

## 2010年桜島火山活動を考える

井口正人・太田雄策\*・植木貞人\*・為栗健  
園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫

\*東北大学大学院理学研究科

### 要 旨

桜島の昭和火口における噴火活動は2006年6月に58年ぶりに再開した後、徐々に活動的となっている。本稿では、地盤変動観測に基づき2010年の火山活動について考察してみた。桜島の地盤変動は2009年9月30日から2010年6月中旬までの隆起・膨張期、6月中旬から11月までの沈降・収縮期、11月下旬からの再隆起・膨張期に分けられる。隆起・膨張期においては爆発的な噴火活動が活発であり、2009年12月～2010年3月には130～160回/月の爆発が発生した。6月中旬以降の沈降・収縮期では爆発回数と火山灰放出量は減少した。この地盤変動を引き起こした力源の位置は南岳から北岳の北麓と推定される。隆起した時期には始良カルデラ下のマグマ溜まりの膨張により桜島北部にマグマが供給され、昭和火口から急速に噴出し、沈降期には、蓄積されたマグマを緩やかに放出したと解釈される。

**キーワード:** 桜島, 昭和火口噴火, 地盤変動, 火山性地震活動, マグマ供給系

### 1. はじめに

桜島では南岳において1955年に爆発的な噴火活動が始まった。南岳の噴火活動は1972年9月以降激化し、1974年と1985年にはそれぞれ、489回と452回の爆発が発生した。また、1985年には2940万トンの火山灰が放出された。南岳における噴火活動は1993年以降、低下し、2004年以降は爆発回数が10回以下まで減少した。ところが、2006年6月4日に昭和火口における噴火活動が58年ぶりに再開した。2006年と2007年はマグマ水蒸気爆発で噴火の規模も小さかったが、2008年2月3日の噴火以降、火砕流を伴う爆発的な噴火活動に移行してきた。爆発的な噴火は2008年に18回、2009年に580回(井口・他, 2010)、2010年には1055回発生した。また、火山灰放出量は2008年には10万トンであったが、2009年は340万トン(井口・他, 2010)、2010年は670万トンと増加しており、噴火活動は長期的に活発化の傾向にある(Fig. 1)。

桜島においては火山活動と地盤変動に密接な関係があることは以前から指摘されている通りである。1914年の噴火、いわゆる大正噴火後には南九州一円の地盤が沈降した(Omori, 1918)。沈降量の分布からこの地盤変動を引き起こした圧力源の位置は桜島

島内ではなく、北部海域である始良カルデラ中央部の深さ10kmにあるとされている(Mogi, 1958)。

1915年以降、始良カルデラ周辺の地盤は再び隆起を始めたが、南岳の東山麓から0.18km<sup>3</sup>の溶岩を流出した1946年の噴火では地盤が約7cm沈降したと推定されている(佐々, 1956)。さらに、始良カルデラ周辺の地盤は隆起を続けるが、1955年から始まった南岳の山頂爆発活動でも噴火活動と地盤の上下変動に明瞭な関係が見られる。爆発の発生回数の少ない1973年までは隆起が続いたが、1974年～1992年の山頂爆発回数が200～400回に達する活動期には地盤の隆起が停滞するか、やや沈降に転じている。このように、地盤の隆起・沈降の中心が始良カルデラにあること、静穏期には隆起、噴火活動期には沈降の明瞭な地盤変動と噴火活動の関係が認められることから、桜島火山にマグマを供給する主たるマグマ溜りは桜島の北方、始良カルデラの中心の深さ10km付近にあると考えられている(江頭・他, 1997)。

南岳における爆発活動は452回の爆発が発生した1985年をピークとして爆発回数が減少していく傾向にあった。これに対応するように始良カルデラ周辺の地盤は1993年ごろから上昇に転じ(江頭・他, 1997; 江頭・他, 1998a)、桜島北部では地盤が2005

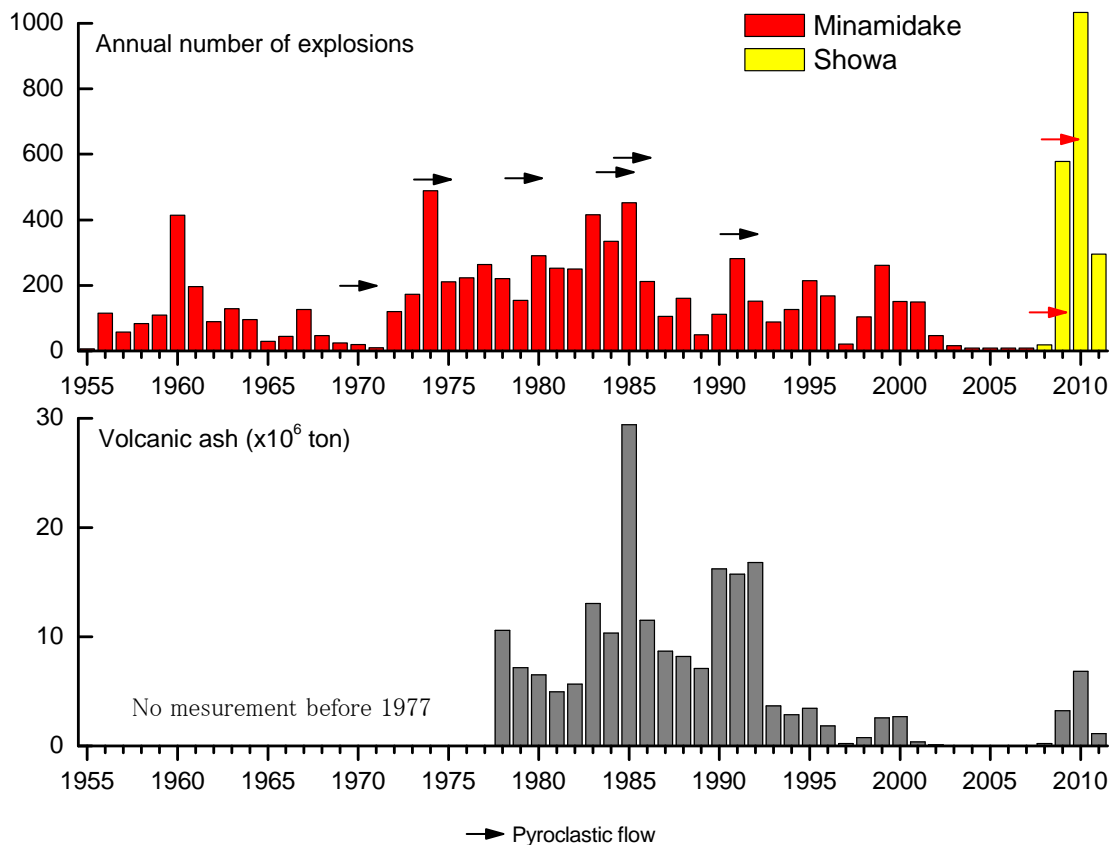


Fig.1 Eruptive activity of Sakurajima volcano. Annual numbers of volcanic explosions at Minamidake and Showa craters (top). Annual weight of volcanic ash ejected from the craters (bottom). The data in 2011 are plotted until February.

