

浅間火山 2004 年噴火噴出物の岩石学的検討

嶋野 岳人***・飯田 晃子*・吉本 充宏*・安田 敦*・中田 節也*

(2005年5月9日受付, 2005年9月9日受理)

Petrological Characteristics of the 2004 Eruptive Deposits
of Asama Volcano, Central JapanTaketo SHIMANO***, Akiko IIDA*, Mitsuhiko YOSHIMOTO*,
Atsushi YASUDA* and Setsuya NAKADA*

The 2004 eruption of Asama volcano, central Japan, was characterized by emergence of small amount of andesite lava in the summit crater, strombolian explosions and a series of vulcanian explosions. There is a good correlation between the degree of differentiation of glass in juvenile ash and repose times between successive explosions. Glass in ash erupted after a long repose time is high in SiO₂ content and crystallinity. In contrast, glass in ash from continuous strombolian explosions is less evolved chemically and is poorer in microlites. The chemical compositions of the evolved glasses in the Qz-Ab-Or diagram suggest that the magma was degassed at lower pressures. This is supported by low H₂O contents of the least vesicular rinds on bread crust bombs. In addition, complexly deformed fragments of white-colored volcanic sediment containing high SiO₂ glass and silica minerals, which probably originated from beneath the volcano, shows substantial heating evidenced by partial melting of the sediment and further modification by strong shearing along the conduit wall during magma ascent. The eruptive sequence can be modeled, as follows; 1) magma emerged continuously in the summit crater, accompanied by strombolian explosions (lava emergence and strombolian stage). 2) Magma became stagnant and crystallized at a shallow level in the conduit (repose period and crystallizing stage). 3) Vulcanian eruption occurred when crystallizing magma was pressurized by addition of new magma and/or gas accumulation sufficient to overcome the strength of a lava plug present below the crater (vulcanian stage). The 2004 eruption was marked by repetitions of this cycle and the conduit probably was choked when magma supply stopped. The deformed nature of volcanic sediment entrapped as xenoliths suggests significant shearing between viscous magma and the conduit wall.

Key words: degassing, crystallization, repose interval, vulcanian eruption, Asama volcano

1. はじめに

ブルカノ式噴火は安山岩質マグマを噴出する火山に特徴的な噴火現象である。連続的なマグマ噴出を行うプリニー式噴火とは対照的に、ブルカノ式噴火では間欠的なマグマ噴出がその特徴である。また、プリニー式噴火では火口近傍に殆ど堆積物が定置しないのに対して、ブルカノ式噴火では火口近傍に最大径が数十 m にもおよぶ多量の火山弾が着弾することが知られている。一方、噴

出物の構成についても、プリニー式噴火では発泡度が高いガラス質の降下軽石が堆積物の大半を占めるのに対して、ブルカノ式噴火では緻密な結晶質の溶岩片や外来岩片が主な噴出物である。このような噴出物の特徴は、どのようなマグマ上昇過程を反映しているのであろうか？

マグマの火道上昇過程においては、脱ガス現象（揮発成分の析出と分離）が噴火様式を決定する主な要因と考えられている。特に H₂O は火山ガスの主成分であり、減

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

** 現在: 〒980-8576 宮城県仙台市青葉区川内 41
東北大学東北アジア研究センター

Present: The Center for Northeast Asian Studies,
Tohoku University, 41 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai,
Miyagi 980-8576, Japan.

Corresponding author: Taketo Shimano
e-mail: shimano@cneas.tohoku.ac.jp

圧によるマグマの脱水はリキダス温度の上昇を伴うため、メルトは過冷却状態になって結晶化が進行する (Couch *et al.*, 2003). 近年, 世界のブルカノ式噴火の数例については, マグマの上昇過程を模擬した減圧実験生成物と天然の噴出物との比較が行われ, マグマの結晶化過程と関連づけて議論されている (Hammer and Rutherford, 2002; Couch *et al.*, 2003). しかし, 様々な噴火パターンを示すブルカノ式噴火に対して, このような物質科学的研究の実例はまだ少なく, 噴火メカニズムの理解にはデータの蓄積が必要である.

浅間火山は 2004 年 9 月 1 日より噴火を開始し, 2004 年末にかけて数日から数週間の間隔で断続的に火山灰および火山礫, 火山弾を放出するブルカノ式噴火活動を行った. 我々はこの間, 各噴火について噴出物の分布, 噴出量の見積りを行い (吉本・他, 2005), 継続的な噴出物採取に成功した. また, 9 月 13 日, 10 月 29 日には山頂周辺の調査により火山岩塊等の試料も採取した. これらの噴出物を噴出した噴火現象については, 重力, 地震, 地殻変動等の地球物理学的観測データが得られており (大湊・他, 2005; 青木・他, 2005; 植木・他, 2005; 山本・他, 2005), ビデオ映像による噴煙の挙動解析 (寺田・他, 2005b) も行われている. このように, 本噴火はブルカノ式噴火のメカニズムを多角的に考察する上で格好のケーススタディーになると考えられる. そこで本論文では, 浅間火山 2004 年噴火噴出物の岩石学的特徴からマグマの結晶化過程を明らかにし, マグマの火道上昇メカニズムについて考察を行う.

2. 噴火の概要

浅間火山は, 東京から北西約 130 km に位置する成層火山であり, 歴史時代に 2 度のプリニー式噴火 (1108, 1783 年; 天仁, 天明噴火) を行っている日本でも屈指の活火山である (荒牧, 1993; 安井・他, 1997; Fig. 1). 一方, 明治時代以降, 本火山では断続的にブルカノ式噴火を行っており, 1910, 1930, 1950 年代, 1973 年の活動は特に活発であった (宮崎, 2003; 中田・他, 2005). 最も活発な時には小規模な火砕流を発生させる活動や約 1 m 大の火山弾を火口から 4 km 以上離れた地域に到達させる活動をする事もあった. しかし, 1973 年以降は, 小規模な水蒸気爆発 (1982, 2003 年) や噴気活動の消長は認められたが, 概ね静穏でありマグマ噴出を伴う活動は確認されていなかった.

2004 年噴火は 9 月 1 日夜より噴火を開始し, その後も数日~数週間の休止をおいて断続的に火山灰, 火山礫, 火山岩塊の放出活動を行った (Table 1). 最初の噴火は, 数日前から活発化していた地震活動 (火映も観測) が沈

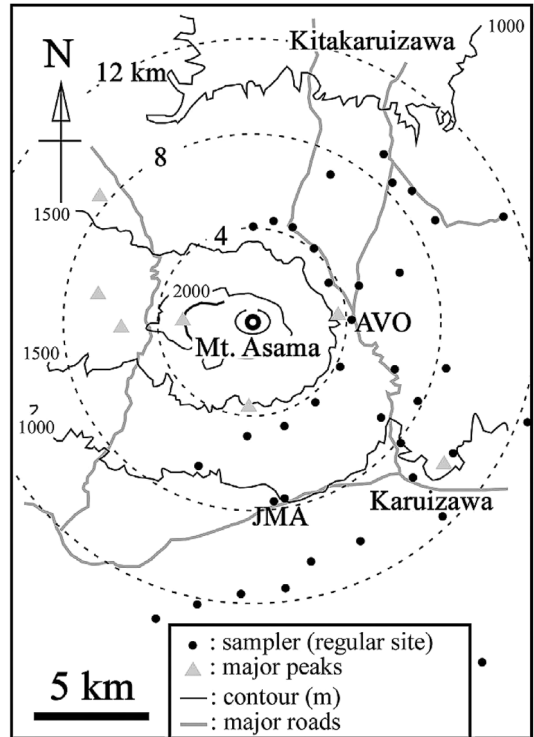


Fig. 1. Locality map of Asama volcano.

Table 1. The 2004 eruption sequence summarizing type of eruption, samples, and repose intervals of the 2004 eruption.

Date	Eruption (i)*	investigated sample	repose (hour)
9/1	explosive (1)	ash, lapilli, volcanic block	188*
9/14	small (3)	ash	295, 10, 2
9/15	small (40)	ash	< 9
9/16	successive	ash	-0
9/17-18	successive	ash	-0
9/23	explosive (1)	ash, lapilli	119
9/24-25	small (2)	ash	14, 33
9/29	explosive (1)	ash, lapilli	90
10/1	small (2)	no ashfall	47, 6
10/10	explosive (1)	ash, lapilli	222
10/15	small (1)	no ashfall	107
10/16	small (1)	no ashfall	26
10/18	small (1)	no ashfall	44
10/19	small (1)	no ashfall	31
10/28	small (1)	no ashfall	206
11/14	explosive (1)	ash, lapilli	425
11/17	small (2)	no ashfall	66, 2
11/18	small (1)	no ashfall	9

The repose intervals are calculated from eruption times by Japan Meteorological Agency. explosive: vulcanian eruption, successive: strombolian eruption. *: For the first eruption, repose interval is assumed to be equal to the duration of glowing in the crater before the event. #: number of eruptions.

静化した9月1日20:02頃、ブルカノ式噴火により開始した。この噴火では、細粒な火山灰が東北東約250kmの福島県に到達したほか、爆発により火口から約4kmの範囲に数cm～数mの火山礫及び火山岩塊が到達した。その後約2週間は地震活動も低いレベルにあったが、一方で、夜間の火映現象が顕著になった。そして9月14日に再び小規模な噴火を開始し、噴煙を火口上空数千mにあげる火山灰放出活動を9月18日まで断続的に行った。特に9月16日夜-17日の噴火では火口付近に赤熱した火山岩塊が放出されるのが観察され、東京でも細粒火山灰の降下が観測された。また、火口内には直径約140mの円形で扁平な溶岩ドーム（通称、溶岩ケーキ）が形成されていることが合成開口レーダにより確認された（9月16日10:40国土地理院；<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/ASAMA/>）。その後、地震活動、火山灰放出は沈静化した。夜間の火映現象は継続し、9月23日に再び地震活動の活発化ののちブルカノ式噴火を行った。以降、このような活動（火映現象、地震活動活発化→ブルカノ式噴火）を1～数週間間隔で繰り返したが、12月以降噴出物を伴う噴火は認められていない。

3. 噴出物採取方法

我々は噴火直後の9月2日未明より噴出物調査を行い、その後も全ての噴火について噴出物分布調査を噴火中から直後にかけて行った。特に9月後半～10月末は東京大学地震研究所浅間火山観測所に常駐し噴火に備えた。また、風向によって様々な方角に分布する噴出物を確実に採取するため、プラスチック製容器を山頂火口から半径約4-20kmの範囲に計約60個設置し（Fig. 1）、定期的に試料回収と容器清掃を行った。また、状況に応じて人工物等の上に堆積した噴出物も採取したほか、数試料については地域住民の方々等により提供して頂いた。一方、9月13日、10月29日には浅間山頂周辺の調査を行い火山岩塊を採取した。なお、これらの噴出物の分布状況、噴出量については吉本・他（2005）で議論する。以上のような継続調査により、我々は噴火毎の火山灰採取に成功した。また、比較的大きな空振を伴うブルカノ式噴火では、広域に降下した火山灰、火口から10km以内の地域に降下した数cmの火山礫、更に山頂周辺に落下した径数十cm～最大10m以上の火山岩塊（又はその一部）の特徴的な3サイズの噴出物を採取することが出来た。

4. 噴出物の特徴

4-1 火山灰

本噴火の一連の活動によって放出された火山灰は、主として遊離結晶（斜長石、輝石）、結晶質粒子、ガラス質

Table 2. Classification of ash particles and their groundmass mineral assemblages.

particle type		groundmass minerals
glassy	brown	Pl, Cpx, Opx, Ox
	colorless	Pl, Opx, Si, Crd, Lm
crystalline	brown	Pl, Cpx, Opx, Si, Ox
	colorless	Pl, Cpx, Opx, Si

Pl: plagioclase, Cpx: clinopyroxene, Opx: orthopyroxene, Ox: oxides, Si: silica minerals, Crd: cordierite, Lm: limonite.

