

## 桜島昭和火口2007年噴火の活動推移

横尾亮彦\*・為栗 健・井口正人・石原和弘

\* 日本学術振興会特別研究員

### 要 旨

2007年5月から6月のおよそ40日間にわたって、桜島昭和火口で噴火活動が発生した。2007年噴火初期には、それまで火道内を埋めていたと考えられる比較的低温の灰放出が観測された。第2活動期は、100 を超える噴煙が頻繁に観測され、初動の立ち上がりが明瞭な、いわゆる爆発型の空気振動を伴う噴火である。赤熱物質の放出や火映が観察されるなど、2007年噴火の活動最盛期であったといえる。噴火活動が終息する直前2週間は、20~30 の低温噴煙が放出され、この現象に対応する空気振動は約1 Hzに卓越周波数を持つ単調微動型であった。

キーワード：桜島、昭和火口、2007年噴火、単調微動型空気振動

### 1. はじめに

南九州の始良カルデラ南縁に位置する桜島の噴火活動の特徴は、1955年以降、南岳山頂火口においてブルカノ式噴火に分類される爆発的な噴火活動が継続していることである。しかし、1992年以後は、その活動度も漸次低くなり、2002年以降の年間爆発回数は10回程度でしかない。この半世紀にわたって繰り返されてきた山頂火口での噴火活動とは対照的に、有史以後の桜島火山の噴火活動は、山腹火口からの溶岩流出も特徴として挙げられる。たとえば、1471~76年、1779年、1914~15年、1946年には、それぞれ約0.2~1.7 km<sup>3</sup>におよぶ溶岩流が流出した(石原ら、1982)。特に最も新しい1946年の溶岩流を流出した噴火活動とその活動火口は、昭和噴火、昭和火口とそれぞれ呼ばれている。

昭和火口における噴火活動は1948年7月を最後に沈静化していたものの(宇平、1994)、2006年6月4日に58年ぶりとなる噴火が再開し、およそ半月後の6月20日まで継続した(Yokoo and Ishihara, 2007)。2006年噴火は、高さ数100~1000 m程度の小規模噴煙の放出が頻繁に繰り返されることで特徴付けられ、噴火開始から沈静化までの間で、その活動様式に大きな変化は見られなかった。2006年噴火の終息から約11ヶ月を経た2007年5月15日夜、2006年噴火の活動位置

からやや南側の昭和火口地形内で噴火活動が再開した。そして、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。本稿では、この噴火活動を昭和火口2007年噴火と呼び、可視・熱赤外カメラ、低周波マイクロホン等による噴火表面現象の観測結果をもとに、2007年噴火の活動推移と特徴についてまとめる。

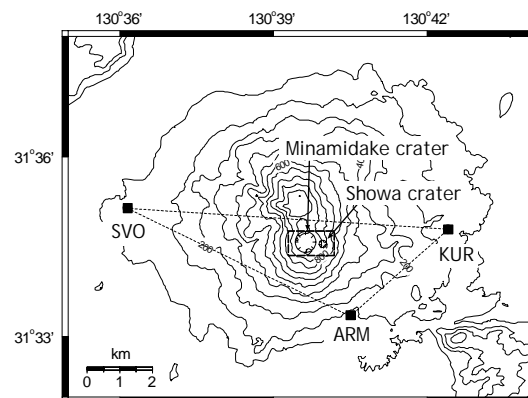


Fig. 1 Map of Sakurajima volcano with three stations with low frequency microphones. Two stations of SVO and KUR were also equipped with video monitoring systems.

