

浅間火山 2004年9月噴火の本質噴出物について

三宅康幸*・高橋 康**・津金達郎**・牧野州明*・
角前壽一*・西来邦章**・福井喬士*・
信州大学浅間火山04年噴火調査グループ***

(2005年3月31日受付, 2005年7月14日受理)

On the Essential Ejecta of the September 2004 Eruptions
of the Asama Volcano, Central Japan

Yasuyuki MIYAKE*, Kou TAKAHASHI**, Tatsuro TSUGANE**, Kuniaki MAKINO*,
Hisakazu KAKUZEN*, Kuniaki NISHIKI**, Takashi FUKUI*
and Shinshu University Research Group for Asama 04 Eruptions***

Asama volcano in central Japan became active on September 1st, 2004 with a vulcanian eruption which was the biggest eruption among a series of small eruptive events from September to December in 2004. The ejecta of the Sept. 1st eruption were mostly polygonal fresh andesitic lithic fragments. Most of them were derived from the andesite body which played the role of cap rock for the rising new magma and escaping volcanic gas. Less amount of pumice fragments were also ejected and most of them are mantled by the black and dense andesitic crust, which is broken and expanded to form breadcrust structure. These breadcrust pumices are concluded to have been the fragments of the new magma. After they were broken into pieces by the explosion, the outer margin of them rapidly consolidated, and then degassing and inflation in the inner melt caused rupturing of the outer crust. The pumices are clearly discriminated from the andesitic lithic fragments by their whole rock chemistry. The next vulcanian eruption occurred on September 23rd. Majority of the ejecta were again polygonal lithic fragments of andesite, although their chemistry corresponds not to the lithic fragments, but to the pumices of the Sept. 1st eruption. Small amount of scoria are found among the Sept. 23rd ejecta. Their whole rock chemistry and the assemblage and chemical composition of phenocrysts are quite similar to those of the Sept. 1st pumice. The black appearance of the scoria is derived from the less crystalline, therefore less differentiated groundmass glass in the scoria than in the pumice.

From these petrologic evidences the following magmatic processes are deduced. Before Sept. 1st, a column of new magma had risen into the pre existing andesite body beneath the crater floor. On Sept. 1st, the built up gas pressure surpassed the tensile strength of the andesite body to result in a vulcanian eruption. This eruption provided fragments of the pre-Sept. 1st andesite as polygonal lithic fragments, along with smaller amounts of the breadcrust pumices. In the course between Sept. 1st and Sept. 23rd, the column of new magma uplifted because the cap rock had disappeared. The upper part of the column was cooler and more crystalline than the lower. Some portion of the upper part of the magma column effused and made a dome inside the crater. On Sept. 23rd, next vulcanian eruption took place. The ejecta consisted of the lithic fragments which had been upper part of the consolidated magma column, and the scoria derived from the lower level of the same magma column.

Key words: Asama volcano, vulcanian eruption, essential ejecta, breadcrust pumice

* 〒390-8621 松本市旭 3-1-1

信州大学理学部地質科学科

Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University, Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan.

** 〒390-8621 松本市旭 3-1-1

信州大学大学院工学系研究科地球システム科学専攻
Division of Environmental System Science, Graduate

School of Science and Technology, Shinshu University, Asahi 3-1-1, Matsumoto 390-8621, Japan.

*** 高塚哉子・向井理史・山下太一・横地順平・馬場章・中島由記子・児玉 優・小島 萌・柏原秀雄

Corresponding author: Yasuyuki Miyake
e-mail: ymiyake@gipac.shinshu-u.ac.jp

1. はじめに

浅間山の噴火活動は2004年9月に活発化した。気象庁火山監視・情報センター(2004)によれば、9月中の噴火の経緯は以下のものであった。9月1日20時02分に空振を伴う爆発によって噴石多数が放出され、中でも北東方向には上空の風に運ばれて火口から6kmの地点でも、最大3cmの火山礫が降下した。9月14~18日には9月1日よりも小規模な噴火が頻発し、火山灰が千葉県にまで降った。そのうち16日には火口から赤熱する噴石が飛び出すストロンボリ式噴火が起こったことが確認され、軽井沢町などに軽石質岩片が降下した。9月23日19時44分には空振を伴う爆発が起こり、山頂の北北東4km付近で最大直径3cmにおよぶ火山礫が降って、山形県まで降灰があった。また、9月29日12時17分にも空振を伴う爆発が起こって、火口から北へ4kmの地点でも最大直径4cm程度の火山礫が降った。なお、国土地理院が9月16日に実施した合成開口レーダーによる観測によれば、当日火口底北東部にドーム状の地形ができていた(大木・他, 2005)。

本論文では、これらの噴火のうち比較的噴出量の多かった9月1日と9月23日の噴火の噴出物を記載し、噴火に関与したマグマについて考察する。あらゆる噴火において、マグマ起源の物質を特定することは、噴火のメカニズムを解明して今後の噴火推移を予測する上で最も重要である。そこで、噴出物の形状や鉱物組成、および化学組成にもとづいて本質物質を特定し、それらをもたらしたマグマと噴火との因果関係を考察し、かつ9月1日から23日までのマグマの挙動に関して議論する。なお、我々は、9月14日から18日にかけての噴出物の十分な試料を得ていないため、星住・他(2004)や嶋野・他(2004)の記載と9月1日と23日の噴出物の比較に基づきながら、14日から18日におけるマグマの状態についても議論することとする。

2. 噴出物の産状と種類

2-1 9月1日の噴出物

9月1日の噴出物は9月2日に、六里ヶ原^{ろくりがはら}駐車場(Loc. 1)と浅間牧場(Loc. 2)で採取した(Fig. 1)。

Loc. 1では、駐車場のアスファルトの上およびその周辺の草地の上で採取した。草地の上の噴出物は直下の草を焦がしている(Fig. 2a)ことや、草と噴出物の間に薄い火山灰層が挟んでいることなどにより今回の噴出物であることを確認した。噴出物の大部分は黒色で多角形状の安山岩片である(Fig. 2b)。それらは非孔質なものと同孔質なものからなる。少量の軽石片もあり、その多くは内部の白色多孔質な軽石を取り囲む厚さ5~10mm前

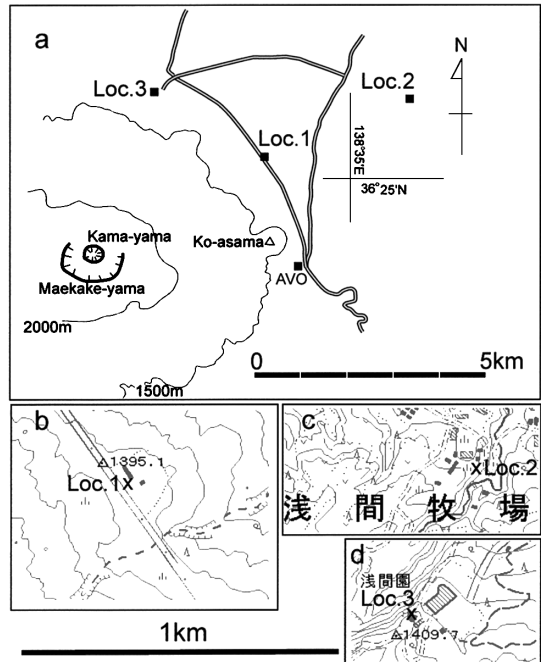


Fig. 1. Sampling localities. a: Index map. b-d: Detailed map of Loc. 1-3. Topographic map adopted from 1:25,000 quadrangle map Kitakaruizawa (Geographical Survey Institute of Japan, 1989). The eruptions took place in the Kama-yama crater which is the youngest central cone formed on the top of Maekake-yama. AVO: Asama Volcano Observatory.

