

## 桜島における BL 型地震群発活動に伴う地盤変動

立尾有騎\*・井口正人\*

(2009年3月16日受付, 2009年7月27日受理)

## Ground Deformation Associated with BL-type Earthquake Swarms at Sakurajima Volcano

Yuki TATEO\* and Masato IGUCHI\*

Sakurajima volcano experiences, in addition to repeated vulcanian eruptions, intermittent small eruptions similar in style to strombolian eruptions. These strombolian-like eruptions are associated with swarms of BL-type earthquakes dominated by low frequency components (1–3 Hz). Ground deformation associated with BL-type earthquake swarms was detected by water-tube tiltmeters and extensometers in an underground tunnel. Tilt and strain records were corrected by BAYTAP-G to account for the tidal effect. Gradual tilt change of crater-side-up (20–320 nrad) and extension of the ground (8–170 nstrain) continued for 3–30 hours before the BL swarms. The inflation was temporarily suspended for 0.5–19 hours, and was then followed by deflation associated with BL swarms. The degree of tilt and strain change was in the same order as that for vulcanian eruptions; however the duration of inflation processes is longer than that of a vulcanian explosion (by several minutes to several hours). The inflation rates (2–28 nrad/h, 2–16 nstrain/h) prior to BL swarms are smaller than those prior to vulcanian eruptions (20–90 nrad/h, 10–50 nstrain/h). In the deflation process, tilt change of crater-side-down (40–300 nrad) and contraction of the ground (20–160 nstrain) continued for 1–6.5 hours and was accompanied by BL swarms. The deflation rates (17–113 nrad/h, 12–57 nstrain/h) accompanying BL swarms are small. The deflation rates of 1/3 of the vulcanian eruptions exceeded the upper limit of the deflation rate that accompanied the BL swarms. The depth of the source of pressure that is thought to induce the ground deformation associated with BL swarms is estimated to be 3–4 km for both inflation and deflation processes (assuming the Mogi source to be horizontally located at the center of crater). No difference in depth is detected for vulcanian eruptions. Volcanic gases were emitted in the inflation process prior to BL swarms, however volcanic gas emission stopped in the inflation process prior to vulcanian eruptions. It is inferred that prior to vulcanian eruptions, the top of the conduit is plugged by a lava dome derived from cooled and degassed magma, and the internal pressure rapidly increases. In contrast, prior to BL swarms, the upper conduit is loosely choked and the internal pressure gradually increases due to the intrusion of new magma from a deeper source. The difference in inflation rates may be caused by the degree of choking of the upper conduit. BH-type earthquakes dominated by high frequency components (5–8 Hz) occurred alongside inflation prior to a BL swarm. The inflation rate almost reached the maximum rate prior to BL swarms that occurred without pre-BH-type earthquakes. It is inferred that a high inflation rate due to choking of the conduit is the cause of BH-type earthquakes.

**Key words:** ground deformation, BL-type earthquake swarms, Sakurajima volcano

## 1. はじめに

火山噴火に先行して火山体内にマグマが貫入することにより、噴火地点周辺の地盤が隆起・伸張し、噴火開始とともにマグマの放出により地盤が沈降・収縮することが多くの火山において観測されている。1980年5月18日に山体崩壊を伴う大噴火が発生したセントヘレンズ火山

では噴火の約1カ月前から1.5~2 m/日の速度で北側斜面がせり出し、山体が膨張していたことが光波測量により検出された(Lipman *et al.*, 1981)。小規模な噴火についても、同様に噴火に先行して火山体の隆起・伸張が見られる。浅間火山では2004年9月1日の爆発的噴火を含む4回の中規模爆発的噴火の3.5~29時間前から西側

\* 〒891-1419 鹿児島市桜島横山町1722-19  
京都大学防災研究所附属桜島火山活動研究センター  
Sakurajima Volcano Research Center of DPRI, Kyoto  
Univ., Sakurajima-Yokoyama, Kagoshima, 891-1419

Japan.

Corresponding author: Masato Iguchi  
e-mail: iguchi@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

隆起の傾斜変化 ( $0.03 \sim 0.11 \mu\text{rad}$ ) が、山頂から北北東  $2.5 \text{ km}$  の地点に設置された傾斜計により観測されており、この傾斜変化は山頂火口直下にはほぼ東西に走向を持つダイク状の圧力源が膨張したことに起因すると解釈されている (中禮・潟山, 2006)。同様にインドネシアのスメル火山においても爆発の  $3 \sim 30$  分前から火口方向の地盤が隆起する傾斜変化を示し、噴火とともに沈降へと反転する (Iguchi *et al.*, 2008)。このような地盤の隆起は広帯域地震計から得られる変位記録でも見られ、諏訪の瀬島火山においては爆発の  $100$  秒前から上方への変位が始まり、爆発が始まると下向きの変位へと反転する。これは火口下  $100 \text{ m}$  の深さに位置する球状圧力源の体積増加と減少によって引き起こされたと考えられている (Iguchi *et al.*, 2008)。また、阿蘇火山でも水蒸気噴火の数  $10$  秒前から山体が膨張していることが示されている (Kaneshima *et al.*, 1996)。

桜島火山では  $1955$  年から南岳山頂火口において噴火活動が繰り返されている。典型的な噴火様式は、強い爆発音・空気振動とともに火山岩塊や火山灰を放出するブルカノ式噴火である。京都大学防災研究所附属桜島火山観測所 (現: 火山活動研究センター) では火口から  $2.7 \text{ km}$  の距離に位置する観測点において地震動 (爆発地震) の最大振幅が  $10 \mu\text{m}$  以上、空気振動の振幅が  $10 \text{ Pa}$  以上の噴火をブルカノ式噴火と定義している。2008 年末までに  $7897$  回に及ぶブルカノ式噴火が発生した。空気振動の振幅が  $500 \text{ Pa}$  を超え (井口・石原, 1990)、火山弾が火口から  $3 \text{ km}$  の距離にまで達することもある (井口・他, 1983)。一回のブルカノ式噴火によって放出される火山灰量も多く、 $1987$  年  $11$  月  $17$  日の噴火では  $20 \sim 40$  万トンの火山灰が放出したと見積もられている (石原・小林, 1988)。

噴火活動はマグマ供給系と密接に関係している。石原 (1988) は山頂火口下  $3 \sim 4 \text{ km}$  以深にマグマ溜りは存在し、ほぼ垂直な火道によって火口底へと繋がっていると推定している。ブルカノ式噴火の数分～数時間前に先行して火口周辺の地盤が隆起・伸張し、噴火後には沈降・収縮する。その変動量は傾斜変化が  $0.01 \sim 0.3 \mu\text{rad}$ 、面積歪変化が  $0 \sim 0.25 \times 10^{-6}$  である。この変動を引き起こす圧力源の深さは火道下部からマグマ溜まりの深さに対応する  $2 \sim 6 \text{ km}$  であることから、噴火前の火口方向の地盤が隆起・沈降する傾斜変化は、それぞれ、火道下部へのマグマの貫入と火道からのマグマの放出に対応すると解釈されている (Ishihara, 1990)。

桜島火山ではブルカノ式噴火ほど爆発的ではないが、噴煙を単発的に放出する噴火や (Kamo and Ishihara, 1989)、ストロンボリ式噴火に似た間欠的な小噴火が火山灰放出を伴いながら長時間継続することがある。ストロンボリ

式噴火に似た間欠的な小噴火が発生する時には、BL 型地震 (井口, 1989) と呼ばれる低周波成分 ( $1 \sim 3 \text{ Hz}$ ) が卓越する微小地震が群発する (石原・井口, 1989)。この BL 型地震は火道上部に相当する直径  $200 \sim 300 \text{ m}$ 、海水面下  $0 \sim 2 \text{ km}$  の領域内で発生し、その発生機構は、マグマや火山ガスの流体で満たされた火道内における鉛直方向へのガス塊の体積変化であると考えられている (Iguchi, 1994)。また、BL 型地震が群発している時は火口方向が沈降する傾斜変化を示すことから、BL 型地震は火口の直下の圧力が低下する過程で群発し、揮発性成分に富んだマグマが火口底において溢れ出ている状態であると考えられている (石原・井口, 1989)。

