

洗砂用風化花崗岩の 評価・探査に関する予察研究

—島根県及び広島県下の粗粒黒雲母花崗岩を例に—

村上浩康^{※1)} 高畠裕之^{※2)} 三好誠^{※3)} 町田晶一^{※4)}
安永健太郎^{※5)} 有田正史^{※6)} 須藤定久^{※7)}

1. はじめに

西日本では陸域の砂資源が乏しいため、細骨材資源として瀬戸内海や九州周辺海域の海砂へ大きく依存してきた¹⁾。特に瀬戸内海沿岸地域から大阪周辺地区では、瀬戸内海産の海砂への依存度が極めて高かった。一方、海砂資源にも乏しい山陰では、砂状となった風化花崗岩が採掘・洗浄され、砂の代替資源として利用してきた。瀬戸内海の海砂の採取禁止に伴い、山陽でも広島県を中心として風化花崗岩が砂の代替資源として多量に使用されるようになった^{2) 3)}。

しかし、近畿、中国、四国、九州を含む西日本地域では平成21年度の骨材用砂需要量の約17%が不足するとの試算もある⁴⁾。一方、海砂の代替供給源の一つである海外からの輸入は、平成10年度の157万4千tから平成15年度の390万5千tへ約2.5倍に拡大しているものの⁵⁾、その約90%が中国産である。そして、中国は2007年3月以降、海外への砂輸出を全面的に停止した。

花崗岩の分布が極めて広い中国地方では、細骨材となる砂の代替資源として風化花崗岩の長期的使用が想定される⁶⁾。永続的な使用に向けて、今後新たな風化花崗岩採取地の選定のための探査技術やこれを支える砂資源の安価でかつ簡便な評価技術の開発が重要である^{7) 8) 9)}。

風化花崗岩を採掘・(必要により破碎・円磨)・洗浄して製造される砂を、ここでは「洗砂」と呼んで、検討を進める。洗砂の製品や試作品についての評価には、砂や碎砂についての試験法、粒度試験 (JIS A 1102) 及び密

度・吸水率試験 (JIS A 1109) が適用される。しかし、風化花崗岩における探査の初期段階での評価法については、風化分帶に基づく分類などがあるが¹⁰⁾、十分な検討がなされていない。今回、評価・探査の初期段階における地質学的評価法について議論し、予察的な研究を試みた。

2. 花崗岩と風化作用の一般的性質

(1) 西南日本内帯花崗岩の分布と分帶

本州中部を横断する糸魚川—静岡構造線以西、本州中部から四国・九州へと延びる中央構造線以北の地域は、地質学的に西南日本内帯と呼ばれる。西南日本内帯に属する中国地方には花崗岩が広く分布しており、例えば、中国地方 (5県) における花崗岩分布域は陸地面積のおよそ30%を占めている (図1)。

これらの花崗岩は、岩石学的には瀬戸内地方に多く分布する山陽帯チタン鉄鉱系花崗岩類と山陰帯磁鉄鉱系花崗岩類に区分される¹¹⁾。両者の差は、岩石全体の鉱物体積比で2~3%以下しか含まれない不透明鉱物の性質の差異によるものであり、花崗岩の風化プロセスに若干の差異をもたらすかもしれないが、洗砂資源としての風化花崗岩の品質に大きな差異をもたらす可能性は少ないと考えられる。

(2) 風化作用の一般的性質と風化花崗岩

岩石が風雨にさらされて、改変・分解されることを風化という。風化には岩石が加水分解され、長石や雲母鉱物が粘土鉱物などに変化する化学的な側面 (化学的風

※1) 個人会員 産業技術総合研究所 地図資源環境研究部門

※2) 産業技術総合研究所 地図資源環境研究部門

※3) 日鉄鉱コンサルタント (株)

※4) 賛助会員 日鉄鉱業 (株)

※5) 元日鉄鉱コンサルタント (株)

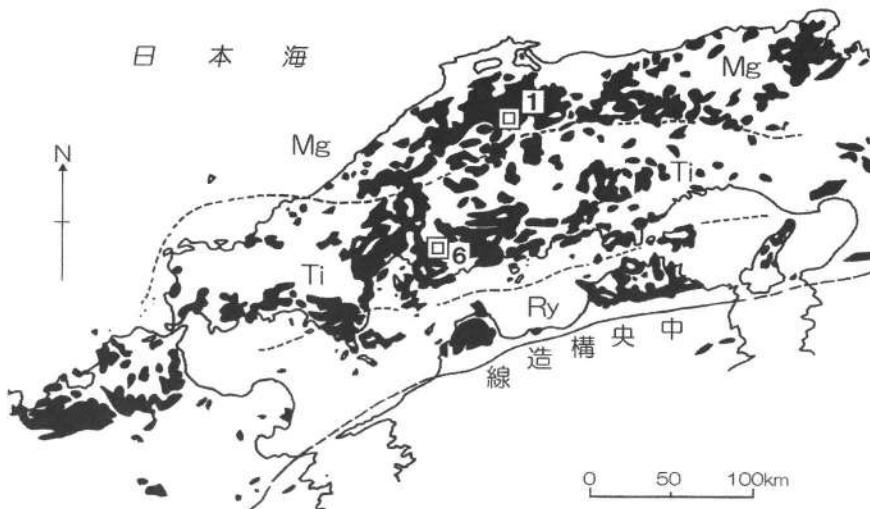


図1 中国地方の花崗岩分布図と調査位置 (Ishihara and Sasaki (1973)²⁰⁾を改編)

1 及び 6 は試料採取位置、
 Mg = 磁鉄鉱系花崗岩、Ti = チタン鉄鉱系花崗岩、Ry = 領家帶花崗岩。

化) と構成粒子の結合のゆるみにより、岩石が割れたり、ほぐされたりする物理的な側面(物理的風化)とがある。

一般に花崗岩の表層部は、風化され砂状を呈している。このような風化花崗岩は「真砂」あるいは「真砂土」と呼ばれ、古くから様々に利用されてきた。花崗岩表層部の真砂の厚さは、場所により様々ではあるが、花崗岩体や地域により真砂の厚いところ、薄い場所が知られ、土地質図などにその概要が表示されていることもある。

風化花崗岩を洗砂資源としてみた場合、風化花崗岩は表層部にのみ発達するので一般に開発面積は広くならざるを得ない。また、場所により風化程度や風化部の厚さに大きな差があることから、開発場所の選択には大きなリスクが伴う特徴もある。風化花崗岩を洗わずに使用する試み¹²⁾もあるが、一般に洗浄して使用するので、化学的風化によって形成された粘土鉱物などのために、多量の廃泥が発生するのも風化花崗岩の特徴である。

現在の風化花崗岩の採取場は、埋めたて用の山砂採取場を転用し、現場の経験と試行錯誤を基に、採掘・破碎・洗浄による供給態勢ができあがってきた。今後、次世代の採掘場の開発にあたっては、化学的風化が弱く廃泥発生量が少なく、かつ構成粒子の結合がゆるく採掘・破碎コストの低い物理的風化が深部まで進行した場所をつきとめ、開発を行うことが重要となる。

