

まさ土の構成鉱物の風化特徴と水分保持性の関係

On the Weathering of constituent minerals  
in Decomposed Granite Soil and The moisture characteristics

高橋 悟\* (Takahasi Satoru)

田中 弥寿男\*\* (Tanaka Yasuo)

キーワード：特殊土／まさ土／風化／鉱物／土中水／物理化学的性質／砂／シルト (IGC : D-1, D-2)

1. ま え が き

まさ土地帯の多くは花崗岩の風化残留土であり、その構成鉱物の特異な風化過程と水のかかわり合いによって地層の理工学性を著しく変化させ、災害に対する抵抗性を失わせるものと考えられる。著者らは前報<sup>1)</sup>においてまさ土の風化と水分特性の関係を、まさ土以外の土と対比させて検討し、まさ土の風化はその構成鉱物中の長石、雲母の風化変質とそれによって二次的に生成された粘土鉱物が水分保持性と密接な関係を持つことを明らかにした。このことからまさ土の風化と水分特性を従来の様にまさ土全体の風化から究明するより、構成鉱物自身の風化変質をとおして水分特性との関係を検討することが重要であると考えた。今回はまさ土の構成鉱物の風化変質と水分特性に与える影響を明らかにするため、風化が進めば土粒子の微細化が生じ、微細化による比表面積の増加をまさ土の風化進行の尺度と規定し、各風化段階のまさ土から、長石、雲母、粘土鉱物などを取出し、これらの鉱物の風化をX線回折、熱分析により検討し、一方では風化段階の水分特性を知るためにpF-水分量の試験を行ない、まさ土全体の風化と構成鉱物の風化特性の関係、構成鉱物の風化と水分特性の関係を究明したので報告する。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試土及び調整

供試土は島根県東部に分布する花崗閃緑岩から生成された風化度の異なるまさ土6種類である。これら供試土の採取地及び基本的性質を表-1に示す。基本的性質及び水分保持については2.0mmフルイ通過土を供試し、構成鉱物の風化の検討のための長石と黒雲母は2.0mmフルイ通過まさ土を水洗いし、0.84~0.42mm残留土から磁性、非磁性鉱物に分離後、ピンセットで取出し供試した。なお長石は斜長石とカリ長石の分離がむづかしい為、今回は第一段階として両長石を分離せず一括して長石として供試した。

2.2 実験方法

実験は基本的性質及び水分保持性については、比表面積、粒度、pF水分量試験を行ない、構成鉱物の風化変質はX線回折、示差熱分析(DTA)、熱重量分析(TG)試験などを行なった。その概要は次の通りである。

(1) 比表面積

比表面積の測定は、粉体表面におけるガス吸着を利用したBET一点法<sup>2)</sup>の原理に基づいて製作された直統式比表面積測定装置MONOSORB(米国製)を使用した。本装置の場合吸着ガスとして窒素ガス(295°K, 1気圧)

\* 東京農業大学農業工学科 助手, \*\* 東京農業大学農業工学科 教授

表-1 供試土の基本的性質

No.	採取地	土色	比表面積	比重
1	島根県八原町	WET 7、6 YR5 / 1 褐灰	0.64	2.674
2	島根県 赤来町	WET 10YR5 / 2 灰黄褐	3.36	2.667
3	島根県 赤来町	WET 10YR5 / 4 <sup>1)</sup> 灰黄褐	3.50	2.666
4	島根県 赤来町	WET 10YR4 / 4 褐	9.04	2.617
5	島根県 三刀屋町	WET 10YR5 / 3 <sup>1)</sup> 灰黄褐	9.35	2.663
6	島根県 木次町	WET 5YR5 / 6 明赤褐	13.27	2.638

を用いるため比表面積  $S$  ( $m^2/g$ ) は

$$S = 2.84 \times \frac{V}{W} \quad (m^2/g) \quad \dots\dots\dots (1) \quad V: \text{吸着ガス量} (m^3) \quad W: \text{試料質量} (g)$$

で求まる。測定は約 0.5 g の絶乾供試土壌が入っている 3 個の試料容器でおこない、それらの平均値をもって比表面積とした。なお 3 個の間の誤差は 5% 以下であった。

(2) 粒度

J I S A 1 2 0 4 に準じて測定した。

(3) pF 水分量

pF 2.4 以下は吸引法。pF 2.4 ~ 3.9 は遠心法により測定した。

(4) X線回折試験

島津製作所製作の X D - 3 A 型 X 線回折装置を使用し、Cu-K $\alpha$ 線によって、30KV, 20mA, 走査速度 2° (2 $\theta$ /分) の条件で定方位試料を用い行なった。

(5) 示差熱分析 (D T A) 試験

島津製作所製作 D T - 3 0 B 型熱分析装置を使用し、昇温速度 20°C/分で 1100°C まで昇温して分析した。

(6) 熱重量分析 (T G) 試験

示差熱分析と同型の熱分析装置を用い、昇温速度 20°C/分で 1000°C まで昇温して分析した。

3. 実験結果及び考察

3.1 風化段階における基本的性質及び水分特性

供試した風化度の異なるまさ土 6 種類の粒度三角座標を図-1 にまた粘土含有量と比表面積の関係を図-2 に示す。土性と比表面積の関係は、比表面積の増加にともない砂→砂質ローム→ロームに変化し、粘土含有量も比表面積の増加に比例して多くなる結果を得た。このことからまさ土は、風化の進行にともない構成粒子の細粒化、粘土化が進行することが伺える。