## 2. 観測データ

本稿で使用する可視画像データは、桜島の東西の2点 (Fig. 1; KUR, SVO) にそれぞれ設置されている可視画像撮影装置によるものである。これらはデジタルカメラモジュール (SONY DFW-VL500; SVO), および高感度TVカメラシステム (NEC NC840-B, CANON U-4E; KUR) を用いて構成され、いずれもGPS衛星時間と同期した信号を利用して時刻情報の付与がなされる。とくに、KUR (火口までの視線距離3.5 km) において30fpsで撮影される画像の一部は、10秒に一度の頻度でSVOへの転送が行われ、噴火表面現象の監視に役立てられる。また、毎日05:00から21:00までの映像はKUR現地においてDVD/HDデッキにも録画保存し、これの詳細な確認作業によって、天候不良や夜間による視界不良の期間を除いた、

2007年5月15日から6月22日までの2007年噴火の活動期間中に、少なくとも578回の噴火が発生していたことが明らかとなった (Fig. 2)。また、一連の噴火活動推移と噴煙温度との対応を明らかにするため、熱赤外カメラ (NEC三栄 TH7102MV) を用いた現地観測もKURにて随時実施した。

他方、従来からSVOに設置されていた低周波マイクロホン (ACO TYPE 3048S/7144) に加えて、島内2地点 (Fig. 1; KUR, ARM) にも同タイプのマイクロホン (TYPE 3348/7144) を設置し、3点による空振ネットワーク観測も行った。各観測点への空振到着時間差による波源決定計算により、夜間や天候不良時でも南岳山頂火口における爆発的噴火と昭和火口からの噴火活動を区別することが可能である (横尾ら, 2008)。マイクロホン・増幅器からの出力信号は、24bit A/D変換し、200Hz (SVO, ARM) および100Hz

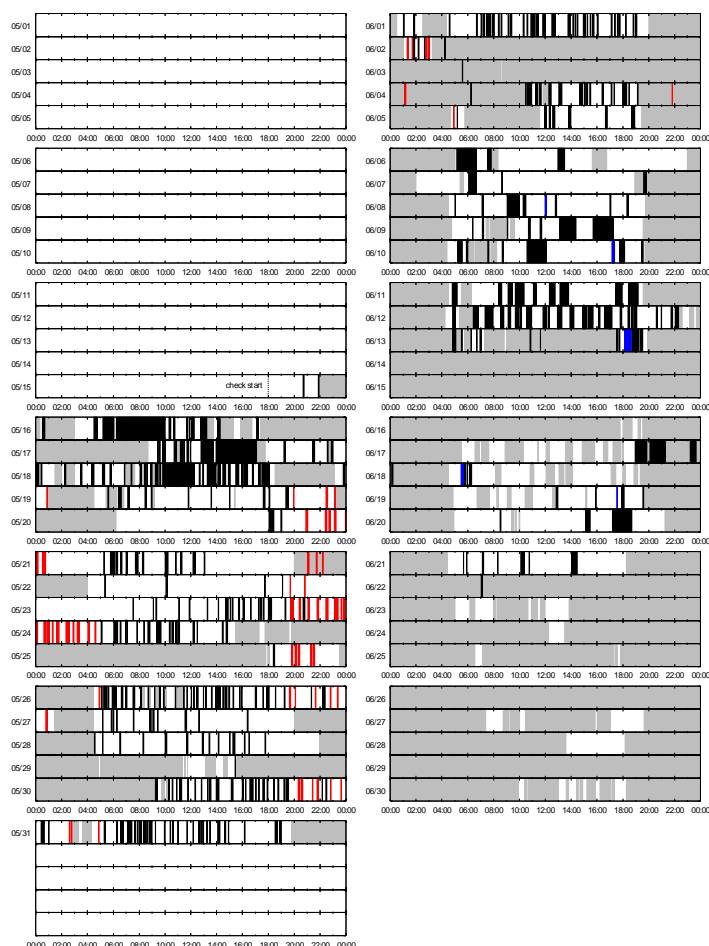


Fig. 2 Time table of the 2007 eruptions determined by recorded movie images at KUR (Fig. 1). Black and white colored areas mean the occurrences of eruptions and no eruptions, respectively. Gray colored areas are the periods during we could not determine whether eruptions occurred or not due to bad weather conditions, the night time or no records of movie images owing to devices' accidents. Red and blue bars mean the eruptions with ejection of reddish materials and small scaled pyroclastic flows, respectively (see Figs. 7 and 10).

