

## 島根県東部に産するマサ土の風化度判定に関する基礎的研究

The fundamental studies on the weathering degrees of decomposed granite soil obtained at the eastern district of shimane prefecture.

鈴鹿 和央 \* (KAZUO SUZUKA)

高橋 悟 \*\* (SATORU TAKAHASHI)

福田 恭司 \*\*\* (KYOJI FUKUDA)

風化花こう岩(マサ土)についての工学的性質、あるいはその風化過程の研究は、主として山陽型花こう岩を研究対象として、これまでに多く発表されている。しかし、山陰型花こう岩についての研究発表は意外と少ない。しかし、現地においては、ほぼ毎年のように山腹斜面の崩壊による災害を受けており、この風化に関するあるいは工学的性質に関する研究が急務のこととなっている。

当研究は、島根県東部地域に産するマサ土を実験材料として、その風化度の判定を、特に土の保水性に着目して行った実験について述べたものである。その結果、土の保水性(pF含水比(%))、強熱減量(%)は、内部の変質を示す雲母鉱物の変化や膨張量( $\mu\text{m}$ )、細粒化の代表として求めた74 $\mu\text{m}$ 以下含有率(%)や比表面積と密接な関係を示し、風化の指標として有意なるものであることが確認できた。また、この保水性は土の工学的性質である突固めによる最大乾燥密度と最適含水比ともよく相関し、マサ土の風化度と工学的性質を結び付ける指標としても有効ではないかとの結論を得た。

キーワード: 特殊土/マサ土/風化/鉱物/土中水/突固め D1

## 1. まえがき

花こう岩は、風化作用によってかなり岩体深部まで風化が進み、砂状土化していることが多い。この風化生産物である砂状土をマサ土と呼んでいる。土木建設において、このマサ土はコンクリート用材とか盛土用材として有効に利用されているが、反面、花こう岩のこの厚い風化帯は、常に崩落の危険にさらされる場所となっている。このため防災上は、一般にあまり歓迎されない地盤とされている。

島根県東部地域には花こう岩を主として構成される中国山脈が存在するために、広域にわたるマサ土地帯がある。これらの地域では降雨期には常に土石流、崖崩れなど人命に関わる危険に直面する現状にあり、防災工学上問題の多い地域となっている。従って、島根地域でも、このマサ土化した斜面の崩壊に関する研究は急務のこととなっている。

マサ土地帯の崩壊現象の解明には、マサ土が花こう岩を母岩とする以上、まずこの花こう岩の風化の状況を的確に判断することが必要となる。これまでの研究で、花こう岩の風化は物理的、化学的あるいは生物的作用によると指摘されている<sup>1)</sup>。物理的風化は浸食作用による上載荷重の除去、温度変化、更には水分の体積変化により膨張・収縮圧力の発生などにより岩石組織が緩むことで生ずる。化学的風化は水合、酸化・還元、加水分解、それに炭酸塩化作用など、主に岩石の構成鉱物の変質することで進行するものである。生物による風化は、植物根の成長、あるいは細菌・藻類の生活に伴う酸の発生などで岩石が物理的に、また化学的に砕かれるものである。この中で、細粒化を最も促進するのは物理的な風化とされている。

花こう岩が風化し、細粒化する過程についての研究には、地質鉱物学的方法と、工学的あるいは農業工学的方法がとられている。前者は野外における地質鉱物的観察、室内においては造岩鉱物の風化変質をX線回折とか示差熱分析で研究したり、風化変質に伴う化学成分の変化を研究する。さらには長石類とか雲母類のような風化され易い特定鉱物の含有状態の研究をするものである。後者は現地においては弾性波、あるいは電気探査による解析、標準貫入試験によるN値の解析、現場密度の測定等、室内においては、主に工学的性質と呼ばれる比重の変化、粒度の特徴、粒子界面に保持される水分特性(pF含水比、強熱減量など)、土の単位重量、土中あるいは粒

\* 松江高専 教授 \*\* 東京農大 助教授 \*\*\* 松江高専 技官

子内の間隙量の変化などを風化指標として研究するものである<sup>2-14)</sup>。

当島根地域での花こう岩の風化に関する研究は三浦<sup>15,16)</sup>、高橋・田中<sup>17)</sup>による報告があるが、未だその研究が完成された状況にはないと判断できる。当研究では、これまでになされてきている風化度判定についての研究を重視しつつ、現地での風化度判定を肉眼的細粒化、あるいは深度に求め、花こう岩の風化を工学的性質と関係が深い土の保水性で判定できないかについての研究を進めている。ここでは、保水性と風化度判定の可能性、および風化度判定と土の工学的性質の一つとしての突固め性状との関連について述べる。

