

## 桜島昭和火口噴火とそれに前駆する地盤変動について

### The Eruptions at Showa Crater of Sakurajima Volcano and Preceding Ground Deformation

加藤幸司<sup>1</sup>, 井口正人<sup>2</sup>  
Koji KATO<sup>1</sup> and Masato IGUCHI<sup>2</sup>

(Received December 20, 2011; Accepted May 23, 2012)

**ABSTRACT:** Showa crater of Sakurajima Volcano, located at the eastern flank of the volcano resumed eruptive activity in June 2006, after a 58 year interval. The activity gradually increased and vulcanian eruptions have repeated since February 2008. Preceding these eruptions, ground deformation that indicates the accumulation of gas at the top of a conduit was observed (Iguchi et al., 2009). In this paper, we investigate ground deformation preceding eruptions at the Showa crater in order to predict whether the eruption is explosive or not, and to estimate the amount of plume in advance. As a result, we confirmed that 70% of eruptions were explosive when the inflation rate accelerated and that plume height becomes higher in proportion to the amount of inflation strain.

#### 1 はじめに

桜島は、北から北岳、中岳、南岳の三峰と権現山、鍋山、引ノ平などの側火山から構成される、始良カルデラの南縁部に生じた安山岩～デイサイトの成層火山である。有史以降では、1471年-1476年(文明)、1779年-1780年(安永)、1914年-1915年(大正)に山腹で大規模噴火を繰り返しており、1939年-1946年の噴火活動でも山腹の昭和火口から溶岩を流出した。1955年(昭和30年)以降は、南岳山頂火口で爆発的噴火を繰り返しており、また、2006年6月には昭和火口が58年ぶりに噴火活動を再開するなど日本で最も活発な火山のひとつである。2006年6月に再開した昭和火口の噴火活動は、2006年、2007年は単発的に噴煙を噴出する噴火であったが、2008年2月には火砕流を伴う爆発的噴火が発生し、2009年には年間の爆発的噴火の回数が500回を超えるなど、徐々に活発化しながら噴火を繰り返している。

気象庁は、桜島の火山災害の防止・軽減のため関係機関の協力を得ながらその活動を監視し、活動状況の変化、特に噴火の前兆現象を捉えることに努めている。噴火の前兆については、多くの火山で、噴火に前駆した地盤変動が観測されている。2004年の

浅間山の噴火活動では、山頂火口から北北東約2.5kmに設置された傾斜計で、爆発的噴火の3.5~29時間前から、山頂火口の深さ約2kmのほぼ東西の走向を持つダイクの貫入によると推定される地盤変動が観測されている(中禮・鴻山, 2006)。インドネシアのスメル火山では、爆発的噴火の3~30分前から火口方向の地盤が隆起する地盤変動が観測されている(Iguchi et al., 2008)。また、諏訪之瀬島でも爆発的噴火の約100秒前から火口直下の体積増加を示す地盤変動が観測されている(Iguchi et al., 2008)。桜島では、南岳山頂火口の爆発的噴火の数分~数時間前から南岳山頂火口の北西約2.7kmに設置された水管傾斜計及び伸縮計で、マグマだまりから火道下部へのマグマの貫入によるものと推定される傾斜変化と地盤の伸張が観測されている(Ishihara, 1990)。2006年6月に活動を再開した桜島昭和火口の噴火では、噴火に前駆して、昭和火口の南南東約2.1kmに設置された伸縮計で、噴火直前に火道の上部に圧力が集中していることを示す歪変化が観測されており(井口ほか, 2009)、桜島の噴火発生予測に活用されている。しかし、火山防災に対して適切な情報を発表するには、噴火の前兆現象を捉えるだけでは不十

<sup>1</sup>福岡管区気象台火山監視・情報センター, Fukuoka District Meteorological Observatory

<sup>2</sup>京都大学防災研究所火山活動研究センター, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

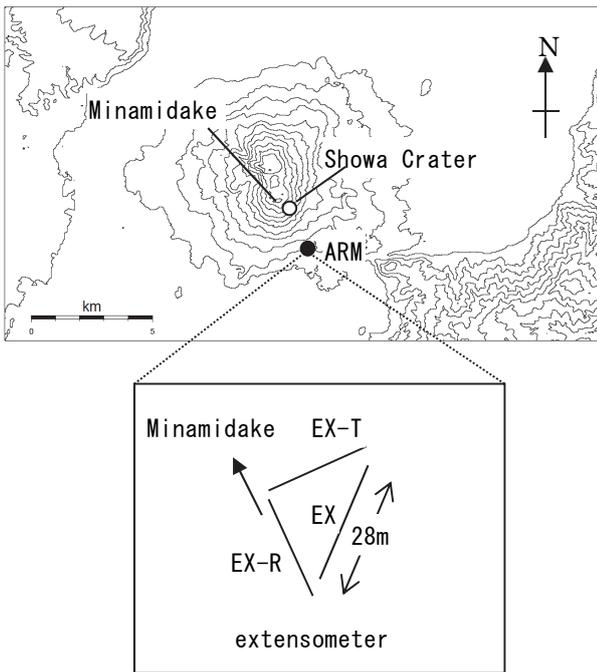


Fig. 1 The location of extensometers in the underground tunnel at Arimura (ARM: solid circle).

