

第8章 岩石調査

第1節 はじめに

竜山石は白亜紀末（約9千万年前頃）に噴出した凝灰岩類であるとされている。また、成因的には水中で破碎されたハイアロクラスタイトであるともいわれている（尾崎・原山，2003；先山，2005）が、いずれにしても岩質としては凝灰岩質である。石材に使用される岩石は、しばしばその硬さにより硬岩と軟岩に区分される。石材を切り出すとき、一般に硬岩はダイナマイトを使用しなければ切り出せないもので、それに対して軟岩はダイナマイトを使用しなくても切り出せるものである。

凝灰岩は軟岩の代表的な石材とされ、その典型的な例に大谷石がある。実際に、屋外で大谷石を使用した構造物は、数十年のうちに劣化が進むことが多い。それに対し同じ凝灰岩である竜山石の劣化は遅く、古墳時代の石棺であっても、しばしば非常に新鮮な状態で産出する。この点で、竜山石は一般に石材として使用されている凝灰岩類とは異なる。

一方、竜山石と同時代の白亜紀後期の凝灰岩類は結晶質であり、非常に硬く、加工されにくい性質がある。そこで竜山石の物性を明らかにするため、密度測定および一軸圧縮強度の測定を行い、他の石材との比較を行った。

また、竜山石にはその色相によって青竜山石・赤竜山石・黄竜山石の3種類の岩相が存在している。これらの岩石についてはX線回折および色彩色差実験も実施し、その色相の違いも検討した。

なお、これらの石材は（株）松下石材店によって提供していただいたもので、その物性に関する実験は応用地質株式会社へ委託して実施したものである。

第2節 使用した岩石

実験には色の異なる3種類の竜山石と、それ以外に大谷石、北木石、中国産花崗岩を加えた6種類の岩石を使用した。以下にそれらの岩石の概要を述べる。

1. 青竜山石

現在もっとも一般に切り出され、多くの場所で使用されているのが青竜山石である。採石場でもその中心部に存在し、風化変質していない竜山石の本来の岩相を現わしている。青灰色～青緑色を呈し、しばしば白色の流紋岩片（または軽石片）を有する。鉱物片としては石英と斜長石が見られる。

2. 黄竜山石

採石場の上部および節理にそった部分に存在し、青竜山石が表層からの水の移動などによる風化変質によって変化したものと考えられる。顕微鏡下で青竜山石に比べて水酸化鉄鉱物が多い。古墳時代の石棺から中世～近世の石造物の大部分はこの色合いの竜山石で構成されている。

3. 赤竜山石

赤色のものは、採石場の断面では不規則な脈として産する。分布域が狭いため、大量に使われることは少なく、比較的小規模な石造物や置物に使用されることが多い。赤色を呈するのは主に酸化鉄によるものと考えられる。

4. 大谷石（おおやいし）

栃木県宇都宮市大谷付近に分布する新第三紀中新世の凝灰岩類の呼称で、主として流紋岩質の軽石凝灰岩からなる。全体に発砲した軽石を多量に含み、それらはミソと呼ばれる黒っぽい斑点となって見られる。火に強く熱を通しにくい特徴を有する。軟らかく加工しやすいことから外壁や塀などの建築用石材として広く利用され、日本の凝灰岩類の石材としては最も普及しているものの一つである。また空隙が多く、比重が1.5～2.0程度で非常に軽いことも特徴である。その一方で、もろく風化に弱いという欠点もある。

5. 北木石（きたぎいし）

岡山県笠岡市北木島町（北木島）から産出された、中生代白亜紀後期中粒～細粒黒雲母花崗岩である。白色を主に赤味を帯びた細目石、赤サビ色をした北木錆石とがある。全体に均質で硬度にもすぐれており、「ねばり」があるので加工も容易で、墓石の素材として適しているとされている。

大坂城の石垣、靖国神社の大鳥居、日本銀行本館などの近世以降の歴史的建造物に使用されている。

6. 黒雲母花崗岩【G603】

中国福建省産で、代表的な白色の黒雲母花崗岩である。大材が採れるため、建材・墓石などによく利用されている。

第3節 密度試験

1. 方法

岩石の密度試験は「岩石の密度試験（JGS 2132-2000）ノギス法」に準拠して実施した。本試験は、成形した供試体を対象に、岩石のかさ密度を求めることを目的とする。かさ密度とは、岩石供試体の単位体積あたりの質量をいう。

以下に供試体の作成および試験の方法を示す。

- ①岩石を切断機、コアリング装置により直円柱状に成形する（図 8-1）。
- ②供試体表面に付着する粒子を、刷毛で除去する。
- ③供試体の質量 $m(g)$ をはかりで測定する。
- ④供試体の直径 $D(cm)$ 、高さ $H(cm)$ をノギスで測定する。ノギスは 0.05mm まで測定可能なものを使用した。
- ⑤供試体の体積 $V(cm^3)$ を次式で算出する。
$$V = \pi \cdot (D/2)^2 H$$
 D ：供試体の平均直径（cm） H ：供試体の平均高さ（cm）
- ⑥供試体のかさ密度 $\rho(g/cm^3)$ を次式で算出する。
$$\rho = m/V$$
 m ：供試体の質量（g）

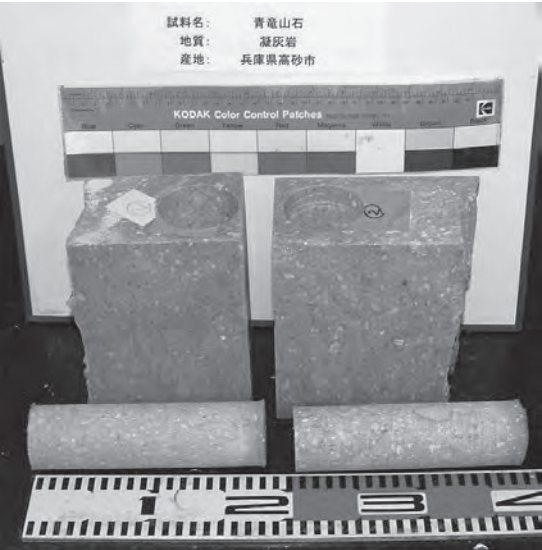


図 8-1 くり抜いて成形した試料



図 8-2 密度試験用供試体と測定器具

図 8-2 に密度測定用に用意した試料の写真を示す。

表 8-1 各岩石の湿潤密度

	湿潤密度 $\rho(g/cm^3)$		
	試料 1	試料 2	平均
青竜山石	2.334	2.327	2.331
赤竜山石	2.356	2.271	2.314
黄竜山石	2.312	2.257	2.285
大谷石	1.555	1.542	1.549
北木石	2.631	2.627	2.629
G607	2.657		2.657

2. 結果

結果を湿潤密度として表 8-1 に示す。

竜山石では新鮮部とされている青竜山石がもっとも湿潤密度が大きく、ついで熱水の影響を受けたとされる赤竜山石、風化変質作用を受けた黄竜山石となっている。しかしながら、青竜山石と黄竜山石の密度の差は 0.03g/cm3 程度であり、大きな差があるとは言えない。

竜山石と同じ流紋岩質凝灰岩類に分類される大谷石の密度は竜山石のものよりもはるかに低く、1.5g/cm3 程度の値となっている。このことは大谷石に軽石や空隙が多いことと調和的である。

花崗岩類の北木石と G603 は、竜山石よりやや大きい値となっている。

第 4 節 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS M0302 に準拠して実施し、そこで定義されていない事項は JGS 2521-2000「岩石の一軸圧縮試験方法基準」を準用する。この試験では一軸圧縮強度、破壊ひずみ、変形係数を求める。

1. 方法

試料は 1 試料 1 個 1 組を基本とし、自然状態の供試体を用いる。供試体は密度試験で成形した円筒状のものを使用し、供試体寸法は原則として直径 50mm、長さ 100mm とする。圧縮の負荷はひずみ制御法により、載荷速度を 0.1 (%/min) とした。試料を装着した状態の圧縮実験装置と破壊された岩石の写真を図 8-3 に示す。