また、高規格道路の建設などの大型土木工事の際に、風化花崗岩の開削に伴って発生する多量の真砂の品質を迅速・的確に判断し、有効利用することも重要となる。

3. 評価・試験法についての考察

風化花崗岩の有効利用のため、野外での露頭観察や試料採取とも連携しうる迅速・簡便な評価・試験法について考える。

岩石の風化による脆弱化の程度は土木工事を行う上で重要な関心事である。土木現場では、定性的ではあるが有用な指標として、岩石を最も新鮮なA級から土砂状であるDL級までにランク分けする岩級区分が広く使用されている。しかしながら、花崗岩の場合、風化して砂状を呈する部分(真砂)が厚く発達し、この中では風化程度が小さいこと、風化部から新鮮部へ急変する場合もあり、岩級区分はあまり実用的とは言えない。

(1) 化学的風化の評価

化学的風化によって生成されている粘土鉱物量など、骨材には適さない成分の定量ないし半定量がまず必要であろう。粘土鉱物などの同定・半定量に地質・鉱物学で使用される試験法には、X線回折試験や熱分析試験(TG-DTA)、蛍光X線による化学分析試験などがある。

X線回折試験は、試験に要する時間は1試料あたり数

分間と簡便で定性には有効である。しかし、粘土鉱物の結晶性により検出精度が変化するため、定量にはあまり有効とは言えない。蛍光X線装置による化学分析試験も、花崗岩は化学的に単調であり試料ごとの差がでにくく、粘土鉱物に起因する水含有量が分析できない難点がある。一方、熱分析試験(TG-DTA)は、試験に要する時間は1試料あたり2時間程度を要するが、加水分解によって付加された水含有量の測定やその水が結晶構造どの位置にあるのかなどの判定が可能であり、粘土鉱物の定量には有効な方法である。

以下のような各試験の特性から、X線回折試験による風化鉱物種の同定と熱分析試験(TG-DTA)による半定量が最も効率的な試験方法と考えられる。

(2) 物理的風化の評価

花崗岩が風化によって、構成粒子の結合がゆるみ、加水分解が進行していく過程を観察するには、薄片が有用である¹³⁾。しかし、洗砂原料となる風化の進んだ砂状の風化花崗岩(真砂)については、試料の採取や薄片の作成が困難であるという難点があり、その利用は難しい。

花崗岩の構成粒子の結合のゆるみの程度は、風化花崗岩のほぐれ易さであり、ほぐして篩い分けすれば、結合のゆるみの程度を半定量的に知ることができる。ほぐれ易さとともに、骨材原料としては、ほぐされた粒子の形も重要である。砂粒子の簡単な観察はすでに報告したように、スキヤナーを使った容易な方法があり¹⁴⁾、この場合にも有用な方法であろう。更に、試料の粗碎・篩分を繰り返して実施することにより、脆い粒子が崩壊し、より細粒で安定した粒子となっていく過程を追跡する方法¹⁵⁾も有用であろう。

以上の考察をふまえ、実際の現場での観察と試料採取・分析を試みた一例を示す。

4. 現場での予察研究

今回、観察・試料採取を行ったのは、山陰帯磁鉄鉱系花崗岩の分布する島根県仁多郡奥出雲町の採石場(観察地点番号1)、山陽帯チタン鉄鉱系花崗岩類の分布する広島県東広島市の中国自動車道志和インターチェンジ付近の国道2号線バイパス建設現場の断面である(観察地点番号2、図1)。前者は採石場内、後者は花崗岩からなる山裾を切り開いてバイパスを通す工事が行われていた現

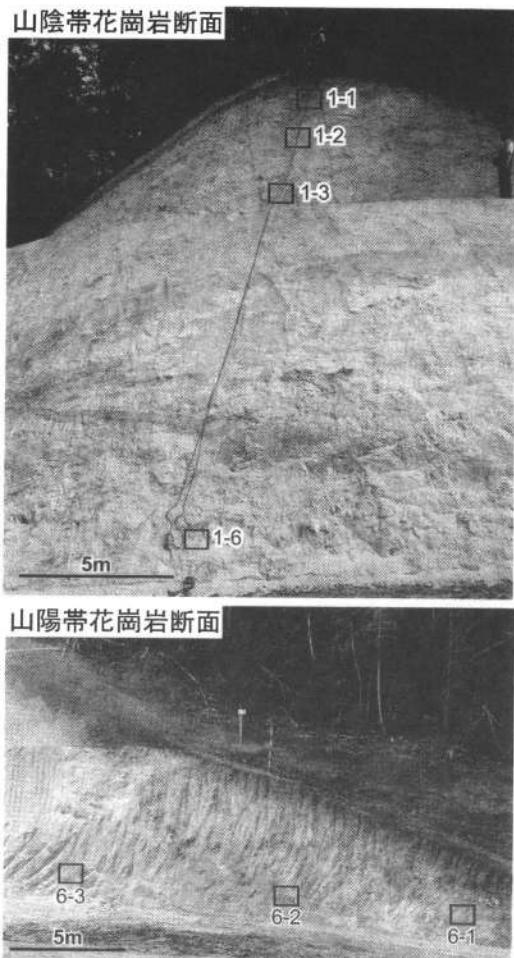


図2 山陽帯及び山陰帯風化花崗岩断面
□は試料採取位置を示す

場で、それぞれ、小さな尾根の断面の観察が許可された。

奥出雲町採石場の尾根の断面は、高さ約17m、幅30mほどで、地表から深部へ、約1.3m、約4m、約7m、及び約17mの部分から、風化花崗岩約1kgずつを採取し、試料番号を、それぞれ1-1、1-2、1-3、1-6とした(図2)。東広島市のバイパス建設現場の断面は高さ約7m、幅30mほどで、地表から深部へ、約2m、約4m、約6mに相当する部分から試料を採取し、試料番号を6-1、6-2、6-3とした(図2)。また、本来の花崗岩の性質を知るために、これら断面近くの新鮮な花崗岩(以下、新鮮花崗岩)も採取した(表1)。

