

2004年浅間山噴火における地球化学的観測研究

—噴出物の水溶性成分の変動と火山活動—

野上 健治*・鬼澤 真也***・平林 順一*

(2006年11月21日受付, 2008年2月28日受理)

Geochemical Observation on the 2004 Eruption of Asama Volcano
through Analysis of Water-soluble Components on the Ash

Kenji NOGAMI*, Shin'ya ONIZAWA*** and Jun-ichi HIRABAYASHI*

Monitoring of volcanic gases will provide us with important information on volcanic activity and contributes towards reduction of volcanic disasters. However, approach to an erupting volcano considerably involves danger. Analysis of water-leachates of pristine ash is also available for estimating composition of volcanic gases. It is a safe and effective method for monitoring of eruptive activity without having to use a particular equipment.

Asama volcano lies about 150 km northwest of Tokyo and it is one of the most violent volcanoes in Japan. After about 20 years dormancy, the three-months-long eruptive activity commenced on September 1, 2004 with vulcanian explosion. Non-explosive strombolian eruptions with ash emission followed the explosion, and new lava effused at the bottom of the summit crater. After that, vulcanian explosions produced ash fall and bombs at intervals.

We examined change in water-soluble F, Cl and SO₄ contents of volcanic ash in the sequence of the 2004 eruption of Asama volcano. The 2004 eruptive activity was divided into three phases according to the mode of the volcanic activity. The ash in Phase I issued by vulcanian explosions before the effusion of new lava was an aggregate of rock fragments altered under acidic conditions. The contents of water-soluble Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, F, Cl, and SO₄ were noticeably high. This is mainly attributed to fluoride, chloride and sulfate alteration products formed by reaction of rock fragments within the summit crater with HF, HCl and SO₂ in volcanic gases before the 2004 eruption. Although molar ratio of Cl to SO₄ in the ash leachates was not equivalent to HCl/SO₂ of eruptive gases in this phase, increase in the Cl/SO₄ in the ash leachates in the late of this phase suggests that volcanic gases significantly became hot.

In Phase II, new lava effused at the crater bottom and the ash was extremely fresh. The contents of the water-soluble components of the ash in this phase were significantly less than those of the ash in Phase I. The Cl/SO₄ in the ash leachates was equivalent to the HCl/SO₂ ratio in the plume observed by FT-IR. This result indicates that water vapor in plume did not condense into droplets of water. Owing to reaction of the ash particles with volcanic gases at high temperature without condensation of water vapor, the contents of the water-soluble components of the ash were very low. While, the F/Cl values of the ash leachates were significantly higher than that of plume, which was due to selective fixation of HF on the ash particles.

In Phase III, the contents of the water-soluble components of the ash were clearly more than those of the ash in Phase II, which suggests that the lava effused in Phase II was gradually altered by volcanic gases. Although molar ratio of Cl to SO₄ in the ash leachates is probably not equivalent to that of the eruptive gases in this phase, the Cl/SO₄ in the ash leachates mirrored temperature of the hot region at the crater bottom.

Key words: volcanic ash, ash leachate, volatile components

* 〒377-1711 群馬県吾妻郡草津町草津 641-36
東京工業大学火山流体研究センター草津白根火山観測所
Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, Kusatsu 641-36, Agatsuma, Gunma, 377-1711, Japan.

*** 現在: 〒305-8567 つくば市東 1-1-1

産業技術総合研究所地質情報研究部門
Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567, Japan.

Corresponding author: Kenji Nogami
e-mail: knogami@ksvo.titech.ac.jp

1. はじめに

我が国における火山観測は1888年の関谷清景による磐梯山での地震活動の観測をもって嚆矢とし、爾來地震活動を中心に、地盤変動、電磁気変動、放熱量など、様々な観測が行われている。火山活動は物質の急速な移動を伴う現象であり、火山ガスはマグマから放出される物質の中で最も速く地表に達することから、火山活動について多くの情報がそれらの化学組成や温度、放出量等の観測から逸早く得られる。火山ガスは、 H_2O と CO_2 、 H_2S 、 SO_2 、 HCl 、 HF などの所謂酸性ガス成分、 He 、 H_2 、 Ar 、 N_2 などのアルカリ溶液に不溶な成分からなる。Iwasaki *et al.* (1966) は、本邦各地の火山ガスの分析結果に基づいて、火山ガス組成、特に酸性ガス組成を噴気孔温度によって分類している。それによると、噴気温度が 100°C 程度の場合、酸性ガスの主成分は CO_2 、 H_2S であるが、温度が上昇するにつれて SO_2 、 HCl 、 HF が含まれるようになり、これらの割合が高くなる。

地形的制約によって噴気地帯へ接近できない火山や噴火中の火山では、火山ガスを直接採取できないため、分光学的手法を用いた火山ガスの遠隔測定が行われている。近年、フーリエ変換型赤外分光放射計 (FT-IR) によって複数の火山ガス成分を同時に測定できるようになり (例えば、Love *et al.*, 1998; Mori *et al.*, 1993; Mori and Notsu, 1997; 森・野津, 2005; 小野・他, 1997)、火山ガス組成の変動が捉えられるようになった。遠隔測定は観測結果が即時に得られ、短期の化学組成変動を捉えることも可能であるが、何よりも火山観測に内在する様々な危険を軽減できる。これらは火山ガスを噴気孔から直接採取する従来法よりも優越している点であり、FT-IR による火山ガス観測は火山活動のモニタリングの一翼を担うものと大いに期待される。

