

# 足羽山産凝灰岩の風化に関する研究 (第1報) — 風化の過程に関する研究 —

伊 藤 一 郎 ・ 港 種 雄  
澤 崎 雅 之 ・ 永 全 立 樹

## Studies on the Weathering of Tuffaceous Rocks in the Region of Mount Asuwa, Fukui (1st Report)

Ichiro ITO, Taneo MINATO, Masayuki SAWAZAKI  
and Tatuji NAGATAKE

Different weathered samples of tuffaceous rocks from the region of Mount Asuwa in Fukui city — so-called Shakudani-ishi — have been investigated from the geological and rock mechanics points of view.

At first, to clarify the difference in mineral constituents in each sample, microscopic observations, x-ray powder analyses, and quantitative analyses by the scanning type x-ray fluorescence spectrometer have been carried out.

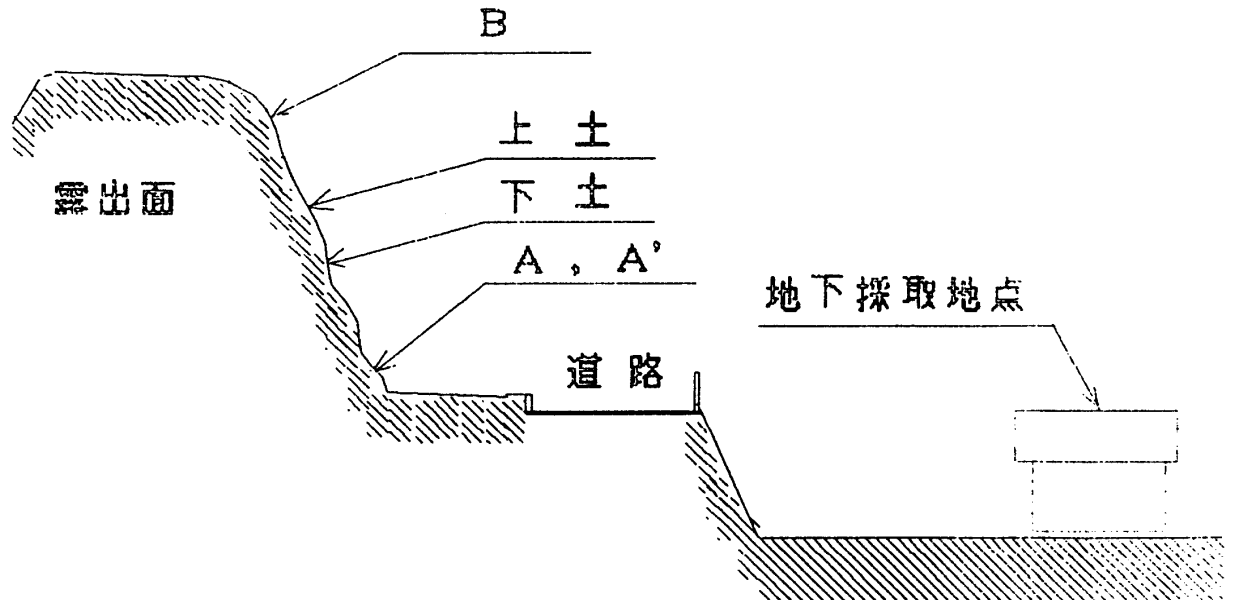
The results of these studies showed that the gradual weathering of these tuffaceous rocks has proceeded mainly through deterioration due to alteration and succeeded breakdown of plagioclase originally contained in these rocks and also from the results of microscopic observation we could finally identify these rocks as the weathered or slightly weathered dacitic welded tuffs.

### 1. 緒 言

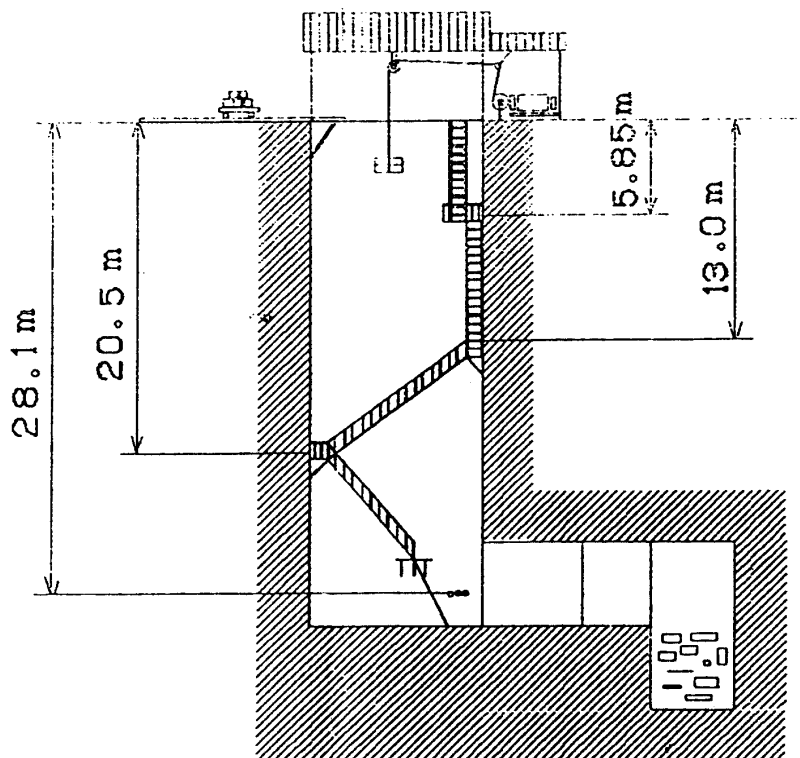
岩石の風化現象は古くから注目されているにもかかわらず、風化そのものが極めて長期間にわたって行われる変質現象であるために、適切な資料を採取することがむずかしく、また人工的に風化を促進できるような実験環境を整備することも極めて困難であるため、岩石の風化現象に関する本格的な研究は最近になってようやく始められるようになったといつてよい。いっぽう、岩石の風化は対象となる岩石の特性に応じてその程度を異にするものであるから、岩石別にそれぞれの風化現象を解明することによってはじめてその全体像が明らかにされるような性質のものである。そのためには、できるだけ多くの種類の岩石を対象にして研究することが必要であるが、今日までに研究の対象として取り上げられた岩石は、花崗岩や砂岩、一部の火成岩等に限定されており<sup>1)~7)</sup>、他の岩石類についての研究はその数が少ない。