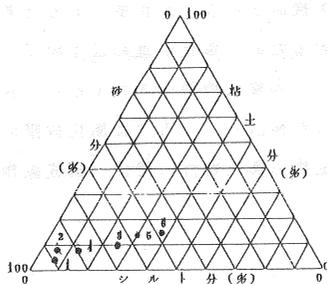


図-1 三角座標による土性分類

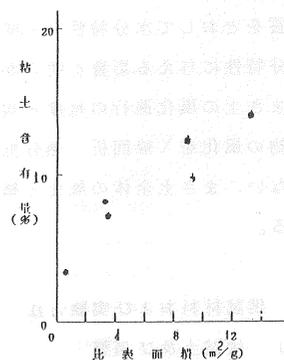


図-2 粘土含有率と比表面積の関係

風化段階とまさ土の水分特性の関係を図-3 に示すが、比表面積の増加にともない pF 水分曲線の傾きが緩となり、保水性が増大し、風化の進行にともない保水性が増大することがこれより知られた。さらに、風化の進行にともなう土中水の特性を検討するため、土壌学による土中水の一般的分類に準じて重力水 (pF 0 ~ 1.5 水分量)、毛管水 (pF 1.5 ~ 3.9 水分量)、吸着水 (pF 3.9 以上) に分け、比表面積との関係を求めた結果を図-4 に示す。

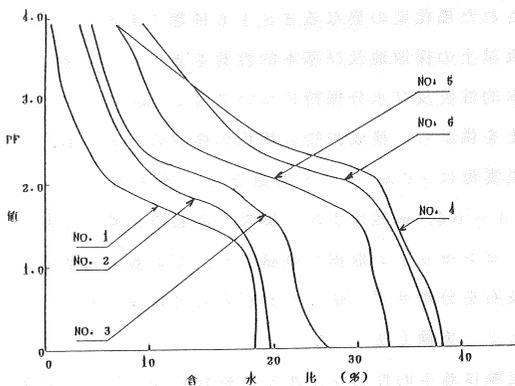


図-3 各風化まさ土の pF 水分曲線

重力水は比表面積が 0.64 ~ 13.27 ( $m^2/g$ ) と変化してもほぼ一定の値 3 ~ 5% を示した。元来重力水は、土の粗間隙に左右されるが供試土のどれも砂分が相当量あることから、この砂分が粗間隙形成に大きく作用し、風化度にあまり関係なくほぼ一定になったものであろう。また毛管水は比表面積の増加に比例して多くなるが、風化進行にともなって小間隙が発達することを意味するものと思われる。そこで、まさ土の毛管水と風化の関係をより詳しく知るため、毛管水を土壌学の方で易有効水分量

まさ土構成鉱物の風化特徴と水分保持性の関係

として示される重力水に近い毛管水 (pF 1.5~3.0) と難有効水分量として示される吸着水に近い毛管に分けて検討したのが、図-5 である。

重力水に近い毛管水 (pF 1.5~3.0) より吸着水に近い毛管水が比表面積と高い相関性を示した。このことは、まさ土を構成する鉱物のなかで比較的風化度合が大きい長石・黒雲母の土粒子内の空隙増加による水分特性と推察される。次に高い pF で的水分である吸着水をみてみよう。吸着水は毛管水と同様に比表面積の増加に比例して多くなり、風化の進行にともない吸着水が多くなる傾向を示した。これは先に示した図-2 の粘土含有量と比表面積の関係からも明らかのように、風化の進行にともない風化抵抗度の弱い鉱物である長石、黒雲母の二次生成物が多くなるためと理解できる。

以上の事からまさ土の風化と保水性の変化の特徴は、前回の報告と同様に、吸着水に近い毛管水及び吸着水の増加があげられる。これらはまさ土の主要鉱物中、抵抗度の弱い黒雲母、長石の風化にともなう土粒子内空隙の形成と黒雲母、長石類の風化変質による二次生成物である粘土鉱物が強く寄与しているものと考えられる。

### 3.2 まさ土構成鉱物の風化

まさ土の風化による保水性の変化にはまさ土構成鉱物のなかの風化抵抗度の弱い黒雲母、長石、これらの風化生成物である粘土鉱物が重要な働きをすることが明らかになったので、比表面積の増加がまさ土の風化の進行をあらわすとして示した各風化段階の No.1 ~ No.6 のまさ土中の各鉱物の風化変質を X 線分析、熱分析で追跡した。