噴火に伴って放出される火山灰に火山ガス起源の水溶性 F 、 Cl 、 SO_4 が含まれていることは古くから知られている (例えば、朝比奈・三宅, 1935)。1955年10月以来マグマ噴火を続けている桜島では、降灰の水溶性成分が長期間にわたって分析されている (例えば、平林, 1982; 鎌田, 1957, 1980; 坂元, 1994)。火山ガス/火山灰比、ガス濃度、火山灰の粒径、表面積、反応時の温度等によって水溶性成分量は変動するが、水溶性成分の Cl/SO_4 はほぼ同時期に大気中に拡散していた噴煙の HCl/SO_2 の平均値とよく一致していることが小坂・小沢 (1975) によって明らかにされた。更に、爆発回数の多い時期には水溶性成分の Cl/SO_4 は大きく、逆に爆発回数の少ないときにはこの値は小さく、水溶性成分の Cl/SO_4 は爆発回数と調和的に変動していることが Hirabayashi *et al.* (1982) によって示された。これに対して、水蒸気爆発に伴う噴

出物は既存の山体構成物であり、噴出前に火口内部で生成していた水溶性火山昇華物が噴出物中に含まれる場合もある。例えば、十勝岳 1988-1989年噴火は1988年12月16日に水蒸気爆発で始まり、その後ブルカノ式マグマ水蒸気爆発へと移行し、爆発は1989年3月5日まで間欠的に続いた (Katsui *et al.*, 1990)。この一連の噴火に伴う降灰は多量の水溶性成分を含んでいた (小坂・他, 1998)。噴出物の大部分は火口内の岩石が火山ガスによって変質作用を受けたものであり (Ikeda *et al.*, 1990)、降灰の水溶性成分には酸性変質過程で生成した水溶性火山昇華物に由来するものが相当量含まれていたと考えられている (小坂・他, 1998)。従って、水溶性成分の Cl/SO_4 は必ずしも噴火時の火山ガスの HCl/SO_2 と一致しないが、噴出物量で表された噴火スケール (Katsui *et al.*, 1990) と調和的に変動し (小坂・他, 1998)、マグマ噴火の最盛期に最大値を示した。また、北海道駒ヶ岳は1996年に56年振りに噴火し、その後1998年と2000年に小規模な噴火が発生したが、いずれも水蒸気爆発であった (中川・他, 2001)。この間に降灰の水溶性 SO_4 量は大きく変化しなかったが、水溶性 Cl 量は増大した。特に、2000年に発生した4回の噴火のうち、水溶性成分の Cl/SO_4 が高かった噴火では、1998年までの降灰には認められなかった、より深部の基盤を構成する岩体も放出されていた。これは、2000年になって火道が深所まで発達し、マグマ由来の高温ガスの影響が増大したと考えられている (中川・他, 2001)。これらの結果は、降灰の水溶性成分の Cl/S 比は火山ガス組成の変化を捉え、火山活動のモニタリングに有効な指標であることを示している。

群馬県と長野県に跨がる浅間山は古より非常に活動的な火山として知られている。1911年には日本で初めての火山観測所が湯の平に設置され、文部省震災豫防調査会と長野県立長野測候所によって火山観測業務が始まった (山里, 2005)。1933年には東京帝国大学地震研究所附属施設として火山観測所が東麓の峰の茶屋に設立され、爾來我が国における科学的火山研究観測拠点の一つとなっている。

宮崎 (2003) によると、浅間山は20世紀前半、特に1930年代から40年代は非常に活動が活発で、連日の様に噴火していた。その後、1954~1955年、1958年、1961年に大噴火があったが、1950年代から60年代の活動状況は概して静穏であった。1973年に水上 (1935) による分類でB以上のマグマ噴火が、1982年、1983年及び1990年には小規模な爆発があったものの、1970年代~90年代も火山活動は静穏な状態にあった。

2000年9月以降、地震活動はやや活発な状態で推移していた。2002年6月から9月には一時的に月1400回を

を超える地震が発生し、2003年2月から4月には4回の微噴火が発生した。2003年7月から10月にも月1600回を超える地震が発生している(気象庁, 2003c)。火口底の噴気孔周辺では温度の高い状態が2002年6月から続き、2003年5月には火口底最深部に642°Cに達する赤熱状態の新たな噴気孔が確認されている(気象庁, 2003a, c)が、同年10月の観測では300°Cまで低下していた(気象庁, 2003b)。SO₂放出量は1983年の噴火以降1995年頃までは日量100~200トンで推移し、2002年から2003年の活動期には日量400~1000トンに増加したが、その後は再び元のレベルに低下している(平林・他, 2004)。

2004年1月以降、火口底の高温領域の面積は徐々に減少していたが、4月には火口内の最高温度は420°Cに上昇していた(気象庁, 2004a, b, c, d)。噴煙活動が活発になった7月下旬には火口底の高温領域が一時的に拡大し、火口底の最高温度は524°Cに上昇した。7月25日午後9時26分頃に火口の南約8kmの気象庁軽井沢測候所に設置されている高感度カメラで30秒程度の火映が捉えられている。火映が観測されたのは2002年9月以来である(気象庁, 2004e)。また、7月末にはGPS連続観測点間の距離の伸びが観測され、マグマの貫入が起ったと解釈されている(青木・他, 2005)。翌8月にも火口底の高温領域が一時的に拡大する現象が観測され、火口底の最高温度は570°Cまで上昇し、高感度カメラで微弱ながら火映が時々捉えられていた(気象庁, 2004f)。

この様に火山活動がやや活発な状態にある中、2004年9月1日午後8時2分に爆発的噴火が発生し、その後約3ヶ月間にわたって降灰や噴石を伴う中規模~ごく小規模な噴火が繰り返された。本小論では、継続的に採取した降灰の水溶性成分の変動と火山活動との関連について報告する。

