

火山灰から見た 2008 年の桜島昭和火口の再活動過程

宮城磯治・伊藤順一・篠原宏志・鹿児島地方気象台

(2009年7月14日受付, 2009年12月22日受理)

Re-activation Process of Showa Volcanic Vent at Sakura jima Volcano in 2008:
Evidence From Volcanic AshIsoji MIYAGI, Jun'ichi ITOH, Hiroshi SHINOHARA and
Kagoshima Observatory, Japan Meteorological Agency

We describe reactivation processes of the Showa volcanic vent at Sakura jima volcano, Kagoshima, Japan. The Showa volcanic vent is located on the east side hill of Minami-dake summit vent at Sakura jima volcano. While Minami-dake summit vent has been active intermittently for the past five decades, the Showa volcanic vent was dormant for an interval of about 58 years until 4 June 2005. Ash samples analyzed were obtained from volcanic explosions of both Showa and Minamidake summit vents from 1981 to 2009. The analyses and observations on the volcanic ash samples include (1) amount of water soluble chlorine and sulfur adsorbed on volcanic ash particles, (2) mineral identification using X-ray diffraction patterns, (3) color measurement, (4) simplified particle size analysis of volcanic ash, (5) micrographic observations of ash particles using an optical binocular microscope and a SEM, and (6) chemical analysis of minerals and glasses in ash particles with an EPMA. (1) and (2) suggested that the proportion altered/non-altered blocky particles in volcanic ash from the Showa volcanic vent was decreased from 2008 to 2009. (2), (3), and (5) indicated a gradual increase in temperature of the vent with time. We regard (1)-(5) features as results of a gradual reactivation process of the Showa volcanic vent since 4 June 2005 by May 2008.

Key words: Sakura jima, Volcanic ash, Backscattered Electron Images, XRD, Volcanic gas

1. はじめに

地下のマグマが地表へと移動するメカニズムは、火山噴火現象において本質的に重要な役割を果たすが、まだ十分に理解されたとは言いがたい。マグマ上昇の本質的な駆動力は浮力である (Ryan, 1987; 高田, 1994)。しかしマグマが浮力を有していても、火道が狭い場合には、粘性がマグマの移動を阻む (Anderson, 1978; Takeuchi, 2004)。火道の太さは、火道内のマグマの移動や脱ガス様式に影響を与えるが (Kazahaya *et al.*, 1994; Koyaguchi, 2005; Melnik *et al.*, 2005)、逆に火道内のマグマの移動が母岩を破碎して火道を広げ、これによって促進されたマグマの移動が火道を益々拡大させる可能性がある (正のフィードバック)。その一方で、破碎された母岩が火道を閉塞させることもあり得る (負のフィードバック)。この

ように、地下のマグマが地表へと移動するメカニズムは単純でなく、これを理解するためには、実際の噴火で観測された地球物理学的データや噴出物の岩石学的情報にもとづいた事例研究を積み重ねる必要がある。特に、母岩の破碎による火道の拡大は無視できない。例えば肘折火山の噴火ステージ 4-2 では、長さ 2 km 直径 190 m の円柱に相当する体積の母岩が失なわれ火道が拡大したであろうことが、異質岩片量から見積もられている (宮城, 2007)。

一旦活動を休止した火口が再び噴火を開始する際に、マグマはどのように火道を広げ、地上へと移動しているのだろうか？ 火口の再活動過程の事例として筆者らが注目する昭和火口は、桜島南岳南東の海拔約 750 m 付近に形成された直径約 150 m の側火口である。昭和火口の

* 〒305-8567 茨城県つくば市東 1 の 1
産業技術総合研究所中央第七地質情報研究部門

** Kagoshima observatory, Japan Meteorological Agency
Geological Survey of Japan, Tsukuba Central 7, 1-1-1

Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan.

Corresponding author: Isoji Miyagi
e-mail: miyagi.iso14000@aist.go.jp

Time change in of volcanic activities at Showa vent (Sakurajima)

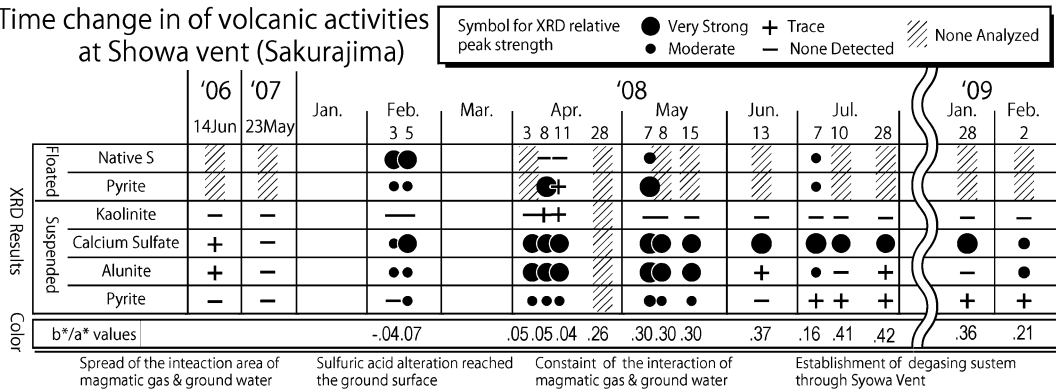


Fig. 1. Temporal change in eruptive materials from Sakura jima volcano (2006 to 2009).

位置は、大正噴火によって形成された南岳南東側の火口群と南岳山頂火口を結ぶ線上にある。昭和火口を形成した一連の噴火活動は、1935（昭和10）年9月に南岳山頂火口（以後単に山頂火口と呼ぶ）で開始した。1939（昭和14）年10月26日に昭和火口が形成後、1940年頃までは南岳火口と昭和火口の双方で降灰や小規模な火砕流を噴出する活動が断続的に続いた。その後噴火活動の中心は昭和火口へ移り、溶岩の流出に至った。しかし1948（昭和23）年には再び噴火の中心が昭和火口から山頂火口へと移動した。山頂火口の小規模で爆発的な活動は、1955（昭和30）年以降1990年代まで継続した。

昭和火口を地表への経路とするマグマ活動の推移は、断続的に行われた桜島総合観測の際の地温測定から推測することができる。それによると、昭和火口付近の地温は1976年以降1992年まで低下する傾向にあったが、2006年2月頃から噴気活動が活発化し、白色昇華物の付着の顕在化や地表温度の上昇が確認された（横尾・他, 2007）。このような地熱活動の活発化の後、2006年6月4日に、昭和火口は58年ぶりに噴火活動を再開した。2006年には噴煙高度約100~1,000 m程度の噴煙を間欠的に立ち上げる活動を6月末まで継続した後、噴煙活動は沈静化した。脱ガス活動は継続的に発生していた模様で、昭和火口周辺の山体表面に昇華物と思われる白色付着物が目立つようになった。その後、2007年5~6月、2008年2~7月には爆発的な噴火が頻発し、2008年4月以降は火映現象や監視カメラに赤色発光を示す岩塊の飛散が認められるようになる。2009年1月以降の活動では、爆発地震や空振を伴わない噴煙活動が数時間継続する活動が目立つように推移している（Fig. 1）。

現在の桜島は地球物理学的観測体制が充実している（例えば、第10回桜島火山の集中総合観測；京都大学防災研究所, 2008）。2008年の火山学会秋季大会において

は、MT連続観測による火山体浅部の比抵抗変化（相澤・他, 2008）、絶対重力の連続観測（風間・他, 2008）、熱赤外映像の連続観測（横尾, 2008）、噴火に伴う震動波形の観測（加藤・他, 2008）、噴火に伴う地盤変動観測（井口・他, 2008）、紫外線カメラを用いた二氧化硫黄放出量の観測（風早・森, 2008）、等に関する講演が行われた。また、桜島の周囲に設置された複数の監視カメラは、噴煙の勢い、到達高度、そして夜間における赤熱岩塊の放出状況を記録し続けている。このように多角的な観測の下で得られた火山灰は、火山体内のマグマ上昇メカニズムや火道の再活動プロセスを考察するうえで重要な情報をもたらす可能性がある。そこで、気象庁・鹿児島地方気象台が1981~2009年にかけて採取した桜島火山灰試料について、(1) 水溶性付着成分量の測定、(2) X線回折、(3) 色の測定、(4) 粒度分析、(5) 実体顕微鏡及び反射電子像の観察、(6) ガラス化学組成分析を行ない、噴火の経緯・モデル・活動推移を整理した。

2. 試料・方法

火山灰試料の内訳と分析内容をTable 1に示す。2008年の火山灰試料のうち鹿児島地方気象台の屋上で採取されたものは4月28日、5月9日、6月3日、7月9日、そして7月25日のものであり、これら以外は桜島内で採取された。比較のため分析した1981~1992年に南岳山頂火口から放出された火山灰は、全て鹿児島地方気象台内の降灰回収容器の中に、24時間の間に降った物である。2009年の火山灰試料には、Table 1に記載されていないものも存在する。

水溶性付着成分量の測定方法は以下のとおりである。約0.5グラムの火山灰（未乾燥）に重量比で約50倍の蒸留水を加え、密閉容器内で攪拌混合後、超音波洗浄器で30分間振盪し、火山灰表面の水溶性付着成分を溶解さ

Table 1. List of volcanic ash samples from Sakurajima.

Sample Identification	Timing of eruption	Timing of sampling	Vent	sampling location	water soluble	XRD	Color	Size	BEI	Count
Sakura2009 1004a	16:45 on 3 Oct. 2009 (and 00:30, 01:19, 03:04 on 4 Oct. 2009)	on 4 Oct. 2009	S(&M)	Tarumizu	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0911	12:28, 13:04, 14:10 on 11 Sep. 2009	2009.9.11 14:30	S	Sakurajima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0816	13:08 on 15 Aut. 2009	2009.8.16 16:30	S	Kagoshima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0409c	15:31, 16:05 on 9 Apr.	9:00 9 to 9:00 10 Apr. 2009	S	Kagoshima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0409b	15:31, 16:05 on 9 Apr.	18:30 on 9 Apr. 2009	S	Sakurajima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0409a	15:31, 16:05 on 9 Apr.	around 17:00 on 9 Apr. 2009	S	Sakurajima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0310b	6 a.m. on 10 Mar. 2009	10:30 on 10 Mar. 2009	S	Sakurajima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0310a	6 a.m. on 10 Mar. 2009	10:15 on 10 Mar. 2009	S	Sakurajima	n.d.	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0202b	9:02, 11:12, 14:30 on 2 Feb. 2009	around 15:00 on 2 Feb. 2009	S	Sakurajima	done	n.d.	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0202a	9:02 and 11:12 on 2 Feb. 2009	15:15 on 12 Sep. 2009	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2009 0128	16:21 on 28 Jan 2009	15:15 on 12 Sep. 2009	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2008 0912	on 12 Sep. 2008	16:40-16:50 on 28 Jan. 2009	M	Sakurajima	done	n.d.	B	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0728	7:05 and 10:10 on 28 Jul. 2008	12:00 on 28 Jul. 2008	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0725	not identified	9:00 25 to 9:00 26 Jul. 2008	S	Kagoshima	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0710	9:23 to 12:00 10 Jul. 2008	on 10 Jul. 2008	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0709	19:17 and subsequent small eruptions on 9 Jul. 2008	9:00 9 to 9:00 10 Jul. 2008	S	Kagoshima	done	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0705	explosion on 5 Jul. 2008	not identified	M	Sakurajima	done	VFP&FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0613	22:59 and 23:36 on 13 Jun.	on 14 Jun. 2008	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2008 0603	not identified	9:00 3 to 9:00 4 Jun. 2008	S	Kagoshima	done	n.d.	B	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0530	16:30 on 30 May 2008	16:10 to 16:30 on 30 May 2008	S	Sakurajima	done	n.d.	B&FP	done	done	done

Abbreviations.

n.d.=not determined or not available. done=determined.