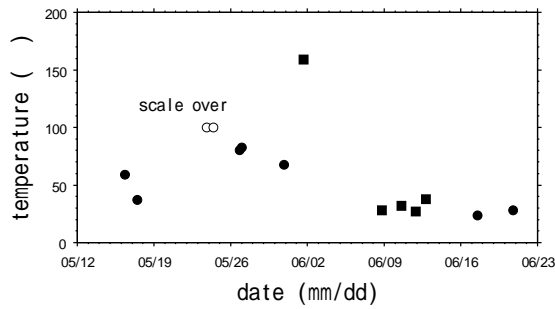


Fig. 3 Temporal change of apparent temperatures of the volcanic clouds. Circles and squares mean the different methods of taking thermal data; single capturing and continuous capturing (1 s intervals), respectively.

(KUR) のサンプリング周波数で通信回線を通じてテレメータ収録した。

### 3. 表面現象観測結果からみた2007年噴火

5月15日夜に開始した噴火活動は、最初の数日は高度数100 m程度の噴煙を断続的に放出し続けるものであった (Fig. 2)。KURから撮影した熱赤外画像によれば、これらの噴煙の見かけ最高温度は40~60°Cである (Fig. 3)。いずれの噴煙も火口を出た直後、火口直上の部分で最高温度を示し、噴煙が上昇・拡大する過程で周囲大気を取り込むため、見かけ温度が火口からの距離に応じて漸次低下する。この時期にはそれぞれの噴火イベントに対応するような明瞭な空振は観測されていない。

その後の5月19日未明から6月5日までのおよそ2週間にわたる期間は、爆発的な噴火が散発的に数多く発生することで特徴付けられ (Figs. 2, 4 and 5), その噴煙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 (Fig. 4c)。噴煙高度は2 kmを超えるものも散見され、SVOから撮影した噴火映像からだけでは南岳の爆発噴煙との区別がつかない (Fig. 4b)。これらの噴火に伴って発生する空振はFig. 6に示すような振動波形を呈し、変動開始時に比較的明瞭な圧縮相、その後膨張相が続く。圧縮相の最大振幅は、昭和火口に最も近いARM (伝播距離2.3 km) においても1~2 Paと、2006年以後発生した山頂爆発13例 (ARMにおいて15~180 Pa; 伝播距離2.7~2.8 km) に比べて1桁から2桁小さい (横尾ら, 2008)。後続の膨張相は明瞭でないことが多く、さらにその後には、はじめの圧縮相と同程度かやや小さい振幅の短周期振動が発現する (Fig. 6)。

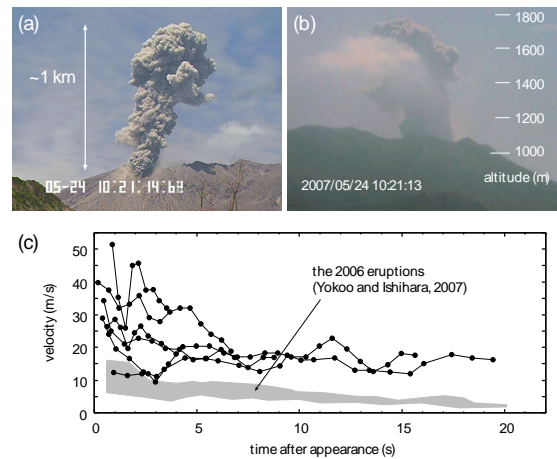


Fig. 4 (a) and (b) Video stills of the eruption on May 24 taken by the KUR and SVO monitoring systems, respectively. (c) Time change of uprising velocities for selected 6 explosive eruptions (see Table 1). Gray colored range indicates the results for the 2006 eruptions (Yokoo and Ishihara, 2007).