2. 2004年噴火活動と観測の概要

2004年9月1日午後8時2分に発生した中規模なブルカノ式噴火に伴う爆発音は、浅間山火口の北北東約25kmの群馬県草津町にある、東京工業大学草津白根火山観測所でも明瞭に聞こえた。爆発直後から山体が一望できる群馬県道59号草津嬬恋線の草津町前口や嬬恋村今井から目視観測を試みたが、噴煙の高さや方向、降灰状況などは把握できなかった。その後、浅間山東部から北東部にかけて降灰調査を行い、火口の北東約9kmの長野原町北軽井沢周辺で降灰を採取した。浅間山博物館駐車場や国道146号峰の茶屋から長野・群馬県境付近にかけて路上に直径数cmの火山礫が多数降下していた。吉本・他(2005)によれば、火山礫の最大長径は火口から4km付近で約10cmだった。浅間山で山腹以遠まで

噴石を飛ばすような規模の噴火は1983年4月8日以来である(気象庁, 2004g)。引き続き浅間山北東麓から火口の北東約40kmの高山村役場の間で降灰調査を行い、高山村役場前及びJR中之条駅前で降灰を採取した。また、北東約30kmの吾妻町(現東吾妻町)内2カ所で採取された降灰を吾妻警察署より提供して頂いた。噴火発生から4時間半後の2日午前0時半頃から群馬県北西部にはまとまった降雨があり、この時点で噴火直後の降灰調査と採取を終了した。その後、9月14日まで噴火は発生しなかったが、SO₂放出量は次第に増加し、9月3日には日量1020~1350トン、9月8日には日量2200~2600トンに達した。これは1973年や1982-1983年の活動期のSO₂放出量(日量約1000トン)を凌駕する(平林・他, 2004)。

9月15日の昼前からは小規模な噴火を繰り返すようになり(吉本・他, 2005)、噴火様式が大きく変化した。16日未明からは小規模な噴火がほぼ連続的に発生し、同日行われた航空機搭載型合成開口レーダー観測によってパンケーキ状の地形が火口底北東に新たにできていることが確認されている(大木・他, 2005)。また、同夜から17日の未明にかけてはストロンボリ式噴火によって赤熱した岩塊が放出されるのが望見され、連続的な小規模噴火は17日の夕方まで続いた。その後も小規模噴火が頻発する状況は18日夜まで続いた(気象庁, 2004g)。この一連の噴火活動で主として火口の南東-東南東方向に大量の降灰があり、軽井沢町内でこれを採取した。

9月18日夜以降は噴煙活動のみが継続していたが、9月23日と29日に中規模な、10月10日には小規模なブルカノ式噴火が発生した(気象庁, 2004g, h)。これらの噴火では草津町や長野原町、嬬恋村など火口の北東~北北東で降灰があったが、いずれも雨天だった。10月19日と28日にもごく小規模なブルカノ式噴火に伴う少量の降灰が南麓の御代田町や軽井沢町で観測され(気象庁, 2004h)、28日の降灰を軽井沢町内で採取した。その後、再び噴煙活動のみが続いていたが、11月14日20時59分に9月29日以来の中規模なブルカノ式噴火が発生した(気象庁, 2004i)。吉本・他(2005)によると、火山礫の最大長径は火口から約4.3kmで7.5cmだった。遠地での降灰量測定も兼ねて、火口の東約45kmの渋川市から前橋市にかけて降灰調査を行い、渋川市内ならびに吉岡町内で降灰を採取した。この噴火によって火口の東~東北東方向に降灰があったが、火口からの距離が25km以遠でも降灰量はあまり減衰しなかったことが明らかになっている(吉本・他, 2005)。この噴火後SO₂放出量は日量2000~2900トンと非常に多い状態が継続していた(気象庁, 2004i)。12月9日にごく小規模な噴火が発

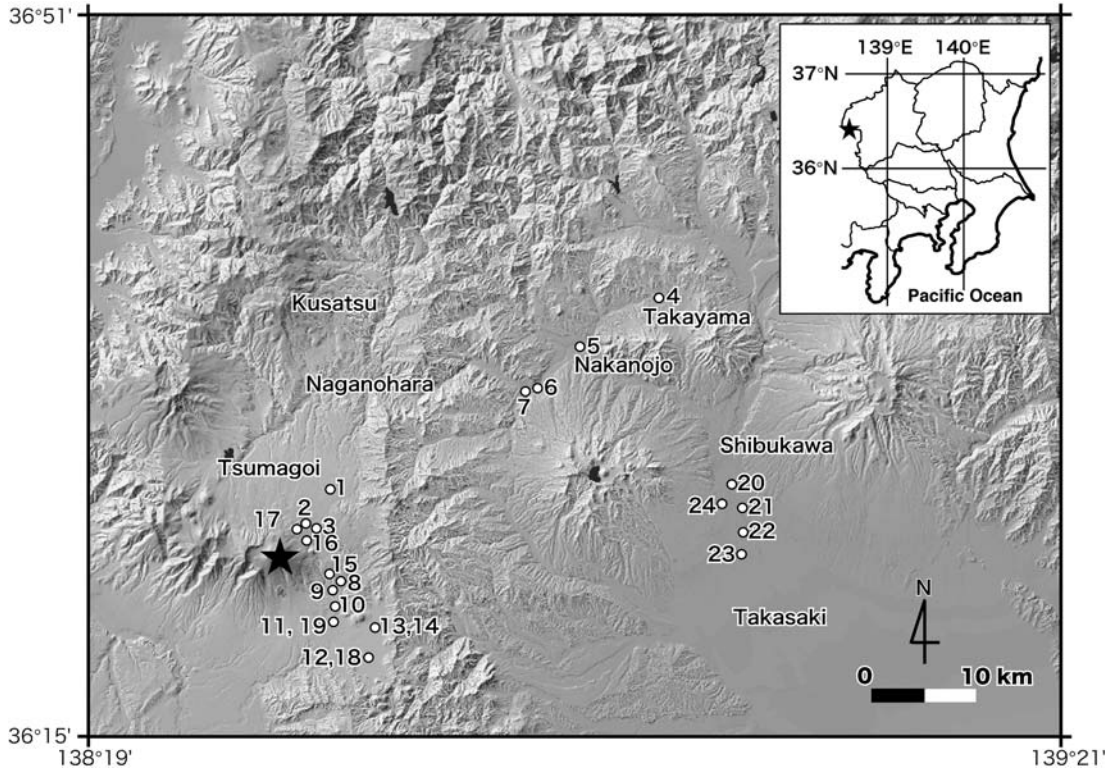


Fig. 1. Map showing spatial distribution of the ash sampling sites (○) in this study. Star (★) indicates the location of the summit crater of Asama volcano. Numbers beside the sampling sites correspond to the samples listed in Table 1.

