

火山岩の風化プロセス — 従来の研究とその問題点 —

Weathering Processes of Volcanic Rocks: A Review

小口 千明*・八田 珠郎**・松倉 公憲***

Chiaki OGUCHI, Tamao HATTA and Yukinori MATSUKURA

I はじめに

著者らは、流紋岩の風化にともなう諸性質の変化に関する研究を行ってきた(高嶋, 1993; 小口ほか, 1993)。その際とくに火山岩の風化変質を扱った主要な研究を集めた(第1表)。その結果、従来の研究内容は、(1)化学的・鉱物学的性質の変化を扱ったもの、(2)物理的・力学的性質の変化を扱ったもの、(3)その両方を扱ったもの、に大別された(第1表)。Yatsu(1988)は、火山岩の風化に関する従来の研究をまとめている。しかし、近年の研究成果をふまえ、分析・測定項目より従来の研究を取りまとめたものはない。本稿においては、従来の研究を上記の(1)~(3)の各項目ごとに総括し、それぞれの問題点を指摘し、今後行われるべき火山岩の風化に関する研究を提示する。なお、降下火山灰に関しては、火山岩の風化機構の解明に重要と判断されたもののみを取りあげた。

II 化学的性質および鉱物学的性質の 変化に関する研究

火山岩の風化にともなう化学的・鉱物学的性質の変化に関する研究においては、野外で得られた試料に対し、風化による化学・鉱物組成の変化を求めたものが多い。その結果、調査地域における風化生成物の記載、粘土鉱物の生成機構や変質系列、一次鉱

物の安定系列、および元素の易動度などが求められている。これらの研究では、一般の化学分析とともにXRD(X線回折分析)、DTA(示差熱分析)、IR(赤外分光分析)、TEM(透過型電子顕微鏡)、SEM(走査型電子顕微鏡)などにより風化生成物の同定が行われる。しかし、火山岩は微細な結晶・組織を有するため、岩石オーダーとしての定量的な議論は決して多いとはいえない。

1. 玄武岩の風化

玄武岩の風化に関する初期の研究は、風化の進行が速いとされる温暖湿潤地域で行われた。たとえば、Bates(1962)は、ハワイの玄武岩の風化生成物中にノントロナイトおよびアロフェンが存在し、カオリナイトは認められないと報告した。これと同様に、1940~1960年代の研究の多くは風化生成物の鉱物および化学組成の変化を中心としている(Payne and Mau, 1946; Abbott, 1958)。また、Tiller(1958)のように風化にともなう元素の易動度を論じた例もある。その研究では、サウスオーストラリア州南西部に分布するかんらん石玄武岩の風化生成物が調査され、風化に対する安定性は $Al > Fe > Si > K > Mg > Na > Ca$ の順であることが示された。

その後、風化生成物の鉱物同定・化学組成に関する研究は、結晶構造の変化を含む風化変質機構の解明に力点を置くようになった。また、研究の対象地域も世界各地に拡大した。Craig and Loughnan

* 筑波大学・院・地球科学研究科 ** 農水省・国際農林水産業研究センター・環境資源部 *** 筑波大学地球科学系

第1表 火山岩の風化に関する従来の研究例（文中に取り上げた順に配列）

文 献	調 査 地 域	地質年代	岩 型	試料採取 の対象	測 定 項 目 ¹⁾				備 考
					化学	鉱物	物理	力学	
Bate (1962)	ハワイ	第四紀	玄武岩	露頭	○	○	-	-	
Payne & Mau (1946)	ハワイ	第四紀	玄武岩	風化殻	○	-	-	-	
Abbott (1958)	ハワイ	-	玄武岩	露頭	○	○	-	-	
Tiller (1958)	サウスオーストラリア	-	玄武岩	露頭	○	-	-	-	微量元素の変化を検討
Craig & Loughnan (1964)	ニューサウスウェールズ	二疊紀 ~第三紀	玄武岩 ラタイト	露頭	○	○	-	-	
Singer (1973)	ガリラヤ湖 (イスラエル)	更新世	玄武岩	風化殻	○	○	-	-	
Singer (1978)	ゴラン高原 ガリラヤ湖 (イスラエル)	中新世 ~完新世	玄武岩	露頭	○	○	-	-	
Singer & Navrot (1970)	南イスラエル	三疊紀 ~白亜紀	玄武岩	風化皮膜	○	○	-	-	玄武岩礫
Navrot & Singer (1976)	ゴラン高原 (イスラエル)	-	玄武岩 ²⁾	土壌断面	○	○	-	-	²⁾ スコリア, ラピリについても検討
Singer (1984)	南イスラエル	白亜紀	玄武岩	土壌断面	○	○	-	-	
Rodriguez (1982)	アルゼンチン	-	玄武岩 流紋岩	露頭	○	○	-	-	
Wada <i>et al.</i> (1972)	ハワイ	第四紀	玄武岩	コアストーン	○	-	-	-	
Smith (1959, 1961)	エジンバラ	-	玄武岩		-	○	-	-	鉱物種の変化について 検討
Chesworth <i>et al.</i> (1981)	フランス中央高地	白亜紀 ~晩新世 ³⁾	玄武岩	露頭	○	○	-	-	³⁾ 6.5~7.3 Ma
Bain <i>et al.</i> (1980)	スコットランド	第三紀	玄武岩	露頭	○	○	-	-	
Bain & Russel (1980, 1981)	スコットランド	第三紀	玄武岩	露頭	○	○	-	-	
Curtin & Smillie (1981)	アイルランド	-	玄武岩	土壌断面	○	○	-	-	
Smith <i>et al.</i> (1987)	クイーンズランド (オーストラリア)	-	玄武岩 ⁴⁾	コアストーン	-	○	-	-	⁴⁾ とくに, かんらん石 について検討
Zhou & Fyfe (1989)	海洋地殻上部 ⁵⁾	漸新世 ⁶⁾	玄武岩質 ガラス	ボーリングコア	○	○	-	-	⁵⁾ DSDP site. 335, ⁶⁾ 約 3 Ma
Simonett & Bauleke (1963)	クイーンズランド (オーストラリア)	鮮新世 ~更新世	玄武岩	土壌断面	○	○	-	-	
Sieffermann & Millot (1969)	カメルーン	-	玄武岩	土壌断面	○	○	-	-	
Singer (1966)	ガリラヤ湖 (イスラエル)	中新世 ~鮮新世	玄武岩	露頭	○	○	△	-	
Singer (1970)	ゴラン高原 (イスラエル)	-	玄武岩 ⁷⁾	土壌断面	○	○	○ ⁸⁾	-	⁷⁾ 土壌についても検討, ⁸⁾ 色・粒度
Dan & Singer (1973)	ゴラン高原 (イスラエル)	鮮新世	玄武岩 ⁹⁾	土壌断面	-	○	△	-	⁹⁾ 火山碎屑物について も検討
Talkington <i>et al.</i> (1982)	クイーンモード山脈 (南極)	-	玄武岩	風化皮膜	○	○	-	-	
Evans & Chesworth (1985)	バフィン島 (カナダ)	第三紀	玄武岩	土壌断面	○	○	-	-	
丹 (1993)	弥彦山地	-	玄武岩	露頭	-	○	-	-	
Nesbitt & Wilson (1992)	ベイントン (オーストラリア) ¹⁰⁾	-	玄武岩	露頭	○	○	-	-	¹⁰⁾ 既存データと比較
Nesbitt & Young (1989)	香港 ¹¹⁾ オーストラリア ¹¹⁾	-	流紋岩 ¹²⁾ 玄武岩 ラタイト		○	○	-	-	¹¹⁾ 既存データを利用, ¹²⁾ 深成岩と比較 斑岩
Hendricks & Whittig (1968a, b)	カスケード山脈	鮮新世	安山岩	土壌断面	○	○	-	-	
肥塚 (1979)	三笠山 (奈良県)	第三紀	安山岩	コアストーン	○	○	-	-	