各物性値は応力-歪み曲線(図 8-4)を使用して求めた。ある物質に力を加えたとき、それを表面積で割ったものを応力という。物質に力がかけると変形（伸長または圧縮）



図 8-3 試料を装填した一軸圧縮装置（左）と破壊された試料（右）

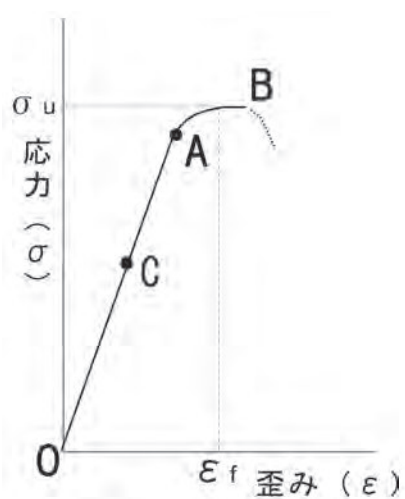


図 8-4 模式的な応力－歪み曲線

が生じる。元の長さに対するこの時の変位量の割合を歪みと呼ぶ。図 8-4 で 0～A の部分は応力と歪みは比例し、応力を解放すると歪みが元に戻る弾性変形を行う部分である。A を超えると岩石は元に戻らない塑性変形の領域に入り、B では破壊してしまう。

今回の実験では、 $\sigma - \epsilon$ 曲線上の最大応力値 (MN/m^2) を一軸圧縮強度 (σ_u)、その時の歪み (%) を破壊歪み (ϵ_f) とし、曲線上で圧縮強度の 2 分の 1 の付近の接線勾配を変形係数とする。

2. 結果

各岩石の圧縮方向の力（圧縮強さ）と軸方向のひずみ量（軸ひずみ）の関係を図 8-5 及び図 8-6 に示す。また、それぞれの圧縮強度・変形係数・破壊歪みを表 8-2 に示す。

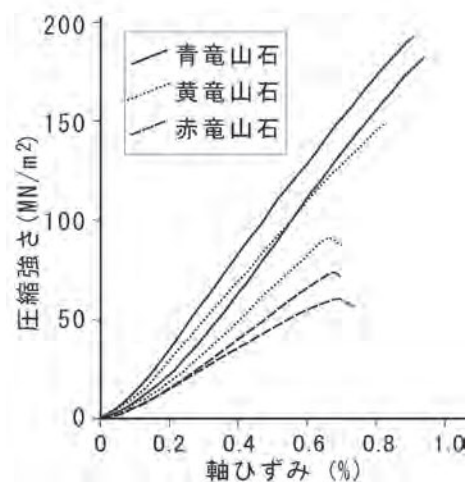


図 8-5 竜山石各岩相の圧縮強さと軸ひずみ

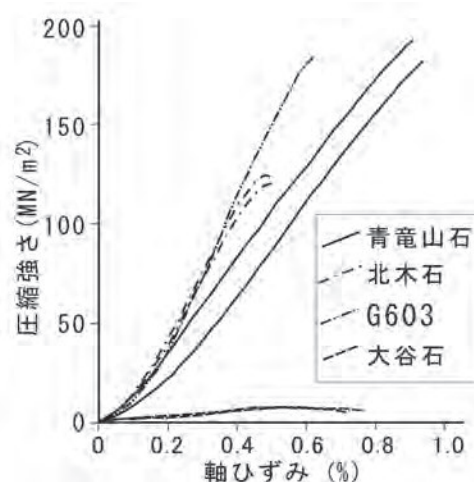


図 8-6 各種岩石の圧縮強さと軸ひずみ

表 8-2 各岩石の圧縮強度・変形係数・破壊歪み

	一軸圧縮強度 (MN/m^2)	変形係数 (MN/m^2)	破壊歪み %
青竜山石	193	23900	0.85
	182	23900	0.82
赤竜山石	74.3	12900	0.61
	60.8	10100	0.64
黄竜山石	148	20100	0.77
	91.1	16900	0.59
大谷石	7.53	1570	0.56
	7.10	1410	0.59
北木石	125	35200	0.44
	120	32800	0.43
G603	184	40000	0.51

今回試験を行った試料のうち一軸圧縮強度が最も大きかったのは青竜山石で、約 190 (MN/m²) となっている。竜山石のなかでは赤竜山石が約 70 (MN/m²) と低く、黄竜山石はその中間の値を示す。

大谷石は 7.1 と 7.5 (MN/m²) で試験を行った他の試料と比べて著しく低い。一方花崗岩類（北木石と G603）は青竜山石と同程度か少し低い圧縮強度を示す。

変形係数は花崗岩類で 30000～40000 (MN/m²) と最も高く、以下青竜山石、黄竜山石、赤竜山石でやや低い値を有する。さらに大谷石では 1470 および 1570 (MN/m²) の値を有し、著しく低い値である。

破壊歪みは竜山石で大きく、以下大谷石、花崗岩類の順に小さくなる。

第5節 X線回折

1. 分析原理

X線回折 (X-ray diffraction, XRD) は、鉱物の結晶構造に関する情報を得るための分析方法である。結晶体に単色のX線を当てると、X線が結晶格子面で反射しお互いに干渉しあうので、次の条件を満たす方向の回折線のみ強度が増大し、他は打ち消しあって観察されない。

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

dは面間隔、λは波長、nは正の整数

波長λが一定の単色X線を照射してθ (2θ)を観測し、上の式から結晶の面間隔が求められる。この面間隔は一般に物質の固有の値で、一つの物質の数個のdとそれに対応する回折X線の相対強度が観察できれば、その物質を同定することができる。

X線回折には通常、粉末回折法 (powder diffraction method) が適用される。また通常の粉末法では不定方位法を用い、あらゆる方向に配列した結晶粉末からのX線回折を測定する。不定方位法により試料に含まれる鉱物種の同定が可能であり、そしてそのおおよその量も知ることができる。

一方、層状珪酸塩の薄板状結晶粉末をスライドガラス上に沈着させ、層面がほぼ平行に並んだ配向試料からのX線回折を測定する方法を定方位法という、定方位法では層面による回折、すなわち底面反射が強く記録されるので、層面方向の原子の配列に関する情報、いいかえれば粘土鉱物の同定や混合層構造の判定などに必要なデータが得られる。さらに、薬品処理や加熱処理による底面反射の変化を調べることにより、複雑な混合物の同定が可能となる。

2. 前処理

①試料切断、乾燥、粗粉碎

分析に用いた試料はいずれも硬岩であったため、ダイヤ

モンドカッターを用いて試料を 50g～100g 程度切り分けた。試料は脱イオン水で洗浄、乾燥させた後、鉄乳鉢で粉碎して #100 メッシュ以下の粒子はフルイを用いて除去した。#100 メッシュ以上の粉碎した試料から不定方位分析用に 5g 程度、および定方位分析用 50g 程度の試料を取り分けた。

②不定方位分析用試料調整

不定方位分析用試料はアルミナ製乳鉢で粉末に調整した。粒度の判定は乳鉢中で十分細粒化が認められ、指で触れたときに粒状感を感じなくなること、および粉末に粘りが生じることを目安とした。粉末化した試料は、不定方位分析用試料ホルダー（無反射ガラス製）に充填して測定に供した。なお分析時にX線が当たる箇所については、表面をスライドガラスで軽く押さえて平面にした。