分である。気象庁は、とるべき防災対応に応じて火山活動を 5 段階に区分した噴火警戒レベルを 2007 年 12 月 1 日に導入しており、噴火発生だけではなく、発生する噴火の影響範囲を予測することが求められる。桜島昭和火口の噴火では、大きな噴石の飛散と空振を伴う爆発的噴火だけではなく、噴煙を噴出するだけの非爆発的噴火も発生している。これらの噴火の形態や規模を事前に予測することは、適切な防災情報を発表するためには重要である。発生する噴火形態の予測には噴火発生の前駆過程の理解が不可欠である。そこで、本研究では、噴火に前駆する地盤変動の特徴について調査した。

## 2 観測・データ

国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所は、2006 年 8 月に桜島南岳山頂の南南東約 2.4km (昭和火口から 2.1km) の有村地区に観測坑道を掘削し、伸縮計などを設置した。観測坑道は南岳に向け約 300m 掘削され、坑道奥の直角二等辺三角形部の 3 辺に伸縮計 3 成分 (火口方向 (EX-R), 火口と直交する方向 (EX-T), 斜辺方向 (EX)) が設置されている (Fig. 1)。伸縮計は石英管できており、長さ

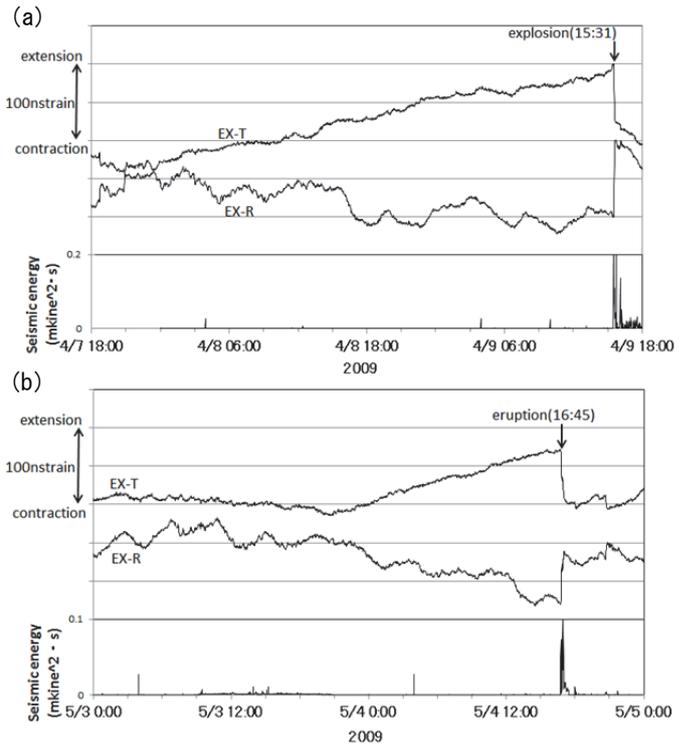


Fig. 2 Strain records associated with (a) explosive and (b) non-explosive eruptions. Seismicity is represented by seismic energy.

はそれぞれ 28m (溶接後) である。データは、1Hz でサンプリングされ、大隅河川国道事務所桜島砂防出張所にテレメータされたのち鹿児島地方気象台に転送され、火山活動の監視に活用されている。本解析には、2009 年 1 月から 7 月にかけて得られた記録を用いた。

## 3 地盤変動の特徴

Fig. 2 に爆発的噴火と非爆発的噴火の発生前後の有村観測坑道の伸縮記録の例を地震動エネルギーとともに示す。なお、伸縮記録はいずれも BAYTAP-G (石黒ほか, 1984) を用いて潮汐補正済みである。ここで、本論で扱う爆発的噴火及び非爆発的噴火の定義を述べる。鹿児島地方気象台では、昭和火口の噴火に対して、爆発地震を伴い、桜島島内の観測点で空振が 10Pa を超えるものや大きな噴石が火口から 500m 以上飛散したものを爆発的噴火としている。また、噴煙高度が概ね 1000m 以上で、爆発的噴火の要件を満たさないものを、非爆発的噴火と呼ぶ。まず、爆発的噴火発生前後の伸縮記録をみる (Fig. 2a)。4 月 8 日 0 時頃から伸縮計の火口方向 (EX-R) で収縮、火口と直交する方向 (EX-T) で伸張の変化が始