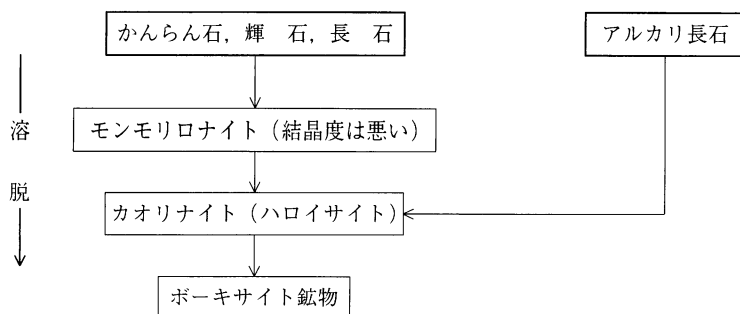
¹⁾ 化学：化学的性質の変化 鉱物：鉱物学的性質の変化 物理：物理的性質の変化 力学：力学的性質の変化 △：色についての調査

第1表 つづき

文 献	調 査 地 域	地 質 年 代	岩 型	試料採取 の 対 象	測 定 項 目			備 考	
					化学	鉱物	物理 力学		
Colman (1982a, b)	アメリカ西部	更新世	玄武岩 安山岩	風化皮膜	-	○	-	-	15年以上でB層が発達
Glasmann (1982)	カスケード山脈	-	安山岩	風化皮膜	-	○	-	-	
Ruxton (1968)	パプアニューギニア	-	玄武岩 ¹³⁾ デイサイト ¹⁴⁾		○	○	-	-	¹³⁾ ドレライト ¹⁴⁾ 火山灰・火山ガラス
Allnatt <i>et al.</i> (1983)	- ¹⁵⁾	-	流紋岩	-	○	○	-	-	¹⁵⁾ 実験 (1時間-1週間)
Nesbitt & Young (1984)	香港 ¹⁶⁾ オーストラリア ¹⁶⁾	-	流紋岩 玄武岩 ラタイト	-	○	○	-	-	¹⁶⁾ 既存データを利用、 深成岩より求めた熱力 学的データを火山岩に 適用
立山ほか (1982)	佐賀県, 鹿児島県	-	黒曜石 火山ガラス ¹⁷⁾	露頭	○	○	○ ¹⁸⁾	-	¹⁷⁾ シラス, ¹⁸⁾ 粒度 XRDでガラスの構造 を推定
大見ほか (1976)	熊本県	第三紀	安山岩	供試体	-	-	○	○	
平野 (1991)	兵庫県	-	流紋岩	地表	-	-	○ ¹⁹⁾	○	¹⁹⁾ 弾性波, 風化拡散係 数は0.1m ² /yr
斉藤ほか (1974a, b, 1975)	宮城県, 福島県	第三紀	安山岩 デイサイト 玄武岩	露頭	○	-	△	○	
藁谷 (1993)	耶馬溪	第三紀	安山岩	露頭	-	○	-	○	
Eggleton <i>et al.</i> (1987)	ビクトリア (オーストラリア)	第三紀	玄武岩	コアストーン	○	-	○	○	

(1964) は、オーストラリアのサウスウェールズ州東部の玄武岩の風化を論じ、造岩鉱物の風化系列を第1図のように示した。イスラエルの玄武岩の風化に関しては、Singer (1973, 1978), Singer and Navrot (1970) などがカオリナイトあるいはモンモリロナイトへの変質条件について考察した。その後、Navrot and Singer (1976) は、 SiO_2/Al_2O_3 値は未風化岩では5~7を示すが、風化物では2~4へと減少することを指摘した。Singer (1984) の

安山岩質玄武岩の風化に関する研究においては、中間層に水酸基をもつ高電荷のスメクタイトが認められ、ベイサナイトの風化については2八面体スメクタイトが認められると報告された。アルゼンチンのソレライト質玄武岩の風化については、Rodriguez (1982) により、粘土鉱物が地中に卓越する深度はその種類ごとに異なり、とくにハロイサイトとカオリナイトは同じ深度には共存しにくいことが示された。Wada *et al.* (1972) はハワイの玄武岩サブロ



第1図 玄武岩の風化にともなう鉱物変化
(Craig and Loughnan, 1964をもとに作成)