そこで本研究では、今までに比較的研究が少ない凝灰岩の風化現象について研究することにした。本研究で凝灰岩を取り上げたのは次の理由による。すなわち、

- ① 当福井市内の足羽山には典型的な凝灰岩の一種と考えられている笏谷石が広く分布しており、現在もなお採掘作業が行われているため、試料の採取が比較的容易である。
- ② 笏谷石の採掘の歴史は古く、おおよそ1500年前に遡るといわれているが、その後も幾多の消



(a) 地表部試料採取位置図



(b) 地表面下試料採取位置図

図1 試料採取位置図

長を経つつ現在まで断続的に続けられてきており、主として石材として多方面の用途に供されているにもかかわらず、笏谷凝灰石の特性、とくにその風化現象に関する研究は今日までにまったく行われていない。したがって、笏谷石をすぐれた石材資源として今後とも活用していくためにも、笏谷凝灰岩の風化特性が明らかにされていることが望ましいと考えられるからである。

## 2. 試料採取

### 2.1 試料採取地と採取の方法

足羽山の地質は第三紀中新世に属し、今から約1600万年前の火山活動で噴出した火山灰や岩石で構成されており、小山谷凝灰岩層と笏谷凝灰岩層の2層が中心となっている。笏谷凝灰岩層は小山谷凝灰岩層の下にあり、足羽山の主体を構成しているが、主として火山礫凝灰岩層ないし小山谷角礫層から成り、一般に塊状または層をなしている。

今回、試料採取を行った場所は笏谷断層の西北部に分布している笏谷凝灰岩の地域内であって、図1に示すように、試料は、越前石株式会社所有の採掘用立坑内およびその地表上で採取した。

地下試料は、現地表から下へ深さ28.1m, 20.5m, 13.0m, 5.85mの各位置で水平ボーリングを行って採取した。ボーリングに使用した器具は、マキタ電動工具製の型名6300TBWダイヤコアドリルで、これを岩層面に押しつけつつ回転穿孔させ、そのコアとして試料を採取した。この器具の穿孔能力は $\phi=54\text{mm}$ 、深さ180mmである。なお、試料採取後、それぞれの地点においてシュミットテストハンマーによる反発度試験を行った。

地上試料は、岩石露出面の上端部（B）、下端部（A, A'）において採取した。さらにAとA'は同位置で採取したが、色が異なっていたため区別して扱った。また、これらの露出面の中間付近を被覆して堆積していたものを土壌試料として採取し、採取位置によって上部のものをSU試料、下部のものをSD試料として区別した。

なお、先に述べた現地表という表現は、昭和38年頃、採掘のための立坑および諸施設を設けるために今の地表まで掘削されたもので、元の地表はB地点より高い位置にあったということである。

### 2.2 試料の区分とその整形ならびに保存

採取した試料は、岩石試料と土壌試料とに分け、表1(a), (b)に示すように、採取地点別に名称をつけて区別して呼ぶことにした。なお、表1には、それぞれの試料別に外観上の特徴をも付記した。

採取した岩石試料は実験室に持ち帰り、取り敢えずそのまま蒸留水中で保存し、その後各試料を順次取り出し、金切り鋸を用いて所定の長さに切断した。

側面および上下両端面の仕上げは次の方法によった。すなわち、側面および上下両端面とも100メッシュ程度の研磨剤を用いて粗仕上げを行い、さらに上下両端面については、粒度400メッシュの研磨剤により十分研磨し、精密仕上げを行った。