表1 採取試料の産状

試料番号	試料の産状	採取深度 (m)	帯磁率 (× 10 ⁻³ SI)	色	卓越する粒度	φ>5cm以上の風化礫	斜長石	黒雲母	記載
山陰 帶 花崗岩	1-1 風化花崗岩 (砂状)	1.3	0.55	オレンジ	φ=3-4mmの風化花崗岩礫多い	無し	白色粘土化, 細粒	結晶形不明瞭, 勢間に沿って剥がれやすく, 緑色に変質	φ=3-4mmの風化花崗岩礫や植物片多く, φ=2-3mmの石英・カリ長石は比較的円磨されており, 表面にオレンジ色酸化鉄付着
	1-2 風化花崗岩 (砂状)	4	0.13	灰黄色	φ=1-2mmの角張った石英・カリ長石	無し	白色粘土化, 細粒	細粒, 黒色で結晶系やや不明瞭, φ=1mm以下	φ=2-3mmの角張った鉱物粒子が多く, 特に石英の表面に黄色酸化鉄付着
	1-3 風化花崗岩 (砂状)	7.3	0.15	濃茶色	φ=1-2mmの石英・カリ長石	無し	白色粘土化	φ=1mm以下の細粒成分中に単結晶で残存	主にφ=2-5mmの花崗岩礫からなる, φ=1-2mmの鉱物粒子表面に付着する黄褐色酸化鉄が顕著となる
	1-6 風化花崗岩 (礫状)	17.5	0.13	灰色	φ=2-3cmの花崗岩礫多い	有り	白色粘土化	小礫中に細粒結晶残存, 結晶周辺にオレンジ色酸化鉄ハロー発達	φ=10mm以下の花崗岩礫多い, φ=3-4mm, 石英・カリ長石残存, へき開面の光沢あり, 酸化鉄の付着なく新鮮
	1F 新鮮花崗岩 (岩石)	—	12.4	淡ピンク色	φ=5mmのカリ長石粒多く, 山陽帶花崗岩に比べ石英粒が密集して産し, 粒度分布は不均質.	—	白色～半透明	新鮮長柱状, 六角板状結晶	不均質粗粒黒雲母花崗岩
山陽 帶 花崗岩	6-1 風化花崗岩 (砂状)	2	0.48	明灰オレンジ色	φ=0.5-1mm, 粘土及び鉱物の単体粒子多い	殆どなし	白色粘土化	結晶形不明瞭, 酸化鉄少なく, 殆ど緑色に変質している	φ=0.5-1mm, 白色粘土様の直径1mm以下の細粒成分多く, 黒雲母結晶の表面には赤褐色の酸化鉄が付着.
	6-2 風化花崗岩 (砂状)	5	0.5	濃灰褐色	φ=1-2mm, 粘土及び鉱物の単体粒子多い	有り	白濁, 粒境界部分	黒雲母結晶の縁に赤褐色の酸化鉄, 部分的に晶出.	直径1-2cm程度の花崗岩礫多く, 直径5cm以上の花崗岩礫も認められる. 花崗岩礫の結晶粒間は部分的に不明瞭.
	6-3 風化花崗岩 (礫状)	7.5	0.88	灰褐色	φ5-10mmの花崗岩礫	有り	白濁, 粒境界6-2より明瞭	酸化して黒褐色, 結晶周辺に赤褐色の酸化鉄ハロー発達	主に直径0.5-1cm程度の花崗岩礫から成る. 斜長石は白色に濁るが結晶の円磨度低い. 茶褐色の粘土様細粒成分多い.
	6F 新鮮花崗岩 (岩石)	—	1.4	灰色	φ=3mmのカリ長石粒多く, 石英や斜長石と均等に密接して産する	—	半透明	新鮮六角板状結晶	等粒状粗粒黒雲母花崗岩

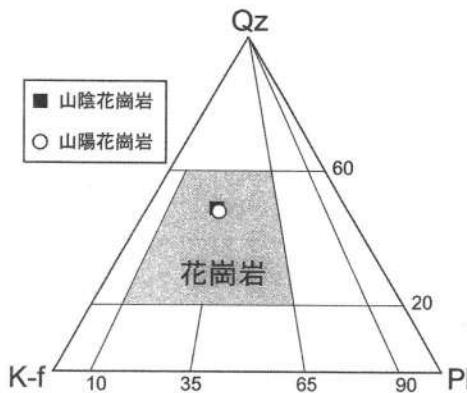


図3 山陽帶及び山陰帶新鮮花崗岩の分類²¹⁾

(1) 花崗岩の産状と性質

まず西本 (1996) の方法¹⁶⁾により、山陽帶及び山陰帶の新鮮花崗岩の岩片 (測定面積12cm²) を用いて構成鉱物の量比を測定するモード分析を行った結果、両花崗岩とも国際地質科学連合 (IUGS)¹⁷⁾ の火成岩分類図において花崗岩に区分されることがわかった (図3)。山陰帶の新鮮花崗岩は、石英、カリ長石、斜長石から成り、少量の黒雲母、磁鉄鉱、微量のアパタイト、ジルコンを伴う。石英や斜長石の粒径が5mm以下であるのに対し、カリ長石の粒径が大きく、5-10mm前後に達する「不均質粗粒黒雲母花崗岩」である (図4)。山陽帶の新鮮花崗岩は、粒径約5mm程度の石英、カリ長石、粒径2-3mmの斜長石からなり、少量の黒雲母、磁鉄鉱、アパタイト、ジルコン及びアラナイトが伴われる「等粒状粗粒黒雲母花崗岩」に相当する。

いずれの風化花崗岩の断面でも、深部から地表に近づくにつれ、次第に黒雲母や不透明鉱物の周辺には黄色から褐色の水酸化鉄が生じ、斜長石は白濁し、結晶粒境界が不明瞭となり、斜長石が粘土へと変わっていく様子が観察される。これとともに、花崗岩は脆くなり、採取試料は礫状から砂状へと変化し、花崗岩の風化が地表に向かってより進行していることが明確に目視される (表1及び図5)。

(2) 試料の処理と試験

採取した風化花崗岩試料は2週間程度室内で自然乾燥させたのちごく一部を微粉碎し、X線回折試験、熱分析試験を行った。試料の多くは縮分し、篩分試験 (粒度分

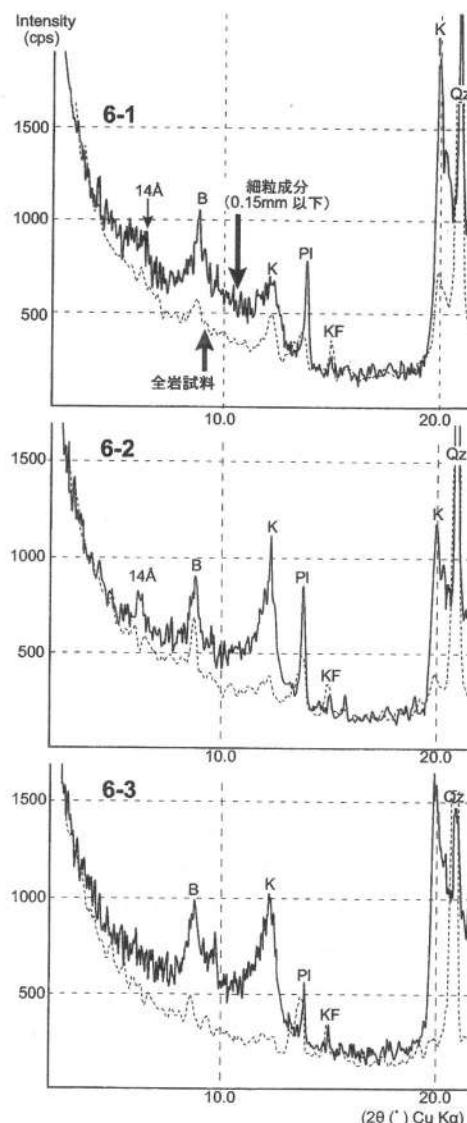


図6 風化花崗岩各試料のX線回折チャート
(0° ~ 25° 付近まで)