生 (気象庁, 2004j) したが、これ以降は噴煙活動が継続するだけで、現在 (2008 年 1 月末) に至るまで新たな噴火は発生していない。

いずれの火山灰試料についても、土砂等の混入がないように、通行量の多い道路から離れた地点の植物の葉や駐車中の車両、郵便ポストの上などから採取した。試料の採取地点を Fig. 1 に示す。

3. 火山灰試料の分析

分析にはすべて特級試薬を用い、水は逆浸透—イオン交換水を更にイオン交換高純度精製装置 (本研究では Barnstead NANOpure II を使用) により精製したものをを用いた。100 ml ガラスビーカーに火山灰試料を秤量し、これに精製水を加えた後、約 80°C に保ったホットプレート上で一昼夜加温する。空冷後、これをメスフラスコに 5C 濾紙で濾過し、精製水で定容にしたものを分析した。

抽出液中の Na, K は原子吸光法、Ca, Mg, Fe, Al は ICP 発光分析法、Cl, SO₄ はイオンクロマトグラフ、F は Tsuchiya *et al.* (1985) によるトリメチルシリル化蒸留—

イオン選択性電極法によって定量した。分析に供した火山灰量と各成分の濃度から火山灰 1 kg あたりの水溶性成分量を求めた (Table 1)。

火山灰試料のうち、比較的多量に採取できたものについては主要成分を蛍光 X 線分析装置で定量した。また、強熱減量 (LOI) は重量法で求めたが、FeO の Fe₂O₃ への酸化に伴う重量増加については補正していない。分析結果を Table 2 に示す。

4. 噴火活動と水溶性成分の変動

2004 年の噴火活動を様式とその変化に基づいて次の 3 つの Phase に分けた。Phase I : 噴火開始から連続噴煙を伴う小規模噴火が始まるまで (9 月 1 日~14 日)、Phase II : 連続噴煙を伴う小規模噴火が継続している間 (9 月 15 日~18 日)、Phase III : Phase II 以降 (9 月 19 日~)。

4-1 Phase I の噴火活動と水溶性成分

9 月 1 日と 14 日の降灰は主に暗灰色の緻密な結晶質粒子、変質粒子、斜長石や輝石などの遊離した結晶で構成されていた (吉本・他, 2005)。この Phase の降灰は他

Table 1. Contents of water-soluble components of the volcanic ash issued by the 2004 eruption of Asama volcano.

Phase	Sample	Date	Location	Na*	K*	Ca*	Mg*	Fe*	Al*	F*	Cl*	SO4*	F/Cl**	Cl/SO4**
	1	Sep. 1	Kurinoki Plaza, Kita Karuizawa	963	230	12600	310	246	631	270	2610	34600	0.19	0.20
	2	Sep. 1	Pension Morino-Kumasan, Kambara	1020	236	11800	351	341	665	300	2590	33000	0.22	0.21
	3	Sep. 1	Asama Highland Park, Kambara	812	74.7	12000	303	208	471	283	2010	33300	0.26	0.16
	4	Sep. 1	Takayama Village Office, Takayama	845	330	8210	226	117	535	n.d.	1400	23100	-----	0.16
I	5	Sep. 1	JR Nakanole Station, Nakanole	1110	245	13000	316	273	1040	336	1270	39300	0.49	0.09
	6	Sep. 1	Gohbara intersection, Agatsuma	1300	286	14600	350	213	910	305	1970	41600	0.29	0.13
	7	Sep. 1	Aisuta intersection, Agatsuma	1210	307	13600	309	249	1160	351	1390	41900	0.47	0.09
	8	Sep. 14	Hotel Soyokaze, Sengataki, Karuizawa	2390	851	12600	377	193	745	n.d.	5420	37100	-----	0.40
	9	Sep. 14	Seibu Kogen Bus, Sengataki, Karuizawa	2260	822	14100	370	115	933	704	5990	39300	0.22	0.41
	10	Sep. 16	Hoshino Spa, Nagakura, Karuizawa	270	94.6	430	33.1	b.d.	4.73	61.2	90.8	1370	1.25	0.18
	11	Sep. 16	Shinano Rv Naka-Karuizawa Station	332	123	859	23.7	b.d.	23.7	109	93.1	2990	2.18	0.08
	12	Sep. 16	Karuizawa 72-Golf Course Club House	335	103	740	26.8	b.d.	31.2	103	96.3	2300	2.00	0.11
II	13	Sep. 16	JR Karuizawa Station	297	74.4	186	4.65	b.d.	b.d.	203	233	618	1.63	1.02
	14	Sep. 16	JR Karuizawa Station Parking Area	300	75.1	192	9.38	b.d.	113	256	207	576	2.31	0.97
	15	Sep. 17	Manzanbo, Karuizawa	373	68.8	314	14.7	b.d.	187	203	996	558	0.38	4.84
	16	Sep. 18	Kuromegawara Parking Area	133	35.2	79.7	2.07	b.d.	37.3	133	72.3	204	3.87	0.96
	17	Sep. 18	Asama Volcano Museum, Kita Karuizawa	168	50.9	211	12.7	b.d.	61.1	n.d.	253	647	-----	1.06
	18	Oct. 28	Karuizawa 72-Golf Course Club House	1050	413	4740	213	142	b.d.	n.d.	597	14100	-----	0.12
	19	Oct. 28	Shinano Rv Naka-Karuizawa Station	1050	342	4200	216	b.d.	669	n.d.	431	14300	-----	0.08
III	20	Nov. 14	7-11 Shibukawa-Yagihara, Shibukawa	545	146	5920	42.3	b.d.	202	498	2320	13200	0.40	0.48
	21	Nov. 14	Mega Mart Yoshioka, Ohkubo, Yoshioka	488	123	3590	69.0	b.d.	88.8	n.d.	1400	8390	-----	0.45
	22	Nov. 14	Ohmatsu intersection, Yoshioka	422	109	2190	40.9	b.d.	77.2	163	834	5470	0.36	0.41
	23	Nov. 14	7-11 Yoshioka-Bypass, Ohkubo, Yoshioka	288	52.1	650	33.7	b.d.	36.8	102	239	2090	0.21	0.31
	24	Nov. 14	Yoshioka Town Office, Yoshioka	487	145	3970	39.3	b.d.	118	235	1420	9780	0.31	0.39