年までに約10cm上昇した（山本・他，2008）。水平変動についても同様に1992～1993年ごろに始良カルデラおよび桜島の地盤は収縮から伸張に反転したことが光波測量により明らかとなり（江頭・他，1998b），GPS連続観測により始良カルデラ周辺において始良カルデラの中心から放射状のパターンを示す水平変位ベクトルが得られている（Kriswati and Iguchi, 2003）。最近10年間の上下変動および水平変動のいずれについても，Mogiモデル（Mogi, 1958）を仮定して圧力源の位置を求めると桜島の北方，始良カルデラの中央部の下，10km付近にその位置が求められている（井口・他，2008b；山本・他，2008）。

地盤変動観測からMogiモデルなどを仮定することにより圧力源における体積変化量が把握されている。体積変化量に南岳の火口から放出される噴出物量を加えることにより始良カルデラ下のマグマ溜りへの供給率は1年あたり約1000万m<sup>3</sup>と推定されている（Ishihara, 1981）。1993年以降の地盤の隆起・膨張ではマグマの供給率は0～2000万m<sup>3</sup>/年の間で変化するが，平均的には1000万m<sup>3</sup>/年の割合で供給が継続していることがGPS連続観測により確かめられている

（井口，2006）。

一方，Yoshikawa（1961）および江頭（1988）は，始良カルデラの周辺だけではなく桜島における地盤の上下変動の空間分布を詳細に調査し，得られた上下変動の空間分布を説明するために始良カルデラの中心に位置する圧力源と当時噴火活動中の南岳の直下の深さ5kmにある圧力源からなる2圧力源モデルを提唱した。桜島直下の圧力源が存在すると見積もられる深さは地震波が著しく減衰する深さでもある。加茂・他（1980）は桜島の南岳から北岳の直下の深さ3～6kmの領域は地震波が著しく減衰する領域であることを指摘し，さらに，鈴木（1999）は，高密度アレイ地震観測を行うことによりその減衰域の広がりをも山頂域の2～3km程度の範囲としている。この南岳直下の圧力源は直接的に噴火活動にかかわっている。爆発発生の数分から数時間前に桜島の地盤が隆起・膨張し，爆発の発生とともに沈降・収縮に転じる現象が南岳火口から2.7km北西のハルタ山に設置された水管傾斜計と伸縮計により捉えられおり，その傾斜ベクトルは南岳の火口方向を向く。さらに，傾斜量と歪量の比からは，圧力源の深さは2～6kmとなり

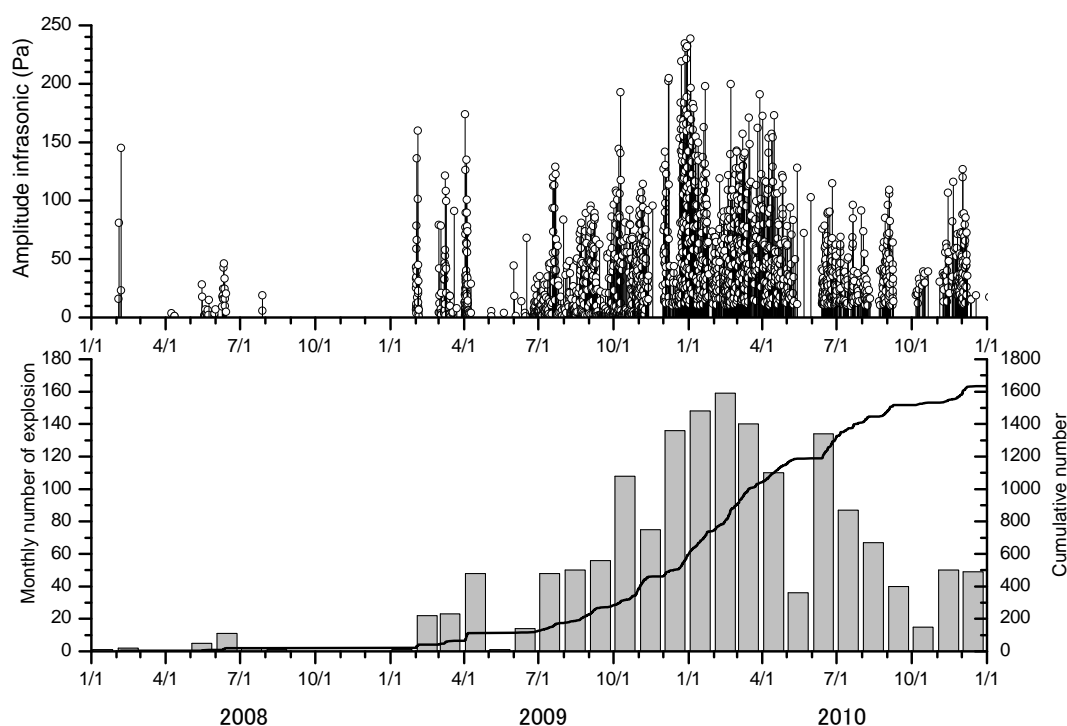


Fig.2 Eruptive activity at Showa crater during the period from 2008 to 2010. Amplitude of infrasonic wave generated by explosion (top). Monthly numbers of explosion are shown by histogram and line is cumulative number (bottom). Explosions occurred at Minamidake crater on October 3, 2009.

