2010年までの桜島昭和火口の噴火活動について

横尾亮彦*,**・井口正人*・為栗 健*・園田忠臣*

* 京都大学防災研究所** 現所属:東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

2006年に58年ぶりに再開した桜島昭和火口の噴火 活動は、2010年2月現在も衰えることなく高い活動状 態を維持しており、今後のますますの活発化が懸念 されている¹。本稿では、これまでに著者らが実施し てきた観測結果を中心に、噴火再開以後の約3年半に わたる活動状況推移について簡単にまとめる。

2. 2006年以前の昭和火口の活動状況

鹿児島県の桜島火山南岳東斜面の標高およそ800 m地点には、1939年10月の噴火活動で形成され、1946 年の昭和噴火で約0.2 km³ (石原・ほか, 1981)の溶岩 を流出した昭和火口がある(Figs. 1 and 2)。

1939年は、噴火開始当初数日間の活動は非常に強いものであったものの、活動度は漸次落ち着いていき、およそ半月後には噴火が終息した(鹿児島測候



Fig.1 昭和火口の位置図。主な観測点を3レター (SVO: 桜島火山観測所、KUR: 黒神観測室、ARM: 有村観測坑道(国土交通省大隅河川国道事務所)) で記す。

所,1940)。当時の火口サイズは130 m×60 m、深さ100 mほどであった (本田,1940)。同火口では、これ以後 1948年まで、数ヶ月程度の休止期をはさみながらも、 毎年のように噴火活動が繰り返され、1946年3月には 黒神・有村両地区集落の一部を埋没させた昭和溶岩 流が流出した (鹿児島測候所,1951)。その後、1948 年7月の噴火 (字平,1994)を最後に、昭和火口におけ る噴火活動は2006年までなく、この間、昭和火口に 着目した活動報告文等は特に知見しない。



Fig. 2 (a) 2006年1月12日、(b) 2009年3月10日におけ る桜島南岳山体斜面。いずれも国土交通省ヘリ「お おすみ」から撮影(2006年は大久保綾子氏撮影)。 (a)の赤線部は2006年の噴火開始地点を示す。昭和 火口周囲の小黄色点は地形対応点を表す。

¹ 例えば平成 22 年 2 月 2 日気象庁報道発表(火山噴 火予知連絡会会長会見)など。

昭和火口周辺の熱活動は、1976年までは南岳山体 斜面における熱異常域の中で、最も熱放出率が大き かったものの(加茂・ほか,1980)、その後、1992年ま での間は、次第に地表温度が低下する傾向にあった (加茂・ほか,1995)。ところが、2006年の噴火再開に先 立つ2005年末頃から、昭和火口すぐ脇の南側斜面に 昇華物の顕著な付着領域が目立ち始め、また、2006 年2月下旬ころからは、昭和火口近傍での噴気活動が 活発化し始めた(横尾・ほか,2007)。これを踏まえて 実施した2006年3月、5月の熱赤外映像観測結果には、 1992年の観測結果に比べて昭和溶岩流上の一部の熱 異常が鮮明化しているなど(Fig.3)、少なくとも昭 和火口近傍を含む南岳南東斜面の広い領域における 熱活動の活発化が認められた(横尾・ほか,2007;横 尾・井口,2008)。

地震活動は、2006年に入ってからB型地震が増え始 め、2006年3月以降になるとその振幅が次第に大きく なった(井口・ほか,2008a)。噴火に向けた直前の準 備は、このころから始まっていた可能性がある。ま た、さらに直接的に噴火再開に関連する現象として は、C型微動の増加(井口・ほか,2008a)も考えられ るのかもしれない。しかし、GPSによる地盤変動観 測データは従来どおりの変動パターンを示している など(井口・ほか,2006)、既往の地球物理観測結果か らは、噴火活動再開を示唆するような顕著なシグナ ルは検出できなかった。

3. 2006年以後の昭和火口の噴火活動

2006年6月に噴火が再開した昭和火口では、その後、 幾度かの休止期間をはさみながらも、噴火は断続的 に発生し、徐々に活動度も高まってきている。特に 2009年は、京都大学防災研究所附属火山活動研究セ ンターの判定基準²に合致した「爆発」的噴火は583 回に達した(うち3回は南岳山頂火口の噴火)。2009 年4月以降は、個々の噴火規模の消長はありながら も、9ヶ月以上にわたって噴火が毎日発生している。

各活動期に繰り返される(爆発的な)噴火活動に よって、昭和火口の形状・サイズは年を経るごとに 変わってきており、2010年2月現在、火口の直径はお よそ300 m弱に達している(Fig. 4)。また、ヘリコ プターや航空機から繰り返し撮影した斜めおよび垂 直空中写真から判断すると、火口は年々深くなって いるようである。2008年11月に大隅河川国道事務所



Fig. 3 (a) 1992年4月16日黒神観測室から撮影した熱 赤外画像 (加茂・ほか, 1995)。図中の白矢印は2006 年6月4日に開口する火孔位置を、右のカラースケー ルは表示温度 (℃)をそれぞれ示す。 (b) 2006年3 月29日地獄河原から撮影。特に白色点線で囲まれた 昭和溶岩流上の熱異常部が1992年に比べて活発化し ていた。

が実施した航空機によるレーザー測量では、昭和火 口の深さは約70mに達しており、これは2008年2月の 段階よりも55mほど深い(大隅河川国道事務所,私 信)。他方、火口外の周囲地形状況は、南岳山頂火 口側の斜面で侵食が進む様子が見られるほかは、特 段大きな変化は認識できない(Fig.4)。

以下、各活動期について順に記す。

3.1 2006年噴火(6月4日~6月20日)