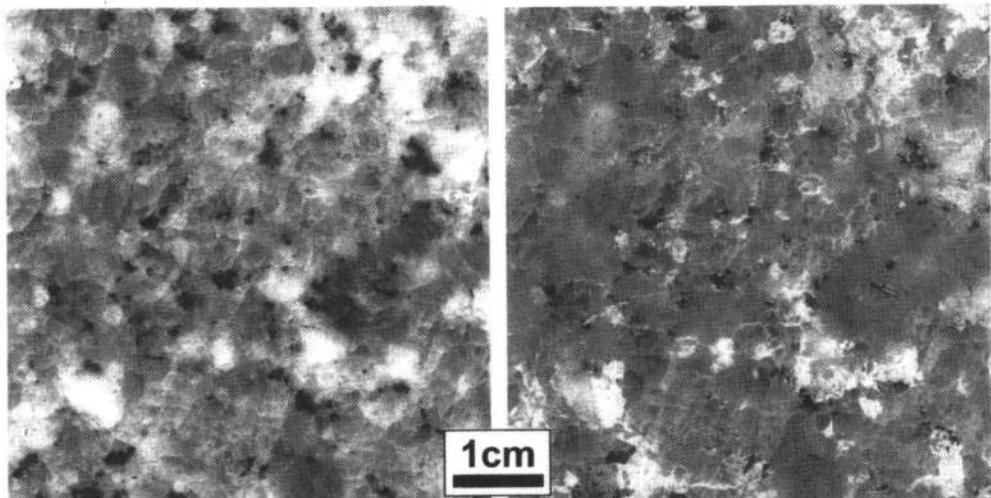
細破線はすべての粒度成分を含む全岩試料、実線は0.15mm以下の細粒成分のXRDチャートをそれぞれ示す。B. 黒雲母、Pl. 斜長石、Qz. 石英、KF. カリ長石、K. ハロイサイト等のカオリン鉱物

布測定) を実施した。

A. X線回折試験

産業技術総合研究所のRIGAKU社製RINT2000を用いた。測定には対陰極にCuを採用し管電圧40kV、管電流100mAの条件で行い、Kβ線はNiフィルターにより除

1 F: 山陰帶花崗岩 (不均質粗粒黒雲母花崗岩)



6 F: 山陽帶花崗岩 (等粒状粗粒黒雲母花崗岩)

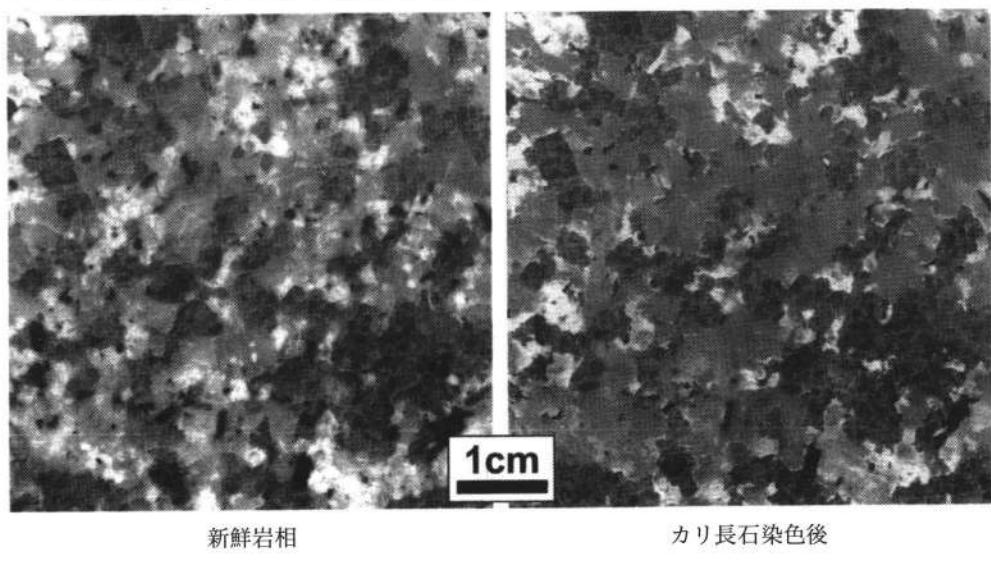


図4 山陽帶及び山陰帶の新鮮花崗岩の岩相

図面右: 試料研磨面をフッ化水素酸処理後、コバルチ亜硝酸ナトリウムにてカリ長石を染色した

去した。全岩試料のほか、各試料の0.15mm以下の細粒分についてもあわせて試験を行い、山陽帶風化花崗岩の代表的な全岩及び細粒細分のX線チャートを図6を示した。

全岩試料の場合、花崗岩の主要構成鉱物である石英 (Q z)、斜長石 (P l)、カリ長石 (K F)、黒雲母 (B) のピークが強く出現する。地表に近づく (風化が進む)

につれ7.2Å ($2\theta = 12.20$) 及び4.46Å ($2\theta = 19.90$) 付近にも粘土鉱物のピークが出現するものの、不明瞭である。

一方、細粒分の場合では、粘土鉱物が多く入るために、7.2Å ($2\theta = 12.20$)、4.46Å ($2\theta = 19.90$) 及び3.5Å ($2\theta = 24.90$) にも明瞭なピークが出現、さらに14Å ($2\theta = 10.20$) にも明瞭なピークが出現する。

