

安達太良火山, 12 万年前噴火(岳噴火)における噴火推移の復元: 火口近傍露頭と山麓火砕流との対比による推察

藤原健一郎*・長谷川 健*・藤 縄 明 彦*

(2014 年 8 月 10 日受付, 2014 年 10 月 20 日受理)

Sequence of the 120 ka Adataro-Dake Eruption from Adataro Volcano, Fukushima, Japan:
Based on Correlations between the Outcrops of Pyroclastic Fall Deposits at
the Summit and Flow Deposits on the Flank and Foot of the Volcano

Ken-ichiro FUJIWARA*, Takeshi HASEGAWA* and Akihiko FUJINAWA*

We performed systematic sampling and description of the Adataro-Dake tephra outcrop on the summit of Adataro volcano, Fukushima Prefecture, Japan in order to reveal the detailed eruption sequence and temporal evolution of the magma system of this volcano that erupted 120 ka BP. Even though there is no recognizable eruption hiatus represented by a paleosoil layer, pyroclastic fall characteristics at the outcrop permit to divide Adataro-Dake tephra into 19 layers: A to R; from bottom to top. The earlier layers (A to L) are characterized by successive pumice fall deposits, intercalated by thin volcanic sand layers. The later layers (M to R) are rich in scoria fall and are partly welded, with agglutinate found in layers O and R. Representative clasts from each layer were analyzed to determine the grain size distribution, componentry, modal composition and whole rock chemistry. Layer M can be correlated petrologically and petrographically with the lower part of Yugawa pyroclastic flow deposit on the eastern foot and the Motoyama pyroclastic flow deposit on the western flank of the volcano. Similarly, the upper part of Yugawa pyroclastic flow correlate with layer N, meanwhile the upper part of Motoyama pyroclastic flow correlate with layers O or R. There is an increase in the lithic fraction with decreasing sorting in layer M, which we interpret to indicate increasing enlargement of vent during the phase of this layer. The scoria/pumice volume ratio also increases remarkably in layer M, suggesting that vent enlargement and sudden increase of mafic magma during phase M caused the column collapse that generated the Yugawa and Motoyama pyroclastic flows. The mafic magma composition changed after layer O, with the FeO*/MgO ratios becoming less than 2.1. After this change in chemistry in phases O to R, pyroclastic flows were continuously generated and agglutinated deposits were formed at the summit. This suggests that the eruption style of the final phase abruptly changed to relatively low column height.

Key words: Adataro volcano, agglutinate, Pyroclastic flow deposit, Correlation, Eruption sequence, Magma composition

1. はじめに

福島県中北部に位置する安達太良火山は、東北日本弧の火山フロントを構成する第四紀複合火山である (Fig. 1)。本火山は東西約 12 km, 南北約 15 km の範囲に、主として安山岩質の火山錐がほぼ南北に配列した火山列をなし、主なピークは北から鬼面山 (1482 m)、箕輪山 (1728 m)、鉄山 (1709 m)、矢筈ヶ森 (1673 m)、安達太良山 (1700 m)、和尚山 (1601 m) と称される。本火山は、約 55 万年

前あるいはそれよりも古い時期から現在まで、活動を続けてきた活火山である (藤縄, 1980)。藤縄ほか (2001) によれば、その活動期は、休止期の挟在により、大きく三期に区分される。最新の第三期は、三活動期中、最長・最大規模であり、約 25 万年前から現在までに、カルケアルカリ安山岩とデイサイトの噴出を繰り返し、本火山列の主体部を形成した。藤縄・鎌田 (2005) では、第三期をさらに、噴火様式や休止期の存在から 3-1、3-2、3-3 期

* 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1

茨城大学理学部

Department of Earth Sciences, College of Science, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512, Japan.

Corresponding author: Akihiko FUJINAWA

e-mail: fujinawa@mx.ibaraki.ac.jp

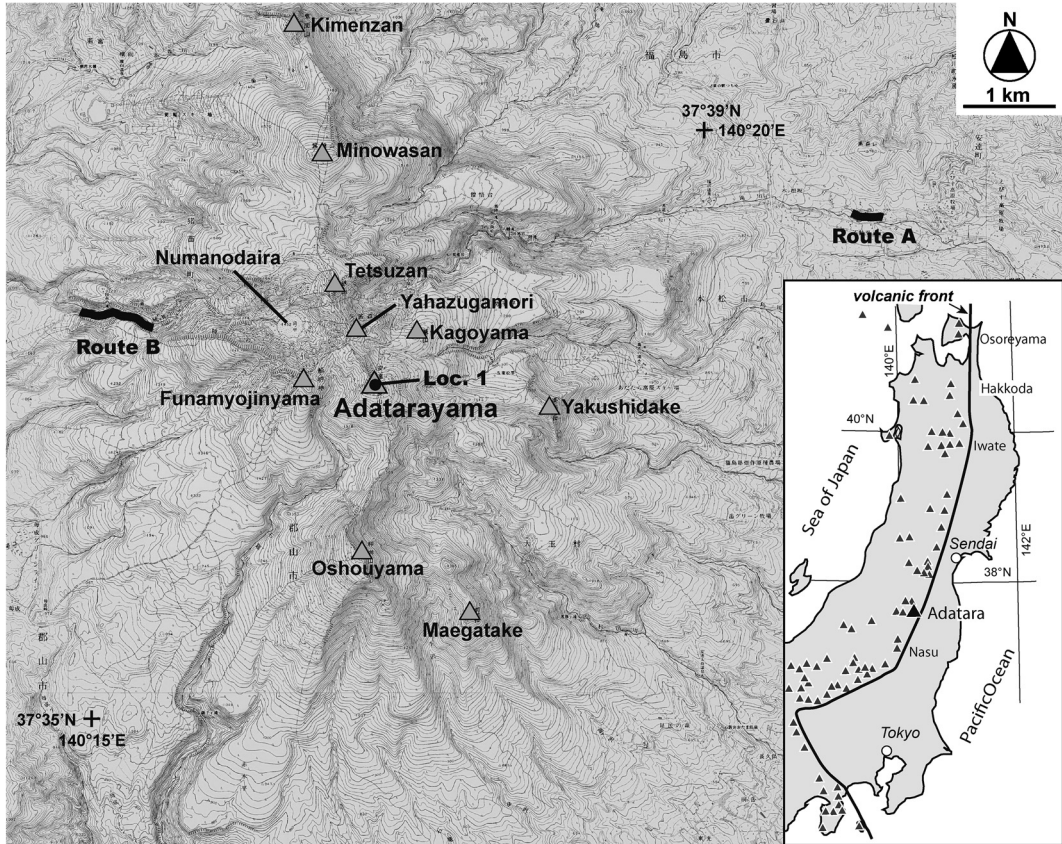


Fig. 1. Location map of Adataro volcano based on the 1/20,000 scale Fukushima-hokubu map of the Japan Geographical Survey Institute. Triangles show the peaks of major volcanic edifices, with locality 1 showing the Adatarayama peak.