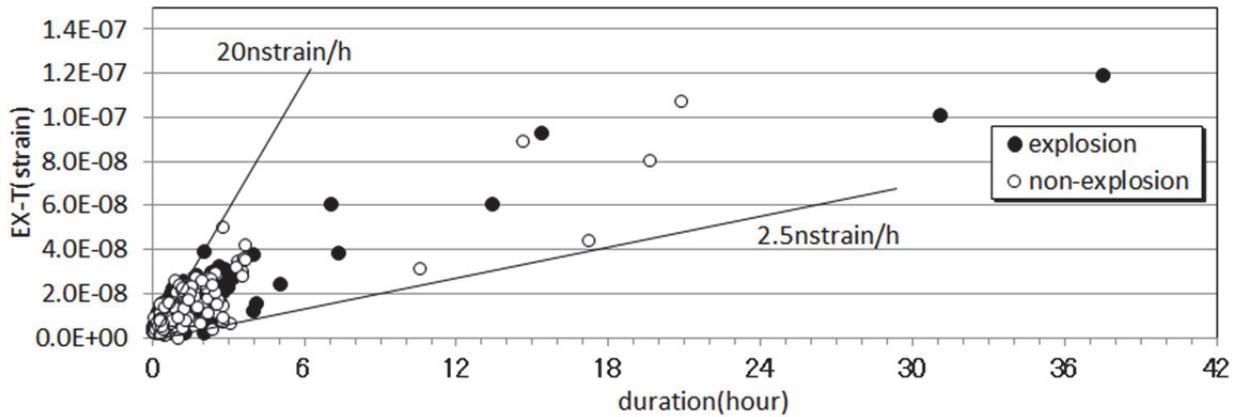


Fig. 3 Relationship between the amount of extension and the duration of time of extension preceding explosive and non-explosive eruptions.

まり、9日15時31分の爆発的噴火発生とともにそれぞれ急激に反転している。同様に Fig. 2b に非爆発的噴火の発生前後の伸縮記録例を示す。5月3日21時頃から伸縮計の火口方向 (EX-R) で収縮、火口と直交する方向 (EX-T) で伸張の変化が始まり、4日16時45分の噴火発生とともに反転している。噴火発生前後の変動の様子は両者とも類似している。

次に、前駆する地盤変動量とその継続時間についてみる (Fig. 3)。ここでは、比較的 S/N が良好な火口と直交する方向 (EX-T) に注目する。爆発的噴火及び非爆発的噴火それぞれ伸張量は、どちらも数 nstrain から 120nstrain である。継続時間は概ね数分から 20 時間であるが、爆発的噴火ではそれを超えるものも少しみられる。伸縮量の時間変化率は概ね一定で、伸張量を継続時間で割った平均伸張変化率をみるとどちらも 2.5~20nstrain/h の範囲に分布しており、爆発的噴火と非爆発的噴火で大きな違いは認められない。

噴火に伴う地震の最大振幅、空振振幅及び噴煙高度と火口と直交する方向 (EX-T) の噴火に前駆する伸張量の関係を Fig. 4 に示す。地震及び空振振幅値と伸張量に相関は認められないのに対し、噴煙高度は伸張量が大きいくほど高くなる傾向があるようにもみえる。

噴火に前駆する伸縮記録の噴火直前部分を Fig. 5 に拡大して示す。噴火発生の数分前から、それまでほぼ一定の割合で続いていた伸縮計の火口方向 (EX-R) の収縮と、火口と直交する方向 (EX-T) の伸張の変化が加速する場合は認められた (Fig. 5)。そして、その加速の有無にかかわらず、噴火発生の