表1 試料の区分

(a) 岩石試料の区分

試料名称	採取地点(m)	試料の外観
B	地表	表面は、風化が進んだせいか凹凸が激しく土にちかい。色は、ライト・レッド色を基本としてところによりライト・メイ・グリーン色の塊がある。
A	地表	表面は、地下試料と同じだがやや凹凸があった。色は、ライト・ターコイズ色。
A'	地表	表面は、地下試料と同じだがやや凹凸があった。色は、ライト・メイ・グリーン色。
C	- 5.85	表面は、緻密に礫などが混じっており、色は、ペイル・ウォーム・グレイ
D	-13.00	表面は、緻密に礫などが混じっており、色は、ペイル・ウォーム・グレイ
E	-20.50	表面は、緻密に礫などが混じっており、色は、ペイル・ウォーム・グレイ
F	-28.10	表面は、緻密に礫などが混じっており、色は、ペイル・ウォーム・グレイ

(b) 土壌試料の区分

試料名称	採取地点(m)	試料の外観
SU	地表(上部)	ほとんど土で、色はライト・レッド色。
SD	地表(下部)	ほとんど土で、色はライト・レッド色。

表2 供試体の諸元

試料	試料記号	高さ(cm)	体積(cm <sup>3</sup> )	断面積(cm <sup>2</sup> )	直径(cm)
F	F-1	9.960	185	18.57	4.86
	F-2	9.835	180	18.30	4.83
	F-3	9.925	185	18.64	4.87
	F-4	9.940	190	19.11	4.93
	F-5	9.955	183	18.38	4.84
E	E-1	9.970	186	18.66	4.87
	E-2	9.955	185	19.37	4.97
	E-3	9.960	186	18.67	4.88
	E-4	9.980	183	18.34	4.83
	E-5	9.960	190	19.08	4.93
D	D-1	9.960	188	18.88	4.90
	D-2	9.955	187	18.78	4.89
	D-3	9.945	190	19.11	4.93
	D-4	9.950	189	18.99	4.92
	D-5	9.960	190	19.08	4.93
C	C-1	9.945	189	19.00	4.92
	C-2	9.960	190	19.08	4.93
	C-3	9.950	190	19.10	4.93
	C-4	9.935	190	19.11	4.93
	C-5	9.940	189	19.01	4.92
A A'	A-1	9.950	189	18.99	4.92
	A-2	9.945	187	18.80	4.89
	A-3	9.945	189	19.00	4.92
	A'-4	9.940	188	18.91	4.91
	A'-5	9.930	188	18.93	4.91

