

足羽山産凝灰岩の風化に関する研究（第2報） 諸特性に及ぼす風化の影響

伊 藤 一 郎 ・ 港 種 雄
澤 崎 雅 之 ・ 永 全 立 樹

Studies on the Weathering of Tuffaceous Rock in the Region of Mount Asuwa, Fukui (2nd Report)

Ichiro ITO · Taneo MINATO · Masayuki SAWAZAKI
and Tatuji NAGATAKE

In this second report, detailed investigations on the physico-chemical and mechanical properties of these weathered and slightly weathered tuffaceous rocks have been carried out in the laboratory and their relations with each other from the weathering point of view have been studied.

From the results of these studies, it was clarified that the effects of weathering have been considered to come out more prominently in the change of both the physical and mechanical properties, such as the values of longitudinal wave velocity, shore hardness, specific surface area and strength under uniaxial compression. Finally an available method to check the degree of weathering for these tuffaceous rocks has been described.

1. 緒 言

第1報¹⁾では、顕微鏡観察、X線粉末回折および定量分析の結果をもとにして、試料として用いた足羽山産凝灰岩の風化がどのような過程を経て進行していくかについて考察した結果を述べた。

次に、上記のような地質学的な見地からの研究に続いて、われわれは足羽山産凝灰岩の物理的性質、化学的性質および力学的性質を明らかにするために、実験室において各種の試験を実施し、それらの試験によって得られた結果にもとづいて岩石力学的な立場からの検討を行い、足羽山産凝灰岩の諸性質のうちで、風化によってもっとも影響を受けやすい性質を明らかにするように努めるとともに、さらに風化度を表示するにはどのような方法が適当であるかなどについても考察したので、それらの結果についてここに報告する。

2. 試験の種類と試験方法

物理的性質の試験は、土粒子比重、含水比、密度、粒度、硬度、比表面積、弾性波速度について実施し、飽和度、間隙比は計算により求めた。また、化学的性質の試験のうち、今回実施したのは急速吸水試験、強熱減量試験であって、さらに、力学的性質の試験としては一軸圧縮試験のみを行った。

次に、これらの各種試験のうち、粒度測定のみは土壌試料についてのみ行ったが、その他の試験はすべて岩石試料を対象にして実施した。すなわち、それぞれの地点で採取した岩石試料から、各試料別にそれぞれ6個の供試体を作成し、それらのうち第1報¹⁾の表1(a)に示した各試料別の5個ずつの供試体を弾性波速度および一軸圧縮試験の試験用供試体として使用し、残りの1個の供試体を目的に応じて処理し、その他の物理的、化学的性質の試験用試料として用いた。

なお、各種試験はいずれも国際岩の力学会 (ISRM) 等で定められている試験方法²⁾に準拠して実施したが、比表面積のみは、島津製作所の協力を得て同社製の比表面積・細孔分布解析装置を用いて測定した。また、一軸圧縮試験では、強度特性、変形特性に及ぼす荷重速度および荷重履歴の影響を調べるために、およそ $4 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $5 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ の荷重速度での単調載荷試験、およびおよそ $5 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ の荷重速度での繰り返し載荷試験を実施した。

3. 試験結果の要約

紙面の制約により各種特性試験の結果を詳述する余裕はないので、ここでは、それらを要約して示しておくことにする。

表1は、5種類の凝灰岩試料について実施した各種試験により得られた物理的、化学的および力学的諸特性を総括して1つの表にまとめて示したものである。ただし、この表では、物理的性質および化学的性質の試験において供試体を2個使用して行った試験の結果はその平均値をとって示しておいたが、とくに力学的性質を調べるための一軸圧縮試験においては、2個の供試体について得られた変形特性(弾性係数、ポアソン比)や強度にかなりのバラツキが認められたため、これらの特性については2個の供試体について得られた結果を併記して示した。なお、前項において述べたように、一軸圧縮試験では、単調載荷と繰り返しの2種類の載荷方法による試験を実施したが、それらの結果からは、今回実施した程度の荷重速度や繰り返し載荷の範囲では、荷重速度の違いや繰り返し載荷による応力履歴のちがいがこの凝灰岩の変形特性や強度特性にあまり大きな影響を与えているとは考えられなかったため、表1には単調載荷試験の結果より得られた一軸圧縮強さを示した。