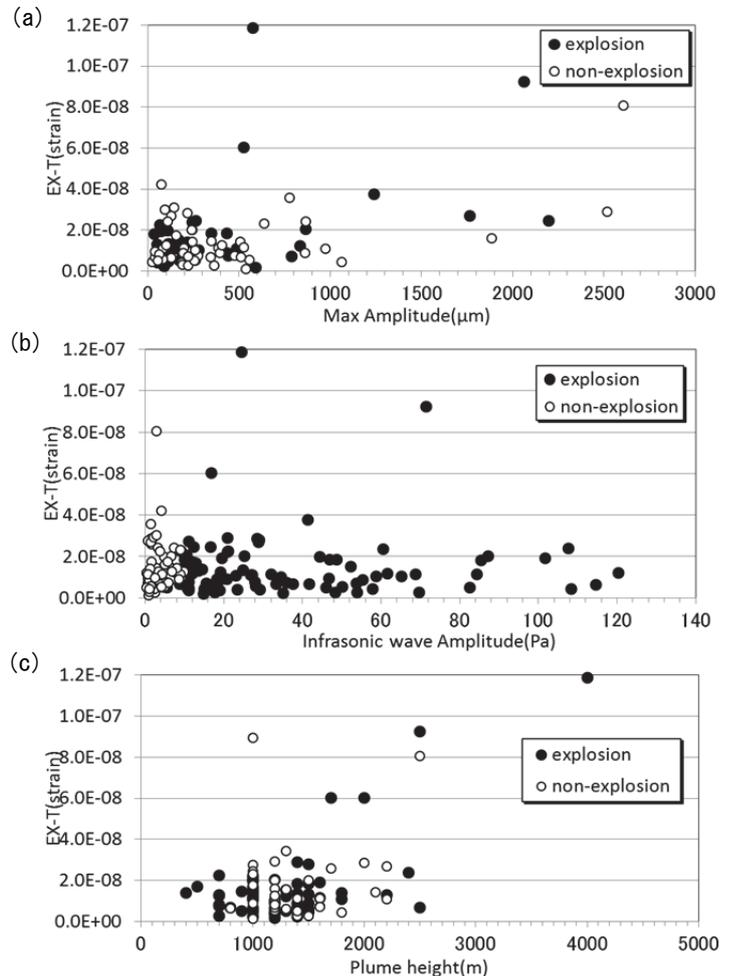


Fig. 4 Relationship between the amount of extension and (a) maximum seismic amplitude, (b) infrasonic wave amplitude, and (c) plume height associated with explosive and non-explosive eruptions.

数十秒から 5 分前より、ゆるやかに火口方向 (EX-R) で伸張、火口と直交する方向 (EX-T) で収縮に転じる場合が認められた。そこでまず、その伸張変化の加速の有無と発生する噴火の形態について調べてみた。加速の有無の判定は、1 分値を用い、噴火に先駆する変動全体の平均伸張変化率にその標準偏差を 2 倍したものを足した値を閾値として、前 10 分間の変化率が閾値を超えた場合を加速ありと判定した。噴火に前駆する地盤変動は 172 例で、そのうち爆発的噴火は 92 例である。加速がみられたものは全 172 例中 18 例と少ないが、18 例のうち爆発的噴火が 13 例と約 70%を占めており、変化に加速がみられた場合は爆発的噴火が発生する可能性が高いといえる (Fig. 6)。

次に噴火直前のゆるやかな収縮と噴火の形態の関係について調べてみる。収縮の有無の判定は、目視で行った。収縮がみられたものは 46 例で、そのうち爆発的噴火は 23 例と占める割合は 50%である。噴火発生直前の収縮の有無と後続する噴火の形態 (爆発的、非爆発的) にはあまり関係がないのかもしれない。

次に、噴火直前の火口と直交する方向 (EX-T) のゆるやかな収縮の収縮量とその継続時間の関係についてみる (Fig. 7)。ゆるやかな収縮の終了時刻は、噴火に伴う地震の開始時刻とした。なお、徐々に噴出が開始することにより、ゆるやかな収縮と見えている場合もありうるので、ここでは空振記録を指標として用いることとし、突然噴出が始まるもの、つまり噴火に伴う空振の初動の立ち上がり急峻なもののみ対象とした。収縮量とその継続時間に明瞭な相関は認められず、ゆるやかな収縮の速度は一定でないといえる。

#### 4 議論

Fig. 4 に示すとおり、噴火に前駆する伸張量と地震の最大振幅及び空振振幅に相関はみられない。それに対して、噴煙高度は伸張量が大きくなるにつれて高くなる傾向がみられる。このことについて考える。Iguchi et al. (2008)は、噴火に前駆する地盤変動は、火道下部へのマグマ貫入と火道最上部における火山ガスの蓄積によるとしており、噴火に前駆して観測される伸張変化は、火道下部と火道最上部のこれら二つの圧力源による変動を足し合わせたものを

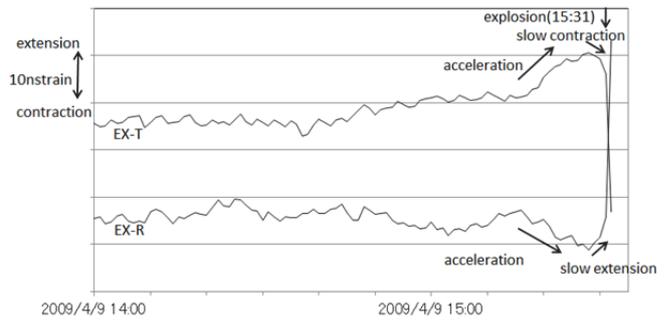


Fig. 5 Example of a strain record just before explosion.