ライトより無機物ゲルとアロフェンを収集し、ゲルの大半はイモゴライトであることを報告した。ヨーロッパにおいては、Smith (1959, 1961) がイギリス・エジンバラ周辺に分布する玄武岩を取りあげ、かんらん石が赤鉄鉱および緑泥石に変質することを示した。また、Chesworth *et al.* (1981) はフランス・中央高地の調査を行い、風化断面中に黒色と赤色の土壌を認め、黒色帯は赤色帯中に存在するスメクタイト、ハロイサイト、赤鉄鉱/ゲータイト、および非晶質物質の変質物であることを明らかにした。Bain *et al.* (1980) および Bain and Russell (1980, 1981) は、スコットランドの第三系の玄武岩について、サブロライト中に2八面体モンモリロナイト/イライト混合層鉱物、赤鉄鉱、およびアナターゼが存在することを報告し、モンモリロナイト/バーミキュライト/イライト混合層鉱物中の各鉱物の量比を約2:1:1と算出した。Curtin and Smillie (1981) は、北アイルランドの玄武岩由来の土壌を対象とし、結晶構造中の陽イオンの占有状態を考慮しつつ鉱物の変化を論じた。その結果、玄武岩の風化生成物中の3八面体スメクタイトが、その構造を保持しながら2八面体スメクタイトとの混合層鉱物に変質することが示された。玄武岩質ガラスの変質に対しては、Zhou and Fyfe (1989) がパラゴナイト化に関する研究を行った。これによれば、最初にSiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO、およびNa₂Oの60%が溶出してゲル状のパラゴナイトが形成され、次にそれが繊維状のパラゴナイトに変化する。CaOとNa₂Oはその後も継続して溶出するが、SiO₂、Al₂O₃、およびMgOは溶液中から再吸収される。さらに、Kの比

率の増加がパラゴナイト化の指標になるとも述べている。また、鉱物中の変質箇所が特定された研究として、Smith *et al.* (1987) が挙げられる。これによれば、元素の溶出による玄武岩中のかんらん石の層状構造の層間部分に生じた歪みが腐食による変質を促進させ、その層間部分に粘土鉱物が集積する。

玄武岩の風化に関しては、風化生成物と現在の気候との関連を取りあげて論じた研究も多い。したがって、近年、研究地域もさらに拡大しつつある。Sherman (1952) は、ハワイの玄武岩上に発達する土壌中のギブサイト、カオリナイト、モンモリロナイトの含有量と降水量との対応関係を示した。Simonett and Bauleke (1963) は、オーストラリア北部の玄武岩上のラトソル(ラテライト)を調査し、(1)結晶度の悪いカオリナイトが増加する、(2)降水量の増加にともない、鉄(FeO、Fe₂O₃)およびギブサイトの含有量が増加する、(3)降水量の多い地域ではハロイサイトが見られるが、アロフェンは観察されない、ことなどを指摘した。また、Sieffermann and Millot (1969) は、ギニア湾岸における気候帯と玄武岩の風化生成物との対応を指摘した(第2表)。それらの研究によれば、風化生成物におけるアロフェンおよびハロイサイトの存否は風化環境により決定される。さらに、アルカリ・アルカリ土類金属の溶脱の程度と風化生成物とを対応させたSinger (1966, 1970)、Dan and Singer (1973)によれば、半乾燥地域ではモンモリロナイトが多く見られるが、半湿潤地域ではカオリン鉱物が多く存在する。Talkington *et al.* (1982) は、南極大陸のクイーンモード山脈における玄武岩の岩片に生じた風化皮膜

第2表 玄武岩の風化生成物と風化環境との関係
(Sieffermann and Millot, 1969をもとに作成)

	気 候 帯	風 化 生 成 物
Zone I	熱帯湿潤(ギニア湾岸) 年降水量10,000mm以上	アロフェン→ギブサイトと結晶質カオリナイト
Zone II	乾季が存在 年降水量3,000~6,000mm	アロフェン→水和ハロイサイト(10Å) ハロイサイト(7.4Å)、イモゴライト
Zone III	顕著な乾季が存在 年降水量1,500mm以上	アロフェン(極めて不安定)→ハロイサイト

の分析より、この地域においても主要な化学的風化は酸化と水和作用であるとした。また、Evans and Chesworth (1985) は、北極に近いカナダ・バフィン島の玄武岩においても、岩石中の Mg と Ca の量は風化にともない減少し、かんらん石、普通輝石がわずかながら風化することを示した。しかし、これらの研究は現在の気候環境および水分状態を、長期間の風化環境にそのまま外挿している。このことに関連して、丹 (1993) も、気候環境との対応ばかりでなく、岩石の産状とその後の変質条件も考慮しなければ風化機構を論ずることができないと述べている。丹によれば、隣接する2種の玄武岩において、粗粒な結晶の場合には輝石・斜長石はスメクタイトからハロイサイトへと変化するが、細粒な結晶の場合には鉱物はハロイサイトに変質せずに若干のカオリナイトに変化する。さらに、後者の玄武岩においてクリストバライトも同定されたことから、熱水変質の可能性も指摘された。

鉱物同定・化学組成分析を主とした研究に対し、溶出実験を行い化学種の溶出量および溶出機構を求めた研究はわずかである。Nesbitt and Wilson (1992) は、微量元素を含めた24種の陽イオンについて、一般に最も安定な元素と見なされている Ti との比をとり、これと Nesbitt and Young (1989) などが用いている CIA (Chemical Index of Alteration, $CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$) との関係性を求めた。その結果、従来 Ti とともに安定な元素と考えられていた Al は、風化期間が長くなると溶脱されることが判明した。