③定方位分析用試料調整

定方位分析用試料の調整は遠心分離器を用いて水簸法により行った。手順は以下の通りである。

- a) 定方位分析用試料として取り分けた粉碎試料はイオン交換水 200cc と混ぜ合わせた。次に懸濁液を超音波洗浄器にかけた。超音波処理は攪拌しながら 15 分間の処理を 2 回行った。
- b) 懸濁液から直径 2 μm 以下の粒子を濃集させた。まず a で得られた懸濁液を遠心分離器にかけた。設定条件は 1,000 回転、1 分 20 秒である。その後、直径 2 μm より小さい粒子が拡散した上澄みを回収した。次に遠心分離器を用いてこの上澄みから直径 2 μm 以下の粒子を沈殿させた。設定条件は 3,000 回転/分、30 分間である。
- c) 上記 b) の操作で得られた沈殿物（直径 2 μm 以下の粒子）の一部をスポイトでとり、スライドガラス上に展開して室温で乾燥させたものを XRD 分析用試料（定方位試料：無処理・エチレングリコール (EG 処理)）とした。なおエチレングリコール処理は 50℃に保った恒温槽内にエチレングリコールが入ったデシケーターを用意し、エチレングリコール蒸気で充満したデシケーター内に定方位分析用試料を 30 分以上静置することにより行った。
- d) 上記 b) の操作で得られた沈殿物（直径 2 μm 以下の粒子）の一部をスポイトでとり、以下の手順で塩酸処理を行った。
 - d-1) 遠沈管中の沈殿物に 3 規定の塩酸 10cc を加える。
 - d-2) 沸騰直前に加温した水が入ったホットプレート（ドラフト内）上の 100cc ビーカーに d-1) の遠沈管を入れ、湯煎状態で攪拌しながら 60 分間反応させる。
 - d-3) 反応後の試料は遠心分離器を用いて沈殿させ、上澄みの塩酸を捨てる。その後、遠沈管に沸騰したイオン交

換水を入れ、攪拌して粒子を洗浄する。超音波洗浄器を用いて十分に洗浄した後、遠心分離器を用いて試料を沈殿させ、上澄みを捨てる。洗浄を2度繰り返した後、沈殿物（直径<2μmの粒子）の一部をスポイトでとり、スライドガラス上に展開して室温で乾燥させたものをXRD分析用試料（定方位試料：塩酸処理）とする。

3. 分析手順・条件

調整した試料についてX線回折分析を行った。分析にはX線回折分析装置（X線回折装置 RINT2000）を用いた。X線発生装置の電圧は40kV、電流値は160mAに調整した。

不定方位分析においては拡散スリット、散乱スリットをそれぞれ1°、受光スリットを0.15mmに設定した。スキャン範囲は3°～70°、サンプリング幅は0.02°、スキャン速度は8.0°/分である。

定方位分析においては拡散スリット、散乱スリットをそれぞれ0.5°、受光スリットを0.15mmに設定した。スキャン範囲は2°～40°、サンプリング幅は0.02°、スキャン速度は4.0°/分である。

4. 結果

不定方位および定方位でのX線回折によって検出された主な鉱物およびその相対量比を表8-3に示す。また分析で得られたX線回折スペクトルを巻末に示す。

いずれの竜山石でも石英、斜長石、カリ長石、イライトが検出された。青竜山石でのみ検出されたのは緑泥石で、赤竜山石、黄竜山石ではスメクタイトが検出されている。

第6節 色彩色差測定

	青竜山石	黄竜山石	赤竜山石
石英	◎	◎	◎
斜長石	○	○	○
カリ長石	△	△	△
方解石	△	△	—
緑泥石	△	—	—
イライト	△	△	△
スメクタイト	—	△	○

◎：卓越している
○：含まれている
△：少量だが検出される
—：検出されない

表 8-3 竜山石のX線回折装置の測定結果

1. 方法

竜山石の色を定量的に評価するために色彩色差計を用いて数値化した。色の表現法に関しては、L*a*b*色空間(JIS Z 8729)を用いる。色彩色差測定はミノルタ(株)製色彩色差計CR-200(図8-7)で拡散照明垂直受光方式(JIS Z 8722)により行った。測定試料は、圧縮強度試験用に成型した残試料を利用した。

測定は、測定面が乾燥した状態のものと水に濡らした状態のもので各5回測定した。



図 8-7 色彩色差測定装置と試料

2. 結果

図8-8に色彩色差測定結果を示す。このうち青竜山石はやや緑成分に富む部分に集中した結果を示し、色相的に均質である。黄竜山石は著しく黄色成分に富み、赤竜山石は赤色と黄色の成分に富む。また、この両者は青竜山石と比較してばらつきが大きいのが特徴である。これは基質の色と流紋岩軽石片の色とのコントラストが大きいことに寄っていると考えられる。花崗岩類はゼロ点から黄色方向に延びる分布を示し、大谷石は緑色と黄色の合成された色合いを示す。

第7節 竜山石の岩相記載

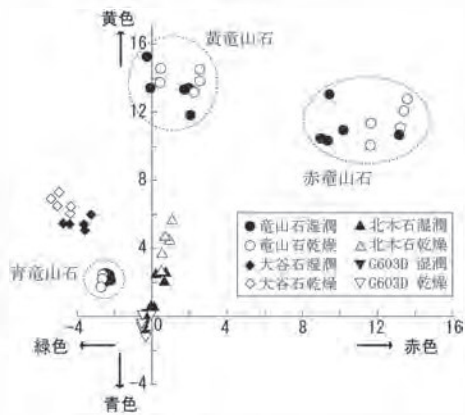


図 8-8 各岩石の色彩色差測定結果

1. 岩片の有無による違い

竜山石は肉眼的に軽石片が少ない結晶ガラス質凝灰岩、緑色流紋岩片に富む火山礫凝灰岩、白色の軽石質の流紋岩片が特徴的な軽石凝灰岩の3種類の岩相に分けられる。これらの3岩相は漸移し、緑色軽石を含む火山礫凝灰岩は結晶ガラス質凝灰岩と白色軽石を含む火山礫凝灰岩との中間に位置する岩相である。各岩相の分布を図8-9に示す。



図8-9 竜山石各岩相の分布

野外で、結晶ガラス質凝灰岩相は主に生石神社周辺から北側に分布し、石の宝殿などを構成する。緑色の流紋岩片の目立つ火山礫凝灰岩相は伊保霊園付近を主体に分布する傾向がある。白色の流紋岩片の目立つ火山礫凝灰岩相は山塊南部の竜山に多い傾向がある。

結晶ガラス質凝灰岩相（図8-10）は肉眼で岩片と基質の境界が不明瞭で、細粒の斜長石と石英のみを含むように見える。斜長石は白色～淡紅色の自形～半自形結晶からな

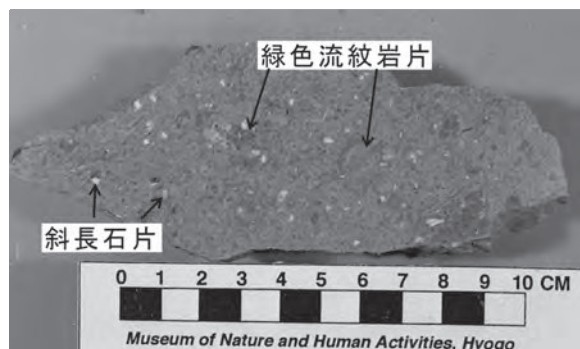


図8-10 結晶ガラス質凝灰岩

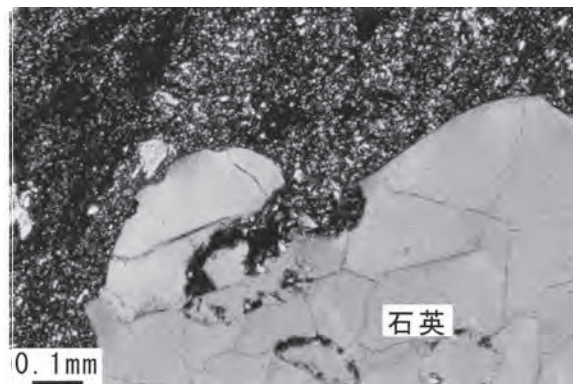


図8-11 融食された石英斑晶

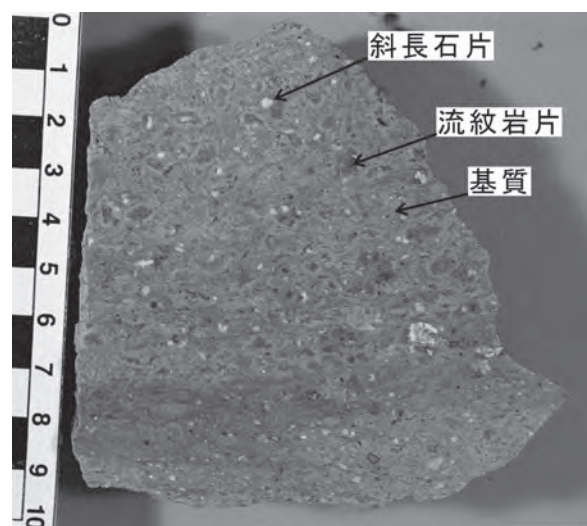


図8-12 緑色流紋岩片を含む火山礫凝灰岩

り、顕微鏡下では変質して濁った表面を呈する。石英は丸みを帯び融食されている（図8-11）。基質の部分は青灰色で、数cm程度から数 μ m程度までさまざまな大きさの流紋岩片が雑然と集合した組織を呈するが、それらの境界は不明瞭で一見均質に見える。鏡下では脱ガラス化して微晶質～隠微晶質の珪長質鉱物からなる。