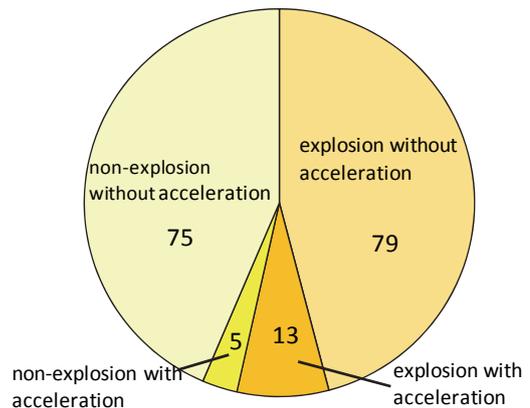


Fig. 6 Distribution of explosive and non-explosive eruptions with or without acceleration.

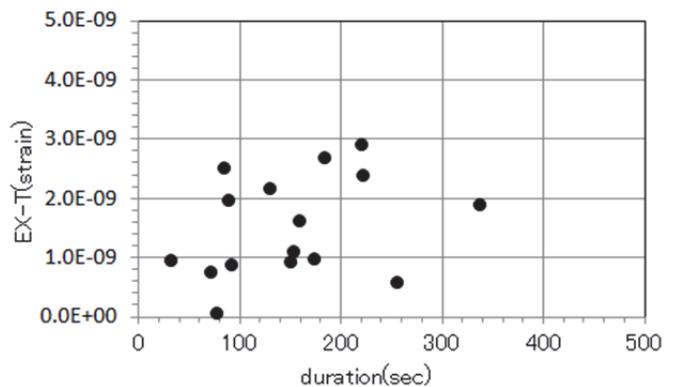


Fig. 7 Relationship between the amount of pre-eruption contraction and its duration.

みていると考えられる。井口ほか (2009) によると、桜島の噴火に前駆する伸張変化の圧力源の深さは、体積変化量 (噴火に前駆する伸張量) が大きいほど深くなる傾向がある。従ってこれらのことから、噴火に前駆する伸張量が大きいほど、観測される伸張変化に対する火道下部へのマグマ貫入の影響は、火

道最上部の膨張に比べて大きくなり、観測される地盤変動源としては深くなるといえる。つまり、観測される伸張量が大きいほど火道へのマグマ貫入量が多いことになり、その結果、伸張量が大きいほど噴出物量が増え、噴煙高度が高くなることを説明できる。それに対して、地震及び空振の最大振幅は、Tameguri et al. (2002)によると、火道最上部のガスだまりの膨張と火山ガスの放出に伴う収縮により励起される。従って、観測される伸張量が大きくなっても、火道下部へのマグマ貫入による影響が大きくなっただけで、火道最上部へのガスの蓄積が地盤変動全体に与える影響はそれほど大きくなりませんので、地震及び空振の最大振幅と噴火に前駆する伸張量に相関がみられないと考えられる。

Nishimura (2009)は、マグマの上昇に伴って気泡が成長した場合、地盤変動が加速することを理論的に示している。そこで、伸縮計の変化が加速する前後で力源の深さに変化がないかをみる。力源の深さを求めるにあたっては、茂木モデル (Mogi, 1958) を仮定し、伸縮計の火口方向 (EX-R) と火口と直交する方向 (EX-T) の変動量の比から推定した。以下にその方法を簡単に述べる。茂木モデルを仮定すると、水平距離 R の地点の r 方向の水平変動は、

$$Ur = k \frac{R}{(D^2 + R^2)^{3/2}} \dots \dots (1)$$

とかける。火口方向の歪 ( $\epsilon_r$ ) および火口と直交する方向の歪 ( $\epsilon_t$ ) は、それぞれ (1) 式を火口方向及び火口と直交する方向に微分すると、

$$\epsilon_r = k \frac{D^2 - 2R^2}{(D^2 + R^2)^{5/2}} \dots \dots (2)$$

$$\epsilon_t = k \frac{1}{(D^2 + R^2)^{3/2}} \dots \dots (3)$$

とかける。ここで D は力源の深さ、R は力源と観測点の水平距離、k は力源の体積変化量を  $\Delta V$  とすると以下のように表わされる。

$$k = 3\Delta V / 4\pi \dots \dots (4)$$

ここで火口方向と火口と直交する方向の比 ( $\beta$ ) をとると、

$$\beta = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_t} = \frac{D^2 - 2R^2}{D^2 + R^2} \dots \dots (5)$$