(Ishihara, 1990), 水準測量から見出された圧力源の位置および地震波の減衰領域に一致する。

2006年の昭和火口噴火に前駆したいくつかの現象が指摘できる。南岳活動期においては放熱量が継続的に低下していた(加茂・他, 1995)昭和火口周辺の熱活動が、2006年3月には活発化していたことが知られている(横尾・他, 2007)。また、2003年11月ごろから桜島の南西部においてA型地震の活動が25年ぶりに活発化した(Hidayati et al., 2007)。さらに、地盤変動は2004年10月から2005年2月まで始良カルデラ周辺の地盤が膨張していたこと(井口・他, 2008b)が知られている。一方、2006年6月に昭和火口の噴火が繰り返されて以降は顕著な地盤変動や地震活動は観測されていなかったが、2008年に爆発的噴火が発生し始めたころから徐々に地盤変動が検知されるようになってきた(井口・他, 2010)。

本稿では昭和火口における2008年以降の爆発的噴火活動の活発化の過程において2010年の火山活動を主に地盤変動データを用いて考察する。

## 2. 噴火活動

桜島の昭和火口の噴火は2006年6月4日に58年ぶりに再開した。2006年6月の噴火活動は約2週間で終息し、その後約11カ月の休止期を経て2007年5月から約

3週間噴火活動が続いた。2006年と2007年の噴火は顕著な噴火地震や火山性微動を伴わず空気振動の振幅は3Pa以下(有村, 昭和火口から2.4km)と小さかった(井口・他, 2008a)。昭和火口における噴火活動が爆発的になったのは、2008年2月3日10時17分の噴火以降である。この爆発に引き続き、同日の16時54分、2月6日の11時25分にも爆発的噴火が発生し、5月から7月にかけても爆発的噴火が繰り返された。2008年には18回の爆発が発生した。2008年7月29日以降、火山灰はほとんど放出されず、爆発的噴火は発生しなかったが、2009年2月1日から爆発的噴火が頻繁に発生するようになった。2月～4月は2週間程度の爆発的噴火の頻発期と2週間程度の静穏期を繰り返したが、爆発的噴火の発生頻度は2009年7月から増加し始め、特に10月以降が活動的となった。10月3日16時45分には南岳において爆発的噴火が発生し、噴煙は火口上3000mまで達した。2009年10月～2010年4月までは月別の爆発発生回数が多く、100回を超えた。中でも2009年12月～2010年3月は特に多く、12月に136回、1月には148回、2月には159回、3月には140回の爆発が発生した。

ところが、2010年5月14日の爆発から約1カ月間は噴火活動が停止し(5月21日, 5月30日の爆発を除く)、火山灰の放出もほとんどみられなくなった。この1カ月の静穏期の後、6月12日から再び爆発的な噴火活

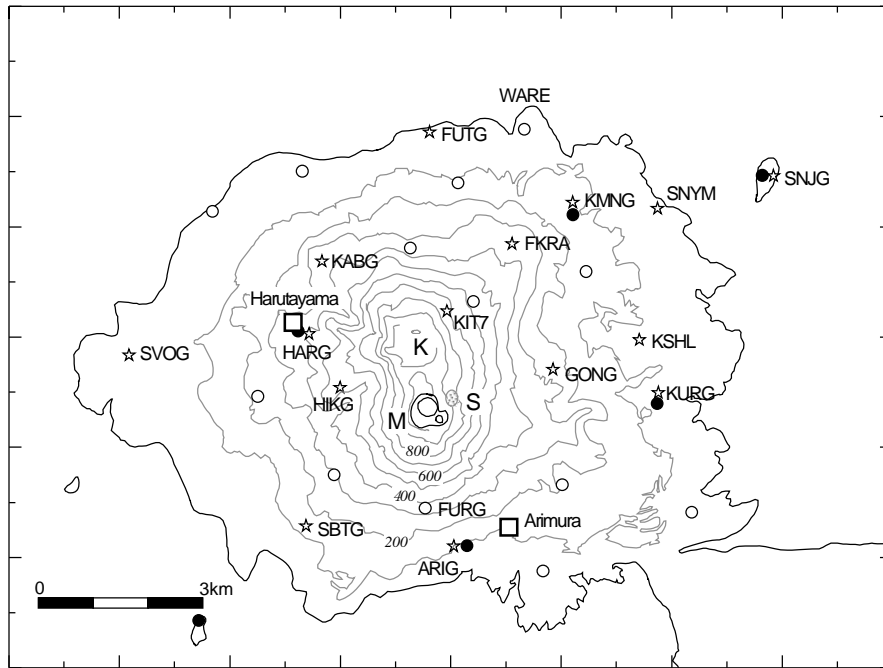


Fig.3 Ground deformation observation network. Squares indicate underground tunnel where water-tube tiltmeters and extensometers are installed at deep inside and dots are borehole tiltmeters. Stars and open circles show continuous stations and benchmarks for GPS. Symbols “K”, “M” and “S” indicate craters Kitadake, Minamidake and Showa, respectively.

動が繰り返されるようになってきた。6月は136回の爆発が発生したもののその後、徐々に減少し、10月は15回の爆発しか発生しなかった。また、6月～10月の爆発の特徴として爆発に伴う空気振動の振幅も減少していることがあげられる (Fig.2)。空気振動の振幅は2009年12月下旬から2010年1月上旬ごろが最も大きく、200Paを超える爆発がいくつか発生している。一方、2010年10月がもっとも小さく、40Paを超える爆発が発生していない。2010年11月末ごろから再び、爆発の発生頻度が増加し、空気振動の振幅も増加している。

### 3. 地盤変動

#### 3.1 観測

Fig. 3に桜島島内における地盤変動観測点の位置を示す。桜島島内には2か所の観測坑道が設置されている。ハルタ山観測坑道は南岳山頂から2.7km北西にあり、昭和火口からは2.9kmの距離にある。有村観測坑道は国土交通省九州整備局大隅河川国道事務所により掘削され、2006年10月から稼働している。昭和火口からは2.1kmの距離にある。いずれも坑道内に2台の水管傾斜計が南岳火口方向と直交方向に、また、伸縮計が火口方向、直交方向および斜辺方向に設置されている。水管傾斜計、伸縮計とも長さは28mで

ある。傾斜および歪データはUDP-IPパケット送信によりリアルタイムで伝送されている。また、埋設型傾斜計も6か所に設置されており、設置深度は85m～350mである。埋設型傾斜計も南岳火口方向と火口と直交方向の2成分からなる。

GPS連続観測点は桜島島内の15か所に設置されている。2008年までは7観測点であったが、2009年に京都大学防災研究所が3点、東北大学が2点、増設した。2010年にはさらに1か所GPS観測点を増設した(東北大学)。使用しているGPS受信機はLeica GX1200, GRX1200+GNSS, GMX902でいずれもGPSの2周波以上を受信可能な受信機である。サンプリングは1秒であり、1秒ごとにTCP-IP接続によりリアルタイム伝送し、GNSS Spider (Leica) により自動基線解析を行っている。また、キャンペーン観測のためのベンチマークも13か所に設置してある。