したがって、BL 型地震が群発する前にはマグマが火道内へ貫入していることが推定されるが、石原・井口 (1989) では、BL 型地震の群発に先行する地盤変動については示されていない。BL 型地震の活動に先行する火口方向の地盤が隆起する現象を伴うものとして、高周波成分 ( $5 \sim 8 \text{ Hz}$ ) が卓越する BH 型地震 (井口, 1989) があげられる。 $1987$  年  $9$  月  $4$  日の BL 型地震の群発活動に先行して半日ほど前から BH 型地震が多発したことから (石原・井口, 1989)、BL 型地震の群発に先行してマグマが貫入したことが示唆される。しかし BH 型地震はその発生例が少なく、BL 型地震活動との対応や地盤変動から推定されるマグマ貫入過程との関係が十分検討されていない。BL 型地震の群発に先行する火口周辺の地盤の隆起傾斜変化は検出された例はあるが (井口, 2000)、その変動量や継続時間については定量化されておらず、歪変化については不明である。

そこで本研究では、南岳における噴火活動が活発であった  $1986 \sim 1988$  年に発生した BL 型地震の群発を対象に、その前後の傾斜および歪変化を解析し、地盤変動を定量化することを試みた。また、ブルカノ式噴火に伴う地盤変動と比較することにより、マグマ供給系である火道内およびマグマ溜まりにおける圧力変化様式の違いを明らかにし、マグマの動態と火道内状態の相違について議論した。

## 2. 観測と地盤変動記録

桜島山体の傾斜および歪変化は桜島南岳山頂火口の中心から北西約  $2.7 \text{ km}$  の距離にあるハルタ山に掘削された坑道において観測されている (HAR; Fig. 1)。ハルタ山は溶岩円頂丘であり、その表層  $25 \text{ m}$  は火山灰と軽石の互層で、その下には標高  $50 \text{ m}$  まで安山岩質溶岩が厚さ  $330 \text{ m}$  にわたって堆積している。観測坑道はハルタ山北西斜面標高  $342 \text{ m}$  地点から南岳に向け、ほぼ水平に溶岩円頂丘内を掘削されており、最奥部に直角二等辺三角

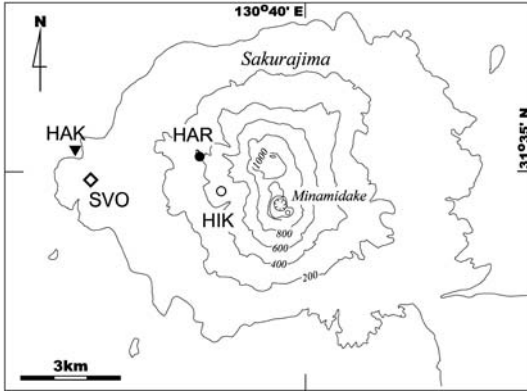


Fig. 1. Map showing the location of tiltmeters and extensometers in the underground tunnel at Harutayama (HAR: solid circle). Also shown are Seismometers (HIK: open circle), a tide gauge (HAK: reversed triangle) and the video camera equipped main observatory (SVO: diamond).

形の地盤変動観測室が設けてある。地盤変動観測室には、水管傾斜計 2 成分 (WT-R, WT-T) およびスーパーインパール棒伸縮計 3 成分 (EX-1 (R), EX-2 (T), EX-3) が設置されており、基線長はいずれも 28 m である。坑道の方向は N111°E であり、火口方向から 11°北寄りになっている (Ishihara, 1990; Kamo and Ishihara, 1989)。本稿ではほぼ火口方向に一致する坑道方向の成分を R 成分、それに直交する方向の成分を T 成分と略記する。

1986~1988 年当時の記録は打点計によるものしか残っていないため、まず、打点記録紙をスキャンし、画像データにした後、OriginLab Corporation のグラフ作成・データ解析用ソフト Origin Pro 7J のカスタムツールの一つである “Digitizer ツール” により、画像をディスプレイ上に表示し、マウスで地盤変動記録線ををクリックすることによりデジタル化した。サンプリング間隔は 5 分~20 分である。得られた読み取り値に内挿処理を行い、10 分毎値データを作成した。

Fig. 2 にブルカノ式噴火および BL 型地震の群発に前後する地盤変動の元記録を地震活動の推移とともに示す。地震活動の指標として、火口から 1.7 km の距離にある引ノ平地震観測点 (HIK; Fig. 1) における 10 分間の地震動エネルギー積算値を用いた。1987 年 11 月 14 日 15 時 36 分のブルカノ式噴火では約 4 時間前から 150 nrad の火口方向隆起の傾斜変化、また火口方向において 44 nstrain、直交方向において 40 nstrain の伸張歪が観測されている。火口方向の地盤が隆起・膨張を示す時間帯では地震動エネルギー積算値が著しく低下している。これ

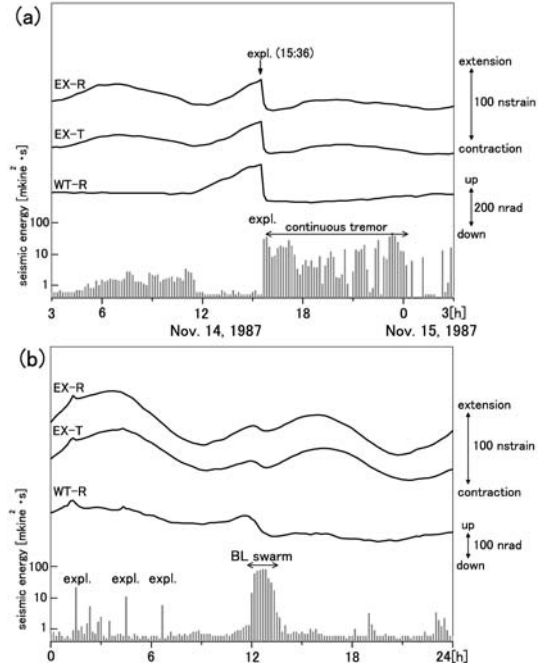


Fig. 2. Tilt and strain records associated with (a) vulcanian eruptions, and (b) BL-type earthquake swarms. Seismicity is represented by amounts of seismic energy released in 10-m intervals.

は、それ以前の時間帯において発生していた火山性微動が停止したことによる。ブルカノ式噴火後に引き続き発生した連続的な火山灰放出を伴う連続微動活動では、顕著な沈降・収縮は見られない (Fig. 2a)。

1988 年 2 月 6 日の 11 時 49 分から 13 時 27 分まで群発した BL 型地震では、水管傾斜計 WT-R 成分には山頂火口方向の地盤沈降が認められる。また伸縮計の 2 成分 (EX-R, EX-T) においても、約 100 nstrain の振幅を持つ潮汐変化に重畳する収縮歪が認められる (Fig. 2b)。BL 型地震の発生以前では火口方向の地盤の緩やかな隆起と膨張を認めることができるが、Fig. 2b のように潮汐成分の振幅に比べ、地盤変動量が小さく、変動が緩やかに進行している場合、変動の開始時刻や変動量を元記録から読み取ることが困難である。

### 3. 潮汐補正後の観測記録

#### 3-1 潮汐補正

Fig. 2 に示すように桜島における傾斜および歪変動は潮汐の影響を強く受けている。Ishihara (1990) は、袴腰潮位観測室 (HAK; Fig. 1) の潮位変化とハルタ山観測坑道内の傾斜・歪変化との間に線形関係を仮定し、潮汐

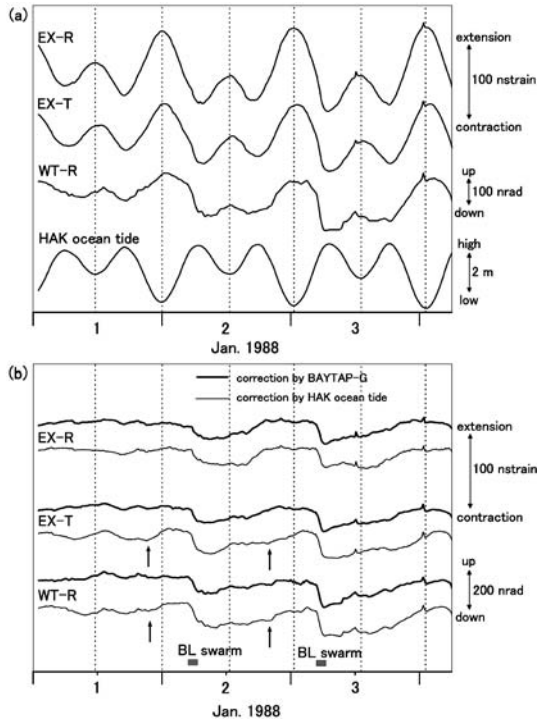


Fig. 3. Representative tidal correction. (a) Original tilt and strain records and tidal level at station HAK. Dashed lines show times of low tide. (b) Tilt and strain records after correction for tidal effects by using BAYTAP-G (heavy lines) and by using the tidal level at station HAK (thin lines).