#### (1) 黒雲母

各比表面積を持つまさ土から取り出した黒雲母の X 線回折、DTA 曲線、熱重量変化量を図-6 図-7、表-2 に示す。

X 線回折の結果を底面反射をもとに大八木<sup>4)</sup>ら

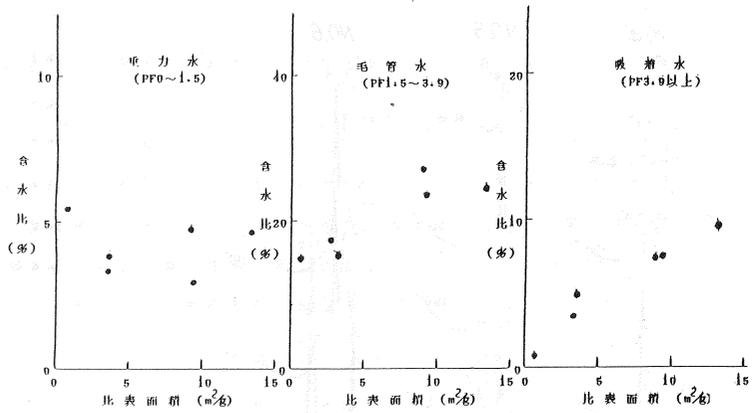


図-4 各土中水に保持される水分量と比表面積の関係

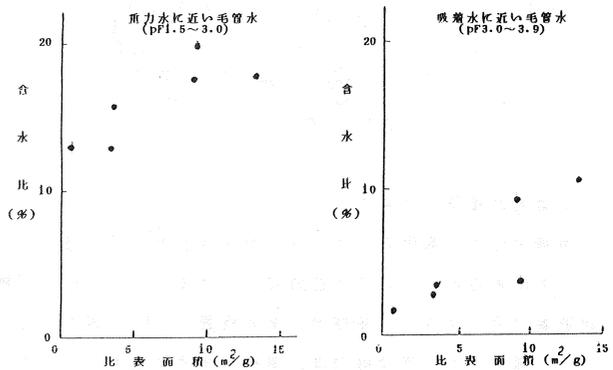


図-5 各毛管水量と比表面積の関係

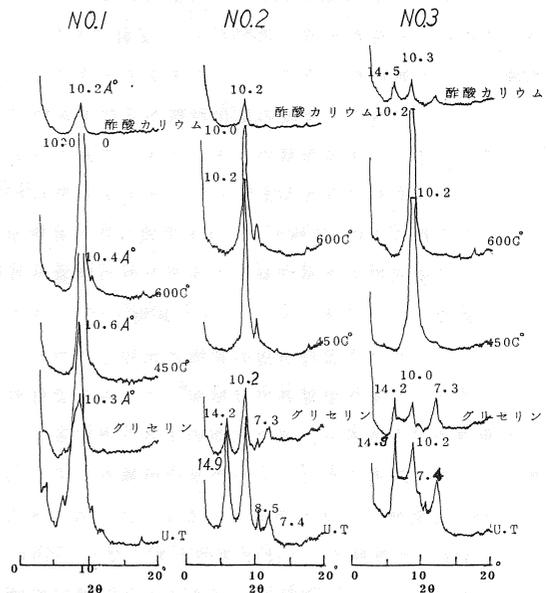


図-6 (a) 黒雲母の X 線回折図

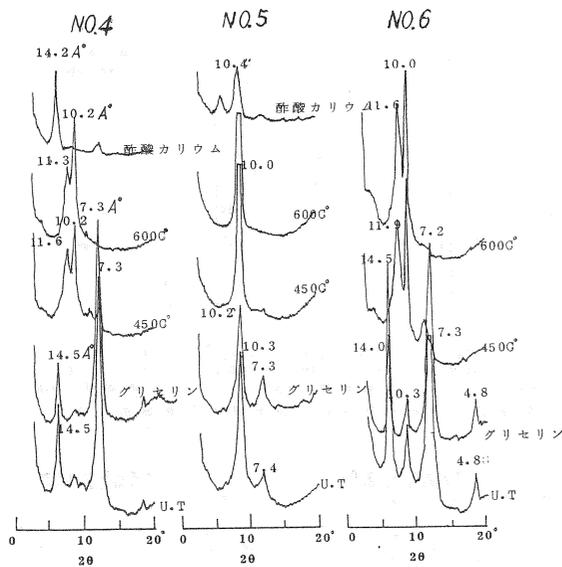


図-6(b) 黒雲母のX線回折図

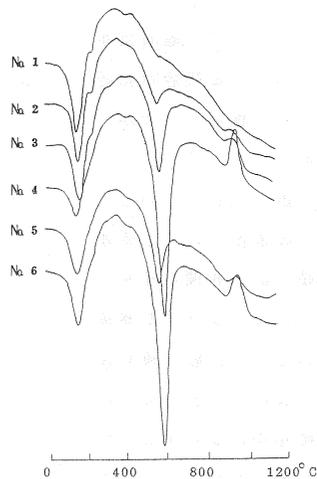


図-7 黒雲母のDTA曲線

表-2 黒雲母のTG減少割合

NO	TG減少割合(%)	NO	TG減少割合(%)
1	9.84	4	15.78
2	9.90	5	11.40
3	14.50	6	15.80

の研究を参考に検討してみる。

比表面積が小さく風化の小さいNa.1のまさ土中の黒雲母は、10.6Åの強いピークがあらわれている。このピークは450℃、600℃加熱処理で順次回折線が強くなること及びピークの位置(2θ)が高くなることから加水雲母と推定され、黒雲母自身の風化がすでに始まっていることが推定される。