さて、今回これらの各種の試験対象とした5種類の凝灰岩試料は、大きく分ければ地上より採取した地上試料Aおよび地下より採取した地下試料に分けられ、また、地下試料については、採取地点の地表よりの深度別にF試料(-28.1m)、E試料(-20.5m)、D試料(-13.0m)、C試料(-5.85m)に分かれている。このように地下試料についても深度別に4種類の試料を採取したが、その目的は地表よりの深度によって風化の影響がどの程度諸特性値の差として現れてくるかを検討したい

足羽山産凝灰岩の風化に関する研究（第2報）諸特性に及ぼす風化の影響

表1 物理的性質・化学的性質・力学的性質の試験結果の総括

項 目	単 位	試 料				
		F	E	D	C	A
土 粒 子 比 重		2.700	2.700	2.693	2.688	2.70
含 水 比	%	14.18	14.10	12.39	12.76	6.61
湿 潤 密 度	g/cm ³	2.221	2.246	2.249	2.230	2.07
乾 燥 密 度	g/cm ³	1.945	1.968	2.001	1.978	1.95
飽 和 度	%	98.57	102.21	96.50	95.45	47.1
間 隙 比		0.388	0.373	0.346	0.359	0.31
間 隙 率	%	27.95	27.17	25.71	26.42	23.6
比 表 面 積	m ² /g	7.52	7.50	9.84	7.21	14.1
シ ョ ア ー 硬 度	Hs	11.0	10.0	14.0	12.5	6.0
弾 性 縦 波 速 度	km/sec	3.483	3.413	3.352	3.518	2.93
急速吸水試験より 求めた間隙指数	%	6.09	6.04	4.00	5.29	2.62
強 熱 減 量	%	4.13	4.18	4.36	3.48	3.94
軸 方 向 接 線 弾 性 係 数	×10 ⁶ kgf/cm ²	0.147 0.123	0.121 0.121	0.119 0.114	0.135 0.135	0.09 0.10
円 周 方 向 接 線 弾 性 係 数	×10 ⁶ kgf/cm ²	1.607 0.680	0.750 0.769	0.774 0.581	1.042 0.729	0.59 0.45
ポ ア ソ ン 比		0.149 0.234	0.162 0.166	0.154 0.197	0.129 0.186	0.160 0.22
一 軸 圧 縮 強 さ	kgf/cm ²	387 352	419 324	394 407	291 272	266 315

と考えたからである。

しかし、表1を一覧して明らかなように、地下試料として採取した4種類の試料（F～C）について諸特性値間にはあまり大きな差は認められないものが多く、また、それらの間にある程度の差が認められる例えば変形特性や強度の値などにおいても、深度に応じて変形特性や強度が増大していくなどの一定の傾向が必ずしも認められない。このことは、これらの4種類の地下試料について得られた諸特性値の違いは、風化の程度の差のみによって生じたものとは考えにくく、むしろそれぞれの試料を採取した地点での地質的な特性にもとづく影響をより強く受けたために生じたものと解釈した方が妥当である。これらのことから、地表に近いC試料では、それよりも

深い深度から採取したD、E、Fの各試料に比べればやや風化の影響をうけたと考えられる特性値も認められはするが、地下試料から求められた各試料の特性値そのものには、全体的には風化による影響の程度は比較的少ないものと判断することができる。

4. 風化の観点からみた試験結果の考察

(1) 凝灰岩の諸特性に及ぼす風化の影響

表1に示した諸性質について、各試料間、とくに地上試料と地下試料とを比較した場合に、比較的顕著な差の認められた性質、やや差が認められた性質、ほとんど差が認められなかった性質の3つに別けて諸特性の変化の状態を調べてみると、表2のようになる。

表2 凝灰岩の諸特性の変化の状態

比較的顕著な差の認められた性質	やや差が認められた性質	ほとんど差が認められなかった性質
含水比	湿潤密度	土粒子比重
飽和度	間隙比	乾燥密度
比表面積	間隙率	
ショアー硬度	弾性縦波速度	
	間隙指数	
	強熱減量	
	軸方向接線弾性係数	
	円周方向接線弾性係数	
	ポアソン比	
	一軸圧縮強さ	