粒子の3種類の粒子により構成される。さらに結晶質、ガラス質粒子には、褐色火山灰粒子（黒色～褐色を呈する色の濃い火山灰の総称）と無色火山灰粒子（無色～白色を呈する色の薄い火山灰の総称）が存在する（Table 2）。いずれの粒子も斜長石、輝石を斑晶として含む場合がある。石基鉱物としては結晶質粒子、褐色ガラス質粒子が斜長石、両輝石、土鉄チタン酸化物、土シリカ鉱物からなるのに対し、無色ガラス質粒子はシリカ鉱物、堇青石、褐鉄鉱からなることが特徴である。なお、シリカ鉱物としては、石英、トリディマイト（鱗珪石）の両者が認められたが、いずれも少量、細粒であるため、全噴出物について両者を識別するのは困難である。

結晶質粒子、褐色ガラス質粒子の石基鉱物としては、斜長石、輝石が全ての噴出物に認められ、9月16-17日以外の粒子にはシリカ鉱物が認められるのに対し、9月16-17日の粒子にはシリカ鉱物が認められない。更に9月18日以降の粒子には、石基により多くの輝石や鉄チタン酸化物を含むものが認められる。また、褐色ガラス質粒子については、結晶質粒子に対する量比が噴火開始後9月17日まで増加傾向にあったが、その後、これらの存在量比は、一定ないし減少傾向を示した（Table 3）。一方、無色ガラス質粒子は概ね少量（全体の数%未満）であるが、9月23日以降でやや増加する傾向が認められた。

なお、黒色～褐色の違いは局所的な石基の結晶度と相關しているようであるが、マイクロライトの局所的な結晶構成（斜長石と隠微品質の不透明鉱物）の違いによっても変化するようである。また、色の比較的薄い褐色結晶質粒子および無色結晶質粒子に対し、無色ガラス質粒子は偏光顕微鏡下で堇青石を含むこと等により区別することが可能であるが、実体鏡下では見分けがつきにくい。ため、これらの量比は大まかなものである。

4-2 火山礫・火山岩塊

ブルカノ式噴火（9月1, 23, 29日, 10月10日, 11月

14日)により噴出した火山礫は、暗灰色～赤色石質緻密岩、白色岩、変質岩、軽石、スコリアにより構成される (Table 4; Fig. 2c). このうちの大部分は石質緻密岩がしめる (8-9割以上). 石質緻密岩は斑晶質の安山岩質溶岩片で、貝殻状の破断面によって囲まれた多面体～ヤジリ状の角張った形状を呈する. また、9月23日以降に採取した試料では、発泡した白色の火砕堆積岩 (白色岩) が数多く認められた. 変質岩は粘土等の付着した溶岩など雑多な岩石からなり、形状は円磨されたものが多い. 軽

石は白色から淡黄色で発泡が良く、石質緻密岩と同様の皮殻を持つパン皮状軽石も含めると数%程度確認された (Fig. 2a). パン皮状軽石は割れ目が発達して脆いため、着弾時に破碎しているものが多い. 内部の高発泡部分は1783年のプリニー式噴火の降下軽石 (Fig. 2b) と同様の発泡度をもつ. 少量認められるスコリアは良く発泡しており、暗褐色～黒色を呈し鈍いガラス光沢を持つことが多い.

山頂付近で採取した火山岩塊も火山礫とほぼ同じ構成種からなるが、特に内部が様々な程度で発泡したパン皮状火山弾が数多く認められた. 発泡の仕方は様々であり、中心部の発泡度が最も高く同心円状に発泡度が変化するもの、発泡度の違いによる縞状ないし層状の構造を持つもの、全体が比較的均一に発泡しているものなどが認められた. また、特に10月29日に採取した試料 (9月13日～10月28日に噴出したもの) では、発泡した白色の火砕堆積岩 (径数～数十 cm のものが多い; 白色岩) やそれらを捕獲岩として取り込んだ石質緻密火山岩塊が数多く認められた. このような捕獲岩はレンズ状に薄く引き延ばされたようなものが多かった (Fig. 2d).

暗灰色～赤色石質緻密岩、軽石、スコリアは、斑晶が主に斜長石、単斜輝石、斜方輝石からなり、鉄チタン酸化物、稀にかんらん石を含む場合もある. 石基鉱物は斜長石、単斜輝石、ピジョン輝石からなり、斜方輝石、鉄チタン酸化物、シリカ鉱物を含む場合もある. これらは褐色ガラス質火山灰粒子、結晶質火山灰粒子とよく似た特徴である. 一方、白色岩は斜長石、輝石、鉄チタン酸化物を斑晶として含む場合もあるが、無斑晶質の場合もある. きわだった特徴として、石基鉱物が無色ガラス質火山灰粒子と同様にシリカ鉱物、堇青石、褐鉄鉱からなることが挙げられる.

5. 分析手法

火山礫、火山岩塊の全岩化学組成の測定、火山礫、火山灰粒子の斑晶鉱物、石基平均組成および石基ガラス組

Table 3. Relative amount of ash particle types for each eruption. Small eruptions were not sampled.

Date	Ash particle type
9/1	crystalline >> glassy, free crystal
9/14	crystalline >> glassy, free crystal
9/15	crystalline >> glassy, free crystal
9/16	crystalline ~ glassy, free crystal
9/17-18	glassy >> crystalline, free crystal
9/23	glassy > crystalline, free crystal
9/24-25	glassy > crystalline, free crystal
9/29	crystalline ~ glassy, free crystal
10/1	n. a.
10/10	crystalline ~ glassy, free crystal
10/15	n. a.
10/16	n. a.
10/18	n. a.
10/19	n. a.
10/28	n. a.
11/14	crystalline ~ glassy, free crystal
11/17	n. a.
11/18	n. a.

Table 4. Constituents of lapilli in vulcanian eruptions.

Date	Lapilli type
9/1	Darkgray dense rock, Pumice (with crust), Altered rock, Sedimentary rock
9/23	Darkgray dense rock, Pumice, Red dense rock, Altered rock, Sedimentary rock
9/29	Darkgray dense rock, Pumice, Red dense rock, Altered rock, Sedimentary rock
10/10	Darkgray dense rock, Pumice, Red dense rock, Altered rock, Sedimentary rock
11/14	Darkgray dense rock, Pumice, Red dense rock, Altered rock, Sedimentary rock

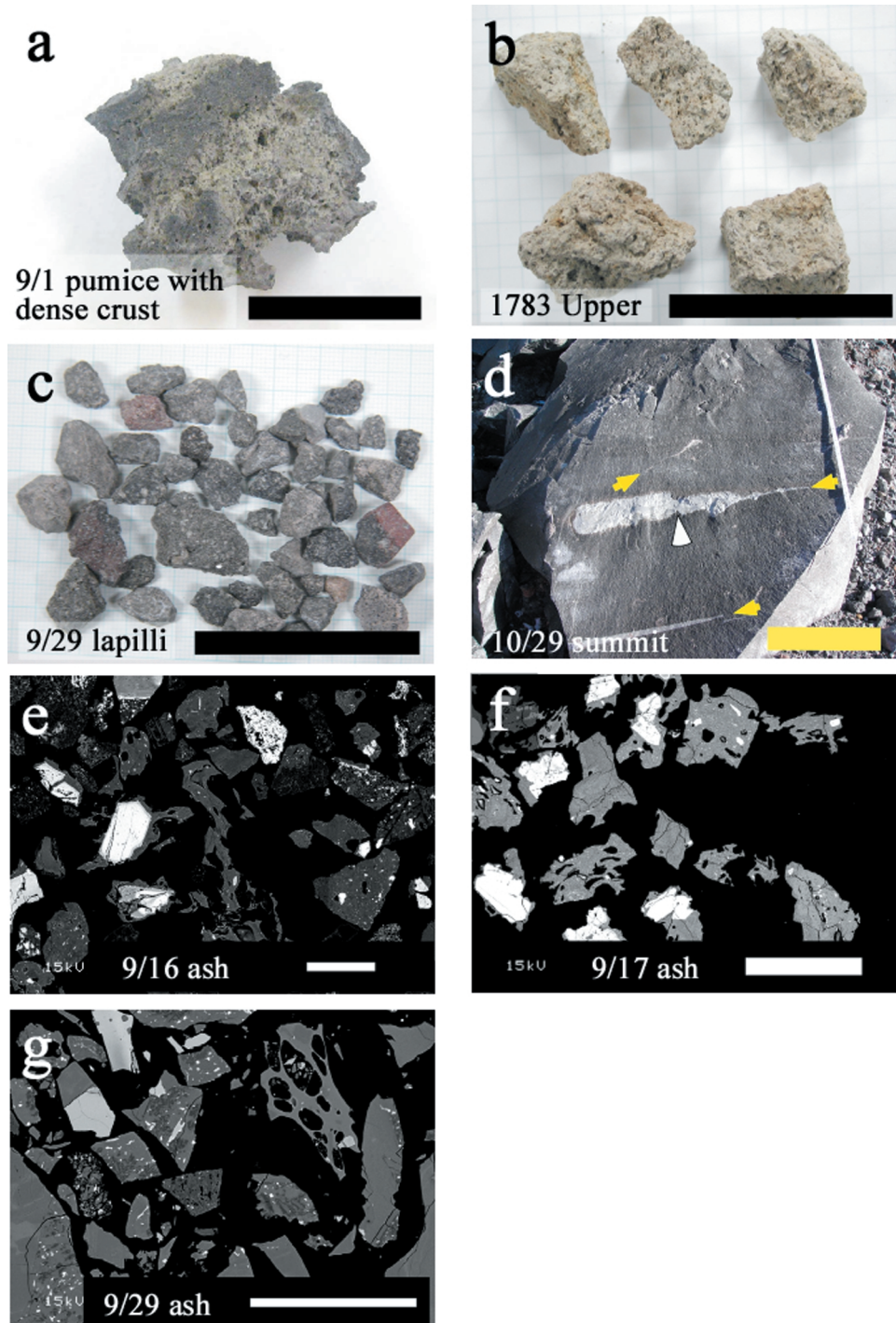


Fig. 2. (a) Pumiceous bread crust bomb erupted on Sep. 1. (b) Pumices of the 1783 plinian eruption (upper unit). (c) Lapilli erupted on Sep. 29. (d) Dense block with white elongated xenoliths at the summit of Mt. Asama (Yellow arrows indicate xenoliths and the white arrow indicates a pull-apart structure). SEM images of ash erupted on (e) Sep. 16, (f) Sep. 17, and (g) Sep. 29. Scale bars are 5 cm for (a) to (c), 20 cm for (d), 200 μ m for (e) and (g), and 1 mm for (f). The ash particles of Sep. 17 are glassy and vesicular, whereas many particles erupted on Sep. 29 are crystalline and dense.