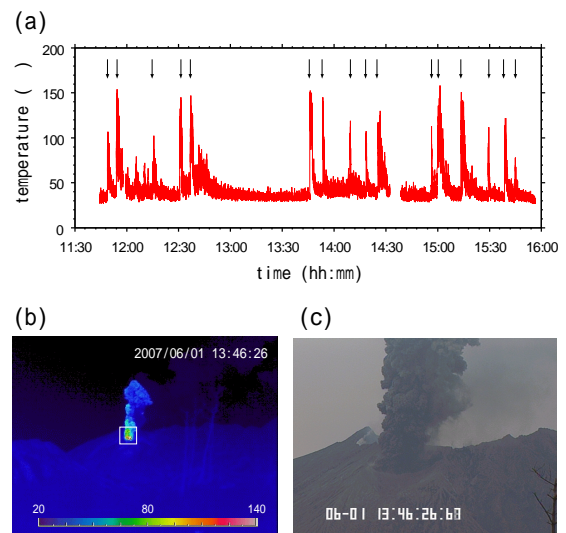


Fig. 5 (a) Four hours' change of the maximum temperature (1-s intervals) in the selected area just above the crater which is shown by a white box in (b). Data were taken on June 1. Arrows mean the times of eruptions start. (b) and (c) Thermal and visible snapshots at the 13:46 eruption.

5月24日~6月1日の噴煙温度は80~160°Cと比較的高温であったこともあり (Figs. 3 and 5a), 夜間か早朝にかけての時間に噴火が発生した場合には、火口から200 m程度の高さにまで火柱が発生することもあった (Fig. 7a)。噴煙から離脱した赤熱岩片が山体斜面に着弾する様子は肉眼でも視認することが可能であった。また、同時期には微弱な火映が連日観

測されていたが (Fig. 7b), 鹿児島県の協力の下で5月24日午前中に実施した上空からの観測では, 火孔の底部にマグマが貯留しているかどうかは明らかにできなかった (火孔部分の最高表示温度は92 であった)。

火映が観察されなくなった6月5日ころからは, 噴火活動は非爆発的となり, 弱々しく灰を放出するタイプの噴火に変化した。そして, 灰放出に伴う継続時間が数分から10数分におよぶ微動型空振が顕著に観測されるようになった (Fig. 8a; 横尾ら, 2008)。初動は正圧変化から始まるが, ARMでの振幅でも0.5 Pa以下と小さく, SVOではほとんど識別できない。いずれの噴火の微動型空振のスペクトル構造にも1 Hzあたりに明瞭なピークが認められる (Fig. 8b)。6月11日9時40分~48分にかけて観測した微動型空振の卓越周波数 (解析区間20.48秒, 1秒刻み) はFig. 9のようになっており, 0.9~1.3 Hzの範囲でのわずかな変動があったものの表面現象との対応も見られず, ほぼ一定であったとみなせる。同様に, 6月7日~21日に発生した20例の微動型空振の卓越周波数についても調べたが, いずれも0.8~1.7 Hzの値におさまり, 系統的な時間変化は認められない。

6月8日~6月20日の噴煙温度は20~30 程度と顕著に低く (Fig. 3), 昭和火口周囲で発生している噴気温度や火口周辺の熱異常領域の表示温度と大きな違いはない。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以下のごく小規模な火砕流 (火砕サージ) が観察された (Fig. 10)。ただし, その発生回数は5回しかなく, 2006年噴火の60回以上 (Yokoo and Ishihara, 2007) と比べると少なく, 発生頻度も低い。

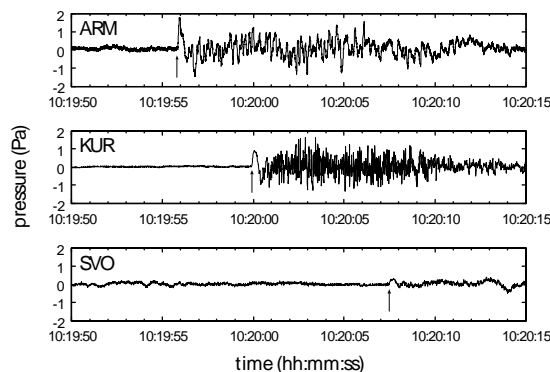


Fig. 6 Infrasonic waveforms associated with the eruption on May 24. Arrows indicate the arrival time of the waves at each station.