前項において述べたように、各試料について求めたこれらの諸特性値にみられる差は、必ずしも風化による影響のみによって生じたものとはいえず、各試料を採取した場所の地質的な条件の差によるものと考えられるが、少なくとも地下試料と地上試料とに大分けて考えれば、それらの諸特性値間にみられる差異の大部分は多分に風化の影響によって生じたものと考えることができる。

そこで、ここでは、地下試料と地上試料との間にみられる諸特性値間の差異に焦点を絞り、両者の特性がどのように変化しているかを調べることにより、凝灰岩の諸特性に及ぼす風化の影響について考察してみる。

さて、岩石の風化度を評価する指標としては、岩石が風化を受けることによりできるだけ顕著な変化を示す性質を利用すると便利である。その上、実用的にその指標が利用しやすいためには、その指標となる性質の測定が比較的容易で簡単に行えるものであることが望ましい。以上のような理由から、従来から、実用的な風化度の指標としては弾性波速度の変化により風化度を評価する方法が用いられている。新鮮な岩石に比べて風化の進んだ岩石では、その風化度に応じて弾性波速度が低下することが知られているからである。

そこで、ここでも、弾性波速度の変化によって風化の程度を評価できるものと考え、弾性波速度と他の諸特性値との間の相関関係を調べ、試料として用いた凝灰岩の諸特性に及ぼす風化の影響について検討する。

いまその例として、凝灰岩の諸特性のうち、乾燥密度、比表面積、軸方向および円周方向平均弾性係数および一軸圧縮強度の4特性を選び、これらの諸特性と弾性波速度との相関関係を図示すると図1～図4のとおりになる。

それぞれの図において、黒丸で示したプロット点のみが地上試料のA試料についての測定値であり、他はすべて地下試料のF～C試料について得られた測定値を記号別に示したものである。

まず、図1～図4のいずれの図においても、各試料についての測定値間にはかなりのバラツキがみられるが、全体的な傾向として、A試料について測定された弾性波速度は地下試料について測定されたそれらよりも小さく、このことは地下試料に比べて地上試料の方がかなり風化が進んでいることを示している。

次に、風化によって個々の特性値にどのような変化がみられるかについて検討してみる。

まず、図1に示した乾燥密度は、風化をうけたA試料も地下試料も、平均的にみればそれぞれのプロット点がそれぞれ横軸に並行なほぼ一直線上に並んでおり、測定値相互の間にはあまり大