後の黒色の皮殻をもち、皮殻はパン皮状に開裂している。これらをパン皮状軽石(Fig. 2c, d)と呼ぶ。軽石にはパン皮状軽石およびそれらの破片と、黒色皮殻をもたないものがある。そのほかに表面が、赤褐色または白色に変質してやや円磨された安山岩片、白色の変質した堆積岩などの異質岩片もあった。ここで採取された安山岩片とパン皮状軽石の最大のものはそれぞれ190gと247gであった。

Loc. 2では、ほとんどの噴出物は2cm未満の火山礫であったが、最大で長辺6cm、8.6gの軽石もあった。ここでは、コンクリートの上1m四方から全試料を採取し、乾燥させた後、篩い分けして、2~4.76mmの粒度のフラクションを実体顕微鏡下で確認しながら岩石種毎に分類した。その結果をTable 1に示す。なお、噴火後の降雨のため火山灰の一部は失われている可能性がある。含まれる全ての軽石(黒色皮殻のついたものも含む)の乾燥重量は、全噴出物の重量の約7.4wt.%であった。

Loc. 1, 2 で採取した噴出物のかさ密度を直径 0.5 mm 程度のガラスビーズを用いて測定した結果を Fig. 3 に示す。安山岩片の密度は $1.7\sim 2.7\text{ g/cm}^3$ であり、皮殻をもたない軽石は 1.0 g/cm^3 以下であるが、パン皮状軽石の密度は $0.8\sim 2.7\text{ g/cm}^3$ と変化に富む。皮殻部分と内部の軽石

との量比によってかさ密度の大きな相違を生じている。

2-2 9月23日の噴出物

今回検討した9月23日の噴出物は、9月27日に浅間園旧火山博物館屋上 (Loc. 3; Fig. 1d) で採取した。噴火後24日夜半から27日午前中までの断続的な降雨のため

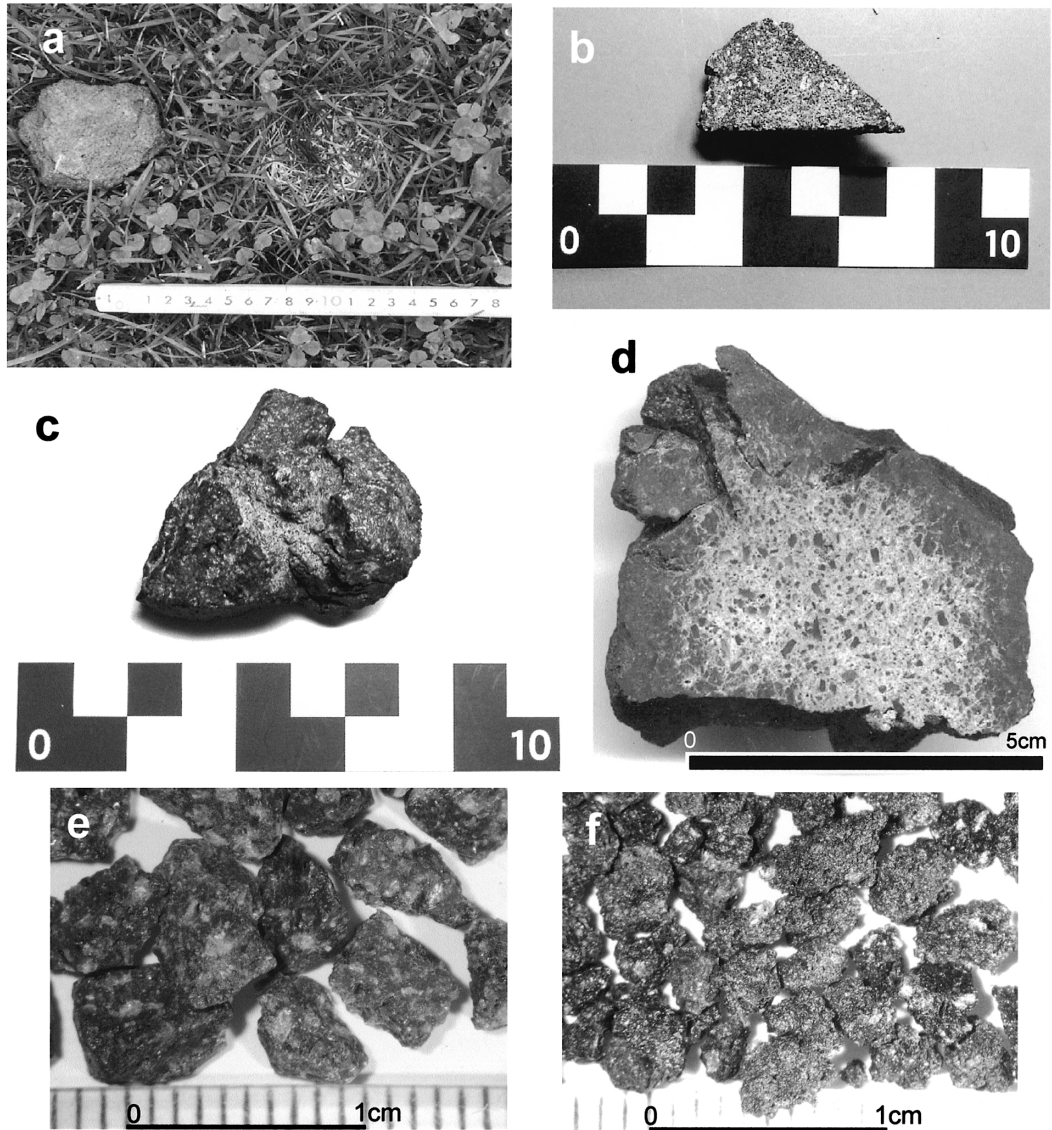


Fig. 2. Photographs of the ejecta. a-d: Ejecta of the Sept. 1st eruption sampled at Loc. 1. a: The occurrence of andesitic lithic fragment. Grasses beneath the fragment were heated and scorched. b: Andesitic lithic fragment with a polygonal outer shape. The length of the scale is 10 cm. c: Breadcrust pumice. The length of the scale is 10 cm. d: Cross section of a breadcrust pumice. The dark colored outer part is the non-vesicular crust, which was ruptured by the expansion as a result of the vesiculation in the inner magma, which is represented by the pale colored inner pumiceous part. The lower part of this sample is broken. e and f: Ejecta of the Sept. 23rd eruption sampled at Loc. 3. e: Andesitic lithic fragments. f: Scoria.

Table 1. Size distribution and the constituent rock types of the Sept. 1st ejecta sampled at the Loc. 2.

grain size (mm)	weight (g)	wt.%	in the 4.76~2.00mm fraction		
>9.52	1.45	0.3%	rock type	weight (g)	wt.%
9.52~4.76	15.54	3.5%	andesite	58.13	89.9%
4.76~2.00	64.66	14.6%	pumice without crust	1.38	2.1%
2.00~1.00	142.01	32.1%	breadcrust pumice	3.4	5.3%
1.00~0.50	141.96	32.1%	others	1.75	2.7%
<0.50	76.68	17.3%	total	64.66	100.0%
total	442.30	100.0%			

Table 2. Constituent rock types of the Sept. 23rd ejecta sampled at Loc. 3.

9/23 ejecta at loc. 3		
rock type	weight (g)	wt. %
andesite	75.09	80.0%
scoria (black)	11.10	11.8%
scoria (partly red)	3.40	3.6%
others	4.28	4.6%
total	93.87	100.0%

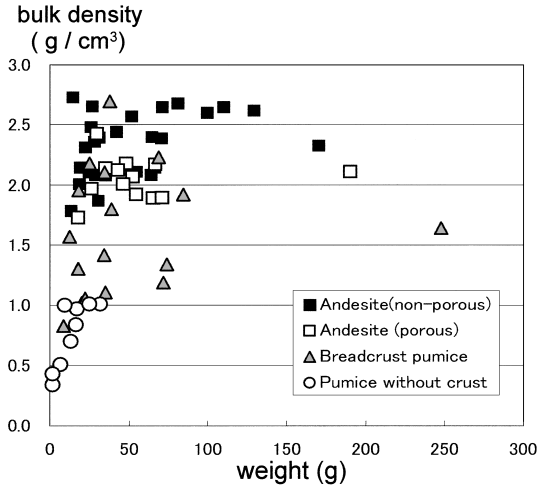


Fig. 3. Bulk density of the ejecta of the Sept. 1st eruption.

に、細かい火山灰などはかなり流されてしまっている可能性が高い。最大のものは長辺2cmであった。1m四方から全噴出物を回収して、採取した全試料について構成岩石種の重量比を計測した結果をTable 2に示す。多くは多角形状の安山岩片（少し発泡したものも含む）であり、そのほかスコリアが15wt.%含まれている。スコリアはいずれも約0.1mmないしそれ以上の直径をもつ円筒状に伸びた気泡を多く含む特徴をもつ。黒光りするガラスに富んでいるが、ガラスの一部は部分的に赤色化している。スコリアはその大きさが小さいために、4個の試料をまとめてかさ密度を計ったところ、その値は1.3 g/cm³であった。その他変質した白色の堆積岩などもある。なお、高橋・信州大学浅間火山04年噴火調査グループ(2004)は、軽石も存在すると報告したが、それらについては、多孔質で白色なのだが、鏡下で確認すると直径0.01mm程度の細かな石英・長石・堇青石とガラスからなる岩石であり、堆積岩もしくは火砕岩起源の再熔融岩である可能性が高い。