に細分している。25万～20万年前頃にかけての3-1期では、平坦な上面の大規模な溶岩台地を形成する活動が主体であった。3-1期の活動後、約7万年の休止期を経て発生した、本研究対象の岳噴火(阪口, 1995)は3-2期にあたり、その噴出年代は、テフロクロノロジーにより、約12万年前とされている(鈴木, 1999; 山元・阪口, 2000)。このとき放出・堆積した降下軽石は安達太良岳軽石(早田・西城, 1987; 町田・新井, 1992)と呼ばれ、噴出量は約 $2\text{ km}^3\text{DRE}$ (山元・阪口, 2000)で、安達太良山頂部から東山麓、さらに東方の太平洋沿岸まで分布が認められる。この噴火では、デイサイト質軽石と安山岩質スコリアが同時に噴出し、さらに噴火の途中で、安山岩質マグマ供給系の変換が起こったと解釈されている(藤縄・鎌田, 2005)。また、この噴火時に火砕流も発生したと考えられ、その堆積物が複数記載されており、これらは東山麓および西中腹部において、それぞれ湯川火砕流(阪口, 1995)・元山火砕流(藤縄, 1980)と称される。

このように12万年前の岳噴火は、安達太良火山にお

ける、最大規模の噴火であるとともにマグマ供給系の変換点でもあり、本火山の噴火史や、カルクアルカリマグマの生成・進化過程を論じる上で重要な噴火と言える。しかしながら、火砕流の発生時期との関係も含め、この噴火の詳細な推移は明らかになっていない。本研究では、安達太良山頂付近に分布し、岳噴火の降下堆積物が連続的に観察できる火口近傍露頭において、詳細な岩相記載と試料採取を行い、火砕流との対比を試みた。また、採取試料について、本質物質の岩石学的特徴や粒度特性の時間変化を明らかにし、マグマ系の変換点や噴火推移を詳細に検討したので報告する。

2. 研究方法

2-1 調査対象と地域

本研究では、まず上述の安達太良山頂付近の露頭(Fig. 1のLoc. 1:北緯 $37^{\circ}37'18''$, 140°17'19")において一連の岳噴火堆積物の調査を行った。藤縄・鎌田(2005)による安達太良第2降下火砕物の記載を踏襲し、本堆積物を

19 層 (下位から A~R) に区分して, 記載と試料採取 (バルクサンプリング) を行った。なお, 本論における最大粒径とは, 露頭内で確認した最も大きい岩片 3 つの平均粒径を指す。

一方で, 岳噴火時に発生したと考えられる 2 つの火砕流の堆積物を調査した。湯川火砕流堆積物 (以下, 堆積物を省略) については東麓湯川沿い (Fig. 1 の Route A) の標高 600 m 付近で, 元山火砕流は西側中腹部, 硫黄川沿いの標高 1200~1300 m 白糸の滝付近 (Fig. 1 の Route B) で, それぞれ記載・試料採取を行った。

2-2 室内分析

2-2-a 鉱物モード組成および全岩主化学組成

岳噴火堆積物の各層および山麓の火砕流について, 本質物質の斑晶モード測定および全岩化学組成分析を行った。モード測定では, 各層につき軽石 2 試料を薄片にし, 1 枚の薄片につき 2,000 点をカウントした。気泡はカウントに入れず, 長径 0.1 mm 以上の鉱物を斑晶と定義した。ただし, 同一層に軽石とスコリアが混在する場合は, 各 2 試料について同様に測定した。

全岩化学組成分析は, 茨城大学の蛍光 X 線分析装置 (RIGAKU 製 3270 型) を使用し, 主に永尾ほか (1997) に準じたガラスビード法を用い, 希釈率は 1:2 で, 主成分元素の測定を行った。この際, ビード作成前の約 850°C での灼熱による減量が 5% 以上の試料, つまり E 層, Q 層の軽石は, 変質による粘土鉱物の割合が多いと考え分析対象から除外した。岳噴火堆積物は, スコリアの最大粒径が 2 cm 以下と, 総じて共存する軽石よりも細粒の傾向があったため, スコリアの多くは複数粒子を一括して処理・分析を行った。この結果, 各層につき軽石は概ね 2 試料以上, スコリアは 1 試料の分析値を得た。主成分元素の合計はほぼ 98~100 wt.% の範囲を示したが, 本論では, これらの合計値を 100% に換算した各元素の重量比 (wt.%) を示す。こうした手法のため, 岳噴火堆積物のうち, 砂サイズ以下の火山砂層 (D, G, I, K 層) については, モード測定および全岩化学組成分析は行っていない。

2-2-b 岳噴火堆積物の粒度・構成物量比

岳噴火堆積物のうち, 火山砂およびアグルチネート以外の各層について, バルク試料を乾燥させて 300 g 程度に縮分し, 粒度分析と構成物量比の分析を行った。粒度分析は, $-6\Phi \sim 4\Phi$ まで, 1 Φ 間隔とし, 電磁式ふるい振とう機 (Retsch 社製, AS200) を用いて行った。ふるい分けた各粒度について, 全体に対する重量比 (wt.%) を求め, Inman (1952) の方法により, 各層の粒度特性, とりわけ中央値と淘汰度を算出した。この際, ひとつの粒子で全体の重量の 5% 以上を占めるような大きな粒子は除

外した。

また, 直径 8 mm 以上の粒子については, 軽石, スコリアおよび石質岩片を分別して各種重量比を求めた。この際, ひとつの粒子に軽石部とスコリア部が不均質に混在する縞状の本質物質については, 肉眼で判断して 7 割以上を軽石部が占めるものは「軽石」, 逆のものは「スコリア」とした。両者の混合比率がほぼ同程度のものについては「縞状軽石」としている。

3. 岩相記載

3-1 安達太良山頂における岳噴火堆積物

本露頭は, 岳噴火堆積物の火口近傍相として従来から存在が認められ, 藤縄・鎌田 (2005) によって安達太良第 2 降下火砕物と命名され系統的な層序区分がなされた。藤縄・鎌田 (2005) は, 本堆積物を 19 層, すなわち下位から A 層~R 層に区分しているが, ここでは各層について, 新しく得られた記載結果を中心に述べる。19 層の合計層厚は約 35 m で, 各層は二次堆積物や土壌層を挟まず累積していることから, 一連の噴火で連続的に堆積したものと解釈できる。

全体的な色調および本質物質の量比から, 概ね, 軽石がスコリアよりも優勢な A~L 層 (前半層準) と, スコリアが優勢で溶結部の多い M~R 層 (後半層準) に大別できる。なお, 記載の途中, より良く観察できる露出箇所を求めて一度移動したが, この際には E 層直上の赤褐色火山砂層を鍵層とし, それによって隔たれる上下 2 層を下位から E, E' 層とした (Fig. 2)。

A 層: 本層と安達太良第 1 降下火砕物との間に雑多な岩相の変質した二次堆積物を挟在することから, 本噴火堆積物の最下部と判断できる。層厚約 350 cm で, 軽石も含まれるが, 明灰色のスコリアが卓越し, その含有量は 80% 以上である。軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 3 cm と 5 cm である。上部約 30 cm は焼結し, 1 cm 以下の軽石とスコリアが点在する火山砂層である。

B 層: 層厚約 40 cm で, 軽石を 60% 以上含み, これに加えて明灰色のスコリアが 30% 程度含まれる。軽石とスコリアの最大粒径は, それぞれ 6 cm と 1 cm である。上部約 10 cm は灰色を示して焼結し, 1 cm 以下の軽石とスコリアが点在する火山砂層である。