*: in mg / 1 kg of ash **; in atomic ratio b.d.: below detection limit n.d.: not determined

Table 2. Chemical composition of the ash issued by the 2004 eruption of Asama volcano.

Phase	I	I	I	II	II	III	III	III	III
Major Elements (wt.%)	1	2	3	11	13	20	22	23	24
SiO ₂	60.63	59.47	60.64	61.39	62.20	60.56	60.19	60.20	59.88
TiO ₂	0.69	0.69	0.69	0.73	0.75	0.69	0.70	0.71	0.65
Al ₂ O ₃	13.64	13.41	13.57	15.89	15.91	16.45	15.26	15.01	15.52
Fe ₂ O ₃ *	4.81	4.78	4.94	6.93	6.46	6.22	7.45	7.81	6.70
MnO	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10	0.08	0.11	0.12	0.10
MgO	2.19	2.11	2.25	3.68	3.00	2.81	4.10	4.52	3.29
CaO	5.94	6.09	5.99	6.34	5.90	6.92	6.48	6.49	6.64
Na ₂ O	2.28	2.28	2.32	3.02	3.18	3.09	2.92	2.89	2.99
K ₂ O	1.17	1.18	1.18	1.30	1.47	1.33	1.28	1.24	1.32
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
Total	91.53	90.18	91.76	99.50	99.08	98.28	98.62	99.11	97.24
sol** F (mg/kg)	270	300	283	109	203	498	163	102	235
sol** Cl (mg/kg)	2610	2590	2010	93.1	233	2320	834	239	1420
sol** SO ₄ (mg/kg)	34600	33000	33300	2980	618	13200	5470	2090	9780
LOI*** (wt.%)	n.d.	12.70	n.d.	n.d.	0.14	0.93	n.d.	n.d.	0.79

Fe₂O₃*: total iron as Fe₂O₃

sol***: water-soluble

LOI***: a percentage of the weight loss on ignition without correction for oxidation of FeO to Fe₂O₃

の Phase の降灰よりも水溶性成分を多量に含んでいる (Table 1; Fig. 2)。また、LOI の割合は格段に高く (Table 2)、変質が著しく進んでいることを示している。これらは、放出前に酸性条件下で変質を受けていた浅間山 1973 年噴火の初期の降灰 (小坂・他, 1973) や、1982–1983 年噴火の降灰 (小坂・平林, 1983)、十勝岳 1988–1989 年噴火の降灰 (小坂・他, 1998) の化学的特徴と酷似している。浅間山では 1973 年以降マグマ物質が出現したことが明確な噴火はなく (中田・他, 2005)、1983 年の噴火から今回の噴火までの約 20 年間にはごく小規模な噴火は数回あったものの、火山活動は山頂火口から噴煙が出続けているだけの比較的静穏な状態が続いていた。9 月 1 日の噴火で本質物質と判断できるパン皮状軽石が放出されている (三宅・他, 2005; 嶋野・他, 2005) もの、この Phase の降灰の殆どは、火口内や火道を埋めていた過去の活動の噴出物が噴火開始前の静穏期に火山ガスによって酸性変質作用を受けたものであると考えられる。従って、降灰に含まれていた多量の水溶性成分はその相当量が酸性変質に伴って生成した水溶性火山昇華物に由来すると推察される。また、この降灰は水溶性 F、Cl を多量に含んでいることから、HF、HCl を含んだ高温の火山ガスが噴火前から放出されていたことを示しており、噴火前に火口内で高温噴気が観測されていたことと整合的である。

9 月 14 日の降灰は 9 月 1 日の降灰よりも多く水溶性成分を含み、特に水溶性 F、Cl 量の増加が顕著である (Table 1; Fig. 2)。F/Cl の変化は顕著ではないが、Cl/

SO₄ は明らかに高くなっている。この結果は、9 月 1 日の噴火以降に火山ガス中の HF/SO₂、HCl/SO₂ が上昇したことを示しており、HF、HCl は高温の火山ガスに特徴的な成分であることから、脱ガス温度が上昇したことを示唆する。9 月 1 日以降の SO₂ 放出量の急激な増加と併せて、これらは火山活動の活発化の兆候だったとみられる。

4-2 Phase II の噴火活動と水溶性成分

9 月 15 日～18 日の降灰は新鮮なガラス光沢を持ち、主に比較的良好に発泡したガラス質粒子と新鮮なガラスの付着した遊離結晶からなるが、17 日の夕方以降、ガラス質粒子は減少した。16 日には火口内に溶岩の噴出が確認されており、これらの降灰は新たに上昇したマグマに由来する本質物質であると判断できる (吉本・他, 2005)。この Phase の降灰に含まれる水溶性成分は Phase I の降灰に比べて明らかに少ない (Table 1; Fig. 2)。1973 年噴火の際も降灰が新鮮なものばかりになると水溶性成分は著しく減少した (小坂・平林, 1983)。また、LOI の割合も非常に低く、未変質であることを示している (Table 2)。