整形後の試料は円柱形で、これらを目的に応じて各種実験の供試体として用いた。なお整形終了後各供試体は再び蒸留水中に浸して保存した。表2には各供試体の諸元を示した。

### 3. 鉱物組成試験

風化度の差による鉱物組成の相違を調べるために、鉱物顕微鏡による観察、X線分析および定量分析を行った。

#### 3.1 顕微鏡観察

鉱物顕微鏡による観察は、地上より採取したB試料および地下28.1mの地点において採取したF試料について行った。

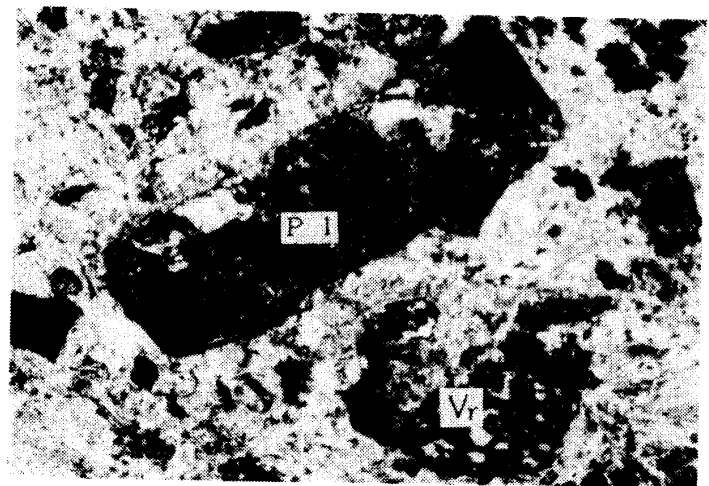
##### (1) B 試料

外観観察では、この試料は著しく風化をうけており、全体に赤褐色で、岩石片や鉱物片が不規則に含まれ、また粗鬆で脆弱土塊状であった。

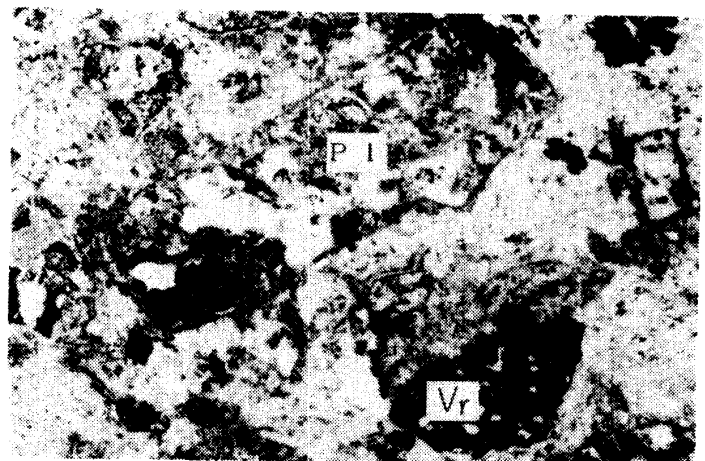
顕微鏡観察の結果の一例を図2に示す。一般に著しく変質されているが、斑状組織が認められる。斑晶は、斜長石（仮像）を主とし、これを微細な鉱物からなる石基がうめている。これらの斑晶斜長石の多くは長柱状、短冊状をなし、大きなものでは約2mm×0.6mm、小さなもので約0.4mm×0.2mmであるが、ほとんど完全に分解されており、粘土鉱物や鉄鉱などの集合体になっている。斑晶斜長石のほかに、丸みを帯びた安山岩質火山岩片（約1.0mm×0.5mm）、不透明で褐色または黒色の不規則形のほとんど褐鉄鉱化した鉄鉱が乱雑に散在する。石基は微細なシリカ鉱物、ほとんど褐鉄鉱化した鉄鉱粒子、緑泥石、粘土鉱物などからなり、全体に著しく不均質である。これらのことから、この岩石は著しく風化した石英安山岩質溶結凝灰岩であると考えられる。

##### (2) F 試料

外観観察では、淡緑灰色（淡緑青色）を呈しており、火山岩片や鉱物片が不規則に含まれ、ま



(a) クロスニコル ×40

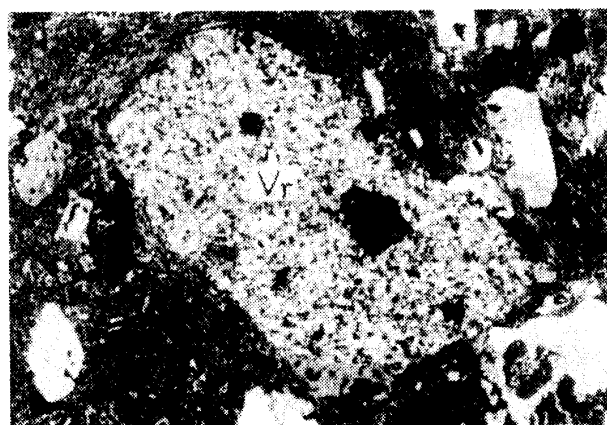


(b) 単ニコル ×40

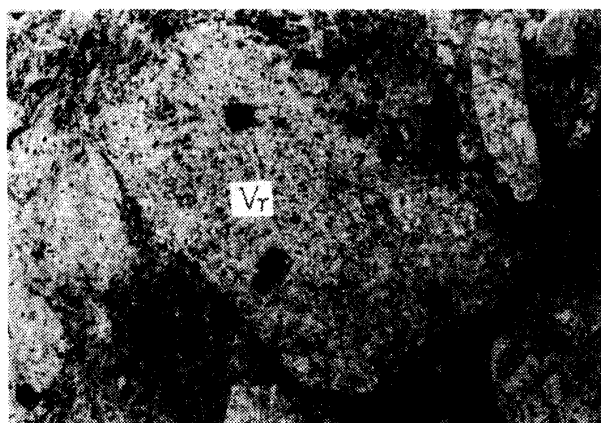
図2 B試料の顕微鏡写真

た火山灰が筋状に入り全体に不均質であるが、塊状で堅硬である。

顕微鏡観察の結果の一例を図3に示す。図にみられるように、さまざまな大きさの斑晶を含む斑状組織を呈する。斑晶のうち最も大きいのは斜長石で、石英は少ない。斜長石は自形の柱状または短冊状結晶をなし、大きさは1.2mm×0.65mm程度のものから0.15mm×0.1mm程度のものである。石英は大きなものでも1.0mm×0.2mm程度で、破片状をなしているものが多い。石英は比較的新鮮であるが、斜長石は新鮮なものが少なく、そのほとんどが絹雲母化、方解石化、あるいは粘土鉱物化をうけている。石基は大部分が微細なシリカ鉱物や粘土鉱物からなるが、ところにより細粒の石英や粒状の黒色不透明な鉱物などが多数散在し、全体に著しく不均質である。なお、石基中には安山岩質火山岩片や脱ガラス化した岩石片などが含まれ、弱いユータキシティック構造が認められる。これらのことから、この岩石は風化度が比較的低い石英安山岩質溶結凝灰岩と判定できる。



(a) クロスニコル ×40



(b) 単ニコル ×40

図3 F試料の顕微鏡写真

### 3. 2 X線分析

地上試料B（最上部）、同A'（中間部）および地下試料F（最下部）の3種類の試料をえらび、これらについてX線粉末回折による分析を行った。

表3 岩石試料のX線粉末回折結果のまとめ

試料	検出された鉱物
地上試料 B	石英, 絹雲母, 緑泥石, ハロサイト, パイロフィライト, トリディマイト
地上試料 A'	斜長石, 石英, 絹雲母, 緑泥石, パイロフィライト, トリディマイト
地下試料 F (-28.1m)	斜長石, 石英, 絹雲母, 方解石, 緑泥石, パイロフィライト, トリディマイト