2006年6月4日午前、昭和火口跡地形内(Fig. 2a) から噴火活動を開始した。顕著な地震・空振を伴わ ないごく小規模な噴火であるため、噴火開始時刻の 特定は難しい(井口・ほか,2008a)。

2006年の噴火活動は、数分から30分おきに、繰り 返し噴煙を放出することで特徴付けられる。個々の 噴火は、コックステール状ないしはカリフラワー状 のジェット噴煙が5~15 m/sの速度で火口上空数10~ 100 mほど上昇することで開始する (Yokoo and Ishihara, 2007)。まれに、火口内から放出される白色 水蒸気に徐々に火山灰が含まれ、そして、これが希 薄な噴煙へと変化して弱々しく噴出し続ける活動も あった。このタイプの噴火活動は1時間以上継続する ことがある。いずれの噴火の場合も、地震・空振は 観測検出限界程度かそれ以下である (井口・ほか,

²昭和火口の噴火は、有村観測坑道(ARM; Fig. 1) において振幅 10 Pa を超える空振を伴った噴火を 「爆発」的噴火とする(南岳山頂火口の噴火は桜島 火山観測所(SVO; Fig. 1)において振幅 5 Pa)。



Fig.4 黒神観測室から撮影した昭和火口周辺部の変化。(a) 2006年8月23日、2006年の噴火活動により形成され た火口(黒色太線部)は丸まったハート型で、直径はおよそ120 m。(b) 2007年6月13日、2007年の噴火活動 により南側(画像左側)へ拡大。北側への拡大は小さい。(c) 2008年3月5日、2008年2月の爆発的噴火により 新たな火孔が火口内北側(画面右側)に形成。(d) 2008年10月16日、2008年4月以降の断続的な噴火活動に より北側谷の火口縁がわずかに拡大。(e) 2009年4月13日、谷部における火口縁拡大が続く。(f) 2009年8月20 日、北側の火口縁が拡大しつつあり、差し渡し幅は2006年のほぼ2倍に達する。(g) 2010年1月2日、さらに 北側への拡大があったほか、火口東側(画像手前側)へも拡大が認められる。

2008a)。

6月9日以降、上昇する噴煙の一部が崩壊し、火口 縁から100m程度の距離まで火砕物が流下する(あふ れる)現象が頻繁に発生した。総発生回数は65回に 上る (Yokoo and Ishihara, 2007)。6月14日19時前の噴 火では火口北側の谷筋に沿って400m程度の距離を 流れ下った。

6月4日の噴火は、旧来の昭和火口跡の一部、標高 800 mほどのところに開口した火孔から行われた。そ して6月9日までの噴火活動によって、直径120 mほど の丸まったハート型の火口に成長した(Fig. 4a)。 その後、終息までの噴火活動期間中、噴出中心位置 が若干南側に移動したほかは、火口の形状、サイズ に大きな変化は見られなかった。

3.2 2007年噴火(5月15日~6月22日)

2006年噴火活動の終息から約11ヶ月を経た2007年 5月15日夜、昭和火口において噴火が再開し、6月22 日朝までのおよそ1ヶ月にわたって噴火が繰り返さ れた。映像観測によれば、本期間中には少なくとも



Fig. 5 2007年5月24日10時19分の噴火。鹿児島県消防・防災ヘリ「さつま」より撮影。火口内南側(画面左奥側)に噴出位置があることがわかる。

578回の噴火発生が確認された (横尾・ほか, 2008)。

5月15日から最初の数日間の噴火活動は、高度数 100 m程度の噴煙を断続的に放出し続けるものであ った。黒神観測室(KUR、視線距離3.5 km; Fig. 1) から撮影した噴煙の見かけ最高温度は40~60℃であ り、2006年の結果(井口, 2006)と大差ない。これら の噴火では目立った空振は観測されなかった。火道 を埋めていた2006年噴火堆積物等を放出し、5月19 日から始まる次のステージのための通路を形成して いた時期だと解釈された(横尾・ほか, 2008)。

その後の5月19日未明から6月5日までのおよそ2週 間は、(それまでに比べて)やや規模の大きい噴火 が散発的に数多く発生することで特徴付けられ、 2007年噴火期の活動最盛期と位置づけられる (Fig. 5)。噴煙上端部の上昇速度は火口出口部で30~50 m/s、 噴火開始20秒を経ても15 m/sであった (横尾・ほか, 2008)。噴火映像のPIV試行解析結果を考えれば、実 際は、この2~3倍程度の火口噴出速度に達していた 可能性がある (石峯・ほか, 2009)。これらの噴火に伴 って発生する空振は比較的明瞭な圧縮相、その後に 膨張相が続く。しかし、圧縮相の最大振幅は、昭和 火口に最も近い観測点であるARM (Fig.1; 伝播距離 2.3 km) においても1~2 Paと小さい。 噴煙温度は80 ~160℃と比較的高温であり、KURに設置した高感度 カメラによる、夜間や早朝の時間帯の噴火映像には、 火口から200 m程度の高さまで火柱状に噴出物が放

出される様子が確認できた。また、これらの時期に は微弱な火映が同映像上で連日観測された。比較的 浅い位置までマグマが上昇していたものと考えられ る。

映像上で火映が観察できなくなった6月5日ころか らは、噴火活動はややおとなしくなり、弱々しく灰 を放出するタイプへと変化した。これらの灰放出に 伴い、継続時間が数分から10数分におよぶ、1 Hz近 傍に明瞭なスペクトルピークをもつ単調微動型空振 が顕著に観測されるようになった。空振の卓越周波 数(~1 Hz)と、噴煙運動等の噴火表面現象の卓越周 期には、それほど明瞭な対応性は確認できない。こ のような空振の発生源を単純な共鳴体だと想定すれ ば、マグマ破砕面から火口出口までの長さは30~100 m程度だと考えられる (横尾・ほか,2008)。6月8日~ 6月20日の噴煙温度は20~30℃程度と顕著に低く、昭 和火口周囲の噴気温度と大差ない。6月8日~19日に かけては、噴煙柱の部分崩壊に伴って発生する流走 距離100 m以下の極小規模な火砕密度流が観察され たが、その発生回数は5回であり、2006年噴火の65 回と比べると非常に少なく、発生頻度も低い。