成の測定を行った。全岩化学組成は東京大学地震研究所の蛍光 X 線分析装置 (Philips 社製 PW2400 型) を用い、谷・他 (2002) に準ずる方法で 1:5 希釈ビードの作製、検量線の作成を行って測定した。斑晶鉱物、石基ガラス組成 (および石基平均組成) は同所 EPMA 分析装置 (JEOL 社製 8800R 型) を用い 15 kV, 12 nA の条件の下、ビーム径をそれぞれ 1, 10 μm で測定した。なお、ガラス測定時のビームダメージによる Na のカウント減少は 10% 未満 (相対値) であった。

また、噴出物の全岩含水量測定は、同所のカルルフィッシャー滴定装置 (三菱化学社製 CA-06 型) を用いて嶋野・小屋口 (2001) と同様の手法で行った。ガラス中の含水量については、同所の顕微 FTIR 分析装置 (JASCO 社製 FT/IR-660V+IRT-30) を用い、分光器内、試料室内を真空にし、マイクロメータで膜厚測定した両面研磨試料を測定した。モル吸光度係数は Dobson *et al.* (1989) の値を用いた ($8.8 \pm 0.8 \text{ m}^3/\text{mol m}$; for $\text{SiO}_2 = 77.59 \text{ wt}\%$)。なお、石基が結晶質の試料については結晶 (ただし無水) とガラスの両者を透過した赤外線信号を測定しているため、測定値は含水量の最低値を与えるものと考えられる。

6. 分析結果

6-1 火山礫・火山岩塊の全岩化学組成

軽石、パン皮状軽石の内部発泡部分および皮殻部分、火山礫の大部分を占める暗灰色～赤色石質緻密岩 (9 月 1 日を除く) の全岩化学組成はほぼ同一であり ($\text{SiO}_2 = 61\text{--}62 \text{ wt}\%$)、浅間火山前掛期の噴出物、特に 1783, 1982 年の噴出物等 (荒牧・早川, 1982) とほぼ同一の組成である (Figs. 3, 4)。一方、9 月 1 日暗灰色石質緻密岩はこれらと異なる組成であり (ややシリカに乏しい)、前掛期の噴出物の中でも 1108 年の噴出物に近い組成を示す。また、10 月 29 日の火口周辺調査で多量に認められた白色岩の全岩化学組成は極めて SiO_2 量が高い ($> 70 \text{ wt}\%$)。これらは浅間火山噴出物の中では仏岩期に噴出した溶岩に近い組成ではあるが、 Na_2O に乏しいなど、浅間火山でこれまでに報告されている岩石 (高橋・他, 2003 等) とは異なる組成を示す。

6-2 斑晶鉱物組成

軽石、9 月 23 日以降の石質緻密岩中の斑晶鉱物 (斜長石、単斜輝石、斜方輝石、鉄チタン酸化物、かんらん石) の組成については、1783 年噴出物 (特に降下軽石層下部～中部) との顕著な違いは認められない (Fig. 5)。斜長石斑晶のコア、リム組成はそれぞれ An_{55-90} , An_{60-75} である。また、斑晶リム組成が噴出直前のマグマの温度を反映しているとする、単斜輝石、斜方輝石組成から Frost and

Lindsay (1992) の温度計を用いると、1783 年噴火と同様に約 1,050°C と求められる (Fig. 5b)。

6-3 石基平均・石基ガラス組成

2004 年噴出物の石基平均組成は、1783 年噴出物のものと誤差の範囲でほぼ一致する (Fig. 6a)。また、2004 年噴出火山灰の石基ガラス組成は、いずれの噴出物とも、1783 年のプリニー式噴火の降下軽石のガラス組成変化の延長上にプロットされ、系統的に SiO_2 量が高い (Fig. 6b)。また、火山灰粒子毎にみると、褐色ガラス質火山灰、結晶質火山灰、無色ガラス質火山灰の順に SiO_2 量が高くなる傾向が認められる (Fig. 7)。さらに、2004 年噴出物の内、褐色ガラス質火山灰粒子の石基ガラス組成の変化については、9 月 1 日、14-15 日の火山灰粒子で SiO_2 量が高いのに対し (シリカ鉱物含む)、9 月 16-17 日の粒子では SiO_2 量が低く (シリカ鉱物含まない)、1783 年輕石のそれに近い傾向を示す (Fig. 7)。更に 9 月 18 日以降では SiO_2 量が 75 wt.% を超えるものが頻繁に認められる。

6-4 含水量

9 月 1 日噴出のパン皮状軽石の内部発泡部分及び皮殻部分の全岩含水量は、それぞれ約 0.20wt.%, 0.45wt.% である (Fig. 8)。一方、9 月 1 日噴出の石質緻密岩の全岩含水量は約 0.15 wt.% である。また、比較のために分析を行った 1783 年噴火の噴出物については、高発泡度のプリニー式噴火軽石の全岩含水量が約 0.4-0.5 wt.%, 鬼押し出溶岩流、鎌原岩屑なだれに伴うプラスト堆積物の岩片がともに約 0.25 wt.% である。肉眼、顕微鏡下で観察する限りいずれも新鮮な試料であるため、水和による影響はほとんど無いと考えられる。なお、FTIR により測定したパン皮状軽石の皮殻部分の石基ガラス含水量は約 0.3 wt.% である。

7. 考察

7-1 最初のブルカノ式噴火の放出火山岩塊・火山礫 (9 月 1 日)

9 月 1 日の活動では、赤熱した岩塊が飛散する様子が目撃され、また着弾した地点で草木の焼失が起きていることから、少なくとも一部の噴出物 (石質緻密岩) が高温であったことが示唆される。一方、最近数十年間の浅間火山噴出物で軽石が報告されているのは 1958, 1973 年で、上記のパン皮状軽石とよく似たものも発見されている。しかし、9 月 1 日軽石はほとんど変質や付着物が認められない新鮮なものである。前回の噴火 (2003 年) ではこのような新鮮な軽石の噴出はなく (寺田・他, 2005a)、噴気の多い火口底に堆積した 1973 年の噴出物が新鮮なまま存在し、かつ前回は放出されずに今回に

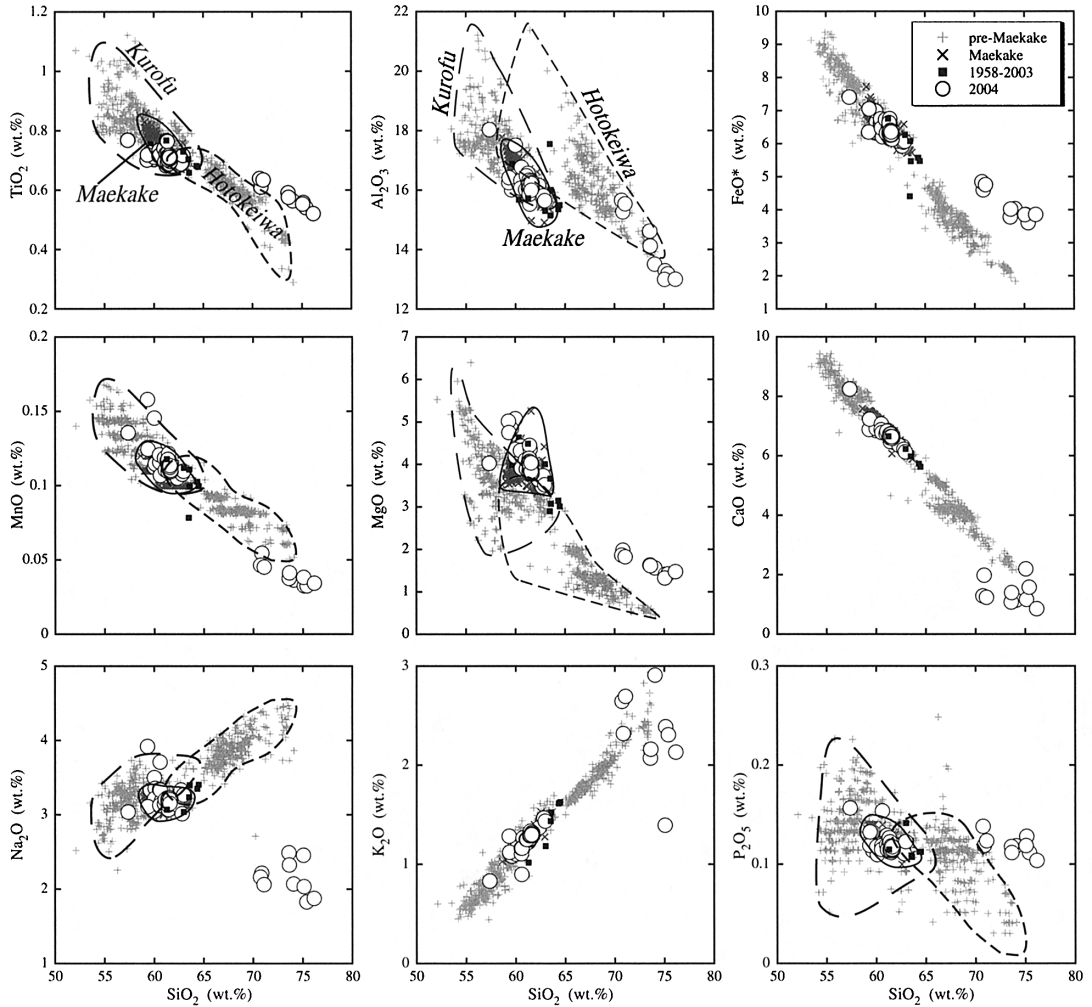


Fig. 3. Whole rock compositions of the products generated in the 2004 eruption in comparison with other rocks of Asama volcano (Kurofu, Hotokeiwa, and Maekake Stages; Takahashi *et al.*, 2003). White circles with $\text{SiO}_2 > 70 \text{ wt.}\%$ are the compositions of white volcanic sediment.