風化の進行と共にNa.2、Na.3のまさ土の黒雲母は、10.2Åピークの他に7.4、8.5あるいは14.9Åで示されるピークがみられる。10.2Åは熱処理による変化がないことから黒雲母自身のピークと思われる。8.5Åは母岩が花崗閃緑岩であることを考えると角閃石110反射であろう。又、7.4Å、14.9Åのピークは熱処理、グリセリン処理及び酢酸カリウム処理からみて、パーミクライト及びパーミクライトの2次反射あるいはハロイサイトと考えられる。いずれにしてもこの程度の風化段階から粘土鉱物の生成が示唆される。

さらに風化の進んだ比表面積の大きいまさ土であるNa.4、Na.5、Na.6の黒雲母では、黒雲母自身のピークは減少あるいは消失し、それにひきかえてハロイサイトと思われる7Å鉱物のピークはシャープになり、さらにパーミクライトとみられる14Å鉱物のピークも出現し粘土鉱物が主体を占めてくるものと推察される。

このようにX線回折の底面反射からまさ土中の黒雲母の風化を追跡していくと、黒雲母鉱物は、黒雲母→加水黒雲母→7Å鉱物(ハロイサイト)、14Å鉱物(パーミクライト)のような風化変質過程を経て風化が進行するものとみられる。これは黒雲母が他の鉱物に比較してやわらかくへき開が発達し、水に弱いことが原因していると思われる、このような風化変質過程は加藤<sup>6)</sup>による黒雲母の風化過程とよく一致している。

DTA曲線を見てみると、風化初期のまさ土であるNa.1の黒雲母は500~600℃の吸熱ピーク、900~1000℃の発熱がほとんど認められない。やや風化の進んだNa.2、Na.3の黒雲母になると、500~600℃の吸熱ピーク、900~1000℃の発熱ピークが認められるようになる。さらに風化の進んだNa.4、Na.5、Na.6のまさ土の黒雲母になると500~600℃の吸熱ピークは非常に大きくなり、900~1000℃の発熱ピークも鮮明となる。500~600℃の吸熱ピーク、900~1000℃の発熱ピークをもとにX線回折結果を参考にして試料中の粘土鉱物の同定を行なうと、比表面積が3m<sup>2</sup>/g以上のまさ土の黒雲母からは明らかに7Å鉱物の生成が認められる。又、層格子のOH基の離脱により生じる500~600℃の吸熱ピークの大きさからして比表面積が9m<sup>2</sup>/g以上のまさ土の黒雲母になると相当量の粘土

鉱物を生成せしめていることが推察される。このことは1000℃までの加熱によるTGの減少割合を見てもあきらかである。

(2) 長石

各比表面積を持つまさ土中から取出した長石のX線回折, DTA曲線, TG変化量を図-8, 図-9, 表-3に示す。

各風化段階のX線回折を比較してみると, 長石自身のピーク(3.2Å最強, 4.0~4.2Å, 3.6~3.8Å, 6.3~6.5Å)が主体をしめ, わずかに $\lambda_3$ 以上の風化が進行しているまさ土で10.3Åの小さな反射ピークが認められる程度である。長石は黒雲母に比べて風化抵抗度が大きいこと<sup>7)</sup>, “相当風化が進んでもなお原鉱物の強い回折線が残る”<sup>6)</sup>とされていることから, カリ長石と斜長石の風化変質の強弱はあるがいつれにしろ長石自身のピークが主体をしめたものと思われる。しかしながら黒雲母ほど風化変質は顕著ではないが, 10.3Åの反射ピークの出現からみて風化変質は生じており, 粘土鉱物の生成が示される。

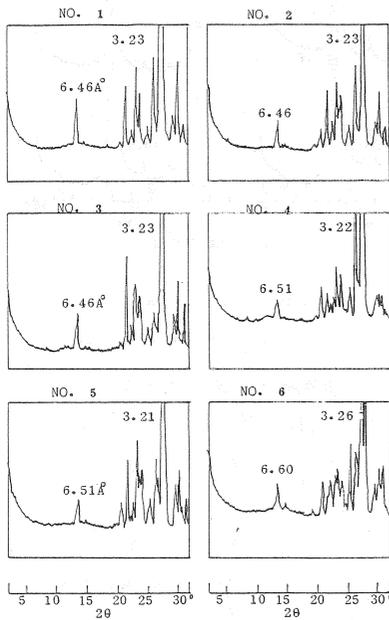


図-8 長石のX線回折図

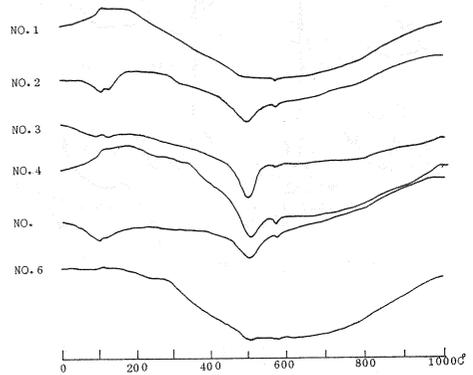


図-9 長石のDTA曲線

表-3 長石のTG減少割合

NO	TG減少割合(%)	NO	TG減少割合(%)
1	1.08	4	2.84
2	2.68	5	2.19
3	2.66	6	1.54

DTA曲線は風化の進行と共に500~600℃の吸熱ピークが大きくなる傾向を示している。500~600℃の吸熱ピークは層格子のOH基の離脱により生じるピークであり, このピークが大きくなる傾向を示すことは水酸基を多量に持つてくることである。しかしながら新鮮な長石自身は成分上OHは持つておらず, OHを持つことは長石自身が風化変質をおこし, OHを持つにいたったものと考えられる。このため長石自身の風化変質は生じており, 粘土鉱物の生成が示唆される。