緑色流紋岩片を含む火山礫凝灰岩相は細粒で破片状の緑色流紋岩片を含む（図8-12）。鏡下では脱ガラス化し、微晶質～隠微晶質の珪長質鉱物と緑泥石および緑褐色の粘土鉱物に置きかわっているが、微細鉱物の配列によって流紋岩片であることがわかる。また基質との境界が不明瞭なことが多く、なかには周縁部に向って細粒になり基質に移化する場合もある（図8-13）。これらの基質は結晶ガラス質凝灰岩相と同様である。

白色流紋岩片を含む火山礫凝灰岩相の典型的なものには5mm～2cm程度の大きさで白色の流紋岩片が含まれ、前二者と比べて軽石が大きく目立つことで区別が可能である（図8-14）。それらの流紋岩片には繊維状ガラスの集合

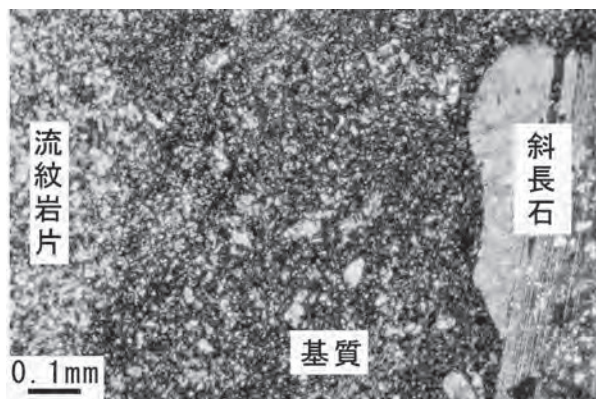


図 8-13 基質と移り変わる流紋岩片

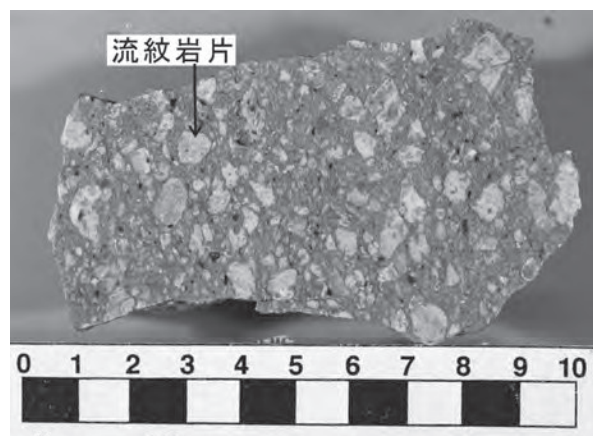


図 8-14 白色の流紋岩片を含む火山礫凝灰岩

からなり空隙のある軽石質のものもある。白色流紋岩片は一般に扁平度が低く、最大1cm 程度の亜円～亜角礫として産する。鏡下では 0.1mm 前後の石英・長石の集合となっている。また、緑色のものと異なり、基質との境界が比較的明瞭である。基質は結晶ガラス質凝灰岩相と同様である。

2. 色相の違いによる岩相区分

竜山地域の採石場露頭における岩石のみかけの色調は、基本的には青灰色～緑灰色の青竜山石が主体であり、現在切りだしている石材のほとんどはこの部分からのものである。一方、石棺等の遺物を構成しているものは大部分が黄竜山石である。また、単独の彫刻などには赤竜山石が使われることもある。これら三者の関係は、伊保山霊園や竜山の大きな露頭でよく観察される。

黄竜山石は一般に露頭上部の尾根近くに分布し、その下位では鉛直方向と水平方向の節理に沿って黄竜山石が分布し、青竜山石が立方体状に残る。さらに下位では、黄色部は鉛直方向の節理に沿った部分に見られるのみで、下方に向かって次第に黄竜山石は少なくなり、青竜山石のみとな

る。このような産状からみて、節理に沿った水の流れなどにより地表から風化変質が進み、青竜山石が黄竜山石に変化したものと考えられる。鏡下では青竜山石と同様、脱ガラス化して隠微晶質～微晶質であるが、微細な水酸化鉄鉱物が基質全体に見られる。

一方、赤竜山石は不規則な形態で、鉛直方向に伸びた分布をしている。また、黄竜山石や節理に切られること（図 8-15）から、赤竜山石の形成は凝灰岩類堆積後の黄竜山石形成以前に形成されたと考えられる。

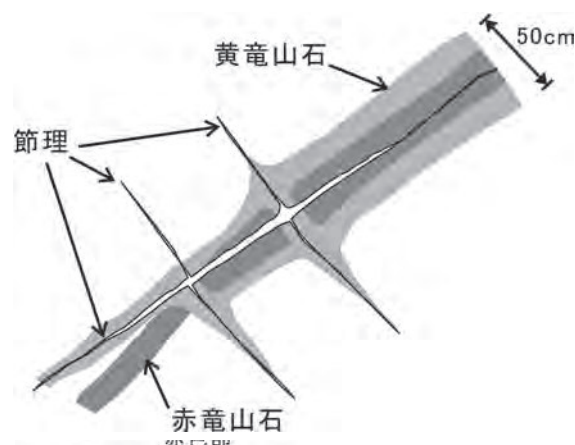


図 8-15 黄竜山石と赤竜山石の関係

第 8 節 結論と考察

1. 竜山石の色相

前述のように、竜山石には青緑色の通称青竜山石、黄褐色の黄竜山石、赤みが勝った赤竜山石が存在する。このうち青竜山石は採石場の深部に存在する堅牢な岩石で、風化していない岩相であると考えられる。しかしながらほとんどの場合基質は微細な鉱物に変化し、有色鉱物が見られることはなく、斜長石の一部はイライト化している。X線回折の結果からみて、基質の微細な部分にはおそらく緑泥石とイライトからなり、そのうち緑泥石の存在がこの岩石の青緑色を作り出していると考えられる。

一般に噴出直後の溶岩や火山灰で初生的に緑泥石が存在することは考えにくく、緑泥石の存在は竜山石が何らかの形で変質作用を被っていることを示している。ほとんどすべての竜山石が均質の青緑色をしていることから、この変質は局所的な熱水等によるものではなく、竜山石の続成作用時のものである可能性が高い。

赤竜山石は不規則な形態の脈状に分布していることからおそらく竜山石の堆積直後に、熱水の上昇によって作られたと考えられる。その赤色は微細な酸化鉄（おそらく赤鉄鉱）に由来している。色彩色差測定によるデータは赤鉄鉱と水酸化鉄の中間の色相を示し、熱水変質の存在を支持

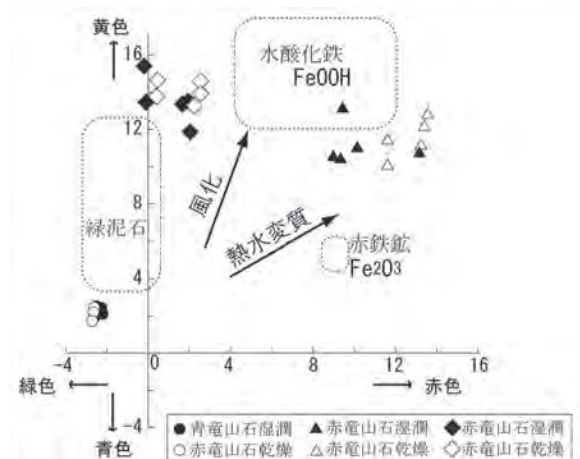


図 8-16 竜山石の色彩と変質鉱物の関係

している(図 8-16)。粘土鉱物としては緑泥石が含まれず、スメクタイトが多くみられる。熱水変質により緑泥石がスメクタイトと赤鉄鉱に分解した可能性がある。図 8-17 に示した生成温度から、緑泥石からスメクタイトの変化は 100～200℃程度で進行したと考えられる。