3. 噴出物の記載岩石学的特徴

3-1 斑晶鉱物

斑晶鉱物のモード量をTable 3とFig. 4に示す。モード計測にあたっては、メカニカルステージを用い鏡下で1000ポイント以上を計測したが、スコリアのみは試料が小さいために3試料の薄片を用いて合計300ポイントの計測をした。噴出物のうち、9月1日の黒色の多角形状安山岩片、軽石とその皮殻部、9月23日のスコリアのほとんどは含かんらん石複輝石安山岩であり、斑晶鉱物の量比や産状などに違いはほとんどみられない。それらの岩石をまとめて記載する。

斑晶は斜長石、かんらん石、エンスタタイト、オーゾジャイト、磁鉄鉱などからなる。斜長石は最大2.0mmで、清澄なもの、汚濁帯を持つものの両方がある。普遍的に双晶し、累帯構造をもつ。輝石の微晶を包有し、自形のオーゾジャイトやエンスタタイトと接する場合には、斜長石が輝石の自形結晶を取り囲むように産する。かんらん石は最大0.4mmで、輝石の反応縁をもつ。オーゾジャイトは最大長径1.6mmの短柱状、エンスタタイトは最大長径0.9mmの長~短柱状の自形の外形を示す。しばしば斜長石、エンスタタイト、オーゾジャイトの集斑晶が見られる。

石基部分では、9月1日と23日の安山岩片、および9月1日の軽石とその皮殻はすべて透明なガラスを含んでいるのに対して、9月23日のスコリアは褐色のガラスを含んでいるという違いがある。なお、石基の構成鉱物に関しては後述する。

3-2 岩片外縁部における産状

Fig. 5とFig. 6に岩片の外縁部における斑晶鉱物の産状を示す。9月1日のパン皮状軽石の皮殻部と9月1日および23日の多角形状安山岩片の外縁部分では、斜長石の結晶が断ち切られていることがしばしば観察される(Fig. 6の黒色矢印)。軽石中にとりこまれた捕獲岩も外縁で切られている。それに対して、9月23日のスコリアではそうした産状は稀であり、むしろスコリア片の外形は多くの部分で斜長石の自形結晶の縁に沿っている

Table 3. Modal compositions of the ejecta.

in vol.%		9/1 ejecta										9/23 ejecta	
		lithic fragment								breadcrust pumice		pumice	lithic
Sample no.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pheno- cryst	Plagioclase	27.4	25.3	30.4	31.9	29.5	25.3	21.2	23.6	13.4	11.8	27.5	20.3
	Augite	4.7	2.7	3.3	3.9	3.1	4.3	4.2	4.1	1.2	0.9	2.7	2.4
	Enstatite	5.6	8.3	8.5	6.9	9.5	5.2	6.9	5.8	4.4	3.0	6.3	3.4
	Olivine	0.7	1.0	0.2	0.9	0.4	0.7	0.0	tr	0.4	0.1	0.4	0.3
	Opaque	1.2	0.5	0.9	tr	0.9	1.1	1.2	1.2	0.4	0.1	0.6	0.7
Groundmass		56.2	59.3	56.7	51.3	55.9	52.0	45.5	52.7	42.9	12.5	52.0	40.7
Vesicle		4.2	3.0	0.0	5.0	0.6	11.4	21.0	12.6	37.4	71.7	10.6	32.1

The No. 8 and No. 9 samples are the outer crust and inner pumice of a breadcrust pumice, respectively. tr: Exist but less than 0.1 wt.%.

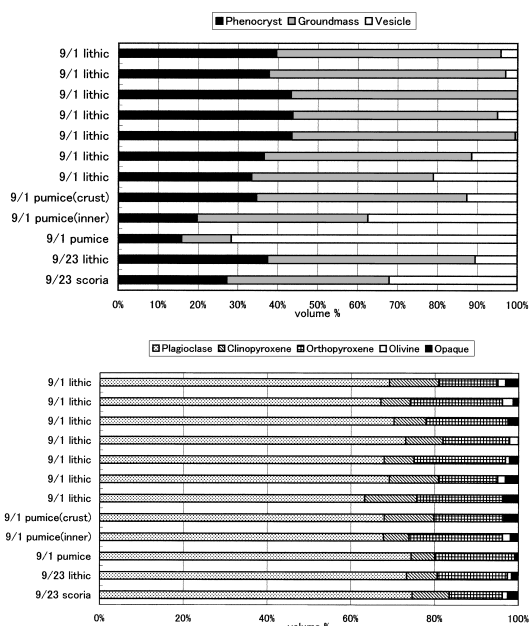


Fig. 4. Modal compositions of the ejecta.

(Fig. 6 の白抜き矢印).

4. 全岩化学組成

4-1 分析方法

全岩の主成分元素と微量元素の分析を信州大学理学部の蛍光 X 線分析装置 (PHILIPS PW2400) を用いて行った。岩石粉末試料 2 g と融剤の四ほう酸リチウム 4 g を混合してガラスビードを作成した。主要元素の検量線は地質調査所の標準試料を用いて作成した。その分析条件、補正計算法及び分析誤差は、三宅・他 (1996) に詳細に述べられている。また、微量元素の分析には、試薬を用いて作成した標準ガラスを用いて検量線を作成した。

マトリックス補正は V, Cr に対してはバックグラウンド、その他の元素には Rh のコンプトン散乱線強度で目的元素の強度を割る方法で行った。分析条件と誤差は津金・三宅 (2001) に詳細に述べられている。

なお、ガラスビード作成にあたり、9 月 23 日に噴出した安山岩片の一部とスコリアの全ては、個々の試料が小さいことから、数個の岩片を合わせて分析用ガラスビードを作成した。

4-2 分析結果

分析結果は Table 4 と Fig. 7 に示す。9 月 1 日の噴出物のうち、軽石は、黒色皮殻をもたないものともつもの、そして後者の皮殻の部分と軽石の部分などの間で組成に有意の違いはみられない。それに対して多くの安山岩片は、軽石の組成から連続し、軽石の組成よりもやや SiO₂ に乏しい領域 (Fig. 7g, h に楕円で囲んだ範囲) にプロットされる。安山岩片の中には、上述した試料と異なる組成領域にプロットされるものもある。液相濃集微量元素の比 (Rb/Zr) で見ると、軽石とそれに連続的な組成をもつ安山岩はほぼ一連のトレンドをなしているのに比べて、主要元素で分散した組成をもつ安山岩片はトレンドからはずれる比を示している (Fig. 7h)。

9 月 23 日の噴出物について見ると、スコリアの組成は 9 月 1 日の軽石の組成とほぼ重複した領域にプロットされる。一方で、9 月 23 日の安山岩片の組成は 9 月 1 日の軽石の組成領域の中にプロットされ、9 月 1 日の安山岩片の組成とは有意に異なっている。

浅間火山の天仁と天明噴火の噴出物 (高橋・他, 2003) と比較すると、今回の噴火の軽石やスコリアは、天明噴出物の SiO₂ に乏しいものと同等の SiO₂ 量をもつが、Fe₂O₃, MgO, CaO などの含有量がそれらと異なる。Fig. 7g, h に楕円で囲んだ一群の安山岩片は、天仁、天明の噴出物と比べて、それぞれ MgO, CaO 量が異なっている。その他の 9 月 1 日の安山岩片にも全元素で天仁または天明のものと同様のものはない。

5. 鉱物の化学組成

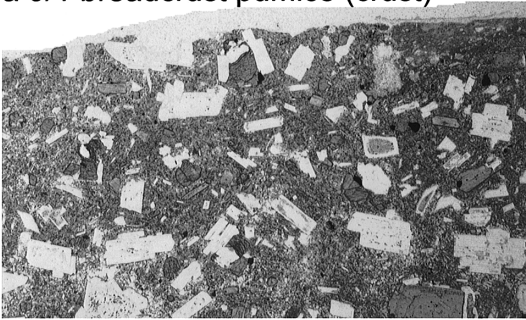
斑晶鉱物、石基ガラスおよびマイクロライトの主成分化学組成の分析を信州大学理学部地質科学教室のSEM (日本電子製JSM-5310E)-EDAX DX4 システム (EDS) で行った。分析条件とスタンダード、分析誤差は竹下 (2004) と同じであるが、ガラスの分析にあたっては、アルカリ元素の強度減衰を防ぐためにビーム径を拡げて分析した。

5-1 斑晶鉱物

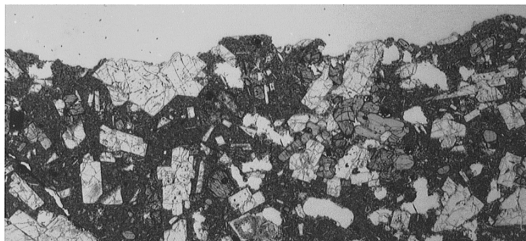
斑晶鉱物の主な分析結果を Table 5 と Fig. 8 に示す。かんらん石については分析した斑晶数が少ないため全体