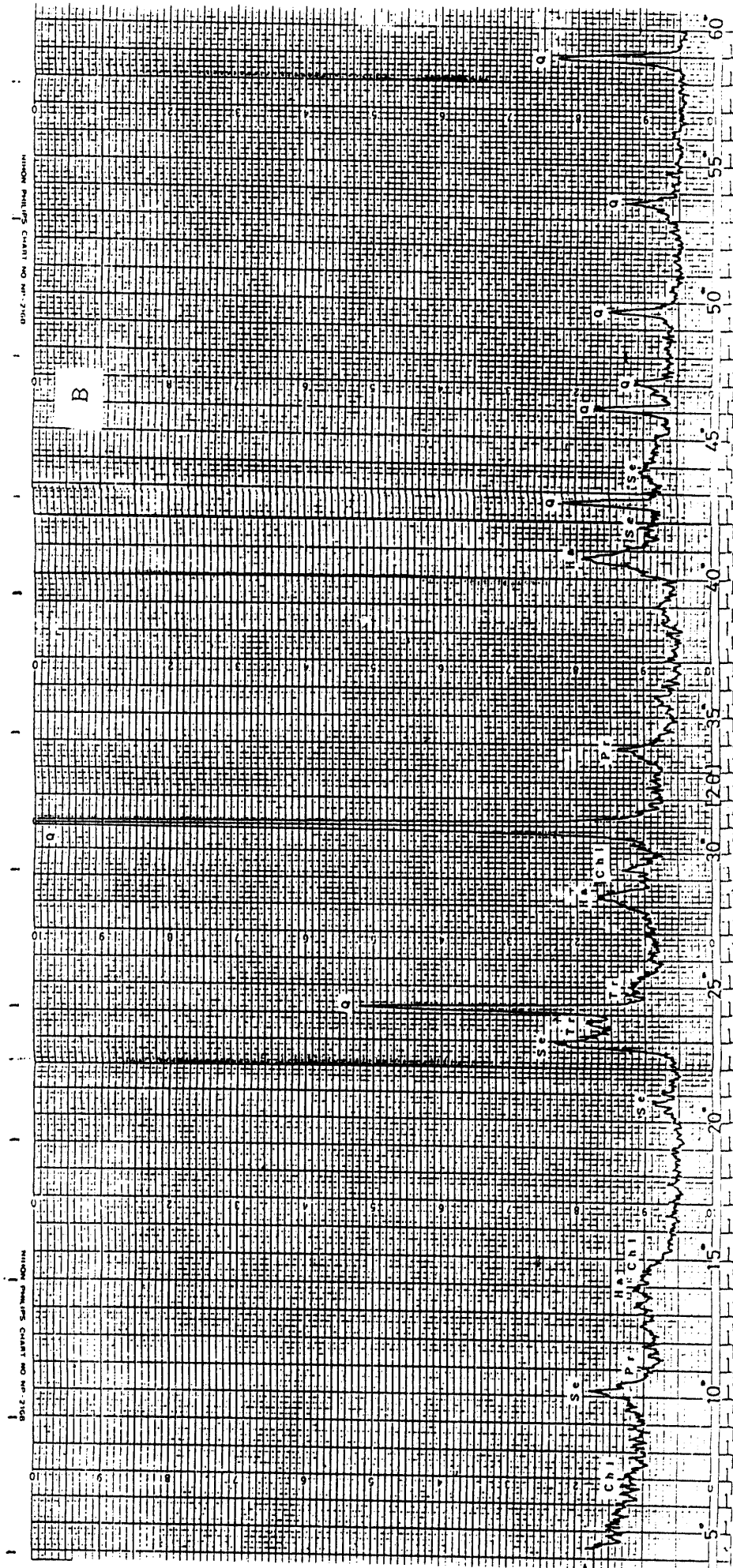


図4 地上試料BのX線粉末回折図

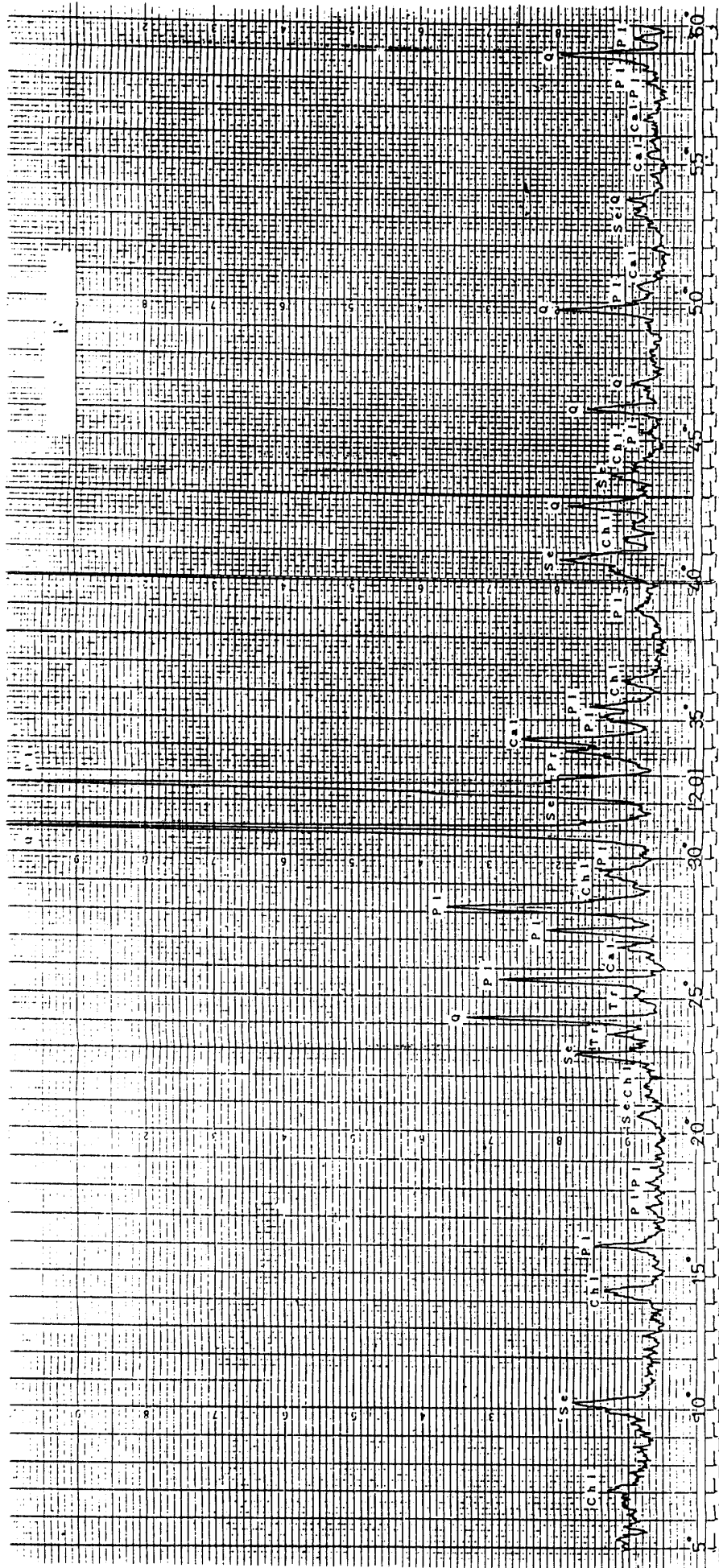


図5 地下試料FのX線粉末回折図



分析結果を対比するために、ここではB試料およびF試料について得られた結果をそれぞれ図4および図5に示した。岩石試料中に検出された鉱物の種類は、これらを取りまとめて表3に示したが、試料の採取位置によってかなり変化していることがわかる。各試料について得られた結果の特徴を示すと以下のようなになる。

(1) 地上試料B（図4参照）

地上試料A'および地下試料Fの両試料にみられた斜長石が全然検出されなかった。しかし、これらの両者にみられなかったハロイサイトがかなり含まれている。また、石英はA'試料とほぼ同程度で、ともに地下試料Fより若干多い。そのほか、絹雲母、緑泥石、トリディマイト等については、A'およびFの両試料とほとんど変化がみられない。なお、本試料ではパイロフィライトがA'およびFの両試料にくらべて若干少ないようである。

(2) 地上試料A'

地上試料B中に全くみられなかった斜長石が少量含まれている。また、パイロフィライトもF試料とともに地上試料Bより若干多くなっている。絹雲母、緑泥石、トリディマイトなどについてはBおよびFの両試料とほとんど変わりがない。なお、石英はF試料よりも若干多く含まれているようである。

(3) 地下試料F（図5参照）

地上試料B中に全くみられずA'試料に少量含まれていた斜長石が著しく多くなっている。このほか、BおよびA'の両試料中にはみられなかった方解石がかなり認められる。その他の絹雲母、緑泥石、トリディマイトなどについては、BおよびA'の両試料とほとんど変化がない。石英はBおよびA'の両試料にくらべて若干減少している。

### 3.3 定量分析

地上試料3種類および地下試料4種類の計7種類の試料について検量線法による定量分析を行った。標準試料としては、窯業協会の窯業原料標準試料を用いた。

定量分析の結果を表4に示す。

表4 定量分析結果（%）

試料	B	A	A'	C	D	E	F
SiO <sub>2</sub>	62.63	60.76	63.84	62.63	57.27	64.26	61.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.47	15.35	16.61	13.92	15.73	14.01	14.43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.24	3.56	3.54	3.51	4.35	3.35	3.83
TiO <sub>2</sub>	0.73	0.62	0.66	0.59	0.67	0.52	0.62
CaO	0.13	3.58	0.42	2.50	2.64	2.86	3.40
MgO	1.41	3.37	2.82	3.14	3.97	2.65	2.74
Na <sub>2</sub> O	0.02	1.54	1.49	3.67	2.32	3.00	3.54
K <sub>2</sub> O	2.93	3.98	4.06	2.45	3.65	2.84	3.11
MnO	0.11	0.26	0.26	0.29	0.36	0.26	0.31
T=	91.67	93.02	93.70	92.70	90.96	93.75	93.01