#### 3.2 傾斜, ひずみ変化

Fig. 4aに2009年8月以降の有村観測坑道における傾斜変化(火口方向)を示す。火口方向の隆起の傾斜変化は2009年9月ごろから始まっている。2009年9月30日から10月3日にかけて約300nradの火口方向の隆起がみられた後も2010年4月ごろまで緩やかな隆起が続き、7月中旬ごろから急速な火口方向の地盤の沈降がみられる。火口方向の沈降傾斜は11月中旬ま

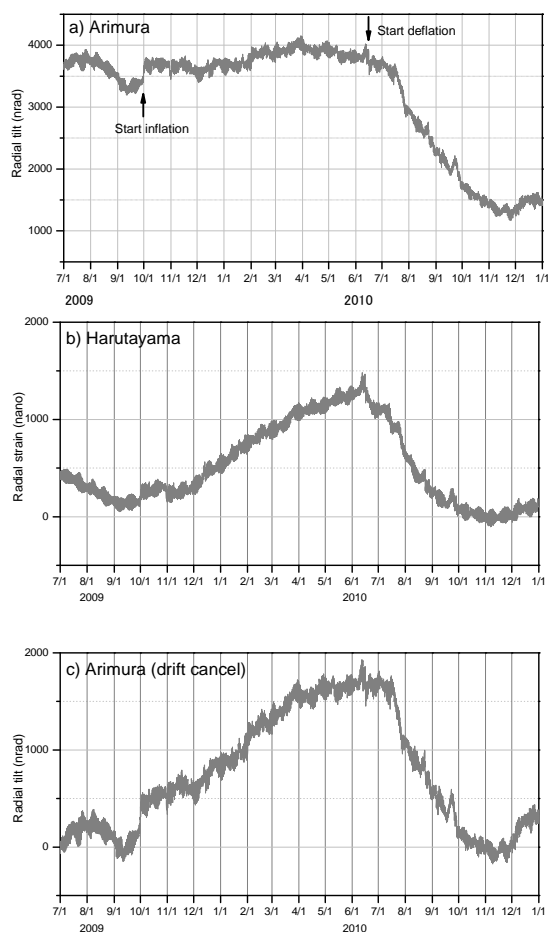


Fig.4. Tilt and strain changes. a) Radial tilt in Arimura tunnel. b) Radial strain in Harutayama tunnel. c) Radial tilt in Arimura. Trend component is reduced assuming linear trend at a rate of -140 nrad/month.

で続いた。有村観測坑道の傾斜計は2006年に設置した後も2009年前半まで頻りに調整を繰り返してきたので、傾斜計のトレンド成分の評価が難しいが、これを設置してから25年が経過しているハルタ山観測坑道における伸縮計の火口方向の成分の記録 (Fig.4b) と比較することにより、トレンド成分を評価してみる。ハルタ山の伸縮計では2009年9月ごろから伸長が始まり、9月30日～10月3日の急激な伸長を挟んで2010年6月中旬まで続いた。6月16日以降は収縮に転じ、収縮のひずみ変化は11月まで続いた。有村の傾斜計の隆起開始と沈降停止の時期は、ハルタ山の伸縮計における伸長開始と収縮停止の時期とそれぞれほぼ一致しているので、同じ圧力源の体積増加とその後の減少に起因すると考えられる。ハルタ山の伸縮計の伸長開始と収縮停止時のひずみ量はほぼ同じであるが、有村の傾斜計では隆起開始と沈降停止時期の間で-1050 nradの差がある。設置後の経過年数の長いハルタ山の火口方向の伸縮計ではトレン

ド成分がないとすれば、有村の傾斜計における隆起開始と沈降停止時期の間の差は観測坑道におけるドリフトによることになる。

そこで、この差がすべて一定速度のドリフト (140nrad/月) によるものとして、トレンド成分を補正してみた。補正後の傾斜変化をFig.4cに示す。火口方向の隆起が始まったのは2009年9月12日ごろからであり、9月30日の8時ごろから10月3日の16時45分の南岳の爆発開始までは急速な隆起が続いた。この期間の火口方向の隆起量は+280nrad、ひずみ増加量は火口方向において+120ナノストレイン、直交方向において+130ナノストレインであった。10月3日16時45分の南岳の爆発的噴火後は50nradの火口方向の沈降傾斜が観測された。その後も10月4日～11月17日は180nrad/月の割合で隆起が続き、12月からはさらに隆起速度が増加した。2009年12月から2010年3月末までは270nrad/月の割合で火口方向隆起が続いた。2010年4月から6月8日までは隆起は停滞したが、6月9日から13日までの隆起傾斜変化を経たのち、6月15日の21～22時頃から翌日の8時まで急激な沈降・収縮が観測された。この沈降・収縮は、有村観測坑道において210nradの火口方向の沈降、伸縮計の火口と直交方向において140ナノストレインに達した。この急激な沈降・収縮を契機に火口方向の沈降傾向が見え始め、7月中旬から沈降傾斜が明瞭となった。7月17日～29日の沈降速度は大きく、-51nrad/日 (1520nrad/月) に達した。その後、沈降速度は段階的に低下した (7月29日～9月17日: -13nrad/日, 9月29日～11月15日: -5.4nrad/日)。沈降傾斜は11月下旬まで続いたが、その後、火口方向隆起の傾斜変化に反転している。

同様の傾斜・ひずみ変化はハルタ山観測坑道においても観測されている。2009年9月30日8時から10月3日16時45分の南岳における爆発的噴火まで地盤変動については、火口方向の隆起傾斜量は180nrad、伸長ひずみ変化量は火口方向で130ナノストレイン、直交方向において100ナノストレインであった。また、爆発発生後の沈降傾斜変化量は110nrad、収縮ひずみは38ナノストレイン (火口方向)、37ナノストレイン (直交方向) であり、有村観測坑道の傾斜計と同様に隆起・膨張量が沈降・収縮量よりも多い。また、2010年6月8日～13日の隆起・膨張と6月15日～16日の急激な沈降・収縮はハルタ山観測坑道でも観測されている。2010年6月15日21時から16日8時までの変動量は火口方向沈降の傾斜変化で-290nrad、収縮ひずみ変化量は火口方向で-125ナノストレイン、直交方向において-105ナノストレインに達した。