吉田 (1975) は 150～850℃ の範囲で火山ガスと岩石粉末を反応させる実験を行い、600℃ 以上では水溶性 F、Cl 量は僅かしか生成しないが、温度が低くなるにつれてこれらは増加することを明らかにした。特に、200℃ 以下で起る水溶性 Cl の著しい増加は、火山ガス中の水蒸気の凝縮による液体の水が関与している可能性を示した。噴煙中で水蒸気が凝縮すると、SO₂ に比べて水相への溶解度が格段に高い HCl が水滴に選択的に溶解するため、噴煙の HCl/SO₂ は低くなる (Burton *et al.*, 2001) が、降

灰の水溶性成分量は増加し、 Cl/SO_4 は高くなると考えられる。9月16日午後にはFT-IRによる観測で得られた噴煙の HCl/SO_2 は0.2程度(森・野津, 2005)であり、このPhaseの初期の連続噴煙に伴う降灰(#10, #11, #12)の水溶性成分の Cl/SO_4 (0.1~0.2)の値とほぼ一致している。この結果から、このPhaseでは噴煙中で火山ガス中の水蒸気は凝縮しなかったと判断できる。従って、火山灰粒子と火山ガスの反応は液体の水が関与しない比較的高温で起こったと考えられ、このために降灰の水溶性成分量が少なかったと推察される。

また、9月16日午後の噴煙の HF/HCl は0.03程度だった(森・野津, 2005)が、水溶性成分の F/Cl の値はこれよりも数十倍高かった(Table 1; Fig. 2)。吉田・他(1968)および吉田(1975)は HF 、 HCl を含む高温の噴気ガスと火山岩との反応実験から、 F は Cl よりも岩石に強く固定される傾向のあることを明らかにしており、これらの結果は、 HF 、 HCl を含む高温の噴煙が火山灰粒子と反応した場合、 HF は HCl に比べて火山灰へ吸着されやすいことを示している。従って噴煙の F/Cl よりも水溶性成分の F/Cl が大きいの、森・野津(2005)も指摘しているように、噴煙中の HF が火山灰に選択的に吸着したことによると考えられる。

Phase IIの末期の降灰(#13, #14, #15, #16, #17)は初期の連続噴煙に伴う降灰(#10, #11, #12)に比べて水溶性 SO_4 は減少し、 F 、 Cl が著しく増加している(Table 1; Fig. 2)。この結果は、降灰と反応した火山ガスの HF/SO_2 、 HCl/SO_2 が上昇したことを示していると考えられ、Phase II末期には脱ガス温度は非常に高かったことを示唆する。これは同時期にストロンボリ式噴火が発生していたことと整合的である。

4-3 Phase IIIの噴火活動と水溶性成分

9月23日以降の降灰は主に暗灰色の緻密な結晶質粒子と遊離結晶で構成され、少量のガラス質粒子を含む。火口内の観察結果等から、このPhaseの降灰は今回噴出した溶岩の破片であると判断でき、本質物質である褐色ガラス質粒子の割合もこれ以降噴火毎に減少している(吉本・他, 2005)。10月28日の降灰はPhase IIの降灰に比べて水溶性 SO_4 、水溶性金属イオン成分を多く含んでおり(Table 1; Fig. 2)、火口内の新しい溶岩等が火山ガスによって徐々に変質し始めていることを示している。2004年10月1日に行われたFT-IRによる観測(森・野津, 2005)では噴煙の HCl/SO_2 は0.17で、9月16日よりも低下していたが、その差は僅かである。ところが、10月28日の降灰の水溶性成分の Cl/SO_4 はPhase IIに比べて著しく低下していた(Table 1; Fig. 2)。この結果は、火山ガスの HCl/SO_2 が10月初旬以降に著しく低下

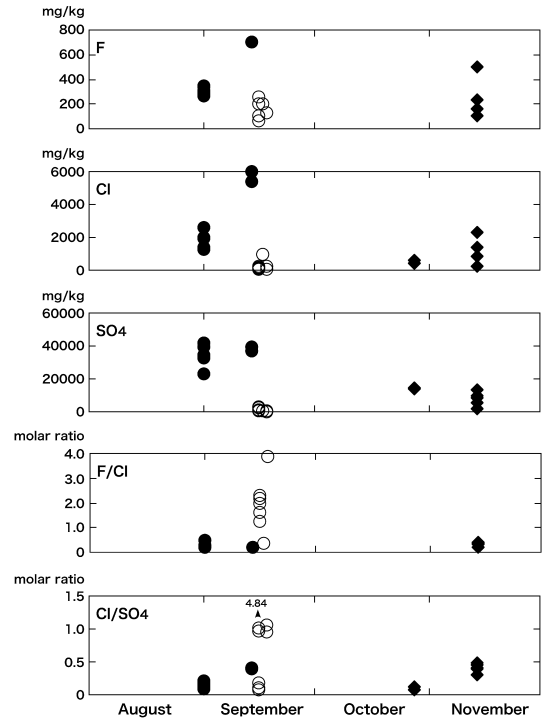


Fig. 2. Temporal change in contents of water-soluble anions and F/Cl and Cl/SO_4 molar ratios. Solid circles, open circles and solid diamonds indicate the ash samples collected in Phase I, Phase II and Phase III, respectively.