## 4. 鉱物組成試験の結果と考察

表4に示した定量分析結果をもとに、各化学成分の含有モル数をそれぞれの試料別に求めた結果を表5に示す。

表5 各試料別に求めた化学成分の含有モル数

試料	B	A	A'	C	D	E	F
SiO <sub>2</sub>	1.0438	1.0127	1.0640	1.0438	0.9545	1.0710	1.0172
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1909	0.1505	0.1628	0.1365	0.1542	0.1374	0.1415
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0265	0.0223	0.0221	0.0219	0.0272	0.0209	0.0239
TiO <sub>2</sub>	0.0091	0.0078	0.0083	0.0074	0.0084	0.0065	0.0078
CaO	0.0023	0.0639	0.0075	0.0446	0.0471	0.0511	0.0607
MgO	0.0353	0.0843	0.0705	0.0785	0.0993	0.0663	0.0685
Na <sub>2</sub> O	0.0003	0.0248	0.0240	0.0592	0.0374	0.0484	0.0571
K <sub>2</sub> O	0.0312	0.0423	0.0432	0.0261	0.0388	0.0302	0.0331
MnO	0.0015	0.0037	0.0037	0.0041	0.0051	0.0037	0.0044

表4および表5より次のことがわかる。

(1) 各試料に含まれている化学成分について、含有モル数の多いものから順位をつければ、SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnOの順となり、これらのうち、SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の含有量がきわだって多い。

(2) 表4および表5について、地上試料と地下試料とを比較し、含有成分に変化のみられるものと変化のみられないものとに分けて示してみると、以下のようになる。

(a) 変化のみられる成分

(i) 地上試料のほうが地下試料より増加している成分

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> (やや増加)

(ii) 地上試料のほうが地下試料より減少している成分

CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, MnO

(b) 変化のみられない成分

SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O

(3) (2)項に述べた含有成分の変化から、試料として用いた凝灰岩の風化現象について考察すると、この凝灰岩の構成鉱物である斜長石が風化による分解をうけ、そのため遊離したAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が地上において増加するとともに、Na<sub>2</sub>OやCaOなどが減少したものと考えられる。また、CaOの減少は斜長石などからの風化産物の溶脱にも起因しているものと思われる。

以上に、定量分析の結果より考察した考えを述べたが、これらのことは、顕微鏡観察の結果やX線粉末回折による分析結果からも裏づけることができる。すなわち、表6は、鉱物顕微鏡観察により検出された鉱物名を、地上試料と地下試料とに分けて列挙したものであるが、この表をさらに整理し、検出された鉱物の相違点を試料別によりわかりやすくして示したのが表7である。

表6 鉱物顕微鏡観察により検出された鉱物

試料	鉱物名
地上試料 B	絹雲母, パイロフィライト, ハロイサイト 石英, 緑泥石 トリディマイト (Si-low type)
地下試料 F (-28.1m)	緑泥石, 絹雲母, 斜長石, 石英, 方解石 トリディマイト (Si-low type) パイロフィライト

表7 検出鉱物の相違

両試料から共通して検出された鉱物	絹雲母, 緑泥石, パイロフィライト, 石英 トリディマイト (Si-low type)
地上試料Bのみから検出された鉱物	ハロイサイト
地下試料Fのみから検出された鉱物	斜長石, 方解石

表7より, 絹雲母, 緑泥石, パイロフィライト, トリディマイト等の鉱物は地上試料, 地下試料の双方から共通して検出されている。これに対し, 地下試料では明瞭に観察されている斜長石と方解石は地上試料については観察されていない。このことは, 斜長石や方解石が風化による影響を多分にうけて分解したり溶脱したためと思われる。また, 地下試料には認められなかったハロイサイトが地上試料では観察されているのは, ハロイサイトが風化の産物として新しく生成したためと考えられる。