2007年噴火によって、昭和火口は南側へ拡大した (Fig. 4b)。噴煙の噴出開始位置は、昭和火口内で 南北方向に時々変化していたことから、この時期の 火孔は単一でなく、複数の火孔が割れ目状亀裂によ ってつながっていたものと推定される。実際、6月11 日の斜め空中写真(福岡管区気象台・鹿児島地方気 象台,2007)では、複数の火孔が存在していることが わかる(割れ目でつながっているかまでは判断でき ない)。このころの火口深度は、空振・映像の観測 結果から20~30 mほどであったと推定されており (横尾・ほか,2008)、当時の上空からの観察結果とも矛 盾しない。

3.3 2008年噴火第1期(2月3日~2月6日)

7.5ヶ月間の休止期を経た2008年2月3日未明、昭和 火口は再度噴火を開始した。天候不良かつ夜間にお ける活動再開であったが、2007年夏にKURに設置し た熱赤外映像観測システム (Yokoo, 2009) によって、 噴火の様子を捉えることに成功した。今回の噴火活 動は2月6日までのわずか4日間と短いが、これまでの 2006年、2007年の噴火スタイル・規模とは一線を画 すものであった。すなわち、ARMにおいて10 Paを超 える空振振幅の爆発的噴火が複数回発生し、これら には流下距離1.5 kmほどの高温火砕流が伴った。

2月3日10時18分の噴火では、噴石が4合目まで飛散 し、ARMでの空振は16 Paを記録した。この噴火が昭 和火口で発生した初めての爆発的噴火である。500 m 程度の火砕流発生も認められ、その流下領域では、 地表水が蒸発して白煙を上げる様子が観察された。 噴煙が非常に高温であったことを示唆している(観 測値は110℃以上(振り切れ))。同日15時54分に発 生した噴火でも、火口東側へおよそ1.3 km流下する 火砕流を伴った(Fig. 6)。2月6日10時33分の噴火は 空振振幅33 Paを記録した爆発的噴火であるが、噴煙 はほとんど放出されず、高圧ガスの解放現象のみが 発生したようである。同日11時25分の噴火には約1.5 kmの距離まで流下した火砕流を伴った(Fig. 7)。空 振振幅は145 Paであった。この噴火により、火口北 側谷筋との地形障壁の一部が破壊され、顕著に北側 へ拡大した(Fig. 4c)。これらの爆発地震は初動が 不明瞭なため、正確な震源を決定することは難しい。 しかし、南岳山頂爆発の震源領域と明らかに区別さ れる領域には求まらない(為栗・ほか, 2008)。

2月5日日中はほぼ断続的に灰放出が行われるなど、

前述の爆発的噴火4例以外にも、噴火は多数発生した。 また、2月3日7時ころのように、高温ガス(30~50℃) だけが放出される特異な現象も観察された。噴火期 間には含めていないが、2月18日夜には、ごく小規模 な前駆地震を伴う瞬時的な灰放出と思われる現象が 発生している(付録)。

なお、活動終息の約1ヵ月後(3月11日)に実施し た上空からの観測では、すでに活動火孔は堆積物等 によって埋まっている状態であり、顕著な高温部は 認められなかった(横尾・松島, 2008)。

3.4 2008年噴火第1期以降(2008年4月~現在)

2008年4月以降の噴火活動は、前2回のような半年 ~1年程度といった明瞭な休止期間がほとんどない まま進行している(Fig. 8)。本稿では、説明都合上、 次の4つの期間に小区分する。観測記録等の見直しが

Fig. 6 2008年2月3日15時54分の噴火の様子。NHKの 協力の下、KURに設置した映像システムにより記 録。画面左下にはGPSに同期させた時刻情報をイ ンポーズしている。(a)噴火直前の様子。昭和火 口からは濃い白色のガス、水蒸気の放出が認めら れる。(b)~(c)噴火開始直後の様子。最初の1秒間 の噴煙上昇速度は54 m/s。(d)東側斜面(画面下 方;時刻情報の背後)へ火砕流が流下し始めてい る。また、その周り地表面では水蒸気が立ち昇る (矢印部)。(e)流下域全体から白色水蒸気が立 ち上る(矢印部)。(f)火砕流堆積物分布の様子 (同日17時14分に鹿児島県消防・防災へリ「さつ ま」より山本圭吾氏撮影)。



Fig. 7 2008年2月6日11時25分の噴火の熱赤外画像(KURから撮影)。時刻情報は各画像右下に示した。(a)噴 出開始1秒前の熱画像。(b)~(h)噴出開始から5秒、10秒、15秒、20秒、25秒、30秒、4分後の画像。噴出直後、 噴煙温度は火口部で260℃以上(振り切れ)を記録。東側への火砕流流下開始時には先頭部で230℃程度、 流下中は160~170℃程度である。噴火開始4分後の火砕流堆積物は最高温度が90℃ほどであるが、その後は、 約2.5℃/分の割合で温度が低下していく。