Vent: [S=Showa vent, M=Minami-dake summit vent];

XRD: [FP=Fine Particle, VFP=Very Fine Particle];

Color: [B=Bulk ash, FP=Fine Particle];

To be continued

Table 1. List of volcanic ash samples from Sakurajima (continued).

Sample Identification	Timing of eruption	Timing of sampling	Vent	sampling location	water soluble	XRD	Color	Size	BEI	Count
Sakura2008 0515	early morning and the subsequent on 15 May 2008	9:00 on 15 May 2008	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0509	14:20 on 8 May 2008	9:00 8 to 9:00 9 May 2008	S	Kagoshima	done	n.d.	B	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0508	14:20 on 8 May 2008	at 16:30 on 8 May 2008	S	Sakurajima	done	n.d.	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0507	6:38 on 7 May 2008	at 7:20 on 7 May 2008	S	Sakurajima	done	VFP&FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0428	28 (Minamidake Summit B crater) and 29 (Showa crater) Apr. 2008	9:00 28 to 9:00 29 Apr.	S&M	Kagoshima	done	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0411	17:21 on 11 Apr. 2008	at 20:30 on 11 Apr. 2008	S	Sakurajima	done	VFP&FP	B&FP	done	n.d.	n.d.
Sakura2008 0408	2008.4.8 0:29	at 7:00 8 Apr. 2008	S	Sakurajima	done	VFP&FP	B&FP	done	done	n.d.
Sakura2008 0404	small continuous eruptions on 4 Apr. 2008	at 13:00 on 4 Apr. 2008	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0403	11 a.m. on 3 Apr. 2008	at 13:50 on 3 Apr. 2008	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0205(C)	0:39, 10:18, 15:54 and subsequent on 3 Feb. 2008	on 5 Feb. 2008	S	Sakurajima	done	VFP&FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0203(B)	0:39, 10:18 and 15:54 on 3 Feb. 2008	at 18:00 on 3 Feb. 2008	S	Sakurajima	done	VFP&FP	B&FP	done	done	done
Sakura2008 0203(A)	0:39 and 10:18 on 3 Feb. 2008	at 13:30 on 3 Feb. 2008	S	Sakurajima	done	n.d.	B	done	done	n.d.
Sakura2007 0523	not identified	on 23 May 2007	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	n.d.
Sakura2006 0614	not identified	on 14 Jun. 2006	S	Sakurajima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura19961017-22	not identified	9:00 4 to 9:00 5 Jan. 1992	M	Kagoshima	done	n.d.	B	done	n.d.	n.d.
Sakura19961017-21	not identified	9:00 26 to 9:00 27 Aug. 1991	M	Kagoshima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura19961017-20	not identified	9:00 8 to 9:00 9 Aug. 1990	M	Kagoshima	done	n.d.	B	done	done	n.d.
Sakura19961017-19	not identified	9:00 24 to 9:00 25 Aug. 1989	M	Kagoshima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura19961017-18	not identified	9:00 15 to 9:00 16 Jun. 1988	M	Kagoshima	done	FP	B&FP	done	done	n.d.
Sakura19961017-17	not identified	9:00 12 to 9:00 13 Nov. 1987	M	Kagoshima	done	FP	B&FP	done	done	done
Sakura19961017-16	not identified	9:00 5 to 9:00 6 Jun. 1986	M	Kagoshima	done	n.d.	B	done	done	done
Sakura19961017-15	not identified	9:00 28 to 9:00 29 Jul. 1985	M	Kagoshima	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura19961017-14	not identified	9:00 3 to 9:00 4 Jun. 1984	M	Kagoshima	done	n.d.	B&FP	done	done	n.d.
Sakura19961017-13	not identified	9:00 28 to 9:00 29 Jun. 1983	M	Kagoshima	done	FP	B	done	done	done
Sakura19961017-12	not identified	9:00 30 to 9:00 31 Jul. 1982	M	Kagoshima	done	n.d.	B	done	n.d.	n.d.
Sakura19961017-11	not identified	9:00 28 to 9:00 29 Jul. 1981	M	Kagoshima	done	n.d.	B	done	n.d.	n.d.

せ、約 2 時間静置後に採取した上澄みを $0.45\ \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで濾過した。この濾液の F, Cl, SO_4 をイオンクロマトグラフを用いて定量した（一部の試料は量が不十分のため分析せず）。なお 2008 年 2 月 3 日（一回目）の火山灰を除き、試料は降灰時に湿潤していない模様であり、降灰後速やかに採取されているため (Table 1), 火山灰粒子に付着した水溶性成分は雨水によって失われていないと考えてよい。試料の乾燥状態の判断は、試料瓶内の火山灰を安息角以上に傾け軽く震動を与えた際の崩れ易さにより液体の水の表面張力による粒子の凝集が起きていないと考えられることや、火山灰の水洗前に行なわれた乾燥操作 (90°C ・数時間以上) の前後において重量が殆んど減少しないことに基いた。

X 線回折分析を行うにあたり、噴出した火山灰試料のうち、いわゆる造岩鉱物種をできるだけ排除して、粘土鉱物に代表される変質鉱物種の細粒の構成物分析を行う為に、試料に対し水簸処理を行った。特に今回の試料に関しては、水中に混濁せず、水面に浮遊する粒子群が確認された。この水中に混濁するか、浮遊するかは、鉱物の疎水性（濡れの差）により生ずる現象で、浮遊選鉱（浮選）として特定の鉱物種を濃集する工程として工業的にも用いられる現象である。従って、これら水面浮遊物と水中混濁物は、構成鉱物種の相違（あるいは疎水性の相違をもたらす構成粒子表面の状態の相違）を示すものと期待されるので、本研究では両者をそれぞれ区分して、X 線回折分析を行うこととした。今回の X 線回折に用いた試料は下記の前処理手順で、2 種類に区分した。まず 1 つは、数〜数 10 グラムの火山灰に約 300 ml の蒸留水を加えて超音波洗浄器で 30 分間振盪した際に水面に浮遊した微粒子である（以後、水面浮遊物あるいは **Hydrophobic very fine particle** と呼ぶ）。この粒子群については水面に膜状に浮遊しているものを、XRD 分析装置に装着できる無反射ガラス板に直接すくい取り回収した。もう 1 つは、上に述べた物の残存物を約 1 分間静置した後、懸濁液を 90°C で一晩かけて蒸発乾固することにより、水溶性鉱物及び懸濁粒子を回収したものである（以後、水中混濁物あるいは **Fine particle** と呼ぶ）。X 線回折分析には理学電気工業製 RINT2500 を用い、銅管球 ($40\ \text{KV}$, $100\ \text{mA}$) にて、 $3\sim 60^\circ$ (2θ) の範囲を、サンプリング幅 0.02° , $4^\circ/\text{分}$ でスキャンし、得られた回折線強度にもとづいて鉱物を同定した。なお一部の火山灰試料では分析に必要な量を確保できなかった。

火山灰の色の測定には、土色計（ミノルタ製 SPAD-503）を用いた。直径 $1\ \text{cm}$ の測光窓を乾燥した火山灰に直接押し当て、粉体からの拡散反射光強度にもとづく火山灰の色調データを、CIE（国際照明委員会; Commission

internationale de l'éclairage, 1976) の $L^*a^*b^*$ 色空間にプロットした。各試料につき 7 回測色が行なわれた。7 回のうち最初と最後は標準白色板の測定であり、残り 5 回は火山灰上の測定位置を毎回変更しながら測色を行なった。標準的な繰返し測定誤差は a^* が ± 0.1 , b^* が ± 0.2 程度と見積られる。火山灰のバルクの色測定に加え、火山灰の細粒成分（上述の水中混濁物）についても、測色を行なった。なお一部の火山灰試料では分析に必要な量 ($0.5\sim 1$ グラム) が得られなかった。

簡易粒度分析法は以下のとおりである。火山灰に含まれるシルトサイズ以下の細粒成分重量比を、水洗前後の乾燥重量の差から把握した。より粗粒な成分については、分析用篩 ($1\ \text{mm}$, $710\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$ のセット、あるいは $1\ \text{mm}$, $0.5\ \text{mm}$, $250\ \mu\text{m}$, $125\ \mu\text{m}$, $63\ \mu\text{m}$ のセット) で篩分けた試料の重量にもとづき、粒度組成を算出した。

実体顕微鏡及び反射電子像の観察法は以下のとおりである。粒径 $150\sim 300\ \mu\text{m}$, あるいは $125\sim 250\ \mu\text{m}$ に篩分けた火山灰粒子を、直径 $24\ \text{mm}$ 厚み $5\ \text{mm}$ の円形ガラス基盤上に単粒子層となるように並べて熱硬化性のエポキシ樹脂で固定した。次に、ガラス基盤から表面までの距離が平均粒径の半分となるように、マイクロメータで測定しながら削削した。これにより、研磨片面に占める火山灰粒子の露出率を高めた。研磨の際には遊離砥粒を用いず、複数の平行な凹みをつけたガラス定盤（宮城, 2008; 特許出願中, 2008-116519, 2008000787) に固定した研磨フィルムを用いた。この定盤は平面度の高い研磨面をもたらす、包埋樹脂に隣接する火山灰粒子周縁部の EPMA による化学分析を容易にした。

研磨片を走査型電子顕微鏡の反射電子像（宮城・鹿児島地方気象台, 2009）と、実体顕微鏡で観察した。火山灰の構成粒子の種類と量を把握するため、反射電子像に撮影された粒子を、輝度と微細構造の特徴にもとづいて変質岩片（暗い）、石質岩片（やや明るく微細な石基鉱物を含み破断面で囲まれる）、ガラス片（やや明るく石基鉱物が少なく気泡を含む）、その他（輝石、長石、および判断に迷う粒子）の 4 つに分類し、個数を数えた。

研磨された火山灰粒子の一部に対して、EPMA を用いた化学組成分析を行なった（JEOL 製 JXA-8900 を使用。電流値は $12\ \text{nA}$, 加速電圧は $15\ \text{kV}$, ビーム径は $4\ \mu\text{m}$, 特性 X 線の検出は分光結晶による波長分散法, 分析対象元素は Si, Ti, Al, Fe, Mn, Ca, Na, K, P, S, F, Cl, 補正計算は ZAF 法)。EPMA の分析対象は、火山灰粒子に内包される微斑晶や斑晶破片 (Pyroxenes, Plagioclase, Fe-Ti Oxides), それらに含まれる斑晶ガラス包有物 (Melt Inclusions), 比較的ガラス質な火山灰粒子の石基ガラス (Matrix Glass), そして反射電子像で比較的暗く見える