C 層: 層厚約 30 cm で, 赤褐色のスコリアを少量 (15% 以下) 含む軽石層である。含まれる軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 4 cm と 1 cm である。

D 層: 層厚 20 cm で, 焼結した粒径 1~2 mm の粒子を主要構成要素とする, 灰色の火山砂層である。その中に最大径 1 cm 程の軽石・スコリアが点在しており, A~C 層に比べ, 明らかに淘汰が悪い。

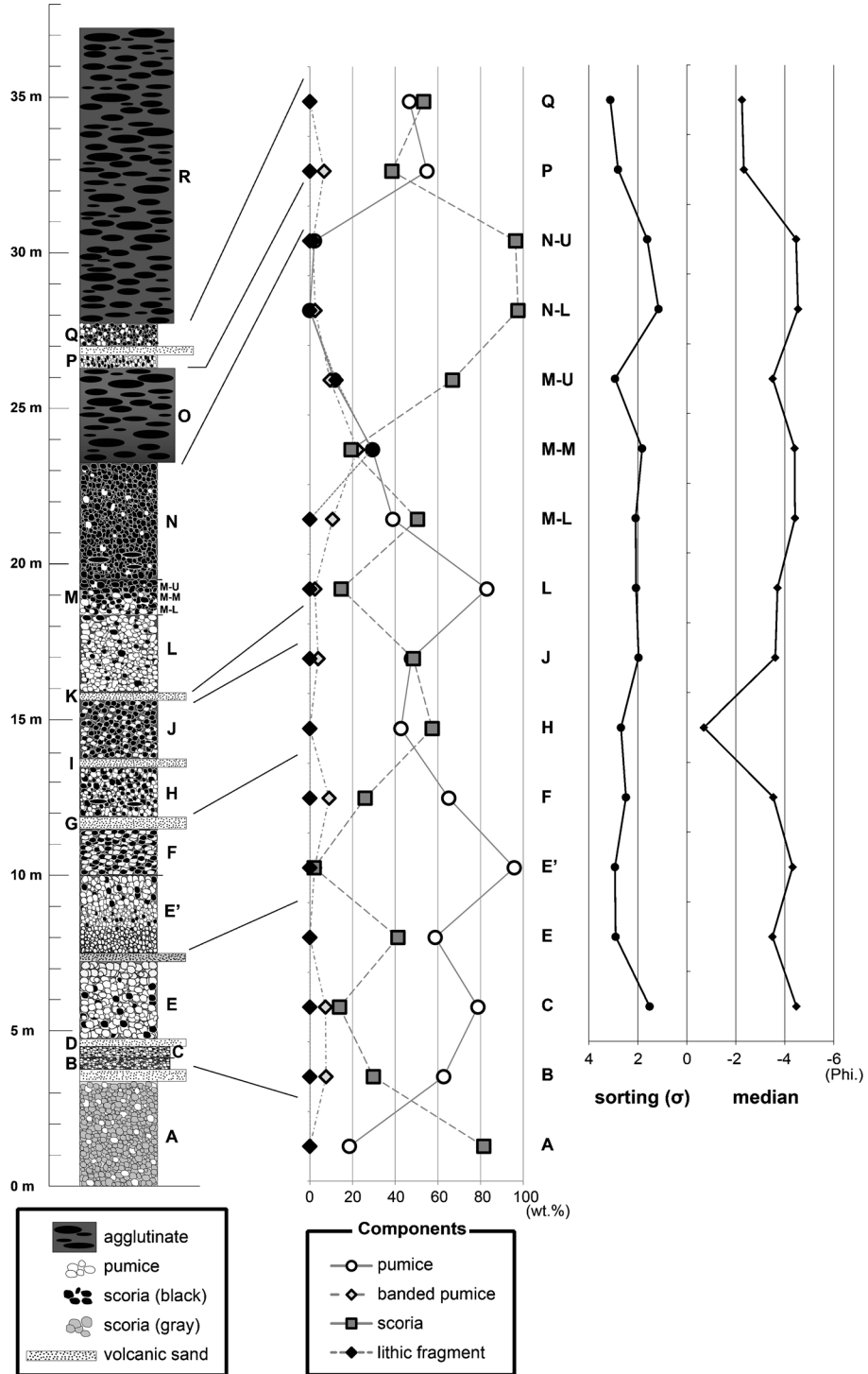


Fig. 2. Left: Schematic stratigraphic column of Adarata Dake tephra on locality 1. The horizontal extent of beds is not proportional to grain size. Right: Stratigraphic variation of rock-type, proportions and grain size distributions (sorting and median). M-U, M-M and M-L mean the upper, middle and lower parts of the M layer, respectively.

E 層: 層厚約 240 cm で, 約 60% の軽石と約 40% の暗灰色スコリアを含む。軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 3 cm と 2 cm である。上位には, 層厚 20 cm で赤色酸化し, 焼結した砂サイズの粒子を主な構成要素とする火山砂層が覆う。この火山砂層は, 最大径 1 cm 程の軽石とスコリアを含み, 下位の E 層に比べて明らかに淘汰が悪い。また, この火山砂層を鍵層とすることで, 次に述べる E' 層の最下部を容易に確認できる。

E' 層: 上述の赤色酸化した火山砂層を覆う, 層厚約 250 cm の軽石層である。スコリアはほとんど含まれず約 2% である。軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 5 cm と 1 cm である。

F 層: 層厚約 160 cm で, 含まれる軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 4 cm と 2 cm である。軽石を 60% 以上含み, スコリアよりもやや優勢である。他の層のほとんどが亜角礫～亜円礫であるのに対し, 本層の軽石・スコリアは角礫であることが特徴である。

G 層: 層厚約 40 cm の灰色火山砂層である。上部と下部は黄褐色に変質する。火山砂の中に最大径 1 cm 程の軽石とスコリアが点在し, 上下に隣接する軽石・スコリア層 (F・H 層) に比べて明らかに淘汰が悪い。

H 層: 層厚約 150 cm で, スコリア約 60% と軽石よりやや多く, 一部で熔結相を示す。含まれる軽石とスコリアの最大粒径はともに 2 cm である。

I 層: 層厚 20 cm で黒色の火山砂層である。火山砂の中に, 最大径 1 cm 程度の軽石とスコリアが散在し, 他の火山砂層と同様に軽石・スコリア層よりも淘汰が悪い。

J 層: 層厚 200 cm で, 軽石とスコリアがほぼ同程度含まれる層である。軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 4 cm と 3 cm であり, 特にスコリアには角礫が多い。

K 層: 層厚 10 cm で全体的に黒色の火山砂層である。層の中部が淡桃色を呈する。最大径 1 cm 程度の軽石とスコリアが散在する。

L 層: 層厚 250 cm で, 軽石が 80% 以上とスコリアより卓越する層である。含まれる軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 4 cm と 1 cm である。

M 層: 層厚 100 cm で, 主要構成粒子の色調変化により, 下部 50 cm は黄白色, 中部 30 cm は淡桃色, 上部 20 cm は黄褐色を示す。軽石量比が下部から上部に向かって約 40% から 10% へと著しく減少する。軽石とスコリアの最大粒径はともに 3 cm である。中部と上部には径 2 cm 程度の石質岩片も 12~29% 認められる。