Fig. 8 (a) KURから観測した昭和火口部分での噴煙温度(2010年2月7日まで;但し、2009年5月20日~11月4日 は欠測)。欠測期間前後でのプロットの色の違いは、使用機材(NEC三栄 TH7102MV:黒色、NEC/AVIO TS9230:水色)および、判断基準の違い(温度変化の様子を考慮したマニュアル読取:黒色、直前に比べ て25℃以上の温度上昇を噴火基準とした自動判定:水色)を表す。(b) ARMにおける空振振幅値(2010年1 月25日まで)。2009年11月16日までのデータはイベントごとのマニュアル読取値(正圧のみ:赤色)に対 して、同年10月1日以降のデータは桜島火山観測所の地震判定処理プログラムの出力値(正圧・負圧の別な く10 Pa以上:黄色)をそのままプロットしている。(c) 有村橋そばの昭和溶岩端部の噴気温度(2009年12 月25日まで;日平均値)。観測開始は2009年7月8日。なお、全パネルに共通する灰色網掛け部は噴火が発 生していた期間を表す。

まだ不十分であるため、ここでの記述はあくまでも 目安としての位置づけにしていただきたい。

(1) 2008年噴火第2期(4月3日~6月14日)

2008年噴火第1期の終息から約2ヵ月後の、2008年4 月3日昼前に灰放出で再開した噴火活動は、これ以後 6月14日までのおよそ10週間継続した。

明瞭な空振や噴石の飛散を伴うブルカノ式噴火に 区別されるものと、2006年噴火や2007年噴火のよう な間欠的な灰放出活動といった、大きく分けてふた つのタイプの噴火があり、映像により視認できた噴 火イベントの総計は839回にのぼる (Yokoo, 2009)。 噴火の平均継続時間は14分であったが、4月23日には 5時間以上にもわたって断続的に噴煙が放出される 様子も観察された。

4月から6月初旬にかけてはKUR映像中に火映が観 察された(Fig. 9a)。防災科学技術研究所ARTSによ って上空から観測された、4月8日の火口内最高輝度 温度は435℃であり(實渕, 2008)、火口底が高温状態 であったことがわかる。夜間の噴火では赤熱岩片が 放出される様子もたびたび観察された(Fig. 9b)。



Fig. 9 (a) 2008年4月6日明け方に観察された微弱な 火映。(b) 2008年6月13日22時59分の噴火(ARMで 20.4 Pa)。(c)~(d) 2008年4月14日14時16分の噴火に 伴う火砕密度流。温度は非常に低く30℃程度でし かない。噴火開始の約4分後には、中岳のあたりま で先端部が到達した(北側への拡大先端部を矢印 で示した)。

噴煙の一部崩落や火口からの直接溢流による火砕密 度流(Figs. 9c and 9d)の発生も2006年、2007年噴火 と同様にあり、その回数は33回であった。ただし、 これの温度は2008年噴火第1期のものほど高くなく、 数10℃程度のものが大半である。

5月半ばの約一週間の地盤変動記録には、噴火の数時間程度前から地盤の膨張がはじまり、噴火とともに収縮へと転じる、個々の噴火に対応した一連の変化が明瞭であった(井口・ほか,2008b)。噴煙放出過程における地盤収縮量と噴煙の熱放射エネルギーの間には正の相関があった(Yokoo,2009)。映像上で火映がみられなくなった6月9日~13日には、ARMで20~50 Paの振幅を記録する爆発的噴火が卓越した。なお、この噴火以前に記録されていた空振振幅はおおむね数Pa以下と小さい。この時期の噴火活動で、北側火口縁がわずかに拡大したが、全体的には火口地形に大きな変化はない(Fig.4d)。

噴煙温度の連続観測ができるようになったことも あり、観測値はイベントごとにバリエーションが大 きく、活動期間内での経時的な変化は読み取りづら い(Fig. 8a)。しかし、ほとんどの噴火は50℃以下 の比較的低温な噴煙であった。噴火に伴う噴煙放出 速度は数m/s~70 m/sほどが見積もられ、噴煙表面温 度と噴煙の放出速度との間には弱いながらも正の相 関が認められた。また、これらのうち、火砕密度流 は高温・高速な噴煙で始まる噴火活動に伴って発生 する傾向にあった(Yokoo, 2009)。例えば噴煙密度な どの初期条件が噴火ごとに異なるため、一般的な火 砕流発生のイメージ(温度が低く、浮力を獲得でき ない噴煙が火砕流になる;例えば、Wilson et al., 1980) との相違を論じることはできない。

(2) 2008年噴火第3期(6月28日~12月18日)

2008年6月末以降の半年は、爆発的噴火は一度しか 発生せず、噴火の規模と頻度は急速に低下した。8 ~57日間の休止期間をはさみつつ、1~15日程度連続 する短期間の噴火活動が散発的に発生した。しかし、 7月28日7時5分と、同日10時10分の噴火では、噴煙が



Fig. 10 (a) 2008年7月28日10時10分の噴火。斜面上の 広い範囲から灰けむりが昇っているが、これは落 下によって破砕した噴石由来のものである。(b) SVOから撮影した同噴火の噴煙(10時13分)。

3000 mを超え(Fig. 10)、熊本県南部にまで降灰が あった(福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2008)。 12月15日夜はKUR現地にて目視可能な火映が発生し ていた。活動の低調さもあり、本噴火期間では火口 形状・サイズに特段の大きな変化は認められなかっ た(Fig. 4d)。

なお、2008年10月中旬以後の火映現象の発生有無 等について、われわれの映像観測結果からは判断で きない。10月15日にKUR映像システムの一時撤収が 行われ、11月に再設置した代替システムでは低照度 環境(朝晩、夜間や曇天時等)での感度が不足して いるためである。

(3) 2009年噴火第1期(1月9日~4月11日)

2009年1月9日から始まる噴火活動は、1月中旬頃か ら徐々にその活動度が高まっていった。大隈河川国 道事務所が桜島内外に展開した超高感度カメラ網に よる映像には、2008年秋頃から断続的に火映が観察 されており³、そのうち、2009年1月15日の火映はKUR 現地で目視可能であった(Fig. 11a)。