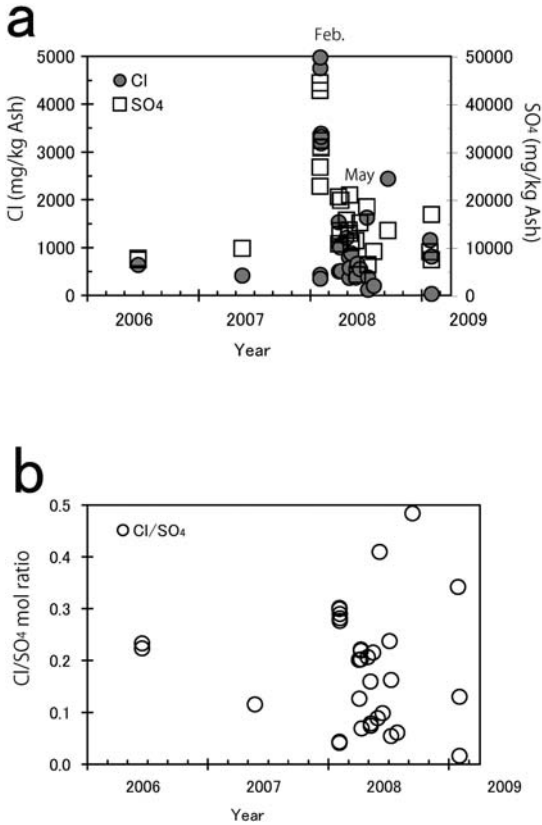


Fig. 2. Water soluble chemical components of volcanic ash (2006–2008). (a) Concentration of chlorine and sulphate ion (mg/kg). (b) Ratios of chlorine and sulphate ion (mol). All the plotted data are from ash samples from Showa volcanic vent, except for a sample (ID=Sakura2008 0428) which is a mixture of those ash from Showa vent and Summit vent.

変質火山灰粒子の石基 (Altered part) である。

3. 結 果

3-1 水溶性付着成分

火山灰の水溶性付着成分量の分析結果 (Fig. 2a, Table 2) のうち 2008 年 2～5 月に注目すると、昭和火口から放出された火山灰の硫酸および Cl イオン付着量は、活動初期に特に多く、時間と共に減少したことが示される。F イオン付着量の時間変化も同様である。Cl/SO₄ 比の増減 (Fig. 2b) には明瞭な傾向は認められないが、1980～90 年の火山灰と比較すると、2008 年噴出物の水溶性成分の付着量は多く、Cl/SO₄ 比は低めである。F/SO₄ 比の増減には明瞭な傾向は認められない。

3-2 X 線回折

水面浮遊物の X 線回折結果 (Fig. 3a) によれば、2008

Table 2. Amount of water soluble F, Cl, S.

Analysis ID	F	Cl	SO ₄
	mg/kg Ash		
Sakura2009 0202b	161	830	17050
Sakura2009 0202a	85	50	7600
Sakura2009 0128	188	1175	9275
Sakura2008 0912	635	2455	13700
Sakura2008 0728	68	215	9350
Sakura2008 0710	87	137	6640
Sakura2008 0709	159	392	6460
Sakura2008 0705	375	1645	18650
Sakura2008 0613	40	565	15300
Sakura2008 0603	162	674	4440
Sakura2008 0530	74	388	11575
Sakura2008_0515	159	895	11175
Sakura2008_0509	108	590	21100
Sakura2008_0508	107	385	13050
Sakura2008_0507	117	818	13775
Sakura2008_0428	213	1220	15850
Sakura2008_0411	126	525	20050
Sakura2008_0408_c	106	1023	13600
Sakura2008_0408_b	113	1045	12850
Sakura2008_0408_a	110	1065	12925
Sakura2008_0404	189	515	10900
Sakura2008_0403	195	1550	20700
Sakura2008_0203c_c	454	3330	31000
Sakura2008_0203c_b	497	3400	32500
Sakura2008_0203c_a	437	3200	31200
Sakura2008_0203b_b	700	4990	44600
Sakura2008_0203b_a	674	4770	43000
Sakura2008_0203a_b	160	363	22950
Sakura2008_0203a_a	202	444	26950
Sakura2007_0523	110	430	9940
Sakura2006_0614_c	73	656	7580
Sakura2006_0614_b	69	654	7860
Sakura1996 1017-22	160	47	1105
Sakura1996 1017-21	17	30	213
Sakura1996 1017-20	72	685	905
Sakura1996 1017-19	95	845	870
Sakura1996 1017-18	51	376	1505
Sakura1996 1017-17	22	98	675
Sakura1996 1017-16	10	13	94
Sakura1996 1017-14	26	653	3240
Sakura1996 1017-13	52	988	2810
Sakura1996 1017-12	62	289	955
Sakura1996 1017-11	126	898	3840

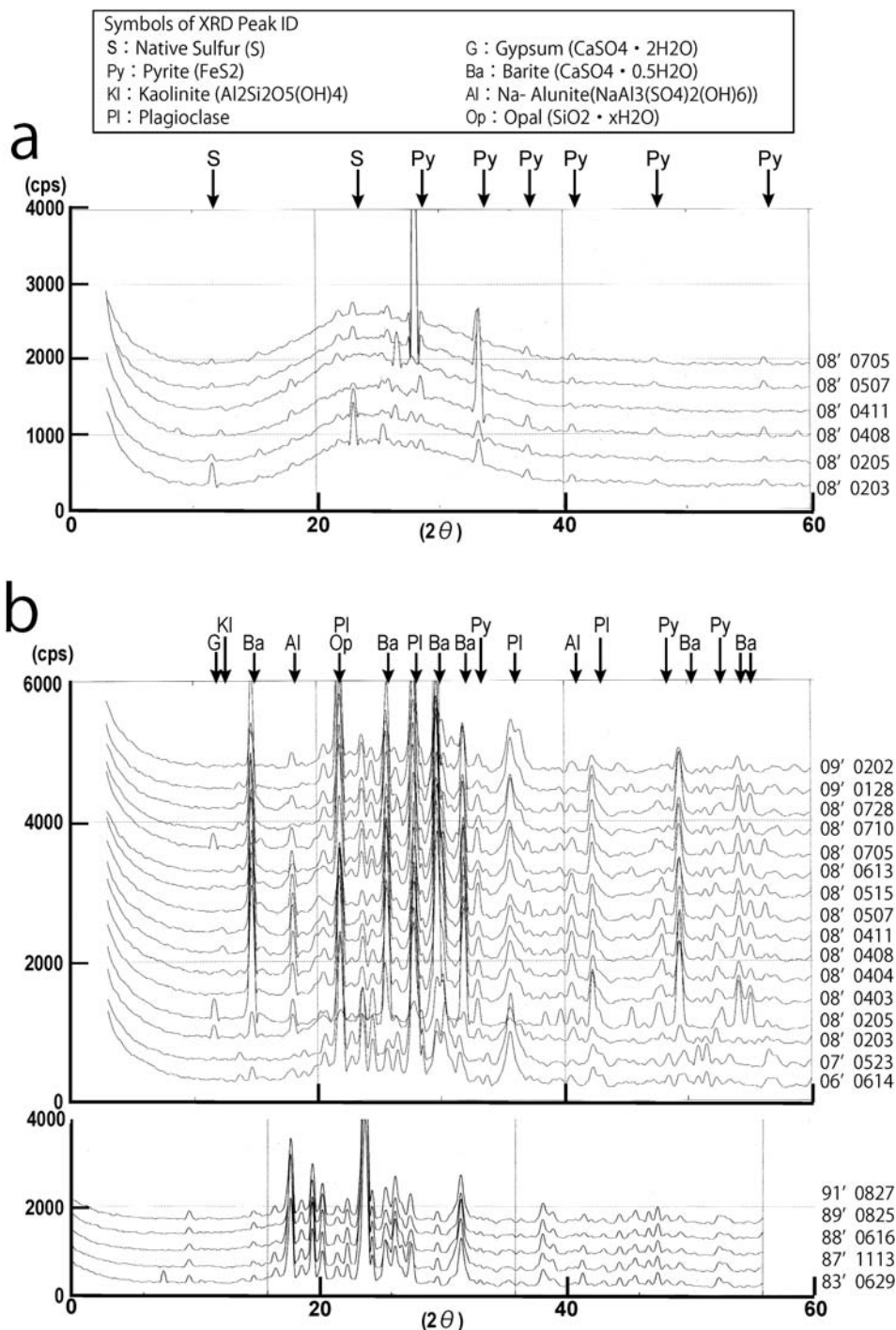


Fig. 3. Collection of X-ray diffraction patterns (cps over 2θ). (a) X-ray diffraction patterns of Hydrophobic very fine particles which was floated on water surface during ultrasonic cleaning of ash samples. (b) X-ray diffraction patterns of fine particles suspended in water for longer than 1 minute after the end of ultrasonic cleaning of ash samples for about 30 minutes and recovered by overnight heating at 90°C . Condition of X-ray diffraction analysis is described in the text.

年2月噴出物では自然硫黄および黄鉄鉱が認められた。自然硫黄は肉眼観察でも懸濁液の乾固物中に黄色沈殿物として確認された。水面浮遊物には経時変化があり、2008年4月以降の噴出物からは自然硫黄が消失した。また、2009年1~2月噴出物では、水面浮遊物自体が認められなくなった。

水中懸濁物のX線回折結果 (Fig. 3b) の特徴は以下のとおりである。(1) 2006年および2007年噴出物では、変質鉱物の明瞭なピークは確認できない。(2) 2008年2月の噴出物では硫酸カルシウム鉱物(焼石膏および石膏)、

ソーダ明礬石、黄鉄鉱のピークが現れはじめる。(3) 2008年4月以降の噴出物では焼石膏の明瞭なピークが確認される様になり(石膏の低いピークを伴うことがある)、2008年6月以降、硫酸カルシウム鉱物のピークが明瞭なまま、ソーダ明礬石のピークは減少傾向にある。また、2009年2月2日噴出物では、硫酸カルシウム鉱物のピークもやや低くなっている。

なお、硫酸カルシウム鉱物は石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)-焼石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)-硬石膏(CaSO_4)の三相をもち、結晶構造が異なることから、X線回折分析によりそれぞれを区分して検出する事が可能である。このうち、石膏と焼石膏は常温においても結晶水の吸収・放出により相変化を起こす。このため、地表に放出された噴出物では、堆積後の周囲の環境に応じて相変化するので、両者を区分して議論することに本質的な意味は見出されない。そこで、本論においては両者を硫酸カルシウム鉱物として一括し、Fig. 1の変質鉱物相対量の経時変化においては、相対的に10倍以上高いピークをもつ焼石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)のピーク値を代表値として用いた。

3-3 色

火山灰のバルクの色調は (Table 3)、2008年2月の昭和火口の噴出物と1981~1991年の山頂火口のもとの異なる色変化傾向を示す。山頂火口の火山灰は、 a^*-b^*