## 2. 実験

当研究で行った実験は、次の各項である。

- (1) 比重試験：J I S A 1 2 0 2 に規定された方法で行ったが、土の処理は鉄製の乳鉢、乳棒を用いて、よくすりつぶすことで土粒子内の間隙の影響が無いようにして行った。
- (2) 粒度試験：J I S A 1 2 0 4 に定められた土質フルイで、全試料を用いたフルイ分け試験（水洗法）を行った。また、土を市販の粉碎機に10分間かけ、それについてもフルイ分析をして、破碎性を調べた。
- (3) 強熱減量試験：市販の電気炉を用いて、700度の温度で5時間強熱した。土は鉄製の乳鉢、乳棒ですりつぶして用いた。
- (4) pF含水比試験：市販の遠心分離機により、pF=3.3, 3.9の含水比を測定した。試料土としては生土を用いた。pF値の計算は分離試験後の厚さで行った。
- (5) 磁気分離試験：市販の磁気分離機を用いて、0.42から0.84mmの範囲に調整された土について行った。
- (6) X線回折試験：市販のX線回折装置により磁選物について、肉眼選別したものについて回折した。条件はCu-K $\alpha$  Ni-filter, 40Kv, 15mA, 2000cps full scale, 走査速度 2deg/min, スリット系 1-0.3-1であった。
- (7) 比表面積試験：ガス吸着を利用したB E T一点法に基づき行った。
- (8) 電子顕微鏡観察：市販の走査型電子顕微鏡を用いて所定の倍率で観察した。
- (9) 膨張試験：膨張試験は2方法で行った。1方法は、水浸による吸水膨張試験であり、他の方法は、熱膨張試験である。前者は圧密試験用の圧密箱を用いるものであり、炉乾燥した土を圧密箱に密度が等しくなるように詰め、これを水浸し、時間の経過とともに生ずる膨張量をダイヤルゲージで読み取ることで行った。後者は市販の熱膨張計を用いるものであり、微粉碎状態の炉乾燥土を、石英製の試料容器に0.33グラム正確に計って詰め、これを毎分10℃の昇温速度で1000℃まで加熱し、その過程での膨張量を計測して行った。環境設定は真空とした。なお、用いる土は2.0mm通過土とした。
- (10) 突固め試験：当実験に用いたモールドは一軸圧縮試験用の内径5cmのものであり、突固めに用いたランマーはJ I S A 1 2 1 0 に定められた2.5kg用のものである。突固め回数は表裏各25回とした。用いる土はあらかじめ室内で乾燥したものを2.0mmフルイでフルイ分け、その通過分とした。

## 3. 風化指標からみた露頭断面の風化状況

### 3.1. 風化指数相互の関係

同一露頭における風化の進行度合の判定に用いた実験土は、松江市東忌部町の採石場で採取したものである。採取にあたり、同一岩体でA, Bの2露頭を選び、A露頭については、肉眼で風化段階が違っていると判断できる3種類の土(A-1, A-2, A-3)を露頭の水平方向（道路沿い）に、またB露頭については、地表面から深さ方向に1m刻みにポイントを決めて5種類の土（下から順にB-1, B-2, B-3, B-4, B-5）を採取した。また、これらの全てを覆って存在する表土1種(C-1)も採取した。表1に採取状態、比重および色調を示す。いずれも母岩は角閃石-黒雲母花こう岩である。採取時に判断基準としたのは、肉眼的な粒度の細粒化判定と、採取の難易度である。

表1. 採土の状況

風化段階	状 況	色 別	比 重	備 考
A-1	ハンドツルハシで塊状に壊し塊状に採取する。	黒褐色	2.64	同一露頭
A-2	ハンドツルハシで塊状に壊しとるが簡単にれき状に砕ける。	赤褐色	2.72	
A-3	ハンドショベルで掘るが、土砂状に採取できる。	赤褐色	2.68	
B-1	ハンドスコップで削り取る。	赤褐色	2.66	機械的に1m刻みに採取した。
B-2	ハンドスコップで削り取る。B-1直上1m。	赤褐色	2.67	
B-3	ハンドスコップで土砂状に削り取れる。B-2直上1m。	優白赤褐色	2.67	
B-4	ハンドスコップで土砂状に削り取れる。B-3直上1m。	優白赤褐色	2.70	
B-5	ハンドスコップで土砂状に削り取れる。B-4直上1m。	優白赤褐色	2.67	
C-1	ハンドスコップですくい取る。表土。	茶褐色	2.70	表 土