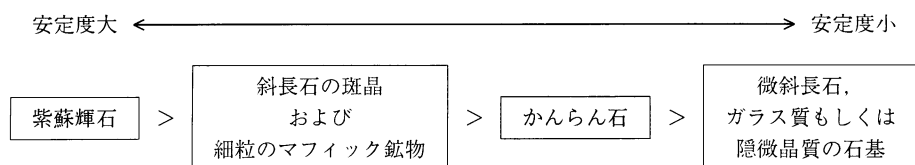
2. 安山岩の風化

安山岩の風化に関する研究は玄武岩のそれと比較して少なく、主要な研究の大半は合衆国と日本とで

行われている。Hendricks and Whittig (1968a, b) は、カリフォルニアのカスケード山脈において、かんらん石安山岩および紫蘇輝石安山岩のサブロライト化を調査した。その研究では、2つの母岩の組成は異なるもののサブロライト化の過程は類似していることが指摘され、造岩鉱物に関する安定系列が求められた (第2図)。さらに、風化の初期の段階には非晶質粘土が生成され、後にカオリンが非晶質粘土より多くなることも報告している。肥塚 (1979) は、奈良県、三笠山の普通輝石-紫蘇輝石安山岩の風化皮膜において、斜長石からスメクタイトが生成し、さらにスメクタイトはカオリナイトに変化することを報告した。また、Colman (1982a, b) は、アメリカ、ロッキー山脈を中心とする地域における氷河性堆積物中の安山岩礫および玄武岩礫の風化皮膜の厚さを測定した。その結果、安山岩礫が玄武岩礫よりも風化されにくい傾向が示された。さらに、Goldich (1938) などによって提唱されている鉱物の風化系列に対する検証が行われた。Glasmann (1982) は、オレゴン、西カスケード山脈における崩積土中の安山岩片を取りあげ、風化にともなう鉱物変化と岩石中の間隙について考察した。その結果、(1)普通輝石の斑晶は元素の溶出により間隙を残したまま変質し、その間隙にはスメクタイトが充填する、(2)斜長石も同様にスメクタイトに変化する、(3)ハロイサイトは土壌中には多く存在するものの変質岩片中には認められない、などが判明した。さらに、これらに基づき粘土鉱物の形成はきわめて狭い範囲の水分条件に依存することが述べられた。

3. デイサイト・流紋岩の風化

デイサイトおよび流紋岩の風化に関する研究は、安山岩のそれと同様に多いとはいえない。Ruxton



第2図 安山岩の造岩鉱物の安定度 (Hendricks and Whittig, 1968a, b をもとに作成)

(1968) はパプアニューギニアのデイサイトドレライト質の溶岩、デイサイト質のガラスと火山灰、および玄武岩質溶岩について、風化による化学組成の変化を求めた。そして、Reiche (1943) の WPI (Weathering Potential Index) および PI (Product Index) などの化学的風化指標を用いて風化過程を考察するとともに、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 値が風化程度の指標になると述べた。Allnatt *et al.* (1983) は、天然の流紋岩と合成した流紋岩 (アルミノ珪酸塩ガラス) を用いて溶出実験を行い、元素の溶出順序、溶出速度、電気伝導度の変化と実験温度との関係を明らかにした。Nesbitt and Young (1984) は実験に基づき、岩石中の化学種の溶出速度定数を求め、熱力学的に風化過程を推定した。ここでは、最初に実験における深成岩中の長石の溶出傾向が求められ、野外における初期段階の風化傾向との一致が示された。次に、この方法が火山岩に対しても試みられ、流紋岩質溶岩のガラスには適用できるものの、化学組成に広いレンジをもつ他の岩型の火山ガラスには適用できないことが明らかになった。立山ほか (1982) は、佐賀県伊万里地区に産する黒曜岩および鹿児島県古江に産するシラスを試料として、火山ガラスの風化過程を研究した。その結論として、風化にともないガラス構造中に H_2O が侵入し、 $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ の架橋構造が破壊されて一部が層状構造に変化することを推測した。

Ⅲ 物理的性質および力学的性質の変化に関する研究

風化にともない、岩石の物理的・力学的性質も大きく変化する。しかし、地球科学関連の分野においてこれらの性質の変化を調査した研究例は、化学的・

鉱物学的性質の変化を扱ったものと比較して決して多いとはいえない。物理的・力学的性質の変化に関する研究では、これらの性質の測定と測定結果に基づく風化帯の定義に主眼が置かれる。これは、土木工学などの分野において、物理的・力学的性質データの収集が応用面から見て重要視されていることと関連する。

大見ほか (1976) は、新第三系の輝石安山岩、角閃石輝石安山岩、凝灰質安山岩について、弾性波伝播速度、かさ密度、空隙率、一軸圧縮強度、静的ヤング率、ポアソン比などを測定し、これらの諸物性間の関係を調べた。その結果、(1) 風化の進行にともないポアソン比が大きくなる、(2) 岩石のかさ密度は空隙率の単純な関数で表される、(3) 砂岩等の風化が膠結物質から進行するのに対し、安山岩は骨格を保持しつつ風化する、などが示された。また、同時にこれらの物性値に基づき、安山岩の風化度の分類法が提唱された (第3表)。

また、平野 (1991) は、大阪西北方の流紋岩 (有馬層群) について、弾性波探査より得られた走時曲線をミラージュ層として解析した。その結果、地表面における弾性波速度とその地下への増加率をかこう岩類の値と比較し、流紋岩の方が斜面の内部構造が不均質であると推測した。また、流紋岩地域とかこう岩地域の地形の違いは、風化岩の空隙率の違いに対応するとした。

Ⅳ 岩石の諸性質の変化に関する総合的な研究

従来の火山岩の風化に関する研究の中で、化学的・鉱物学的性質と物理的・力学的性質とを同時に取りあげ、それらの相互関係を扱った例は少ない。斉藤

第3表 安山岩の風化度の分類 (大見ほか, 1976をもとに作成)

測定項目	風化度 1	風化度 2	風化度 3	風化度 4	風化度 5
一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	≥1,000	999~500	499~150	149~30	<30
縦波伝播速度 (km/s)	≥4.50	4.49~3.50	3.49~2.50	2.49~1.50	<1.50
見かけ密度 (g/cm ³)	≥2.55	2.54~2.40	2.39~2.20	2.19~2.00	<2.00

第4表 安山岩の風化生成物の産状 (藁谷, 1993をもとに作成)