成分の除去を行ったが、この手法では地盤変動と袴腰潮位観測室の潮位変化の間に最大2時間程度の位相差が存在するために、潮汐成分が残る場合がある。そこで本研究においては、潮汐の各分潮の振幅と位相を考慮した潮汐解析プログラム BAYTAP-G (石黒・他, 1984; Tamura *et al.*, 1991) を用いて潮汐成分を除去した。

BAYTAP-G を用いて潮汐成分を除去した傾斜・歪変化の例を袴腰における観測潮位による補正結果と合わせて Fig. 3 に示す。1988年1月2日の6時から7時までと1月3日の5時から6時まで発生した BL 型地震の群発に伴う火口方向の地盤の沈降を示す傾斜変化および収縮歪変化では、BAYTAP-G でも観測潮位を用いた補正でも同様の結果が得られたが、長時間についてみると BAYTAP-G による補正の方が、観測された潮位を用いた補正に残っていた潮汐成分が少ない。最も明瞭な違いが見られるのは1月2日と1月3日の0時前の記録であり、観測潮位を用いた補正では1月1日の21時および1月2日の19時ごろ (Fig. 3 に矢印で示した) から隆起・

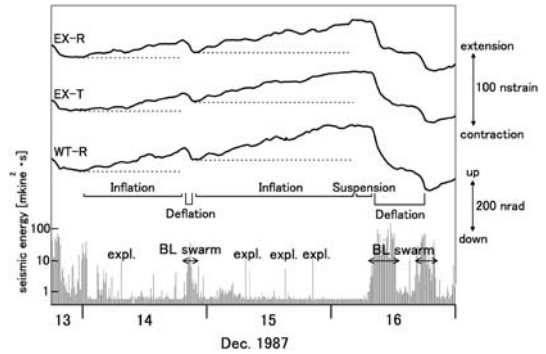


Fig. 4. Tilt and strain records associated with BL-type earthquake swarms (after correction for tidal effects by using BAYTAP-G). Seismic energy released in 10-minute intervals is also shown. Periods of Vulcanian eruptions are denoted by “expl.”.

伸張しているように見えるのに対し、BAYTAP-G による補正記録では大きな変化がない。BAYTAP-G による補正の改善効果は伸縮計の火口方向に直交する方向の成分 (EX-T) および傾斜計の火口方向成分 (WT-R) において顕著に認められた。

### 3-2 潮汐補正後の地盤変動の特徴

1987年12月14日～16日の潮汐補正後の傾斜および歪変化を10分間毎の地震動エネルギーと合わせて Fig. 4 に示す。12月14日の1時頃から緩やかな火口方向の地盤の隆起を示す傾斜変化と地盤の伸張が始まり約19時間にわたり続いた。傾斜変化量は火口方向成分において90 nrad、歪変化量は火口方向成分、直交方向成分とも22 nstrain に達した。20～21時に BL 型地震が群発し、火口方向隆起の傾斜変化と地盤の伸張は、それぞれ、顕著な沈降 (WT-R: -40 nrad) と収縮 (EX-R: -10 nstrain, EX-T: -9 nstrain) に反転した。BL 型地震の発生が停止した14日の23時頃から緩やかな火口方向の地盤の隆起を示す傾斜変化と地盤の伸張が再開し29時間続いた。16日の4時頃には WT-R 成分の傾斜変化量は140 nrad、歪変化量は EX-R において44 nstrain、EX-T 成分において40 nstrain に達した。その後、隆起・伸張は停滞し、傾斜変化量は±1 nrad 以下、歪変化量は±3 nstrain 以下の微小な揺らぎにとどまった。この停滞状態が約4時間続き、8時頃から BL 型地震が群発し始めると20時頃まで約12時間、火口方向沈降の傾斜変化 (WT-R: -240 nrad) と地盤の収縮歪 (EX-R: -68 nstrain, EX-T: -69 nstrain) が観測された。沈降・収縮過程においては BL 型地震の10分毎のエネルギー積算値は最大で145 mkin<sup>2</sup>·s に達したが、緩やかな隆起・伸張過程や停滞過程では、小規模な爆発を除き3 mkin<sup>2</sup>·s 以下と小さい。

次に 20 nrad 以上の火口方向の地盤の隆起を示す傾斜変化を伴う 48 個の BL 型地震の群発活動について隆起・伸張および沈降・収縮の変動量とその継続時間の関係を調べた。ここでは面積歪を用いて歪変化量を評価した。また、比較のためにブルカノ式噴火についても両者の関係を示した。

Fig. 4 に示したように、BL 型地震に伴う地盤変動は先行する緩やかな隆起・膨張から停滞過程を経て、沈降・収縮に至る。まず、それぞれの過程の開始および終了の検出時刻の決定について述べる。データセットは 10 分値であるので、10 分間の変化量に着目する。BL 型地震群発の開始から時間を遡り、 $\pm 5$  nrad 以下の揺らぎ部分を停滞過程とみなす。そこから時間を遡ると隆起・膨張を示す部分となるが、さらに時間を遡り、 $\pm 5$  nrad 以下と変化の小さい部分を見つける。BL 型地震群発の開始直前の停滞過程の傾斜レベルが、さらに時間を遡った変化の小さいレベルよりも 20 nrad 以上大きい場合、両者の間の部分の傾斜量が増加した部分を BL 型地震群発に先行する隆起過程とした。隆起過程の開始は、10 分間の傾斜変化量が 3 回 (30 分) 連続して +5 nrad を超えたときに、最初に超えた時刻を隆起開始時刻とした。隆起開始と判断した後は、3 回連続して変化量が -5 nrad 以下の範囲に入った時に、最初にその範囲に入った時刻を隆起の停止と停滞過程の開始と判断した。沈降過程の開始も同様に 3 回連続して変化量が -5 nrad 以下になった時に、最初に -5 nrad 以下になった時刻を沈降の開始とした。沈降過程の終了は、3 回連続して -5 nrad 以下にならなくなった時に、最初に -5 nrad 以下にならなくなった時刻である。ブルカノ式噴火についても、停滞過程を除いて同様である。なお、BL 型地震群発に先行する隆起および停滞過程でブルカノ式噴火が発生しても 3 回連続して +5 nrad 以上となるか、-5 nrad 以下にならなければ無視した (Fig. 4 の場合)。これは地盤変動が小さい噴火である。

Fig. 5 に BL 型地震の群発活動とブルカノ式噴火について隆起・伸張の変動量とその継続時間の関係を示した。BL 型地震の群発活動に先行する隆起・伸張変動量は傾斜変化 20~320 nrad、面積歪変化 8~170 nstrain であり、ブルカノ式噴火の場合の傾斜変化量 20~340 nrad、面積歪変化量 4~190 nstrain とほぼ同じ範囲にある。一方、BL 型地震の群発に先行する隆起・伸張の継続時間は 3~30 時間であり、継続時間 20 時間の 1 例を除いたブルカノ式噴火の継続時間 10 分~8 時間に比べると有意に長い。変動量を継続時間で割って平均変動速度とすると、BL 型地震に先行する傾斜変化では 2~28 nrad/h、面積歪では 2~16 nstrain/h となった。この値はブルカノ