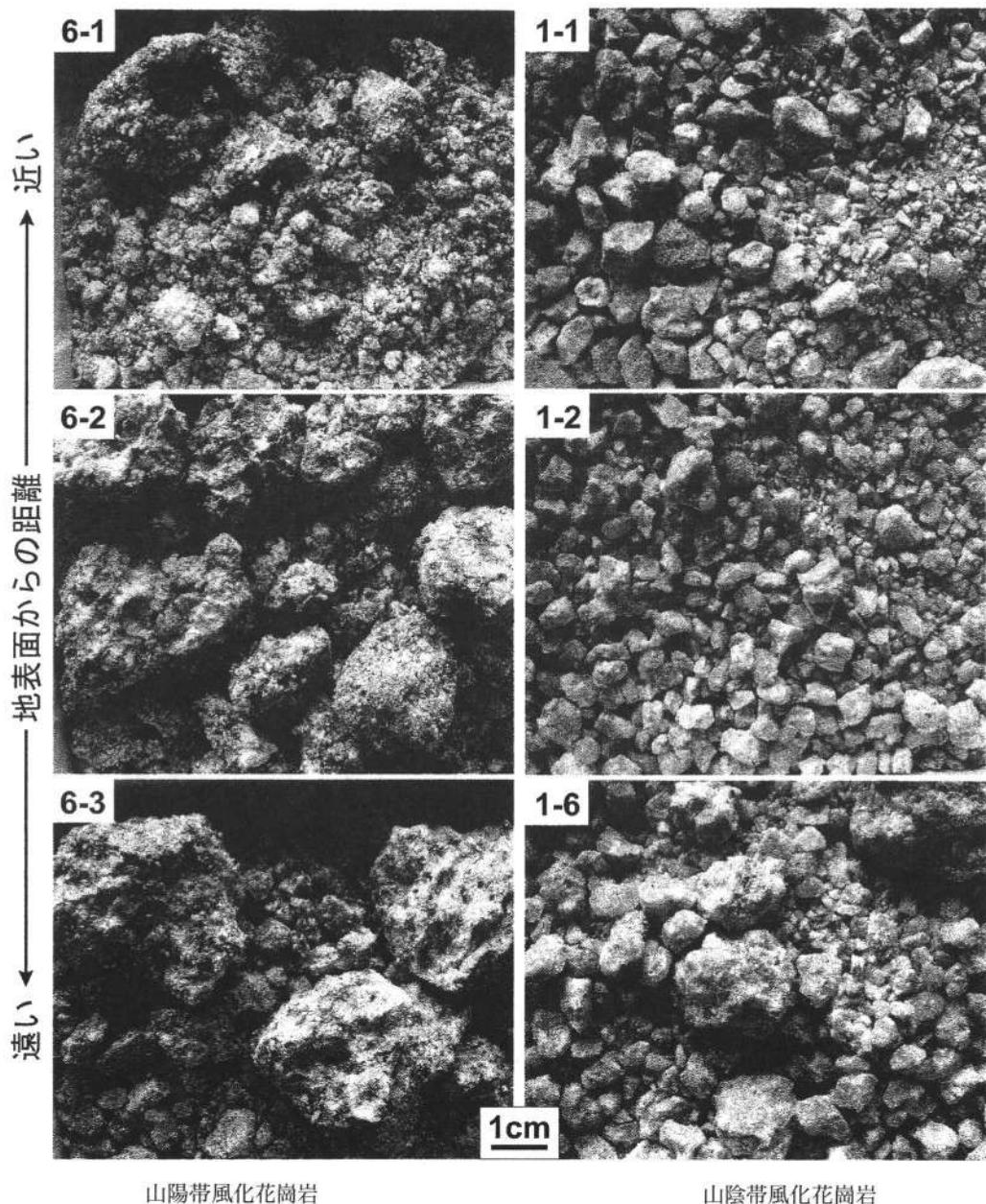


図5 花崗岩風化殻の風乾後の産状

地表面から深部へ試料は砂状から砂礫状へと変化する

$\theta = 6.30$ ）に弱いピークが認められるようになる。14 Å のピークは緑泥石、バーミキュライト、スマクタイト、7.2 Å のピークはカオリン鉱物または緑泥石の可能性がある。風化花崗岩の観察から、風化に伴い黒雲母は緑泥

石様鉱物に 斜長石は白色化して主にカオリン鉱物による変化が起っていると考えられることから、微弱な14 Å のピークは緑泥石、7.2 Å は主にカオリン鉱物の存在をそれぞれ示すと推定される。

このようにX線回折試験では、地表付近の風化花崗岩では主にカオリン鉱物が卓越していることがわかる。また、上記の鉱物種変化は山陰帯風化花崗岩においても同様に認められる。

B. 熱分析試験

試料粉末50mgを使用し、昇温速度毎分20°Cで、1200°Cまで、TG（熱重量）とDTA（示差熱）の分析を行った。

図7に各試料の熱重量曲線（TG: Thermal Gravity）を示す。一般に、粘土鉱物では、粒子に付着した水は110°C前後で、粘土鉱物の層間水は120~250°Cで、構造水は450°C~650°Cで散逸し、減量が起こることが知られている¹⁸⁾。

今回分析した試料では、山陽帯及び山陰帯両者の風化断面において、採取深度が浅いほど、つまり試料6-3から6-1、並びに試料1-6から1-1へ、減量が増加している。また、すべての試料で100°C~200°C（低温側）及び400°C~600°C（高温側）の温度範囲で試料重量が大きく減少している。低温及び高温での減量変化は、いずれも地表に近い試料ほど大きくなっている。

このような減量を示す鉱物としては、黒雲母の風化物

として産するバーミキュライトや斜長石の風化産物などで認められるハロイサイト及びモンモリロナイトなどがあるが¹⁹⁾、今回の試料ではX線回折試験の結果から、地表に近づくに連れてハロイサイトなどのカオリン鉱物が増加することから、減量は主にハロイサイトに由来すると推定される。つまり、各試料中のハロイサイトなどのカオリン鉱物が地表に近づくにつれ増加していると考えられる。

C. 粒度分析試験

須藤（2002c）では、水洗した真砂を5つに分け、それぞれ0分間、0.5分間、1分間、2分間、3分間破碎した後、粒度分析を行い、粉碎時間の増加とともに粗粒率が小さくなる変化を調べた。その結果、粉碎時間が増加しても、FM値が小さくならない例もあったことを報告している。その原因を試料の不均質性と考え、試料の不均質性を除去する方法として、同一の試料について破碎・粒度分析を繰り返す方法を提唱した。この試験法では試料を小分けする必要がないので多めの試料で安定したデータが得られる、試料の不均質さの影響を受けにくいなどの利点がある一方、破碎・乾燥を繰り返すために分析