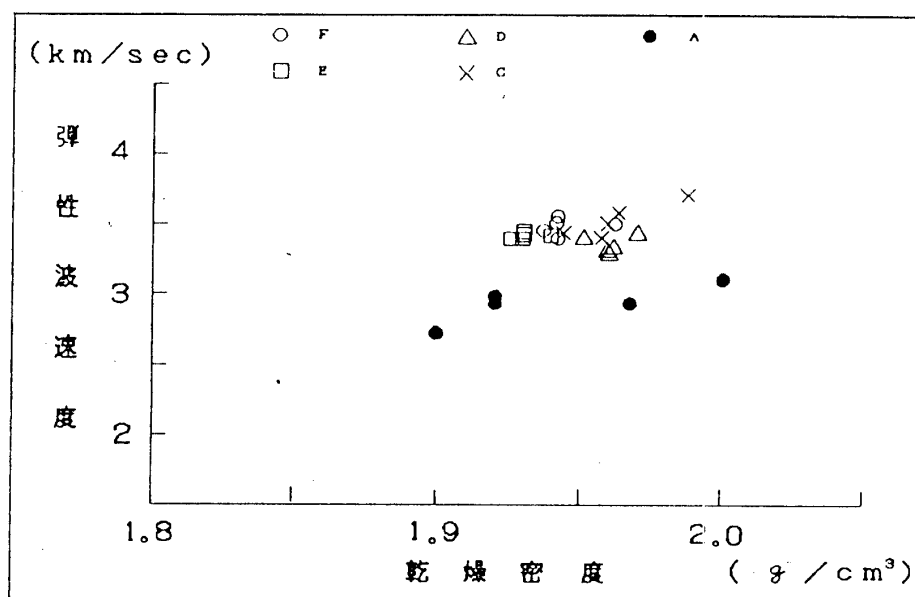


図1 弾性波速度と乾燥密度の関係

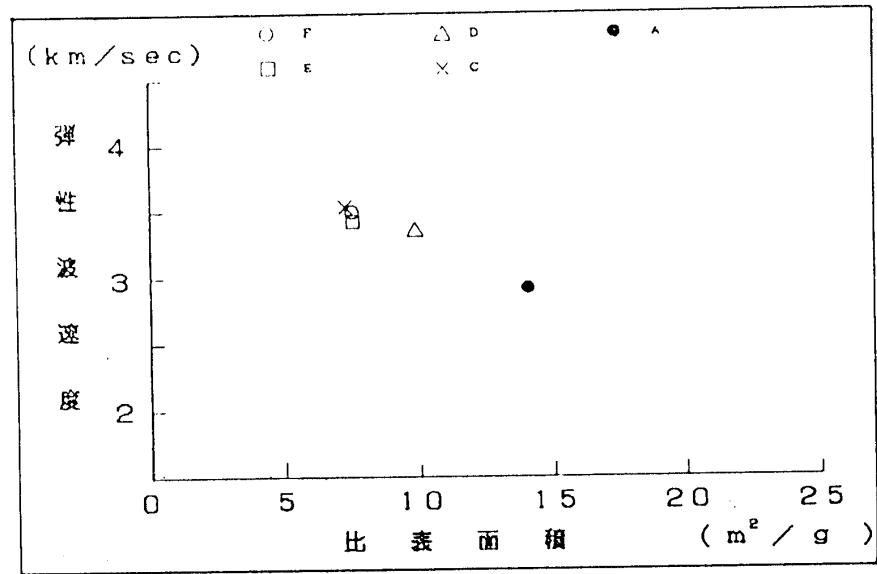


図2 弾性波速度と比表面積との関係

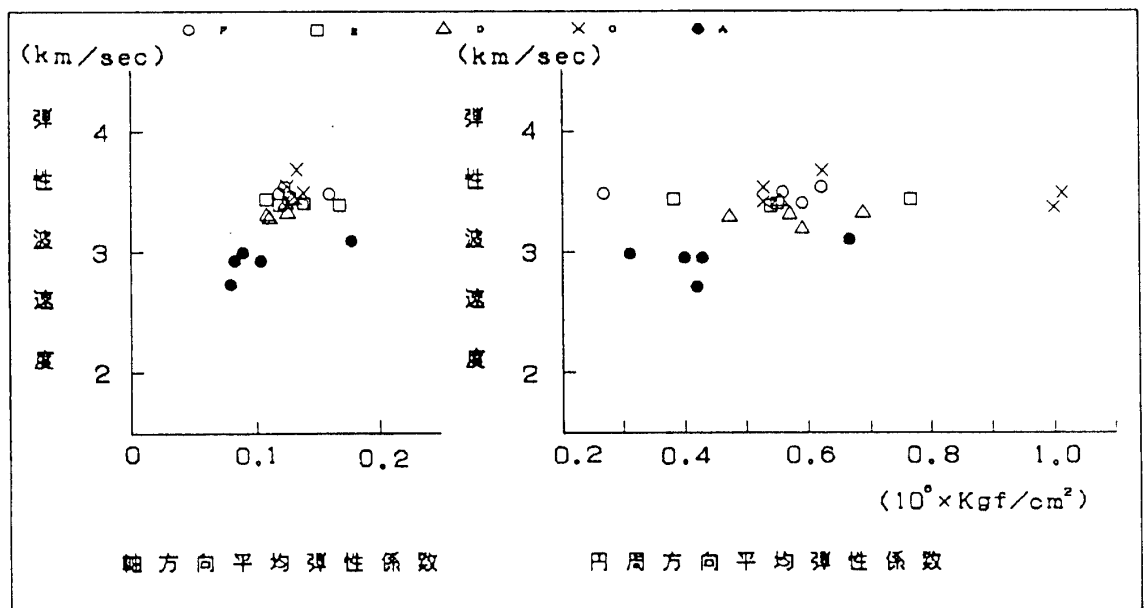


図3 弾性波速度と軸方向および円周方向平均弾性係数との関係

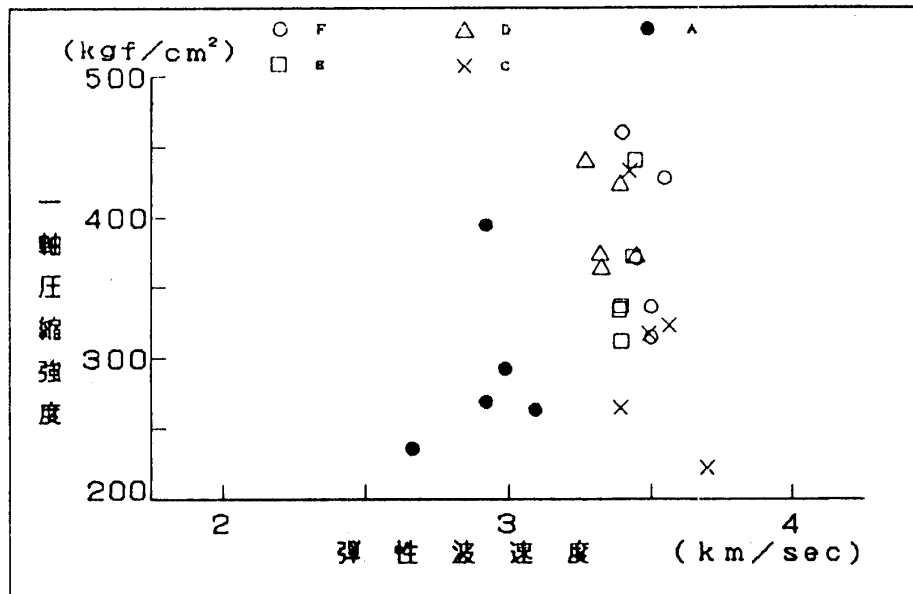


図4 弾性波速度と一軸圧縮強度との関係

きな変化が見られない。このことは先に表2において指摘したこととも一致している。乾燥密度は土粒子比重に対応するものであり、風化によって土粒子構造や組織に変化を生ずるため、その変化の度合いに応じて新鮮岩の密度よりも密度の値が変わるものと思われるが、風化岩同士で比較すればその密度の値はほとんど変化しないものと考えられる。

次に、図2に示した比表面積は、風化が進むにつれて岩石中には、微細な亀裂が発達し、間隙も増大していくから、比表面積も当然増大していくことになる。したがって、比表面積の増大は風化の進行を示唆するものであり、風化が進めば弾性波速度が低下していくという両者の相関関係が図2には明瞭に示されている。

さらに、図3および図4には、平均弾性係数および一軸圧縮強度と弾性波速度との相関関係を示した。一般に岩石の風化が進むにつれて力学的特性は劣化していくから、これら上記の特性値も風化の進行とともに低下の傾向を示すはずである。図3及び図4に示した結果では、地上試料についても地下試料についても、個々の供試体ごとに得られた測定値にかなりのバラツキがみられるために、必ずしもその傾向が明瞭とはいえないが、地上試料と地下試料との測定値間にはある程度風化度の影響によると考えられる差が認められ、さらに風化の程度の差による諸特性値の変化の傾向も全体的には合理的な傾向を示しているといえることができる。