2009年2月~4月は、ARMで100 Paを超えるような 空気振動を伴った爆発的な噴火活動が、幾度か、バ ースト的に発生した(Fig. 8b)。空振波形は、その 先行相(Yokoo et al., 2009)部分に、圧力変化の仕方 が異なるいくつかのタイプが見つかった(横尾・為 栗, 2009)。空振先行相の多様性は、噴火表面現象発 生直前の、火口底における圧力開放過程の多様性を 意味するものと考えられる。一方、このような爆発 的噴火であっても、その地震波形から読み取れる情 報はまだ乏しい。初動が不明瞭、かつ波形が全体的 に複雑であり(横尾・為栗, 2009)、山頂火口の噴火過 程を明らかにした解析手法(Tameguri et al., 2002) などが適用できないためである。

噴火発生時刻が夜間であった場合には、前述の大 隅河川国道事務所の映像中に、赤熱岩片を火口の周 辺の数100 m~1 km程度の範囲に飛散させる様子が 鮮明に映し出される。2月から3月初旬にかけての噴 火は、噴煙や噴石の放出が南への指向性を持ってお り(Fig. 11b)、火孔出口部は北側に傾斜していたこ とが想像される(以降の火口拡大(Figs. 4e~4g)が 北側に限定されていることとも整合的である)。3 月10日5時22分の噴火では、昭和火口から南側の有村 地区の方向へ、水平距離2 km程度まで噴石が飛散し た(福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2009a)。同

³大隈河川国道事務所が撮影する可視・熱赤外映像 は桜島火山観測所ヘリアルタイム配信されている (映像閲覧のみを実施しており、データ保存はして いない)。いくつかのカメラ映像は同事務所ホームペ ージ(http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/camera_sabo.htm) 上からの閲覧も可能である。

噴火開始時の熱赤外映像(大隅河川国道事務所が地 獄河原から撮影)約11秒間に記録された噴石軌跡を、 井口・ほか(1983)にしたがって解析すると、この噴 石は初速141~157 m/s、射出角40~50°で投射された ものと計算された。

頻繁に繰り返されるこれらの噴火には、その発生 に前駆する地盤変動が、これまで以上に明瞭に記録 されるようになった。2009年2月の爆発的噴火に先行 する圧力源の深さは、海水準から火道最上部に相当 する0~800 mの間に求められた(井口・ほか,2009)。 この深さは、山頂火口の爆発的噴火に前駆する圧力 集中深度(2~6 km; Ishihara, 1990)に比べて有意に 浅い。

4月8日15時31分の噴火(ARMで29 Pa)では、火口 東側へ1.0 kmの火砕流(Figs. 11c and 11d)が発生し、 噴煙高度は昭和火口の活動再開以後初めて4000 mを 超えた(福岡管区気象台・鹿児島地方気象台,2009b)。 この噴火による火山灰放出量は10万トンと推定され ており、火山灰は北東の風に流され、鹿児島市内へ も大量の降灰をもたらした(Fig. 11d)。

(4) 2009年噴火第2期~2010年噴火(4月28日~ 現在)

Fig. 8からもわかるように、2009年4月末から始ま った最近の噴火活動は、9ヶ月以上にわたって継続し ており、噴火のなかった日は数える程度でしかない (2010年2月現在)。噴火規模も過去3年間のうちで 最も大きく、非常に活発な状態にある。

夜間の噴火では、肉眼でも真っ赤な噴石の放出を 観察できる(Fig. 12a)。大隈河川国道事務所のカメ ラ映像では、噴火最初期に大量の赤熱した噴石が放 出され、斜面の広い範囲が赤く染まる様子が捉えら れることはもちろん、噴煙放出が続く中、噴煙の根 元で、ストロンボリ式噴火のように、断続的に溶岩 噴泉状に赤熱岩片が放出され続ける様子も確認でき る(例えば、2010年1月18日18時すぎ)。

Fig. 12bのように太い噴煙の噴火も幾度となく発生した。これを反映して、火山灰放出量は6月頃から 増加していった (京都大学防災研究所, 2010)。また、



Fig. 11(左)(a) 2009年1月15日夜の火映(露光1 分で撮影)。(b) 2009年2月1日14時48分の噴火 (ARMで6.6 Pa)。この時期の噴火は南方への 指向性を持って開始するため、南側斜面(画面 左側)にだけ噴石が落下している。(c) 2009年4 月9日15時31分の噴火では東側斜面(画面右側) へ約1.0 km火砕流が流下した(昭和火口のほぼ 真南に位置する有村展望台から撮影)。矢印は 昭和火口の位置を表す。(d)同噴火の噴煙を持 木(桜島南西部)から西に向かって撮影(15時 50分)。(e)~(f)再設置したKUR映像システムに よる同噴火火砕流の画像とその画角。東側斜面 (画面手前側)への流下によって、画面全体が 噴煙に覆われている。

Fig. 12(下) (a) 2009年10月4日19時51分の噴火 (噴火直後から60秒露光)。(b) 2009年6月26日 14時20分の噴火をARMから撮影。(c) 2009年8 月10日10時37分の噴火に伴う火砕流。矢印は噴 出位置を示す。





Fig. 13 (a) 2009年8月27日2時59分の噴火前の火映の発現状態の変化(大隅河川国道事務所の配信画像を使用)。 (b) (a)に四角で示される各領域のRチャンネル(平均値)の時間変化。2時47分から火映の微弱化がはじまり、 5分程度で消滅する。1分に1枚の画像のため、火口部分の2領域(glow1、glow2)では、噴火の瞬間をR値の 上昇として認識できないが、赤熱した噴石が飛散し、そこに留まっている山体斜面領域(reference)ではR 値の上昇が明瞭である。