とかけ、深さ D は以下のように求められる。

$$D = \sqrt{\frac{2+\beta}{1-\beta}} R \dots \dots (6)$$

ここでは力源の水平位置は昭和火口とし、R=2150m として、深さ D を求めた。加速前後の圧力源の深さの関係を Fig. 8 に示す。加速後、圧力源が浅くなれば直線より上にプロットされる。その結果、伸縮変化が加速する前に比べて、加速後は力源の深さが 50 ~ 400m 程浅くなるケースが多くみられた。力源の深さの上昇量が小さく、さらなるデータの蓄積は必要ではあるが、これらの結果は、伸張の加速がマグマの上昇による可能性を示している。伸張に加速がみられた場合、発生する噴火が爆発的になることが多いことから、爆発的噴火発生はマグマの上昇過程と関連している可能性がある。

次に噴火直前のわずかな収縮について議論する。Iguchi et al. (2008)によると、噴火直前のわずかな収縮は桜島南岳山頂火口の爆発や諏訪之瀬島、スメル火山の爆発発生直前でも観測されており、諏訪之瀬島などで爆発発生直前にゆっくりとした火山ガスの放出が観測されていることから、この収縮の原因を火口底の蓋のわずかな亀裂等から火山ガスが緩やかに放出されることによると推定している。従って、前章の収縮速度が一定でないということは、火山ガスの放出が噴火毎に異なっている可能性があることを示唆する。

Iguchi et al. (2008)は、火山ガスのゆるやかな放出で火道最上部が減圧することによりガスだまりの下の過飽和状態のマグマが急激に発泡し、爆発地震の初動は励起されると推定している。火山ガスのゆるやかな放出による火道最上部の減圧により過飽和マグマが発泡するならば、噴火直前にみられるゆるやかな収縮と爆発地震の初動との間に何らかの関係がみられる可能性がある。Fig. 9 に初動振幅と噴火直

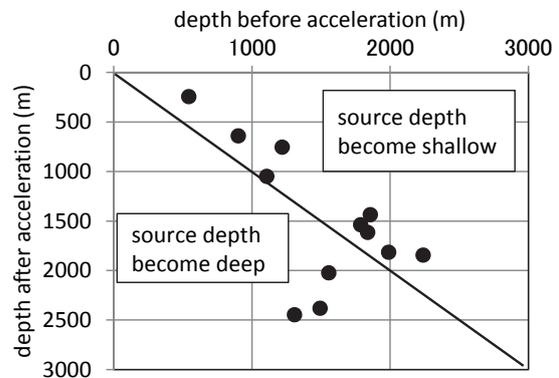


Fig. 8 Relationship between source depths before and after acceleration of the inflation rate.

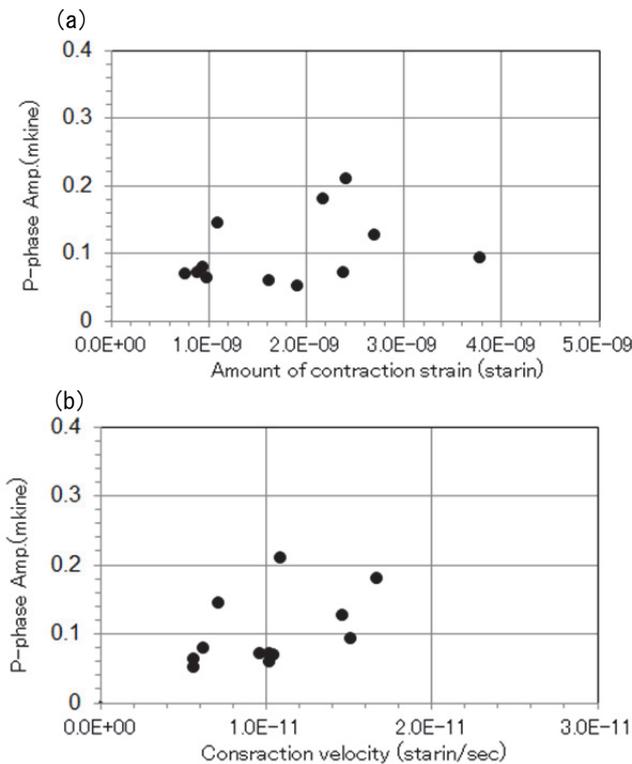


Fig. 9 Relationship between P-phase amplitude and (a) the amount of contraction and (b) contraction velocity.

