS4 粘土試料の XRD パターン (Fig.2) に見られるように、未処理定方位試料では緑泥石の底面反射 (14 Å および 7.1 Å) と重なるものの、エチレングリコール処理および Mg-グリセロール飽和処理ではそれぞれ 17 Å および 18 Å のスメクタイトの底面反射が認められ、試料中にスメクタイトが存在することが示される。

EPMA による検討から、それらスメクタイトは、緑泥石の一部を交代する変質産物、また、斜長石中の空隙を埋める微細結晶の集合体として産することが分かる。なお、Fig.2 の XRD パターンで 10 Å の底面反射を示す雲母鉱物は、顕微鏡下で斜長石内に認められる微細なカリウム雲母に相当する。

(2) NIS28 未処理定方位試料の XRD パターンに見られる 14 Å 付近の強いピークは、エチレングリコール処理により 17 Å 付近に移動するが、Mg-グリセロール処理では 18 Å に移動する部分と 14 Å 付近に残るものの 2 つに分離する (Fig.2)。この Mg-グリセ

Fig. 1 Optical microphotograph of NIS4 (Crossed polar).
Qz: quartz, Pl: plagioclase, Kf: K-feldspar, Ch: chlorite, Scale bar: 1 mm.

Fig. 2 X-ray powder diffraction patterns of oriented specimens.
OM: air-dried, MgGY: Mg-saturated and glycerol treated, EG: ethylene glycol treated.

ロール処理による底面反射の挙動は、本試料中に前者のス멕タイトと後者のパーミキュライトが共存することを示している。なお、エチレングリコール処理において 14 Å 付近のピークが認められないことから、パーミキュライトは、未処理で 10 Å を示しエチレングリコール処理により 14 Å に膨張するカリウム飽和型(Suquet et al., 1977)であると考えられる。さらに、各種処理の XRD パターンにおいて認められる 10 Å および 7.2 Å 付近のピークは、それぞれ、雲母鉱物およびカオリン鉱物が存在することを示している。

本試料中に認められる黒雲母は、一例を Fig.3 に示すように、鉱物粒内で変質が進んでいるものが多い。すなわち、BSE 像で粒内で組成が不均質であることを示す明暗の変化が顕著に認められる (Fig.3A)。それらを元素マップ (Fig.3C) と対応させると、明色部は K および Fe に富み、暗色部は K および Fe に乏しい傾向があり、BSE 像で観察される不均質性は黒雲母変質による組成変化であることが示される。黒雲母の定量化学分析結果からも、未変質の黒雲母は高い K・Fe 含有を示す (Table 1 の Anal.4 および 5) のに対し、変質黒雲母 (とくにその BSE 像における暗色部) では K および Fe が顕著に減少している (Table 1 の Anal.6, 7 および 8) などの組成変化が確認される。これら EPMA により示される黒雲母の組成変化は、XRD において認められたパーミキュライトの生成に相応すると考えられる。

さらに変質黒雲母には、上述のパーミキュライト化した部分と

比べ、BSE 像でより暗色を呈し、元素マッピングでより K・Fe に乏しいが Ca に富む部分が認められる (Fig.3A および C)。EPMA 分析より、この部分はパーミキュライトに比べ Fe と K の含有量が低く、Si と Ca の量が多く、ス멕タイトの組成を有することが示される (Table 1 の Anal.9)。また、このような黒雲母の変質生成物としてのス멕タイト以外に、斜長石を網状に交代するス멕タイトも認められている (Fig.3B および Table 1 の Anal.10)。

カオリン鉱物は、EPMA 分析より、黒雲母を交代する産状で観察される。また、NIS4 と同様のカリウム雲母が斜長石中に広く観察される。

(3) NIS22 本試料は、XRD で 6.3 Å 付近にピークを示すレピドクロサイトが認められること、また、変質生成物である粘土鉱物としてカオリン鉱物が卓越することが特徴的である (Fig.2)。さらに、各種処理試料の XRD パターンで、NIS28 と同様の挙動を示す 14 Å 底面反射が認められており、本試料にはス멕タイトおよびパーミキュライトが存在すると考えられる。また、雲母鉱物の存在を示す 10 Å の底面反射が認められる。

Fig.4 に NIS22 の斜長石変質の一例として BSE 像と元素マップを示すように、カオリン鉱物は斜長石の網脈状の空隙を埋めるような産状の変質生成物として認められることが多い。また、NIS28 同様に黒雲母を交代する産状も観察される。

本試料中のパーミキュライトおよびス멕タイトは、NIS28 と

Fig. 4 Back-scattered electron image (BSE) and characteristic X-ray (SiK α , AlK α , NaK α , CaK α and FeK α) images showing plagioclase alteration of NIS22. Numeral in BSE corresponds to analytical number in Table 1.