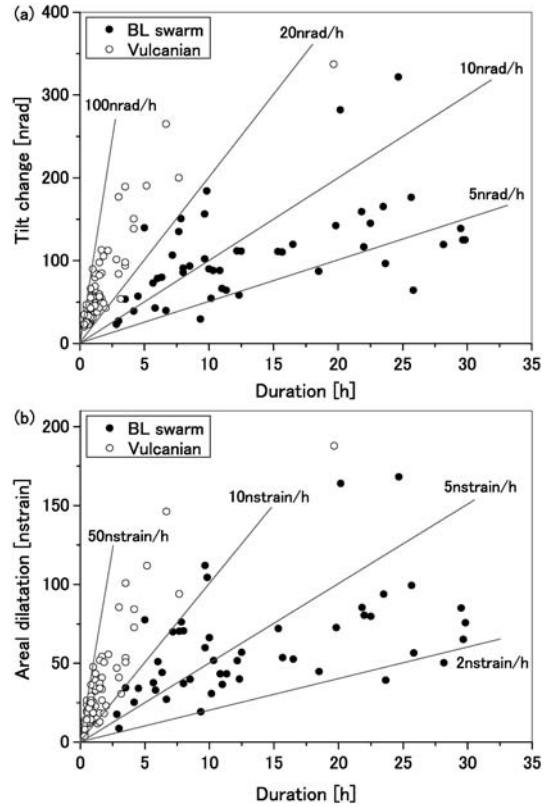


Fig. 5. Relationship between the amount of inflation ground deformation and the duration of time preceding BL-type earthquake swarms and vulcanian eruptions. (a) Tilt change of crater-side-up. (b) Areal dilatation.

式噴火の際の 20~90 nrad/h、10~50 nstrain/h に比べ小さく、BL 型地震群発活動に先行する火口方向の地盤の隆起・伸張は緩やかに進行していることがわかる。

隆起・伸張は停滞過程へと移行する。代表的な例を Fig. 6 に示す。停滞過程は 48 イベントのうち 42 イベントにおいて認められ、その継続時間は 0.5~19 時間であった。一方、ブルカノ式噴火では先行する隆起・伸張は噴火開始とともに沈降・収縮へ反転し、停滞過程は 10 分値データからは認められなかった。

沈降・収縮過程でもその変動量は BL 型地震の群発に伴う傾斜変化が 40~300 nrad、面積歪変化が 20~160 nstrain であり、ブルカノ式噴火の場合の傾斜変化量 10~290 nrad、面積歪変化量 3~150 nstrain とほぼ同じ範囲にある (Fig. 7)。一方、BL 型地震の群発に伴う沈降・収縮の継続時間は 1~6.5 時間であり、ブルカノ式噴火の場合の 10 分~2 時間に比べると長い。BL 型地震の群発中の平均沈降速度は 17~113 nrad/h、平均収縮速度は面

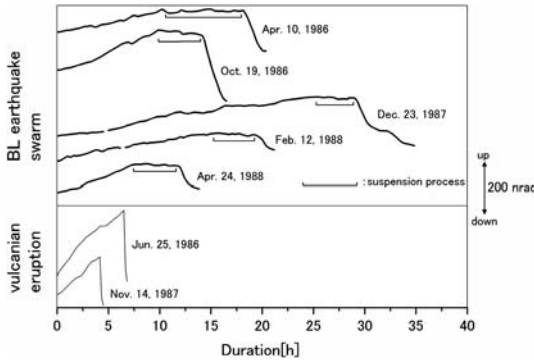


Fig. 6. Examples of records of tilt. Suspension of processes is indicated by bracket lines. Dates refer to the start of upward tilt.

積歪にして  $12 \sim 57$  nstrain/h であり、ブルカノ式噴火ではそれぞれ  $14 \sim 429$  nrad/h,  $8 \sim 220$  nstrain/h となる。変動速度の下限には大きな差がないが、上限についてはブルカノ式噴火に伴う地盤変動速度は BL 型地震の群発に比べ 4 倍程度の大きさであった。また、ブルカノ式噴火 62 例中、23 例 (37%) が BL 型地震群発中の沈降速度の最大値である  $113$  nrad/h を超えていた。

#### 4. 圧力源の推定

Ishihara (1990) にならい茂木モデル (Mogi, 1958) を仮定して、BL 型地震群発に先行する隆起・伸張と、それに伴う沈降・収縮を引き起こす力源の深さと体積変化を推定した。圧力源の水平位置は南岳火口中心とした。

BL 型地震の群発活動に先行して山体の隆起・伸張を引き起こす力源の深さは  $2.6 \sim 4.4$  km, 地表面における体積増加量は  $4 \times 10^3 \sim 7 \times 10^4$  m<sup>3</sup> と見積もられ、ブルカノ式噴火の場合の深さ  $2.1 \sim 4.0$  km, 体積増加量  $4 \times 10^3 \sim 10^5$  m<sup>3</sup> と大きな違いは見られなかった。(Fig. 8a)。また、BL 型地震の群発、ブルカノ式噴火ともに深さへの依存性は認められない。ブルカノ式噴火の場合、体積増加量が  $10^4$  m<sup>3</sup> 以下である場合、力源が浅くなると体積変化量が小さくなるように見えるが、面積歪量と傾斜変化量の比から圧力源の深さを推定する Ishihara (1990) の方法では、深さ 2 km 付近は面積歪量と傾斜変化量の比が 0 に近いことを意味し、面積歪量が小さい場合深さの決定精度がよくない。

山体の沈降・収縮を引き起こす力源についても同様の結果が得られた。BL 型地震の群発に伴う山体の沈降・収縮を引き起こす力源の深さは  $2.6 \sim 4.5$  km, 体積減少量は  $8 \times 10^3 \sim 7 \times 10^4$  m<sup>3</sup> と見積もられた。一方、ブルカノ式噴火の際は深さ  $2.1 \sim 4.2$  km, 体積減少量は  $3 \times 10^3 \sim 9$

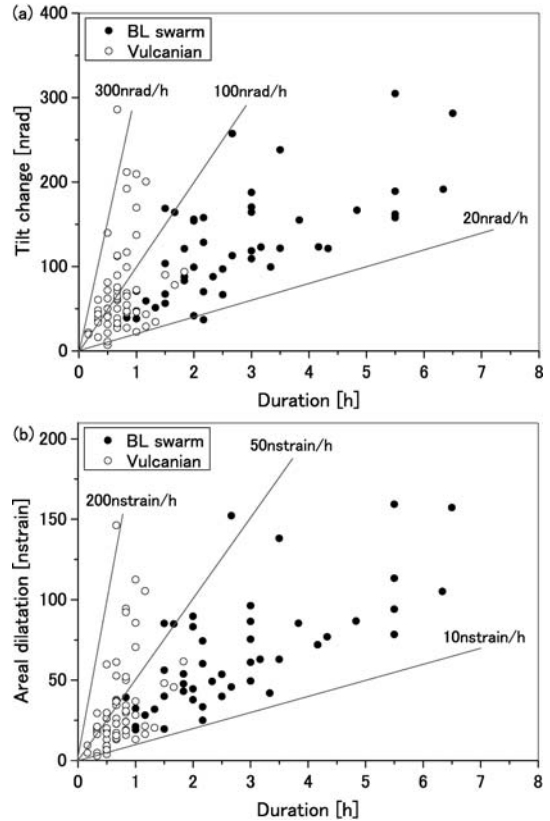


Fig. 7. Relationship between amounts of deflation ground deformation and duration of time associated with BL-type earthquake swarms and vulcanian eruptions. (a) Tilt change of crater-side-down. (b) Areal dilatation.