採石された石材の一部で小規模な剪断帯 (shear band)

	100	200	300℃
スメクタイト			
緑泥石／スメクタイト			
イライト／スメクタイト			
緑泥石			
イライト			
方解石			

図 8-17 主な粘土鉱物の形成温度。温度はおおよそその目安として、Hedenquist et al. (1996)によるものを適用した。

と考えられる変形集中域が青竜山石と赤竜山石の境界を横切っているようすが観察された(図 8-18)。剪断変形は岩石内の粒子を滑らせるように圧縮応力が加わったときに形成されるが、竜山石の様な硬質の岩石を変形させるためには大きな力を要するため、地表に露出した状態での変形は考えにくく、ある程度地下深部での変形が想定される。したがって、竜山石の赤色化は地表に露出するより以前の地下深部で形成されたと考えられる。

黄竜山石は地表付近と節理に沿った部分に分布し、明らかに地表水の影響をうかがわせる。顕微鏡下で水酸化鉄が多く確認されることもこれを支持する。おそらく地表からの風化作用によるものと考えられる。

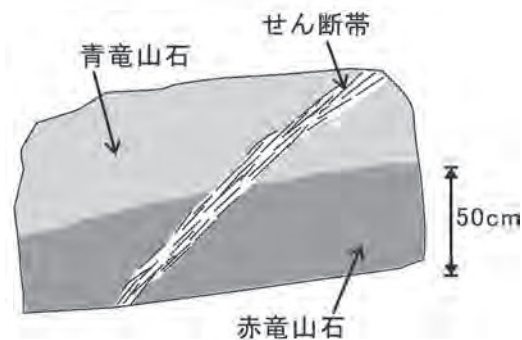


図 8-18 青竜山石と赤竜山石を切るせん断帯

古墳時代の石棺に始まり中世の石造物に至るまで、古い時代の石材は大部分が黄竜山石で造られ、現在採石されているような青竜山石が使われている例はほとんどない。これについては、①もともと青竜山石で造られたものが、その後の風化により黄竜山石に変化したという考えと、②過去には黄竜山石しか露出していなかったため、古い時代の石造物は黄竜山石しかないという、二通りの考えが成り立つ。一軸圧縮試験の結果で明らかのように、黄竜山石は青竜山石と遜色のない強度を維持している。また、古墳時代の黄竜山石で造られた石棺が、それ以上破壊されることなく現在まで原形をとどめていることもこの結果と一致する。このように硬度を保ったまま、スメクタイトや水酸化鉄を形成する現象が地表でおこることは考えにくい。おそらく中世以前の竜山石は、岩体上部の黄竜山石部分しか露出していなかったため、その頃作成された石造物が黄竜山石のみとなったと考えられる。

2. 竜山石の強度

3種類の竜山石とその他の岩石の圧縮強度と破壊ひずみを図 8-19 に示す。この図で明らかのように、軟岩の代表である大谷石は著しく低い圧縮強度を示すが硬岩である花崗岩類は高い圧縮強度を示す。竜山石の場合、赤竜山石

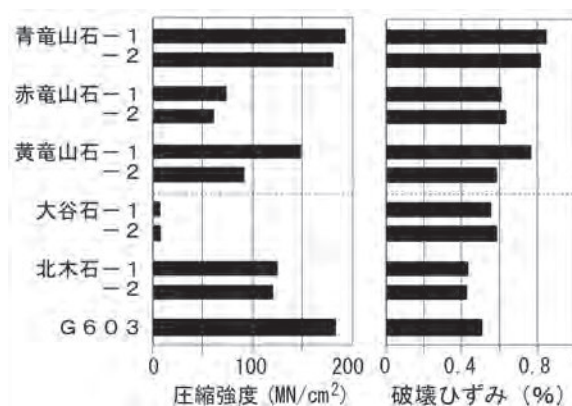


図 8-19 各岩石の圧縮強度と破壊ひずみ

でやや低い圧縮強度を示すが、おおまかに花崗岩類と同程度の強度を示す。

一方破壊ひずみを見た時、花崗岩類と大谷石は破壊ひずみが小さい。花崗岩類と大谷石のひずみ量が大きくないのは、花崗岩類が非常に硬く変形しにくいのにに対し、大谷石は脆く、大きくひずむ前に破壊されるためである。現在盛んに採石されている青竜山石をそれらと比較した場合、花崗岩類と同程度の圧縮強度で硬い岩石といえるが、同じ応力が加えられた時のひずみが大きい。つまり、花崗岩類は硬くてもろいのにに対し、青竜山石は硬く粘りがある岩石と見ることができる。花崗岩と同程度の硬さであっても加工しやすいのはこの破壊ひずみの差を反映しているのであろう。

このような青竜山石の性質を支えているのは、岩石に含まれる鉱物とその構造である。前述のように、この岩石が青緑色をしている要因は緑泥石の存在にあるが、緑泥石は粘土鉱物と同じ層状鉱物であり、塑性変形しやすい。そのような緑泥石が基質全体に含まれることが、青竜山石の粘りをつくり出している可能性がある。それに加えて、流紋岩片と基質の境界がはっきりせず、両者が漸移していることも、この岩石の破壊されにくさと加工しやすさをもたらしていると考えられる。

黄竜山石が青竜山石には劣るものの、硬さと粘り気を保っているのは、青竜山石の性質を引き継ぎながら、ある程度地下深部で緑泥石から粘土鉱物に変化する反応が起こったことによるのかもしれない。赤竜山石はさらに低い圧縮強度と破壊ひずみを有し、同程度の応力が加えられた場合、竜山石の中では最も早く破壊されるが、これはスメクタイトがより多く含まれていることと関係するのかもしれない。いずれにしても花崗岩と同程度の強さとそれ以上のひずみ量を有し、これら竜山石の強度特性を一言で表現すると、粘り気のある丈夫な岩石といえる。

3. 白亜紀火成岩の中での竜山石

日本列島で産する石材のうち、おそらく最も多いのは花崗岩で、それに次いで多いのが凝灰岩であろう。図 8-20 は全国各地の花崗岩と凝灰岩類の主要な石材産地を示したものである。そのうち凝灰岩類の石材産地は大部分が大谷石と同じ新生代新第三紀のものである。これらはグリーンタフと呼ばれるほぼ同時期の火成活動の産物で、水と反応して著しく変質している。凝灰岩の石材が軟岩の代表とされるのは、このことによっている。

一方、竜山石は中生代白亜紀の火成活動で形成されたもので、他の凝灰岩類と同等に扱うことはできない。中生代白亜紀～新生代古第三紀には西南日本内帯に大規模な火成活動が起こり、近畿～中国地方にはこの頃の火山岩類が広く分布している。しかし同時代の凝灰岩類で石材として加



図 8-20 日本列島の主な凝灰岩と花崗岩石材

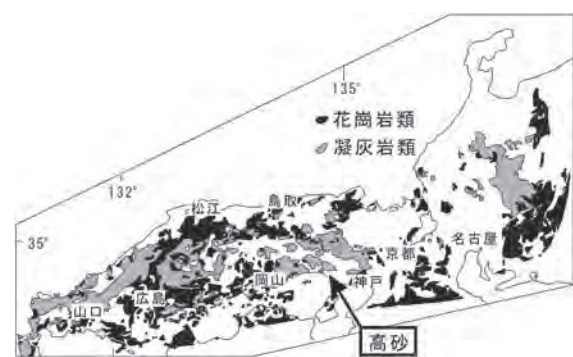


図 8-21 西南日本の白亜紀～古第三紀凝灰岩類と花崗岩類の分布

工されているものは竜山石とその周辺の岩石のみである。

経験的に見て、一般に白亜紀～古第三紀の凝灰岩類は非常に硬く、丈夫ではあるが加工には不向きであるため、石垣等に使われることはあっても、それらで造られた石造品を見ることはまれである。それらの大部分は大規模な火砕流で形成された溶結凝灰岩であり、結晶質なものが多いことである。多くの場合、基質は微細な石英・長石などからなっていて花崗岩類と同じ鉱物組み合わせを示すことから見て、花崗岩と同程度の圧縮強度と破壊ひずみを示すことが想定される。おそらく大部分の白亜紀～古第三紀凝灰岩類と比べて竜山石は破壊ひずみ量が大きいため、硬いにもかかわらず加工が容易で、石材として使用されるにいたったと考えられる。