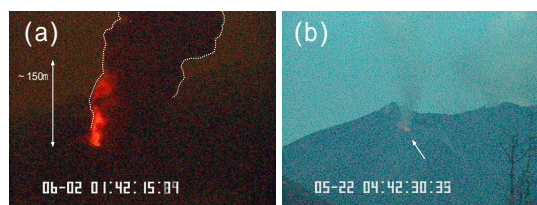


Fig. 7 (a) Reddish ejecta were observed at the night-time eruptions. (b) Weak volcanic glow indicated by a white arrow was frequently observed above the crater.

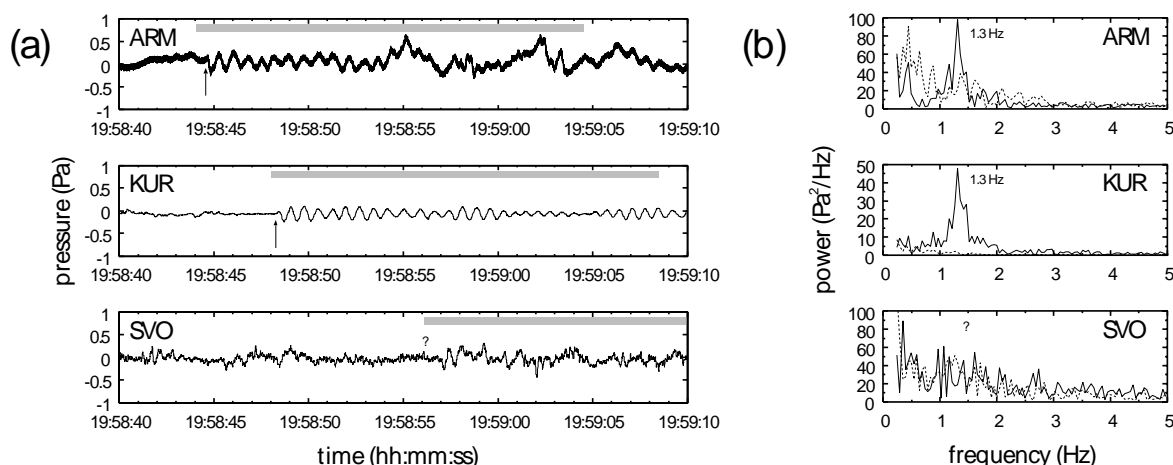


Fig. 8 (a) Monotonic infrasonic waveforms observed on June 15 (Yokoo et al., 2008). It is difficult to recognize these signals at SVO. (b) FFT power spectrum for the gray colored periods in (a), 20.48 s. Dashed lines are those of the background at the periods of 1 min before the arrivals.

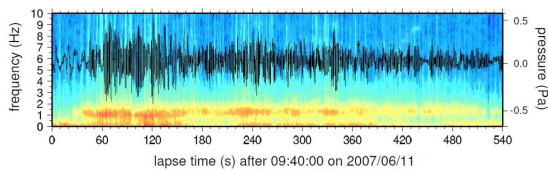


Fig. 9 Waveforms of monotonic infrasound tremor lasting about 8 min. with its power spectra on June 11.