$\times 10^4$  m<sup>3</sup> となり (Fig. 8b), BL 型地震群発活動とブルカノ式噴火の間で力源の深さおよび体積減少量に違いはなく、体積減少量の深さへの依存関係は認められなかった。また、山体の隆起・伸張を引き起こす力源と沈降・収縮を引き起こす力源の間には深さ、体積変化量ともに違いが認められなかった。

Ishihara (1990) は、ブルカノ式噴火に先行する地盤変動を引き起こす膨脹圧力源の深さを  $2 \sim 6$  km と見積もり、体積増加量の深さへの依存性が認めているが、本研究では、圧力源の深さが 3 km 前後に集中し、体積増加量の深さへの依存性は認めにくい。ここで使用した地盤変動データは Ishihara (1990) に示されたものとはほぼ同じであるので、この違いは、潮汐補正方法の違いによるものと考えられる。圧力源の深さは面積歪量と火口方向の傾斜変化量の比から求められるが、3-1 に述べたように補正方法の違いは傾斜計の火口方向の成分と伸縮計の火口

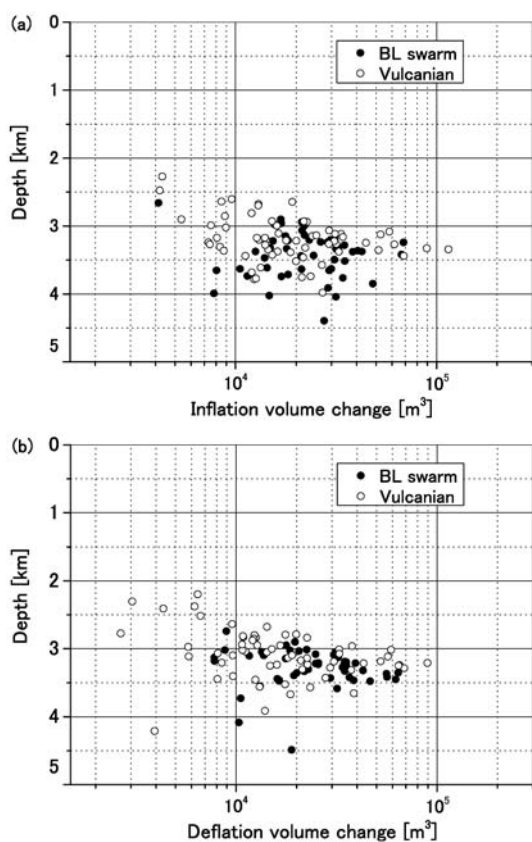


Fig. 8. Relationship between depth and volume change of the pressure source for (a) inflation process and (b) deflation process. Solid and open circles indicate BL-type earthquake swarms and vulcanian eruptions, respectively.

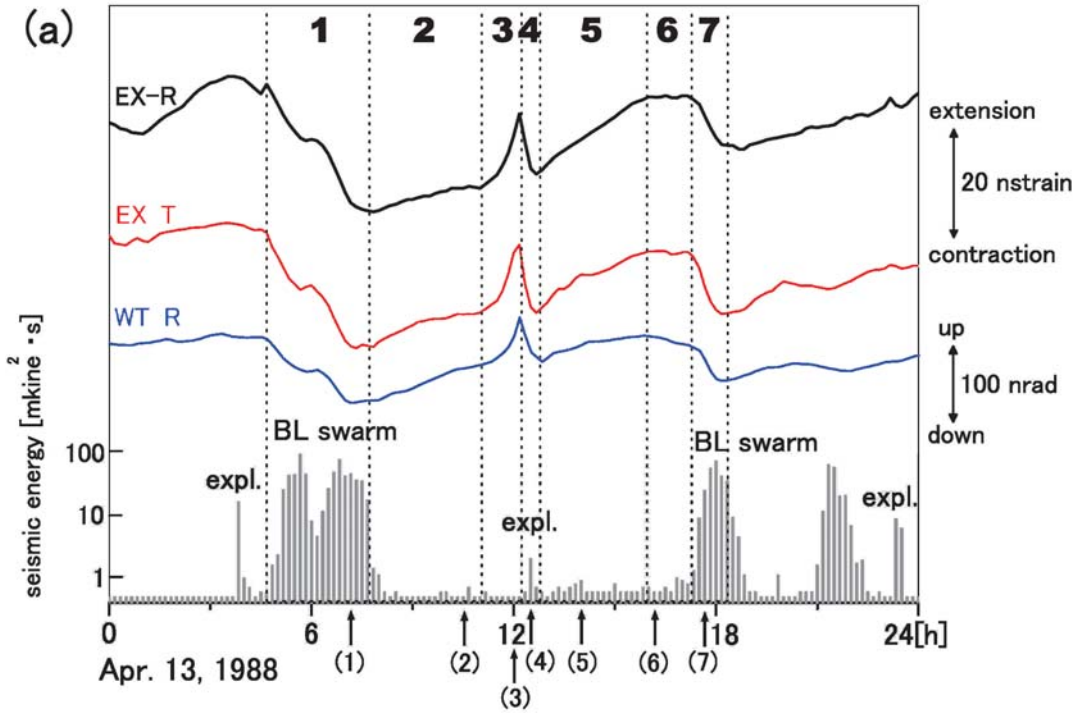
と直交方向の成分の両方に大きく現れるので、補正後の値は圧力源の深さの見積もりに大きく影響を与える。見掛け上、圧力源の深さが深く求まれば、体積変化量も大きい値が得られてしまう。Ishihara (1990) の手法では、観測潮位と傾斜・歪変化の位相差が大きい時に補正誤差を生じることになる。

## 5. 議 論

BL 型地震の群発とブルカノ式噴火のいずれの場合も、それに先行する隆起・伸張を引き起こす圧力源の深さは、火口から 3~4 km 程度である。Ishihara (1990) は、ブルカノ式噴火に先行する火口方向の地盤の隆起と伸張は、深さ 4 km 以深にあるマグマ溜りから、火道下部へのマグマの貫入によって引き起こされているとしており、BL 型地震の群発に先行する地盤の隆起・伸張でも、同様の深さに圧力源が位置することは BL 型地震の群発に

先行して火道下部へマグマが貫入していることを意味する。また沈降・収縮過程における圧力源の深さにも相違がないことから BL 型地震の群発に伴う沈降・収縮は、同様にマグマ溜りから火道上部へマグマが移動し、火道内のマグマが火山灰・火山ガスとして放出された（ストロンボリ式噴火に似た小規模噴火の繰り返し）結果と考えられる。BL 型地震の群発活動ではブルカノ式噴火よりも変動速度の小さい地盤の隆起・伸張が先行し、0.5~19 時間の停滞期を経て、ブルカノ式噴火よりも小さい変動速度で地盤が沈降・収縮することが多い。沈降・収縮速度の相違は、火山灰・火山ガスの放出速度の違いを反映しているものと考えられる。石原・他 (1983) によれば、ブルカノ式噴火の噴煙の上昇速度は 2 つのフェーズに分けられる。最初のフェーズは、ブルカノ式噴火開始直後の噴煙の膨脹に対応し、噴火開始直後は噴煙の上昇速度は大きい、急激に低下する。これに対し、次のフェーズでは噴煙は一定速度で上昇する。これを地盤変動と対応付けると、最初のフェーズは噴火発生直後の歪ステップ (Ishihara, 1990) に対応し、これは火道最上部の高圧ガスたまりの急激な収縮によるものと推定されている。ブルカノ式噴火の地盤変動の大半はそれにつづく沈降・収縮であり、噴煙運動では 2 番目のフェーズの噴煙の一定速度の上昇に対応する。石原・他 (1983) はこの上昇速度を 20~35 m/s と見積もっている。BL 型地震発生時の噴煙はほぼ定常状態で噴出されているので、速度を見積もることは難しいが、1988 年 4 月 13 日の噴煙の一部の特徴的な部分に注目し、その上昇速度を見積もると 5~10 m/s となり、BL 型地震群発に伴う火山灰・火山ガスの放出速度はオーダー的にはちがわないものの有意に小さいといえる。