多くの白亜紀～古第三紀凝灰岩類が結晶質であることの要因としては、地下に存在する花崗岩の熱による再結晶や、非常に厚くたまった火砕流堆積物内部の熱による再結

晶が想定されるが、竜山石にそのような再結晶は見られない。もっとも新鮮な青竜山石の場合、基質は緑泥石と微細な石英・長石からなっている。緑泥石は粘土鉱物の一種であり変形しやすい鉱物である。竜山石の変形係数が花崗岩類より小さいのは、おそらくこの緑泥石の存在が大きいと考えられる。同時代の他の凝灰岩類と異なって、堆積後に大きな熱の影響を受けず、続成作用の過程で緑泥石が生成されたことが、この岩石の特殊な性質を作り出したのであろう。また、黄竜山石はその性質を保ちながら地下水との反応により緑泥石がスメクタイトと水酸化鉄に変化して形成されたもので、地表にさらされてからの風化変質とは異なる過程で生成されたのであろう。

【引用・参考文献】

- Hedenquist JW, Izawa E, Arribas A, White NC (1996) Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. Resource Geology Special Publication No.1, Soc. Resource Geology, 16p.
- 尾崎正紀・原山 智(2003)高砂地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 87p
- 先山 徹(2005) 第2章 岩石と定義. 高砂市教育委員会編「竜山市石切場―竜山石採掘遺跡詳細分布調査報告書―」, 高砂市, 9-22.

【巻末資料】

○一軸圧縮強度試験結果 一覧表

黄竜山石-1			黄竜山石-2		
行番号	軸ひずみ	応力	行番号	軸ひずみ	応力
	(%)	(MN/m ²)		(%)	(MN/m ²)
1	0.00	0.0	1	0.00	0.0
2	0.00	0.2	2	0.00	0.2
3	0.00	0.4	3	0.01	0.4
4	0.01	0.7	4	0.01	0.6
5	0.01	1.1	5	0.02	0.9
6	0.02	1.5	6	0.03	1.2
7	0.02	2.0	7	0.03	1.5
8	0.03	2.4	8	0.04	1.9
9	0.03	2.9	9	0.04	2.2
10	0.04	3.3	10	0.05	2.6
11	0.04	3.7	11	0.05	3.0
12	0.05	4.1	12	0.06	3.4
13	0.05	4.6	13	0.06	3.8
14	0.06	5.1	14	0.07	4.2
15	0.06	5.6	15	0.08	4.6
16	0.07	6.1	16	0.08	4.9
17	0.07	6.6	17	0.09	5.3
18	0.07	7.1	18	0.09	5.7
19	0.08	7.6	19	0.09	6.2
20	0.08	8.2	20	0.10	6.6
21	0.09	8.8	21	0.10	7.1
22	0.09	9.3	22	0.11	7.6
23	0.09	9.9	23	0.11	8.1
24	0.10	10.5	24	0.12	8.6
25	0.10	11.1	25	0.12	9.1
26	0.11	11.7	26	0.12	9.7
27	0.11	12.4	27	0.13	10.2
28	0.11	13.1	28	0.13	10.8
29	0.12	13.8	29	0.14	11.3
30	0.12	14.5	30	0.14	11.8
31	0.13	15.2	31	0.15	12.4
32	0.13	16.0	32	0.15	13.0
33	0.14	16.9	33	0.16	13.6
34	0.14	17.7	34	0.16	14.2
35	0.15	18.6	35	0.17	14.9
36	0.15	19.5	36	0.17	15.5
37	0.16	20.4	37	0.18	16.2
38	0.16	21.3	38	0.19	16.9
39	0.16	22.3	39	0.19	17.6
40	0.17	23.2	40	0.20	18.3
41	0.17	24.2	41	0.20	19.0
42	0.18	25.3	42	0.21	19.7
43	0.18	26.4	43	0.21	20.4
44	0.19	27.4	44	0.22	21.2
45	0.19	28.4	45	0.22	21.9
46	0.20	29.4	46	0.23	22.7
47	0.20	30.4	47	0.23	23.5
48	0.21	31.5	48	0.24	24.3
49	0.21	32.7	49	0.25	25.1
50	0.22	33.8	50	0.25	25.9
51	0.23	35.1	51	0.26	26.7
52	0.23	36.4	52	0.26	27.6
53	0.24	37.7	53	0.27	28.5
54	0.25	39.0	54	0.28	29.5
55	0.25	40.2	55	0.28	30.4
56	0.26	41.5	56	0.29	31.3
57	0.27	42.8	57	0.29	32.2
58	0.27	44.0	58	0.30	33.1
59	0.28	45.3	59	0.31	34.0
60	0.28	46.6	60	0.31	35.0
61	0.29	47.9	61	0.32	36.0
62	0.30	49.2	62	0.32	37.1
63	0.30	50.6	63	0.33	38.1
64	0.31	52.0	64	0.34	39.1
65	0.32	53.3	65	0.34	40.1