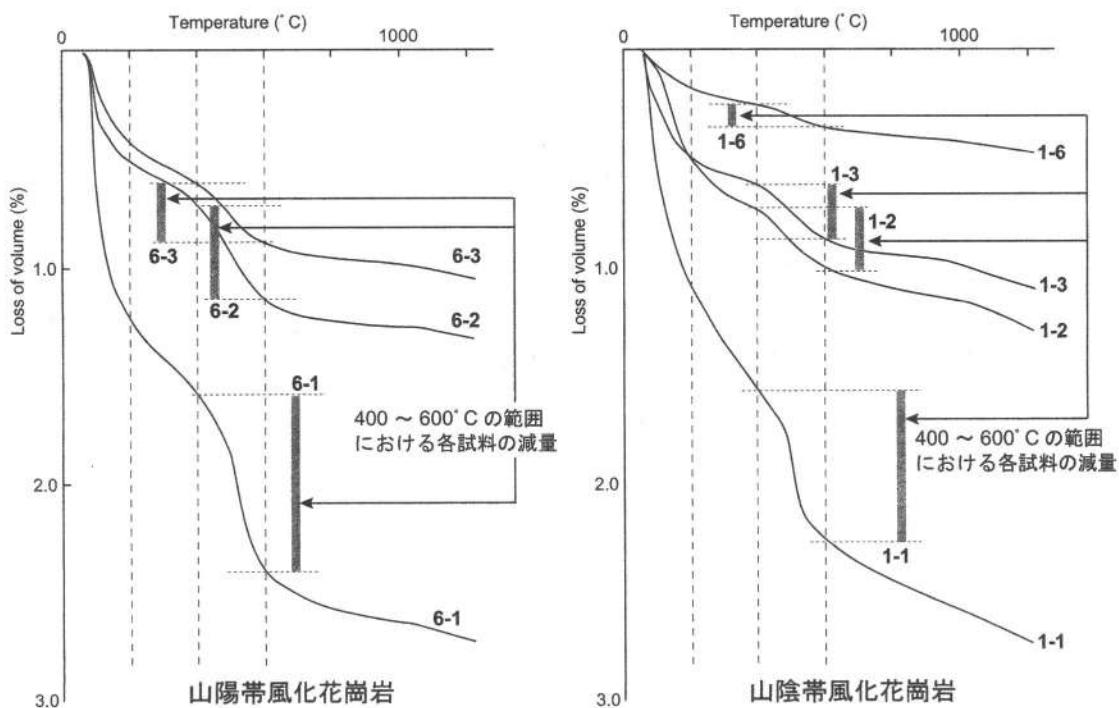


図7 風化花崗岩各試料のTG曲線

表2 篩分試験分析結果

Weight	W = 262g	W = 253g	W = 262g	W = 271g	W = 240g	W = 261g	W = 239g
Sample	No. 1-1-①	No. 1-2-①	No. 1-3-①	No. 1-6-①	No. 6-1-①	No. 6-2-①	No. 6-3-①
Weight	249.7g (%)	242.4g (%)	248.4g (%)	260.9g (%)	203.7g (%)	247.2g (%)	222.4g (%)
5.0mm-	47.8(19.2)	20.9(8.6)	35.4(14.2)	47.1(18.0)	10.3(5.1)	21.7(8.8)	57.3(25.8)
2.5-	72.5(29.0)	85.8(35.4)	77.1(31.0)	72.2(27.7)	37.7(18.5)	56.1(22.7)	59.2(26.6)
1.2-	56.3(22.5)	62.2(25.7)	59.0(23.8)	57.0(21.8)	48.7(23.9)	59.7(24.2)	38.6(17.4)
0.6-	34.0(13.6)	31.2(12.9)	32.3(13.0)	35.1(13.5)	42.2(20.7)	44.5(18.0)	24.5(11.0)
0.3-	21.2(8.5)	22.1(9.1)	22.3(9.0)	25.4(9.7)	30.3(14.9)	29.8(12.1)	18.3(8.2)
0.15-	12.0(4.8)	14.1(5.8)	15.1(6.1)	15.8(6.1)	30.8(15.1)	27.3(11.0)	21.9(9.8)
-0.15mm	5.9(2.4)	6.1(2.5)	7.3(2.9)	8.3(3.2)	3.6(1.8)	8.1(3.3)	2.6(1.2)
FM/Loss	4.13/ 4.7	3.94/ 4.2	3.99/ 5.2	4.00/ 3.5	3.26/27.8	3.52/ 5.3	4.16/ 7.0
Sample	No. 1-1-②	No. 1-2-②	No. 1-3-②	No. 1-6-②	No. 6-1-②	No. 6-2-②	No. 6-3-②
Weight	237.5g (%)	225.8g (%)	229.4g (%)	245.0g (%)	190.3g (%)	225.1g (%)	203.0g (%)
5.0mm-	7.4(3.1)	0.0(0.0)	0.3(0.1)	1.3(0.5)	0.8(0.4)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
2.5-	58.1(24.5)	32.2(14.3)	33.8(14.7)	39.1(16.0)	11.8(6.2)	9.1(4.0)	16.0(7.9)
1.2-	70.6(29.7)	78.0(34.6)	74.6(32.5)	80.2(32.7)	38.5(20.2)	46.6(20.7)	47.8(23.6)
0.6-	49.0(20.6)	50.7(22.5)	54.0(23.5)	55.7(22.7)	57.0(30.0)	59.1(26.3)	47.2(23.2)
0.3-	31.5(13.2)	33.1(14.6)	35.2(15.3)	38.4(15.7)	41.1(21.6)	56.1(24.9)	41.1(20.3)
0.15-	17.5(7.4)	24.9(11.0)	25.0(10.9)	24.3(9.9)	27.9(14.7)	45.3(20.1)	38.8(19.1)
-0.15mm	3.6(1.5)	6.9(3.0)	6.5(2.8)	5.9(2.4)	13.2(7.0)	9.0(4.0)	12.1(6.0)
FM/Loss	3.55/ 9.3	3.17/10.8	3.17/12.4	3.24/ 9.4	2.62/33.4	2.52/13.7	2.63/15.1
Sample	No. 1-1-③	No. 1-2-③	No. 1-3-③	No. 1-6-③	No. 6-1-③	No. 6-2-③	No. 6-3-③
Weight	225.3g (%)	206.2g (%)	214.4g (%)	231.4g (%)	163.3g (%)	202.5g (%)	178.2g (%)
5.0mm-	1.0(0.5)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
2.5-	28.4(12.6)	15.6(7.6)	18.5(8.6)	16.8(7.3)	1.7(1.0)	3.4(1.7)	2.0(1.1)
1.2-	64.1(28.4)	66.4(32.2)	64.8(30.2)	66.5(28.7)	16.0(9.8)	28.9(14.3)	20.1(11.3)
0.6-	61.6(27.4)	51.3(24.9)	56.9(26.6)	66.7(28.8)	53.7(32.9)	49.2(24.3)	41.6(23.4)
0.3-	40.2(17.8)	34.8(16.9)	37.6(17.6)	44.1(19.1)	48.8(29.9)	57.2(28.2)	48.9(27.4)
0.15-	24.5(10.9)	31.2(15.1)	29.0(13.5)	31.6(13.7)	33.5(20.5)	54.9(27.1)	54.3(30.5)
-0.15mm	5.5(2.4)	6.9(3.3)	7.6(3.5)	5.6(2.4)	9.7(5.9)	9.0(4.5)	11.3(6.3)
FM/Loss	3.08/14.0	2.90/18.5	2.92/18.2	2.90/14.4	2.23/44.6	2.22/22.4	2.06/25.4
Sample	No. 1-1-④	No. 1-2-④	No. 1-3-④	No. 1-6-④	No. 6-1-④	No. 6-2-④	No. 6-3-④
Weight	210.6g (%)	193.6g (%)	199.4g (%)	217.9g (%)	148.2g (%)	184.3g (%)	154.8g (%)
5.0mm-	0.3(0.2)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
2.5-	15.3(7.3)	6.0(3.1)	3.6(1.8)	10.2(4.7)	0.8(0.6)	0.4(0.2)	0.7(0.5)
1.2-	53.3(25.3)	48.6(25.1)	43.4(21.8)	54.9(25.2)	9.7(6.6)	8.9(4.8)	11.4(7.4)
0.6-	59.6(28.3)	58.9(30.4)	71.2(35.7)	63.8(29.3)	46.4(31.3)	44.1(23.9)	30.8(19.9)
0.3-	46.5(22.1)	41.6(21.5)	43.2(21.7)	47.3(21.7)	51.8(34.9)	70.1(38.0)	42.3(27.3)
0.15-	29.5(14.0)	33.0(17.1)	32.4(16.3)	33.8(15.5)	34.3(23.1)	49.3(26.8)	55.0(35.5)
-0.15mm	6.1(2.9)	5.5(2.8)	5.7(2.8)	8.0(3.7)	5.2(3.5)	11.5(6.2)	14.6(9.4)
FM/Loss	2.82/19.6	2.67/23.5	2.63/23.9	2.71/19.4	2.16/50.9	1.95/29.4	1.82/35.2
Sample	No. 1-1-⑤	No. 1-2-⑤	No. 1-3-⑤	No. 1-6-⑤	No. 6-1-⑤	No. 6-2-⑤	No. 6-3-⑤
Weight	196.8g (%)	181.8g (%)	186.8g (%)	202.6g (%)	135.1g (%)	167.2g (%)	133.8g (%)
5.0mm-	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
2.5-	9.1(4.6)	1.8(1.0)	2.4(1.3)	3.0(1.5)	0.3(0.2)	0.2(0.1)	0.2(0.2)
1.2-	45.7(23.2)	32.5(17.9)	30.8(16.5)	38.5(19.0)	4.4(3.2)	3.0(1.8)	3.5(2.6)
0.6-	56.5(28.7)	62.1(34.2)	65.1(34.9)	68.0(33.6)	33.4(24.7)	28.2(16.9)	19.5(14.6)
0.3-	48.8(24.8)	51.1(28.1)	46.4(24.9)	49.3(24.3)	54.7(40.5)	69.0(41.3)	43.5(32.5)
0.15-	31.5(16.0)	30.0(16.5)	36.1(19.3)	36.8(18.2)	36.1(26.7)	59.3(35.5)	63.4(47.4)
-0.15mm	5.1(2.6)	4.3(2.3)	5.9(3.2)	7.0(3.4)	6.2(4.6)	7.4(4.4)	3.7(2.8)
FM/Loss	2.68/24.9	2.52/28.2	2.46/28.7	2.51/25.0	1.96/56.4	1.77/35.9	1.67/44.0