なって再放出されたとは考えにくい。また、9月1日噴火の軽石は1958年の軽石とは全岩化学組成が異なり、1973年の軽石とも若干異なる(中田・他, 2005)。さらに9月16日以降には、9月1日に噴出したパン皮状軽石と同一化学組成をもち、明らかにマグマ物質と考えられる溶岩が火口底に噴出している。以上のことから、9月1日に噴出したパン皮状軽石は今回地表付近に上昇したマグマに由来したものであると考えられる。

一方、噴出物の大半を占める9月1日の石質緻密火山岩塊の全岩化学組成は9月1日のパン皮状軽石や最近数百年間の噴出物(1783年噴出物や直前の2003年噴出物など)とも異なり、どちらかというとならぬ噴出物に近い

値を示す(Fig. 6)。このことから、これらはマグマによって加熱された過去の噴出物(溶岩)であると考えられる。しかし、全体的に新鮮であり、草木焼失を起こしていることから、マグマに由来したものである可能性も完全に否定することはできない。

7-2 2回目以降のブルカノ式噴火の放出火山岩塊・火山礫(9月23日, 29日, 10月10日, 11月14日)

9月23日以降は数回のブルカノ式噴火が発生して、そのたびに主に暗灰色~赤色石質緻密岩(8割以上)からなる火山礫が放出された。これら暗灰色~赤色石質緻密岩の全岩化学組成は9月1日のパン皮状軽石と同一であり(Fig. 4)、斑晶量はほぼ等しく、石基結晶度が高い傾

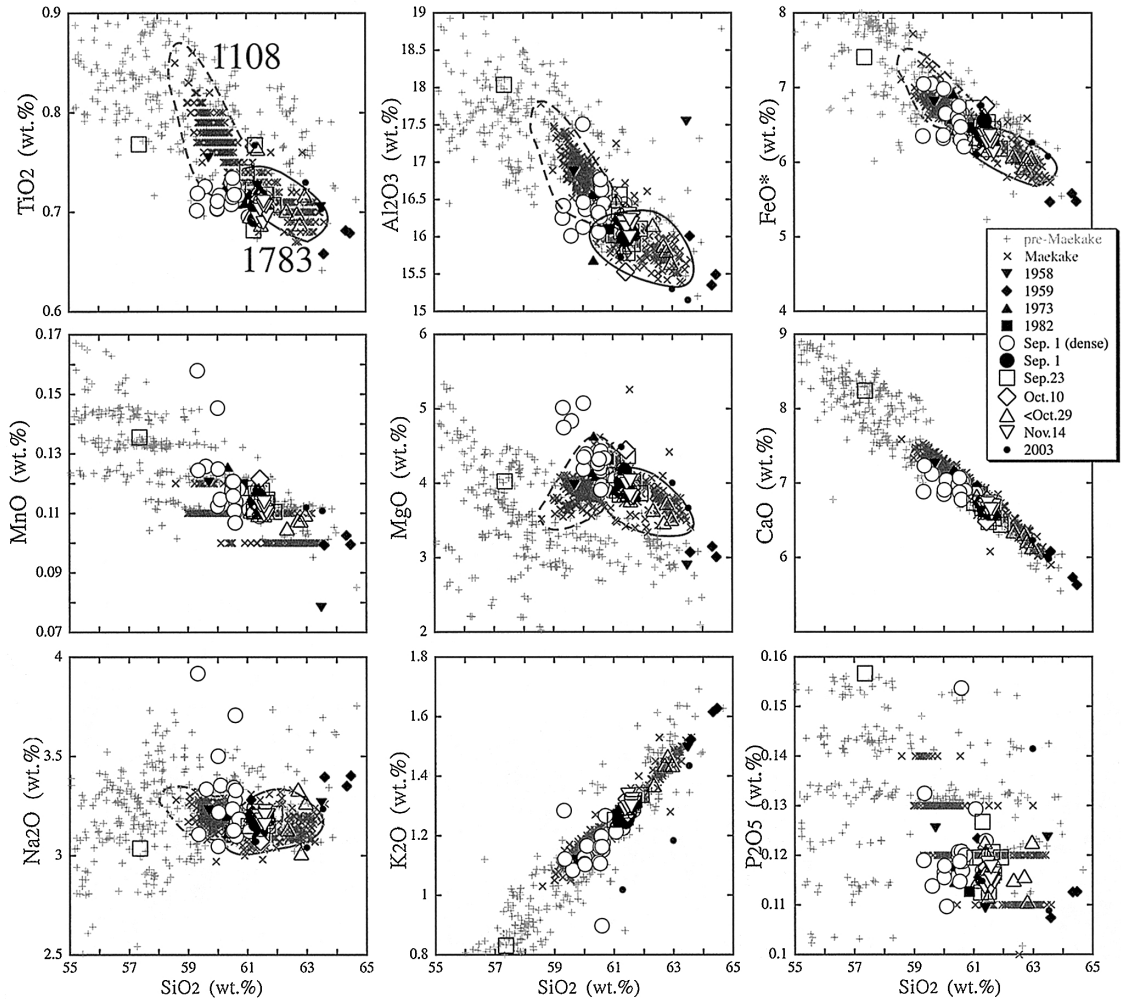


Fig. 4. Comparison of the whole rock compositions among the products of the 2004 eruption excluding the volcanic sediments (gray symbols are pre-2004 products in Maekake Stage; Takahashi *et al.*, 2003).

向が認められる。これらの石質緻密岩の表面は鈍い光沢を持ち茶褐色を呈する。また、火口近傍ではこれら石質緻密岩の接触したプラスチック製人工物が融解ないし焼失していることが確認されている。以上の点から、これらの石質緻密岩は今回上昇したマグマ物質の固化結晶化したものであると考えられる。赤色酸化したのについては、高温状態で空气中に一定期間放置されていたためと考えられ、9月16日以降火口底に出現した溶岩ケーキの表層付近（大気中で徐冷）から放出されたものである可能性が考えられる。

7-3 褐色ガラス質火山灰粒子、結晶質粒子

火山灰粒子の内、褐色ガラス質粒子は新鮮なガラス光沢を持つこと、溶岩ケーキの出現や赤熱岩塊の飛散が目

撃された9月16-17日に多量に噴出していることから、これらも今回のマグマが噴出したものと考えられる。とくに9月16-17日に噴出したものは良く発泡しており、石基の結晶度も低い (Fig. 2f)。一方、結晶質粒子も褐色ガラス質粒子と石基鉱物組み合わせが同じであり、ガラス組成もほぼ同じ又はやや珪長質な範囲にプロットされることから、マグマ物質由来（結晶化の進んだマグマ）であると考えられる。ただし、火山礫サイズには石質緻密岩とよく似た古い溶岩がごく少量含まれることがあるので、結晶質粒子の一部にもごく少量、過去の溶岩由来のものも含まれる可能性はある。

7-4 白色岩・無色ガラス質火山灰

白色岩は、火砕物からなること、一部に認められる層

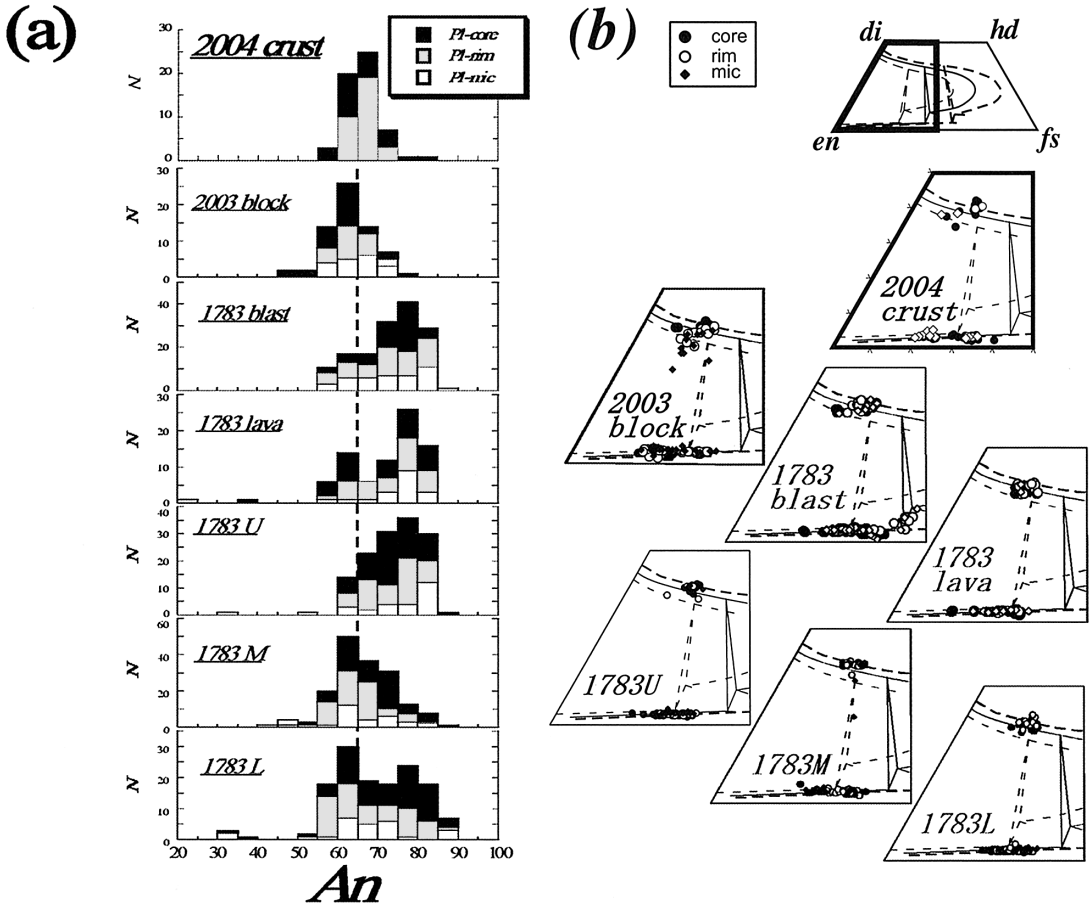


Fig. 5. Mineral compositions in the products of the 2004 and the 1783 eruptions. (a) Anorthite content of plagioclase. (b) Quadrilateral plot of pyroxenes (Lindsley, 1983). di: diopside, hd: hedenbergite, en: enstatite, fs: ferrosilite. Thick broken, solid, and thin broken lines are 1000, 1050, and 1100°C isotherms, respectively.