A-1・2・3, B-3・4・5, C-1を突筒め試験に用いた。

A-1・2・3, B-3・4・5を水浸・熱膨張試験に用いた。

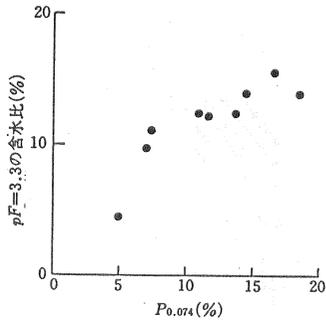


図1. pF含水比と74μm通過量の関係

岩石の風化が物理的、化学的な自然現象に基づく細粒化であるとの認識をすれば、風化物の粒度の測定は風化度判定の大切な基準の一つとなる。ただ、花こう岩風化物の粒度は、粒子単位での風化が進行しているために、実験時の粒子破碎がともない、その正確な測定が非常に困難である。この研究では、細粒化の目安として、粒度曲線上での比較の代わりとして、0.074mmフルイ通過量  $P_{0.074}$  (%) を風化指標として求め、比較することとした。さらに、風化により土が細粒化することで、必然的に比表面積  $A$  ( $m^2/g$ )、土の保水性 (pF含水比、強熱減量  $Lig$  (%)) も変化するはずであることから、これらも指標として求め、 $P_{0.074}$  と併せて採取土の風化度判定をすることとした。

図1はpF=3.3の含水比と  $P_{0.074}$  との関係を示したものである。この図によると  $P_{0.074}$  (%) が増加することでpF含水比も増加している。細粒化を風化の一つの目安とするならば、この結果は風化が進むことで、その土のpF含水比が増加することを意味するものと思われる。即ち、pF含水比も風化の指標として有効な手段となるといえるであろう。

図2は、強熱減量と  $P_{0.074}$  (%) との関係を示したものである。この図も両値間になりに高い相関性 (相関係数 0.94) があることを示している。即ち強熱減量の増減も風化の尺度として有効であるとの結論が得られた。

図3は直接保水量を用いるのではなく、保水量と深く関わっていることが考えられる比表面積と  $P_{0.074}$  の関係を求めたものである。この両者には図にも示されるように、非常に高い相関性 (相関係数 0.98) が認められる。即ち、風化による細粒化を示すのに非常に有効であることが明らかである。

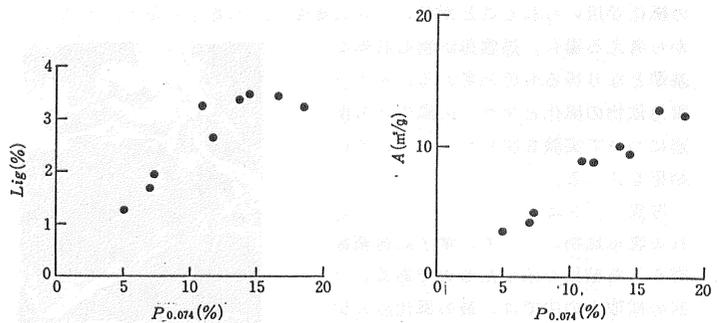


図2. 強熱減量と74μm通過量の関係 図3. 比表面積と74μm通過量の関係

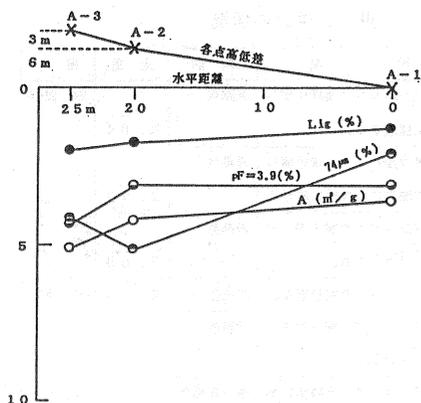


図4. A露頭風化指標の分布

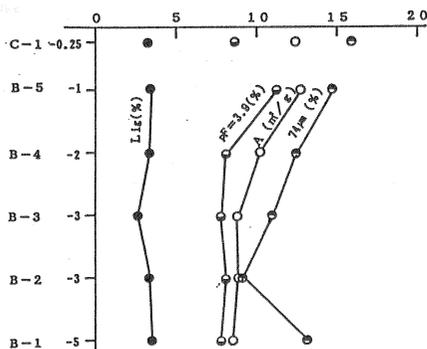


図5. B露頭風化指標の分布

### 3. 2. 風化指標による採取土の風化度判定

図4は、A露頭の全試料中の $P_{0.074}$ 、比表面積、強熱減量、それに $pF=3.9$ 含水比を採取地点別に示したものである。 $P_{0.074}$ のA-2での異常を除けば、他の指標は採取番号順にほぼ一様な減少を示していることから、A-1、A-2、A-3の順に風化が進んでいると判断できる。しかし、指標値の差がわずかであることから風化程度の差はあまり大きいものではないと思われる。特にA-1とA-2の間の差は微妙である。