N 層: 層厚 350 cm のスコリア層である。スコリアの最大粒径は 5 cm である。下半部は一部溶結する。上半部には 20 cm 大のスコリア質の火山弾も認められる。軽石をほとんど含まず約 2% である。

O 層: 層厚 300 cm。強溶結したアグルチネートで下部は赤色酸化する。

P 層: 層厚 30 cm で, 軽石が 55% と, スコリアよりもやや多い層である。含まれる軽石とスコリアの最大粒径はそれぞれ 3 cm と 2 cm である。

Q 層: 層厚 100 cm で, 下部 25 cm は黒色と橙色の火山砂層が互層する。上部は粗粒で, 軽石とスコリアの最大粒径はともに 3 cm である。スコリアと軽石の量比も同程度である。

R 層: 層厚約 10 m で, 強溶結したアグルチネートからなり, 安達太良山頂の突出部を形成する。

3-2 火砕流堆積物

3-2-a 湯川火砕流

山頂から東方を流れる湯川沿いに主に露出し, 最遠で山頂部から 16 km 東方に分布が認められている (山元・阪口, 2000)。本研究では, 山頂から約 6 km 東方, 湯川沿い (Fig. 1 の Route A) で 2 つの露頭を記載した (Fig. 1)。両露頭の火砕流は, 溶結相における本質物の扁平伸長方向や節理などから, ほぼ水平の堆積構造が推定され, 上流側露頭により上部が露出すると判断できる。両露頭ともにフローユニット境界は認められなかった。下部層準は, 層厚 15 m 以上で, 中～強溶結が認められる。灰色の基質中に, 明灰～暗灰色 (一部赤色に酸化) を呈するレンズ状の本質物質 (以下, フィアメと呼ぶ) が散在し, これらの最大長径は 15 cm 程度である。顕著な流理構造も確認できる。上部層準は層厚 2 m 以上で, 弱～中溶結相を示す。赤褐色の基質中に灰色スコリアと白色軽石が共存するが, これらは下部層準ほど扁平になっていない。全体的にスコリアが多く, これらの最大径は 10 cm 程度である。

なお山元・阪口 (2000) は, 山頂から東方約 12 km の山の入ダム付近で, 安達太良岳軽石に直接覆われる白色非溶結の火砕流の露頭を見出し, これを本火砕流の一部とした。この白色非溶結堆積物の体積は約 0.02 km² で, 岳噴火堆積物全体の体積の 1% 以下と見積もられている (山元・阪口, 2000)。しかし, この露頭はすでに消滅あるいは水没し確認ができなかった。

3-2-b 元山火砕流

山頂から西方約 3 km, 硫黄川沿いに狭小に分布する。硫黄川を挟み, 白糸の滝両岸上方の尾根に露出し, 白糸の滝溶岩流 (藤縄, 1980) を直接覆う。本研究では Fig. 1 で示した Route B の 3 地点で記載を行ったが, 湯川火砕流と同様, 水平の堆積構造と標高の関係から下部・中部・上部層準に三分した。

下部層準は層厚約 10 m で露出し, 全体的に強溶結しており, 板状節理も発達する。確認した 3 地点の中では

Table 1. Contents and components of phenocrysts (vol.%) of juvenile materials in each layer. Yug: Yugawa pyroclastic flow deposit, Mot: Motoyama pyroclastic flow deposit. Pl: plagioclase, Opx: orthopyroxene, Cpx: clinopyroxene, Ol: olivine, Opq: opaque minerals, tr: trace component. See the caption of Fig. 2 for the abbreviations of -U, -M and -L.

Lithology	Unit	Phenocryst contents (vol.%)	Components of phenocrysts (vol.%)				
			Pl	Opx	Cpx	Ol	Opq
Pumice	Q	17.4	70.8	13.6	10.9	-	4.7
	P	21.0	72.5	10.6	14.3	-	2.7
	M-U	21.4	72.0	7.6	16.2	-	4.2
	M-M	12.6	83.2	7.4	8.5	-	0.9
	M-L	14.2	71.1	14.8	11.8	-	2.2
	L	19.3	79.9	6.9	11.4	-	1.8
	J	14.6	76.4	7.2	14.4	-	2.0
	H	16.8	65.0	6.3	22.5	-	6.2
	F	18.1	75.1	10.2	12.3	-	2.5
	E'	23.9	78.3	4.8	12.4	-	4.5
	E	23.7	79.9	7.4	10.8	-	1.9
	C	21.4	77.5	7.8	10.9	-	3.8
	B	22.6	70.3	11.5	15.8	-	2.5
	A	18.4	70.2	9.1	18.0	-	2.7
Scoria	R*	48.4	75.4	6.1	16.0	tr	2.4
	Q	36.8	71.0	7.3	16.6	-	5.0
	P	22.0	71.1	12.3	11.7	2.9	2.1
	O*	32.1	75.7	7.2	14.1	-	3.0
	N	19.0	71.8	8.3	16.8	-	3.2
	M-U	10.5	82.7	8.9	6.9	-	1.4
	M-M	11.0	78.4	6.0	14.1	-	1.5
	M-L	11.7	77.0	7.0	13.6	-	2.3
	L	15.2	75.7	7.9	14.3	-	2.1
	J	15.1	75.4	5.8	16.6	-	2.2
	H	18.0	44.4	15.1	33.3	-	7.2
	F	11.5	78.1	9.4	10.3	-	2.2
	E'	19.0	71.4	13.6	12.4	-	2.6
	E	18.5	72.2	12.7	12.6	-	2.4
C	12.4	76.6	11.0	11.7	-	0.7	
B	15.6	77.6	9.0	11.8	-	1.5	
A	19.1	68.8	8.0	20.4	-	2.9	
Scoria	Yug-U	19.4	67.7	9.4	17.5	0.0	5.4
Fiamme	Yug-L	36.6	62.7	13.5	20.2	0.0	3.6
Fiamme	Mot-U	36.0	77.3	6.1	14.3	0.0	2.3
Fiamme	Mot-M	29.6	67.0	11.8	16.6	tr	4.6

一番溶結度が高い。赤褐色の基質中に含まれる暗灰色のフィアメは、厚さ1 cm 以下、幅20 cm 程度に引き延ばされている。中部層準は、層厚約20 m で露出し、露頭下部には柱状節理が、上部には板状節理が発達する。赤褐色の基質中に明灰～暗灰色のフィアメが含まれ、下部層準ほどではないが、長径10～20 cm 程に引き延ばされている。上部層準は25 m で露出し、露頭最上部には板状節理が発達している。赤褐色の基質中に、中部と同様に引き延ばされた、径2～15 cm 程のフィアメが含まれる。

4. 岩石学的特徴

各層に含まれる本質物質の岩石学的特徴を以下に示す。ただし、岳噴火堆積物のM層は、層内で軽石/スコリアの量比が著しく変化し、色調の違いからも明瞭に3分できることから、下部・中部・上部に分けて分析を行った。火砕流については、非溶結試料は湯川火砕流上部のスコリアのみで、それ以外はすべて溶結部に認められるフィアメを採取し、分析に供した。なお元山火砕流の下