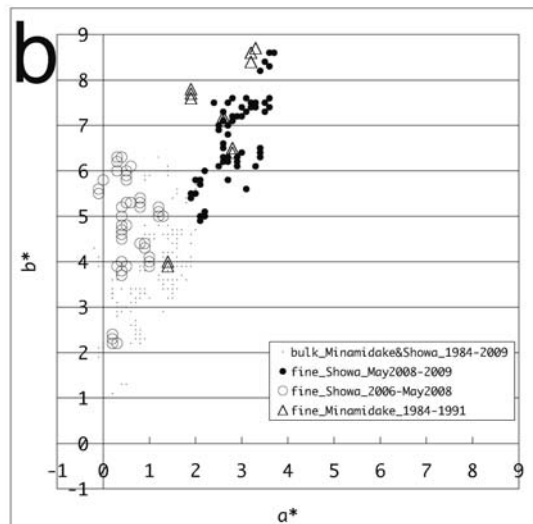
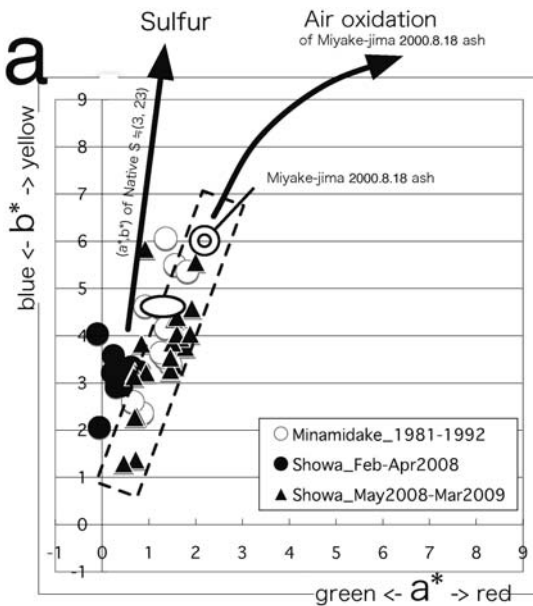


Fig. 4. Color of volcanic ash plotted on a^*-b^* system of CIE $L^*-a^*-b^*$ color space. The CIE $L^*-a^*-b^*$ color space was described in the second Commission Internationale d'Eclairage (CIE) 1976, and the values of a^* and b^* correspond to the intensities of red ($+a^*$) and green ($-a^*$), and yellow ($+b^*$) and blue ($-b^*$) color, respectively. (a) Color of bulk dry volcanic ash. Open circles represents ash samples from 1981 to 1991, all of which were derived from the Summit vent of Sakura jima volcano. Solid circles are samples of the beginning of 2008 activities from 3 February to 11 April, and solid triangles are those from the succedent activities after 28 April. A straight arrow indicates a possible color change trend of a mixture of color less powder and native sulfur. A curved arrow shows an observed change in color of heated volcanic ash in air (Miyagi and Tomiya, 2002). (b) Comparison of the color of dry bulk volcanic ash (dots) with those of dry fine particles (solid circles for samples from 30 May 2008 to 10 March 2008, open circles for those from 2006 to 15 May 2008, and open triangles for those from Minamidake Summit vent from 1984 to 1992) recovered from murky water after ultrasonic cleaning of bulk ash samples for about 30 minutes.

Table 3. Average value of Color measurements.

Sample	Bulk ash powder			Fine particle		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Sakura2009 1004a	37.16	0.72	1.38	57.10	5.24	10.66
Sakura2009 0911	52.30	1.46	3.26	58.92	2.14	5.00
Sakura2009 0816	53.18	1.54	3.38	62.72	2.88	6.16
Sakura2009 0409c	50.28	1.46	3.28	64.18	1.98	5.56
Sakura2009 0409b	52.92	1.78	3.76	60.66	2.64	6.64
Sakura2009 0409a	55.94	1.68	3.96	64.32	2.06	5.68
Sakura2009 0310b	49.06	1.50	3.86	56.46	2.76	7.04
Sakura2009 0310a	46.24	1.54	4.36	58.24	2.70	7.38
Sakura2009 0202b	50.18	1.60	4.04	54.08	2.54	7.04
Sakura2009 0202a	41.44	0.70	3.22	55.60	2.98	7.24
Sakura2009 0128	49.34	1.60	4.40	55.42	2.62	6.22
Sakura2008 0912	40.78	1.34	4.66	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0728	51.62	1.92	4.58	59.76	3.56	7.44
Sakura2008 0710	42.78	1.46	3.54	52.92	3.56	8.42
Sakura2008 0705	46.68	0.92	5.84	54.94	1.74	9.46
Sakura2008 0613	49.62	2.00	5.56	55.28	3.22	7.48
Sakura2008 0603	45.44	0.94	3.22	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0530	47.80	1.88	4.04	55.80	3.32	6.18
Sakura2008 0515	43.88	0.74	2.30	46.42	0.86	4.36
Sakura2008 0509	46.98	0.84	3.84	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0508	47.44	0.70	2.28	48.34	1.22	5.06
Sakura2008 0507	42.84	0.46	1.30	51.60	0.22	2.26
Sakura2008 0428	44.34	0.68	3.14	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2008 0411	48.46	0.32	3.14	59.34	0.40	3.86
Sakura2008 0408	55.52	0.42	2.94	64.44	0.48	5.12
Sakura2008 0404	49.20	0.30	2.92	62.60	0.52	5.96
Sakura2008 0403	53.72	0.22	3.22	60.86	0.32	6.22
Sakura2008 0203C1	46.98	0.24	3.58	70.04	-0.08	5.58
Sakura2008 0203B	45.98	-0.10	4.04	56.24	0.40	4.62
Sakura2008 0203A	42.56	-0.06	2.06	n.d.	n.d.	n.d.
Sakura2007 0523	48.42	0.80	3.24	53.34	1.00	3.96
Sakura2006 0614	46.48	0.62	3.34	56.04	0.80	5.34
1996 1017-22	54.32	0.92	4.62	n.d.	n.d.	n.d.
1996 1017-21	43.72	1.46	3.40	53.44	2.80	6.46
1996 1017-20	50.68	1.26	4.60	n.d.	n.d.	n.d.
1996 1017-19	48.30	1.36	6.06	60.08	1.90	7.72
1996 1017-18	44.96	1.36	4.16	55.62	2.60	7.14
1996 1017-17	47.52	0.86	2.36	57.80	1.40	3.96
1996 1017-16	49.38	1.34	3.54	n.d.	n.d.	n.d.
1996 1017-14	45.90	1.26	3.64	58.96	3.24	8.60
1996 1017-13	43.42	1.56	5.50	n.d.	n.d.	n.d.
1996 1017-12	41.06	0.66	2.60	n.d.	n.d.	n.d.
1996 1017-11	44.30	1.82	5.36	n.d.	n.d.	n.d.

Abbreviations.

n.d.=not determined or not available. done=determined.

プロット上において傾きが約2.7でほぼ原点を通る直線上に分布する (Fig. 4a, 破線で囲まれた長方形の領域). この色変化傾向は, 火山灰を空気中で加熱した際の色変化に合致する (宮城・東宮, 2002). これに対し昭和火口の2008年2月の火山灰の色調は, 原点を通るほぼ垂直な直線上に分布する. a^*-b^* 平面上におけるこのような分布は, 直接的には, 2008年2月の昭和火口火山灰が山頂火口の物と比べて黄色 (正の b^* 値) あるいは緑色 (負の a^* 値) を帯びていることを意味する. 昭和火口火山灰のバルクの色調はその後, 時間とともに変化し, 4月下旬以降には, 80年代の山頂火口の火山灰と同様の色変化傾向を示すようになった (Fig. 4a).

水中懸濁物 (火山灰の極細粒成分) の色は, バルクの火山灰よりも濃く, かつ色調のばらつきが大きい (Fig. 4b). 具体的には, 火山灰のバルクの色では b^* 値が6以下と a^* 値が2以下の範囲に主に分布するのに対し, 極細粒成分は b^* 値が9以下と a^* 値が4以下の範囲にある. 極細粒成分の色と噴火の時期との間には関連が認められる. 2006年6月~2008年5月の極細粒成分の色は, バルクの火山灰との間に差が認められない (Fig. 4b). これに対し2008年5月以降の極細粒成分はバルクの火山灰との間に差があり, 1984~1991年の山頂火口の火山灰細粒成分と同じ色になった (Fig. 4b).

3-4 粒度

2008年の火山灰試料のうち比較的粗粒なものを放出した噴火は, 2008年2月3日初期のもの (0時39分および10時18分の噴火; Fig. 5, 2008 0203a) と4月8日 (Fig. 5, 2008 0404) である. 逆に比較的細粒成分に富むものは, 2月3日の後期 (15時54分の噴火を含む; Fig. 5, 2008 0203b) と5月7日のものである. それらを除けば火山灰の粒度組成は, およそ 2ϕ 以下の細粒粒子が卓越するという点で, 基本的には1992年以前の火山灰との間には特筆すべき違いは認められない. 2009年の火山灰試料についても9月11日 (Fig. 5, 2009 0911) と10月4日 (Fig. 5 2009 1004a) のものが粗粒であることを除けば, 2008年火山灰の粒度組成との間に特筆すべき違いは認められない. 但し2008~2009年に昭和火口から放出された火山灰試料の粒度組成は, 1981~1992年の山頂火口のものとは比べてやや粗粒である (Fig. 5).

3-5 構成粒子

2008年の昭和火口と1980~90年代の山頂火口の火山灰の構成物は, 斜長石, 輝石などの鉱物片, 比較的新鮮で破断面に囲まれた岩片, 褐色~淡褐色の発泡またはブロック状火山ガラス片, そして変質岩片からなるという点では共通しているが, 構成物の量比には経時変化がある. 一連の噴火活動における比較的短い時間スケールに

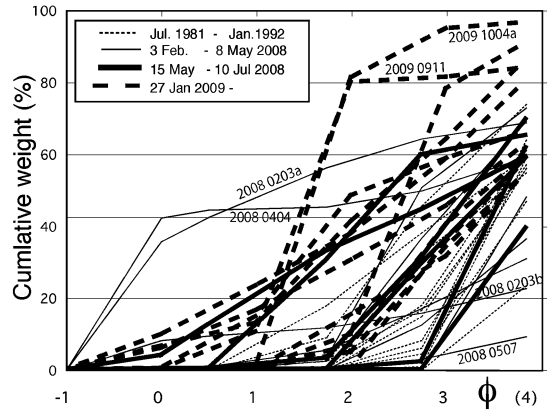


Fig. 5. Particle size distribution curves of volcanic ash. Horizontal axes represents diameter of ash particles in ϕ scale ($2-\phi$, mm), and vertical axes shows cumulative weight of particles (%). Particle size distribution was analyzed according to weight of particles on sieves and weight difference of ash before and after the ultrasonic cleaning with water. Dashed thin lines represent for samples from Minamidake Summit vent from 1984 to 1992. Thin lines represent for those erupted from 3 February to 8 May 2008. Thick lines are those from 15 May to 10 July 2008. Dashed thick lines are those erupted after 27 Jan 2009.