(2) 指標の3次元表示による風化度の検討

先に述べたように、今回の研究で試料として用いた凝灰岩では、地上試料と地下試料とでは明らかに風化の程度が異なっており、地上試料ではかなり風化が進んでいると考えられるのに対し、地下試料相互間には風化による影響はあまり大きく現れていない。そこで、ここでは、風化

の指標を物理的風化指標，化学的風化指標および力学的特性値の3つに区分し，これらの指標値を x ， y ， z の直交座標軸上にとって表した図形のビズミの状態から風化度を検討してみる。すなわち，各軸上の基準値には地下試料で得られた諸特性値を用い，それらに対する地上試料の諸特性値の変化割合を求めた結果を各座標軸上にプロットすることにより風化度を検討しようとするものである。

表3 風化による特性値の変化割合

指標 または 特 性 値	特 性 値	地 下 試 料 (F～C試料平均値)	地 上 試 料 (A試料平均値)	特 性 値 の 変 化 割 合
物理的風化指標	比表面積 (m^2/g)	8.02	14.13	1.7618
	ショアー硬度 (Hs)	11.90	6.00	0.5042
	弾性波速度 (km/s)	3.442	2.938	0.8536
化学的風化指標	強熱減量 (%)	4.04	3.94	0.9752
	化学組成モル比 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$)	0.123	0.131	1.0650
	ポアソン比	0.172	0.191	1.110
力学的特性値	一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	356	291	0.8174