風化帯	産状	強度	採取試料	Ortho-mi- class	Albite	Biotite	Clino- pyrox- ene	Ver- micu- lite	Hydrated halloy- site	Meta- halloy- site	Smec- tite
ⅢB	核岩の痕跡, 斑点, 灰白色	山中式硬度計 50 (kgf/cm ²)	(Ⅲa) 赤褐色 サブロライト	+	-	-	-	+	++	++	+
ⅢA	灰白色の核岩 と風化皮殻	ハンマーで粒状に 砕くことが可能	(Ⅲb) 細粒化し た核岩	+	-	-	-	+	++	++	(+)
Ⅱ	直径約40cmの核 岩 (厚さ2~2.5 cmの風化皮殻)	ハンマーで 砕くことが可能	(Ⅱa) 核岩	+	+	(+)	-	-	-	-	+
			(Ⅱb) 核岩	+	(+)	(+)	-	+	(+)	+	+
			(Ⅱc) 風化皮膜	+++	+++	+	+++	-	-	-	(+)
I	黒色の未風化岩	山中式硬度計 500 (kgf/cm ²)	(Ⅰ) 節理に囲ま れた新鮮な母岩	+++	+++	+	+++	-	-	-	(+)

第5表 元素の溶脱性 (Eggleton *et al.*, 1987をもとに作成)

風化の初期に溶出量の多い元素	Ca, Mg, K, Na, Rb, Sr
徐々に溶出する元素	Si, Mn, P, Cu, Zn
溶出量のきわめて少ない元素	Ti, V, Cr, Fe, Ni, Zr, Nb, Al

ほか (1974a, b, 1975) は, 第三系の火山岩 (玄武岩, 安山岩, 石英安山岩) と深成岩 (石英閃緑岩) の空隙率, 弾性波探査, 圧縮強度などの物理的・力学的性質を測定するとともに, 偏光顕微鏡による鉱物の変質の観察を行った。そこでは, 深成岩では鉱物粒界から変質が進行するので, 物理的・力学的性質が急変するが, 火山岩では石基の部分から変質が進行するので, これらの性質は徐々に変化する, と述べられている。藁谷 (1993) は, 耶馬溪の安山岩溶岩について, 風化による鉱物学的性質と力学的性質との変化を対応させ, 風化分帯および鉱物の風化系列を求めた (第4表)。その結果, 一次鉱物については Goldich (1938) の風化系列が成立することが示された。また, 新鮮岩中にも認められたスメクタイトを, 溶岩が徐々に固結する際の熱水・熱気による初生的変質物と判断し, パーミキュライトとハロイサイトとを, 風化による一次鉱物の変質物と考えた。Eggleton *et al.* (1987) は, オーストラリアの玄武岩のコアストーンに生じた風化皮膜を採取し, 化学的・鉱物学的性質の変化のほか, 最も有効な風化指標である密度に関するデータも得た。化学組成とかさ密度との積により化学種の真の溶脱量が求められた結果, 元素の溶脱様式が3つに分類された

(第5表)。さらに, 従来の研究で指摘されている鉱物の安定系列 (たとえば, Loughnan, 1969) と相違する結果 (火山ガラス~かんらん石<斜長石<輝石<不透明鉱物) が得られたが, 鉱物により風化開始時期および相対的な風化速度が異なるためにこの系列の順序が変わる場合もあるとの解釈がなされた。しかし, この Eggleton *et al.* の結果は, 単に各性質の比較および組み合わせにより風化指標を求めたのみである。したがって, 厳密な風化指標もしくは岩石の風化系列を構築するためには, 諸性質変化の相互関係をより詳細に解明せねばならない。

V 風化速度に関する研究

地形形成機構を把握するためには, 風化速度を求めることが不可欠である。しかし, 一般に天然における風化速度はきわめて小さいので, 岩石の変質速度をモニターすることは困難である。火山岩の風化速度に関してこれまでに報告された研究を第6表に示す。風化速度という場合, 研究者により測定法が異なっており, しかも多様な単位が用いられているので, ここでは単位を統一して岩型ごとの比較を行うことはできない。なお, 第1表にまとめた各研究は, いずれも風化速度を扱っていない。火山岩に関

第6表 風化速度に関する研究

文献	調査地域	岩型	対象	化学	鉱物	物理	力学	風化速度
Hay (1960)	セントピセント島 (西インド諸島)	安山岩質火山灰 安山岩質ラピリ	テフラ	-	○	-	-	土壌形成速度: 1.5~2 feet/1000yr. 火山ガラスの粘土化: 15 g/cm ² /1000yr.
Kirkman & McHardy (1980)	ニュージーランド	流紋岩質火山ガラス 安山岩質火山ガラス	テフラ	○	○	-	-	約3,000年でアロフエン化, 約7,000年で ハロイサイト化(流紋岩) 約300年で粘土画分が消失(安山岩)
湯佐ほか (1988)	富士山	玄武岩質スコリア	風化皮膜	○	○	○	-	変質層の形成速度: 0.5 μm/280yr, 8.8 μm/2800yr
Černohouz & Šolc (1966)	チェコスロバキア	玄武岩	風化殻	-	-	△ ²⁾	-	風化殻の形成速度を, $d = A \log(1+Bt)$ ($A = 4.64 \pm 0.05, B = 0.010 \pm 0.001$) で 近似
Colman & Pierce (1981)	アメリカ西部	玄武岩, 安山岩	風化皮膜	-	-	△	-	風化皮膜の形成速度: 1.1~2.2mm/0.3Ma (玄武岩) 1.3~3.0mm/0.3Ma (安山岩)
Friedman & Smith (1960)	世界各地 ³⁾	黒曜石	水和層	-	-	△	-	水和速度 ³⁾ エジプト: 8.1 μm ² /1000yr エクトル: 11 μm ² /1000yr ユタ州: 6.5 μm ² /1000yr メキシコ中部: 4.5 μm ² /1000yr アラスカ南部: 0.8 μm ² /1000yr 北極: 0.3 μm ² /1000yr
Katsui & Kondo (1965)	北海道	黒曜石	水和層	-	-	△	-	水和速度: 1.6~2.0 μm ² /1000yr
Friedman (1968)	カリフォルニア	流紋岩	水和層	-	-	△	-	水和速度: 5 μm ² /1000yr
谷口 (1980)	神津島	流紋岩	水和層	-	-	△	-	水和速度: 4.46 μm ² /1000yr
Friedman & Long (1976)	アメリカ	流紋岩質火山ガラス	水和層	○	-	△	-	化学組成と水和速度との関係
Dethier (1986)	アメリカ北西部	玄武岩, 安山岩	イオンの溶出量	○	-	-	-	溶出速度: 30~55t/km ² /yr
Caine (1979)	コロラド	流紋岩質安山岩	タブレット	-	-	○	-	重量の減少速度: 0.079 ± 0.012%/yr
糟谷 (1979)	日本	流紋岩質安山岩 安山岩	石材建造物	-	-	○	○	剥離(崩落)速度 [r] と圧縮強度 [Sc] との関係 Sc = 100kgf/cm ² のとき, $r = 0.5 \text{ cm} / 20 \text{ yr}$ Sc = 2000kgf/cm ² のとき, $r = 0.5 \text{ cm} / 900 \text{ yr}$