前の収縮量及び収縮量をその継続時間で割った平均収縮速度との関係を示す。なお、初動振幅はノイズ等の影響により読み取りできないものもある。初動振幅と収縮量との間に明瞭な関係はみられないが、初動振幅と収縮速度には正の相関があるようにもみえる。Toramaru (2006)は、過飽和マグマ中の気泡数密度は、過飽和マグマの減圧速度に比例することを示している。このことは、生じた気泡数密度が高いほど、過飽和マグマ中のマグマの急激な発泡量が多くなり、それにより初動振幅が大きくなることを示しているのかもしれない。

Fig. 10にゆるやかな収縮量と最大振幅の関係を示す。ばらつきはあるものの収縮量が大きくなるにつれて、最大振幅は小さくなっているようにもみえる。Tameguri et al. (2002)は、爆発地震の最大振幅部分は火道最上部の膨張と収縮により励起され、その振幅の大きさは火道最上部の圧力変化の大きさに比例すると述べている。Fig. 10の結果は、火道最上部に蓄積された火山ガスが放出し、火道最上部のガスだまりの圧力が低下したために、爆発地震の最大振幅が

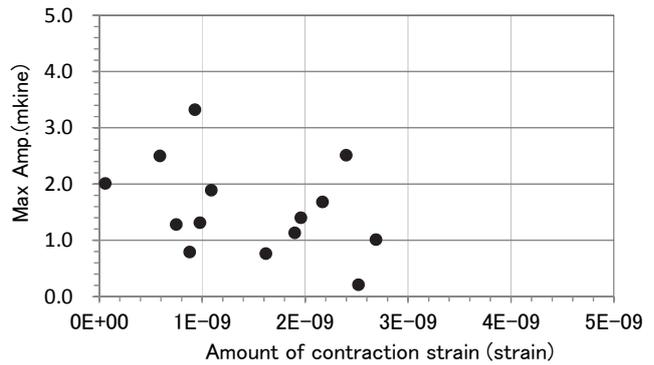


Fig. 10 Relationship between maximum seismic amplitude and the amount of deflation.

小さくなっていることを示しているのかもしれない。

以上の結果と Iguchi et al. (2008)や Tameguri et al. (2002)から、伸張の加速及び噴火直前のゆるやかな収縮がみられた場合の噴火に至る過程は次のように考えられる(Fig. 11)。まず、マグマが火道へ貫入し、それにあわせて火道最上部に火山ガスが蓄積される(過程 1)。少しずつ火口底の蓋が壊れていき、火道最上部に蓄積された火山ガスが少しずつ漏れていき、このことにより火道最上部の圧力がやや低下し、マグマ中に気泡が生成される。気泡の生成によりマグマがさらに上昇し、地盤変動が加速される(過程 2)。火口底の蓋がさらに破壊され、火道上部に蓄積された火山ガスの放出がさらに進み、伸縮計でゆるやかな収縮が観測される。(過程 3)。火道最上部の減圧により過飽和マグマが減圧発泡し、爆発地震の初動が励起される(過程 4)。減圧発泡による圧力波により火道最上部に形成されたガスだまりが増圧し、火口底の蓋が破壊され、噴火が開始する(過程 5)。噴火発生により、火道最上部の火山ガスが急激に放出され、火道最上部が収縮する(過程 6)。

## 5 まとめ

桜島昭和火口の噴火に前駆して有村観測坑道の伸縮計で火口直下の膨張を示す地盤変動が観測された。地盤変動の大きさやその速度と発生する噴火の形態(爆発的、非爆発的噴火)には関係がみいだされなかったが、噴火発生直前に伸張が加速する場合は、その約 7 割が爆発的噴火であった。この変化の加速は圧力源の上昇によると考えられる。また、噴火に前駆する伸張量と噴火に伴う地震や空振振幅には相関