#### 4. 考察

##### 4.1 火口底深度の推定

2007年噴火活動期間中、5月19日～6月5日にかけての期間に発生したいくつかの噴火では、比較的明瞭な空振波形が桜島島内の3観測点で記録されている。横尾ら (2008) は、数値標高データと高層気象データを用いて、各観測点における到着時刻から空振波源を計算した。その結果、2007年噴火における波源は火口内南側、また、2008年噴火の波源は北側にそれぞれ決定され、これらは実際の活動火口位置と一致をみせた。彼らの計算手法を踏襲すれば、空振波源だけでなくその発振時刻も同時に計算することが可能であるため、ここでは、可視映像にみられる噴煙現象の観察結果と併せて、噴火活動中の昭和火口深度について考察する。

5月24日10時19分の噴火 (Fig. 4) は、すべての空振観測点で初動の到達時刻が明瞭に読み取れる (Fig. 6)。波源から各観測点まで、空気振動が風の影響を受けつつ大気音速で伝播したと仮定すると、発振時刻は10時19分49.22秒と計算される ( $t_{0 \text{ infrasound}}$ ; Table 1)。他方、可視映像上での噴煙の火口縁到達時刻 ( $t_{0 \text{ plume}}$ ) は10時19分49.89秒であり、両者の間には0.67秒の時間差 ( $\Delta t$ ) がある。また、噴煙が火口縁上に現れた瞬間の噴煙上昇速度は40 m/sであった (Fig.

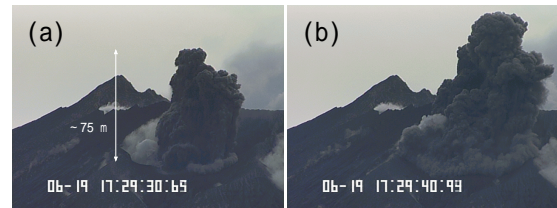


Fig. 10 Small scaled pyroclastic surge caused by a partially collapse of the eruption cloud on June 19.

4c;  $U_{0 \text{ plume}}$ )。いま、昭和火口底面の破壊と噴煙上昇が同時に開始され、また、火口内における噴煙の上昇速度も上記の40 m/sで近似できるものとすれば、火口底までの深さ  $d_{\text{crater}}$  は  $U_{0 \text{ plume}} \times \Delta t = 30$  (m) と計算され (Table 1)、噴火の約10分前に行った上空からの観察結果に矛盾しない。5月19日～6月1日にかけて発生した噴火のうち、各観測点の空振波形、および可視映像中において噴煙の上昇する様子が明瞭であった6つの噴火について、上記と同様の解析を行ったところ、火口底までの深度は21～36 mと非常に浅い、しかしほとんど変わらない結果が得られた (Table 1)。

##### 4.2 単調微動型空気振動

2007年噴火の最も特徴的な現象のひとつに、噴火期間後半 (6月7日～20日) に観測された単調微動型の空気振動がある。この単調微動型空振は、これまで半世紀にわたって噴火を繰り返している桜島でも初めて観測されたものである。世界的にみても、単調微動型空振についての報告は、綿田ら (2005) による諏訪之瀬島での例以外に著者らは知見していない。他方、調和微動型地震にカップリングした調和微動型空振は、桜島をはじめ (坂井ら, 1996)、カリムスキー火山やアレナル火山などでの報告が多数あり (Hagerty et al., 2000; Lee et al., 2004)、その発

Table 1 Estimated depth of the crater bottom at Showa crater during the 2007 eruptions

date and time (mm/dd hh:mm)	$t_{0 \text{ infrasound}}$ (ss)	$t_{0 \text{ plume}}$ (ss)	$\Delta t$ (s)	$U_{0 \text{ plume}}$ (m/s)	$d_{\text{crater}}$ (m)
05/19 19:20	34.00	34.78	0.78	26	22
05/23 19:16	55.55	56.50	0.95	30	31
05/24 10:19	49.22	49.89	0.67	40	30
05/24 14:25	34.99	35.55	0.55	34	21
05/28 06:30	16.48	17.10	0.62	50	36
06/01 17:05	27.50	29.60	1.90	12	24