表3には，物理的風化指標，化学的風化指標および力学的特性値としてこの検討に用いた各指標の種類，ならびに地下試料の特性値を基準としたときの地上試料のそれらの変化割合を計算した結果をあわせて示した。なお，基準となる地下試料の特性値には，F～C試料の特性値の平均を用いた。また，表3に示した化学組成のモル比の値は，第1報¹⁾の表5に示した各試料別に求めた化学成分の含有モル数中の Al_2O_3 および SiO_2 の数値を用い，地下試料 (F～C) および地上試料 (A，A') の双方について各試料別のモル比の値 (表4参照) を求め，その結果より地下試料と地上試料の平均値として求めた値である。

表3をもとにして，上記の方法により三次元的表示を行った例として，ここでは，比表面積，化学組成モル比，一軸圧縮強さ比のそれぞれを3軸上にとった場合を図5に，また，弾性波速度比，強熱減量比，ポアソン比のそれぞれを3軸上にとった場合を図6に示した。これらの図において，各軸上で1.0の値を示す点を結んだ点線で示す図形は基準とした地下試料の状態を示しており，各軸上にそれぞれの指標や特性値の変化割合の値をとり，それらを結んで得られる実線の図形は地上試料の地下試料に対する風化の度合いを表している。したがって，実線で描いた図形が点線で描いた図形に比べてビズミが大きい場合ほど，地下試料に比べて地上試料の風化の程度が著しいことを示している。また，図5と図6を比較すれば明らかなように，例えば比表面積比のように，風化による変化割合の大きな指標や特性値を選んでプロットした場合ほど，風化度をより鮮明に表しうることもわかる。

このように、それぞれの軸上にプロットする指標や特性値の種類を考えて表示していけば合計12通りの図を描くことができる。そこで、それら12通りの図を描いて検討した結果、もっとも大きな図形のヒズミがみられたのは、物理的風化指標として比表面積比をとった場合の図形であり、ついで大きな変化を示しているのは、ショアー硬度を物理的風化指標にとったときの図形であった。これに対して、他の化学的風化指標および力学的特性値にどのような値をとっても、それらが図形のヒズミに与える影響の度合いは比較的少ない。このことは、今回試料として用いた足羽山産凝灰岩の風化に対しては、物理的性質の変化の方が他の化学的性質や力学的性質の変化に比べてより大きな影響を与えていることを示すもので、この凝灰岩の風化現象にみられる1つの特徴といえることができる。

表4 酸化物のモル比

試料	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)}$
B	0.155
A	0.129
A'	0.133
C	0.116
D	0.139
E	0.114
F	0.122