状の構造や石基鉱物として堇青石やシリカ鉱物を含むなどの岩石学的特徴の類似点から、Aramaki (1961) が示したマグマによって加熱溶融した堆積岩起源の岩石に相当するものと考えられる。9月13日に山頂周辺で9月1日噴火の火山弾分布調査を行った際には、2003年以前に放出された岩石も数多く地表面に露出していた。ところが、10月29日の第2回調査時には径数十cm以上の火山弾が火口周辺一帯に散乱し、更に火山礫サイズのものも含めると2004年噴出物が地表面をほとんど覆っていた。したがって、10月29日に地表面に認められた火山弾のほとんどは9月23、29日、10月10日のいずれかに噴出したものと考えられる。第2回調査中には9月1日噴出物と9月23日以降の噴出物を全てについて識別することはできなかったが、9月1日と9月23日以降

の噴出岩塊を比較すると、後者の方が捕獲岩として白色岩を多く含む傾向があった。

暗灰色～赤色石質緻密火山岩塊中の白色岩は引き延ばされたような変形構造を持つものが多く、白色岩が捕獲された時は伸長性のないものであったと仮定すると、変形度にはバリエーションがあり、かなり大きく変形したものも認められる (Fig. 2d)。このような堆積岩の取り込みや顕著な変形構造ができるのは、マグマと周囲の岩石の間で剪断が生じる火道と母岩の境界付近のような場ではないかと推察される。なお、以上の産状からは取り込みと溶融の前後関係について強い制約を与えることはできないが、白色岩の噴出物を占める割合が9月23日以降の火山岩塊の方が噴火初期 (9月1日) より高いことは、マグマの上昇により次第に火道周囲の堆積岩が温め

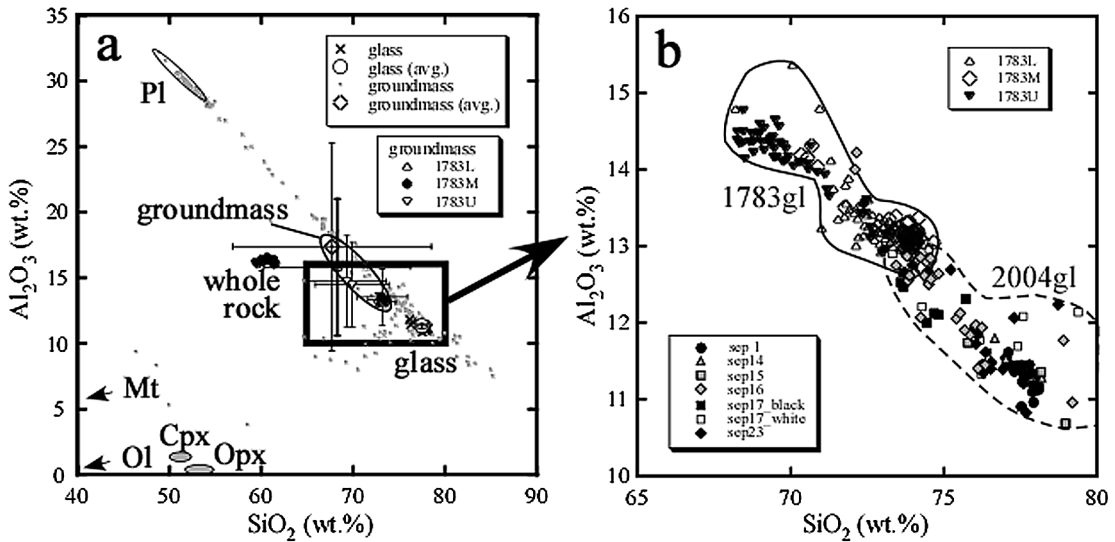


Fig. 6. Glass compositions in comparison with (a) whole rock and groundmass compositions of the products in the 2004 eruption. (b) Glass compositions of the 1783 and the 2004 eruptions.

られて脆くなり、取り込み量が多くなったと解釈することもできる。

無色ガラス質火山灰粒子は、ガラス組成および石基鉱物組み合わせ（特に堇青石を含むこと）が白色岩に一致する。また、これらの無色ガラス質粒子の火山灰全体に占める割合は、白色岩が多量に噴出した9月23日以降の噴火で増加する傾向が認められる。以上のことから、無色ガラス質火山灰粒子は、白色岩と同様に堆積岩を起源とする細粒粒子であると考えられる。

7-5 マグマの脱ガス過程

斑晶リム組成がマグマ上昇直前のマグマ溜まりの平衡条件を反映していると考え、地下のマグマ溜まりにおけるマグマの温度、含水量はそれぞれ、輝石斑晶組成から Frost and Lindsley (1992) により 1,050°C、斜長石斑晶、石基平均組成から Housh and Luhr (1991) により約 3 wt.% であったと考えられる。2004年噴出物の斑晶鉱物組成、平均石基（ガラス+石基鉱物）組成は、それぞれプリニー式噴火をした1783年噴火のものとはほぼ等しいので (Figs. 5, 6)、噴火直前には2004年噴火のマグマも1783年噴火と同様の条件下にあったものと考えられる。なお、含水量は、含水量計の誤差、斜長石、ガラスの組成のばらつきや測定誤差等を考えると ± 1 wt.%程度の誤差を持つものと考えられる。

一方、2004年噴出物は比較的急速に冷却されたと考えられるパン皮状軽石の皮殻部分をふくめ、全ての試料で初期含水量の約3 wt.%に比べて非常に低い含水量（0.5

wt.%未満）であった。このような低含水量はこのメルト組成の場合、圧力数 MPa 未満での平衡溶解度に相当する。特に1783年のプリニー式噴火で噴出した軽石と異なる点は、パン皮状軽石の皮殻部分は発泡度も低いという点であり、マグマは地下浅部まで上昇し噴出するまでに十分脱ガスしていたと考えられる。パン皮状軽石の内部高発泡部分はさらに低含水量であり、このことは地下浅部に上昇して脱ガスしたマグマが急減圧発泡することにより軽石が形成したと考えると上手く説明が可能である。したがって、2004年噴火のブルカノ式噴火において、マグマは地下浅部（圧力数 MPa 程度）に上昇し、その後噴出直前までに非常に効率よく脱ガスし、その後急激に減圧、発泡、噴出したと考えられる。

7-6 マイクロライト結晶化の場合

2004年噴出物の石基結晶度は噴火毎に様々である。そこで石基鉱物組み合わせ、ガラス組成変化に注目し、Blundy and Cashman (2001) がまとめた合成花崗岩系の過去の実験結果と比較し、石基の結晶化した条件を検討してみる (Fig. 9)。図は Blundy and Cashman (2001) の方法で An 成分に関する補正を行って Qz-Ab-Or 面上に投影した上述の実験結果と浅間火山2004年噴出物の石基ガラス組成である（補正後のプロットは Qz'-Ab'-Or' 系で示す）。彼らの補正では Al_2O_3 成分に関する補正はされていないが、2004年噴出物の石基ガラス組成範囲 (CIPW norm Corundum < 2%) ではシリカ鉱物-斜長石共融線の位置は Qz-Ab-Or 系の場合から Qz 頂点側に数

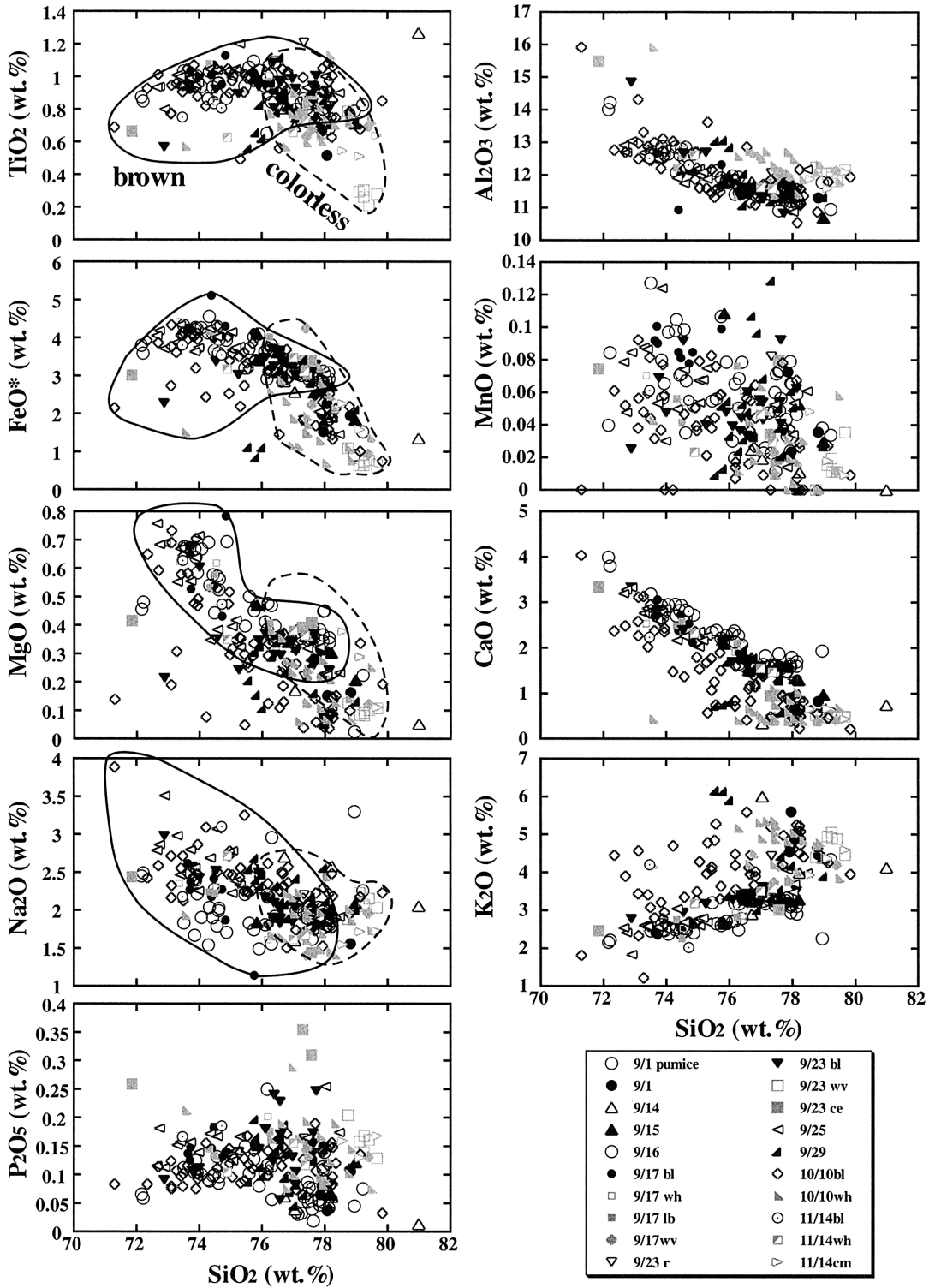


Fig. 7. Comparison of glass compositions among the products in the 2004 eruption.