長期的に見た変動も類似したパターンを示す。ハルタ山においては傾斜計火口方向の成分が長期的なドリフトを含まず正常に稼働できたのは、2010年3

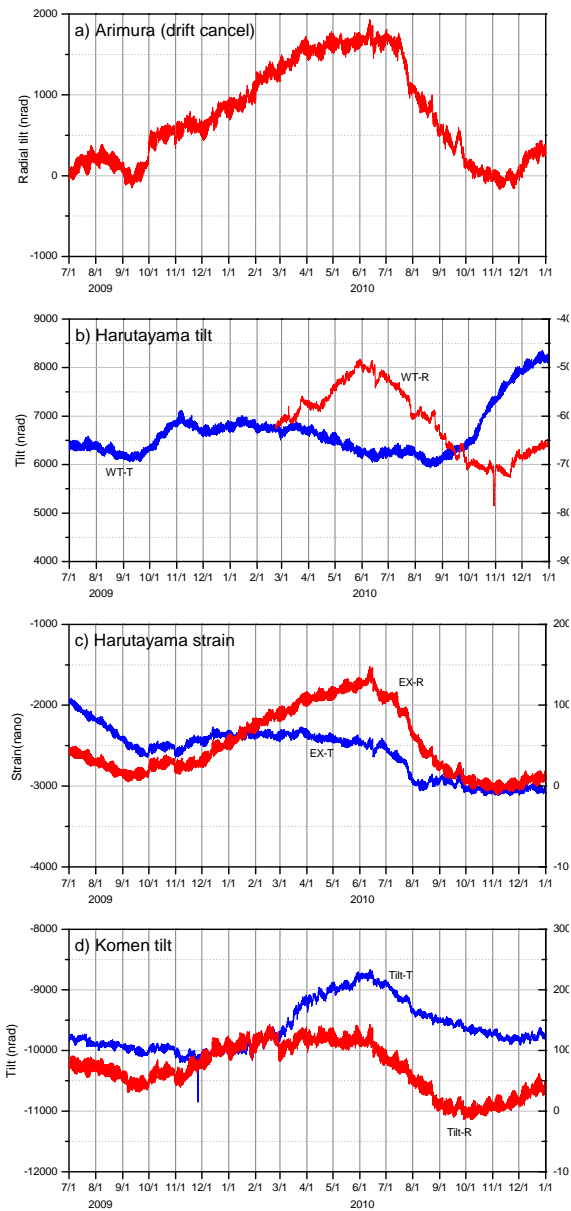


Fig.5 Tilt and strain changes. a) Radial tilt in Arimura tunnel. b) Radial and tangential tilt in Harutayama. c) Radial and tangential components of strain in Harutayama, d) Radial and tilt in borehole at Komen (KMNG)

月以降であるので、長期的な変動については伸縮計の火口方向のひずみ変化を中心に述べる (Fig.5)。有村観測坑道の傾斜変化と同様に2009年12月～2010年3月末まではほぼ一定の割合 (200ナノストレイン/月) でひずみ量が増加した。4月～6月8日まではひずみ増加速度が、86ナノストレイン/月まで減少した。2009年9月から2010年6月8日までの火口方向における歪変化量は+1560ナノストレインに達した。

2010年6月15日からは収縮に反転し、収縮ひずみ速度を減少させながら、11月まで続いた。また、傾斜

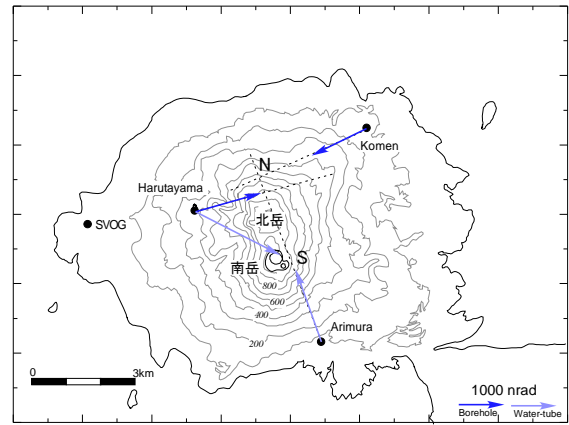


Fig.6 Tilt vectors in deflation period from June to November 2010.

計でも2010年6月以降は沈降に転じた。2010年6月15日～11月までのひずみ変化量は-1400ナノストレイン、沈降収縮量は-2350nradに達した。

有村観測坑道における変動パターンと異なる点は、ハルタ山観測坑道では隆起・膨張から沈降・収縮への転換が明瞭であることである。火口方向のひずみ変化に注目すると、2009年12月～2010年3月は200ナノストレイン/月、2010年4月～6月までは86ナノストレイン/月の割合で膨張を続けたが、2010年6月15日以降、急速に収縮し、収縮率を徐々に低下させながら地盤の収縮は11月まで続いた。一方、有村観測坑道の傾斜計は6月15日～16日の急激な火口方向の沈降を除き、4月から7月中旬までは、大きな変動がなかった。急速な沈降を示したのは、7月16日ごろからである。

また、桜島の北東部の高免観測点 (Fig.3のKMNG) の傾斜計も同様の変動を示した。2009年9月ごろから南岳火口方向の隆起が始まり、9月30日～10月3日にかけて有村、ハルタ山観測坑道と同様に急速な隆起を示した。11月～2010年3月にかけて再び隆起を続け、その後は2010年6月まで隆起状態を保持した。2010年1月ごろからは火口と直交方向成分において火口に向かって右方向の隆起が見え始め6月まで続いた。6月以降は火口方向と火口に向かって右方向が沈降を示し、11月ごろまで続いた。

Fig. 6に有村、ハルタ山、高免における2010年6月中旬から11月までの火口方向の沈降を示す傾斜変動のベクトルを示す。ハルタ山には観測坑道内の水管傾斜計と埋設型傾斜計が設置されているので併記した。ハルタ山の水管傾斜計と埋設型傾斜計の傾斜変動ベクトルの方向は多少ずれるが、ベクトル方向を示す直線が交差するのは北岳の北山麓から南岳の北側である。

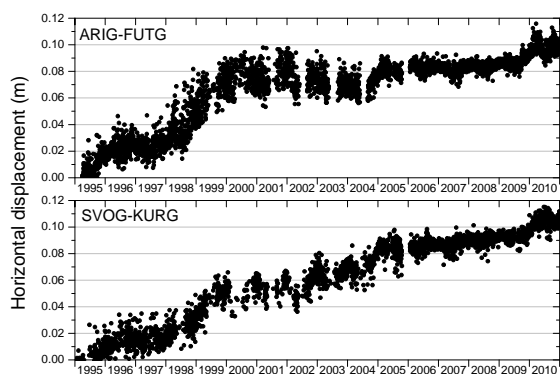


Fig. 7 Temporal changes of horizontal distance along baselines in north-south direction (ARIG-FUTG) and east-west direction (SVOG-KURG)