観察された変化として, 数日以上の休止後の最初の噴火活動で放出された火山灰には変質岩片が比較的多量に含まれるが, 噴火が継続するにつれ変質岩片量が減少することが挙げられる. 宮城・鹿児島地方気象台 (2009) の反射電子像に映った Blocky particle (微細な石基鉱物に富み破断面で囲まれる) に対する Altered particle (輝度が暗い) の個数比は (Fig. 6a, Table 4), 2008年4月3日から4日にかけて1.8から0.8に減少した. 同様に, 5月7日から8日にかけて1.4から0.7へ減少した. 5月15日から30日にかけても1.1から0.9へ減少した. 7月10日から28日にかけては1.1から0.9と減少した.

より長期的な経時変化としては, 2月から4月の噴出物では淡褐色の発泡ガラス片の含有量が比較的多いが, その後淡褐色発泡ガラスの量が減少したことが挙げられる. 具体的には, 宮城・鹿児島地方気象台 (2009) の反射電子像に映った Blocky particle に対する Glassy particle (石基鉱物に乏しく発泡している) の個数比 (Fig. 6b, Table 4) は, 1980年代の山頂火口の火山灰においては0.03から0.05と小さい (1989年8月の0.56を除く). これに対し2008年の昭和火口の火山灰では2月が0.8~0.9と高いが, 時間とともに数値が減少し, 7月28日に

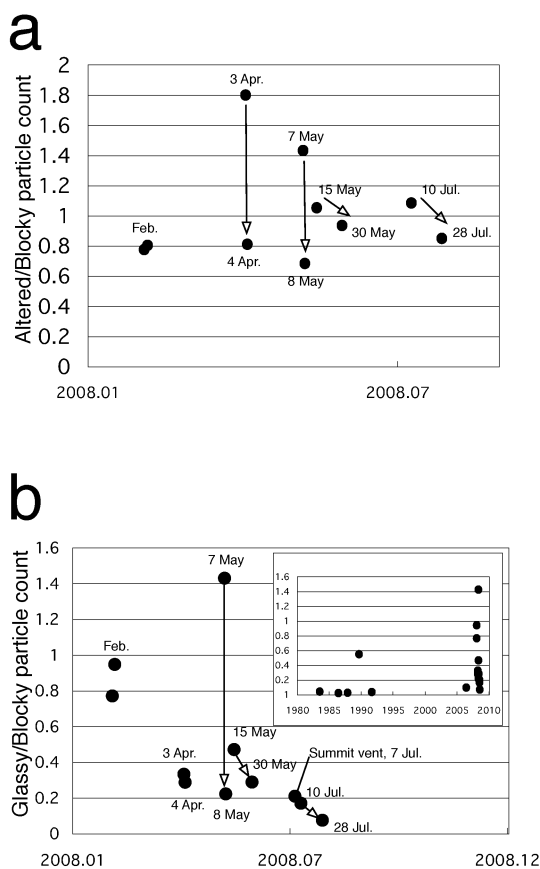


Fig. 6. Temporal change of ash constituent. Ash particles, sieved, mounted, polished and photographed (Miyagi and JMA, 2009) are classified into four categories according to their brightness and micro-textures in backscattered electron images; Altered (dark particles), Blocky (moderately bright particles with numerous groundmass minerals and enclosed by fracture surfaces), Glassy (moderately bright to slightly dark glassy particles with bubbles), Etc (crystal fragments and the rest of particles). (a) Temporal change of Altered/Blocky particle count. Arrows represent the sequence of eruptions. (b) Temporal change of Glassy/Blocky particle count. A superimposed figure shows the long-term data including Minami-dake summit vent.

は 0.08 にまで低下した (5 月 7 日の 1.43 は除く)。同様にガラス質岩片量比に関しても、一連の噴火活動における比較的短い時間スケール内での変化が認められ、数日以上の休止後の最初の噴火活動で放出された火山灰にはガラス片が比較的多く、噴火が継続するにつれ減少する。例えば 2008 年 4 月 3 日から 4 日にかけてこの個数比は 0.33 から 0.29 に若干減少した (Fig. 6b)。同様に、5 月 7

日から 8 日にかけて 1.4 から 0.2 へ大幅に減少した。5 月 15 日から 30 日にかけても 0.5 から 0.3 へ減少した。7 月 10 日から 28 日にかけても 0.2 から 0.08 へ減少した。

3-6 化学組成

1984~2008 年火山灰粒子のガラス化学組成は比較的ばらつくものの、分析値はある領域に集中している (Fig. 7)。Ti, Al, Ca, Mg, Mn, Fe, K, Na のハーカー図において火山灰に含まれるガラスや鉱物 (斜長石・輝石) の化学組成には、1980~90 年代と 2008 年噴出物との間に大きな違いは認められなかった (Fig. 7a-h)。桜島のマグマの全岩化学組成は、およそ 2000 年前よりも若い噴出物と古い噴出物とで異なる (宇都・他, 2005)。Ti のハーカー図において火山灰のガラス化学組成が集中する領域は、宇都・他 (2005) が示した 2000 年前よりも若い噴出物の全岩化学組成の変化傾向の延長上にあり、2000 年前よりも古い噴出物の延長線からは明らかに外れている (Fig. 7 a)。逆に、反射電子像で暗く見える部分 (Altered part) の化学組成は、2000 年前よりも古い噴出物の延長線にある。代表的と思われる石基ガラスと斑晶ガラス包有物の化学組成分析値を、Table 5 に示す。

4. 考 察

4-1 昭和火口周囲に形成された変質帯の成長と消費

2008 年に昭和火口から放出された火山灰の硫酸イオン付着量には経時変化が認められ、活動初期に特に多く、時間と共に減少した。このことは、火口浅部で生成された変質物の混入量の減少を反映していると考えられる。実際、昭和火口の噴出物の構成粒子の量比には経時変化があり、数日以上休止後の最初の噴火活動で放出された火山灰には変質岩片が比較的多量に含まれるが、噴火が継続するにつれ変質岩片量は減少する。この事は、時間とともに火道周囲の変質物の混入割合が減少したことを意味する。また火山灰の X 線回折結果によれば、熱水変質に伴う鉱物 (石膏・明礬・自然硫黄) は 2006 年から 2008 年にかけて一旦は増加したのち、その後は時間とともに減少に転じている。これらの事実は、新たに活動を再開した昭和火口直下の火道周辺における、火山ガスの付与による熱水変質作用の開始と進行、および熱水変質鉱物を含む母岩が噴火の際に異質岩片として放出されることで消費されたことを反映すると思われる (あるいは火道周辺の温度が上昇することにより熱水変質鉱物の生成率が低下したのかもしれない)。なお、本研究で測定された 2006 年と 2007 年の試料の付着成分量が少ない理由は、それぞれの時期の一連の噴火の後期に放出された火山灰を採取したためだと思われるが、試料数不足で検証できない。

Table 4. Result of particle counting.

Sample Identification	particles counted	alt %	glass %	block %	xtal+Etc %	glass / block	alt / block
Sakura2008 0728	846	21.3	1.9	24.9	51.9	0.08	0.85
Sakura2008 0710	887	23.7	3.7	21.8	50.9	0.17	1.09
Sakura2008 0705	891	43.7	0.5	2.1	53.8	0.21	20.47
Sakura2008 0530	1077	21.4	6.6	22.8	49.3	0.29	0.94
Sakura2008 0515	1114	21.9	9.8	20.7	47.6	0.47	1.06
Sakura2008 0508	1249	13.5	4.4	19.7	62.4	0.22	0.69
Sakura2008 0507	940	31.2	31.1	21.7	16.1	1.43	1.44
Sakura2008 0404	1081	21.9	7.8	26.9	43.4	0.29	0.81
Sakura2008 0403	1339	25.5	4.7	14.1	55.7	0.33	1.80
Sakura2008 0205(C)	836	13.0	15.3	16.2	55.5	0.95	0.81
Sakura2008 0203(B)	738	14.4	14.2	18.4	53.0	0.77	0.78
Sakura2006 0614	254	16.6	3.2	30.8	49.5	0.10	0.54
Sakura19961017-21	542	13.8	1.5	35.6	49.1	0.04	0.39
Sakura19961017-19	336	8.6	11.9	21.4	58.0	0.56	0.40
Sakura19961017-17	432	16.2	0.9	28.5	54.4	0.03	0.57
Sakura19961017-16	380	5.5	1.3	45.8	47.4	0.03	0.12
Sakura19961017-13	581	5.3	2.1	42.0	50.6	0.05	0.13

Particle counting was done on the surface of polished sections using Backscattered Electron Images by Miyagi and Kagoshima observatory, JMA (2009).

火砕物の粒度組成は破碎作用の違いを反映するから (例えば Zimanowski *et al.*, 1997), 粒度組成にもとづいてマグマおよび火口周辺の岩石の破碎条件を議論できる可能性がある。しかしながら、火山灰の粒度組成は噴火後の分級や天候条件によっても大きく左右されるから、注意が必要である。2008~2009年に昭和火口から放出された火山灰試料の粒度組成は、1981~1992年の山頂火口のもの比べて系統的に粗粒である (Fig. 5)。その理由は、1981~1992年の火山灰試料がすべて鹿児島市内で採取されたため、より噴出源に近い桜島島内で採取されたものに比べて分級が進んだためと考えられる。本研究で分析した火山灰試料は、採取地点と噴出中心の距離や分布軸からの距離が様々であるから、噴火後の分級作用も様々だと考えられる。それらの試料全てについて分級を受ける前の粒度組成を推定することは困難であるから、火口直下におけるマグマや母岩の破碎作用を粒度組成にもとづいて議論することは止めておく。付着成分、変質鉱物種、色、構成粒子、化学組成の特徴には、粒度組成との対応が認められない。この事は、元々存在していた粒度組成との対応が噴火後の様々な分級作用によって消されたことを意味するのかもしれないが、元々粒度組成との対応が無かった可能性も否定できない。以下、粒度組成の変化を無視して議論するが、本研究で分析された火山灰試料は 2ϕ 以下の細粒粒子を主体とする特徴が共

通しているから、大きな問題はないと思われる。

4-2 マグマの冷却・脱水・酸化履歴

4-2-1 火山灰の色に関する考察

1981~1992年に桜島の山頂火口から放出された火山灰のバルクの色調は、 a^*-b^* プロット (Fig. 4a) 上において傾きが約 2.7 でほぼ原点を通る。これは三宅島の 2000年 8月 18日火山灰を空気中で加熱酸化した際の色変化 (宮城・東宮, 2002) と同じである。そこで本稿では、三宅島と桜島の火山灰の色変化プロセスが共通だと考え、大気と接触した時点におけるマグマ (多くの場合において火口から放出された直後の火山灰) の温度の時間変化を、火山灰の色にもとづいて推定する。