TG減少割合は黒雲母の減少割合に比べて量的には $1/10$ と少ないが, 風化の進行にともなって多くなっている。黒雲母の値に比較して小さいのは, 長石の風化抵抗が黒雲母に比較して大きいこと, 風化変質がゆるやかであり長石自身がOHを持つていないことによるものと考えられ, X線回折, DTAの結果を裏付けするものである。

(3) 粘土鉱物

各比表面積を持つまさ土の粘土のX線回折, DTA曲線, TG減少割合を図-10, 図-11, 表-4に示す。

X線回折図を比較してみると, 各試料とも7.5~7.3Å, 10Å, 14Åのピークが認められる。これらのピークは, グリセリン処理, 450℃, 600℃の加熱処理, 酢酸カリウム処理の結果からみて, カオリンとメタハロイサイトを含む7Å鉱物, 黒雲母鉱物, パーミクライトと考えられ, まさ土特有の粘土鉱物を示している。また $\lambda_1$ では

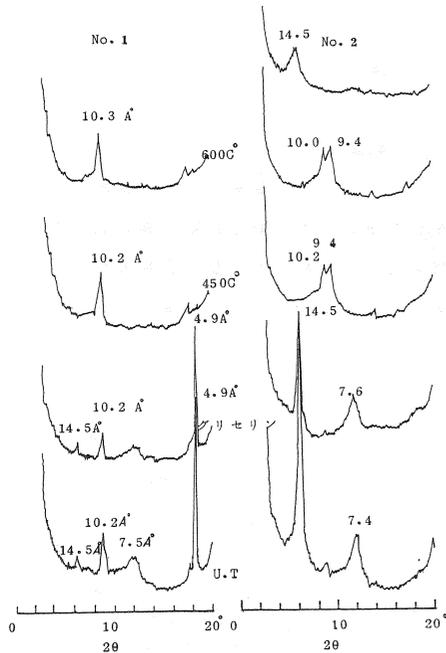


図-10 (a) 粘土のX線回折図

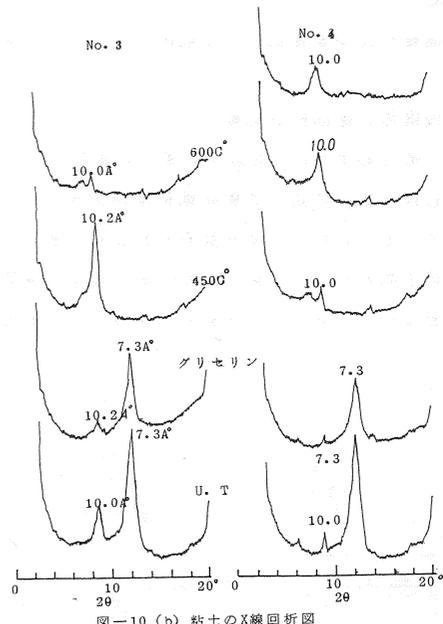


図-10 (b) 粘土のX線回折図

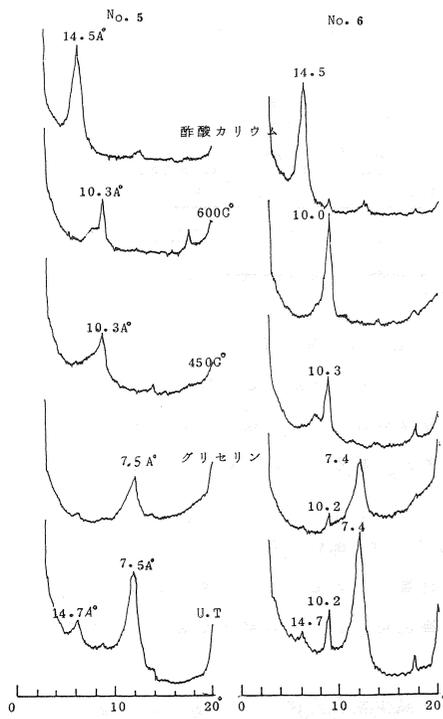


図-10 (c) 粘土のX線回折図

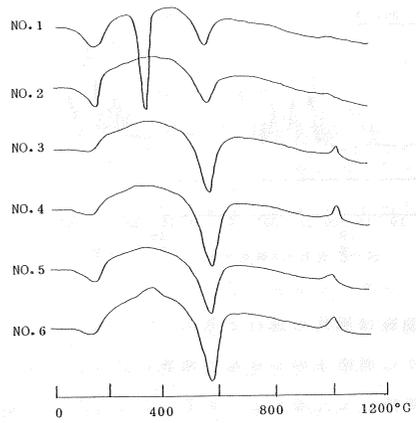


図-11 粘土のDTA曲線

表-4 粘土のTG減少割合

NO	TG減少割合(%)	NO	TG減少割合(%)
1	19.8	4	13.3
2	11.2	5	14.1
3	12.6	6	15.2

まさ土構成鉱物の風化特徴と水分保持性の関係

この他に  $4.8 \text{ \AA}$  にギブサイトとみられる鮮明なピークもある。

これら各粘土鉱物のうち、まさ土の主体粘土鉱物である  $7 \text{ \AA}$  鉱物の  $7 \text{ \AA}$  のピークに注目してみると、風化の進行と共に大きくなる傾向が認められ、風化の進行と共に粘土鉱物量の増加が示される。