生メカニズムはマグマやガスで満たされた火道の共鳴が想定されている (Garcés and McNutt, 1997; Peterson and McNutt, 2007)。

今回の微動型空振について、ここでも火砕物と火山ガスの混相体で構成された火道最上部の領域で共鳴が発生していると考えられる。今、火道上部を長さLのパイプで近似し、その下端はマグマの発泡破砕面、上端に昭和火口を仮定する。噴火が開始されるとパイプ内部は噴煙(火砕物+火山ガス)で満たされ、すなわち、これを共鳴体と考えれば破砕面は閉端、昭和火口は大気側への開放端として作用する。

噴煙の音速Cを理論・観測値を参考に200-300 m/s (Kumagai and Chouet, 2000; Yokoo and Taniguchi, 2004)と仮定すると、6月7日~20日にかけての間に観測された単調微動型空振の卓越周波数 $f = 0.7 \sim 1.7$  Hzが、上記共鳴体の一次モード振動であるとするれば、パイプ長は  $L = C/4f = 30 \sim 100$  (m) と推算される。本稿では記していないが、単調微動型空振が発現しているときの地震波形には同種の波形が見られない。これは、共鳴現象が火口の非常に浅い位置で発生していることと、規模の小さい現象であったためである。

## 5. まとめ

昭和火口2007年噴火の活動推移について、噴火表面現象の観測結果から次の3つの活動ステージに分類し、まとめた。

### (1) 噴火活動開始期 (5月15日~5月18日)

噴火開始から数日間がこれに相当し、ほぼ連続的に低温噴出物を放出する特徴があり、目立った空気振動は観測されない。火道を埋めていた2006年噴火堆積物等を放出し、火道の形成が行われていた時期だと考えられる。

### (2) 噴火活動最盛期 (5月19日~6月5日)

本期間は2007年噴火の活動最盛期であり、火道が確立されることで、比較的浅い位置までマグマが上昇してきていたと考えられる。この時期の昭和火口の深さは20~30 mと推算され、そのため、噴火活動が夜間に発生した場合には、火口から赤熱物質が放出される様子が、また、噴火が発生していないときにも火映が観察される。噴火に伴って発生する空振波形は、南岳山頂爆発のものに類似して、明瞭な圧縮相で開始する。放出される噴煙の上昇速度は火口を出た直後で20~50 m/sである。

### (3) 噴火活動衰退期 (6月6日~6月22日)

噴煙温度が顕著に低下し、そのため、火口から放出される火砕物は上昇速度を獲得できず、噴煙の一

部が崩落した。灰放出等のごく小規模な噴火活動が起きると、マグマ破砕面から火口出口までの長さ30~100 mに依存した共鳴現象が発生し、0.7~1.7 Hzに卓越周波数を持つ単調微動型の空気振動が発生する。第3期の活動期間中に、これの卓越周波数に大きな変化がなかったことは破砕深度がほぼ一定であったことを示唆する。

## 6. おわりに

昭和火口における噴火活動は、2008年2月3日~6日、4月3日~の2期間でも発生し、6月7日現在も継続している。特に、2008年2月の噴火は、ARMで145Paの空振を記録し、1.5 km流下した高温火砕流(260以上)の発生もあり非常に爆発的である。2006~2007年の2期間で発生した噴火活動とは明らかに様相が異なっている(井口ら, 2008)。1936年から開始した昭和火口の噴火活動は、1946年の昭和溶岩流出に至るまでに数ヶ月程度の休止期をさみながらさまざまなタイプの噴火を断続的に続けたこともあり(津屋・水上, 1940)、昭和火口における噴火活動について今後とも注意深く観測を続けていく必要があると考えられる。