1981~1992年に桜島の山頂火口から放出された火山灰の色を基準にとると、2008年 2~4月初旬の火山灰は、相対的に「黄色」および (又は) 「緑色」を帯びている (Fig. 4a)。黄色味を強める原因の一つとして、X線回折で自然硫黄の存在が示されることから、極細粒成分に含まれる自然硫黄による着色を挙げることができるが、Fig. 4aの情報だけからは、黄と緑の寄与率を区別できない。火山灰に緑色の色調を与える要因としては、火山灰に赤い色調を与えるプロセス (酸化) とは逆に、酸化を阻害する何らかのプロセスが考えられる。

2008~2009年の桜島昭和火口の火山灰は、鉱物やガラスの化学組成や構成粒子の種類が 1980~1990年代のもの

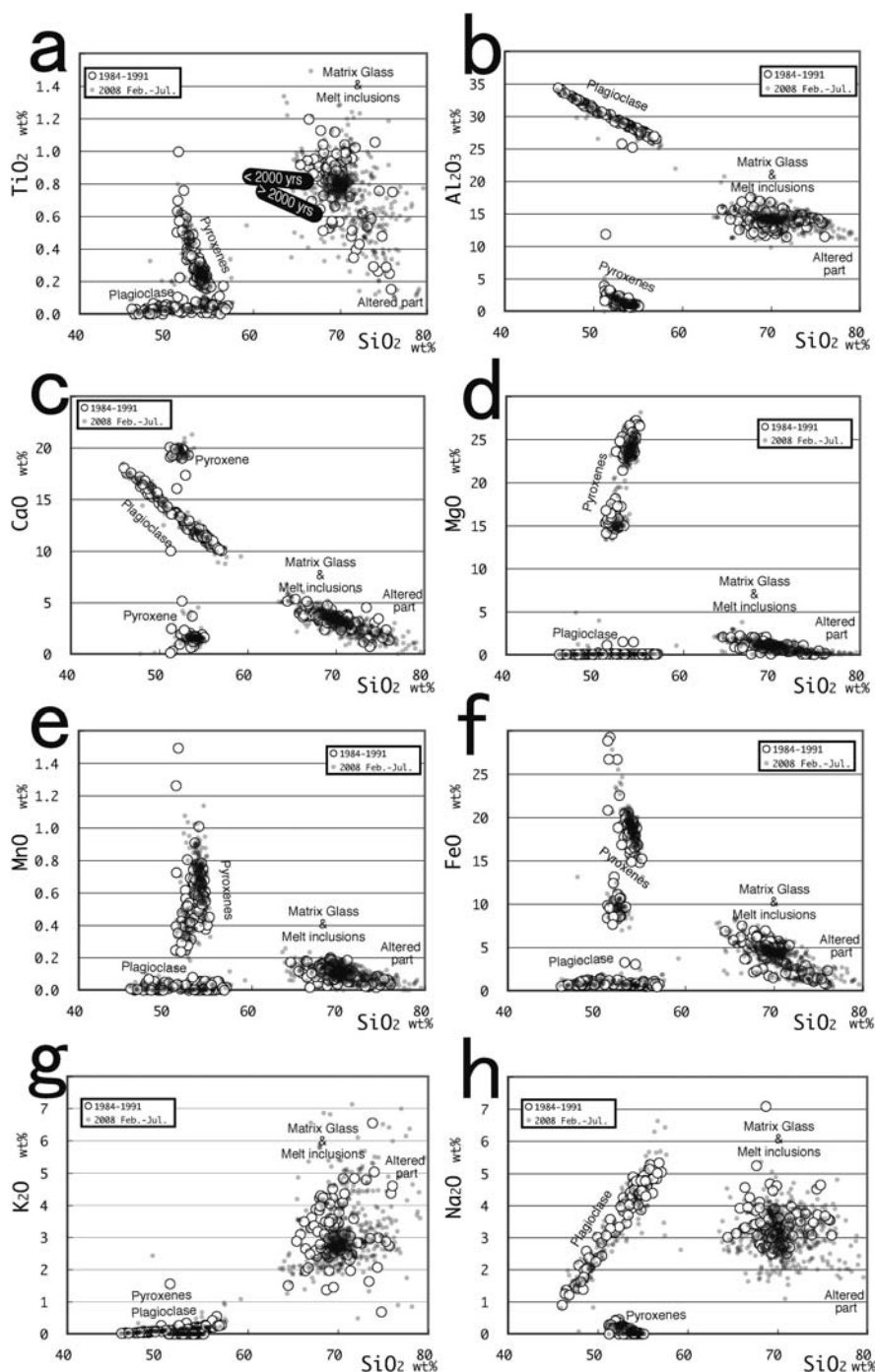


Fig. 7. Chemical composition of ash particles including fragment of phenocrysts, matrix glass, and glass inclusions in phenocrysts. Open circles represent ash samples erupted from Minami-dake Summit vent from 1984 to 1991. Gray transparent circles are those erupted from February to July 2008. Analytical figures are normalized to be dry and 100% bases. Horizontal axes represent SiO₂ wt.%. Vertical axis of plot “a” is TiO₂ wt.%. Two filled regions in plot “a” represents whole rock chemical composition data from Uto *et al.*, (2005) for those samples younger or older than 2000 years (noted as “<2000 yrs” or “>2000 yrs”, respectively). Vertical axis of plot b, c, d, e, f, g, h are Al₂O₃, CaO, MgO, MnO, FeO, K₂O, Na₂O, respectively.

Table 5. Examples of EPMA results for matrix glass and melt inclusions.

Analysis ID	MG44_019	MG44_693	MG52_029	MG52_272	MG54_077
Ash sample ID	Sakura19961017-18 (1988 0614-15)	Sakura2008 0203B	Sakura2008 0403	Sakura2008 0404	Sakura2008 0408
Target	Matrix glass on Pl	Matrix glass on Px	Matrix glass on Pl	Matrix glass of glassy particle	Matrix glass on Pl
SiO ₂	69.30	69.68	69.42	69.71	69.40
TiO ₂	0.83	0.81	0.80	0.81	0.82
Al ₂ O ₃	13.48	13.75	13.94	14.09	13.90
FeO	5.07	5.31	4.78	4.53	4.84
MnO	0.15	0.16	0.18	0.18	0.15
MgO	1.27	0.70	1.14	1.11	1.22
CaO	3.77	2.96	3.54	3.46	3.66
Na ₂ O	3.04	3.32	3.26	3.28	3.01
K ₂ O	2.97	3.23	2.81	2.75	2.68
total	99.88	99.90	99.87	99.91	99.68

Analysis ID	MG54_365	MG57_031	MG57_162	MG57_076	MG57_063
Ash sample ID	Sakura2008 0507	Sakura2008 0530	Sakura2008 0710	Sakura2008 0728	Sakura2008 0728
Target	Matrix glass on Pl	Melt inclusion in Opx	Matrix glass between Pl and Opx	Melt inclusion in Cpx	Matrix glass on Opx
SiO ₂	69.26	68.45	69.29	69.62	69.76
TiO ₂	0.81	0.83	0.79	0.70	0.81
Al ₂ O ₃	14.34	16.19	14.46	14.48	14.05
FeO	4.54	3.67	4.76	4.31	4.46
MnO	0.11	0.12	0.15	0.10	0.13
MgO	1.04	0.58	0.84	1.42	0.95
CaO	3.45	4.32	3.24	3.86	3.58
Na ₂ O	3.20	2.67	3.15	2.61	3.43
K ₂ O	2.94	2.75	3.00	2.63	2.58
total	99.69	99.57	99.69	99.72	99.73

Analytical data are normalized to be dry 100 wt. % (Cl, F, S, P are not shown). Total number of EPMA analysis is 1548. Only 10 examples are selected from the center of a cluster (at TiO₂ = 0.8 and SiO₂ = 69.5 wt. %, in Figure 7a) with expectation to represent typical of matrix glass and melt inclusions.

のと大きく違わないので、一連の火山灰を同質だと考えてよいだろう。同質の火山灰が空気中 (fO_2 = 大気に固定) で高温酸化を受けた際の色調変化の度合は、加熱温度と加熱継続時間という2つの変数によって記述できる(宮城・東宮, 2002)。温度 (low, high) と時間 (short, long) の端成分のみに限定すると、火山灰の色変化プロセスを4つのケースに分類できる (Table 6)。なお、火山灰に含まれる淡色の変質鉱物は、今注目している色調の変化には大きな影響を与えないと考えた。温度の端成分の「high」には冷却前の安山岩～石英安山岩質マグマの温度 (800～1000℃) を、「low」には火山灰が酸化しなくなる温度を想定する。温度「low」の具体例は、三宅島の2000年8月18日火山灰では200～300℃ (宮城・東宮, 2002)、玄武岩組成の角閃石の粉末では400～500℃である (Miyagi *et al.*, 1998)。加熱時間の端成分「long」には、空気中で加熱された火山灰の色の時間変化が頭打ちとなる数10～数100分 (宮城・東宮, 2002) より長い時間を

Table 6. Schematic classification of the effect of t, T, and fO_2 on color of volcanic ash.

Case	Duration	fO_2	Temp.	Color (coarse)	Color (fine)
(1)	short	high	low	green	green
(2)	short	high	high	green	red
(3)	long	high	low	green	green
(4)	long	high	high	red	red

See text for detailed explanation

考え、「short」にはより短い時間を想定する。

Table 6のケース(1)は、大気と接触する以前にマグマの温度が低下している場合である (Table 6のケース(3)も実質的には同じ)。例としてマグマが温度の高くない母岩に幅の狭い岩脈として貫入した場合や、地下水と遭遇して冷却したような場合が挙げられる。冷却後に大

気と接触すれば、火山灰は酸化されないで赤くならないだろう。Table 6 のケース (2) は、高温のマグマが大気中に放出されたのち短時間で冷える場合である。例として通常のマグマ噴火が挙げられる。このケースでは酸化反応の起きる余地がある。噴出直後の高温火山灰粒子が酸化を受ける時間の長さは、火山灰粒子の冷却速度による。一般には大きな塊ほどゆっくり冷える。しかしながら、火山灰のように直径 ($2x$) が $1\sim 0.1$ mm 程度の細粒な粒子においては、周囲の大気と熱平衡に到達するのに要する時間 ($t=x^2/D$) は、岩石の熱拡散率 D を 0.01 (cm^2/sec) とすれば (Clark, 1966), 0.25 秒 ~ 2.5 ミリ秒程度にすぎず、粒径による冷却時間の差は無視できるほど (0.2 秒程度) 小さい。したがって、噴煙中の火山灰粒子の温度は、噴煙の温度に速やかに追従するはずである。噴煙の温度は、常温の大気を大量に取り込むことと断熱膨張とによって低下する。垂水市役所が設置したウェブカメラの画像によれば、昭和火口を出た噴煙は数分以内に多量の大気と混合しているように見える。したがって、ケース (2) における酸化反応の継続時間は数分以下だと考えられる。この継続時間は、空気中で加熱された火山灰の色の時間変化が頭打ちとなる数 $10\sim$ 数 100 分 (宮城・東宮, 2002) よりも短いから、火山灰は不均質な酸化を受けるはずである。具体的には、火山灰構成粒子のうち比表面積の大きな細粒粒子がより酸化を受けて赤色化すると考えられる。Table 6 のケース (4) は、高温マグマと大気がしばらく反応した後に噴火する場合である。例として火道内に大気が侵入する場合が挙げられる。反応時間が十分あるから、細粒粒子のみならず粗粒粒子も酸化が進むと思われる。以上の分類にもとづいて、火山灰のバルクの色調と、火山灰から分離した極細粒成分の色調とを比較することにより、噴出物の温度や火口浅所におけるマグマの冷却・脱水履歴に関する考察を行なう。なお Table 6 のケース (1) \sim (4) は必ずしも排他的ではなく、ケース (4) が他のケースを上書きする可能性がある点には注意が必要である。