説明：最上段は原砂の乾燥重量。その下は試料番号、後の①は第一回目の篩分試験の意味。

その下に試験試料の重量(g)、以下各サイズの重量(g)と%。最下段は試料のFM値と廃泥量
(原砂の重量-試験試料の重量)。

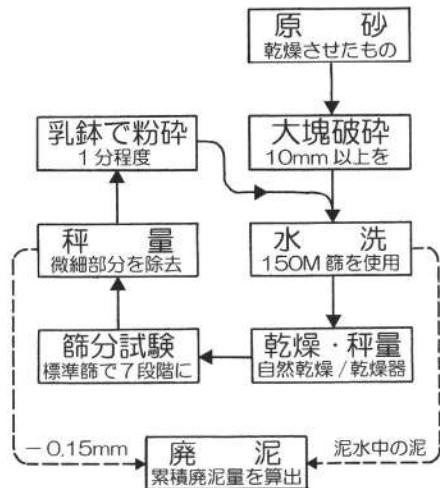


図8 試験の流れ図

時間が長くなる難点が考えられる。

今回は同一試料について破碎・粒度分析を繰り返す方法を採用して粒度分析試験を試みた。乾燥した各試料を縮分し、250～300g前後を試験試料とした。試料をまず指先で軽くほぐして径10mm以下とし、水洗・乾燥・秤量した後、第1回目の篩分試験を行った。その後、0.15mmアンダーの微粒子を除去し、残りをステンレス製乳鉢で約1分間粉碎し、水洗・乾燥・秤量した後、第2回目の篩分試験を行った。以下同様に5回目まで繰り返し分析した。分析手順を図8に、分析結果を表2に示した。

図9には、試料1-1と6-2の篩分試験の結果を示した。1回目から5回目までの篩い分け試験の結果とFM値、それまでの累計廃泥量を表示した。破碎を繰り返す毎の粒度構成の変化を明確に読みとることができる。

図10には、FM値と累計廃泥量の関係を示した。それぞれの試料とも、最初の篩い分け試験で得られた値が右下にプロットされ、次第に左上方へと移動している。つまり、破碎と篩分を繰り返すたびに、FM値は小さくなり、左側へ移動し、一方累計廃泥量は増加し、上方へと移動していくことになる。左上方への移動量は、粒子が破碎された量であり、破碎の強さと試料の破碎され易さによっていると考えられる。これらの点を念頭に置き考察をすすめる。

観察地点1では、表層部から深部まで、大きな差が見られない。FM2.5程度の砂をつくりうるとすると、25%程

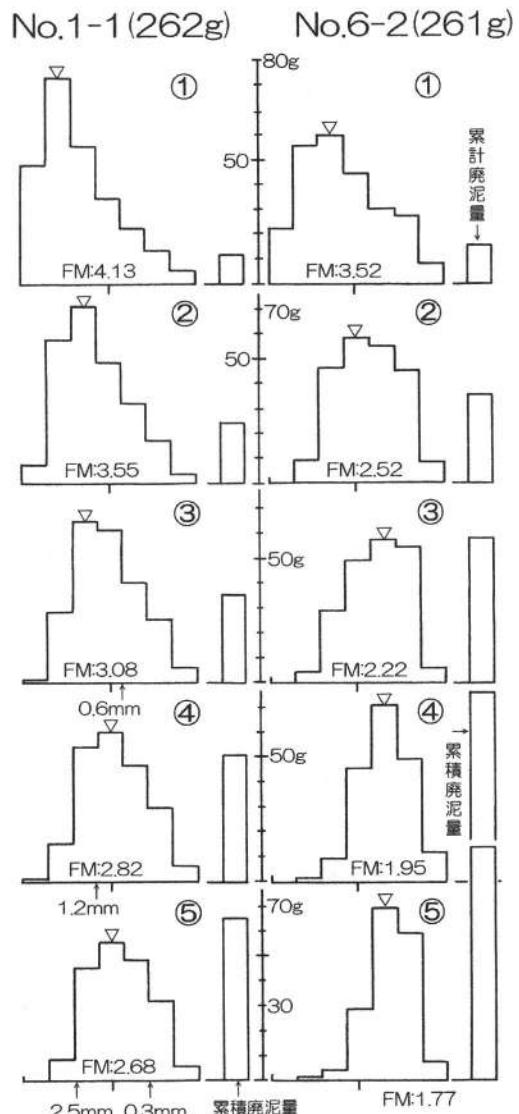


図9 試験試料の粒度構成と廃泥量の変化

度の廃泥が発生するものの、品質変化が少なく、安定した生産が可能であると判断される。一方、観察地点6では、表層部の6-1の廃泥量が著しく大きいことがまず注目される。さらに、6-2、6-3は似た傾向を示すが、試験を重ねる毎にFM値が大きく下がり続けており、観察地点1の試料と大きく異なる。観察地点6で得られる真砂からFM2.5程度の砂をつくりうるとすると、廃泥発生量が表層部では35%程度に達するものの、表層部以