Fig. 3 Electron and characteristic X-ray images showing alteration of biotite and plagioclase of NIS28.
A : Back-scattered electron image, B : Magnified image of a rectangle area in A, C : Characteristic X-ray (SiK α , AlK α , FeK α , NaK α , CaK α and K α) images. Numerals in A and B correspond to analytical numbers in Table 1.

Fig. 5 Plots of atomic ratios of Si-Al(total)-(Fe+Mg) and K-Al(total)-(Fe+Mg) for biotite and its alteration products. Solid circle (●): NIS28, Open triangle (△): NIS22. Numerals correspond to analytical numbers in Table 1. Bt: biotite, Vm: vermiculite, Sm: smectite, Ka: kaolin mineral.

同様に黒雲母の変質生成物として認められる。このほか、スメクタイトとカリウム雲母鉱物が斜長石中の変質鉱物として認められる。

3・3 風化花崗岩の鉱物学的変化

Fig.5はNIS28とNIS22の黒雲母とその粒内の変質生成物のK-Al-(Fe+Mg)原子比およびSi-Al-(Fe+Mg)原子比を三角図へプロットしたものである。図中の番号はTable 1の分析番号に相当し、黒雲母、パーミキュライト、スメクタイト、カオリナイトの組成を持つ部分のプロットである。K-Al-(Fe+Mg)プロットは、全体的に、黒雲母変質はKおよび(Fe+Mg)比の減少とAl比の増加の方向に組成変化するものであり、およそ黒雲母→パーミキュライト→スメクタイト→カオリン鉱物の変化経路を経ることを示唆している。一方、Si-Al-(Fe+Mg)プロットは、(Fe+Mg)比の減少する方向に、大きく黒雲母+パーミキュライト、スメクタイトおよびカオリン鉱物の3つのクラスターに区分され、黒雲母とパーミキュライトの(Fe+Mg)比には大差がないことを明瞭に示している。

これらのことは、長沢・森嶋(1990)による花崗岩中の風化黒雲母の組成変化や泰(1999)による花崗閃緑岩の人工風化実験によって示されていると同様に、風化変質における黒雲母のパーミキュライト化はK比の減少に起因することを示している。すなわち、NIS28およびNIS22の黒雲母は2:1層をほとんど変化させることなく、層間カリウムの溶脱によりパーミキュライトへと変化したと考えられる。このことは、より風化ランクの高い試料であるNIS22中の黒雲母・パーミキュライトがNIS28のそれよりもより低いK比を示すこと(K-Al-(Fe+Mg)プロット)と調和的である。一方、黒雲母・パーミキュライトのスメクタイト化さらにカオリン化は、(Fe+Mg)比の減少とAl比の増加により特徴づけられ、パーミキュライト化の変化とは異なることが分かる。それらのスメクタイト化およびカオリン化は、それぞれ異なったメカニズムによる四面体層および八面体層の変質に起因するものと推察される。

花崗岩の風化変質はさらに斜長石の粘土鉱物化によって特徴づけられる。すなわち、花崗岩風化の進行に伴い、斜長石を交代するスメクタイトとカオリン鉱物が生成する。これら粘土鉱物は、黒雲母の変質メカニズムとは異なり、斜長石の溶解と溶液からの沈殿による生成物であると考えられる。なお、NIS4におけるスメクタイトの顕微鏡下における産状は、それが風化変質による産物であり、肉眼的に新鮮岩に区分される花崗岩試料中にも風化変質による微弱な鉱物学的変化が生じていることを示している。斜長石中の雲母鉱物の詳細については、さらにキャラクターゼーションが必要である。