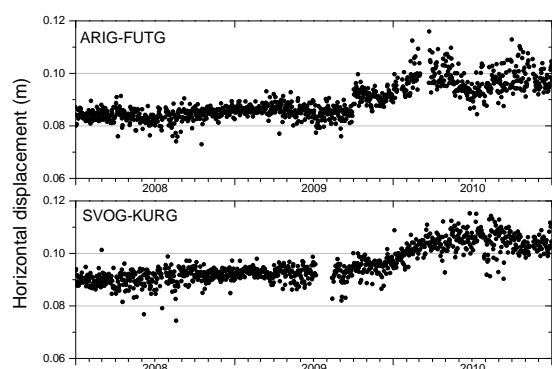


Fig. 8 Temporal changes of horizontal distance during the period from 2008 to 2010

### 3.3 GPS連続観測

桜島におけるGPS連続観測は1994年10月に始まった。Fig. 7に東西および南北測線の水平距離の日々の値の変化を1995年以降について示した。1995年から2010年までに東西および南北とも約11cmの伸びが観測されている。顕著な伸長が観測された期間は観測開始から1996年2月まで、1997年11月～1999年10月、2004年10月～2005年2月、2010年1月～3月である。最も変動量が大いなのは1997年11月～1999年10月までの期間であり、東西基線で約4cm、南北測線において約6cmの伸長が観測された。この伸長期の末期である1999年の後半から南岳の噴火活動が活発となり、1999年12月には104回の爆発が発生した。その後、2004年10月～2005年2月の伸長期までは東西測線において緩やかな伸長、南北測線において緩やかな収縮が検出されている。2006年6月に昭和火口において58年ぶりに噴火活動が再開したが、2008年までは東西基線において約1cmの緩やかな伸びが観測されているものの、南北の基線には変化が見られない。

昭和火口噴火再開以降で顕著な変動が始まったの

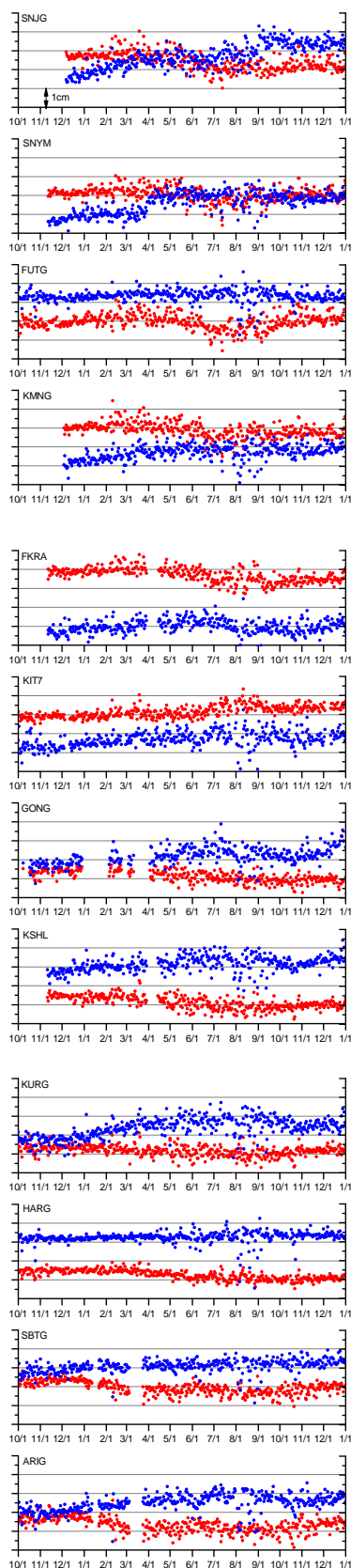


Fig. 9 Temporal changes of north-south and east-west components of coordinates of GPS stations referred to station SVOG. Red: north-south, blue: east-west

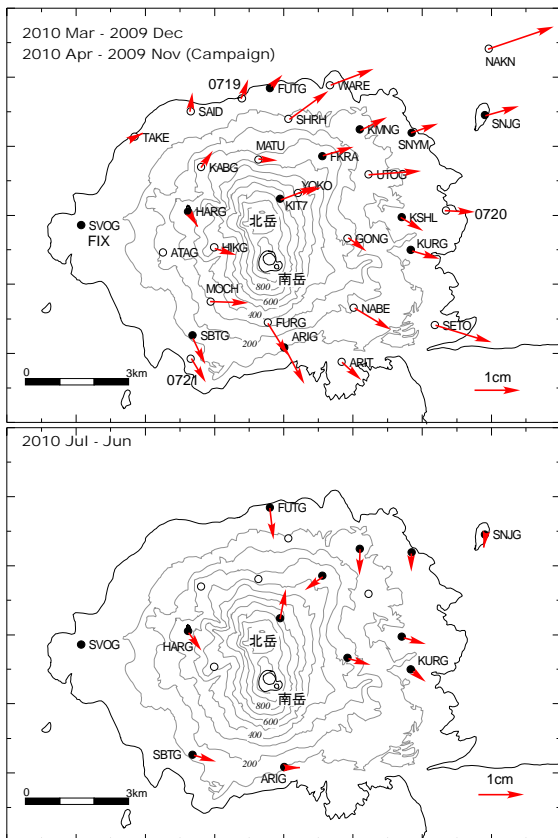


Fig. 10 Relative horizontal displacement vectors referred to station SVOG. Upper: from December 2009 to March 2010. Campaign data are added. Lower: from June to January 2010.

は2009年10月ごろからである。2008年以降の水平距離の変化を拡大してFig.8に示す。南北の基線は2009年10月～2010年3月に約2cm伸びたが、2010年5月ごろからは収縮した。一方、東西の測線の伸びは2009年12月ごろからである。2010年1月には変動が加速しており、東西、南北基線とも明瞭な伸長が捕捉された。この膨張が観測された時期は、桜島島内の傾斜計および伸縮計により火口方向の地盤の隆起と伸長が観測された時期と一致している。2010年の時点では、2009年の秋ごろから始まった地盤変動は2006年6月に昭和火口の噴火活動が再開してから最も大きい地盤変動と位置付けられる。

地盤変動が大きくなった2009年10月からの観測点ごとの変動の時系列を桜島西部のSVOGを基準としてFig.9に示す。水平変動が顕著になったのは、2009年12月～2010年1月からであり、この変動は2010年3月ごろまで続いた。SVOGを基準としているので、いずれの観測点も東西成分は東向きである。南北成分は北部の観測点では北向きであり、東部の観測点は、

南北成分の変動は大きくない。結果、東向きが卓越し、例えば、KURGでは2009年12月中旬から2010年3月中旬までに東へ約1.0cmの相対変位を示した。南部の観測点の南北成分は南向きとなっている。