図5は露頭B断面について、A露頭と同じ指標を深さ方向に示したものである。全試料中 $P_{0.074}$ の値で、B-1の異常を除けば、他の指標はほぼ深さ方向に減少しているの、地表面から深さ方向へ風化が進んでいると判断できる。しかし、各試料土間の風化程度の差はわずかと思われる。なお、A露頭とB露頭の比較では、B露頭の $P_{0.074}$ 、比表面積などの値がA露頭に比較して大きいことから、B露頭はA露頭より風化が進んでいると判断できる。なお、これら全てを覆って存在するC-1は、雨水による溶脱等の自然現象で、この風化系列には必ずしも入らないものと考えられる。

## 4. 雲母鉱物から見た風化状況

### 4. 1. 雲母鉱物の風化について

3においては、主に工学的と呼ばれる土の性質を用いて、風化度判定をしたが、マサ土の風化の判定には鉱物の風化が用いられることが多い。この場合、長石類を対象とすることが一般的である。しかし、風化のされ易さから考える場合、黒雲母鉱物も有効な基準となり得るものとする。そこで雲母鉱物の風化とマサ土の風化との関連について実験を試みた。以下、その結果を述べる。

写真1、2はA-1とB-1に含まれる雲母鉱物について、電子顕微鏡観察をした結果を示したものである。今回の採取土の中では、最も風化度が低いと判断できるA-1に含まれる雲母鉱物の電子顕微鏡写真を示したのが写



写真1. A-1の電子顕微鏡写真 写真2. B-1の電子顕微鏡写真



表2. 各土に含まれる磁気物含有量

土	磁気物量	土	磁気物量	土	磁気物量
A-1	4.6%	B-1	38.2%	B-4	37.0%
A-2	4.7%	B-2	38.0%	B-5	32.7%
A-3	4.9%	B-3	35.3%	C-1	31.0%

はあえて鉱物名称を使わずこれらの鉱物の代表名称として磁気物と呼ぶこととする。試料としたマサ土の磁気物の含有百分率は表2に示す通りであり、A-1からA-3はほぼ等しくなったが、B-1からB-5、C-1では風化段階に従って磁選物量の減少が認められた。即ち風化程度の低いマサ土ほど磁気物量が多い傾向にある。この結果は露頭上部にある試料ほど風化が進み粘土化するために、風化に弱い磁気物量が減少していることを示すものである。従って小露頭のマサ土の風化度判定に、磁気物量の比較は効果があると言えるであろう。

4. 2. 膨張特性

4. 1において、風化度判定の一手段として、風化の進行と黒雲母鉱物の変化を調べたが、黒雲母はその風化によって加水黒雲母からパーミキュライトへと変化することが明らかとなった。同様に長石類鉱物も風化により変化することが知られているので<sup>16)</sup>、マサ土はその風化の進行とともに、次第にその構成する鉱物組成に変化が生ずると考えてよい。このような鉱物組成の変化は熱膨張とか吸水膨張等の膨張特性に示されるものと考えられる。そこで、記述した実験法で得られた膨張量と風化指標との関係について調べてみた。

図10は、膨張特性の一つである熱膨張量の結果を示したものである。用いた土はA-1, A-2, A-3, B-3, B-4, B-5の6種類である。

得られた膨張量の最大値をとり、これと風化度判定の目安と考えているpF含水比、比表面積との関係を求めたのが図11, 12である。図から風化度が進むにつれて、即ちpF含水比、比表面積が増大するにつれて膨張量が減少していることが分かる。これは、風化によるマサ土構成鉱物の粘土鉱物化による結果と考えられるが、粘土鉱物種の同定、又はその含有量等についての確認は今後の検討課題である。

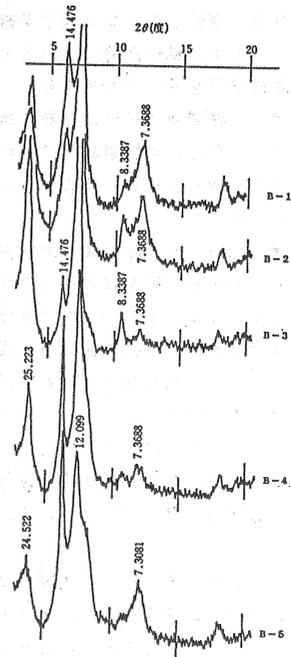


図9. 雲母鉱物のX線回析 (全粉末法)