部強溶結部は、フィアメの厚さが1 cm 以下であったため、十分な試料を得られなかった。

4-1 モード測定結果

4-1-a 岳噴火堆積物

各層に含まれる軽石、スコリア各々について、斑晶量と、斑晶内に占める各鉱物の量比 (vol.%) を Table 1 に示した。各層の値は2薄片試料の平均値である。

本堆積物中の軽石は、斑晶量が12.6～23.9 vol.% の範囲にあり、共通して斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物が認められる。石基は、繊維状で清澄なガラスからなる。斑晶の中では、共通して斜長石が最も多く (65.0～83.2 vol.%), 不透明鉱物が最も少ない (0.9～6.2 vol.%). 斜方輝石と単斜輝石は、いずれも10 vol.% 前後で、ほとんどの層で単斜輝石の方がやや多い傾向にある。これら軽石中の斑晶量および斑晶鉱物量比に、明瞭な時間変化傾向は認められない。

本堆積物中のスコリアは、斑晶量が10.5～48.4 vol.% の範囲を有し、特にO層から上位で増加傾向が認められる。斑晶鉱物には共通して斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物が含まれ、P層とR層にはかんらん石も少量認められる。斜長石、両輝石、不透明鉱物の量比は、軽石に見られるそれとほぼ同様である。石基は、アグルチネート中のスコリアがインターサータル組織で、それ以外は主にハイアロオフィティック組織を示し、ガラス部はいずれも淡褐色～暗色を呈する。

4-1-b 火砕流堆積物

両火砕流ともに斑晶量は19.4～36.0 vol.% であり、特に溶結部で得たフィアメが比較的斑晶量に富む傾向にある。鉱物組合せは、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物が共通して認められ、元山火砕流の中部試料には少量のかんらん石も認められる。これら斑晶量・斑晶量比の傾向は、すべて岳噴火堆積物中の軽石・スコリアの示す値の範囲内に収まる。石基組織は、湯川火砕流上部スコリアがハイアロオフィティック組織、元山火砕流上部のフィアメはインターサータル組織、それ以外はすべてハイアロピリティック組織を示す。

4-2 全岩主化学組成

軽石とスコリアならびに火砕流試料の全岩主化学組成を Table 2 に示し、代表的な変化図を Fig. 3 に示した。岳噴火堆積物の軽石は、SiO₂量が59～64 wt.% の安山岩～デイサイトで、藤縄・鎌田 (1995) で示された通り、ほぼ中カリウム系列に属する (Fig. 3-a)。総じて軽石のSiO₂量と噴火層序との間に系統的な変化傾向の相関関係は認められないが、M層のみに注目すると、下部・中部に比べて上部のSiO₂値が高い (63～64 wt.%). このM層上部の軽石試料は、試料中、最高のSiO₂値かつ最低の

Table. 2. Whole-rock compositions of juvenile materials in each layer. See the caption of Table 1 for the abbreviations of units. All data are normalized to 100%.

Lithology	Unit	sample	wt.%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	
Pumice	P	P-01		62.49	0.70	17.60	6.48	0.19	3.05	4.84	2.49	2.07	0.08	
		P-02		61.84	0.72	17.25	6.97	0.17	3.37	5.31	2.37	1.93	0.08	
		P-03		62.42	0.71	17.14	6.71	0.13	3.21	5.12	2.43	2.05	0.07	
		P-04		58.84	0.78	19.52	7.67	0.21	3.77	5.34	2.13	1.67	0.07	
	M-U	M-U-01		64.00	0.66	17.41	5.92	0.12	2.69	4.36	2.49	2.28	0.05	
		M-U-02		63.19	0.73	17.07	6.63	0.13	3.07	4.55	2.45	2.14	0.05	
	M-M	M-M-01		62.99	0.73	17.33	6.70	0.14	3.01	4.51	2.39	2.15	0.05	
		M-M-02		60.17	0.84	18.88	7.74	0.16	3.28	4.76	2.20	1.91	0.06	
	M-L	M-L-01		62.64	0.76	17.40	6.74	0.14	3.14	4.63	2.35	2.14	0.05	
		M-L-02		60.82	0.82	18.00	7.75	0.16	3.36	4.96	2.22	1.85	0.06	
		M-L-03		61.10	0.79	18.45	7.33	0.16	3.19	4.57	2.32	2.05	0.04	
		M-L-04		62.64	0.73	17.40	6.76	0.15	3.22	4.70	2.31	2.04	0.05	
	L	L-01		61.34	0.78	18.38	7.03	0.16	3.27	4.59	2.32	2.08	0.04	
		L-02		60.34	0.83	18.44	7.71	0.16	3.28	5.04	2.32	1.82	0.06	
		L-03		61.05	0.82	17.65	7.90	0.16	3.15	5.10	2.30	1.81	0.07	
		L-04		62.18	0.75	18.06	6.73	0.14	3.03	4.56	2.38	2.13	0.05	
	J	J-01		61.12	0.77	18.88	6.96	0.15	3.13	4.54	2.36	2.03	0.05	
		J-02		62.05	0.73	18.43	6.65	0.15	3.05	4.27	2.47	2.15	0.04	
		J-03		62.14	0.75	17.83	6.87	0.14	3.06	4.81	2.30	2.03	0.06	
		J-04		61.35	0.77	18.12	7.17	0.16	3.42	4.54	2.36	2.06	0.05	
	H	H-01		62.07	0.73	18.37	6.69	0.14	3.21	4.20	2.38	2.18	0.03	
		H-02		61.86	0.81	17.48	7.32	0.16	3.49	4.47	2.35	2.04	0.03	
		H-03		62.91	0.68	18.34	6.06	0.14	2.83	4.22	2.54	2.24	0.04	
		H-04		61.84	0.72	18.75	6.67	0.15	3.16	4.04	2.39	2.26	0.03	
	F	F-01		59.76	0.84	19.21	7.69	0.19	3.65	4.33	2.28	2.01	0.02	
		F-02		59.17	0.85	19.88	7.83	0.23	3.43	4.45	2.26	1.84	0.05	
		F-03		59.82	0.82	19.32	7.54	0.18	3.40	4.49	2.36	2.04	0.03	
	E'	E'-01		62.05	0.76	17.93	7.03	0.15	3.29	4.18	2.38	2.22	0.02	
		E'-02		62.02	0.76	18.20	6.82	0.14	3.19	4.16	2.41	2.27	0.03	
		E'-03		61.82	0.78	17.73	7.21	0.15	3.41	4.44	2.35	2.09	0.03	
		E'-04		61.63	0.78	18.01	7.24	0.16	3.44	4.10	2.28	2.33	0.03	
	E	E-01		60.92	0.79	18.84	7.22	0.16	3.38	4.03	2.34	2.30	0.02	
		E-02		60.69	0.81	18.49	7.41	0.17	3.51	4.38	2.38	2.14	0.03	
		E-03		61.52	0.75	19.28	7.17	0.16	3.32	3.88	1.95	1.95	0.02	
		E-04		61.29	0.78	18.71	7.17	0.16	3.29	3.88	2.34	2.35	0.02	
	C	C-01		60.05	0.83	20.51	7.52	0.16	3.23	3.43	2.09	2.18	0.01	
		C-02		60.38	0.81	20.11	7.40	0.16	3.34	3.39	2.12	2.28	0.01	
		C-03		60.08	0.83	19.23	8.01	0.18	3.76	3.80	1.98	2.13	0.01	
		C-04		60.50	0.80	20.05	7.39	0.16	3.18	3.51	2.15	2.24	0.01	
	B	B-01		59.68	0.85	19.91	7.91	0.18	3.43	3.87	2.07	2.07	0.02	
		B-02		62.20	0.75	18.21	6.99	0.15	3.28	3.83	2.30	2.28	0.02	
		B-03		61.33	0.78	19.17	7.06	0.15	3.21	3.78	2.20	2.28	0.01	
B-04			61.07	0.81	19.25	7.37	0.16	3.23	3.64	2.15	2.30	0.01		
A	A-01		61.90	0.77	18.68	6.96	0.15	3.20	3.71	2.17	2.45	0.02		
	A-02		61.86	0.78	18.17	7.43	0.15	3.45	3.65	2.12	2.37	0.02		
	A-03		61.74	0.81	19.44	6.99	0.15	3.08	3.05	2.12	2.62	0.01		
Scoria	R	R-S01		61.24	0.72	17.74	7.33	0.15	3.64	5.25	2.26	1.60	0.08	
		Q		56.69	0.92	18.70	9.69	0.19	4.80	6.04	1.76	1.13	0.09	
		Q-S02		57.13	0.84	19.41	8.78	0.19	4.37	5.76	2.03	1.43	0.07	
	P	P-S01		57.18	0.76	18.10	8.35	0.17	4.68	7.77	2.07	0.82	0.11	
		O		61.34	0.72	17.26	7.08	0.14	3.70	5.58	2.45	1.64	0.08	
	N	N-S01		58.92	0.87	17.99	8.47	0.18	3.54	6.24	2.34	1.36	0.08	
		M-U		60.88	0.81	17.25	7.72	0.15	3.33	5.83	2.45	1.49	0.09	
	M-M	M-M-S01		58.50	0.90	18.47	8.73	0.18	3.64	5.91	2.21	1.38	0.08	
		M-L		58.33	0.94	17.95	9.06	0.18	3.70	5.99	2.30	1.47	0.08	
	L	L-S01		59.00	0.93	18.21	9.19	0.18	3.74	6.09	1.24	1.33	0.09	
		J		59.22	0.89	18.37	8.51	0.18	3.44	5.72	2.20	1.39	0.09	
	H	H-S01		58.43	0.97	19.38	9.00	0.18	3.45	4.79	2.09	1.63	0.08	
		F		57.75	0.96	19.14	9.18	0.20	3.59	5.42	2.22	1.46	0.09	
	E'	E'-S01		60.04	0.83	18.34	7.78	0.18	3.46	5.39	2.36	1.53	0.09	
		E		58.83	0.94	19.10	8.45	0.21	3.67	4.96	2.18	1.58	0.07	
	C	C-S01		58.63	1.02	17.94	9.62	0.20	3.72	5.14	2.11	1.56	0.07	
		B		59.02	0.99	18.83	9.26	0.18	3.44	4.44	2.03	1.77	0.04	
	A	A-S01		59.06	0.92	18.91	8.85	0.18	3.42	4.75	2.10	1.75	0.07	
		Scoria			61.24	0.72	17.74	7.33	0.15	3.64	5.25	2.26	1.60	0.08
	Scoria	Yug-U	Yug-U-S01		59.26	0.94	17.82	9.13	0.18	3.84	5.04	2.21	1.50	0.07
		Yug-L	Yug-L-01		63.42	0.74	16.52	6.79	0.13	3.18	4.52	2.60	2.08	0.02
	Scoria	Mot-U	Mot-U-S01		60.74	0.77	17.53	7.29	0.15	3.50	5.68	2.47	1.76	0.10
		Mot-M	Mot-M-01		63.30	0.68	16.63	6.41	0.12	3.08	5.34	2.57	1.76	0.10
	Fiamme	Mot-M	Mot-M-02		63.94	0.67	16.54	6.22	0.12	3.06	5.02	2.56	1.79	0.08