Fig. 6 Mineral-distribution maps revealed by two-dimensional arrangement of point counting data. Scale bar: 0.5 mm, dark gray: quartz, gray: plagioclase, black: K-feldspar, light gray: biotite chlorite clay minerals, white: resin

4. 風化花崗岩のモード測定

4・1 ポイントカウンティング

岩石のモード分析法として従来から広く用いられている光学顕微鏡ポイントカウント法によりモード測定を行った。すなわち、偏光顕微鏡下において鉱物同定を行うとともに、研磨薄片上に0.5 mm 間隔の格子を設定し、モードを計数した。各試料の計数点数はNIS4で2,500点、NIS28で2,560点、NIS22で2,788点である。

なお、各計数点の座標と鉱物情報をパソコンに入力し、鉱物のモードを二次元的な鉱物分布情報を示すマップとして作成した(Fig.6)。計数データをこのように視覚的に表現することにより、花崗岩のモードとともに構成鉱物の集合状態を、その精度は計数点の密度および構成鉱物の粒径によるが、顕微鏡画像とは別に表すことができる。マップにより、試料中の主要構成鉱物が不均質で偏りのある集合状態を示し、とくにその偏りの程度がNIS28に比べてNIS22とNIS4で著しいことが分かる。さらに、このようなポイントカウンティングにおける付加的な情報を、岩石組織の要素の定量化に結びつけることができるものと思われる。

4・2 BSE 像解析

BSE 像を解析することにより風化花崗岩のモード測定を行った。BSE 像はSEMの画像出力モードの一つであり、構成鉱物の化学組成により像の輝度に違いが生じることから、鉱物・岩石の構造・組織観察に広く用いられる(Krinsley et al., 1998)。BSE 像における相対的な輝度は、次式で示される鉱物の後方散乱係数 $\bar{\eta}$ によって決まる。後方散乱係数は、

$$\bar{\eta} = \sum C_i \eta_i$$

により与えられる。ここで C_i は鉱物中での元素 i の重量比、 η_i は各元素の後方散乱係数である。各元素の後方散乱係数は経験式

$$\eta = -0.0256 + 0.16Z - 1.86 \times 10^{-4}Z^2 + 8.3 \times 10^{-7}Z^3$$

で表される(Dilks and Graham, 1985)。ここで Z は原子番号である。

Fig.7AにBSE像で認められるように、重元素に富む鉱物ほど明るい傾向がある。すなわち、レジン→カオリン鉱物($\bar{\eta} = 0.119$)→石英($\bar{\eta} = 0.125$)→斜長石($\bar{\eta} = 0.126 \sim 0.129$)→カリ長石($\bar{\eta} = 0.137$)→黒雲母・パーミキュライト($\bar{\eta} = 0.161 \sim 0.170$)の順番で高い輝度レベルを示しており、EPMAによる定量化学分析値および理想組成式から求めた各鉱物の後方散乱係数(η)が示す順番と調和的である。なお、レジンは試料作成時に含浸させたエポキシ樹脂であり、空隙・亀裂を埋めている。

4・2・1 画像の取得と処理 各試料につき25区画分(一区画当たり2.6 mm × 1.7 mmの大きさ)のBSE像をポラロイド写真に記録した後、画像解像度1,200画素 × 785画素 × 8ビットでパソコンへ取り込んだ。画像処理は画像情報を損なう可能性があるため(Wojnar, 1999)、画像取り込み時の輝度調節以外にBSE像の画像処理は行っていない。

Fig. 7 Analysis of BSE image.
A : BSE image showing typical mineral assemblage of NIS28.
Qz : quartz, Pl : plagioclase, Kf : K-feldspar, Bt : biotite, Sm : smectite, Re : resin.
B : Gray level histogram of A

4・2・2 風化花崗岩のBSE像輝度ヒストグラム Fig. 7Bは、Fig. 7Aに示されているBSE像の輝度ヒストグラムである。ヒストグラムには大きく2つのピークが見られるのみであり、各鉱物の明瞭な輝度分布の違いが認められない。すなわち、今回の検討試料の場合、一般的に行われているBSE像の輝度レベルのしきい値処理では鉱物の識別が困難であることを示している。そこで、ここでは以下に述べるピーク分解(池田ら, 1996)によりヒストグラム上で鉱物を識別し、モードを求めた。なお、鉱物識別を困難にしている原因として、石英・斜長石ピークの重なりや、各鉱物の組成変動から生じる輝度レベルのばらつき、異種鉱物境界領域においてデジタル化により生じる中間的な輝度ゾーンの存在(Launeau and Crude, 1994)などをあげることができる。