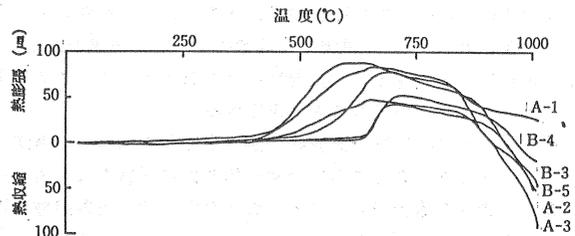


図10. マサ土の熱膨張試験結果

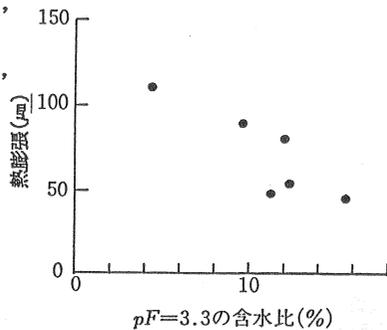


図11. 熱膨張量とpF含水比の関係

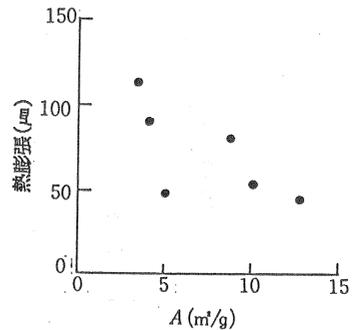


図12. 比表面積と熱膨張量の関係

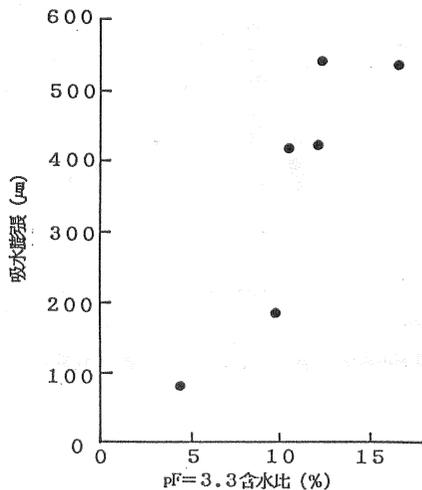


図13. pF含水比と吸水膨張量の関係

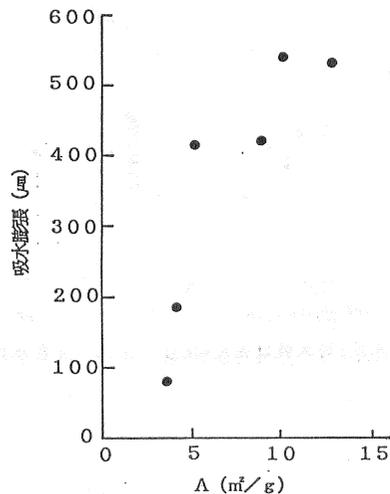


図14. 比表面積と吸水膨張量の関係

図13, 14は吸水による膨張量とpF含水比, 比表面積との関係を示したものである。熱膨張量の結果と逆に, 風化の進行, 即ちpF含水比, 比表面積の増大, 即ち風化の進行に伴う吸水膨張量の増加が認められる。

5. マサ土の風化度と突固め特性

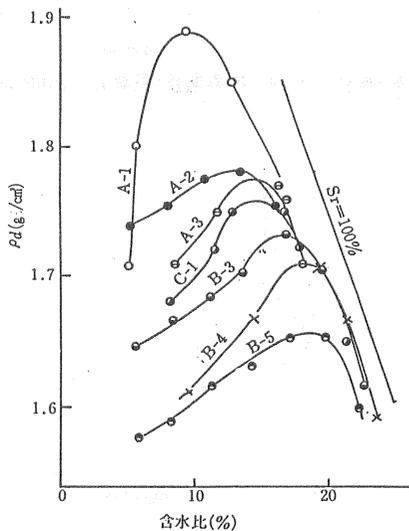


図15. 突固め曲線

図15はA露頭の全てと, B露頭から風化の差が明確な3試料(B-3, B-4, B-5), それにC-1の計7試料を用いて行った突固め試験による突固め曲線を示したものである。用いた土のフルイ分け法に基づく粒