2006 \sim 2008 年 5 月に昭和火口から放出された火山灰は、細粒成分とバルクの色調が合致しており、粒径によらず還元的な色調を有する (Fig. 4b)。粒径によらず酸化を受けていないことから、Table 6 のケース (2) と (4) は該当せず (1) と (3) が該当する。従って、この時期の昭和火口は数 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 以下の低温火山灰を噴出し、火口温度は低かったことが示唆される。実際に、2008 年 3 月 11 日に行なわれた空中熱赤外映像観測によれば、昭和火口の火孔底には顕著な高温部が認められていない (横尾・松島, 2008)。

2008 年 5 月以降 (~ 2009 年) の昭和火口から放出され

た火山灰の細粒成分の色調はバルクよりも酸化化的であるから (Fig. 4b)、細粒成分が粗粒成分よりも酸化される (2) のケースが該当し、ケース (1), (3), (4) は該当しない。大気と接触した高温のマグマに酸化と冷却作用が同時に起こり、比表面積の大きな細粒成分がより強い酸化を受けたと考えられる。以上のように、火山灰の色に関する検討は、昭和火口の温度が時間とともに上昇したことを示した。

2008 年 5 月以降の昭和火口と 1980 \sim 90 年代の山頂火口とは、どちらが高温だろうか？ 1980 \sim 90 年代の山頂火口の火山灰も、細粒成分が粗粒成分よりも酸化される (2) のケースであり、2008 年 5 月以降の昭和火口火山灰と似た領域に色がプロットされ、 a^* および b^* の最大値もほぼ同じである (Fig. 4b)。従って、2008 年 5 月以降の昭和火口の噴出温度は、1980 年代の山頂火口と同程度に高い可能性があるが、山頂火口を越える程ではないのだろう。

ところで、粉体の色調 (拡散反射光の波長強度分布) は、たとえ粉体の構成物が化学的に均一であったとしても、粉体の粒度によっても変化する Barron and Torrent, 1986; Kubelka and Munk, 1931)。そのため、バルク火山灰と極細粒成分との間に見られた色の違いが、単に粒度の違いを反映している可能性もある。しかしながら桜島の火山灰に関しては、バルクの色と微粉化された同じ火山灰の色はほぼ同じであるから (Yamanoi *et al.*, 2008)、色の違いを生じさせた主な要因は粒度組成以外にあると考えてよいだろう。火山灰粒子を構成する粗粒な粒子と極細粒な粒子とで鉄の酸化還元状態が異なる事が、色の変化の主な原因だと考えてさしつかえないだろう。

4-2-3 ガラス質発泡粒子に関する考察

1980 \sim 90 年代に桜島の山頂火口から放出された火山灰は微結晶に乏しいガラス片を殆んど含まない。これに対し、2008 年 2 \sim 4 月の昭和火口噴出物はガラス片を比較的少量に含み、その量は時間とともに減少し、2008 年 7 月には 1980 年代の山頂噴火とほぼ同量となった (Fig. 6 b)。この観察事実は、2008 年 2 \sim 4 月の昭和火口において、石基の結晶化を抑える何らかの作用が働いた事を示している。発泡ガラス片の含有量の経時変化は、昭和火口における何らかのプロセスが、時間とともに 1980 年代の山頂噴火のものに類似してきたことを示唆している。

火山灰に含まれるガラス質片量の増減は、噴火のどのようなプロセスの違いを反映しているのだろうか？ 桜島においては最近 2000 年間においてマグマの化学組成には大きな変動はない (Fig. 7a および宇都・他, 2005)。マグマのバルク化学組成が同じ場合、熱力学的平衡状態におけるマグマの結晶度は、メルトの温度と含水量が低

くなるほど高くなる。しかしながら、噴火現象は限られた時間で完結するから、噴出物は熱力学的平衡状態を達成し難い。マグマ中の結晶成長速度は実効的な過冷却の大きさによって系統的に増加するが、過冷却度が大きすぎれば結晶作用自体が起こりにくくなり、噴出物の結晶度は逆に低下する (Cashman and Blundy, 2000; Suzuki *et al.*, 2006; Swanson, 1977)。また、マグマの飽和含水量は圧力が低くなるほど低下するため (例えば Miyagi *et al.*, 1997)、マグマの減圧は結晶化を促進するが、減圧が急速である場合にはメルト中の水が脱水できない (Mangan and Sisson, 2000) ために、石基の結晶化は抑制される。

したがって結晶度の低い火山灰粒子を生じるための条件として、(1) マグマの冷却速度が大きい事と、(2) マグマの減圧 (上昇) 速度が大きい事が考えられる。但し以下で述べるように、石基の結晶化を抑制するこれら2つの作用の間にはそれらの作用の及ぶ空間的広がりには大きな違いがあるうえに、これら2つの作用の起きるタイミングも最終的な結果 (火山灰に含まれるガラス片の量) を左右するから、注意が必要である。(1) の冷却作用はマグマ内の熱拡散を伴うため、外界との温度差だけでなくマグマ塊の大きさにも左右される。たとえ火道壁が十分低温でもマグマ塊の大きさが数 m 以上ならば、熱拡散の制限により、マグマが急冷を受ける部位は母岩との接触部付近に限られる。これに対し (2) の減圧作用は、圧力伝播の速度が熱伝導に比べて著しく早いことから、火道内のマグマの大部分が影響を受ける可能性がある。(1) と (2) がほぼ同時に作用する例としては、ある程度の深さにおいて高温のマグマと地下水が爆発的に反応し、マグマ塊が数 cm 程度の大きさに分割されつつ急速に噴火するような場合が挙げられる。(1) の急冷作用を欠くが (2) の急減圧作用は被る例としては、ゆっくり減圧 (上昇) し微結晶を晶出させたマグマが高温のまま地表付近で破碎する場合が挙げられる (但し噴出後の火山灰は急冷されるとする)。微結晶を晶出した後のマグマを急減圧しても、ガラス質片は得られそうにないが、より大きな深度で (微結晶を晶出する前に) 急減圧と破碎が起きたなら、微結晶量の少ない粒子が生じる可能性がある。(2) の急減圧作用を欠くが (1) の急冷作用は受ける例としては、冷たい母岩との接触などにより地下で急冷作用を受けガラス化したマグマの一部が、周囲のマグマの流れに乗って上昇する場合が挙げられる。この場合一旦ガラス化したマグマは、周囲のマグマによる再加熱時間が長ければ失透 (結晶化) あるいは再熔融する可能性があるだろう。このように、(1) か (2) のいずれか一方の作用が起きることは、ガラス質な火山灰粒子を生じるための十分条件ではないと思われる。逆に、噴出した

火山灰中にガラス質粒子が見られなくとも、急冷あるいは急減圧の作用がないことの証拠とはならないことに注意する必要がある。これに加えて、結晶化やガラス化がマグマの流動性を著しく減少させる点にも考慮が必要である。地下で流動性を失ったマグマを噴出させるには、何らかの再流動化作用が必要である (Dingwell, 1996)。

以上の考えのもとに、火山灰に含まれるガラス質片量の時間変化を解釈する。桜島の火山灰構成粒子の大半を占める褐色で微結晶に富むブロック状の粒子の存在は、マグマが高温のまま地表付近までゆっくり減圧 (上昇) し微結晶を晶出したことを意味する。桜島では多量の火山ガスとともに火山灰を爆発的に放出する活動が頻発しているが、これは流動性を失ったマグマが破碎作用により再流動化した結果なのだろう。昭和火口の再活動過程の初期 (2008 年 2~4 月) に放出された噴出物に微結晶の少ない発泡ガラス片が比較的多く含まれるという事実は、減圧 (上昇) により微結晶が晶出する前のマグマが、冷たい火道壁と触れて急冷されたのちに噴火したか、あるいは何らかの理由により急上昇して噴火したことを示す。2008 年に昭和火口から放出された火山灰は基本的に結晶質であり、結晶質片に対するガラス質片の量比が半数を越えない (5 月 7 日は除く) という事実は、ガラス片の成因がマグマの急上昇よりも部分的な急冷によるとする考えを支持する。またガラス片の量比が時間とともに系統的に減少したという事実は、2008 年の断続的な活動によって昭和火口の火道壁の温度が次第に上昇したために、マグマを急冷する能力が低下したためだと考えることができる。数日以上休止後の最初の噴火活動で放出された火山灰にはガラス片が比較的多く、噴火が継続するにつれ減少するという事実も、高温のマグマが連続して通過した事により火道壁の温度が上昇し、マグマを冷却する能力が低下したためだと考えることができる。昭和火口下の火道壁の温度が時間とともに上昇したという考えは、昭和火口から放出された火砕物の色調にもとづく結論 (2008 年 2 月から 5 月にかけて、火口から放出された時点における噴出物の温度が上昇した) とつじつまが合う。

5. まとめ (桜島昭和火口における噴火推移)

これまで述べた観察結果を列挙すると、以下のようになる。

1) 火山灰の細粒成分中の変質鉱物量 (硫酸カルシウム鉱物やソーダ明礬石) は 2006 年~2007 年には少なく、2008 年 2 月には急激に増加し、その後 2009 年 1~2 月にかけて時間とともに減少して硫化鉱物は認められなくなった。

2) 2008 年 2~4 月のバルクの火山灰の色調は還元的であったが、2008 年 5 月以降は、1981~1990 年の山頂火口のものと同程度に酸化的な色調を示すようになった。

火山灰細粒成分の色調は、2008 年 2~4 月はバルクの色調とほぼ同じであったが、2008 年 5 月以降はバルクよりも酸化的な色調を示すようになった。

3) 2008 年 2~4 月火山灰には淡褐色のガラス片が比較的多く含まれていたが、その後は減少し、石質岩片の量が増え、1980~90 年代の南岳山頂火口（以後、山頂火口）のものに類似するようになった。

4) 1980~2008 年噴出物の斑晶およびガラス化学組成には系統的な変化が認められない。

以上の観察結果は、2008 年 2 月以降、噴火の進行とともに昭和火口下における噴火プロセス（マグマの冷却・脱ガス・破碎）が 1980~90 年代の山頂火口と類似したものに移行していることを示している。