の傾向は不明であるが、9月1日の軽石と9月23日のスコリアで Mg 値の比較的頻度の高いものの組成を Table 5 に示す。斜長石は、その核部について見ると An 組成が 55~70 の範囲に入るものが岩石種の別を問わず大部分を占めている (Fig. 8)。斑晶の縁部は核部よりもやや An 組成に乏しいことが多い。エンスタタイトはすべての岩石種で Mg 値 60~70 くらいに集中する組成をもつが、まれに Mg 値 78 にいたるまで Mg に富むものもある。個々の斑晶の核部と縁部の組成に違いはあまりない。オーゾタイトの組成は岩石種によらずほとんど同じ組成領域にプロットされる (Fig. 8)。いずれの斑晶鉱物

a 9/1 breadcrust pumice (crust)



b 9/23 lithic fragment



c 9/23 scoria

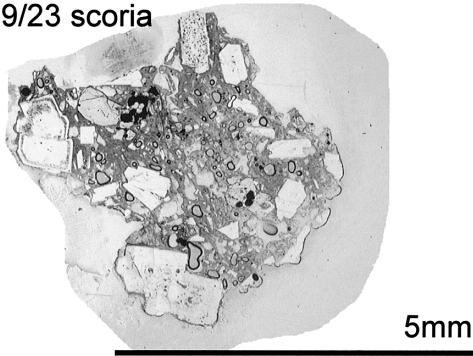
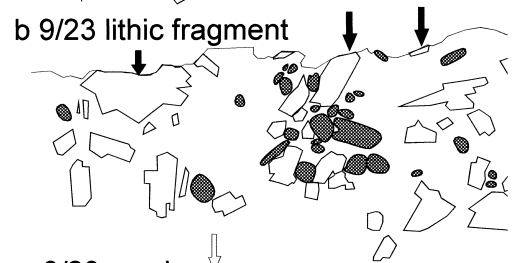


Fig. 5. Microphotographs of the ejecta. a: Outer rim of the Sept. 1st breadcrust pumice. b: Outer rim of the Sept. 23rd lithic fragment. c: The Sept. 23rd scoria.

a 9/1 breadcrust pumice (crust)



b 9/23 lithic fragment



c 9/23 scoria

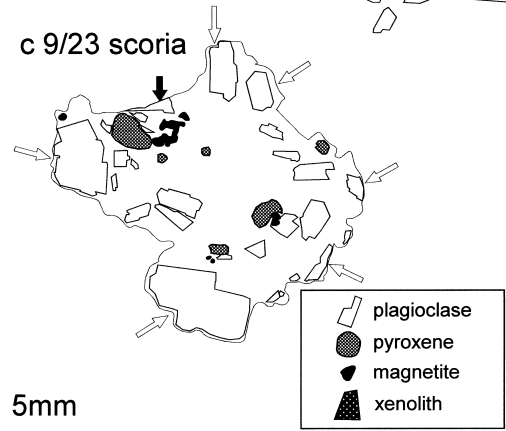


Fig. 6. Sketches of the habits of phenocrysts by tracing the microphotographs (Fig. 5). Vesicles and groundmass are not shown. For the arrows see the text.

Table 4. Representative chemical analyses of the ejecta.

major element (wt. %)	9/1 ejecta										9/23 ejecta								
	pumice 1		pumice 2		pumice		lithic fragment					scoria				lithic fragment			
	pumice crust	pumice crust	pumice crust	pumice crust	without crust	without crust	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	
SiO ₂	60.69	60.71	60.71	61.03	60.92	61.07	60.34	60.29	59.93	59.98	57.07	60.38	60.49	60.83	60.59	60.88	61.21	60.89	
TiO ₂	0.69	0.71	0.69	0.70	0.7	0.68	0.71	0.75	0.71	0.72	0.71	0.68	0.70	0.69	0.71	0.71	0.69	0.70	
Al ₂ O ₃	16.17	15.85	16.06	15.76	15.78	16.03	16.00	16.26	16.10	15.93	15.89	16.25	15.79	15.76	16.01	15.82	16.03	15.79	
Fe ₂ O ₃ *	6.98	7.33	6.92	7.24	7.11	6.93	6.95	6.94	7.42	7.45	7.53	7.10	7.38	7.24	7.11	7.13	6.94	7.20	
MnO	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.15	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	
MgO	3.80	3.90	3.85	3.85	3.9	3.81	4.10	4.20	4.05	4.17	6.21	3.87	4.11	3.95	3.75	3.80	3.72	3.74	
CaO	6.72	6.62	6.70	6.54	6.5	6.38	6.91	6.67	6.90	6.88	6.84	6.71	6.57	6.54	6.71	6.49	6.56	6.41	
Na ₂ O	3.09	3.03	3.06	3.06	3.06	2.96	3.05	3.04	3.09	3.09	3.87	3.05	3.00	3.01	3.06	3.04	3.07	3.09	
K ₂ O	1.28	1.28	1.28	1.33	1.32	1.32	1.25	1.22	1.20	1.15	1.05	1.24	1.26	1.31	1.28	1.34	1.31	1.33	
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	
Total	99.65	99.66	99.49	99.74	99.52	99.41	99.54	99.61	99.63	99.61	99.42	99.50	99.53	99.56	99.45	99.44	99.76	99.38	
trace element (ppm)																			
V	182	188	188	185	184	186	189	209	193	198	190	181	189	188	193	188	182	186	
Cr	51.7	60.1	54.5	54.2	56.6	60.7	66.3	69.8	54.5	54.8	70.1	47.9	57.0	55.2	49.4	50.9	68.2	50.4	
Co	19.2	17.5	21.6	18.5	17.0	18.6	24.6	18.8	24.3	19.6	20.8	19.9	22.3	15.5	21.2	22.0	22.8	12.5	
Ni	33.0	39.6	33.1	41.1	38.5	36.4	37.5	39.0	36.1	36.3	47.5	31.5	34.9	33.5	30.6	31.4	31.4	30.4	
Zn	63.0	64.7	64.2	64.9	64.5	65.8	60.8	59.6	62.1	65.0	88.2	63.9	66.0	64.2	64.4	62.9	63.8	64.3	
Ga	16.9	16.3	17.2	16.9	16.6	16.6	15.7	17.4	16.5	16.5	16.4	16.9	16.2	17.0	16.6	16.7	15.2	16.1	
Rb	30.2	30.3	30.0	31.3	30.9	30.3	26.7	27.3	25.2	20.7	8.8	29.5	30.4	30.0	31.2	31.0	31.1	30.6	
Sr	305	295	301	291	294	298	303	312	313	307	316	304	295	292	301	296	301	295	
Y	16.3	17.5	16.0	16.8	16.7	16.9	15.7	16.6	16.3	16.2	15.0	16.2	16.7	16.6	16.1	16.8	18.6	16.8	
Zr	93.8	93.5	92.2	93.8	95.0	93.9	91.0	92.2	89.2	88.9	82.1	90.4	92.9	94.3	94.2	97.6	96.7	95.5	
Nb	1.5	1.1	2.4	2.0	2.2	2.4	1.6	2.2	1.2	1.3	1.4	1.5	2.8	2.0	1.0	1.6	2.2	2.1	
Rb/Zr	0.322	0.324	0.325	0.334	0.325	0.323	0.294	0.296	0.282	0.233	0.107	0.326	0.328	0.318	0.331	0.318	0.322	0.321	

Fe₂O₃* = Total Fe as Fe₂O₃.

でも、岩石種による組成の系統的違いは見られない。

5-2 石基の鉱物とガラス

石基の鉱物種とその量は、9月1日の軽石と9月23日のスコリアとでかなり異なっている。両者の反射電子線像(組成像)を Fig. 9 に示す。9月1日の軽石に含まれるマイクロライトは斜長石、エンスタタイト、オーゾナイト、ピジョナイト、磁鉄鉱、石英、それに微量のチタン鉄鉱と磁硫鉄鉱などからなる。それらのうち、石英は9月23日のスコリアには見られない。試料の反射電子線像(軽石の黒色皮殻で12面、スコリアで8面)を明度に基づいて彩色し、色ごとのピクセル数を求めることでマイクロライトのモード組成を算出した (Table 6)。その方法の詳細は津金・他 (2005, 投稿中) に述べる。なお、3種類の輝石をこの方法だけで識別できないので、それらは、個々の粒子ごとに EDS で判別した結果を計測に用いた。磁硫鉄鉱とチタン鉄鉱は存在量が少なく、両者とも 0.1% 以下である。軽石の黒色皮殻は全マイクロライト量が 30% とスコリアの 14% に比べて高い。石基のガラス組成を Fig. 10 に示し、その平均値を Table 7 に示す。軽石とその黒色皮殻ではガラスの SiO₂ 量は 76-77% 前後の組成範囲に集中する。一方スコリア中のガラスは 72.5-74.8% とよくまとまった値を示し、軽石の石基ガラスの組成範囲とは重複しない。全鉄 (Fe₂O₃) 量はスコリアの方が有意に軽石よりも高いことが Fig. 10 からわかる。