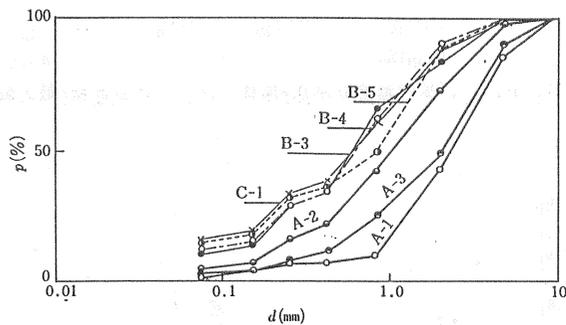


図16. 実験土の粒度分布

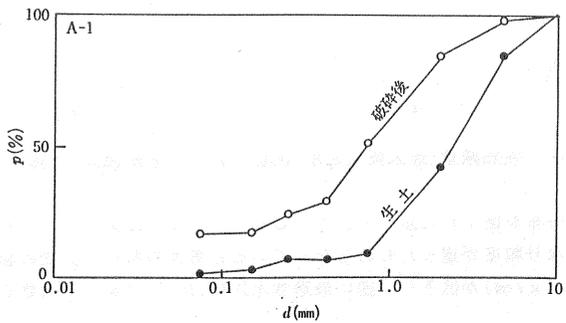


図17. マサ土粒子の破碎性

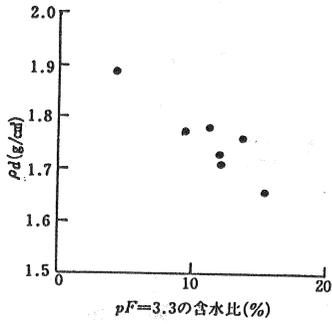


図18. pF含水比と最大乾燥密度の関係

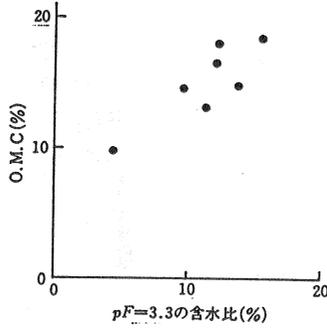


図19. pF含水比と最適含水比の関係

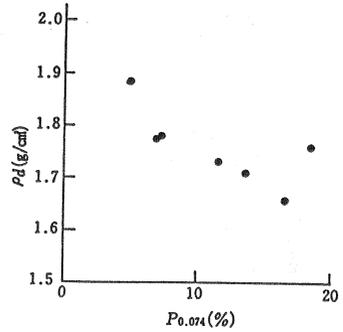


図20. P<sub>0.074</sub>(%)最大乾燥密度の関係

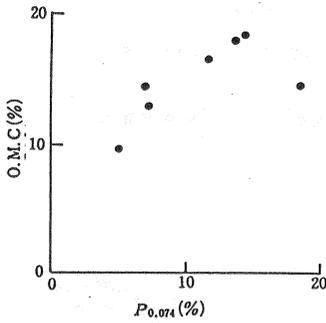


図21. P<sub>0.074</sub>(%)と最適含水比の関係

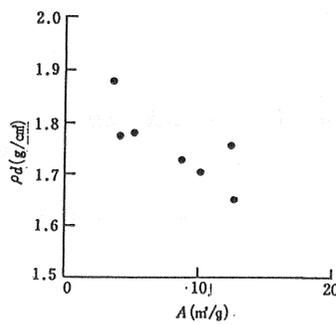


図22. 比表面積と最大乾燥密度の関係

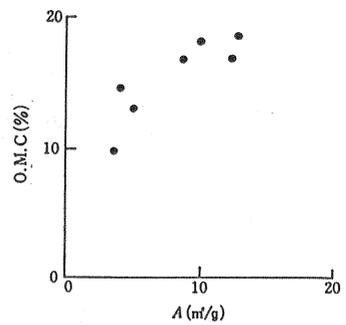


図23. 比表面積と最適含水比の関係

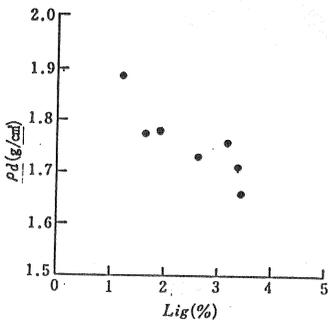


図24. 強熱減量と最大乾燥密度の関係

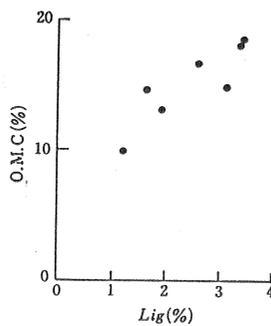


図25. 強熱減量と最適含水比の関係

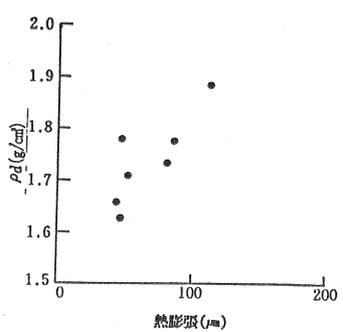


図26. 熱膨張量と最大乾燥密度の関係

度分布を図16に示しておく。しかし、マサ土は図17に示すように粒子の破碎性が高いため、突固め前後ではかなり粒度が違ったものとなっていると考えられる。突固め結果は、大体風化の進行にともなって最大乾燥密度  $\rho_d$  (g/cm<sup>3</sup>) が低下し、逆に最適含水比 O.M.C (%) が大きくなっていく傾向が示されている。この傾向は青柳