変動速度の相違は隆起・伸張過程においても同様であり、BL 型地震の群発に先行する変動速度はブルカノ式噴火に比べて小さい。この理由について表面現象の変化に基づいて考察を行う。BL 型地震の群発とブルカノ式噴火が発生した 1988 年 4 月 13 日の日中の地盤変動記録と映像記録を Fig. 9 に示す。伸縮計が収縮、水管傾斜計が火口方向の沈降を示す時間帯 1 では BL 型地震の群発に伴って火山灰が連続的に放出されている。7 時 30 分頃、緩やかな隆起 (14 nrad/h)・伸張 (3 nstrain/h) が開始した (時間帯 2)。この時間帯では 10 分間の地震動エネルギー積算値は  $0.7 \text{ mkin} \cdot \text{s}$  以下と小さい。時間帯 1 と比べると噴煙活動度は低いが、映像からは薄い火山灰混じりの火山ガスの放出が確認できる。したがって火道上部は開放状態であるか、火山ガスの放出を停止させるほど完全には閉塞した状態ではないことがわかる。隆起・伸張速度は徐々に増加し、11 時 20 分から 12 時 22



(b)

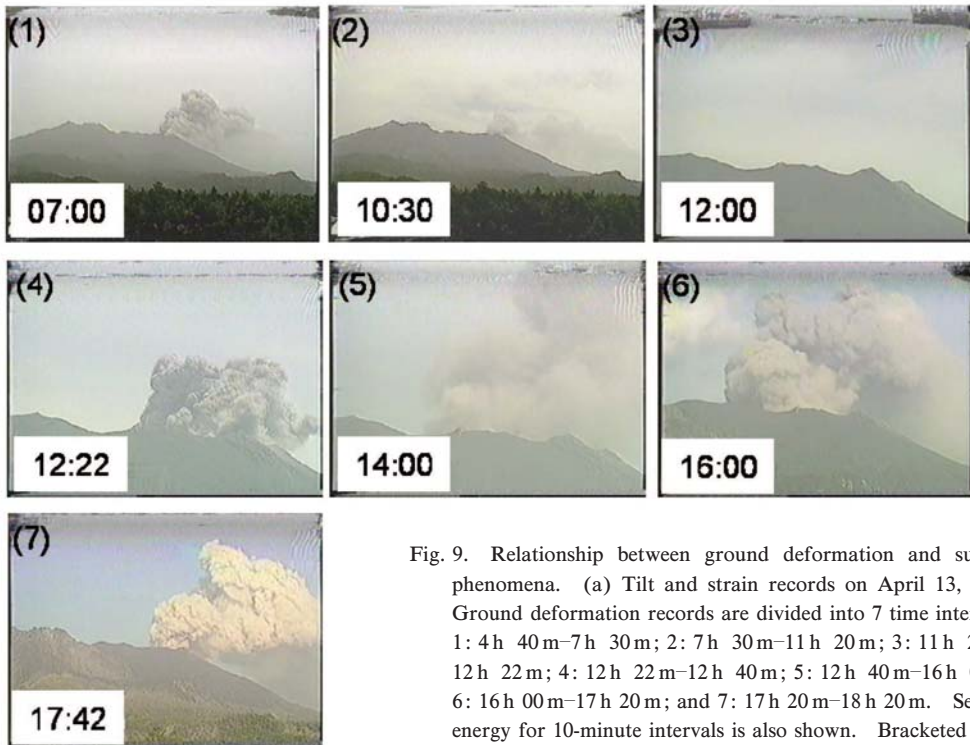


Fig. 9. Relationship between ground deformation and surface phenomena. (a) Tilt and strain records on April 13, 1988. Ground deformation records are divided into 7 time intervals: 1: 4 h 40 m–7 h 30 m; 2: 7 h 30 m–11 h 20 m; 3: 11 h 20 m–12 h 22 m; 4: 12 h 22 m–12 h 40 m; 5: 12 h 40 m–16 h 00 m; 6: 16 h 00 m–17 h 20 m; and 7: 17 h 20 m–18 h 20 m. Seismic energy for 10-minute intervals is also shown. Bracketed numbers with arrows indicate the time of capture of photographs (b) of surface phenomena above the summit crater.



分までの時間帯 3 の変動速度は傾斜変化速度において 70 nrad/h、歪速度において 30 nstrain/h に達した。時間帯 3 のビデオ映像では火山灰・火山ガスが放出されていないように見える。この時の火口底の状況は確認されていないが、ブルカノ式噴火の前には火口底において溶岩ドームの形成が確認されたこと (Ishihara, 1985) があることから、この場合も火口底には溶岩ドームが形成されていた可能性がある。この例では、地震動エネルギーの低下は顕著ではないが、Fig. 2a に示したように、火山性微動が停止し、地震動エネルギーが顕著に低下することがあり、このことは火道最上部が閉塞したことを示唆する。もし、時間帯 2 と 3 において火道下部へのマグマの供給速度に変化がなくても火道上端部が溶岩ドームにより閉塞すれば、火道内の圧力が急速に高まることが可能となる。12 時 22 分にブルカノ式噴火が発生すると、多量の火山灰が放出され、それに伴い急激な沈降・収縮を示す (時間帯 4)。12 時 40 分頃に、噴煙の放出が弱まると、緩やかな隆起・伸張 (傾斜: 10 nrad/h, 面積歪: 8 nstrain/h) が再開した (時間帯 5)。この時は時間帯 2 と同様に地震動エネルギー積算値は  $0.9 \text{ mkin}^2 \cdot \text{s}$  以下と小さく、映像からは薄い火山灰混じりの火山ガスの放出が確認できる。その後、16 時~17 時 20 分の地盤変動の停滞期 (時間帯 6) を経て、BL 型地震の群発を伴いながら地盤が沈降・収縮する過程に至った (時間帯 7)。ブルカノ式噴火に先行する急速な地盤の隆起・伸張が噴煙放出の停止、BL 型地震の群発に先行する緩やかな地盤の隆起・伸張が穏やかな火山ガスの放出に対応することから、火道最上部の閉塞状態が、観測される地盤変動速度と関係しているようにみえる。深部から火道へのマグマ供給率が一定であると仮定するならば、完全には閉塞していない BL 型地震の群発前の火道へのマグマの貫入過程では、火道内の圧力は急速には上昇せず、小さな隆起・伸張速度として観測されるが、上端部が閉塞状態にあると考えられるブルカノ式噴火直前の火道にマグマが貫入すると火道内の圧力が急速に上昇し、大きい隆起・伸張速度として観測されたと解釈できる。火道内へのマグマの供給速度が一時的に増加した可能性もあるが、この時間帯 3 において地震動エネルギー積算値は  $0.6 \text{ mkin}^2 \cdot \text{s}$  以下とその前の時間帯 2 と変わらず、火口からの火山灰・火山ガスの放出状態だけが変化していることを考慮すると、火道上部が閉塞したことが、火道内部の圧力の上昇速度を高めたと考えた方が妥当であろう。

次に、火道最上部の閉塞状態が変化する理由について考察してみた。推定される火道内の状態変化を Fig. 10 に示す。BL 型地震が群発している過程 1 では火道内はマグマに満たされており、ストロンボリ式噴火に似た間