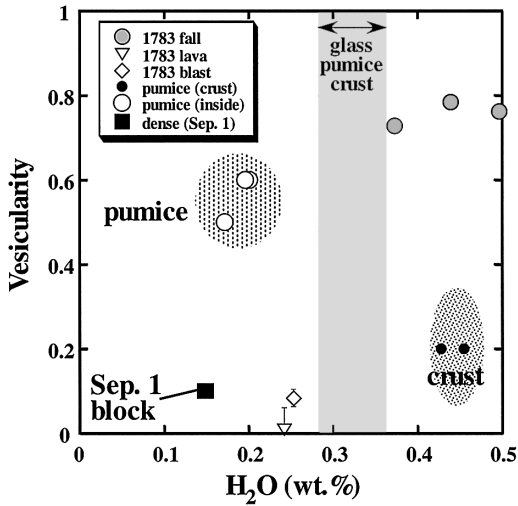


Fig. 8. Residual water content of the products erupted on Sep. 1, 2004, compared to that of the 1783 eruption.

ずれる程度と考えられる (Johannes and Holtz, 1996). また, H_2O が不飽和の場合は, ternary minimum が 10% 程度 Qz - Or join 側にずれるが, シリカ鉱物-アルカリ長石共融線の位置は殆ど変化しないと考えられる (Johannes and Holtz, 1996). 太い実線は出発物質 ($Qz_{16}Ab_{75}Or_9 + 4$ wt.% H_2O ; 初期結晶量 10% (アルカリ長石) が 200 MPa から低下下 (0.1 MPa) まで等温減圧 (890°C) により分別結晶化した場合の計算結果を示している. アルカリ長石晶出に伴って次第に Qz 成分に富むようになり, シリカ鉱物-アルカリ長石の共融線上に到達した時点でシリカ鉱物 (石英, 次いでトリディマイト) を晶出することがわかる. アルカリ長石のかわりに斜長石を晶出しながら減圧する場合でも, 前述の補正計算を行えば, 液の組成は同様の経路を辿ることになる (Blundy and Cashman, 2001).

上記の出発物質は浅間火山 1783 年噴火の降下軽石の石基ガラス組成 ($Qz'_{20}Ab'_{75}Or'_7$) とほぼ等しい組成であり, この軽石は 2004 年噴出物と全岩, 石基平均組成が等しく石基が殆ど結晶化していないという特徴を持つ. また, 2004 年噴出物のガラス組成変化はこの計算結果とよく似た傾向を示しており, 石基ガラス組成が石基鉱物の結晶化によって変化したと考えることができる. また, 噴出物が全て低含水量であること, メルト組成が Oz' - Ab' - Or' 図上でほぼ Qz'_{50} であり, かつシリカ鉱物+斜長石の晶出が同時に起こりうるのが低下下 (数十 MPa 以下) であるという実験結果から考えると, シリカ鉱物

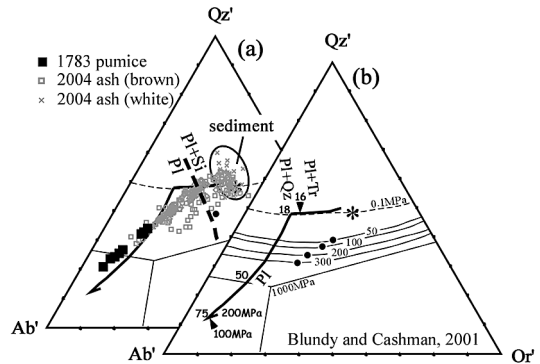


Fig. 9. Qz' - Ab' - Or' ternary plot of glass compositions of (a) the products of the 2004 eruption with (b) experimental results summarized by Blundy and Cashman (2001). Thick line: decompression induced crystallization path at $T = 890^\circ C$ with the initial melt composition of $Qz'_{16}Ab'_{75}Or'_9$ containing 10% alkali-feldspar crystals. The plagioclase crystals dissolve before H_2O saturation resulting in an Ab rich melt. After saturation with H_2O , new plagioclase crystallizes with decompression resulting enrichment of the melt in Qz' . At 18 MPa, quartz crystallizes, and the melt composition moves along quartz-plagioclase cotectic line toward Qz' - Or' join with almost constant Qz' (ca. Qz'_{50}). With further decompression, the melt encounters the quartz-tridymite phase boundary at 16 MPa, then reaches the ternary minimum at 9 MPa. Thin line: quartz-feldspar cotectics at different labeled pressures ($P = P_{H_2O}$). Filled circle: ternary minimum at each pressure, and *: at 0.1 MPa. Appearance of silica minerals in the products of the 2004 eruption are labeled on the thick broken line.

(石英, トリディマイト) を含み, Qz' 成分の高いガラス組成を持つ 2004 年噴火の噴出マグマは地下の比較的浅部において結晶化したと解釈することができる.

7-7 火山灰構成比・石基ガラス組成の時間変化

火山灰粒子の構成比, とくに褐色ガラス質粒子の結晶質粒子に対する量比に着目すると, 火山活動が次第に活発化した 9 月 14-16 日噴火で次第に多くなり, 連続的に噴火を繰り返した 9 月 16-17 日噴火ではこれらが噴出物の大半を占めた. 一方, 数日~数週間の休止期の後に発生したブルカノ式噴火では比較的結晶度の高い火山灰粒子が大部分を占めた (Table 3). このように噴火の活発化と共に褐色ガラス質粒子の構成比が上昇したことは, 噴火の活発化とともに結晶化の進んでいない新鮮なマグマ物

質の関与が増大したことを反映していると考えられる。

また、褐色ガラス質火山灰粒子の石基ガラス組成および石基鉱物組み合わせに注目すると 9 月 1 日、14-15 日で SiO_2 量が高く、石基にシリカ鉱物を含み、9 月 16-17 日では低 SiO_2 量でシリカ鉱物を含まない。9 月 23 日以降は褐色ガラス質火山灰粒子の量はあまり変化しないものの、石基がより結晶化していることを反映して、ガラス組成は SiO_2 量で 75 wt.% を超えるものが多く認められた。さらに、ガラス組成と噴火順序および噴火休止期間の関係に注目する。誤差を考慮すると個々の噴火間の差については比較が出来ないが、測定数の少ない 11 月 14 日（および 9 月 15 日；後述）以外に関しては、ガラス組成は噴火順序 (Fig. 10) よりも噴火休止期間との間により相関関係が認められる (Fig. 11)。ガラス組成はおおむね石基の結晶度を反映しているため、この相関関係は休止期間が長いほど結晶化の進んだマグマが噴出したことを示唆していると考えられる。

さらに全火山灰粒子のガラス組成範囲について噴出順に比較すると (Fig. 12)、活動初期では褐色ガラス質粒子から結晶質粒子への組成変化が示すトレンド上に殆どのデータが乗ること、9 月 23 日以降ではこのトレンドとは異なるガラス組成を持つ粒子が増加していることが分かる。前者は上述の通り全岩組成、平均石基組成のほぼ等しい噴出物について認められるため、白色岩と本質マグマの混合ではなくマグマの結晶化を反映していると考えられる。また、後者については、9 月 23 日以降の噴火で白色岩捕獲岩が顕著に見られることと対比すると、地下でのマグマによる周囲の岩石（類質岩片；白色岩や本質マグマと同一組成でないものも含む）の捕獲が顕著になったことを反映していると考えられる。

なお、9 月 14-15 日の火山灰については、本質マグマの結晶化トレンドとは異なる組成の火山灰粒子が認められた (Fig. 12)。また 9 月 15 日噴火では、休止期間は短かったが褐色ガラス質火山灰粒子が少なく、ガラス組成も上述の相関関係と比較するとかなり分化した値であり、9 月 14 日と似た火山灰であった (Fig. 11)。このような事実、および火口底で溶岩ケーキが最初に確認されたのが 9 月 16 日朝であることから、9 月 14-15 日には 9 月 1 日の結晶化したマグマのほかに、火口周辺の古い溶岩等が放出されたと考えられる。

7-8 2004 年噴火の岩石学的マグマ上昇モデル

以上の結果から、浅間火山 2004 年噴火のマグマ上昇システムは以下のようなものであったと考えられる (Fig. 13)。マグマは地下数 km 以深のマグマ溜まりに蓄積しており、噴火時にはここから上昇を開始した。噴出物が全て低含水率であることから、マグマは地下浅部 (1

km 以浅) に到達するまでに十分に水を析出、ガス分離したと考えられる。また、脱水の結果としてマグマ（石基）の結晶化が進行し、その結果メルトからはき出される（あるいは地下深部から供給される）揮発成分により過剰圧力が蓄積した（結晶化期）。何らかの条件で圧力が急激に解放されブルカノ式噴火に至った（ブルカノ式噴火期）。その後マグマの供給が継続した場合には、しばらく結晶化の進んでいないマグマが連続的に噴出した（溶岩ケーキ出現～ストロンボリ式噴火期）。やがてマグマ供給の休止あるいは火道の閉塞がおこると、火映現象（夜間）のみが認められる状況になった。この間、石基の結晶化が進行し、次のブルカノ式噴火まで続いた（休止期；結晶化期）。このような現象を一サイクルとしてブルカノ式噴火が繰り返されていたと考えられる。とくに、上記の褐色ガラス質火山灰の結晶度と休止期間の相関関係は、各サイクル毎にほとんどマイクロライトを持たないマグマが上昇し、浅部に滞留して噴出するまで結晶化を行ったことを示しており、マグマが地下深部から毎回供給されていたと想像される。