6. 考 察

6-1 噴出物の成因

6-1-1 9月1日の噴出物

9月1日の噴出物には軽石が含まれている。軽石はパン皮状の皮殻をもつものともたないものがあるが、両者に化学組成と鉱物組成上の違いはないので後者は前者の破砕されたものであると考えられる。パン皮状軽石の多くのものは破片化しているが、同じ採取場所に破片の対が伴われているという産状は見られなかったため、これらが着地時に破砕されたとは考えにくい。このパン皮状皮殻をもつ軽石の成因を生起した現象の順に説明すると、① マグマの破片の形成、② 破片の周縁部が急冷して固結、③ 内部における遅延発泡と外側の皮殻のパン皮状開裂、④ 一部のものはおそらく飛行中に断片化という事件が起こったと考えられる。つまりこのパン皮状軽石は爆発時にはマグマ片であったはずである。仮にこれが爆発時にすでに固結した岩石片であったとするならば、③の遅延発泡が起こるとは考えにくいためである。ところで、パン皮状軽石の発泡による膨張の軽微なものではその外形は多角形状の安山岩片とよく類似しており、またパン皮状軽石の皮殻の外縁部では、斑晶鉱物や捕獲岩片が外縁によって切られているので (Fig. 6)、①の破片形成は脆性破壊が原因と考えられる。液体のマグマも急速に応力が増えられると脆性的に破壊されるということに

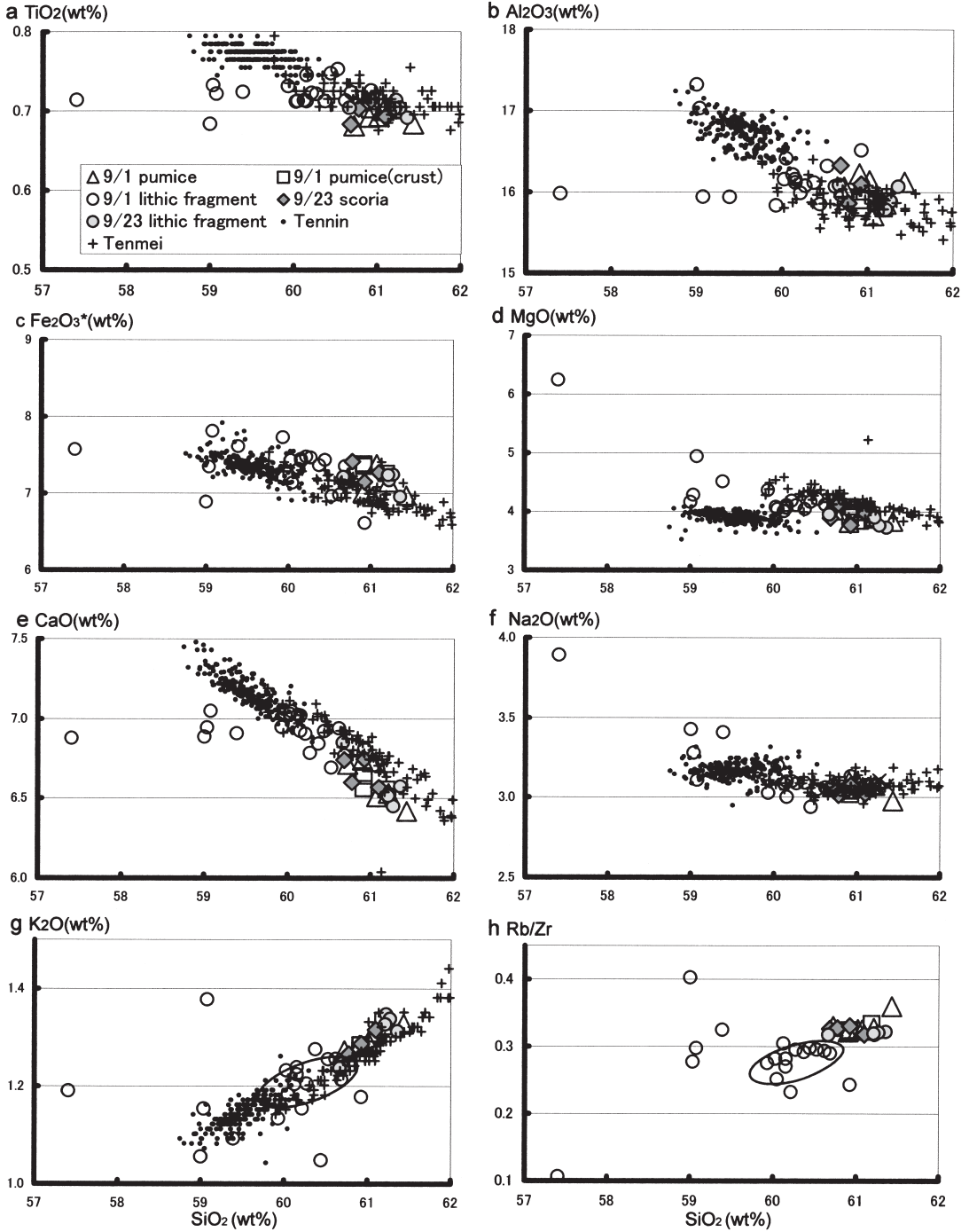


Fig. 7. Whole rock chemistry of the ejecta. The products of the Tennin and Tenmei eruptions are from Takahashi *et al.* (2003). Fe₂O₃*=total Fe. All the data are recalculated on the basis that the total=100%. See the text for the interpretation of the ellipses in the figures g and h.

Table 5. Representative chemical compositions of the phenocrysts.

olivine			plagioclase				
	9/1 pumice	9/23 scoria		9/1 lithic	9/1 pumice	9/23 lithic	9/23 scoria
SiO ₂	39.59	37.84	SiO ₂	53.87	53.73	53.59	52.12
FeO	16.26	24.10	Al ₂ O ₃	29.43	29.75	29.32	29.86
MnO	0.21	0.31	FeO	0.58	0.58	0.64	0.79
MgO	44.2	36.75	MgO	0.03	0.14	0.12	0.19
CaO	0.09	0.24	CaO	11.82	12.33	11.96	12.74
Total	100.62	99.24	Na ₂ O	4.23	4.02	4.15	3.68
O=4.000			K ₂ O	0.10	0.01	0.01	0.07
Si	0.996	1.001	Total	100.06	100.56	99.79	99.45
Fe	0.342	0.533	O=8.000				
Mn	0.004	0.007	Si	2.433	2.417	2.428	2.379
Mg	1.658	1.450	Al	1.567	1.577	1.566	1.607
Ca	0.002	0.007	Fe	0.022	0.022	0.024	0.030
M1+M2	2.007	1.997	Mg	0.002	0.009	0.008	0.013
Ca(%)	0.12	0.34	Ca	0.572	0.594	0.581	0.623
Mg(%)	82.79	72.85	Na	0.370	0.351	0.365	0.326
Fe(%)	17.09	26.80	K	0.006	0.001	0.001	0.004
Mg value	82.89	73.10	Ca(%)	60.33	62.86	61.39	65.39
			Na(%)	39.07	37.08	38.55	34.18
			K(%)	0.61	0.06	0.06	0.43
			An(%)	60.89	62.89	61.43	65.67