4・2・3 輝度ヒストグラムのピーク分解 BSE像のグレイレベル x のヒストグラムパターン $F(x)$ は、画像中に存在する鉱物の輝度ヒストグラムの足し合わせによって構成されることができると考えることができる。ここで鉱物 i のヒストグラムパターンを確率分布 $f_i(x)$ によって表現すると、 $F(x)$ は以下のように表現される。

$$F(x) = \sum_i w_i f_i(x) \quad (1)$$

ここで w_i は鉱物 i の画像中での画素数を示す。式(1)から、 $F(x)$ は既知であるので、各鉱物のピーク形状を示す確率分布 $f_i(x)$ が分かれば w_i は求まる。各鉱物の確率分布は画像中から鉱物 i 以外の部分を消去することにより見積もることができる。しかし、今回の検討試料には組成変化を示す鉱物や微細な二次鉱物を示す鉱物が存在するため、この作業を正確に行うことは困難である。そこで以下の手法によって各鉱物の確率分布を見積もった。

画像上に等間隔の格子(80画素間隔, 150格子点)を設ける。その格子点を中心とした 50×50 画素領域の中で、もっともグレイレベルのばらつきの小さい 10×10 画素領域を選定する。その小領域について、偏光顕微鏡像も参照にして鉱物同定を行い、BSE像から輝度分布データを採取する。各格子点について、同様の小

領域の選定、鉱物同定、データ採集を行い、各鉱物のグレイレベル頻度データを集積する。なお、同一鉱物であってもグレイレベルに変動が大きいものがある場合、式(2)における異なった輝度平均を有するサブグループとして集積される。

$$\mu^* - 2\sigma^* < \mu < \mu^* + 2\sigma^* \quad (2)$$

ここで μ^* と σ^* はサブグループの輝度レベル平均および標準偏差である。

最終的にえられた鉱物のサブグループについてそれぞれ正規分布によって近似し、また各サブグループにおける計数の集積回数を考慮し、足し合わせることによって、鉱物の確率密度関数を導いた。

$$g_i(x) = \sum_j \frac{C_{ij}}{T_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi} W_i \sigma_{ij}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_{ij})^2}{2W_i \sigma_{ij}^2} \right] \quad (3)$$

ここで、 C_{ij} は鉱物 i の j 番目の集積画素領域の集積回数(カウント数)、 T_i は鉱物 i についてカウントされた総カウント数、 μ_{ij} と σ_{ij} はおのおの鉱物 i の j 番目のサブグループのグレイレベル平均および標準偏差である。なお、 $W_i(1.0 \sim 1.9)$ は、 σ_{ij} が実際のものよりも過小評価されていると推定されるためにつけた重みである。そして、以下の式(4)において、

$$\varepsilon = (F(x) - \sum_i w_i g_i(x))^2 \quad (4)$$

ε を最小にする w_i 、 W_i を求めることによって各鉱物の画素数を求めた。

上述の解析を、画像面積の大半を占める石英、斜長石、カリ長石の3成分のピークに対して行った(Fig. 8)。それ以外の成分については、次の処理を行った。石英より輝度レベルの低い成分(レジジンおよびスメクタイト・カオリン鉱物)との境界を、石英の $\sum w_i g_i(x)$ の値が100になる輝度レベルに置き、それらを一括してレジジンとして表した。同様に、カリ長石より輝度レベルの高い成分(緑泥石、黒雲母・パーミキュライト)との境界を、カリ長石の $\sum w_i g_i(x)$ の値が100になる輝度レベルに置き、それらを一括して変質黒雲母として表した。また、カリウム雲母などの微量鉱物は類似の輝度レベルをもつ主成分に含めた。さらに、斜長石とカリ長石ピーク間の低輝度レベル($\sum w_i g_i(x) < 100$)領域を(Fig. 8)、異種鉱物境界領域においてデジタル化により生じる中間的な輝度ゾーンとみなし、Table 2において'inter'として区別している。今回の試料の場合、主にパーサイト内における微細な斜長石とカリ長石の境界領域がそれに相当すると考えられる。この影響を減らすためには、より高解像の画像を用いるか、適切な画像処理を行う必要があると考えられる。なお、既述のように、輝度分布曲線の閾

Fig. 8 Result of BSE image analysis shown in Fig. 7. See text in detail. Open circle : pixel value of gray level histogram. Solid line : synthesis of calculated curves.