¹⁾化学: 化学的性質の変化 鉱物: 鉱物学的性質の変化 物理: 物理的性質の変化 力学: 力学的性質の変化 ²⁾△: 色についてのみ調査

する従来の研究は、(1) 風化期間が既知の火山噴出物を用いて算出する方法、(2) 風化期間を設定し、測定および実験により算出する方法、の2つに分類できる。

第1の研究は、長期間風化を受けてきた物質を調査対象としたものである。それらの研究は、固結した火山岩よりもテフラを扱ったものが多い。そのため、玄武岩質よりも安山岩～流紋岩質のテフラを対象とした研究が多い（たとえば、Hay, 1960; Kirkman and McHardy, 1980）。Hay (1960) は、高温多湿な西インド諸島のセントビンセント島の安山岩質火山灰を調査し、噴火後4,000年間で粘土鉱物が生成されることを示した。Kirkman and McHardy (1980) は、ニュージーランド北島における安山岩と流紋岩の風化について調査し、(1) 流紋岩質中の $1\ \mu\text{m}$ 以下の火山ガラスは、約3,000年でアロフェンに変質し、約7,000年でアロフェンからハロイサイトに結晶化し始める、(2) 安山岩質テフラでは、約300年間で $1\ \mu\text{m}$ 以下の粘土画分がほとんど消失する、との結果を得た。湯佐ほか (1988) は280年前と2,800年前に噴出した富士山のスコリアの密度・含水比・粒度・化学組成を測定した。これと同時に、スコリア採取位置の下方約2 mから採水した湧水および試料中の間隙水の水質分析を行った。その結果、(1) スコリアの変質層は280年前のもので約 $0.5\ \mu\text{m}$ 、2,800年前のもので約 $8.8\ \mu\text{m}$ であること、(2) それらの変質層にはスメクタイトが生成されていること、(3) 岩石からの元素の溶出量と地下水の水質との間に対応関係があること、などを報告した。Černohouz and Šolc (1966) は、風化開始時期が既知の礫に生じた風化皮膜を用いて、その厚さから風化速度を求めた。また、Colman and Pierce (1981) は、氷河性堆積物中の玄武岩・安山岩礫の風化皮膜の厚さを測定し、皮膜の成長曲線を描いている。

流紋岩質の火山ガラスや黒曜石の表面に生ずる水和層も風化皮膜の一種と見なされる。Friedman and Smith (1960) は、大気中の水分を吸着した黒曜石表面の水和層の厚さが時間の関数であると仮定して、年代既知の黒曜石製石器の水和速度を求め、これをもとに年代未知の石器の年代を推定した。その後、

この方法を用いて、石器の年代（たとえば、Katsui and Kondo, 1965）や流紋岩質溶岩の年代（たとえば、Friedman, 1968; 谷口, 1980）が推定された。また、Friedman and Long (1976) は実験に基づき、黒曜石の水和速度が温度のほかに岩石の化学組成にも依存することを明らかにした。すなわち、水和速度は SiO_2 の比率が高いほど大きく、 CaO や MgO の比率が高いほど小さくなる。

第2の研究は、元素の溶出量から岩石の重量変化を求めたものである。これらの研究には、質量収支の観点から、小流域における河川水中の溶存物質の濃度を測定して、流域の風化速度を推定したもの（たとえば、Dethier, 1986）や、砕いた岩石を用いて重量の減少速度を求めた研究（たとえば、Caine, 1979）がある。Dethier (1986) は、アメリカ北西部の火山岩の山地流域において、溶出速度として約 $30\sim 55\text{t}/\text{km}^2/\text{yr}$ を求め、この値が變成岩とシルト質堆積岩の中間値であることを指摘した。また、Caine (1979) は、デイサイト～流紋岩質岩石の粉砕物 60 g を用い、コロラド州南西部における風化速度（重量損失速度）として $0.079\pm 0.012\%/yr$ を得た。これらの研究では、いずれも数週間から十数年という短い期間でしか測定もしくは実験を行うことができないため、長期間にわたる風化速度を求めることができない。しかし、糟谷 (1979) のように、安山岩、流紋岩質安山岩、凝灰岩、かこう岩、砂岩などからなる建造物の剥離速度を測定した例もある。この場合、百年オーダーの風化速度が得られることになる。剥離（崩落）深度および岩石の物理的・力学的性質の測定により、(1) 火山岩においては、雨水の間隙への侵入が堆積岩および深成岩よりも深いために、風化もより深くまで及ぶこと、(2) 剥離の進行速度は岩石の圧縮強度および気象条件（温度差、日照時間）と深く関係すること、などが示された。

VI おわりに

火山岩の風化に関する従来の研究を概観すると、化学的・鉱物学的性質の変化に関する研究例が多い。これに対し、物理的・力学的性質の変化をもとに風化過程を論じた例は少ない。さらに、化学的・鉱物

学的性質と物理的・力学的性質の変化を同時に検討した研究はきわめて少ない。各火山岩型における風化様式を理解するためには、諸性質変化の相互関連性を求めねばならない。同様に、風化速度に関してもすべての性質の変化を調査した研究が望まれる。一般に、火山岩に限らず、他の岩石においても物理的・力学的性質の変化速度を求めた例は少ない。なぜなら、風化にさらされている期間の認定が難しいからである。しかし、火山岩においては、とくに数千～数万年にわたる噴出年代を風化期間として設定できる利点があり、風化速度を詳細に検討できる可能性がある。