D T A 曲線は風化の進行と共に  $500 \sim 600^\circ\text{C}$  の吸熱ピーク、 $900 \sim 100^\circ\text{C}$  の発熱ピークは大きくなり、 $7 \text{ \AA}$  鉱物特有の D T A 曲線を示すようになる。これは X 線回折で述べたように生成粘土鉱物量の増加によるものと思われる。

$\text{Na}1$  のまさ土の粘土ではこの他に  $345^\circ\text{C}$  の明確な吸熱ピークを持っている。これは長石の風化により生成したギブサイトの吸熱ピークと考えられる。

T G 減少割合は、風化度の最も小さい  $\text{Na}1$  の試料で最も大きい、他の試料間では風化が進んだもの程大きい値を示す。 $\text{Na}1$  の試料は D T A 曲線で認められる特異な粘土鉱物の含有のため他の試料と異なったが、T G 減少割合の結果も X 線回折、D T A の結果と同様に風化の進行と共に粘土鉱物の割合が増加することを表わしている。

まさ土の風化に主要な働きをすとみられた黒雲母、長石、粘土を検討してみると、三浦<sup>8)</sup>が“花崗岩類の風化において化学的、鉱物学的に積極的にその作用を高めるのは黒雲母で、機械的にそれを決定づけるのは斜長石である。”と述べているように、花崗岩のまさ土化の主体は黒雲母であり、それに付随して長石の風化が作用していると推察される。しかしながら、花崗岩類の岩石中に占める黒雲母と長石の割合はおよそ  $1:15$  で長石が圧倒的に多いこと、及び長石の中でも斜長石は風化変質が相当激しく、また長石の中でも量が多いことから花崗岩の風化の主体は黒雲母とはいえ、まさ土化現象にとって長石の影響も相当大きいと考えておくことが重要と思われる。

### 3.3 まさ土全体の風化と鉱物の風化の関係

まさ土中の鉱物の風化について検討してきたが、この各鉱物の風化がまさ土全体の風化にどのように影響しているかを知るため、各鉱物の風化を定量的に示し、まさ土全体の風化基準尺度である比表面積との関係を求めた。各鉱物の風化の定量方法は、古くから提案されている D T A 曲線を用いた定量法<sup>9)</sup>を応用し、図-12に示したような D T A 曲線の  $500 \sim 600^\circ\text{C}$  の吸熱ピーク面積比を求め、各鉱物の風化度とした。

図-13は長石、黒雲母、粘土についての  $500 \sim 600^\circ\text{C}$  吸熱ピーク面積比と比表面積の関係である。

長石については  $500 \sim 600^\circ\text{C}$  吸熱ピーク面積比と比表面積の間には相関があまりなく、黒雲母及び粘土は比表面積の増加に伴ない、 $500 \sim 600^\circ\text{C}$  の吸熱ピーク面積比も比例して大きくなり、まさ土全体の風化は黒雲母及び粘土の風化と一致する。このように黒雲母及び粘土の風化度とまさ土全体の風化度である比表面積の間に正の相関を示すのは、花崗岩のまさ土化の主体は黒雲母の風化変質であること、そして風化生成された粘土鉱物も黒雲母の風化変質に強く影響されているものと推察され、まさ土全体の風化は黒雲母の風化程度によると見て良いと考えられる。

一方長石については、黒雲母に付

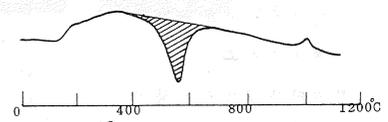


図-12 吸熱ピーク面積の求め方

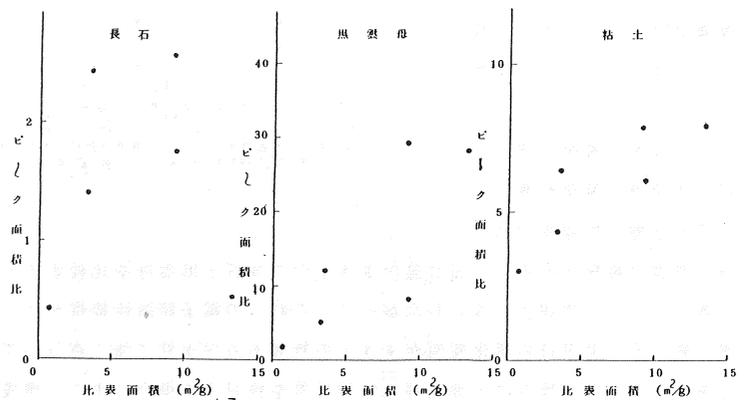


図-13 各鉱物のピーク面積比と比表面積の関係

随してゆっくりとした風化進行過程を得るために、比表面積との間に十分な関係が認められなかったものと思われる。

### 3.4 鉱物の風化と水分特性

まさ土の風化に伴う保水性の特徴は前述のように吸着水に近い毛管水及び吸着水の増加があげられ、これらの原因として、長石、黒雲母類の風化変質に伴う土粒子内空隙の形成、及び長石、黒雲母の風化変質による粘土鉱物の影響が考えられる。しかしながらどのような鉱物の風化変質が主体的に影響を与え、水分特性に作用しているかは明らかではない。そこで鉱物の風化と水分保持の関係を明らかにするために前述した500~600℃の吸熱ピーク面積比と、各風化まさ土の水分量の関係を検討した。