Table 2 Results of modal analysis in percent.

BSEI : convenient analytical method using BSE image, PC : point count method, Biotite : biotite including vermiculite, Ka+Sm : smectite and kaolin mineral, Inter : boundary part which have intermediate gray-level values between plagioclase and K-feldspar. BSEI values are expressed with confidence intervals (95%) of student-t-distribution.

	NIS4		NIS28		NIS22	
	BSEI	PC	BSEI	PC	BSEI	PC
Quartz	35.98±4.54	38.4	37.28±3.72	34.5	35.43±6.47	34.0
Plagioclase	31.62±3.62	26.1	24.12±2.31	25.5	22.67±2.33	23.1
K-feldspar	30.11±2.29	32.4	29.41±3.75	33.6	32.84±6.12	30.0
Chlorite	1.34±0.06	2.0	-	-	-	-
Biotite	-	-	0.51±0.02	0.9	0.68±0.07	1.2
Others	-	0.3	-	0.7	-	0.7
Inter	0.47±0.03	-	3.80±0.28	-	0.51±0.01	-
Ka+Sm	0.48±0.01	0.0	4.88±0.52	1.2	7.87±0.77	4.8
Resin		0.8		4.1		6.3

値を $\Sigma w_i g_i(x) = 100$ に設定し、その値に相応する輝度レベルを鉱物の境界としている。今回の解析例の場合、各主要鉱物の輝度分布ピークの高さおよび面積は 10^4 を超える値であり (Fig.8), 閾値の設定が数百以下であれば解析結果に大きく影響しないとみなせる。しかし、高解像の画像を用い、精度の高い解析を行う場合、閾値の設定値が問題となることも考えられる。

上記の解析において、各鉱物に割り振りされた画素数の総和は解析画像の全画素数の 95 % 程度であり、約 5 % の画素情報が失われていることになる。処理後の画素数を 100 % に規格化し、25 画像分の平均値を試料のモード値とした。

4・3 モード分析の比較

BSE 像解析およびポイントカウントの 2 つの手法によって得られた試料のモードを Table 2 に示した。2 つの方法による石英、斜長石およびカリ長石のモード値はおおよそ一致していると見なし得る。また、風化変質による花崗岩の鉱物変化を評価する上で重要なレジンの値 (含カオリン・スメクタイト) についても、BSE 像解析による方法がやや低い値を与えるものの、風化の進行とともに増加する傾向が一致している。これより、主成分鉱物に関しては、BSE 像解析による方法と従来の偏光顕微鏡による分析法はほぼ同等のモードを与えるものと考えられる。なお、主成分モードの分析精度を向上させる上で、前者の方法では試料の構成物粒度に起因する各画像間の鉱物量比のバラツキが分析結果に与える影響を考慮する必要がある。また、後者の方法では構成物粒度に対応した最適な計数点密度を考慮する必要がある。

一方、花崗岩の副成分鉱物や風化変質により生成・変化する変質鉱物とくに粘土鉱物について、BSE 像による方法は、微細スケールでの鉱物識別も容易であり、偏光顕微鏡像を利用する従来法に比べて高精度のデータ取得が可能であり、より適用性があると考えられる。しかし、既に述べてきたように、BSE 像解析によるモード測定には解析画像の取得や画像の輝度ヒストグラムにおける鉱物識別など、解析精度にかかわる問題点が残されている。

2 つの分析の簡便性についてみると、BSE 像による方法は、SEM による研磨片の観察と画像の取り込み、そして画像の処理と解析によりなされるものであり、複数の手順を必要とするが比較的習熟度を要せずに簡単に分析を行うことができる。一方、岩石薄片を直接観察し計数する偏光顕微鏡による方法は、より少ない手順