2 回目以降（9 月 23 日以降）のブルカノ式噴火では、本質マグマに伴って発泡あるいは変形した白色岩が大量に認められた。さらに、白色岩や無色火山灰粒子では石基にシリカ鉱物を含むこと、ガラス組成が $\text{Qz}'\text{-Ab}'\text{-Or}$ 系の低圧下での ternary minimum での組成とほぼ一致すること (Fig. 9) は、これらが低圧下での $\text{Qz}'\text{-Ab}'\text{-Or}$ 系に近い主成分組成の岩石の溶融によって生成したことを示している。このような捕獲岩の存在は地下浅部にマグマが滞留し、周囲の岩石を加熱溶融したと考えると説明しやすい。

本論文では、噴出物の岩石学的特徴を基にマグマの上昇過程を議論し、上記のようなモデルを提案した。しかし、モデルの検証、特にマグマの滞留した正確な深度や上昇速度等については、より定量的な議論を行うためには、今後、浅間火山 2004 年噴火と同一組成マグマについて、様々な減圧率および冷却率による結晶化実験等を行って検証する必要がある。また、今回の噴火については地球物理学的観測、火山ガス観測等のデータも出されており、これらとの比較によりマグマ上昇メカニズムおよび結晶化、脱ガスプロセスに関する理解がより深まるであろう。

8. ま と め

浅間火山 2004 年噴火ではブルカノ式噴火が断続的に起こった。また、ブルカノ式噴火の前には溶岩ケーキの出現（又は火映現象）やストロンボリ式噴火が発生したのち、数日～数週間の休止期間が続いた。我々は噴火期間中の調査により、火山灰、火山礫、火山岩塊試料の継

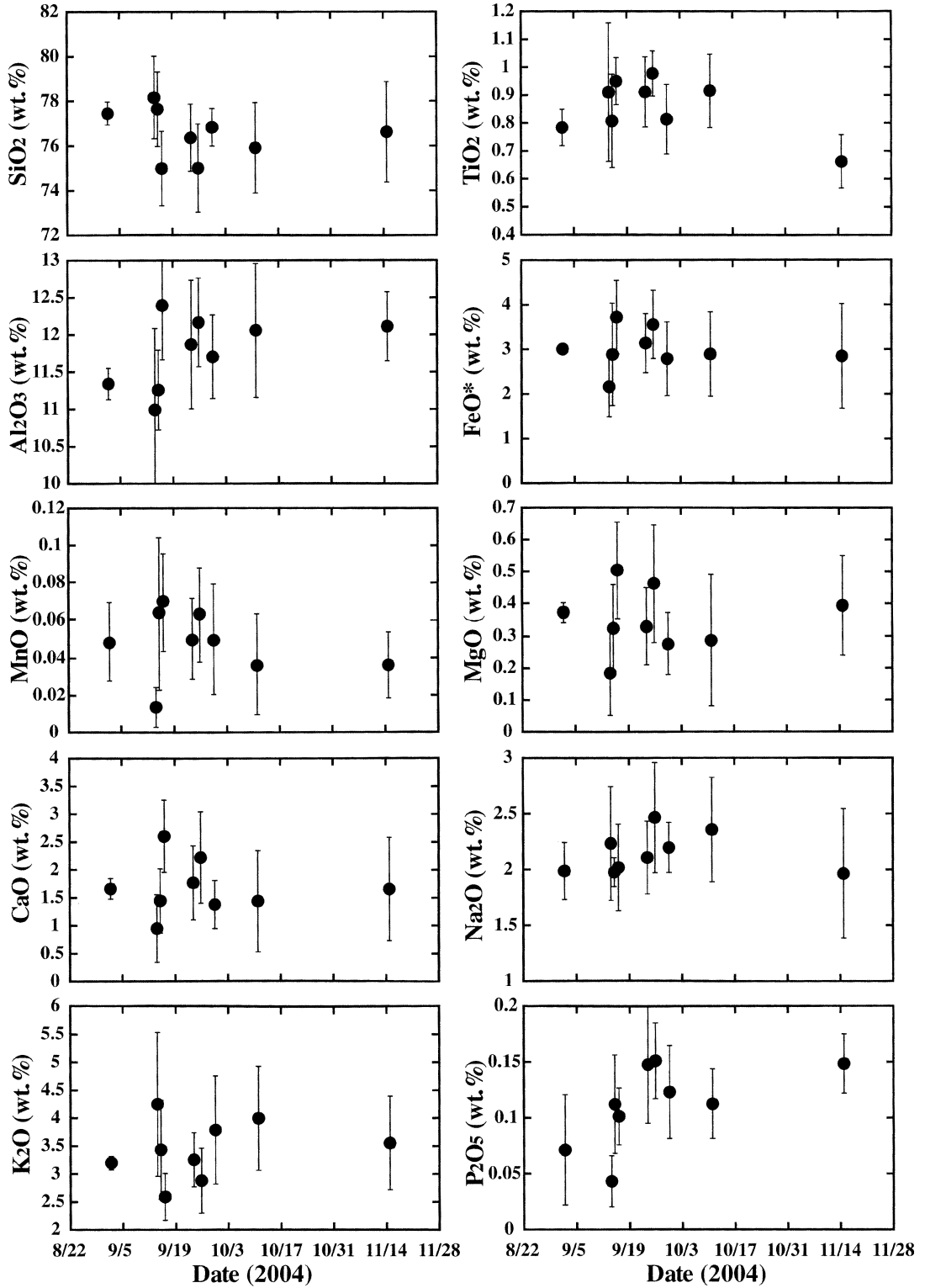


Fig. 10. Temporal change in glass compositions of brown ash particles. Error bars are $\pm 1\sigma$.

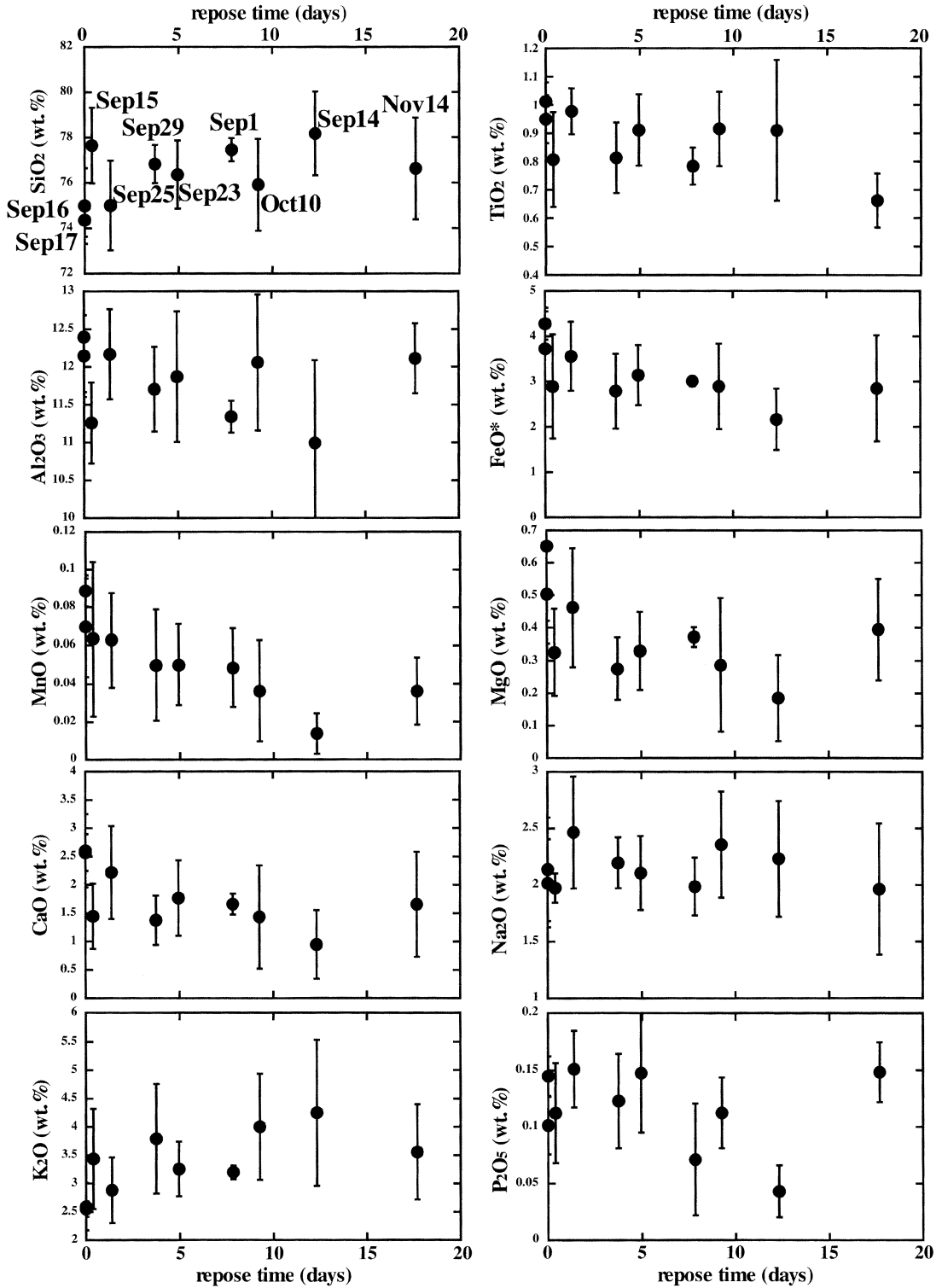


Fig. 11. Relationship between repose intervals of eruptions and glass compositions of brown ash particles. Error bars for compositions are 1σ . Nov. 14 ash may have a much larger error because few data are available for averaging.