各鉱物の500~600℃の吸熱ピーク面積比と吸着水に近い毛管水量、吸着水量の関係を図-14、図-15に示す。

吸着水に近い毛管水、吸着水は長石以外の黒雲母及び粘土の500~600℃吸熱ピーク面積比と高い相関性が認められる。

吸着水に近い毛管水、吸着水と黒雲母及び粘土の風化と高い相関性を示すのは、これまで述べてきたように、長石は黒雲母に比較して風化抵抗が高く、その風化は遅速であり、一方の黒雲母は急速で多様な風化変質過程を得て粘土鉱物を形成し、まさ土全体の風化を支配することから当然のことと考えられる。

この黒雲母及び長石の保水性に及ぼす風化変質過程を裏付けるため、各風化まさ土の黒雲母及び長石の低倍率(40倍)、高倍率(4000倍)の電子顕微鏡が写真-1であり、写真観察結果を表-5のようにまとめた。

まさ土はその風化に伴ない長石、黒雲母も風化が進行し土粒子内空隙の形成及び粘土

鉱物の形成が観察されるが、同じ風化まさ土中の長石と黒雲母を比較すると、長石に対して黒雲母の方が風化変質の激しいことが確認される。したがって、これらの電子顕微鏡観察から、長石に比較して黒雲母の風化変質が急速で激しく、黒雲母の風化変質がまさ土の特徴ある保水性に強く寄与していると言える。

今後まさ土の保水性以外の他の理工学的性質を検討する場合、まさ土構成鉱物としての黒雲母の影響、及び今回はカリ長石と斜長石を分類せず長石として扱ってきたが、長石の中でも斜長石は風化変質が激しく、量的にも