で分析できるもののある程度の習熟を必要とするなど、その簡便性については一長一短がある。

いずれにせよ、風化花崗岩のモード分析を行う場合、まず、3. で述べたような変質鉱物とくに粘土鉱物に対するキャラクターゼーションを行うことが必要となる。すなわち、偏光顕微鏡や SEM さらには EPMA を用いて花崗岩の風化変質の程度に応じた十分な鉱物同定を行うことが重要である。このような鉱物の詳細なキャラクターゼーションと結びつけて風化花崗岩のモード分析を実施する場合、広〜微小領域においてモード値を得ることができる方法として BSE 像を利用するモード分析法に利点があると考えられる。

5. ま と め

花崗岩の風化変質による鉱物学的変化は、主成分鉱物とくに黒雲母と斜長石の変質と粘土鉱物の生成によって特徴づけられる。すなわち、それぞれ変質メカニズムが異なると推察される黒雲母→パーミキュライト→スメクタイト→カオリン鉱物および斜長石→スメクタイト→カオリン鉱物の 2 つの鉱物変化系列が認められた。それら主成分鉱物の鉱物学的変化は、風化環境下にある花崗岩の物理的、化学的性状を支配する大きな要因の一つであることを示している。

上述の風化花崗岩の鉱物学的変化を物理的・化学的特性と関連づける上で、さらに花崗岩風化によるモードの変化を定量的に知ることが重要である。BSE 像解析による風化花崗岩のモード分析を行い、偏光顕微鏡を用いた従来法と比較した。すなわち BSE 像輝度分布ヒストグラムを各鉱物ごとに見積もった確率密度関数により分解し、鉱物定量を行った。この方法によるモード測定は、主成分鉱物に対し従来法であるポイントカウント法と同等の結果を与えるものであり、風化花崗岩の鉱物組成解析に対し十分に適用性があることが示された。また、この BSE 像を利用する方法には、花崗岩の副成分鉱物や風化変質により生成・変化する変質鉱物とくに粘土鉱物に対してより高品質のデータ取得ができる利点があり、より高精度のモード分析が期待できる。

引 用 文 献

- Beavis, F. C. (1985) : Engineering Geology, Blackwell Scientific Publications, p. 52 - 91
Dilks, A. and Graham, S. C. (1985) : Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 55, p. 347 - 345
濱崎聡志・月村勝宏・藤本光一郎・池田隆司・小村健太郎 (1999) : 地質調査所月報, Vol. 50, p. 499 - 508
秦 明德 (1999) : 粘土科学, Vol. 38, p. 233 - 245
池田 進・佐伯和人・多野雄一 (1996) : 月刊地球, Vol. 18, p. 217 - 223
陣内和彦・向山 広 (1973) : 鉱山地質, Vol. 23, p. 411 - 423
Kinsley, D. H., Pye, K., Boggs, S. and Tovey, N. (1998) : Backscattered Scanning Electron Microscopy and Image Analysis of Sediments and Sedimentary Rocks, Cambridge University Press, p. 193
久城育夫・荒牧重雄・青木謙一郎 (1989) : 日本の火成岩, 岩波書店, p. 155 - 173
Launeau, P. and Crude, A. R. (1994) : The Canadian Mineralogist, Vol. 32, p. 919 - 933
Murakami, T., Ohnuki, T., Isobe, H. and Sato, T. (1997) : Am. Mineral. 82, p. 888 - 899
長沢敬之助・森嶋 光 (1990) : 粘土科学, Vol. 30, p. 101 - 108
白水晴雄 (1988) : 粘土鉱物学, 朝倉書店, p. 71 - 73
Sammartino, S., Partier, P., Sardini, P., Meunier, A. and Tevissen, E. (1999) : Phys. Chem. Earth (A), Vol. 24, p. 601 - 606
Suquet, H., Iiyama, J. T., Kodama, H. and Pezerat, H. (1977) : Clays and Clay Minerals, Vol. 25, p. 231 - 242
Wadsworth, W. B. and Baird, A. K. (1989) : The Canadian Mineralogist, Vol. 27, p. 323 - 341
Wojnar, L. (1999) : Image analysis applications in materials engineering, CRC Press, p. 7 - 54