pyroxene		9/1 pumice		9/23 lithic		9/23 scoria		
	9/1 lithic	Au-gite	Ens-tatite	Au-gite	Ens-tatite	Au-gite	Ens-tatite	
SiO ₂	51.73	53.31	52.50	52.44	52.50	53.27	51.63	52.52
TiO ₂	0.41	0.13	0.41	0.16	0.30	0.36	0.44	0.14
Al ₂ O ₃	1.61	0.58	1.58	1.88	1.57	0.82	1.64	0.71
FeO	10.67	20.57	9.97	20.68	10.89	21.75	10.05	20.84
MnO	0.23	0.65	0.25	0.45	0.28	0.54	0.36	0.53
MgO	14.53	23.35	14.67	22.57	14.28	22.79	14.83	22.91
CaO	19.81	1.14	20.23	1.66	20.28	1.53	19.85	1.46
Na ₂ O	0.19	0.00	0.36	0.05	0.26	0.10	0.31	0.05
Cr ₂ O ₃	0.34	0.00	0.31	0.36	0.33	0.16	0.22	0.11
Total	99.39	99.72	100.29	100.25	100.70	101.32	99.34	99.27
O=6.000								
Si	1.946	1.979	1.954	1.942	1.954	1.960	1.943	1.966
Al	0.071	0.025	0.069	0.082	0.069	0.036	0.073	0.031
Al ^t	0.054	0.021	0.046	0.058	0.046	0.036	0.057	0.031
Al ^o	0.017	0.004	0.023	0.024	0.023	0.000	0.015	0.000
Ti	0.012	0.004	0.011	0.004	0.008	0.010	0.012	0.004
Fe	0.336	0.639	0.310	0.640	0.339	0.669	0.316	0.652
Mn	0.007	0.020	0.008	0.014	0.009	0.017	0.011	0.017
Mg	0.815	1.292	0.814	1.246	0.792	1.250	0.832	1.278
Ca	0.798	0.045	0.807	0.066	0.809	0.060	0.800	0.059
Na	0.014	0.000	0.026	0.004	0.019	0.007	0.023	0.004
Cr	0.010	0.000	0.009	0.011	0.010	0.005	0.007	0.003
M1+M2	2.009	2.005	2.008	2.009	2.008	2.018	2.017	2.017
Ca(%)	40.97	2.29	41.78	3.37	41.69	3.05	41.08	2.94
Mg(%)	41.81	65.39	42.15	63.82	40.84	63.14	42.69	64.26
Fe(%)	17.22	32.32	16.07	32.81	17.47	33.81	16.23	32.80
Mg value	70.82	66.92	72.40	66.05	70.04	65.13	72.45	66.21

については Walker (1969) により他のパン皮状火山岩塊の例をひいて論証されている。

一方、多角形状の安山岩片はすべて軽石とは異なる化学組成をもっている。それらのうち、SiO₂-K₂O 図と、SiO₂-Rb/Zr 図で、軽石よりもやや SiO₂ に乏しいが軽石と連続する領域 (Fig. 7g, h に楕円で囲んだ領域) に集まってプロットされる一群のものについては、9月1日噴火時に既に存在していた安山岩に由来すると考えられる。この安山岩体の形成時期については不明であるが、以後この安山岩を pre9/1 安山岩と呼んで議論する。軽石とも pre9/1 安山岩とも異なる組成領域にプロットされる安山岩片は、それらとは別の岩石に由来すると考えられる。例えば Table 4 の 9月1日の安山岩片の試料 No. 5 は、他の安山岩片と異なり表面が赤色に変質して

かつ円磨されており火口底で礫として存在していたものであると解釈できるものであった。分析したすべての岩片がこのように礫であったか否か識別できているわけではないが、分析値がかなり分散していることは多種類の岩石に由来することを示唆している。

6-1-2 9月23日の噴出物

9月23日には多孔質で肉眼的に黒色ないし一部赤色のスコリアが噴出した。Figs. 5, 6 に示すとおり、スコリアの外縁と斑晶鉱物の関係を見ると、9月1日の軽石皮殻部や1日と23日の多角形状岩片とは異なって、岩片外縁によって斑晶鉱物が切断されているという事実はほとんど見られない。それとは逆に、スコリアの外縁が自形の斑晶鉱物の外形に沿って形作られていることが多い。これは噴火時に、スコリアの現在ガラスとなっている部分が斑晶鉱物とは異なる物性をもっていた、すなわち液体であったことを示すものである。逆にもしもその部分が固体であったとすれば、爆発時の破壊による破断面は他の安山岩片と同様に鉱物をガラスととも切断して形成されたであろう。従って9月23日のスコリアも本質物質であるといえる。

9月23日の噴火でも、噴出物のうち最も多かったのは安山岩片であった。しかし、9月23日の安山岩片の分析値は、すべて9月1日の安山岩片とは有意に異っており、9月1日の軽石の組成領域に重複してプロットされる (Fig. 7)。斑晶鉱物の種類や量、組成も軽石と同じであるので、9月23日の安山岩片の多くのものは、9月1日に上昇してきたマグマが固結した岩石であると考えのが妥当である。

6-2 マグマの性格の変化

9月23日のスコリアの斑晶鉱物量も化学組成もともに9月1日の軽石と変わらない (Figs. 4, 7)。したがって9月1日と23日とで噴出したマグマは同じものであった可能性が高い。しかし、スコリアは肉眼的に黒く、白色の軽石とは見かけ上異なる。9月23日に噴出したスコリアが黒っぽいのは、石基の火山ガラスが褐色であるためである。それに対して9月1日の軽石の石基のガラスは透明である。石基のガラスの組成を比較すると、9月23日のスコリアの方が9月1日の軽石よりも有意に SiO₂ に乏しく、Fe に富む組成となっている (Fig. 10)。一方、石基のマイクロライトのモード量について比較すると、軽石が約 30% に対してスコリアは約 14% であり軽石よりもかなり少ない (Table 6)。つまり、9月23日に噴出したマグマのほうがマイクロライトの量が少ないので、マグマには鉄やマグネシウムなどの成分がより富んでいるために色づいている、それに対して9月1日のマグマはすでに相当結晶化していたので、それらの成分が

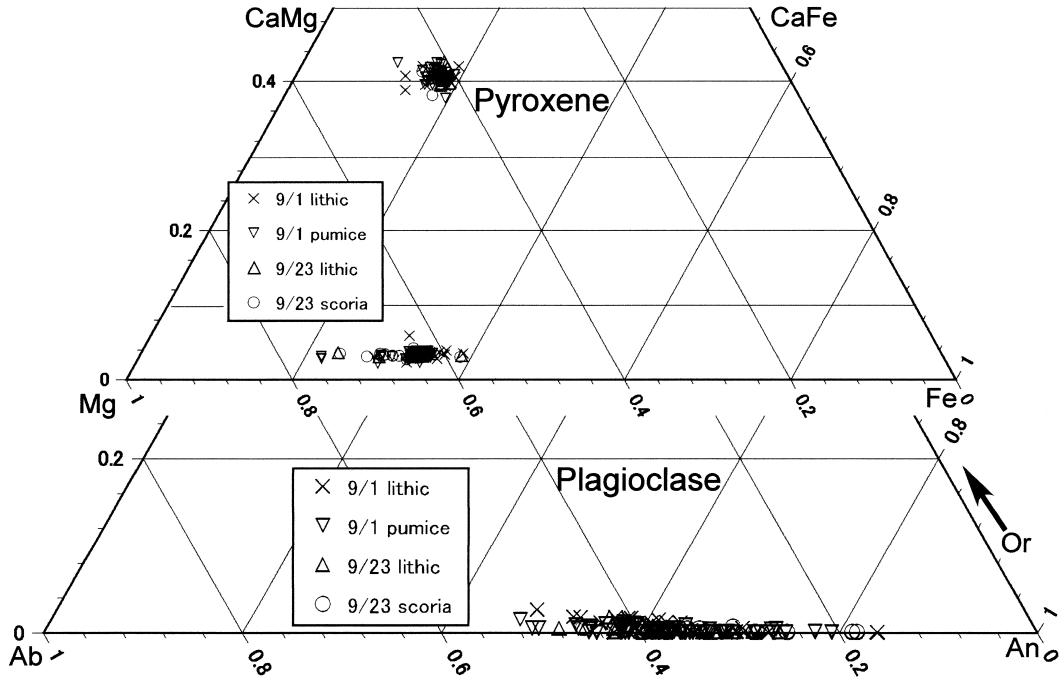


Fig. 8. Compositions of pyroxene and plagioclase phenocrysts.

結晶にとられて透明になっているというわけであろう。石基のマイクロライトのうちで、9月1日の軽石には含まれている石英は、9月23日のスコリアには含まれていない。石英はマイクロライト鉱物のうちで最後に晶出したと考えられるので、それが晶出するに至っていない9月23日のスコリアの起源マグマは9月1日の軽石のそれよりも噴火時の温度が高かった可能性が高い。

6-3 噴火の経緯

以上の考察に基づいて、9月中の噴火の経緯についてのモデルを Fig. 11 に示す。噴火に関与したマグマは9月1日以前に、すでに火口底下に存在していた pre9/1 安山岩体中に貫入した。上昇したマグマからは減圧に伴う発泡が起こり、ガスは pre9/1 安山岩体を帽岩としてその下部に蓄積された (Fig. 11a)。蓄積したガスにはマグマに熱せられた地下水から発生したものも含まれていた可能性もある。9月1日のパン皮状軽石の皮殻部は爆発時に急冷されてきたため、その部分の石基ガラスの含水量は噴火時点のメルト中の含水量を示していると考えられ、その量は、FT-IR により約 0.6 wt.% と計測される。この量は 850°C の流紋岩質マグマが約 50 bar の圧力下に置かれた時の飽和水蒸気量に相当する (Silver *et al.*, 1990)。ブルカノ式噴火の噴火前のマグマにかかる圧力は、帽岩の岩石荷重と帽岩の引張強度の和となる (Self

et al., 1979)。Self *et al.* (1979) は、安山岩の引張強度を 100–200 bar と推定したが、福井・他 (1995) は、ある種の安山岩の一軸引張荷重下での引張強度を 42 bar と計測した。今回の噴火の帽岩となった安山岩の引張強度は不明であるが、爆発前に合計して少なくとも 50 bar 程度のガス圧が蓄えられていたと推定される。