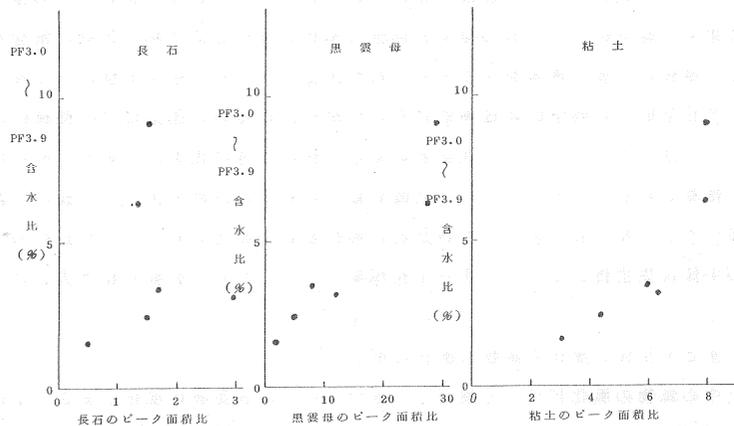


図-14 PF 3.0~3.9 含水比と各鉱物のピーク面積比の関係

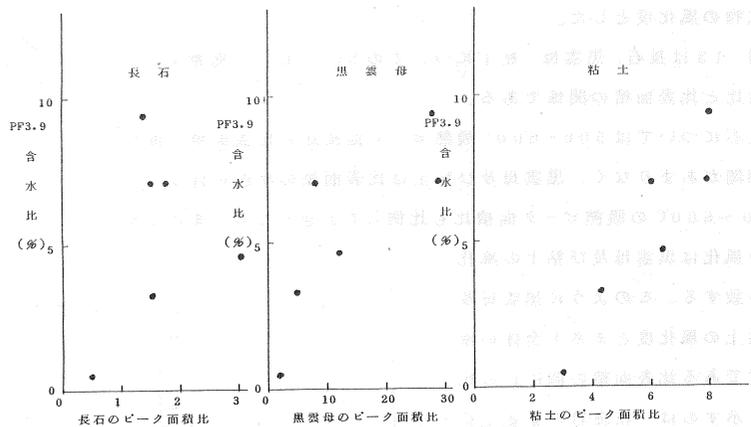


図-15 PF3.9 含水比と各鉱物のピーク面積比の関係

写真一 各鉱物の電子顕微鏡写真

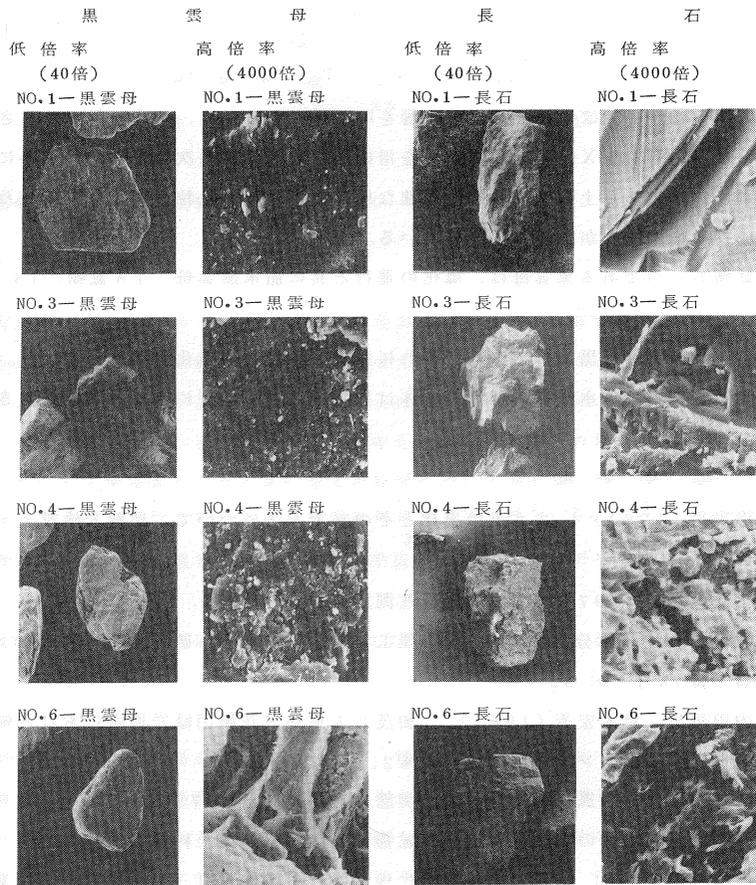


表-5 電子顕微鏡観察結果

風化度	試料No	比表面積 <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /g)	黒雲母		長石	
			低倍率 (40倍)	高倍率 (4000倍)	低倍率 (40倍)	高倍率 (4000倍)
小 ↓ 中 ↓ 大	1	0.64	粒子の角がかくばつて いる	へき開にそつ たクラックが みとめられる	粒子表面わり と滑らか	へき開が明確 きれいな面を 持つ
	3	3.50	粒子の角のか くばり減少 粒子内空ゲキ 形成	へき開にそつ たクラック増 大 粘土鉱物生成	表面ややザラ ザラ	へき開にそつ たクラック発 生
	4	9.04	角は丸みをあ びてくる 粒子内空ゲキ 多い	へき開にそつ たクラック多 数 粘土鉱物増加	表面ザラザラ	いろいろな方 角にクラック 発生 粘土内空ゲキ 多数 粘土鉱物生成
	6	13.27	粒子の角は丸 い 粒子内空ゲキ 多数	粘土化大	表面の変化大	粒子内空ゲキ 更に増大 粘土鉱物の増 加

相当量含むことから長石をカリ長石，斜長石に分け，斜長石の影響についても細かく検討していくことが必要と思われる。

#### 4. ま と め

まさ土の特徴ある水分特性に及ぼす構成鉱物の影響を明らかにするため，風化の異なるまさ土から構成鉱物を取り出し，それぞれの風化変質をX線回折，熱分析を用いて検討した結果次のことが明らかになった。

- (1) まさ土の保水性には，まさ土の構成鉱物の急速な風化に伴ない，土粒子内空隙の形成及び構成鉱物の風化変質による二次生成物の粘土鉱物が大きく関与している。
- (2) まさ土構成鉱物の一つである黒雲母は，風化の進行と共に加水黒雲母， $7\text{\AA}$  鉱物， $14\text{\AA}$  鉱物を生成し，変質が激しい。
- (3) 花崗岩のまさ土化の主体は黒雲母であり，それに付随して長石の風化が作用している。
- (4) まさ土の風化変質に伴なう水分保持特性の主体は黒雲母の風化変質によるところが大きい。

#### 参 考 文 献

- 1) 高橋悟，田中弥寿男(1983)：まさ土の風化とその判定方法について，地盤と建設，vol 1, No 1, p. 1~8
- 2) 土壤物理性測定委員会編(1976)：土壤物理性測定法，養賢堂，p. 71~83
- 3) 小谷佳人(1965)：pF-水分系における土の工学的性質に関する研究-Atterberg-及び締め試験について-鳥農学報18号 p. 95~
- 4) 大八木規夫，内田哲男，鈴木宏芳(1961)：加茂，大東地方花崗閃緑岩地帯における風化帯粘土鉱物(第1報)，国立防災科学技術センター研究報告，No 2, p. 21~44
- 5) 松尾新一郎監訳(1971)：風化-その理論と実態，ラテイス，p. 75~80
- 6) 加藤芳朗(1965)：花崗岩の風化-特に一次鉱物の風化過程-粘土科学の進歩，No 5, p. 125~135
- 7) 西田一彦，福田護(1973)：岩石の風化と風化残積土の工学的性質，土質工学会関西支部テキスト，p. 107~134
- 8) 三浦清(1966, 1967)：鳥根県加茂町付近の花崗岩類とその崩壊について(I)(II)，岩鉱 56, p. 256~283, p. 11~24
- 9) 日本粘土学会編(1967)：粘土ハンドブック，技報堂，p. 472~473