次に、変動がみられるのは2010年6月～7月にかけてである。北部の観測点であるFUTG, FKRA, KMNG, KIT7で変動が大きい。この時期はFUTGとKMNGは南向きに相対変位したが、KIT7は北向きが卓越した。また、FKRAは南および西向きを示した。

水平変位の空間分布を調べるため、SVOGを基準とした相対水平変位ベクトルをFig.10に示す。2009年12月～2010年3月については、Fig.9に示した連続観測点の変位に繰り返し観測点での変位（2009年11月～2010年4月）を加えた。北部の観測点は北東向きに、東部の観測点は東向きに南部の観測点は南東向きの相対変位を示すことが分かる。また、2010年6月～7月の期間では変動は大きくないが、桜島の北部の変位が大きい観測点では北岳の北山麓方向を変位ベクトルが向く。

#### 4. 2010年6月～8月の地震活動

桜島においてはA型、B型、爆発地震などの火山性地震や多様な火山性微動が発生する。A型地震については南岳活動期の1970年代の後半に多数発生しており、A型地震の深部から浅部への移動の後、B型地震が群発し、爆発的噴火活動が活発化することが知られている（加茂，1978）。南岳の噴火活動が定常的に活発であった1980年代、噴火活動の後退期であった1990年代はA型地震の発生回数は少なかったが、2003年ごろから再び活動的となり、1970年代の後半のように桜島南西部においてA型地震が発生した（Hidayati et al., 2007）。

Fig. 11に桜島および周辺におけるA型地震の震源分布を示す。用いた速度構造はHidayati et al. (2007)と同じである。2010年の地震活動の特徴は6月中旬から8月上旬にかけて桜島の南西部において地震活動が活発化したことである。震央は2003年11月～2004年の桜島南西部の地震活動とほぼ同じであるが、深度が異なる。2003年～2004年の震源は6～9kmと深かったのに対し、2010年の震源の深さは2～3kmと浅くなっている。また、2003年～2004年の活動では最大でM2.2の地震が発生したが、2010年に発生した地震のマグニチュードは1以下と小さい。また、微小であるためにメカニズム解を求めることができなかったが、初動の読み取り可能な観測点はすべて引きであったので、正断層型である可能性が高い。



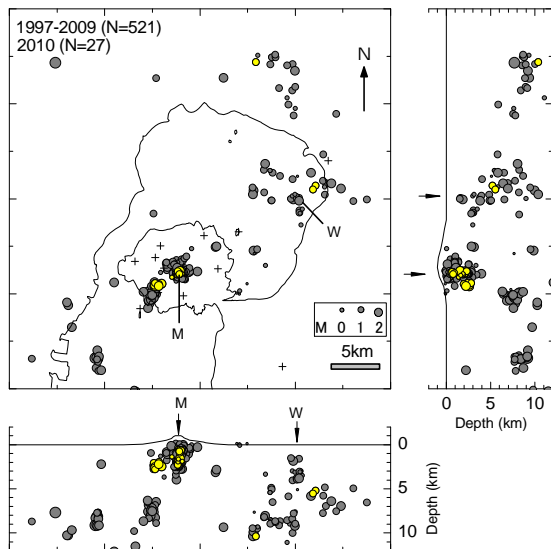


Fig. 11 Hypocenter distribution of A-type earthquakes. Gray: hypocenters during the period from 1997 to 2009, yellow: in 2010.

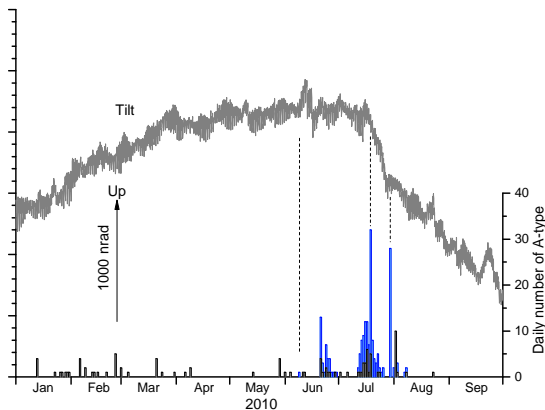


Fig.12 Relation of daily number of A-type earthquake and ground deformation. Tilt is radial component in Arimura underground tunnel. Histograms are daily numbers of A-type earthquake located at southwest (blue) and beneath summit area (grey)

この南西域浅部の地震活動を有村観測坑道における傾斜変化と対比してFig.12に示す。地震が発生し始めたのは、有村観測坑道において6月7日～13日の急速な火口方向の隆起が観測された時期とほぼ一致している。地震の発生頻度が高まったのは、6月下旬と、7月中旬から8月の初めにかけての急速な火口方向の沈降がみられた時期であることがわかる。

## 5. 議論

2009年9月以降の火山活動は地盤変動からみると2009年9月～2010年6月までの隆起・膨張期と2010年6

月～11月の沈降・収縮期に分けられる。それぞれの期間の火山活動と隆起・膨張期から沈降・収縮期への遷移について議論する。

### 5.1 隆起・膨張期

傾斜計・伸縮計によって示される2009年9月～2010年6月中旬までの隆起・膨張期において、隆起・伸長速度が大きいのは、2009年12月から2010年3月末までである。この期間ではGPS観測でも示されるように変動が大きい。1996年12月～2007年12月までの長期的な地盤変動を引き起こした圧力源の位置は始良カルデラの中央部の深さ11kmに求められ、体積変化量は $8 \times 10^7 \text{m}^3$ とされている(井口・他, 2008b)。2010年1月～3月の桜島島内の水平変動はおおむね始良カルデラ中央部下の圧力源の膨張により大部分が説明できる。しかし、始良カルデラの中央部に膨張力源があるだけでは有村、ハルタ山、高免の各観測点における傾斜変化とひずみ変化は説明できず、桜島島内に圧力源を加える必要がある。また、始良カルデラの中央部の膨張力源は桜島北部において観測された水平変位を説明できない。したがって、始良カルデラ中央部の膨張力源に加え、桜島島内にも膨張力源を存在する必要がある。

2009年9月から2010年6月中旬までの隆起・膨張期のうち、2010年3月～6月中旬までのハルタ山観測坑道における傾斜変化量は+1300nrad、伸縮計の火口方向と直交方向で、それぞれ、+510ナノストレイン、+200ナノストレイン(ドリフト補正後)の収縮ひずみ量であった。Fig.6に示した沈降・収縮期において傾斜ベクトルが交差する南岳の北縁から北岳の北山麓に隆起・膨張期の圧力源があると仮定し、Ishihara (1990)に基づいて面積ひずみと傾斜変化量の比から深さを見積もると、Fig.6のNの位置では2.6kmとなり、Sの位置では3.4kmと見積もられた。また、体積増加量はそれぞれ $2.1 \times 10^5 \text{m}^3$ 、 $4.8 \times 10^5 \text{m}^3$ となった。