桜島では 2006 年に南岳東斜面の昭和火口下に貫入したマグマあるいは火山性流体によって水蒸気噴火が生じ、比較の変質の少ない母岩が放出され、この時開いた割れ目の周囲では新たな熱水変質作用が始まったものと考えられる (Fig. 8a; 2006 年 6 月と 2007 年 3 月の活動)。以後、火山性流体による熱水変質作用は昭和火口下の火道周辺に硫酸カルシウム鉱物・ソーダ明礬石・自然硫黄といった熱水変質鉱物を沈殿し続けたと思われる (Fig. 8b; 2007 年 5 月以降)。2008 年 2 月の噴火においては、昭和火口に供給されたマグマが、恐らく火山体内に存在する地下水との作用によって爆発的な噴火を引き起こし、母岩を破碎して火道を拡大させるとともに、熱水変質鉱物に富む比較的低温の噴出物を放出させたのだろう (Fig. 8c)。以後、昭和火口の断続的な噴火活動に伴って恐らく火道は徐々に拡大し、これにより地下からのマグマ供給量が増加したために、2008 年 5 月以降の噴火においては火口浅所の温度上昇が顕著となり、高温の噴出物を放出するようになったのだと考えられる (Fig. 8d)。

本研究は火山灰の水溶性付着成分、変質鉱物、色、粒度、構成粒子の観察結果にもとづき、2008 年の昭和火口の再活動過程におけるマグマ噴出プロセス（特に火道周辺環境）の時間変化に関する考察を試みたが、様々な課題が残された。マグマの深度（浅い/深い）、温度、冷却や上昇の速度（速い/遅い）が定量性を欠いた。噴出物の結晶度に関する議論は、マグマは地下から地表へと一方通行で上昇することを想定した。しかしながら非噴火時においても多量の火山ガスを放出し続けている桜島においては火道内マグマ対流 (Kazahaya *et al.*, 1994) が起きている可能性がある。火道内の双方向の流れは、破碎前のマグマの温度・圧力履歴をより複雑にするはずである

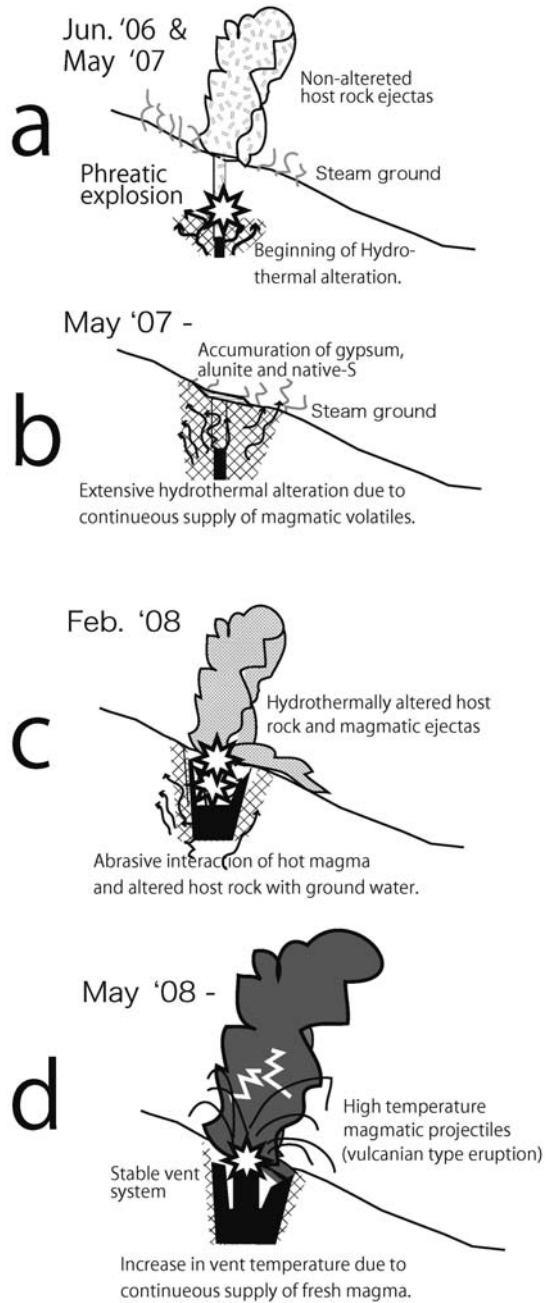


Fig. 8. Schematic illustration of the re-activation processes of Showa volcanic vent at Sakura jima volcano.

から、噴出前のマグマに関する情報（鉄チタン鉱物の拡散プロファイルや斑晶ガラス包有物の組成など、例えば Nakamura, 1995）を更に検討する必要があるだろう。また、現実的な問題として、桜島の火山灰においては本質岩片と類質岩片の区別が難しく、ある火山灰の構成粒子の量比がその噴火のマグマ破碎プロセスを反映しない可能性がある点にも、注意を要する。

謝 辞

火山灰試料の処理にあたり、及川里絵氏には実作業を手伝っていただいた。桜島の噴火活動状況を把握するにあたり、監視カメラを設置運用している垂水市役所および大隅河川国道事務所、そして画像の編集に際し（特定非営利活動法人）阿蘇ミュージアムの吉田照光氏にお世話になった。産業技術総合研究所の佐藤鋭一氏には、草稿の不備を指摘していただいた。エスカ地質の上野龍之氏には図面の不備を指摘していただいた。森林総合研究所の宮縁育夫氏と匿名の査読者、そして編集担当の伴雅雄氏には、細部にわたる不備の指摘と建設的な意見をいただいた。以上の方々に感謝する。

引用文献

相澤広記・神田径・井口正人・小川康雄 (2008) MT 連続観測による桜島火山浅部の比抵抗変化。火山学会予稿集, 2008 年。P42, 134p.

Anderson, O.L. (1978) The role of magma vapors in volcanic tremors and rapid eruptions. *Bull. Volcanol.*, **41**, 341-353.

Barron, V. and Torrent, J. (1986) Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *J. Soil Sci.*, **37**, 499-510.

Cashman, K.V. and Blundy, J.D. (2000) Degassing and crystallization of ascending andesite and dacite. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, **358**, 1487-1513.

Clark, S.P.J. (1966) Thermal conductivity. In *Handbook of physical constants. Geol. Soc. Am. Mem.*, **97**, 460-482.

Dingwell, D.B. (1996) Volcanic dilemma: flow or blow?. *Science*, **273** 1054-1055.

井口正人・横尾亮彦・為栗 健 (2008) 桜島昭和火口噴火に伴う地盤変動の特徴。火山学会予稿集, 2008 年。B26, 78p.

加藤幸司・山里 平・増田与志郎 (2008) 桜島昭和火口の噴火活動と噴火に伴う震動波形について。火山学会予稿集, 2008 年。P38, 130p.

Kazahaya, K., Shinohara, H. and Saito, G. (1994) Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit. *Bull. Volcanol.*, **56**, 207-216.

風早竜之介・森 俊哉 (2008) 紫外線カメラを用いた桜島、南岳火口及び昭和火口の火山噴煙二酸化硫黄イメージング及びその定量。火山学会予稿集, 2008 年。P39, 131p.

風間卓仁・井口正人・山本圭吾・菅野貴之・田中愛幸・松本滋夫・孫文科・大久保修平・高山鐵郎 (2008) 桜島火山における絶対重力連続観測。火山学会予稿集, 2008 年。P41, 133p.

Koyaguchi, T. (2005) An analytical study for 1-dimensional steady flow in volcanic conduits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **143**, 29-52.

Kubelka, P. and Munk, F. (1931) Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Zeitschrift fur technische Physik*, **12**, 593-620.

京都大学防災研究所 (2008) 第 10 回桜島火山の集中総合観測 (平成 19 年 6 月~平成 20 年 3 月), 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター。

Mangan, M. and Sisson, T. (2000) Delayed, disequilibrium degassing in rhyolite magma: decompression experiments and implications for explosive volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **183**, 441-455.

Melnik, O., Barmin, A.A. and Sparks, R.S.J. (2005) Dynamics of magma flow inside volcanic conduits with bubble overpressure buildup and gas loss through permeable magma. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **143**, 53-68.

宮城磯治 (2007) 肘折火山: 噴出物の層序と火山活動の推移, 火山, **52**, 311-333.

宮城磯治・東宮昭彦 (2002) 色変化に基づく火山灰加熱温度の推定: 三宅島火山 2000 年 8 月 18 日火山弾の着地温度への適用, 火山, **47**, 757-761.

宮城磯治・鹿児島地方気象台 (2009) 桜島 1983~2008 年火山灰の反射電子像。地質調査総合センター研究資料集, no. 489.

Miyagi, I., Yurimoto, H. and Takahashi, E. (1997) Water solubility in albite-orthoclase join and JR-1 rhyolite melts at 1000°C and 500 to 2000 bars, determined by microanalysis with SIMS. *Geochem. J.*, **31**, 57-61.

Miyagi, I., Matsubaya, O. and Nakashima, S. (1998) Change in D/H ratio, water content and color during dehydration of hornblende. *Geochem. J.*, **32**, 33-48.

Nakamura, M. (1995) Continuous mixing of crystal mush and replenished magma in the ongoing Unzen eruption. *Geology*, **23**, 807-810.

Ryan, M.P. (1987) Neutral buoyancy and the mechanical evolution of magmatic systems. In *Magmatic processes: physicochemical principles (Mysen, B.O. ed.)*, *Geochem. Soc. Special Publ.*, **1**, 259-287.

Suzuki, Y., Gardner, J.E. and Larsen, J.F. (2006) Experimental constraints on syneruptive magma ascent related to the phreatomagmatic phase of the 2000 A.D. eruption of Usu volcano. *Japan. Bull. Volcanol.*, doi 10.1007/s00445-006-0084-3.

Swanson, S.E. (1977) Relation of nucleation and crystal growth rate to the development of granitic textures. *Amer. Mineral.*, **62**, 966-978.

高田 亮 (1994) 珪長質マグマの発生と上昇。マグマ溜まり, 地質学論集, **43**, 1-19.

Takeuchi, S. (2004) Precursory dike propagation control of viscous magma eruptions. *Geology*, **32**, 1001-1004.

宇都浩三・味喜大介・Hoang NGUYEN・周藤正史・福島大輔・石原和弘 (2005) 桜島火山マグマ化学組成の

- 時間変化. 京都大学防災研究所年報, **48B**, 1-7.
- Yamanoi, Y., Takeuchi, S., Okumura, S., Nakashima, S. and Yokoyama, T. (2008) Color measurements of volcanic ash deposits from three different styles of summit activity at Sakura jima volcano, Japan: conduit processes recorded in color of volcanic ash. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.11.013.
- 横尾亮彦 (2008) 桜島における熱赤外映像観測. 火山学会予稿集, 2008 年. P40, 133p.
- 横尾亮彦・松島喜雄 (2008) 桜島火山における空中熱赤外映像観測. 第 10 回桜島火山の集中総合観測 (平成 19 年 6 月～平成 20 年 3 月), 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター, 131-136.
- 横尾亮彦・井口正人・石原和弘 (2007) 熱赤外映像観測からみた桜島南岳山体斜面の熱活動. *火山*, **52**, 121-126.
- Zimanowski, B., Buttner, R., Lorenz, V. and Hafele, H.-G. (1997) Fragmentation of basaltic melt in the course of explosive volcanism. *J. Geophys. Res.*, **102**, 803-814.

(編集担当 伴 雅雄)