文 献

- 大見美智人・金沢鉄治・井上正康 (1976) : 風化安山岩の物性について。応用地質, **17**, 1-9.
- 小口千明・八田珠郎・松倉公憲 (1993) : 多孔質流紋岩の風化とそれともなう物性変化。地形, **14**, 343-344.
- 糟谷憲司 (1979) : 石材建造物を対象とした岩石の風化実態調査とその考察。応用地質, **20**, 1-11.
- 肥塚真知子 (1979) : 三笠安山岩の風化過程。大和地学, **25**, 18-31.
- 斉藤徳美・阿部 司・九里尚一 (1974a) : 火山岩の風化に関する研究 (I) - 鉱物の変質過程と弾性波速度について。物理探鉱, **27**, 3-15.
- 斉藤徳美・阿部 司・九里尚一 (1974b) : 火山岩の風化に関する研究 (II) - 弾性波速度・見掛密度・有効間隙率・1軸圧縮強さ相互の関係について。物理探鉱, **27**, 16-26.
- 斉藤徳美・阿部 司・九里尚一 (1975) : 火成岩の風化による空隙組織の変化と弾性波速度との関係。物理探鉱, **28**, 11-21.
- 高嶋千明 (1993) : 多孔質流紋岩の風化とそれともなう物性変化。筑波大学修士論文, 154p.
- 立山 博・木村邦夫・陣内和彦・恒松絹江 (1982) : 火山ガラスの風化による変化と加熱発泡性について。粘土科学, **22**, 1-10.
- 谷口宏充 (1980) : 神津島流紋岩のガラス質石基に見られる水和層とその火山地質学的意義。火山, **25**, 217-229.
- 丹 恵美 (1993) : 弥彦山地における玄武岩の風化。谷津榮壽編 : 『火打山付近の氷河地形・風化論・その他』, 創造社, 59-72.
- 平野昌繁 (1991) : ミラージ現象にもとづく流紋岩地域の風化と地形。応用地質, **32**, 1-10.
- 湯佐泰久・新井 隆・亀井玄人・佐々木憲明・高野 仁・桜本勇治 (1988) : 富士火山スコリア中の玄武岩質ガラスの風化変質-環境条件の検討とナチュラルアナログ研究。三鉱学会講演要旨集, p.41.
- 藁谷哲也 (1993) : 耶馬溪, 八面山における安山岩溶岩の風化過程。日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **28**, 15-24.
- Abbott, A. T. (1958) : Occurrence of gibbsite on the island of Kauai, Hawaiian Islands. *Economic Geol.*, **53**, 482-853.
- Allnatt, A. R., Bancroft, G. M., Fyfe, W. S., Jacobs, P. W. M., Karkhanis, S. N., Melling, P. J., Nishijima, A., Vempati, C. S. and Tait, J. (1983) : Leaching behavior and electrical conductivity of natural rhyolite and modified synthetic rhyolites. *Chem. Geol.*, **38**, 329-357.
- Bain, D. C., Ritche, P. R. S., Clark, D. R. and Duthie, D. M. L. (1980) : Geochemistry and Mineralogy of weathered basalt from Movern, Scotland. *Mineral. Mag.*, **43**, 865-872.
- Bain, D. C. and Russell, J. D. (1980) : Swelling minerals in basalt and its weathering products from Movern, Scotland: I. Interstratified montmorillonite-vermiculite-illite. *Clay Miner.*, **15**, 445-451.
- Bain, D. C. and Russell, J. D. (1981) : Swelling minerals in basalt and its weathering products from Movern, Scotland: II. Swelling chlorite. *Clay Miner.*, **16**, 203-212.
- Barth, T. W. (1948) : Oxygen in rocks: A basis for petrographic calculations. *Jour. Geol.*, **56**, 50-61.

- Bates, T. F. (1962): Halloysite and gibbsite formation in Hawaii. *Ninth Nation. Conf. Clays and Clay Miner.*, Pergamon Press, Pennsylvania, 315–328.
- Caine, N. (1979): Rock weathering rates at the soil surface in an alpine environment. *Catena*, **6**, 131–144.
- Černohouz, J. and Šolc, I. (1966): Use of sandstone wanes and weathered basaltic crust in absolute chronology. *Nature*, **212**, 806–807.
- Chesworth, W., Dejou, J. and Larroque, P. (1981): The weathering of basalt and relative mobility of the major elements at Belbex, France. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **45**, 1235–1243.
- Colman, S. M. (1982a): Clay mineralogy of weathering rinds and possible implications concerning the sources of clay minerals in soils. *Geology*, **10**, 370–375.
- Colman, S. M. (1982b): Chemical weathering of basalts and andesites: Evidence from weathering rinds. *Geol. Surv. Prof. Pap.*, **1246**, 51p.
- Colman, S. M. and Pierce, K. L. (1981): Weathering rinds on andesitic and basaltic stones as a Quaternary age indicator, Western United States. *Geol. Surv. Prof. Pap.*, **1210**, 51p.
- Craig, D. C. and Loughnan, F. C. (1964): Chemical and mineralogical transformation accompanying the weathering of basic volcanic rocks from New South Wales. *Australian Jour. Soil Res.*, **2**, 218–234.
- Curtin, D. and Smillie, G. W. (1981): Composition and origin of smectite in soils derived from basalt in Northern Ireland. *Clays and Clay Miner.*, **29**, 277–284.
- Dan, J. and Singer, A. (1973): Soil evolution on basalt and basic pyroclastic materials in the Golan Heights. *Geoderma*, **9**, 165–192.
- Dethier, D. P. (1986): Weathering rates and the chemical flux from catchments in the Pacific Northwest, U. S. A. Colman, S. M. and Dethier, D. P. eds. : *Rates of chemical weathering of rocks and minerals*; Academic Press, Orlando, 503–530.
- Eggleton, R. A., Foudoulis, C. and Varkevisser, D. (1987): Weathering of basalt: Changes in chemistry and mineralogy. *Clay and Clay Miner.*, **35**, 161–169.
- Evans, L. J. and Chesworth, W. (1985): The weathering of basalt in an Arctic environment. *Catena, Supple.*, **7**, 77–85.
- Friedman, I. (1968): Hydration rind dates rhyolite flows. *Science*, **159**, 878–880.
- Friedman, I. and Long, W. D. (1976): Hydration rate of obsidian. *Science*, **191**, 347–352.
- Friedman, I. and Smith, R. L. (1960): A new dating method using obsidian: part I, the development of the method. *Amer. Antiq.*, **25**, 476–493.
- Glasmann, J. R. (1982): Alternation of andesite in wet, unstable soils of Oregon's Western Cascades. *Clays and Clay Miner.*, **30**, 253–263.
- Goldich, S. S. (1938): A Study of rock weathering. *Jour. Geol.*, **46**, 17–58.
- Hay, R. L. (1960): Origin and weathering of late Pleistocene ash deposits on St. Vincent, B. W. I. *Jour. Geol.*, **67**, 65–87.
- Hendricks, D. M. and Whittig, L. D. (1968a): Andesite weathering: I. Mineralogical transformations from andesite to saprolite, *Jour. Soil Sci.*, **19**, 135–146.
- Hendricks, D. M. and Whittig, L. D. (1968b): Andesite weathering: II. Geochemical changes from andesite to saprolite. *Jour. Soil Sci.*, **19**, 147–153.
- Katsui, Y. and Kondo, Y. (1965): Dating of stone implements by using hydration layer of obsidian. *Japanese Jour. Geol. Geogr.*, **36**, 45–60.