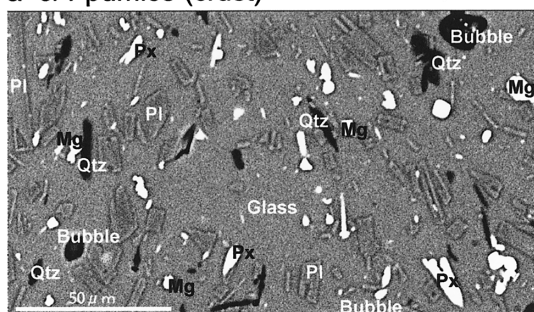
なお、軽石は破碎された後に遅延発泡しているのだから、軽石の起源となったマグマの内部での発泡は爆発の直接の原因ではなく、上述したガス圧に起因する爆発が安山岩片とマグマを破碎して噴き飛ばしたと考えられる (Fig. 11b)。

9月1日の噴火の後、生じた火口は噴火の破碎物質によって埋め立てられたと推測されるが、その中に帽岩を失って上昇しやすくなったマグマ柱が貫入してきた。そのマグマがおそらく9月14~18日の連続噴火を起こしたと推定される。星住・他 (2004) によれば、16日の噴出物中の多孔質岩片には白いガラスと褐色のガラスが認められており、嶋野・他 (2004) は9月16日に噴出した火山灰中に、石基にシリカ鉱物を含まないものを報告している。したがって9月1日にはマグマ柱の下部にあった、SiO₂に乏しくFeに富んだ結晶度の低いマグマがこのころまでに地表付近にまで上昇してきていたと考えられる。この時点まで帽岩がなかったためマグマからの火

山ガスの散逸は容易になされ、発泡によりかなり水を失ったマグマが上昇してきたことになる。そのマグマが 9 月 23 日のスコリアとなって放出された。スコリアの気泡が球形ではなく、円筒形にかなり変形しているのは気泡がマグマの移動に伴う変形を受けた、または移動中に

機械的原因で生じた減圧部で気孔形成が起こった (Smith *et al.*, 2001) ためと考えられる。9 月 16 日には火口底にパンケーキ形の溶岩が存在することが合成開口

a 9/1 pumice (crust)



b 9/23 scoria

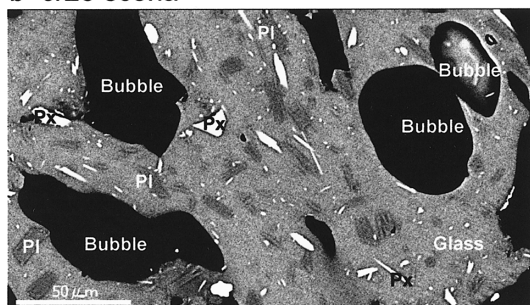


Fig. 9. Back-scattered electron images of the groundmass. a: The crust of Sept. 1st pumice. b: Sept. 23rd scoria. Mg: magnetite, Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Qtz: quartz.

Table 6. Modal compositions of the groundmass from the crust of the Sept. 1st pumice and the Sept. 23rd scoria.

in vol. %	9/1 pumice (crust)	9/23 scoria
glass	69.7	85.9
plagioclase	21.1	10.7
silica mineral	2.4	0.0
enstatite	2.4	0.9
augite	0.7	0.9
pigeonite	1.5	1.3
magnetite	2.2	0.2
total	100.0	100.0

Table 7. The chemistry of the microlites and glass in the groundmass of the Sept. 1st pumice and the Sept. 23rd scoria.

9/1 pumice (crust)							
	magne- tite	ens- tatite	aug- ite	pigeon- ite	plagio- clase	microlite average	glass average
SiO ₂	0.42	52.06	50.12	52.58	54.54	51.47	76.56
TiO ₂	16.06	0.39	0.95	0.49	0.09	2.19	0.77
Al ₂ O ₃	1.67	1.51	2.63	1.81	28.03	18.53	11.61
FeO	70.65	18.20	15.20	16.48	0.88	12.60	3.35
MnO	0.31	0.43	0.39	0.32	0.01	0.12	0.04
MgO	1.32	23.41	14.90	21.21	0.09	4.00	0.42
CaO	0.15	2.37	14.84	6.88	10.99	8.07	1.55
Na ₂ O	0.00	0.10	0.20	0.18	4.46	2.89	3.04
K ₂ O	0.15	0.01	0.03	0.00	0.16	0.12	2.66
Total	90.72	98.48	99.26	99.95	99.25	100*	100*
9/23 scoria							
SiO ₂	0.43	52.62	49.88	51.46	54.07	52.32	73.76
TiO ₂	13.05	0.28	0.68	0.54	0.10	0.61	0.90
Al ₂ O ₃	2.24	1.44	2.81	2.69	28.85	21.26	12.94
FeO	70.54	16.48	10.81	13.68	0.78	6.45	3.98
MnO	0.25	0.36	0.21	0.29	0.00	0.09	0.05
MgO	1.48	24.51	15.32	21.46	0.11	5.65	0.58
CaO	0.16	2.36	17.12	7.73	11.59	10.63	2.32
Na ₂ O	0.06	0.05	0.20	0.18	4.07	2.94	3.08
K ₂ O	0.08	0.01	0.02	0.00	0.05	0.04	2.38
Total	88.28	98.11	97.05	98.03	99.62	100*	100*

*: recalculated to be 100%

The average composition of microlite is calculated using the data of chemical compositions, modal compositions and density of constituent minerals.

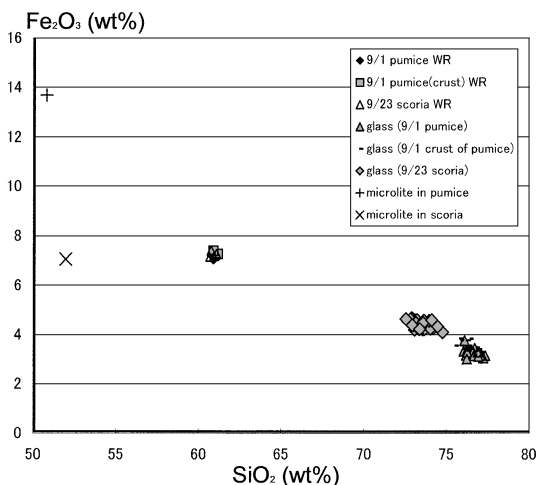
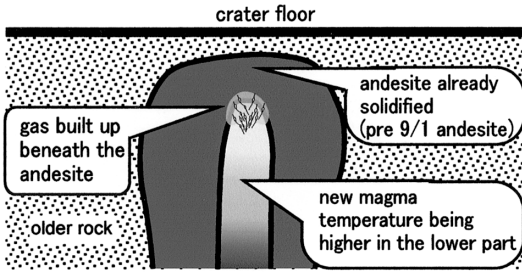
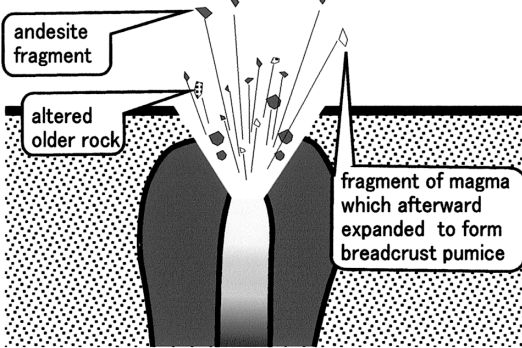


Fig. 10. Chemistry of the glass and microlites. WR: The whole rock compositions. The plots of the microlites are the average compositions of all constituent minerals as shown in Table 7.