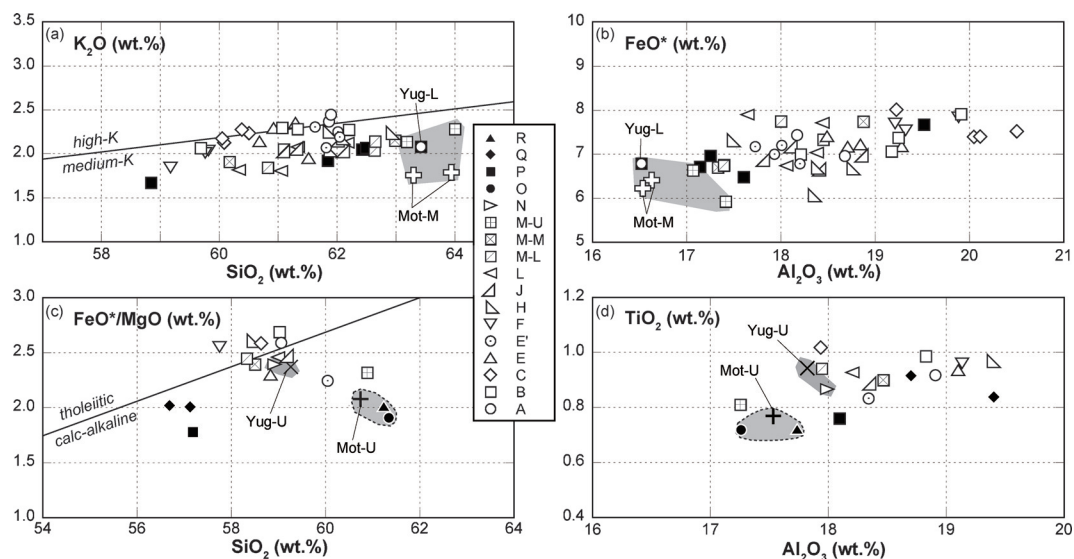


Fig. 3. Whole rock compositional (normalized to 100%) variation diagrams of (a) K_2O vs. SiO_2 (b) FeO^* vs. Al_2O_3 (c) FeO^*/MgO vs. SiO_2 and (d) TiO_2 vs. Al_2O_3 for Adataro volcano samples. (a) and (b) are for pumice while (c) and (d) are for scoria lithologies. The high-K/medium-K boundary in (a) is based on Gill (1981) while the tholeiite/calc-alkaline boundary in (c) is based on Miyashiro (1974). See the caption of Table 1 for the abbreviations of Yug and Mot.