しなければ説明できず、脱ガス温度の低下を示唆する。火口内の最高温度は2004年10月1日の測定では 517°C だったが、10月28日の測定では 375°C まで低下しており(気象庁, 2004i)、水溶性成分の変化から推察される火山ガス温度の変化は温度観測の結果と一致していた。

最後の中規模噴火となった11月14日の降灰は、Phase IIの降灰に比べて化学組成は著しく変化していないが、 LOI は僅かではあるが増加している(Table 2)。また、10月28日の降灰と同程度の水溶性成分を含んでいる(Table 1; Fig. 2)ことから、これらの結果は、火口内の溶岩等の変質が着実に進んでいることを示している。この時期の降灰の水溶性成分の Cl/SO_4 は0.31~0.41で、10月28日の降灰に比べて大幅に上昇しており(Table 1; Fig. 2)、10月28日以降に火山ガスの HCl/SO_2 が著しく増加したことを示していると考えられ、脱ガス温度の急激な上昇を示唆するものである。火口内の最高温度はこの噴火の直後の2004年11月17日の測定では 464°C に上昇し、水溶性成分の変化から推察される火山ガス温度の変化は温度観測の結果と一致していた。その1週間後の24日

の測定では最高温度は 571°C 以上に達した (気象庁, 2004i).

5. ま と め

浅間山 2004 年噴火活動は 2004 年 9 月 1 日に発生した中規模な爆発的噴火に始まり, 連続的な火山灰放出を伴う小規模噴火を繰り返した後, ストロンボリ式噴火によって赤熱した岩塊を放出した. この噴火は 1973 年以來のマグマ噴火だった. その後, 中規模〜ごく小規模なブルカノ式噴火が繰り返され, 12 月 9 日の小規模噴火を最後に噴火活動は小康状態となり, その後は再び噴煙活動のみが継続している.

2004 年の噴火活動を, 様式とその変化に基づいて, 次の 3 つの Phase に分けた. 9 月 1 日の噴火開始から連続噴煙を伴う小規模噴火が始まるまでの Phase I では, その降灰の殆どは, 火口内や火道を埋めていた火山岩片等が今回の噴火前の静穏期に火山ガスによって酸性変質作用を受けたもので, 多量に含まれていた水溶性成分は, その相当量が酸性変質に伴って生成していた水溶性火山昇華物に由来すると推察される. このためこの Phase の降灰の水溶性成分量や F/Cl, Cl/SO₄ は必ずしも噴火時の火山ガスの HF/HCl, HCl/SO₂ と一致しないが, その変化からは 9 月 1 日以降に脱ガス温度が上昇したと推察され, 同時期の SO₂ 放出量の著しい増加と併せて, 火山活動の活発化の兆候を捉えていたと考えられる.

連続噴煙を伴う小規模噴火が継続している間の Phase II では, その降灰は新たに上昇したマグマに由来する極めて新鮮な岩片であり, 水溶性成分は Phase I の降灰に比べて著しく少なかった. FT-IR による観測で得られた噴煙の HCl/SO₂ は水溶性成分の Cl/SO₄ とほぼ一致していることから, 噴煙中で火山ガス中の水蒸気は凝縮しなかったと判断できる. 水溶性成分量が少なかったのは, 火山灰粒子と火山ガスの反応は比較的高温で起こり, 液体の水が関与しなかったことに起因すると推察される. 一方, 水溶性成分の F/Cl は FT-IR による観測で得られた噴煙の F/Cl よりも数十倍高かった. HF は岩石との反応性に富むため, 噴煙中で火山灰に選択的に付着したものと考えられる. この Phase 末期には水溶性 F, Cl 量が著しく上昇しており, 放出されていた火山ガスの温度は非常に高かったことを示唆する. 同時期にストロンボリ式噴火が発生しており, 表面現象と整合的である.

Phase II に続く Phase III の降灰は水溶性の金属イオン成分や陰イオン成分を多量に含んでいた. これは新たに噴出した溶岩等が火山ガスによって徐々に変質し始めていることを示しており, 火口内では 2004 年噴火以前と同様の状況が再現されていることを意味する. この

Phase の降灰の水溶性成分量や Cl/SO₄ も酸性変質によって生成した水溶性火山昇華物の影響を受けているため必ずしも噴火時の火山ガスの HCl/SO₂ と一致しないが, その変化から推定される脱ガス温度の変化は温度観測の結果と一致していた.

謝 辞

群馬県警長野原警察署の方々には噴火時の降灰情報を随時提供していただいた. また吾妻警察署の方々には降灰を分与していただいた. また, 査読者の方々や編集担当委員からは建設的なご意見をいただいた. 記して厚く感謝申し上げる.

引用文献

- Burton, M.R., Oppenheimer, C., Horrocks, L.A. and Francis, P.W. (2001) Diurnal changes in volcanic plume chemistry observed by lunar and solar occultation spectrometry. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 843–846.
- 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**, 575–584.
- 朝比奈貞一・三宅泰雄 (1935) 火山灰の水溶性成分 (其の一). *気象集誌*, 第 2 輯, 第 13 巻, 549–554.
- 平林順一 (1982) 桜島における火山ガスの成分変化と火山活動. *京都大学防災研究所年報*, **24**, B-1, 11–20.
- Hirabayashi, J., Oosaka, J. and Ozawa, T. (1982) Relationship between volcanic activity and chemical composition of volcanic gases — A case study on the Sakurajima volcano. *Geochem. J.*, **16**, 11–21.
- 平林順一・及川光弘・野上健治・鬼澤真也・風早康平・森 俊哉 (2004) 浅間山からの SO₂ 放出量. *日本火山学会講演予稿集 2004 年秋季大会*, 195.
- Ikeda, Y., Katsui, Y., Nakagawa, M., Kawachi, S., Watanabe, T., Fujibayashi, N., Shibata, T. and Kagami, H. (1990) Petrology of the 1988–89 Essential ejecta and associated glassy rocks of Tokachi-dake Volcano in Central Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **35**, 147–162.
- Iwasaki, I., Ozawa, T., Yoshida, M., Katsura, T., Iwasaki, B. and Kamada, M. (1966) Differentiation of magmatic emanation of gases. *Bull. Tokyo Inst. Tech.*, **74**, 1–57.
- 鎌田政明 (1957) 火山噴出物中のハロゲン元素について. *昭和 32 年度地球化学討論会講演要旨集*, 101–105.
- 鎌田政明 (1980) 桜島火山活動の特異性—化学的立場からみた. *桜島地域学術調査協議会調査研究報告*, 29–40.
- Katsui, Y., Kawachi, S., Kondo Y., Ikeda, Y., Nakagawa, M., Gotoh, Y., Yamagishi, T., Yamazaki, T. and Sumita, M. (1990) The 1988–1989 explosive eruption of Tokachi-dake, central Hokkaido, its sequence and mode. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **35**, 111–129.
- 気象庁 (2003a) 日本の主な火山活動. 平成 15 年 5 月地震・火山月報 (防災編), 27–29.
- 気象庁 (2003b) 日本の主な火山活動. 平成 15 年 10 月地