## 謝 辞

ARMの空振観測結果は国土交通省九州地方整備局のものである。KURの監視映像はNHK鹿児島放送局と共同で撮影した。熱赤外観測の実施には高山鉄朗氏、山崎友也氏のご協力があった。空気振動の発振時刻の推定に使用した数値標高データ、高層気象データは国際航業株式会社、鹿児島地方気象台からそれぞれ提供していただいた。その際、平松秀行氏にお世話になった。以上の方々に対して記して感謝します。なお、本研究の一部には文科省科研費補助金(特奨19・126:代表者 横尾亮彦)を使用した。

## 参考文献

- 井口正人・為栗 健・横尾亮彦 (2008): 火山活動の経過 1997~2007年, 第10回桜島火山の集中総合観測, pp. 1-18.
- 石原和弘・高山鉄朗・田中良和・平林順一 (1982): 桜島火山の溶岩流 (I) 有史時代の溶岩流の容積, 京大防災研年報, Vol. 24B, pp. 1-10.
- 坂井孝行・山里 平・宇平幸一 (1996): 桜島火山のC型微動に伴う超低周波音, 火山, Vol. 41, pp. 181-185.

- 津屋弘達・水上 武 (1940): 昭和14年10月桜島火山の小噴火, 東大震研彙報, Vol. 18, pp. 318-339.
- 宇平幸一 (1994) 大正噴火以後の桜島の活動史, 駿震時報, Vol. 58, pp. 49-58.
- 綿田辰吾・及川 純・井口正人・八木原 寛 (2005): 諏訪之瀬島火山の空振記録, 火山爆発のダイナミックス, Vol. 3, pp. 71-72.
- 横尾亮彦・井口正人・為栗 健・綿田辰吾・及川 純 (2008): 桜島における火山噴火に伴う空気振動の観測, 第10回桜島火山の集中総合観測, pp. 173-181.
- Garcés, M.A. and McNutt, S.R. (1997): Theory of the airborne sound field generated in a resonant magma conduit, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 78, pp. 155-178.
- Hagerty, M.T., Schwartz, S.Y., Garcés, M.A. and Protti, M. (2000): Analysis of seismic and acoustic observations at Arenal Volcano, Costa Rica, 1995-1997, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 101, pp. 27-65.
- Kumagai, H. and Chouet, B. (2000): Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, pp. 25,493-25,512, doi:10.1029/2000JB900273.
- Lee, J.M., Gordeev, E.I. and Ripepe, M. (2004): Explosions and periodic tremor at Karymsky volcano, Kamchatka, Russia, *Geophys. J. Int.*, Vol. 158, pp. 1151-1167.
- Peterson, T. and McNutt, S.R. (2007): Seismo-acoustic associated with degassing explosions recorded at Shishaldin Volcano, Alaska, 2003-2004, *Bull. Volcanol.*, Vol. 69, pp. 527-536, doi:10.1007/s00445-006-0088-z.
- Yokoo, A. and Taniguchi, H. (2004): Application of video image processing to detect volcanic pressure waves: A case study on archived images of Aso volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L23604, doi:10.1029/2004GL021183.
- 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.*, Vol. 50C, pp. 149-156.

## Sequence and Characteristics of the 2007 Eruptions at Showa Crater of Sakurajima Volcano

Akihiko YOKOO\*, Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI and Kazuhiro ISHIHARA

\* JSPS Research Fellow

### Synopsis

Showa crater of Sakurajima volcano erupted again in 2007 after 1 year's interval. Activity of this 2007 eruptions was able to be divided into three stages. The first stage was characterized by weak ejection of volcanic materials without significant infrasound signals. This stage lasted only for the first few days. Main explosive eruptions accompanying with impulsive infrasound waves occurred in the second stage (about two weeks). During this stage, incandescent reddish ejecta were frequently observed. Temperatures of the eruption clouds were relatively high (~160°C). Final two weeks was categorized into the third stage of the 2007 eruptions. Peculiar infrasound tremor signals (peak frequency was about 1.0 Hz) were recorded associated with minor ash eruptions.

**Keywords:** Sakurajima volcano, Showa crater, the 2007 eruptions, monotonic infrasound tremor