$Al_2O_3 \cdot FeO^*$ 値を示す (Fig. 3-a および -b)。一方スコリアは、 SiO_2 が 56~62 wt.% の安山岩組成を示す (Fig. 3-c)。藤縄・鎌田 (1995) で指摘された通り、ほぼカルクアルカリ系列の組成を示すとともに、都城図 (Miyashiro, 1974) において FeO^*/MgO の低いトレンド ($FeO^*/MgO < 2.1$) と高いトレンド ($2.1 < FeO^*/MgO$) に明瞭に二分される。

火砕流の下~中部、つまり湯川火砕流下部および元山火砕流中部のフィアメが、いずれも $SiO_2 = 63$ wt.% 以上のデイサイト組成を示すのに対し (Fig. 3-a および -b)、火砕流上部、つまり湯川火砕流上部のスコリアと元山火砕流上部のフィアメは、各々 59.3 wt.% と 60.7 wt.% で、安山岩質な組成を示す (Fig. 3-c および -d)。

5. 議論

5-1 岳噴火堆積物と火砕流の露頭間対比

湯川・元山の両火砕流は、従来から、岳噴火に関連して発生したと考えられていたが (山元・阪口, 2000)、これまで岳噴火のどの時点で発生したのかは検討されていなかった。ここでは、露頭から得られた層序関係および本質物質の岩石学的特徴から、岳噴火堆積物と両火砕流との詳細な対比を試みる。

全岩化学組成を見ると、湯川火砕流下部および元山火砕流中部のフィアメと岳噴火の M 層とが、特徴的に高い SiO_2 値 (63 wt.% 以上) を示す点で類似することが分かる

(Fig. 3-a)。これらは、他の主成分元素、たとえば、 Al_2O_3 、 FeO^* 、 K_2O においても互いに類似する (Fig. 3-a および -b)。また、斑晶鉱物組合せ・量比も、これら試料間の対比を否定するものではない。溶結凝灰岩試料 (29.6~36.6 vol%) が軽石試料 (21.4 vol%) よりもやや斑晶量が多い傾向にあるが、これは火砕流に一般的に見られる傾向で (たとえば、Cas and Wright, 1987)、火砕流流走時に起こるガラス部の逸脱や強溶結によるガラス基質部の圧密 (たとえば、Ross and Smith, 1981) などで両者の食い違いは説明可能である。よって、本研究で記載した湯川火砕流下部と元山火砕流中部は M 層上部に対比可能と考えられる。

続いて、より上位にあたる湯川・元山火砕流上部と、岳噴火の N 層以上の層準について対比を検討する。湯川火砕流上部のスコリアと N 層、および元山火砕流上部のフィアメと O または R 層中のスコリアが、各々近い組成を示すことが分かる (Fig. 3-c および -d)。湯川火砕流上部スコリアと N 層はモード組成上も比較的良好一致することから、両者は対比可能と考えられる。湯川火砕流上部スコリアは、M 層下部や C 層のスコリアとも組成が類似するものの (Fig. 3-c および -d)、層序的に矛盾する。元山火砕流上部は、化学組成とモード組成の類似性と層序関係から見て、O 層または R 層に対比するのが妥当と考えられる。いずれの層準に対比されるかは、

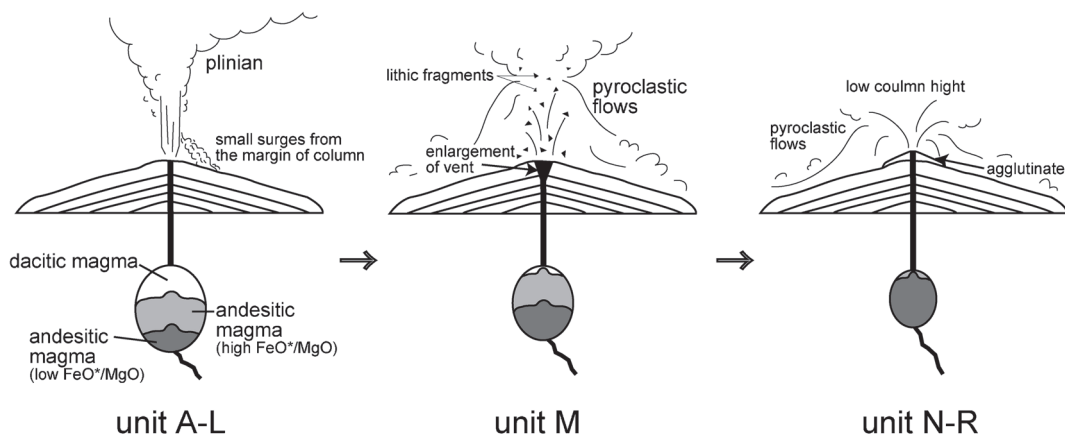


Fig. 4. Schematic illustration showing temporal change of eruption styles and related magma systems during Adatarata-Dake eruption.

今後さらに分析値を増やすことなどで詳しく検証できるであろう。

5-2 噴火様式の推移

上記の対比結果と第3章で記した岩相変化をもとに、岳噴火における噴火様式の推移を考察する。まず、A~L層を堆積させた前半には、明確に火砕流の発生を伴う証拠はなく、非溶結で比較的淘汰の良い軽石層で主に構成されることから、安定した噴煙柱を形成し、主に降下軽石を放出した噴火フェーズと捉えることができる (Fig. 4のユニット A-L)。一方でこれらの層準には、比較的淘汰が悪く一部焼結した火山砂層が複数挟在する (Fig. 2)。これら火山砂は、噴煙柱が安定していながらも突発的にその縁辺部が崩れることで発生する、ごく小規模な火砕サージによる堆積物の可能性がある (たとえば、Sigurdsson *et al.*, 1985)。なお、前半層準のいずれかが、現在は水没し認識不能の山の入ダム露頭で山元・阪口 (2000) が記載した、湯川火砕流の白色非溶結ユニットに対比される可能性が残る。しかし、白色非溶結の火砕流ユニットは岳噴火の全噴出量の1%に満たないとされることから、この可能性を容れても、前半層準で大規模な火砕流は発生しなかったと考えられる。

引き続き、後半最初に堆積したM層には、中部から上部にかけて、前半層準では認められなかった石質岩片が10~20%以上含まれることが分かる。さらにM層上部では、構成物粒子の淘汰度が、 σ 値で約3.0と、それ以下の層準 ($\sigma=2.0$) より有意に低い。これらはいずれも、M層噴出時に、火口が侵食によって拡大したことを示唆する (たとえば、Németh and White, 2003; White, 1996)。噴煙柱崩壊型火砕流は、火口拡大による大気を取り込み率減少によって発生する場合がありますと考えられており (た

とえば、Freundt *et al.*, 2000)、M層に見られるこれらの岩相変化と、M層噴出物が岩石学的に火砕流と対比されることから、後半最初期に、火口拡大に起因する噴煙柱崩壊型の火砕流が起こったと解することができる (Fig. 4のユニット M)。この時発生した火砕流は、東西の谷沿いを流れ下って谷地形を埋没させ、一部溶結した。

M層には、さらに注目すべき岩相変化が認められる。本質物質の量比を見ると、前半層準では優勢であった軽石が減少して、M層で軽石/スコリア比が逆転し、続くN層では本質物質がほぼスコリアとなる。山元・阪口 (2000) は、火砕流発生の原因について、卓越する本質物質が軽石 (デイサイト) からスコリア (安山岩) に変わることによってマグマ中の揮発性成分が減少し、噴煙柱が不安定となった可能性を指摘した。M層噴出時には、火口の拡大だけでなく、同時にマグマ組成の急変が伴っており、これも火砕流の発生に関与した可能性が考えられる。