- 震・火山月報 (防災編), 30-35.
- 気象庁 (2003c) 2003年の日本の主な火山活動. 平成15年12月地震・火山月報 (防災編), 76-87.
- 気象庁 (2004a) 日本の主な火山活動. 平成16年1月地震・火山月報 (防災編), 24-32.
- 気象庁 (2004b) 日本の主な火山活動. 平成16年2月地震・火山月報 (防災編), 21-27.
- 気象庁 (2004c) 日本の主な火山活動. 平成16年3月地震・火山月報 (防災編), 23-27.
- 気象庁 (2004d) 日本の主な火山活動. 平成16年4月地震・火山月報 (防災編), 29-33.
- 気象庁 (2004e) 日本の主な火山活動. 平成16年7月地震・火山月報 (防災編), 30-35.
- 気象庁 (2004f) 日本の主な火山活動. 平成16年8月地震・火山月報 (防災編), 30-34.
- 気象庁 (2004g) 日本の主な火山活動. 平成16年9月地震・火山月報 (防災編), 30-37.
- 気象庁 (2004h) 日本の主な火山活動. 平成16年10月地震・火山月報 (防災編), 27-39.
- 気象庁 (2004i) 日本の主な火山活動. 平成16年11月地震・火山月報 (防災編), 29-35.
- 気象庁 (2004j) 日本の主な火山活動. 平成16年12月地震・火山月報 (防災編), 29-36.
- Love, S.P., Goff, F., Counce, D., Siebe, C. and Delgado, H. (1998) Passive infrared spectroscopy of the eruption plume at Popocatepetl volcano, Mexico. *Nature*, **396**, 563-567.
- 水上 武 (1935) 最近の浅間山の活動 (1). 地震, **I**, 7, 319-339.
- 三宅康幸・高橋 康・津金達郎・牧野州明・角前壽一・西米邦章・福井喬子・信州大学浅間火山04年噴火調査グループ (2005) 浅間火山2004年9月噴火の本質噴出物について. 火山, **50**, 333-346.
- 宮崎 務 (2003) 浅間火山活動記録の再調査. 震研彙報, **78**, 283-463.
- Mori, T., Notsu, K., Tohjima, Y. and Wakita, H. (1993) Remote detection of HCl and SO₂ in volcanic gas from Unzen volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 1355-1358.
- Mori, T. and Notsu, K. (1997) Remote CO, COS, CO₂, SO₂, HCl detection and temperature estimation of volcanic gas. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2047-2050.
- 森 俊哉・野津憲治 (2005) 浅間山噴煙中の火山ガス化学組成の遠隔測定. 火山, **50**, 567-574.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦郎・辻 浩・ト部 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**, 303-313.
- 中川光弘・野上健治・石塚吉浩・吉本充宏・高橋 良・石井英一・江草匡倫・宮村淳一・滋賀 透・岡崎紀俊・石丸 聡 (2001) 北海道駒ヶ岳, 2000年の小規模噴火とその意義: 噴出物と火山灰付着成分の時間変化から見たマグマ活動活発化の証拠. 火山, **46**, 295-304.
- 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.
- 小野 暁・神宮司元治・藤光康宏・江原幸雄 (1997) FT-IRによる九重硫黄山におけるCOガスの遠隔観測. 火山, **42**, 47-51.
- 小坂丈予・小沢竹二郎・大平洋子・富田 毅・坂元隼雄 (1973) 浅間山1973年活動における噴出物と噴火様式 (その1). 日本火山学会講演予稿集1973年度秋季大会, 108-109.
- 小坂丈予・小沢竹二郎 (1975) 桜島火山噴出ガスの成分の観測と活動状況. 第1回桜島火山の集中総合観測, 62-66.
- 小坂丈予・平林順一 (1983) 火山灰抽出成分から見た浅間火山の最近の噴火. 日本火山学会講演予稿集1983年度秋季大会, 422.
- 小坂丈予・野上健治・平林順一 (1998) 十勝岳1988-1989年噴火で放出された火山灰の付着水溶性成分. 火山, **43**, 25-31.
- 坂元隼雄 (1994) 桜島火山南岳から放出された降下火山灰の水溶性成分の地球化学的研究. 鹿児島県科学研究所研究報告, **5**, 11-20.
- 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也 (2005) 浅間火山2004年噴火噴出物の岩石学的検討. 火山, **50**, 315-332.
- Tsuchiya, K., Imagawa, T., Yamaya, K. and Yoshida, M. (1985) Separation of microamounts of fluoride coexisting with large amounts of aluminium and silica by improved trimethylsilylating distillation. *Anal. Chim. Acta*, **176**, 151-159.
- 山里 平 (2005) 近代火山観測の歴史—気象庁の監視観測を中心に—. 火山, **50**, S7-S18.
- 吉田 稔 (1975) 火山ガスと火山岩の反応によるフッ素, 塩素の分別に関するモデル実験. 日本化学会誌, **3**, 449-454.
- 吉田 稔・小沢竹二郎・小坂丈予 (1968) 噴気孔ガスによる変質にともなう火山岩へのフッ素, 塩素の付加. 日本化学雑誌, **89**, 930-933.
- 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り. 火山, **50**, 519-533.

(編集担当 松島喜雄)