欠的な小噴火が繰り返され、火道上部は解放状態である。BL 型地震が群発していることから急激なマグマの発泡が起こっているものと推定される (Iguchi, 1994)。ここで火道内を上端部まで満たしているマグマを A とする。間欠的な小噴火の繰り返しにより火山灰や火山ガスが放出されることにより火道内の体積は減少するので火口方向の地盤の沈降を示す傾斜変化と収縮ひずみが観測される。過程 2 では緩やかな隆起・伸張が始まる。マグマ A は過程 1 において火道上部まで達しており、隆起・伸張を引き起こす圧力源の深さは 3~4 km に求められることからマグマ A 自体が隆起・伸張を引き起こしているとは考えにくく、マグマ A の下に新たに供給されたマグマ B によってこの変動は引き起こされたと考えた方が妥当である。この時、穏やかな火山灰・火山ガスの放出が見られるので火道内にあるマグマ A の上部は解放状態にあるか完全には閉じていない。火山灰・火山ガスの放出量は貫入するマグマ B の量よりも小さいので隆起・伸張が観測されるものと思われる。Ishihara (1985) は、ブルカノ式噴火の前に確認される溶岩ドームは、火口底まで上昇したマグマの脱ガスにより形成されると考えており、過程 1 から過程 2 においてマグマ A の脱ガスが進行することにより最上部は徐々に粘性が増加していき、過程 3 ではマグマ A の最上部は溶岩ドームとなり、火道は閉塞状態に至る。過程 2 ではマグマ溜りから火道下部へのマグマ供給率が、開放された火道最上部からの火山灰・火山ガス放出率をやや上回っており、その過剰分だけ火道下部が緩やかに膨張するが、過程 3 では火道が閉塞されているので、マグマ溜りから火道下部へのマグマの供給率に変化がなくても、供給分がすべて火道下部の膨張に寄与することになり、火道下部の膨張速度が増加することになる。過程 4 ではブルカノ式噴火に伴い溶岩ドームが破壊され火山岩塊として放出され火道は再び開放状態となる。その結果、マグマ A は火山灰および火山ガスとして放出されるので、急速に火道内の体積が低下する。過程 5 においてはマグマ B がその上部を完全には閉塞していない状態で火道を上昇するので、過程 2 と同様に緩やかな隆起・伸張が観測されると考えられる。

BL 型地震の群発に先行する隆起・伸張過程は、0.5~19 時間の停滞過程を経て BL 型地震の群発を伴う沈降・収縮過程に至る。Fig. 9 の時間帯 6 では 18 時頃からの BL 型地震群発活動に先行して約 1.5 時間の停滞過程が認められた。この時間帯の火山灰の放出量は緩やかな隆起・膨張過程であるその前の時間帯 5 よりも多いことが映像から推定できる。停滞過程において推定される火道内の状態を Fig. 10 に示す。過程 4 においてマグマ A が火道外に放出されると、過程 5 では、マグマ B のみ

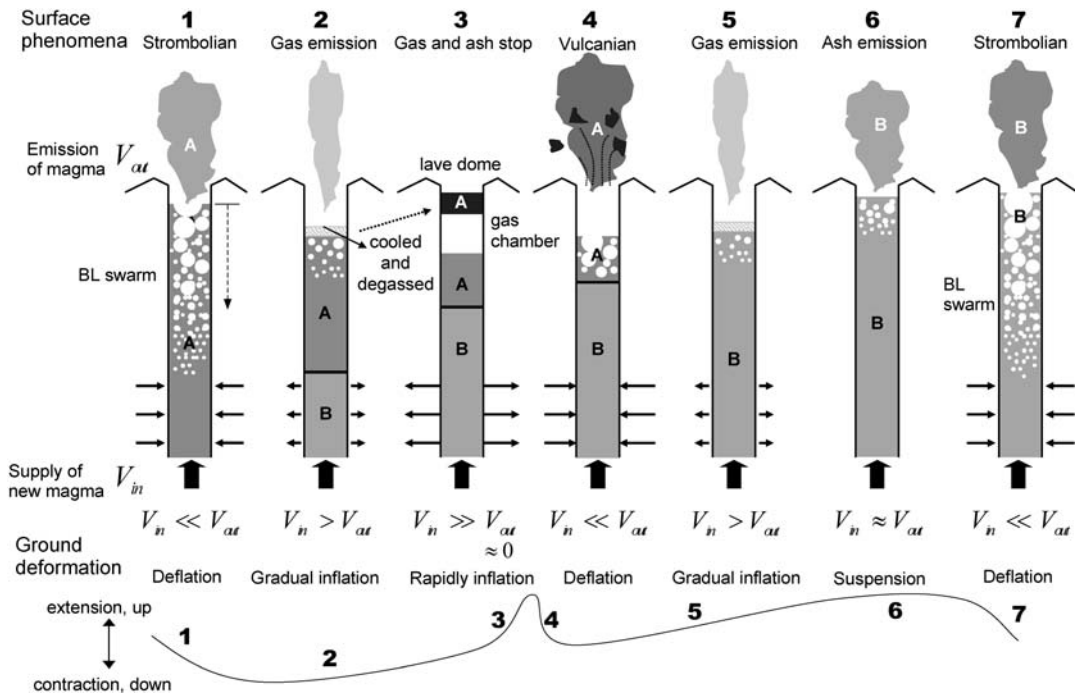


Fig. 10. Schematic illustration of the internal change of the conduit inferred from ground deformation and surface phenomena. Illustrations 1-7 correspond to time intervals in Fig. 9.  $V_{in}$  indicates the volume of magma emitted as volcanic ash and gas;  $V_{out}$  indicates the volume of magma supplied from the magma reservoir. Symbols "A" and "B" represent magma, which supplied into the conduit in different stage. A schematic of the ground deformation of tilt and strain changes is shown.

が上昇していくと考えられる。過程 6 においては過程 5 よりも多量の火山灰が放出され、浅部へ移動し減圧されたマグマ B の上端部が発泡することにより、フラグメンテーションが始まり火山灰が放出されたと解釈される。過程 6 は地盤変動が停滞している過程であり、火道下部へ供給されるマグマ B の増加量と火山灰として放出されるマグマ B の減少量が一時的に釣り合うことにより火道内に顕著な体積変化がない時間帯と考えられる。マグマ B の上端部からのフラグメンテーションが漸次進行すると、減圧が加速し (Cashman *et al.*, 2000), 揮発性成分に富んだ新鮮なマグマ B は急激な減圧発泡を起こす。その結果、発泡したガスの体積変化によって生じる BL 型地震が群発し、間欠的な小噴火によって火山灰や火山ガスが放出されることにより顕著な沈降・収縮過程に至ると考えられる (過程 7)。

過程 4 において、一度の爆発によってマグマ A がすべて火道外へ放出され切らなかった場合は、マグマ A が浅部へ移動し、過程 3 のようにマグマ A の最上部が再び強固な蓋になるため、地盤の急激な隆起・伸張が起こり、再び過程 4 を経て、過程 5 の状態へ至ると考えら

れる。Nogami *et al.* (2006) は、ブルカノ式噴火と BL 型地震の群発を伴う間欠的な小規模噴火により放出された火山灰の付着成分を分析し、BL 型地震の群発時の小規模噴火に伴う火山灰に付着したフッ素および塩素の水溶性成分はブルカノ式噴火に伴うそれよりも有意に多いことを示している。これは BL 型地震の群発を伴う小規模噴火は揮発性成分に富むマグマに由来するが、ブルカノ式噴火では、脱ガス後のマグマが放出されていることを意味する。マグマ A は BL 型地震の群発を伴うマグマの発泡過程を経たものであり揮発性成分が少ない。したがって、マグマ A は浅部へ上昇しても、深部から新たに貫入するマグマ B のように揮発性成分に富んでいないので、発泡せず、固結して最上部に蓋となる溶岩ドームを形成すると考えられる。12 月 14 日 23 時~15 日 22 時の緩やかな隆起・伸張過程 (Fig. 4) では、3 度のブルカノ式噴火が繰り返され、BL 型地震の群発を伴う沈降・収縮に至った。これは過程 3, 4 を繰り返した後、最終的に過程 5, 6, 7 へと移行したものと思われる。

Fig. 5 に示したように、ブルカノ式噴火と BL 型地震群発に先行する傾斜増加量の上限値は 300 nrad と同程

度である。Fig. 10 に示したモデルに基づいて、ブルカノ式噴火と BL 型地震群発に先行する地盤変動量の上限がほぼ同程度となったことについて考えてみる。ブルカノ式噴火の前の地盤変動量の上限は溶岩ドームの強度と火道下部からのマグマ柱の高さによるものと思われる。BL 型地震の群発のときに火道上部が完全に開いておれば、火道内のマグマ柱の高さにより規定されるが、Figs. 9, 10 (過程 5) に示すように、一般的な形態としては完全に閉じた状態ではないと考えられる。もし、ゆっくりとした速度で火道上部の閉塞が進行し、最終的に爆発直前の溶岩ドームの強度をもつとすれば、地盤変動の速度はマグマの火道下部への供給速度と溶岩ドームの閉塞速度で規定されることになり、最終的な地盤変動量としてはブルカノ式噴火と同様に溶岩ドームの強度と火道下部からのマグマ柱の高さに依存することになる。この場合、ブルカノ式噴火ではなく、BL 型群発を伴うストロンボリ式になる理由は、火道上部にあるマグマが脱ガス前の新鮮なマグマだからである。Nogami *et al.* (2006) はブルカノ式噴火と BL 型群発に伴う噴火により放出された火山灰の水溶性付着成分を分析し、BL 型群発に伴う噴火は新鮮なマグマに由来し、ブルカノ式噴火は脱ガス後のマグマに由来するとしている。