火砕流堆積物との対比結果から、続くN層~O層、あるいは最後のR層の堆積時まで火砕流の発生が継続したと考えられる。火口近傍において、N層は一部が溶結し、O層・R層はアグルチネートの岩相を示す。山元・阪口 (2000) は、山頂から8km以上東方で岳噴火軽石 (降下火砕物) を記載し、ここでは上部に向かってスコリアが増加するような傾向を認めていない。このことから、山元・阪口 (2000) では、噴火後半のスコリア優勢部では噴煙柱高度が減少したと推察している。以上のことから、N層以降では、それまでよりも比較的低い噴煙柱を形成し、火口近傍にアグルチネートを集積させつつも、同時に火砕流を発生、谷沿いに流下させるような噴火様式をとっていたと結論できる (Fig. 4のユニット N-R)。

5-3 安山岩質マグマの変換期

藤縄・鎌田 (2005) は、スコリアの化学組成が、特に都城図で明瞭に二分されることから、安山岩質マグマには異なる2つのタイプが存在していたと主張した。両タイプは都城図上で、 $\text{FeO}^*/\text{MgO}=2.1$ 付近を境に、P層以前で高 FeO^*/MgO 側、Q層以降で低 FeO^*/MgO 側にプロットされ、それぞれ異なる組成トレンドを示す。すなわち2つの安山岩質マグマは、P層からQ層を変換点として、付け替わったと結論した。本研究で採取したスコリアを同様に都城図にプロットすると、やはり $\text{FeO}^*/\text{MgO}=2.1$ 付近を境に組成範囲が2分される。しかしながら、その変換点は、先行研究よりも早期のN層とO層の間に認められる (Fig. 3-c)。すなわち、A~N層が高 FeO^*/MgO 側、O~R層が低 FeO^*/MgO 側にプロットされる。このことから、藤縄・鎌田 (2005) の指摘した安山岩質マグマの変換は、従来よりも早期 (下位) のN-O層準で起こっていたと考えられる。つまり変換期では、アグルチネートを主体とする、噴煙柱の低い噴火様式が卓越したことが推測される。

6. ま と め

安達太良火山における最大規模の噴火である約12万年前の岳噴火について、噴火推移やマグマ組成の変換点などを詳細に検討するため、火口近傍の好露頭で連続的な採取・記載を行った。その結果、噴出物の岩相 (構成物量比、粒度分布) やマグマ組成などの時間変化を高解像度で解析することができた。本論で得られた主な結論は次の3つにまとめられる。

1) 共存する本質物質であるデイサイト質軽石と安山岩質スコリアの岩石学的特徴から、岳噴火堆積物のM層上部が、東西に分布する湯川・元山両火砕流に対比された。さらに上位のN層は、湯川火砕流の上部に、O層またはR層は元山火砕流の上部に対比できる。

2) 岳噴火では、前半層準のA~L層では比較的安定した噴煙柱を形成していたが、M層噴出時に、火道の拡大と安山岩質マグマの急増が同時に起こり、火砕流を発生させた。続くN層以降では、火砕流を発生させつつも、火口近傍には主にアグルチネートを堆積させるような噴火様式をとった。

3) スコリアに代表される安山岩質マグマには FeO^*/MgO が系統的に異なる2タイプが存在した。N層からO層のタイミングを変換点にして、O層噴出以降では、低 FeO^*/MgO マグマが噴出した。

本論ではこれらの結論を得た一方、露頭の消滅によって前半層準の検証を十分に行うことができなかった。今後新たな露頭情報を得ることができれば、全体の噴火推

移の復元が達成されると期待できる。さらに、ともに本質物質と考えられる軽石とスコリアの成因関係を明らかにすることで、カルクアルカリマグマの生成、進化過程、マグマ供給系の変遷について、より具体的な描像を得ることが期待できる。

謝 辞

本論は、編集委員の伴雅雄氏、および査読者である和田恵治氏と匿名査読者のコメントによって改善されました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- Cas, R.A.F. and Wright, J.V. (1987) *Volcanic Successions, Modern and Ancient*, 528 pp. London, Allen and Unwin.
- Inman, D.L. (1952) Measures for Describing the Size Distribution of Sediments, *Journal of Sedimentary Petrology*, **22**, 125-145.
- 藤縄明彦・鎌田光春 (Fujinawa, A. and Kamata, M.) (2005) 安達太良火山の最近25万年間における山体形成史とマグマ供給系の変遷. 岩石鉱物科学 (*J. Mineral. Petrol. Sci.*), **34**, 35-58.
- Freundt, A., Wilson, C.J.N., Carey, S.N. (2000) Ignimbrites and block-and-ash flow deposits, in *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson H. ed), 581-599, Academic Press, London.
- 藤縄明彦 (Fujinawa, A.) (1980) 安達太良火山の地質と岩石. 岩鉱 (*J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **75**, 385-395.
- 藤縄明彦・林信太郎・梅田浩司 (Fujinawa, A., Hayashi, S. and Umeda, K.) (2001) 安達太良火山のK-Ar年代-安達太良火山形成史の再検討. 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. J.*), **46**, 95-106.
- Gill, J.B. (1981) What is "Typical calcalkaline Andesite", in *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, pp. 1-12, Springer-Verlag, New York.
- 町田 洋・新井房夫 (Machida, H. and Arai, F.) (1992) 火山灰アトラス (Atlas of Tephra in and around Japan). 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 276 p.
- Miyashiro, A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins, *Amer. Jour. Sci.*, **274**, 321-355.
- 永尾隆志・角縁 進・白木敬一 (Nagao, T., Kakubuchi, S. and Siraki, K.) (1997) 全自動蛍光X線分析装置 (理学/RIX3000) による岩石中の主成分および微量元素組成の定量. 山口大学機器分析センター報告 (*Rep. Center Instru. Anal. Yamaguchi Univ.*), **5**, 10-15
- Németh, K., and White, J.D.L. (2003) Reconstructing eruption processes of a Miocene monogenetic volcanic field from vent remnants; Waipiata volcanic field, South Island, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **124**, 1-21.
- Ross, C. S. and Smith, R. L. (1961) Ash-flow tuffs: their origin, geologic relations, and identification. U. S. Geological Survey Professional Paper, 366, 81 p.
- 阪口圭一 (Sakaguchi, K.) (1995) 二本松地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅) (Explanatory text of the geological map of Japan, scale 1: 50,000, "Nihonmatsu

- region”), 地質調査所 (GSJ), 79 pp.
- Sigurdsson, H., Carey, S., Cornell, W. and Pescatore, T. (1985). The eruption of Vesuvius in A.D. 79. *National Geograph. Res.* **1** (3), 332-387
- 早田 勉・西城 潔 (Soda, T. and Saijo, K.) (1987) 安達太良火山周辺に分布するテフラ, 東北地理 (*Geography of Tohoku Jour.*), **39**, 205.
- 鈴木毅彦 (1991) 福島県太平洋岸, 塚原海岸における最終間水期最盛期の海進海退過程とその時期降下したテフラについて. 地学雑, **108**, 216-230.
- White, J. D. L. (1996) Impure coolants and interaction dynamics of phreatomagmatic eruptions., *J. volcanol. Geotherm. Res.*, **74**, 155-170.
- 山元孝広・阪口圭一 (Yamamoto, T. and Sakaguchi, K.) (2000) テフラ層序からみた安達太良火山最近 25 万年間の噴火活動. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **106**, 865-882.

(編集担当 伴 雅雄)