等(1974)<sup>14)</sup>の研究とほぼ一致したものとなっている。この結果は土の細粒化に伴い比表面積が増加し、そのために、土粒子に付着する総水量が増加すること、およびこれらの水分が突固めによって自由水化し、間隙水圧を発生させることによるものと考えられる。

実験で得られた最大乾燥密度、最適含水比と風化度との関係を明確化するためにpF含水比、 $P_{0.074}$ 、比

表面積それに強熱減量との関係を示したのが図18から図25である。それぞれかなり良い相関を示し、マサ土の風化の進行と締固め特性とは無関係では無いことが明らかとなった。図26、図27は今回風化度の指標の一つとして取上げた熱膨張量と突固め特性との間にある関係を示したものである。A-3の値にバラツキが認められるが比較的明確な相関性を示していると言える。即ち、熱膨張量の増加で最大乾燥密度は増加し、逆に最適含水比は低下する。この結果は、熱膨張量が今回取り上げた風化指標としての土の保水性との関わりが深いことによるものであることは明白のことであろう。

図28、29は膨張量を水浸法で求め、この値と突固め試験の最大乾燥密度、最適含水比の関係を求めたものである。この結果も熱膨張に等しく、吸水膨張量の増加で最大乾燥密度は減少し、最適含水比は増加している。

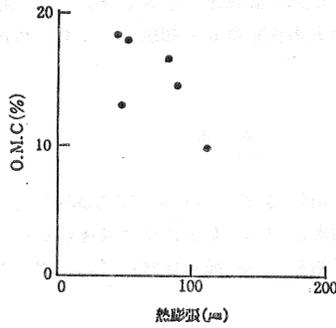


図27.熱膨張量と最適含水比の関係

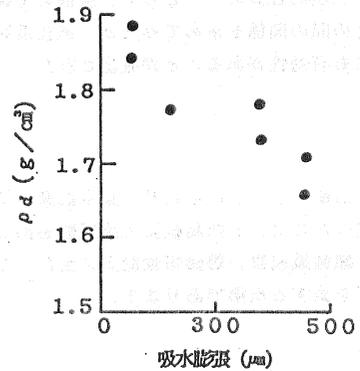


図28.吸水膨張量と最大乾燥密度の関係

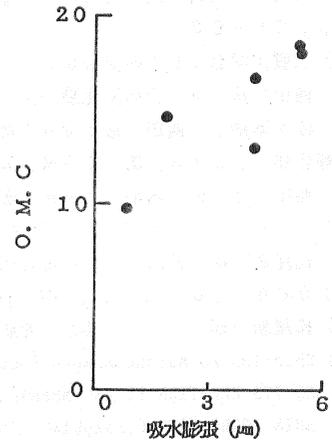


図29.吸水膨張量と最適含水比の関係

## 6. まとめ

以上述べてきたように、マサ土の風化をその細粒化現象としてとらえ、同一岩体の2露頭から肉眼的判定法で8試料と表土1試料の計9試料を採取した。この試料について、まず $P_{0.074}$  (%), 比表面積 ( $m^2/g$ ), pF含水比 (%) それに強熱減量 (%) を求めた。