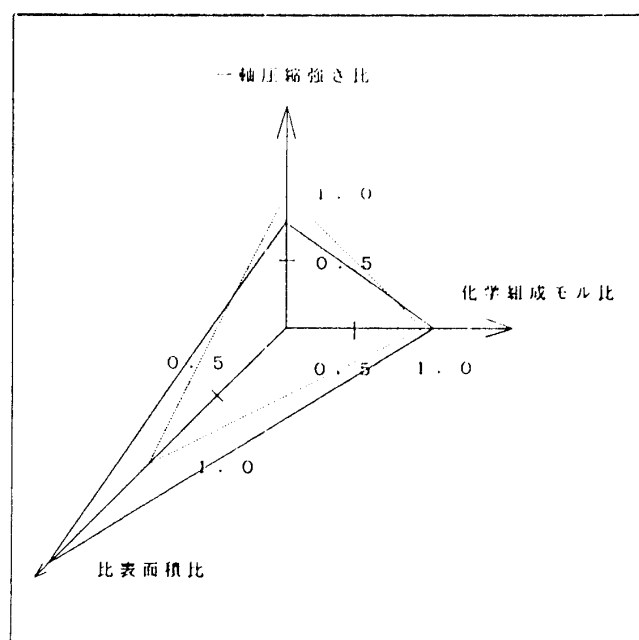


図5 比表面積比、化学組成モル比、一軸圧縮強さ比で表した風化度

5. 結 言

本研究により得られた主な成果を箇条書きにして示すと、以下のとおりになる。

(1) 第1報¹⁾で述べたように、地上より採取した試料は地下より採取した試料に比べてかなり風化が進んでいることは、試料の外観観察や顕微鏡観察の結果から明らかであるが、深度別に採取した4種類の地下試料相互の間には主要構成鉱物の種類にも大きな変化はみられず、また定量分析より求めた化学成分の含有率もほぼ同程度の値を示しているなどのことから、地表より深度30m程度の範囲内で採取した地下試料相互間には風化度の差はほとんどないものと推定することができた。

(2) 各種の試験を実施して、試料として用いた足羽山産凝灰岩の主要な物理的性質、化学的性質および力学的性質を明らかにした。その結果、ほとんど風化の影響を受けていないと考えられる新鮮な状態では、この凝灰岩は、緻密でかなり高い応力まで弾性的な変形特性を示し、一軸圧縮強さも平均して350~400kgf/cm²の値をもっており、凝灰岩としてはかなり堅硬な特性をもつことがわかった。

(3) 地上試料および地下試料のそれぞれについて得られた諸特性値を対比して試料とした凝灰岩の風化による諸特性の変化について検討した。その結果、風化による弾性波速度の低下の程度を利用して岩石や岩盤の風化度を判定しようとする、実用的に一般に用いられている判定法は、この凝灰岩の風化度の判定にも有用であることを示した。

(4) 風化による凝灰岩の諸特性の変化を検討するために、変化が大きい諸特性の中から物理的風化指標、化学的風化指標および力学的特性値をそれぞれ設定し、これらの指標や特性値の変化の割合を x , y , z の直交座標軸上にプロットした図形を描き、新鮮な岩石

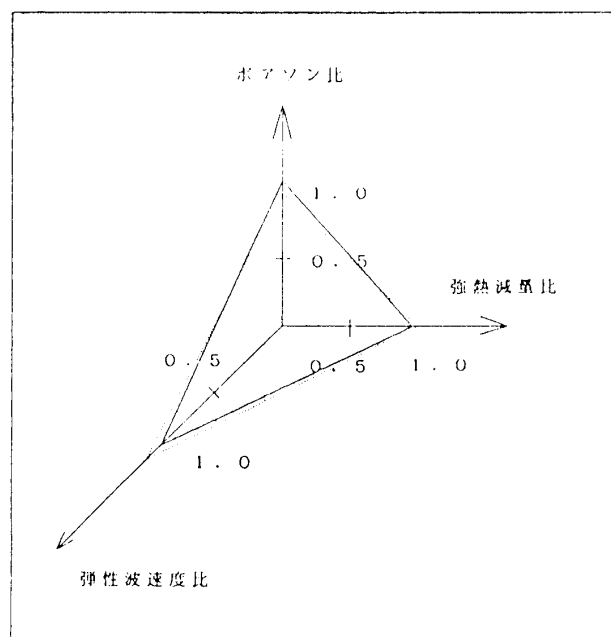


図6 弾性波速度比，強熱減量比，ボアソン比で表した風化度

について得られる同様な図形と対比して風化度を検討する方法を試みた。この方法により、地下試料の特性値を基準として、それより風化の進んだ地上試料の特性値の変化割合を求めてプロットした図形を数多く描いて検討した結果、この凝灰岩の風化による特性の変化は、化学的性質や力学的特性値の変化に比べて物理的性質の変化により顕著に現れていることが明らかとなり、比表面積、ショアー硬度あるいは弾性波速度などの物理的性質の変化割合を利用すれば、これらの指標を尺度としたこの凝灰岩の風化度の判定も可能となることを示唆した。

謝 辞

本研究のうち、弾性波速度の測定については京都大学寺田亨教授および柳谷俊助手のご協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表する。また、ワープロ原稿の作成にあたっては院生高橋義治君の協力を得た。併せて感謝する。

【参考文献】

- 1) 伊藤一郎，港種雄，澤崎雅之，永全立樹：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—，福井工業大学研究紀要，第19号，1989年9月，PP.253～265.
- 2) 岩の力学連合会：ISRM 指針；Vol.1，Vol.2；昭和57年9月，昭和58年3月
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。