1987 年 9 月 4 日に発生した BL 型地震群に先行し、BH 型地震 (井口, 1989) が約半日前から多発し、火口方向の地盤の隆起を示す傾斜変動が観測されている (石原・井口, 1989)。BAYTAP-G により元記録に潮汐補正を施したところ、この BH 型地震の多発に伴う火口方向隆起の傾斜変動速度は  $26 \text{ nrad/h}$ 、伸張を示す面積歪変動速度は  $14 \text{ nstrain/h}$  と求められた。BL 型地震の群発活動に先行する地盤変動速度 ( $2\text{--}28 \text{ nrad/h}$ ,  $2\text{--}16 \text{ nstrain/h}$ ) と比べると最大値に近いことがわかる。BL 型地震群発に先行する火道へのマグマの貫入過程において、火道内圧力が急速に上昇し、地盤変動速度が大きくなる場合には、BH 型地震を伴うのかもしれない。BH 型地震の群発活動時は噴気の放出は見られるものの顕著な火山灰放出などの噴火現象が見られないことから、火道は部分的に固結した溶岩によって緩く閉じた状態であると推定されている (石原・井口, 1989)。火道の閉塞状態がマグマの火道への貫入時の圧力上昇速度に影響を与えているのかもしれない。先に述べたようにブルカノ式噴火に先行する隆起・膨張過程でも火道が閉塞していることが推定される。1987 年 9 月 4 日の BH 型地震の多発に伴う地盤変動を引き起こす圧力源の深さは  $3.4 \text{ km}$  であり、BL 型地震に群発やブルカノ式噴火に先行する隆起・膨張を引き起こす圧力源の深さの範囲にあるが、BH 型地震は火道下部に相当する海水面下  $1\text{--}2.5 \text{ km}$  (山頂火口下  $2\text{--}3.5$

$\text{km}$ ) において発生し、BL 型地震や爆発地震の震源よりも深い (Iguchi, 1994)。BH 型地震が多発するときは、火道の閉塞状態が火道上部だけでなく下部まで及んでいたのかもしれない。この BH 型地震が多発する前の 8 か月は噴火回数、火山性地震回数とも少なく、1974 年以降の爆発活動期の桜島では例外的に静穏な時期である。

## 6. 結 論

BL 型地震の群発に前後する地盤変動記録から以下のことが明らかになった。

- 1) BL 型地震の群発に先行して  $3\text{--}30$  時間にわたる火口方向の地盤隆起・伸張が検出できた。また隆起・伸張過程の後、 $0.5\text{--}19$  時間の停滞過程を経て、BL 型地震の群発を伴いながら沈降・収縮過程に至る。
- 2) BL 型地震の群発に先行する山体の膨張と収縮を引き起こす圧力源はブルカノ式噴火の場合と同様に  $3\text{--}4 \text{ km}$  の深さに位置する。
- 3) BL 型地震の群発に先行する隆起・伸張過程はブルカノ式噴火 ( $10$  分 $\sim$  $8$  時間) に比べ長い、変動量は傾斜変化において  $20\text{--}320 \text{ nrad}$ 、面積歪において  $8\text{--}170 \text{ nstrain}$  であり、ブルカノ式噴火の際の変動量と同程度であった。隆起・伸張の速度は  $2\text{--}28 \text{ nrad/h}$ 、 $2\text{--}16 \text{ nstrain/h}$  であり、ブルカノ式噴火に比べて小さく、緩やかに進行する。

以上のことから、BL 型地震の群発に先行する火口方向の地盤の隆起・伸張はブルカノ式噴火と同様にマグマ溜りから火道下部へのマグマの貫入によって引き起こされると推定できる。BL 型地震の群発に先行する火口方向の地盤の隆起・伸張過程では穏やかな火山ガスの放出が目視できるのに対し、ブルカノ式噴火の直前には火山ガスの放出が停止することから、火道最上部の閉塞状態のちがいが隆起・伸張速度から推定される BL 型地震の群発とブルカノ式噴火に先行する火道内の圧力上昇速度の相違に反映されていると考えられる。

## 謝 辞

京都大学防災研究所石原和弘教授、同大学院理学研究科鍵山恒臣教授、大倉敬宏准教授には御指導、御助言を頂きました。白山工業株式会社の佐藤峰司博士には潮汐解析プログラムに関して御指導を頂きました。三友株式会社において映像ダビング機器を使用させて頂きました。1 名の匿名査読者と小林知勝博士の助言は本稿を改訂する上で大変参考になりました。記して御礼申し上げます。

## 引用文献

- 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.
- Cashman, K.V., Sturtevant, B., Papale, P. and Navon, O. (2000) Magmatic fragmentation. In *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H. ed.), Academic Press, San Diego, 421-430.
- 井口正人 (1989) 火山性地震 BL・BH の初動の押し引き分布. 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-1, 13-22.
- Iguchi, M. (1994) A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **39**, 49-67.
- 井口正人 (2000) 火山性地震の発生と火山爆発発生場としての火道内の状態変化. 月刊地球, **22**, No. 5, 315-323.
- 井口正人・石原和弘 (1990) 爆発的噴火に伴う地震動・空気振動の比較研究—桜島火山と諏訪之瀬島火山の比較—. 京都大学防災研究所年報, **33** B-1, 1-12.
- 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—. 京都大学防災研究所年報, **26** B-1, 9-21.
- 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.
- 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, **32**, 71-85.
- Ishihara, K. (1985) Dynamical analysis of volcanic explosion. *J. Geodyn.*, **3**, 327-349.
- 石原和弘 (1988) 地球物理学的観測による桜島火山のマグマ溜まりおよび火道の推定. 京都大学防災研究所年報, **31** B-1, 59-73.
- 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.
- 石原和弘・井口正人 (1989) 火山体の変形, 表面活動と火山性地震発生の関係 (1)—微小地震の群発現象について—. 京都大学防災研究所年報, **32** B-1, 1-11.
- 石原和弘・小林哲夫 (1988) 桜島火山の最近の火山活動. *火山*, **33**, 269-271.
- 石原和弘・井口正人・加茂幸介 (1983) 火山の爆発過程における噴煙および火山ガスの放出について. 京都大学防災研究所年報, **26** B-1, 1-7.
- Kamo, K. and Ishihara, K. (1989) A preliminary experiment on automated judgment of the stages of eruptive activity using tiltmeter records at Sakurajima, Japan. In *Volcanic Hazards* (Latter, J.H. ed.) Springer-Verlag, 585-598.
- Kaneshima, S., Kawakatsu, H., Matsubayashi, H., Sudo, Y., Tsutsui, T., Ohminato, T., Ito, H., Uhira, K., Yamasato, H., Oikawa, J., Takeo, M. and Iidaka, T. (1996) Mechanism of phreatic eruptions at Aso Volcano inferred from near-field broadband seismic observations. *Science*, **273**, 642-645.
- Lipman, P.W., Moore, J.G. and Swanson, D. A. (1981) Building of the north flank before the May 18 eruption — Geodetic data. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **1250**, 143-155.
- Mogi, K. (1958) Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surface around them. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, **36**, 99-134.
- Nogami, K., Iguchi, M., Ishihara, K., Hirabayashi, J. and Miki, D. (2006) Behavior of fluorine and chlorine in volcanic ash of Sakurajima volcano, Japan in the sequence of its eruptive activity. *Earth Planets Space*, **58**, 595-600.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.

(編集担当 古谷正人)