- Kirkman, J. H. and McHardy, W. J. (1980): A comparative study of the morphology, chemical composition and weathering of rhyolitic and andesitic glass. *Clay Miner.*, **15**, 165–173.
- Loughnan, F. C. (1962): Some considerations in the weathering of the silicate minerals. *Jour. Sedimen. Petrol.*, **32**, 284–290.
- Loughnan, F. C. (1969): *Chemical Weathering of the Silicate Minerals*. Elsevier, New York. 154p.
- Navrot, J. and Singer, A. (1976): Geochemical changes accompanying basic igneous rocks Clay transition in humid mediterranean climate. *Soil Sci.*, **121**, 337–345.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1984): Prediction of some weathering trends of plutonic volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **48**, 1523–1534.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1989): Formation and diagenesis of weathering profiles. *Jour. Geol.*, **97**, 129–147.
- Nesbitt, H. W. and Wilson, R. E. (1992): Recent chemical weathering of basalts. *Amer. Jour. Sci.*, **292**, 740–777.
- Payne, J. H. and Mau, K. T. (1946): A study of the chemical alteration of basalt in the Kilauea region of Hawaii. *Jour. Geol.*, **65**, 345–358.
- Reiche, P. (1943): Graphic representation of chemical weathering. *Jour. Sedimen. Petrol.*, **13**, 58–68.
- Rodriguez, A. M. I. (1982): Basaltic and rhyolitic rocks as parent materials of halloysite in Argentine deposits. *Proc. Clay Conf. Bologna and Pavia, Italy, 1981*, Elsevier Scientific Publishing co., 605–612.
- Ruxton, B. P. (1968): Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Jour. Geol.*, **76**, 518–527.
- Sherman, G. D. (1952): The genesis and morphology of the almina-rich laterite clays: Clay and laterite genesis. *Amer. Inst. Min. Met.*, 154–161.
- Sieffermann, G. and Millot, G. (1969): Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroon: Allophane, halloysite, meta-halloysite, kaolinite, and gibbsite. *Proc. Clay Conf., Tokyo, Japan*, **1**, 1969, Israel Universities Press, Jerusalem, 417–430.
- Simonett, D. S. and Bauleke, P. (1963): Mineralogy of soils on basalt in North Queensland. *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, 205–212.
- Singer, A. (1966): The mineralogy of the clay fraction from basaltic soils in Galilee, Israel. *Jour. Soil Sci.*, **17**, 136–147.
- Singer, A. (1970): Weathering products of basalt in the Galilee: I. Rock-soil interface weathering. *Israel Jour. Chemistry*, **8**, 459–468.
- Singer, A. (1973): Weathering products of basalt in the Galilee and Menashe II: Vesicular and saprolitic weathering. *Israel Jour. Earth Sci.*, **22**, 229–242.
- Singer, A. (1978): The nature of basalt weathering in Israel. *Soil Sci.*, **125**, 217–225.
- Singer, A. (1984): Clay formation in saprolites of igneous rocks under semiarid to arid conditions, Negev, Southern Israel. *Soil Sci.*, **137**, 332–340.
- Singer, A. and Navrot, J. (1970): Diffusion rings in altered basalt. *Chem. Geol.*, **6**, 31–41.
- Smith, W. W. (1959): Pseudomorphs after olivine in Markle basalt. *Mineral. Mag.*, **32**, 324–331.
- Smith, W. W. (1961): Structural relationships within pseudomorphs after olivine. *Mineral. Mag.*, **32**, 823–825.
- Smith, K. L., Milnes, A. R. and Eggleton, R. A. (1987): Weathering of basalt: Formation of iddingsite. *Clays and Clay Miner.*, **35**, 418–428.

- Talkington, R. W., Mayewski, P. A. and Gaudette, H. E. (1982): Geochemical and glacio-geomorphic implications of basalt weathering in the Queen Maud Mountains, Antarctica. *Geol. Mag.*, **119**, 553–566.
- Tiller, K. G. (1958): The geochemistry of basaltic materials and associated soils of south-eastern South Australia. *Jour. Soil Sci.*, **9**, 225–241.
- Wada, K., Henmi, T., Yoshinaga, N. and Patterson, S. H. (1972): Imogolite and allophane formed in saprolite of basalt on Maui, Hawaii. *Clays and Clay Miner.*, **29**, 375–380.
- Yatsu, E. (1988): *The Nature of Weathering: An Introduction*. Sozosha, Tokyo, 624p.
- Zhou, Z. and Fyfe, W. S. (1989): Palagonitization of glass from DSDP Site 335, Leg 37: Textures, chemical composition, and mechanism of formation. *Amer. Mineral.*, **74**, 1045–1053.