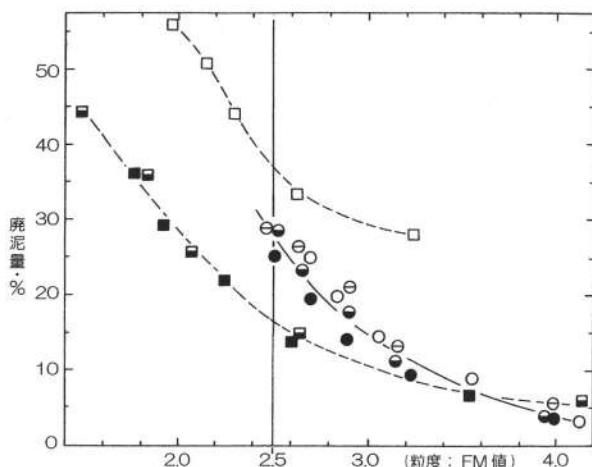


図10 試験試料の粒度 (FM 値) と廃泥量の変化

外では15%程度であるが、脆い粒子が多いと判断される。観察地点1の試料1-1は熱分析試験の結果、試料6-1と共に大きな減量が認められ、粒子分析においても類似した結果が予想された。しかし、試料1-1は大きな減量を示さない試料1-2などと類似した粒度分析結果を示した。これは、熱分析試験試料を調整する際、少量取り分けた試料中に、粘土化の進んだ長石粒が多めに混入するなどにより、試料1-1の熱分析試験で本来よりも多い減量が検出された可能性が強い（ここには示していないが、別途行った化学分析においても試料1-1の強熱減量は2.10%と低かった）。

D. 粒子の形態観察

上に述べた試験を実施する過程で、粒子の形態観察を行えば、その変化を追跡することも可能である。今回、ほぼ同一条件で粒度分析試験を繰り返したにも拘らず、観察地点1の試料ではFM値が2.5前後にとどまったのに対し、観察地点6の試料では2以下となった。この原因を知るために、試験を終えた双方の試料中の粗い粒子を、スキャナーを使って比較観察した（図11）。

この結果、観察地点1の試料番号1-2では粒子の殆どが单一の結晶からなるのに対し、観察地点6の試料番号6-2では細かい石英と長石からなる粒子が多く認められた（図11）。おそらく、細かい石英と長石からなる粒子は破碎によりさらに分解し、単一鉱物粒子にまで変化

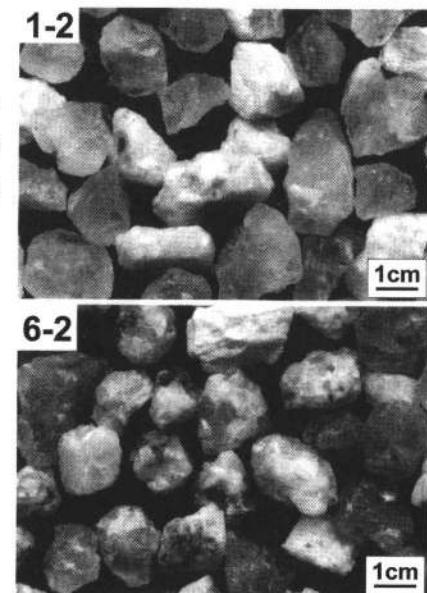


図11 各試料における粗い粒子のスキャナー画像

するものと思われる。つまり、両者の差はもともとの花崗岩の結晶の粒度の差に起因しているものと考えられよう。

5. まとめ

今回研究対象とした山陽帯及び山陰帯の風化花崗岩断面の予察的な研究の結果をまとめると以下のようである。
 ①風化花崗岩断面で深度が増すにつれて、採取される試料は砂状から砂礫状へと変化する。
 ②表層部の化学的風化が進んだ試料は、粘土鉱物含有量が高く、粒度分析試験でも高い廃泥量を示した。
 ③化学的風化の進んだ表層部を除くと、同一地点の試料はほぼ類似した廃泥量・粒度を示す。
 ④異なる観察地点では、異なる廃泥量・粒度を示すが、これは原岩を構成する結晶の粒度による可能性が高い。
 ⑤同一試料について、破碎・洗浄・乾燥・篩分試験を繰り返すことにより、廃泥量・粒度・粒子形態の変化を容易に追跡できた。

今回試行した試験法は、真砂から洗砂を製造する場合の一種のシミュレーションであり、簡単で効果的な方法と期待される。著者らは、より多くの観察・試験を重ねることにより、この方法の有効性の確認をすすめ、地域

や花崗岩の岩質と廃泥量・粒度・粒子形態の関係などの解明を行うと共に、また実際の探査現場への適用も試みていきたい。

謝 辞

株式会社ケイナンの関係者の方々には、採石場内における調査を許可頂くと共に、試料採取の便宜を図って頂きました。黒瀬資源再利用センター株式会社の方々には、風化花崗岩の産状観察に関してご助言を頂きました。本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所と日鉄鉱コンサルタント株式会社との共同研究「海砂代替資源としての真砂の資源評価手法の開発」の研究費を使用して実施した。

参考文献

- 1) 須藤定久:平成13年度骨材資源調査報告書、p.1-12、(2002)、独立行政法人産業技術総合研究所
- 2) 近江正明:コンクリートテクノ、277 (2004)、p.92-97
- 3) 四国地方整備局:四国地区骨材資源対策の基本方針、(2003)、p.1-12
- 4) 国土交通省:骨材需給動向調査、(2000)、p.1-3
- 5) 財団法人経済調査会:輸入骨材の現状、(2005)
- 6) 小村良二:Green Report2002、p.111-112、(2002)、産業技術総合研究所地図資源環境研究部門
- 7) 前出1)
- 8) 須藤定久:平成13年度骨材資源報告書、p.13-18、(2002)、独立行政法人産業技術総合研究所
- 9) 須藤定久:平成13年度骨材資源報告書、p.19-29、(2002)、独立行政法人産業技術総合研究所
- 10) 陣内和彦・向山 広:鉱山地質、23 (1973)、p.411-423
- 11) Ishihara, S.: Mining Geo1., 27 (1977)、p.293-305
- 12) 相田大作:コンクリートテクノ、277 (2004)、p.87-91
- 13) 福士圭介、米田哲朗、中島巖:資源と素材、116(1999)、p.711-716
- 14) 須藤定久、有田正史、矢田部信郎:地質ニュース、580 (2002)、p.32-37
- 15) 須藤定久:平成14年度骨材資源調査報告書、p.23-28、(2003)、独立行政法人産業技術総合研究所
- 16) 西本昌司:岩鉱、91 (1996)、p.235-241
- 17) IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks : Geol. Newslett., 2 (1973) : 110-127 ; N. Yahrb. Miner. Mh., 149-164 ; Geotimes, Oct. 26-30 ; Geol. Rundsch., 63: 773-785
- 18) 白水晴雄:粘土鉱物学、p.93-101、(1988)、朝倉書店
- 19) 前出18)
- 20) Ishihara, S. and Sasaki A : Metallogenetic Map of Japan : Plutonism and Mineralization (1) Molybdenum, Tungsten and Tin, Map Series, 1:2,000,000, 15-1, 1 sheet, (1973)、Geological Survey of Japan
- 21) 前出17)