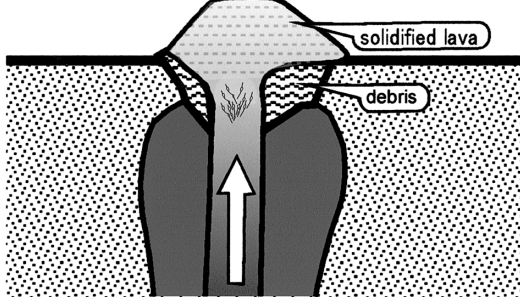
a before Sept.1st



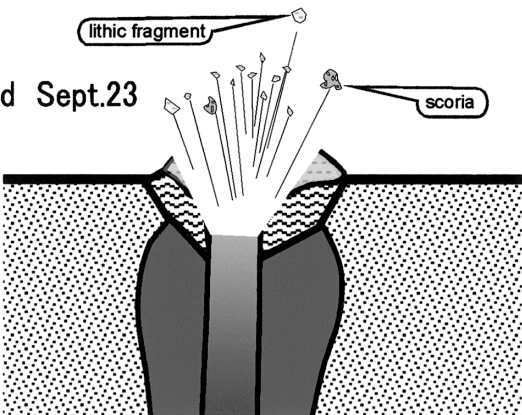
b Sept.1st



c before Sept.23



d Sept.23



レーダーで観測されている (大木・他, 2005). おそらく, 9月1日の軽石起源マグマの残りが地表に流出して冷却固化しドームを作っていたものと解釈でき, その後それが帽岩となってその下に火山ガスが蓄積され (Fig. 11c), 9月23日にはそのガスの爆発によって, 固結した溶岩を吹き飛ばし, それに伴ってマグマもスコリアとしてもたらされたと推定される (Fig. 11d). スコリアの石基ガラスに含まれる水の量は約0.1 wt.%と, 9月1日の軽石よりもかなり低い. これは火道中を上昇中に脱水してしまっていたためであろう. 9月23日の噴火では pre 9/1 安山岩に由来する岩片はもたらされていないので同安山岩はこの時点では帽岩の役割をほとんど果たしていなかった.

以上の経緯からみて, 9月1日と23日の両噴火とも典型的なブルカノ式噴火であったといえる. また, 両噴火とその間の14~18日の噴火のすべては同一

Fig. 11. The schematic illustrations of the eruption process. The size of the magma column and its depth are not in scale.

a: Before Sept. 1st, a column of new magma had risen to some shallow level beneath the crater floor and the decrease in pressure caused degassing of volcanic gas which was built up beneath the pre-Sept. 1st andesite body.

b: On Sept. 1st, the built up gas pressure surpassed the tensile strength of the pre-Sept. 1st andesite body to result in a vulcanian eruption. This eruption provided fragments of pre-Sept. 1st andesite, altered older rocks and magma. The magma fragments were originally polygonal-shaped. While they were transported in air, they inflated as the result of the delay vesiculation inside the magma and formed into breadcrust pumices.

c: In the course between Sept. 1st and Sept. 23rd, the column of new magma uplifted because the cap rock had disappeared. The upper part of the column was cooler and more crystalline than the lower part in which the residual magma was poorer in SiO₂ and more enriched in Fe therefore it formed darker glass than the pumice of Sept. 1st eruption. Some portion of the upper part of the column effused and made a lava dome.

d: On Sept. 23rd, next vulcanian eruption took place. The ejecta consist of lithic fragments of already consolidated upper part in the magma column and the scoria derived from the lower level of the same column.

のマグマ柱の上昇を伴う現象とみなすことができる。6-2節で述べた9月1日の軽石と9月23日のスコリアの石基中のマイクロライト晶出状況の差異も、前者がマグマ柱の上部にあってより冷却していたということで合理的に説明できる。9月23日噴火の後に火道を埋めたマグマ柱は、スコリアに見られるように円筒形に伸びた大型の気泡を多く含んでいるためにガスの逃散がかなり容易であったと考えられる。しかも、9月23日の噴火でマグマ柱の上の固結溶岩が吹き飛ばされた後は、マグマが露出するかせいぜい破砕物の堆積層によって覆われている状態であると推定されるので、火山ガスは大気中に出て行き易く、ガスの圧力が蓄積されて噴火に至るということは起こりにくい状態となる。それでも9月29日、10月10日、11月14日などに主として多角形状の安山岩片を噴出する小噴火がおこっているのは、その間に噴火口に流出した溶岩が固結してできた帽岩、もしくは破砕物の間のガスの通路が気相晶出鉱物などに塞がれてできた閉塞部の下にガスの圧力が蓄積した結果であろう。2005年3月本稿投稿現在、その過去に遡ること4ヶ月間はブルカノ式噴火は起こっていない反面、二酸化硫黄などの火山ガスの放出は続いているのは上記の脱ガスしやすい状態が継続しているためと考えられる。

7. ま と め

- 1) 浅間火山9月1日と23日のブルカノ式噴火に伴って、それぞれ、パン皮状軽石とスコリアからなるマグマ起源物質が抛出された。
- 2) 両噴火におけるマグマの化学組成、斑晶鉱物に違いはないが、石基の性質は異なり、23日噴火のマグマはより高温で結晶化程度も小さい。
- 3) 9月1日以前、および9月1日～23日の間に、火口底地下でマグマ柱が上昇しつつ脱ガスし、そのガスが蓄積されてブルカノ式噴火をもたらしたと考えられる。

謝 辞

9月2日の試料採取には、気象庁機動観測班に同行させていただいた。中田節也教授、吉本充宏博士、嶋野岳人博士をはじめとする東京大学地震研究所の方々と、上田義浩氏、飯島 聖氏をはじめとする気象庁軽井沢測候所の方々には浅間火山の状況に関して多くのご教示と有益な御討論をいただいた。初稿は編集委員の津久井雅志教授、井村隆介助教授および匿名の査読者の方のご意見をいただいて改善された。以上のかたがたに御礼申し上げます。また研究費には信州大学の2004年度プロジェクト推進経費、東京大学地震研究所特定共同研究B(2003-B-01)「活火山における噴火様式の時代的変遷と長

期噴火予知の基礎的研究(中川光宏代表)」、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C):17540435)「浅間火山噴出物の石基組織を利用した噴火予測の研究(三宅康幸代表)」を充当させていただいた。

引用文献

- 福井勝則・金 豊年・大久保誠介(1995)一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲線. 資源と素材, **111**, 25-29.
- 星住英夫・下司信夫・石塚吉浩・古川竜太・宇都浩三・中野 俊・宝田晋治・齋藤元治・東宮昭彦・宮城磯治・篠原宏志・伊藤順一・風早康平・大和田道子・森俊哉(2004)浅間火山2004年9月噴火の特徴と噴出量の見積り. 日本火山学会2004年度秋季大会演旨, 187p.
- 気象庁火山監視・情報センター(2004)関東・中部地方および伊豆・小笠原諸島の火山活動解説資料(平成16年9月)浅間山. 16p.
- 三宅康幸・津金達郎・金井哲男・池元壮彦(1996)珪酸塩岩石試料の主成分の蛍光X線分析-低希釈率ガラスビードの作成と迅速分析の精度-. 信州大学理学部紀要, **31**, 2, 105-117.
- 大木章一・村上 亮・渡辺信之・浦部ぼくろう・宮脇正典(2005)航空機搭載型合成開口レーダー(SAR)観測による浅間火山2004年噴火に伴う火口内の地形変化. 火山, **50**, 401-410
- Self, S., Wilson, L. and Nairn, I. A. (1979) Vulcanian eruption mechanisms. *Nature*, **277**, 440-443.
- 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也(2004)浅間火山2004年噴火噴出物の岩石学的検討. 日本火山学会2004年度秋季大会演旨, 186p.
- Silver, L. A., Ihinger, P. D. and Stolper, E. (1990) The influence of bulk composition on the speciation of water in silicate glasses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **104**, 142-162.
- Smith, J. V., Miyake, Y. and Oikawa, T. (2001) Interpretation of porosity in dacite lava domes as ductile-brittle failure textures. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **112**, 25-35.
- 高橋 康・信州大学浅間火山04年噴火調査グループ(2004)浅間火山2004年9月1日噴火の噴出物:その産状と化学組成. 日本火山学会2004年度秋季大会演旨, 192p.
- 高橋正樹・市川八州夫・安井真也・浅香尚英・下斗米朋子・荒牧重雄(2003)浅間・前掛火山天仁噴火噴出物の全岩化学組成と天明噴火噴出物との比較. 日本大学文学部自然科学研究所研究紀要, **38**, 65-88.
- 竹下欣宏(2004)中部日本, 中期更新世古期御嶽火山の火山活動史-テフラ層序学と記載岩石学に基づいて-. 地質雑, **110**, 158-174p.
- 津金達郎・三宅康幸(2001)珪酸塩岩石試料の微量成分のガラスビード法による蛍光X線分析. 平成11~12年度科学研究費補助金 基盤研究(C)(2)研究成果報告書, 課題番号11640447, 23-35p.
- 津金達郎・牧野州明・三宅康幸・高橋 康(2005)浅間火山2004年噴火噴出物の鉱物粒径分布とマグマの結

346 三宅康幸・高橋 康・津金達郎・牧野州明・角前壽一・西来邦章・福井喬士・信州大学浅間火山04年噴火調査グループ

晶化過程. 火山 (投稿中).

Mag., **106**, 166-173.

Walker, G.P.L. (1969) The breaking of magma. *Geol.*

(編集担当 津久井雅志)