Fig. 14 ARMにおける (a) 2009年8 月27日、(b) 8月28日、(c) 9月2日、 (d) 9月27日のひずみ記録(赤:火 口方向、青:火口直交方向)。線1 の時刻に火映が消滅し(始め)、 線2の時刻で噴火が発生する。火映 の消滅している時間は、それ以前 の時刻に比べて地盤変動が加速し ている。横軸、縦軸の一目盛りは いずれも10分と20×10⁻⁹ストレイ ン。

流下距離0.5~1 km程度の火砕流の発生も依然とし て多数認められる(Fig. 12c)。噴出物量の増加開始 にやや遅れて、8月下旬と、9月下旬~10月いっぱい はほぼ毎日、大隅河川国道事務所の監視画像上で火 映が観察された。

火映の発現状況は、噴火過程を考察する上でも有 益な情報を供す。すなわち、噴火が発生する直前に 火映が微弱化、ないしは消滅することがあり(Fig. 13)、火映が消滅する時刻あたりから、地盤変動レ ートが加速する(Fig. 14)。火映が消える前の、も ともとの地盤変動は、マグマ物質の火口浅部への移 動と蓄積によって応力が集中したためと考えられて いるが(井口・ほか, 2009)、火映の消滅と相まって現 れるこの加速的な変化は、火口底下の圧力溜り(ガ ス溜り)の形成過程を見ていると考えられる。つま り、噴火時に放出される高圧ガスは、火映の消えて いる間、噴火直前の数分~20分程度といったごく短 い時間で火口底下に集積されたものかもしれない。

すなわち、これら一連の過程については、次のように考えられる。まず、火道内から火口底につながる亀裂などの、マグマからのガスの逃げ道が、なんらかの原因によって、徐々に通路として機能しなくなる(これはSO2放出率の減少として観測されたことがある;山本圭吾氏、私信)。そのため、ガスによって運ばれていた熱の供給が減少ないしは休止し、火映が微弱化して消滅する。併せて火口底表層の冷

却・固化が進行し、いわゆる「溶岩蓋」が形成され、 今まで火口外に放出されていたガスが、圧力溜りに 溜められていく。そして、このガス集積による圧力 増加によって、山体膨張レートが上昇するのであろ う。

もう少し地盤変動記録を詳しく見ると、噴火の1 ~3分前には火口方向の伸縮計記録が反転し、応力開 放が始まることが多い。力学的には減圧過程として 捉えられるが、この時間に噴煙やガス放出等の顕著 な表面現象は確認できない。一方、噴火直前の2分~ 30秒程前からは、微小地震・微動の発生が顕著とな ることが認められ(Fig. 15)、微動振幅が大きくな り始める時刻が、地盤変動記録が反転する時刻に一 致しているようである。微動の発生原因や発生位置 を特定することは難しいが、ガス溜りの圧力が「溶 岩蓋」の強度を超えた結果、「溶岩蓋」内において 亀裂が形成される過程を見ているのかもしれない。 また、この亀裂を通ってガス溜りからガスが抜けて いく、いわゆる、Iguchi et al. (2008) で示された "gas leakage"に相当する過程による振動現象を観測して いる可能性もある。いずれにしても、応力解放(圧 力現象)が噴火に先立ち発生していることは確かで あり、この後の噴火表面現象を直接誘引する鍵とな る現象である。

活動推移に話を戻す。活動期全体を通し、空振振 幅は徐々に大きくなる傾向が認められる(Fig. 8b)。 特に、2009年12月末からはその様子が顕著である。 これまでに記録された一番大きな空振振幅値は、 2010年1月3日0時34分の噴火による239 Paである。高 周波成分に卓越するような位相が認められるものも あり、先行相だけでなく、波形全体のバリエーショ ンも出てきているように思える。

噴煙温度の高温化も、それまでの噴火期の結果に 比べて著しい(Fig. 8a)。2010年1月12日19時01分の 噴火では最高温度394℃を記録するなど、200~300℃ を有意に超える温度が、12月以降多数観測された。 高温の噴出物が放出されるのは、爆発的噴火だけに



Fig. 15 2009年9月27日1時39分の噴火に伴う地震波 形(春田山、上下動)。主要動の到着時刻を0とし た。いずれの波形も同じ記録であるが、表示振幅 (縦軸)を変えて表示している。

限っているわけではない。例えば、2009年12月4日は、 爆発的噴火は7回発生したが、それ以外にもほぼ一日 中100~200℃を超える温度の噴煙が噴出し続けてい ることがわかる(Fig. 16)。このことは、爆発的で ない、断続的な灰放出時にも高温なマグマ物質の放 出があることを意味しており、真っ赤な噴石が放出 される夜間の噴火映像とも矛盾しない。マグマ頭位 の上昇や火道の拡大などといった、マグマを容易に 火口外へ出すことのできる状況に変化しつつあるこ とを示唆している。

活動の活発化を反映し、火口サイズの拡大も確認 された(Figs. 4f and 4g)。2009年夏には火口が北側 へ拡がり、直径はおよそ250 mほどにまで成長した。 2010年になると、そのサイズはさらに大きくなり300 m近くにまでなった。

大振幅空振の噴火が多発し、噴煙温度が顕著に上 昇するなどといった、2009年12月からの噴火活動活 発化に同期、ないしは前駆するように、有村昭和溶 岩脇の噴気温度が12月9日14時すぎから徐々に上昇 し始め、12月12日には46℃になった(Fig. 8c)。同 噴気のガス組成はCO₂ 3.0%、O₂ 19.84%、N₂ 77.15% であり(平林順一氏、私信)、ARMで測定している ガスに大気が混入したものと考えられる。ARMの CO₂濃度は昭和火口の噴火活動に前駆して変動する



Fig. 16 2009年12月4日における火口領域の温度変化(赤線)。爆発的噴火(黒丸)以外にも、ほぼ断続的に高 温噴出物を放出する噴火が発生している様子が読み取れる。