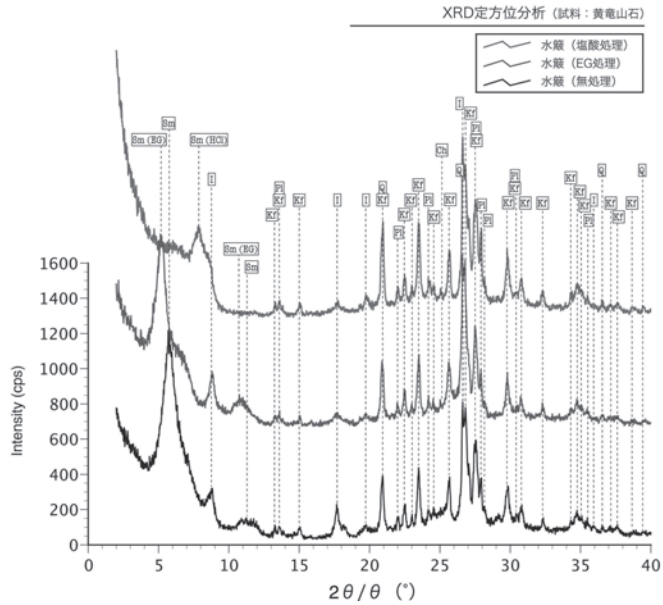
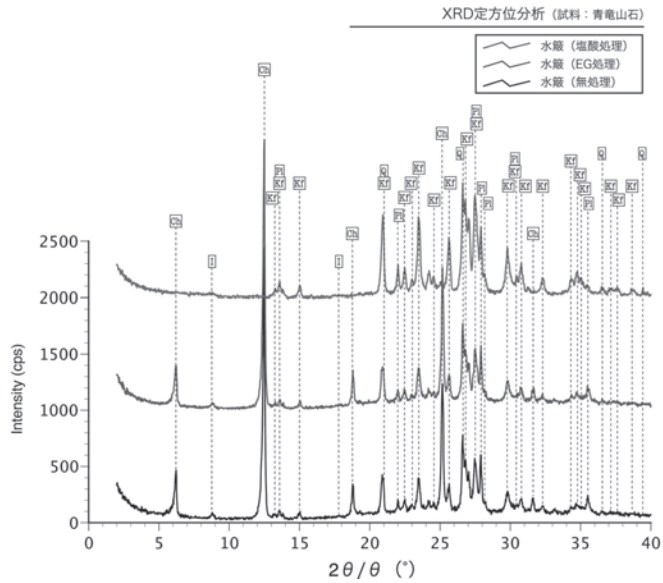
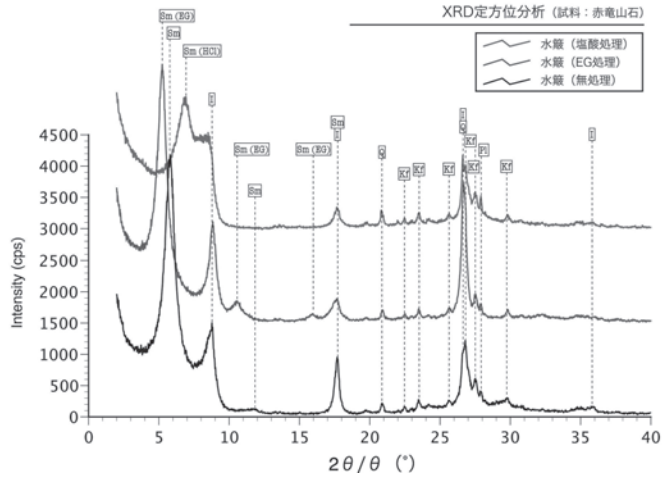
青竜山石-1			青竜山石-2		
行番号	軸ひずみ	応力	行番号	軸ひずみ	応力
	(%)	(MN/m2)		(%)	(MN/m2)
1	0.00	0.0	1	0.00	0.0
2	0.00	0.1	2	0.00	0.2
3	0.00	0.2	3	0.00	0.4
4	0.00	0.4	4	0.01	0.7
5	0.01	0.6	5	0.01	1.0
6	0.01	0.9	6	0.01	1.3
7	0.01	1.1	7	0.02	1.6
8	0.01	1.4	8	0.02	2.0
9	0.02	1.6	9	0.03	2.3
10	0.02	1.9	10	0.03	2.7
11	0.02	2.2	11	0.04	3.1
12	0.02	2.6	12	0.04	3.4
13	0.03	2.9	13	0.05	3.8
14	0.03	3.3	14	0.05	4.1
15	0.03	3.7	15	0.06	4.5
16	0.04	4.1	16	0.06	4.9
17	0.04	4.5	17	0.07	5.3
18	0.04	4.9	18	0.07	5.7
19	0.05	5.3	19	0.08	6.1
20	0.05	5.8	20	0.08	6.6
21	0.05	6.2	21	0.09	7.0
22	0.06	6.7	22	0.09	7.5
23	0.06	7.1	23	0.09	8.0
24	0.06	7.6	24	0.10	8.5
25	0.06	8.0	25	0.10	9.0
26	0.07	8.5	26	0.11	9.5
27	0.07	9.0	27	0.11	10.1
28	0.07	9.5	28	0.12	10.7
29	0.07	10.0	29	0.12	11.3
30	0.08	10.5	30	0.12	11.9
31	0.08	11.0	31	0.13	12.5
32	0.08	11.5	32	0.14	13.1
33	0.09	12.1	33	0.14	13.8
34	0.09	12.7	34	0.15	14.5
35	0.09	13.3	35	0.15	15.1
36	0.10	13.9	36	0.16	15.9
37	0.10	14.5	37	0.16	16.6
38	0.10	15.1	38	0.17	17.4
39	0.11	15.8	39	0.17	18.2
40	0.11	16.5	40	0.18	19.0
41	0.11	17.2	41	0.18	19.8
42	0.12	18.0	42	0.19	20.6
43	0.12	18.8	43	0.19	21.5
44	0.13	19.7	44	0.20	22.4
45	0.13	20.5	45	0.21	23.3
46	0.13	21.3	46	0.21	24.2
47	0.14	22.1	47	0.22	25.2
48	0.14	23.0	48	0.22	26.1
49	0.15	23.9	49	0.23	27.1
50	0.15	24.8	50	0.23	28.1
51	0.16	25.6	51	0.24	29.2
52	0.16	26.6	52	0.24	30.3
53	0.16	27.5	53	0.25	31.4
54	0.17	28.4	54	0.26	32.5
55	0.17	29.4	55	0.26	33.7
56	0.18	30.4	56	0.27	34.8
57	0.18	31.5	57	0.27	35.9
58	0.19	32.6	58	0.28	37.1
59	0.19	33.7	59	0.29	38.3
60	0.20	34.8	60	0.29	39.5
61	0.20	35.8	61	0.30	40.8
62	0.21	36.9	62	0.30	42.0
63	0.21	38.0	63	0.31	43.3
64	0.22	39.1	64	0.32	44.6
65	0.22	40.2	65	0.32	45.8

赤竜山石-1			赤竜山石-2		
行番号	軸ひずみ	応力	行番号	軸ひずみ	応力
	(%)	(MN/m2)		(%)	(MN/m2)
1	0.00	0.0	1	0.00	0.0
2	0.00	0.0	2	0.00	0.0
3	0.00	0.1	3	0.00	0.1
4	0.00	0.2	4	0.01	0.3
5	0.01	0.2	5	0.01	0.4
6	0.01	0.3	6	0.01	0.6
7	0.02	0.4	7	0.01	0.8
8	0.02	0.6	8	0.02	0.9
9	0.03	0.7	9	0.02	1.1
10	0.03	0.8	10	0.02	1.3
11	0.04	0.9	11	0.03	1.5
12	0.04	1.0	12	0.03	1.7
13	0.04	1.1	13	0.03	1.9
14	0.04	1.2	14	0.04	2.1
15	0.05	1.4	15	0.04	2.4
16	0.05	1.5	16	0.05	2.6
17	0.05	1.7	17	0.05	2.8
18	0.06	1.8	18	0.06	3.1
19	0.06	2.0	19	0.06	3.4
20	0.06	2.2	20	0.07	3.6
21	0.07	2.3	21	0.07	3.9
22	0.07	2.5	22	0.07	4.2
23	0.07	2.7	23	0.08	4.5
24	0.08	2.9	24	0.08	4.8
25	0.08	3.1	25	0.09	5.1
26	0.08	3.3	26	0.09	5.5
27	0.08	3.5	27	0.10	5.8
28	0.09	3.8	28	0.10	6.1
29	0.09	4.0	29	0.10	6.3
30	0.10	4.2	30	0.11	6.6
31	0.10	4.5	31	0.11	6.9
32	0.10	4.7	32	0.11	7.3
33	0.10	5.0	33	0.12	7.6
34	0.11	5.2	34	0.12	8.0
35	0.11	5.5	35	0.13	8.3
36	0.11	5.8	36	0.13	8.7
37	0.12	6.0	37	0.13	9.0
38	0.12	6.3	38	0.14	9.4
39	0.12	6.6	39	0.14	9.8
40	0.12	6.9	40	0.14	10.2
41	0.13	7.1	41	0.15	10.6
42	0.13	7.4	42	0.15	11.0
43	0.13	7.7	43	0.16	11.4
44	0.13	8.0	44	0.16	11.8
45	0.14	8.3	45	0.17	12.2
46	0.14	8.6	46	0.17	12.6
47	0.14	8.9	47	0.17	13.1
48	0.14	9.2	48	0.18	13.6
49	0.15	9.5	49	0.18	14.0
50	0.15	9.8	50	0.19	14.4
51	0.15	10.1	51	0.19	14.9
52	0.16	10.4	52	0.20	15.4
53	0.16	10.7	53	0.20	15.9
54	0.16	11.0	54	0.21	16.4
55	0.16	11.3	55	0.21	16.9
56	0.17	11.7	56	0.22	17.4
57	0.17	12.0	57	0.22	17.9
58	0.17	12.3	58	0.23	18.5
59	0.18	12.7	59	0.24	19.0
60	0.18	13.0	60	0.24	19.5
61	0.18	13.4	61	0.25	20.1
62	0.19	13.8	62	0.25	20.6
63	0.19	14.1	63	0.26	21.2
64	0.19	14.5	64	0.26	21.8
65	0.20	14.9	65	0.27	22.4