風化が進行することで、 $P_{0.074}$  (%) は増大し、それにもなって比表面積が増大し、さらに表面に付着する水分量、即ちpF含水比も増大すると考えられる。このような観点から採取土の風化度判定をした結果、ほぼ水平方向に露頭中心部から地表面に向かって採取したA試料では、露頭中心から外に向かうことで、次第に風化度が高くなる傾向が得られた。また、露頭の垂直断面を1m刻みに採取したB露頭では、採取土B-1を除いて、大体上部ほど下部に比較して風化が進行していることが認められた。これらの結果を土の内部状態としてとらえるために、黒雲母鉱物を、電子顕微鏡、X線回折をすることで調べてみたが、風化の進行と共に形態的には劈開面の拡大の進行、細粒化の進行、質的には黒雲母、加水黒雲母さらにはパーミキュライトへの変化が認められ、保水性等の風化指標による風化度判定に信頼性のあることが確認された。視察および回折結果を数値化するのにはかなりの技術を必要とすることであるので、鉱物の変化が膨張量に示されるものと考え、熱膨張と吸水膨張を求め、これらとpF含水比、比表面積等との関係を調べてみた。その結果は、かなりよい相関性を示すものであり、今回風化指標として扱ったpF含水比、比表面積等は形態的にも質的にもマサ土の風化度を示すのに適切なものではないかと考える。

工学的性質の一つとして、突固めで得られる最大乾燥密度、最適含水比と風化指標としての保水性、熱膨張量との間の関係を求めてみたが、風化度判定と突固め性状は良く相関し、これらの風化度指標は工学的性質の判断にも有効性があることが確認された。

## 7. 謝 辞

当研究を行うに当たり、東京農業大学 白井 清恒 教授には現地での試料採取法、実験手法についてのご指導を賜ったこと、また島根県工業試験場浜田技術指導所 永島 晴夫氏にはX線回折のご指導を賜ったこと、さらに電子顕微鏡観察、熱膨張量測定に当たっては松江高专 山本 誠司技官にご協力頂いた。ここに合わせ記し、深謝の意を表する次第であります。

## 8. 参考文献

- 1) C.D.Ollier: 風化—その理論と実態(松尾新一郎訳) —, ラテイス, 1971, pp6-90.
- 2) I.P.: ガーソフ, M.A.: ガーソフ, スカフ: 土壌地理学の基礎(上)(菅野一郎, 原田竹治他訳), 築地書館, 1965, pp55-63.
- 3) 土質工学会マサ土研究委員会: マサ土の工学的性質とその取扱指針, 土質工学会, 1970, pp1-32.
- 4) 西田一彦: マサ土の風化度判定, 第18回土質工学シンポジウム発表論文集, 1973, pp13-20.
- 5) 佐々木清一, 西田一彦: マサ土のような圧縮性を有する土の不飽和浸透特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 1983, 第340号, pp155-164.
- 6) 西田一彦, 佐々木清一: 水蒸気吸着によるマサ土粒子の表面特性の検討, 土質工学会論文報告集, 1975, vol 15, No2, pp79-87.
- 7) 松尾新一郎, 西田一彦: 花崗岩の真砂化と物理的・工学的諸性質について, 京大工業教員養成所研究報告, 1966, vol 3, pp63-68.
- 8) 松尾新一郎: マサ土の特性と問題点, 土と基礎, 1975, 23-2, pp1-8.
- 9) Shin-ichiro Matsuo, Mamoru Fukuta and Kazuhiko Nishida: CONSISTENCY OF DECOMPOSED GRANITE SOILS AND ITS RELATION TO ENGINEERING PROPERTIES, SOILS AND FOUNDATIONS, 1970, vol X, No4, pp1-10.
- 10) SHIN-ICHIRO MATSUO, KAZUHIKO NISHIDA: THE DECOMPOSED GRANITE SOILS AND THEIR INFLUENCE ON PERMEABILITY, SOILS AND FOUNDATIONS, 1970, vol X, No1, pp95-105.
- 11) 青山千彰, 遠山茂行, 西田一彦: 間隙分布から見た不カク乱マサ土の土構造, 第12回土質工学研究発表会, 1977, pp149-152.
- 12) 青山千彰, 遠山茂行, 荒木茂幸, 西田一彦: 乱さないマサ土の透水特性, 第13回土質工学研究発表会, 1978, pp157-160.
- 13) 土壌物理研究会: 土の物理学, 森北出版, 1979, pp338-358.
- 14) 青柳省吾, 石井秀明, 横瀬広司: 花崗岩風化残積土の基本的性質と二次的性質について, 香川大学農学部学術報告, 1974, vol 26, No1, pp25-35.
- 15) 例えば三浦清: 豪雨によって発生する花崗岩山地の崩壊現象とその特質, 応用地質, 1966, vol 7, No3, pp145-157.
- 16) 例えば三浦清, 秦明德: 風化花崗岩の節理型崩壊と節理粘土, 応用地質, 1970, vol 11, No2, pp40-72.
- 17) 例えば高橋悟, 田中弥寿男: マサ土の風化とその判定方法, 地盤と建設, 1983, vol 1, No1, 1-8.