ことが報告されているため(平林・ほか,2008)、ここ でみている噴気温度の変化も火山活動との関連があ ることが想像される。有村地区における噴気活動が、 Aizawa et al. (submitted)で示されるような桜島山体 内部での脱ガス過程を反映したものであるとすれば、 噴気温度の上昇は、前述したような12~1月の噴火活 動活発化、ないしは、今後の昭和火口の活動活発化 を示唆する指標なのかもしれない。

しかし、噴気地点から500 m程度しか離れていない ARMにおける観測井の水温は、2009年3月から12月 末まで、70.5℃程度で安定している。上記の考えは まだ推測の域に過ぎず、今後の活動推移との対応性 をきちんと検討することが必要である。

4. おわりに

2006年6月4日に58年ぶりに再開した桜島昭和火口 の噴火活動は、2010年2月現在に至るまで、幾度かの 噴火活動休止期をはさみながらも、活発化しつつ継 続している。特に2009年2月以降は、噴火に伴う空気 振動振幅がそれまでに比べて極端に大きくなり、噴 出物の温度も著しく高温化するなど、マグマの関与 が示唆される爆発的な活動へと噴火スタイルが変わ ってきている。2010年2月2日気象庁報道発表(火山 噴火予知連絡会会長会見)では、溶岩流出の可能性 について、噴火再開以後初めてふれられるなど、今 後のさらなる活発化も懸念されている。これからも、 噴火活動推移について、可能な限り詳細な記録を残 し、後の解析研究に役立てたい。

謝 辞

ここで記した、桜島昭和火口の噴火活動を対象に した観測研究のほぼ全ては、京都大学防災研究所附 属火山活動研究センター、ならびに石原和弘氏をは じめとした同センター職員諸氏からの献身的な支援 を受けて実施したものである。国土交通省九州地方 整備局大隅河川国道事務所、日本放送協会鹿児島放 送局からはデータの提供を受けた。その他多くの関 係機関ならびに関係者の方々からも観測研究の実施 に支援・協力をいただいた。本稿執筆にあたり、嶋 野岳人氏、相澤広記氏、加藤幸司氏から有益なコメ ントをいただいた。地震波形プロットは山本 希氏の プログラムを使用した。この場を借りてお礼申し上 げます。なお、本研究の一部には、科研費補助金(Nos. 18740277, 19・126、いずれも代表:横尾亮彦)、京 大防災研21COEプログラム(No. 14219301、代表:河 田惠昭)、平成21年度京大防災研一般共同研究(代 表:嶋野岳人)からの支援があった。

参考文献

- Aizawa, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Iguchi, M., Yokoo, A., Yakiwara, H. and Sugano, T. Electric resistivity change of Sakurajima volcano from magnetotelluric continuous observation: Possible indication of subsurface lateral magma degassing. Earth Plan. Sci. Lett., submitted in Feb. 2010.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2007) 桜島.火 山活動解説資料(平成19年6月),1-10.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2008) 桜島の火 山活動解説資料(平成20年7月).火山活動解説 資料(平成20年7月),1-11.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2009a) 桜島の 火山活動解説資料(平成21年3月).火山活動解説 資料(平成21年3月),1-12.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2009b) 桜島の 火山活動解説資料(平成21年4月).火山活動解説 資料(平成21年4月),1-14.
- 平林順一・野上健治・撹上勇介・井口正人・味喜大 介 (2008) 桜島火山の活動と火山ガス組成および 土壌からの二酸化炭素ガスの拡散放出.第10回桜 島火山の集中総合観測,149-163.
- 本田 彪 (1940) 昭和14年10月下旬の櫻島火山活動 調査報告. 験震時報, 11, 120-129.
- 井口正人 (2006) 2006年6月桜島昭和火口における噴 火活動. DPRI Newsletter, 41, 5-7.
- 井口正人・石原和弘・加茂幸介 (1983) 火山弾の飛跡 の解析-放出速度と爆発圧力について-. 京大防 災研年報,26B,9-21.
- 井口正人・味喜大介・福嶋麻沙代 (2006) 最近10年間 のGPS観測データから見た2006年6月桜島昭和火口 における噴火活動,2006年度火山学会秋季大会, B45.
- 井口正人・為栗 健・横尾亮彦 (2008a) 火山活動の 経過-1997~2007年-. 第10回桜島火山の集中総 合観測, 1-18.
- 井口正人・横尾亮彦・為栗 健 (2008b) 桜島昭和火 口噴火に伴う地盤変動の特徴.火山学会2008年度 秋季大会, B26.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M. and Hirabayashi, J. (2008) Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes. J. Volcanol. Geotherm. Res., 178, 1-9.
- 井口正人・横尾亮彦・為栗 健 (2009) 桜島昭和火口 における爆発直前の火道最上部への圧力集中.日 本地球惑星科学連合2010年大会, V159-032.

Ishiahra, K. (1990) Pressure sources and induced ground

deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In Magma Transport and Storage, edited by Ryan, M.P., 336-356.