大谷石-1			大谷石-2			北木石-1			北木石-2		
行番号	軸ひずみ	応力	行番号	軸ひずみ	応力	行番号	軸ひずみ	応力	行番号	軸ひずみ	応力
	(%)	(MN/m2)		(%)	(MN/m2)		(%)	(MN/m2)		(%)	(MN/m2)
1	0.00	0.0	1	0.00	0.0	1	0.00	0.0	1	0.00	0.0
2	0.00	0.1	2	0.00	0.0	2	0.00	0.1	2	0.00	0.2
3	0.01	0.2	3	0.01	0.1	3	0.00	0.3	3	0.01	0.4
4	0.02	0.4	4	0.02	0.1	4	0.01	0.6	4	0.01	0.6
5	0.03	0.5	5	0.03	0.2	5	0.01	0.8	5	0.01	0.9
6	0.04	0.6	6	0.04	0.2	6	0.01	1.1	6	0.02	1.2
7	0.05	0.8	7	0.05	0.3	7	0.02	1.3	7	0.02	1.6
8	0.05	0.9	8	0.05	0.3	8	0.02	1.6	8	0.03	2.0
9	0.06	1.0	9	0.06	0.4	9	0.03	2.0	9	0.03	2.4
10	0.07	1.2	10	0.06	0.4	10	0.03	2.3	10	0.04	2.9
11	0.08	1.3	11	0.07	0.5	11	0.03	2.6	11	0.04	3.4
12	0.09	1.5	12	0.07	0.6	12	0.04	2.9	12	0.04	3.9
13	0.10	1.7	13	0.08	0.7	13	0.04	3.3	13	0.05	4.4
14	0.11	1.8	14	0.09	0.7	14	0.04	3.7	14	0.05	4.9
15	0.12	2.0	15	0.10	0.8	15	0.05	4.1	15	0.06	5.4
16	0.13	2.1	16	0.11	0.9	16	0.05	4.5	16	0.06	5.9
17	0.13	2.3	17	0.11	1.0	17	0.05	5.0	17	0.06	6.4
18	0.15	2.4	18	0.12	1.1	18	0.05	5.4	18	0.07	7.0
19	0.15	2.6	19	0.13	1.2	19	0.06	5.9	19	0.07	7.6
20	0.16	2.7	20	0.14	1.3	20	0.06	6.4	20	0.08	8.2
21	0.17	2.9	21	0.15	1.4	21	0.06	6.9	21	0.08	8.9
22	0.18	3.0	22	0.15	1.5	22	0.07	7.4	22	0.08	9.6
23	0.19	3.1	23	0.16	1.6	23	0.07	7.9	23	0.09	10.3
24	0.20	3.3	24	0.17	1.8	24	0.07	8.4	24	0.09	11.1
25	0.21	3.4	25	0.18	1.9	25	0.07	8.9	25	0.10	11.9
26	0.22	3.5	26	0.19	2.0	26	0.08	9.4	26	0.10	12.8
27	0.22	3.7	27	0.20	2.1	27	0.08	10.0	27	0.11	13.7
28	0.23	3.8	28	0.21	2.2	28	0.08	10.6	28	0.11	14.5
29	0.24	3.9	29	0.22	2.4	29	0.08	11.3	29	0.11	15.4
30	0.25	4.1	30	0.22	2.5	30	0.09	11.9	30	0.12	16.3
31	0.26	4.3	31	0.23	2.6	31	0.09	12.7	31	0.12	17.3
32	0.27	4.4	32	0.24	2.7	32	0.09	13.5	32	0.12	18.2
33	0.28	4.5	33	0.25	2.8	33	0.10	14.2	33	0.13	19.2
34	0.29	4.6	34	0.26	3.0	34	0.10	15.0	34	0.13	20.2
35	0.30	4.8	35	0.27	3.1	35	0.10	15.7	35	0.13	21.3
36	0.31	5.0	36	0.28	3.2	36	0.11	16.6	36	0.14	22.4
37	0.32	5.1	37	0.29	3.3	37	0.11	17.5	37	0.14	23.5
38	0.33	5.2	38	0.29	3.5	38	0.11	18.5	38	0.15	24.6
39	0.34	5.3	39	0.30	3.6	39	0.12	19.4	39	0.15	25.8
40	0.35	5.5	40	0.31	3.7	40	0.12	20.4	40	0.15	27.1
41	0.36	5.6	41	0.32	3.9	41	0.12	21.4	41	0.16	28.4
42	0.37	5.7	42	0.33	4.0	42	0.13	22.4	42	0.16	29.9
43	0.38	5.9	43	0.34	4.1	43	0.13	23.4	43	0.17	31.3
44	0.38	6.0	44	0.35	4.2	44	0.14	24.4	44	0.18	32.8
45	0.39	6.1	45	0.36	4.4	45	0.14	25.5	45	0.18	34.3
46	0.40	6.2	46	0.37	4.5	46	0.14	26.5	46	0.18	35.7
47	0.41	6.3	47	0.38	4.6	47	0.15	27.7	47	0.19	37.2
48	0.42	6.4	48	0.39	4.8	48	0.15	28.8	48	0.20	38.7
49	0.43	6.6	49	0.40	4.9	49	0.16	29.9	49	0.20	40.2
50	0.44	6.7	50	0.41	5.0	50	0.16	30.9	50	0.21	41.8
51	0.45	6.8	51	0.42	5.1	51	0.16	32.1	51	0.21	43.3
52	0.46	6.9	52	0.43	5.3	52	0.17	33.4	52	0.22	45.0
53	0.47	7.0	53	0.44	5.4	53	0.17	34.6	53	0.22	46.7
54	0.48	7.1	54	0.45	5.5	54	0.18	35.9	54	0.23	48.3
55	0.49	7.1	55	0.46	5.6	55	0.18	37.1	55	0.23	49.9
56	0.50	7.2	56	0.47	5.7	56	0.19	38.4	56	0.24	51.5
57	0.50	7.3	57	0.47	5.8	57	0.19	39.6	57	0.24	53.3
58	0.52	7.4	58	0.48	6.0	58	0.19	40.9	58	0.25	55.1
59	0.53	7.5	59	0.49	6.1	59	0.20	42.2	59	0.25	56.9
60	0.53	7.5	60	0.50	6.2	60	0.20	43.5	60	0.26	58.7
61	0.55	7.5	61	0.52	6.3	61	0.21	44.8	61	0.27	60.5
62	0.56	7.5	62	0.52	6.4	62	0.21	46.3	62	0.27	62.8
63	0.57	7.5	63	0.54	6.5	63	0.22	47.7	63	0.28	64.6
64	0.59	7.4	64	0.55	6.6	64	0.22	49.1	64	0.28	66.4
65	0.60	7.2	65	0.56	6.7	65	0.22	50.6	65	0.29	67.9

G603		
行番号	軸ひずみ	応力
	(%)	(MN/m ²)
1	0.00	0.0
2	0.00	0.2
3	0.01	0.4
4	0.01	0.7
5	0.02	1.0
6	0.02	1.3
7	0.03	1.6
8	0.03	1.9
9	0.03	2.3
10	0.04	2.7
11	0.04	3.1
12	0.05	3.6
13	0.05	4.1
14	0.06	4.7
15	0.06	5.2
16	0.07	5.8
17	0.07	6.4
18	0.08	7.1
19	0.08	7.7
20	0.09	8.4
21	0.09	9.1
22	0.10	9.9
23	0.10	10.6
24	0.11	11.4
25	0.11	12.2
26	0.11	13.1
27	0.12	14.0
28	0.12	14.8
29	0.13	15.8
30	0.13	16.7
31	0.14	17.7
32	0.14	18.7
33	0.14	19.8
34	0.15	21.0
35	0.15	22.1
36	0.16	23.2
37	0.16	24.4
38	0.17	25.7
39	0.17	27.1
40	0.18	28.5
41	0.18	30.0
42	0.19	31.4
43	0.19	32.9
44	0.19	34.4
45	0.20	35.9
46	0.20	37.4
47	0.21	39.0
48	0.21	40.5
49	0.22	42.1
50	0.22	43.7
51	0.23	45.3
52	0.23	47.0
53	0.24	48.8
54	0.24	50.5
55	0.24	52.2
56	0.25	54.0
57	0.25	55.8
58	0.26	57.7
59	0.26	59.7
60	0.27	61.7
61	0.27	63.8
62	0.28	65.8
63	0.29	67.9
64	0.29	69.8
65	0.30	71.7

○粉末 X 線回折定方位分析



○粉末 X 線回折不定方位分析