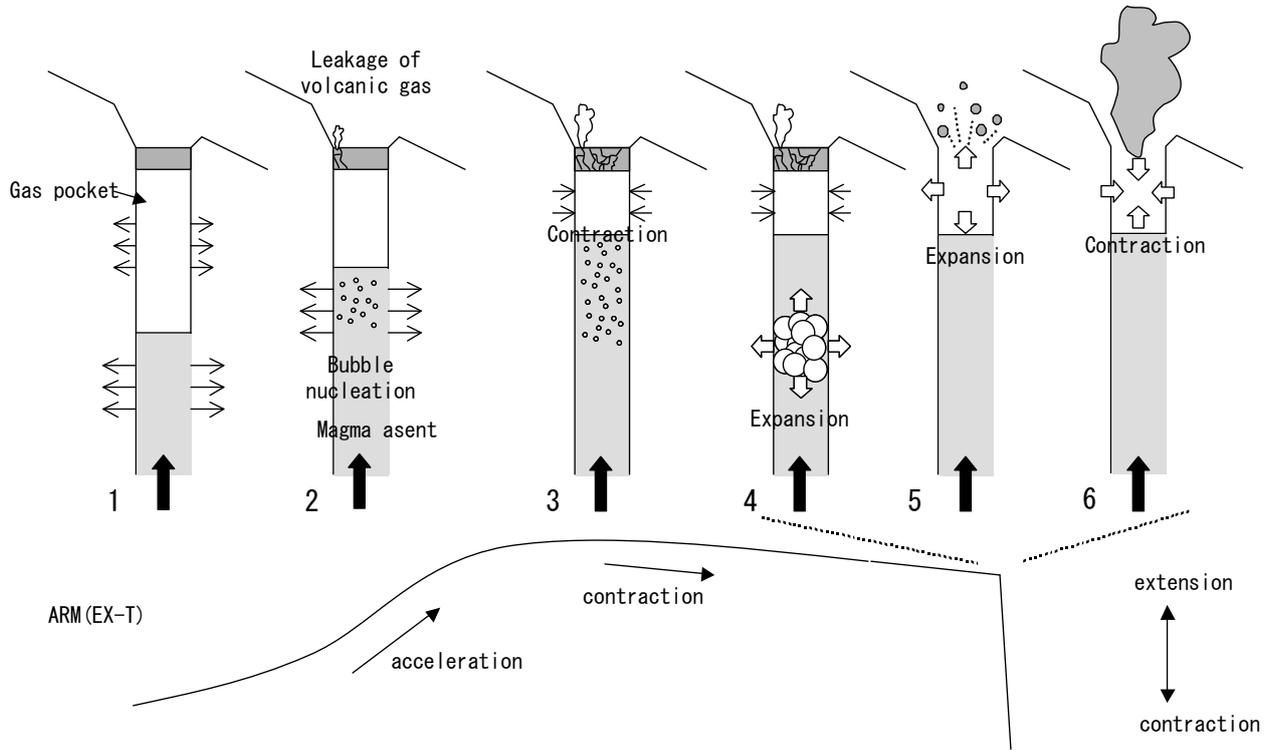


Fig. 11 Schematic illustration of the explosion process at Sakurajima Showa crater, and the strain changes (EX-T) at ARM.

が認められないが、噴煙高度は伸張量が大きくなるほど高くなる傾向がみられた。これらの結果は、事例が少なく、噴火予警報運用に活用するには、さらなる事例蓄積と検討が必要であるが、噴火に前駆する地盤変動を詳細に監視すれば、発生する噴火の形態（爆発的噴火、非爆発的噴火）や規模が、ある程度予測可能であることを示している。発生する噴火の形態（爆発的噴火、非爆発的噴火）に関わらず、噴火発生直前にわずかな収縮を示す地盤変動が観測される。その収縮の速度と爆発地震の初動振幅に相関がみられる。このことは、収縮（減圧）速度が大きいほど過飽和とマグマが急速に発泡し、爆発的噴火が励起されるという物理過程の可能性を示唆する。

#### 謝辞

有村観測坑道の伸縮計記録は国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所より提供していただいた。本論文は、筆頭著者が鹿児島地方気象台勤務中に調査した結果をまとめたものである。鹿児島地方気象台観測予報課火山担当の皆さんとの日ごろからの意見交換は、本稿を作成する上で非常に有益でした。石原和弘京都大学名誉教授や京都大学大学院理学研究科の横尾亮彦博士からは御助言をいただきました。本稿を仕上げるにあたり、2名の匿名査読者のコメ

ントが大変有意義でした。以上、ここに記して感謝いたします。

#### 文献

- 中禮正明・瀧山弘明 (2006): 2004年浅間山噴火活動に伴う傾斜変動について, 火山, **51**, 91-101.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M. and Hirabayashi, J. (2008): Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 1-9.
- 井口正人・横尾亮彦・為栗健 (2009): 桜島昭和火口噴火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 2009年大会予稿集.
- Ishihara, K. (1990): Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano : sakurajima volcano, Japan. In *Magma Transport and Storage* (Ryan, M.P. ed.), John Wiley & Sons, 335-356.
- 石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江正嗣 (1984): 地球潮汐データ解析 -プログラム BAYTAP の紹介-, 統計数理研究所彙報, **3**, 327-349.
- Mogi, K. (1958): Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of ground

surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, **38**, 99-134.

Nishimura, T. (2009): Ground deformation caused by magma ascent in an open conduit, J. Volcanol. Geotherm. Res., **187**, 178-192.

Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002): Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima Volcano, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **47**, 197-215.

Toramaru, A. (2006): BND (bubble number density) decompression rate meter for explosive volcanic eruptions, J. Volcanol. Geotherm. Res., **154**, 303-316.

(編集担当 坂井孝行)