- 石原和弘 (2000) ブルカノ式噴火の特性とその発生 場.月刊地球, 22, 308-314.
- 石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一 (1981) 桜 島火山の溶岩流 (I) -有史時代の溶岩流の体積-. 京大防災研年報,24B,1-10.
- 石峯康浩・瀧本浩史・神田 学・木下紀正・横尾亮 彦・井口正人 (2009) 桜島火山・昭和火口で発生し た噴煙のPIV解析. 京大防災研年報, 52B, 319-322.
- 實渕哲也 (2008) 航空機搭載型放射伝達スペクトル スキャナ (ARTS) による桜島の試験観測結果.火 山学会2008年度秋季大会, A08.
- 鹿児島測候所 (1940) 昭和14年10月~11月櫻島噴火 報告. 験震時報, 11, 99-119.
- 鹿児島測候所 (1951) 1946年3月~5月櫻島噴火報告. 験震時報, 15, 42-51.
- 加茂幸介・西 潔・高山鐵朗 (1980) 赤外線映像によ る桜島火山の地表温度異常域の調査. 第3回桜島火 山の集中総合観測, 27-33.
- 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鐵朗 (1995) 赤外 線映像による桜島火山の地表温度異常域の調査. 第8回桜島火山の集中総合観測, 31-36.
- 京都大学防災研究所 (2010) 南岳山頂下へのマグマ 供給量の見積もり. 第115回火山噴火予知連絡会資 料.
- Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002) Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 47, 197-215.
- 為栗 健・井口正人・山崎友也・高山鐵朗 (2008) 桜 島火山における火山性地震観測の強化. 第10回桜 島火山の集中総合観測, 19-25.
- 宇平幸一 (1994) 大正噴火以後の桜島の活動史. 験 震時報, 58, 49-58.
- Wilson, L., Sparks, R.S.J. and Walker, G.P.L. (1980) Explosive volcanic eruptions IV. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behavior. Geophys. J. R. Astron. Soc., 63, 117-148.
- Yokoo, A. (2009) Continuous thermal monitoring of the 2008 eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan. Earth Planets Space, 61, 1345-1350.
- Yokoo, A. and Ishihara, K. (2007) Volcanic activity around Showa crater of Sakurajima volcano monitored with infrared and video cameras. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 50C, 14-156.

- 横尾亮彦・井口正人 (2008) 熱赤外カメラによる桜島 山体斜面の熱観測. 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),105-112.
- 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, 131-136.
- 横尾亮彦・為栗 健 (2009) 地球物理観測による桜島 昭和火口の噴火プロセスへの一考察. 京大防災研 年報, 52B, 309-317.
- 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.
- 横尾亮彦・為栗 健・井口正人・石原和弘 (2008) 桜 島昭和火口2007年噴火の活動推移. 京大防災研年 報, 51B, 267-273.
- Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2009) Swelling of a lava plug associated with a Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan, as revealed by infrasound record: case study of the eruption on January 2, 2007, Bull. Volcanol., 71, 619-630, doi: 10.1007/s00445-008-0247-5.

付 録

2008年2月18日夜に発生した火山灰放出現象について、引ノ平における地震記録(上下動)と可視・ 熱赤外映像記録をFig. Aにまとめる。

地震波形 (Fig. A-a) を概観すると、17時台は砂防 工事の影響が乗畳しているためあまり明瞭ではない ものの、18時すぎから振幅数µm/s程度のごく小さな 地震が発生し始め、19時、20時台には孤立的になっ た。そして、21時17分ころから振幅が10~50 µm/sと 顕著に大きくなり、その状態が17分程度継続した後、 21時34分にわずかに火山灰の混じったガスが放出さ れた(Fig. A-b)。この表面現象はきわめて小規模で あり、空振記録上では同イベントの識別は困難であ る。噴煙形状も不明瞭であり、最高温度も20℃と低 い(Fig. A-b)。しかし、熱映像上において、昭和火 口部の領域c(rater) と熱異常のない領域n(ormal) と の温度差の時間変化をとることで、現象発生を容易 に認識することができる(Fig. A-c)。すなわち、イ ベント発生前後では2.5~5.0℃であった両者の温度 差が、放出現象の発生と同時に瞬時的に8.7℃まで上 昇した。

石原 (2000) がすでに指摘しているように、桜島 山頂火口では、爆発的噴火発生の数10分~数時間前 から微小な地震・微動が記録されることがある。地 震規模に対する観測点分布の制約から、発生原因の 詳細はわかっていないものの、火口付近のごく浅い



Fig. A (a) 2008年2月18日17時から23時までの地震速度波形(引ノ平、上下動)。小規模地震活動は22時34分の灰放出発生(赤線部)ののちに低下する。現象発生に前駆する地震は最大のもので片振幅50 µm/s程。灰線部は図(b)の撮像時刻を表す。(b) 21時15分と21時35分の可視画像(左)と熱赤外画像(右)。可視画像の 画角は熱赤外画像中に白線で示される。不明瞭ながらも、可視・赤外ともに21時35分に火山灰まじりのガ ス放出があったことがわかる(矢印)。(c)昭和火口部の領域cと熱異常のない領域nの温度差(℃)。23時35 分あたり(青線部)に明瞭な温度上昇が認められる。

場所で発生していることが想像され、また、噴火準 備過程における火道上端部の溶岩の微小破砕、マグ マの脱ガスなどと関係していると考えられている。

今回の場合、微小地震がしばらく継続し、これの 後に灰混じりのガス放出が発生したこと、また、表 面現象発生後に地震活動が低下したことから、地震 発生の原因として、火道内でのマグマからの急激な 発泡・脱ガス、ガスの集積や移動(上昇)、そして、 これらに伴う母岩の応力変化などいくつか考えられ る。ただし、より正確な情報を得るためには、微小 地震の震源位置やスペクトル構造、メカニズム解な どを求める必要があり、難しい。 2009年以降は、噴火前の数時間~数10分で微小地 震が多発する例が多数観測されるようになった。そ のような地震は噴火準備期である山体膨張時に発生 しているようである。しかし、少なくとも、2008年2 月18日の本イベント以前の昭和火口の噴火活動に、 微小地震の発生(増加)を経て現象発生(噴火発生) に至る、という一連の経過をたどったものがあった 記憶はない。2009年の例のように微小地震の発生と 噴火現象とが結びつくようになったのは、2008年2 月の時期を境に、山体内部の物理状況が変化したこ とが一因にあるのかもしれない。