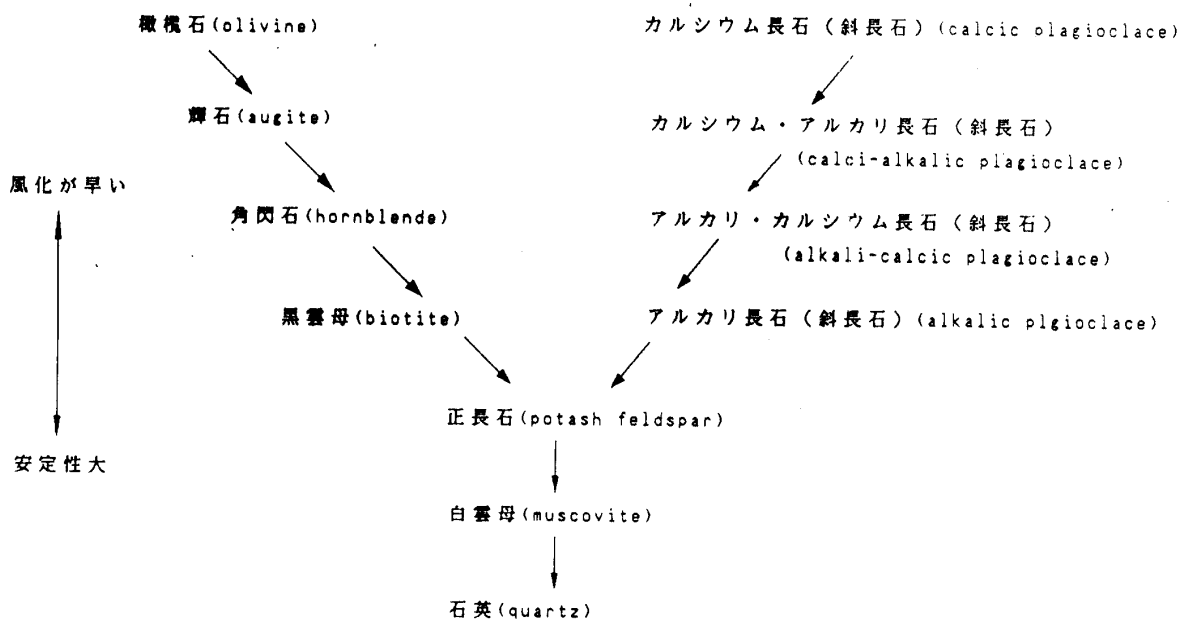


図6 風化に対する主要造岩鉱物の安定系列 (Goldichによる)<sup>8)</sup>

以上に述べたことを要約すると、今回試料として用いた足羽山産凝灰岩では、斜長石がその構成鉱物としてかなり多く含まれており、これとその変質によって生成した方解石などがさらに地表付近における風化分解作用をうけることによって、この凝灰岩の風化が進行していつていると考えることができる。

なお、図6は、Goldichにより示された主要造岩鉱物の風化に対する安定系列を表わしたものであるが<sup>9)</sup>、風化に対して斜長石が極めて不安定な鉱物であることが示されており、上記の推論とも一致している。

## 5. 結 言

本研究により得られた主な成果を簡条書きにして示すと、以下のようになる。

(1) まず、鉱物顕微鏡による観察によって凝灰岩の構成鉱物について綿密な検討を行った結果、今回試料として用いた足羽山産の凝灰岩は石英安山岩質溶結凝灰岩であることを明らかにした。

(2) 鉱物顕微鏡による観察およびX線粉末回折の結果から、この凝灰岩の主要構成鉱物は斜長石、石英、絹雲母、方解石、緑泥石、パイロフィライト、トリディマイトおよびハロイサイトの8種類であることを示した。

(3) 検量線法による定量分析により化学成分の含有率を詳しく調べた結果、試料凝灰岩中には他の成分に比べて、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ の含有率が極めて高く、これらについて $\text{Fe}_2\text{O}_3$ の含有率が多いことを示した。

(4) 顕微鏡観察およびX線粉末回折により、地上より採取した試料と地下より採取した試料とについて主要構成鉱物の差異を検討するとともに、定量分析結果をもとにして地上試料と地下試料中における化学成分の増減の状態を検討した結果、試料として用いた凝灰岩の風化は、主として主要構成鉱物として含まれている斜長石が風化による分解や変質をうけて進行し、主要粘土鉱物としてハロイサイトを生成しているなどのことを明らかにし、足羽山産凝灰岩の風化現象についての一つの知見を得た。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、試料として用いた足羽山産の凝灰岩の採取を快くお許しいただき、試料としてご提供下さったばかりでなく、試料採取に際しても種々の便宜をお図りいただいた越前石株式会社に対し、また、比表面積の測定等の際にご協力下さった島津製作所ならびにX線粉末回折を行うにあたってご協力をいただいた京都大学木村 訓技官に対し心から厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Dorothy Carroll : Rock Weathering  
松尾新一郎監訳 : 岩石の風化 (株)ラテイス, 昭和49年5月  
土質工学会編 : 岩の工学的性質の設計・施工への応用, (株)土質工学会, 昭和54年1月, p.22
- 2) A. Hamrol : A Quantitative Classification of the Weathering and Weatherability of Rocks, Proc, 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng., Paris, 2, 1961, p.771~774
- 3) Iliia G. Ilive : An Attempt to Estimate the Degree of Weathering of Intrusive Rocks from their Physico-mechanical Properties, Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, 1, 1966, p.109~114
- 4) T. Saito : Variation of Physical Properties of Igneous Rocks in Weathering, Int. Symposium on Weak Rock, Reprints, 1-3-32, 1981, p.184~189
- 5) T. F. Onodera, R. Yoshinaka and N. Oda : Weathering and its Relation to Mechanical Properties of Granite, Proc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Denver, 2A, 1974, p.71~78
- 6) G. R. Martin and P. J. Millar : Joint Strength Characteristics of a Weathered Rock, Advance in Rock Mechanics, Vol. II, Part A, Washington, National Academy of Sciences, 1974, p.263~270
- 7) W. A. Watters, B. W. Riddolls and C. W. R. Soong : Weathering of Greywacke Sandstone, Wellington, New Zealand, Int. Symposium on Weak Rock, Reprints, 1-3-30, 1981, p.172~177
- 8) 土質工学会編 : 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 昭和54年1月, p.327