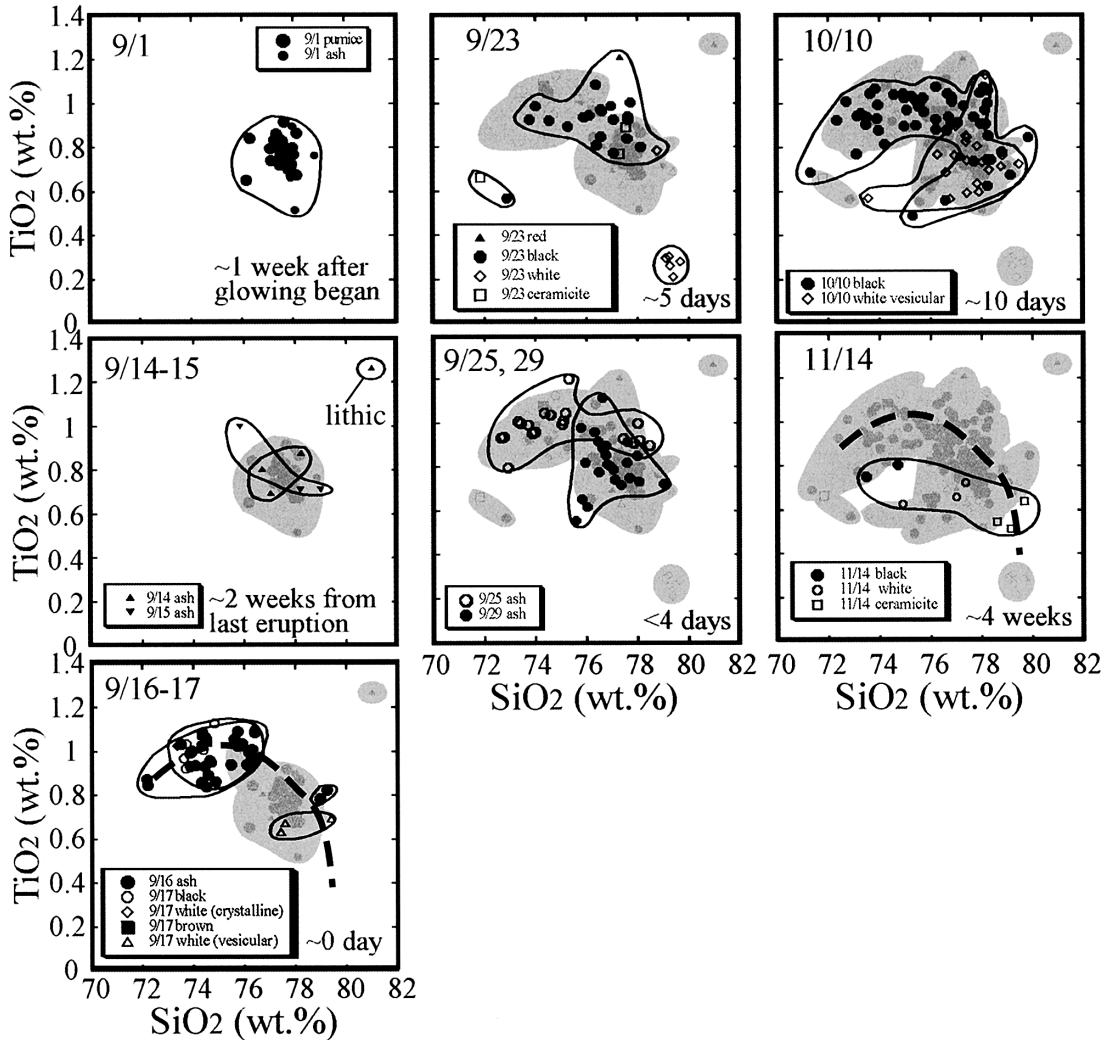


Fig. 12. Temporal change in glass compositions (SiO_2 vs. TiO_2) for all ash particles erupted in 2004. The shaded part shows the compositional range of ash particles before the erupted date of interest. The broken line shows the liquid line of descent.

続採取に成功した。噴出物は含水量が低いこと、石基ガラス組成の変化傾向、この組成が $\text{Qz}'\text{-Ab}'\text{-Or}'$ 図上でほぼ Qz'_{50} で石基鉱物にシリカ鉱物が認められることなどから、マグマが低圧下で結晶化したことが示唆された。また、ガラス組成と噴火の休止間隔とにより相関関係が認められることから、噴火毎に新しいマグマが供給され、休止期間にマグマが低圧下で結晶化を進行させたことが示唆された。一方、本質物質に伴って変形した堆積岩由来の捕獲岩が多数認められた。これらはマグマによる地下浅部での母岩の取り込みによって噴出したと考えられる。

謝 辞

気象庁、産業技術総合研究所、東京工業大学火山流体センター、東京大学地震研究所および同所浅間火山観測所、軽井沢町・嬭恋村周辺の住民をはじめとする多くの方々には、火山灰等の試料および採取地点の提供、野外調査に協力して頂いた。また、本稿を完成するのにあたり、編集担当の小林哲夫氏、査読者の石塚吉浩氏、西村光史氏には非常に有益なご指摘を頂いた。Johns Hopkins 大学の Thomas Wright 氏には英文表現についてご教示して頂いた。以上の方々に深く感謝するとともに、ここに厚くお礼申し上げます。本研究では文部科学省科学研

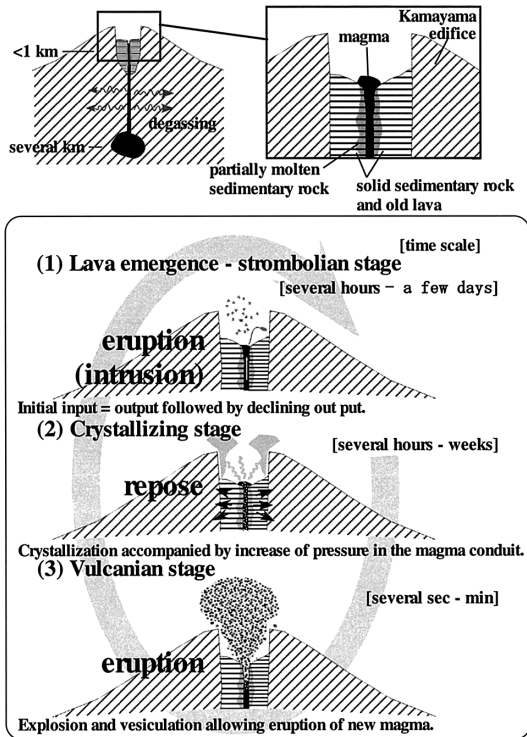


Fig. 13. Model of the 2004 Asama eruption (see text for details).

究費補助金特別研究促進費「2004年浅間山火山の噴火に関する総合的調査」(代表者: 中田節也, 課題番号 1680002)を使用した。

引用文献

- 青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎・及川 純・森田裕一 (2005) 2004-2005年浅間山火山活動に伴う地殻変動. 火山, 50 (印刷中).
- Aramaki, S. (1961) Sillimanite and cordierite from volcanic xenoliths. *Am. Mineral.*, 46, 1154-1165.
- 荒牧重雄 (1993) 1: 50000 浅間山火山地質図. 火山地質図 6, 地質調査所.
- 荒牧重雄・早川由起夫 (1982) 浅間火山 1982年4月26日噴火の降下火山灰 (演旨). 火山, 27, 321-321.
- Blundy, J. and Cashman, K. (2001) Ascent-driven crystallisation of dacite magmas at Mount St. Helens, 1980-1986. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 140, 631-650.
- Couch, S., Sparks, R. S. J. and Carroll, M. R. (2003) The kinetics of degassing-induced crystallization at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *J. Petrol.*, 44, 1477-1502.
- Dobson, P. F., Epstein, S. and Stolper, E. M. (1989) Hydrogen isotope fractionation between coexisting vapor and silicate glasses and melts at low pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 53, 2723-2730.

- Frost, B. R. and Lindsley, D. H. (1992) Equilibria among Fe-Ti oxides, pyroxenes, olivine, and quartz: Part II. Application. *Am. Mineral.*, 77, 1004-1020.
- Hammer, J. E. and Rutherford, M. J. (2002) An experimental study of the kinetics of decompression-induced crystallization in silicic melt. *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JB000281.
- Housh, T. B. and Luhr, J. F. (1991) Plagioclase-melt equilibria in hydrous systems. *Am. Mineral.*, 76, 477-492.
- Johannes, W. and Holtz, F. (1996) *Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks*. Springer, Berlin Heidelberg, 335 p.
- Lindsley, D. H. (1983) Pyroxene thermometry. *Am. Mineral.*, 68, 477-493.
- 宮崎 務 (2003) 浅間火山活動記録の再調査. 地震研究所彙報, 78, 283-463.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦郎・辻 浩・卜部 卓 (2005) 浅間山 2004年噴火と過去の噴火との比較による活動評価. 火山, 50, xxx-xxx.
- 大湊隆雄・武尾 実・及川 純・熊谷博之・山品匡史・小山悦郎・辻 浩・卜部 卓 (2005) 2004年浅間山噴火に伴う爆発地震の解析. 文部科学省科学研究費補助金報告書, 特別研究促進費「2004年浅間山火山の噴火に関する総合的調査」(代表者: 中田節也, 課題番号 1680002).
- 嶋野岳人・小屋口剛博 (2001) 諏訪の瀬島火山 1813年噴火 (文化噴火) の噴火様式とマグマの脱ガス過程. 火山, 46, 53-70.
- 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, 第2部, 地球システム科学, 日本大学文学部自然科学研究所, 38, 65-88.
- 谷健一郎・折橋裕二・中田節也 (2002) ガラスビードを用いた蛍光 X線分析装置による珪酸塩岩石の主・微量成分分析: 3倍・6倍・11倍希釈ガラスビード法の分析精度の評価. 東京大学地震研究所技報, 8, 26-36.
- 寺田暁彦・嶋野岳人・飯島 聖・及川 純 (2005a) 噴煙映像を用いた火山灰噴出量の推定—浅間火山 2003年2月6日噴火の噴煙解析—. 火山, 50, 183-194.
- 寺田暁彦・井田喜明・飯島 聖・吉本充宏・嶋野岳人 (2005b) 浅間火山で頻発した小噴火の噴煙運動の特徴—2004年9月15-18日噴火—. 火山, 50 (印刷中).
- 植木貞人・大久保修平・大島弘光・前川徳光・孫 文科・松本滋夫・小山悦郎 (2005) 浅間火山 2004年9月1日噴火前後の重力変化. 火山, 50, xxx-xxx.
- 山本真紀・武尾 実・大湊隆雄・及川 純・青木陽介・植田寛子・中村 祥・辻 浩・小山悦郎・長田昇・卜部 卓 (2005) 2004年浅間山噴火に先行する特異な長周期地震活動. 火山, 50, xxx-xxx.
- 安井真也・小屋口剛博・荒牧重雄 (1997) 堆積物と古記録から見た浅間火山 1783年のプリニー式噴火. 火山, 42, 281-297.
- 吉本充宏・嶋野岳人・中田節也・小山悦郎・辻 浩・飯田晃子・黒川 将・岡山悠子・野中美雪・金子隆之・星住英夫・石塚吉浩・古川竜太・野上健治・鬼沢

真也・新堀賢志・杉本健・長井雅史(2005) 浅間山
2004年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり. 火
山, **50** (印刷中).

(編集担当 小林哲夫)