### 5.2 沈降・収縮期

2010年6月ごろから高免とハルタ山の傾斜計は火口方向の地盤の沈降に、ハルタ山観測坑道の伸縮計では全成分において収縮に転じた。有村観測坑道の傾斜計も7月16日以降は急速な火口方向の沈降を示すようになった。2010年6月中旬から11月までにハルタ山観測坑道では水管傾斜計において-2100nradの火口方向の地盤の沈降、伸縮計の火口方向と直交方向で、それぞれ、-1380ナノストレイン、-1150ナノストレインの収縮ひずみが観測された。隆起・膨張期と同様に圧力源の深さと体積変化を見積もると、Fig.6の位置Nに圧力源を仮定すると、深さは4.3km、体積

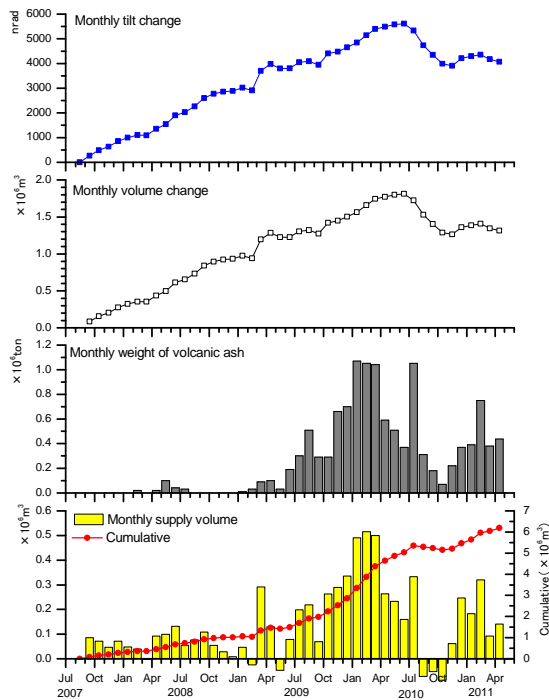


Fig.13 Monthly supply volume to Sakurajima. Top: monthly tilt change in radial component of tiltmeter in Arimura underground tunnel. Second: monthly volume change of pressure source located at a depth of 4 km beneath the position S in Fig. 6. Third: monthly weight of volcanic ash estimated from 59 observation sites around Sakurajima. Bottom: Monthly supply volume of magma and its cumulative volume.

減少量は $7.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ となった。また、Sの位置を仮定すると深さは5.7km, 体積減少量は $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ となる。

ハルタ山や高免観測点の傾斜変化量やひずみ変化量は隆起・膨張期と沈降・収縮期において大差がない。一方、GPS観測による水平変動からみると隆起・膨張期の変動は桜島全体に及んで、その変動量も大きい、沈降・収縮期では水平変動は桜島北部の観測点においてしかみられない (Fig.10下図)。隆起・膨張期においては始良カルデラ中央部の圧力源の急速な膨張に加え、桜島北部においても力源の膨張が進んだと考えるが、沈降・収縮期においては始良カルデラ下の力源の体積変化は顕著ではなく、隆起・膨張期において体積が増加した桜島山頂下の力源における体積のみが減少したと考えられる。

### 5.3 桜島下へのマグマ供給量

桜島島内の傾斜変化量から桜島島内へのマグマの供給量の変化を見積もってみた。マグマ供給量は、桜島内に推定される圧力源の体積変化と火口から放出される火山灰重量のマグマ相当体積の和によって

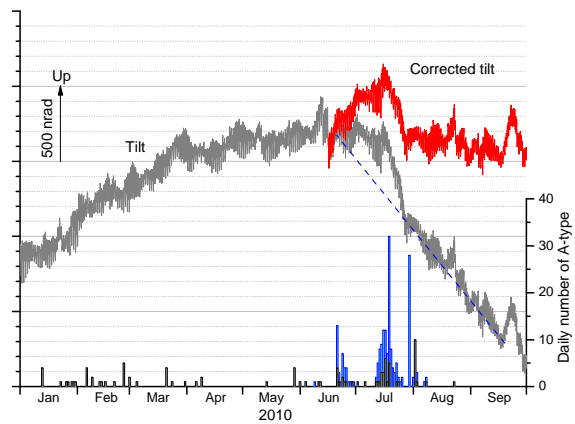


Fig.14 Relation of daily number of A-type earthquake and ground deformation. Tilt is radial component in Arimura underground tunnel (grey). Corrected tilt change is indicated by red curve reducing deflation tilt change at a rate of -13 nrad/day. Histograms are daily numbers of A-type earthquake located at southwest (blue) and beneath summit area (grey)

求めることができる。圧力源の位置はFig.6のNからSの間にあると考えられるが、ここでは位置Sの深さ4kmを仮定することとする。火山灰放出重量は鹿児島県により測定されている鹿児島県内59か所における月ごとの降灰重量から石川・他 (1981) に基づいて求めた。そのうえで、 $DRE=2500\text{kg/m}^3$ としてマグマ相当体積に換算した。Fig.13に月ごとのマグマ供給量とその積算値を示す。

マグマ供給量は地盤変動の隆起・膨張期である2009年9月～2010年5月までが多く、隆起・膨張速度の大きかった2010年1月～3月は $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ /月に達している。一方、沈降・収縮である2010年6月中旬～11月のうち、8～10月は計算上、負の値をとるので、桜島下へのマグマの供給はほぼ停止していた状態であると判断される。2009年から2010年の隆起・膨張期においては地盤変動がまだ小さく、マグマ供給量の見積りにおいて火山灰放出量の寄与は80～90%であり、供給されたほとんどのマグマは桜島下での蓄積過程を経ることなしに噴出物として放出されていることが分かる。残りの10%の寄与が地盤変動の隆起・膨張に相当する蓄積分であるが、沈降収縮期において放出されたことになる。

### 5.4 遷移期と地震活動

隆起・膨張期から沈降・収縮期に遷移した前後は特異な沈降パターンを示している。高免観測点の傾斜計とハルタ山の傾斜計、伸縮計は2010年6月ごろからそれぞれ火口方向沈降の傾斜と地盤の収縮を示し

ているのに対し、有村観測坑道の傾斜計が明瞭な火口方向の沈降を示したのは、2010年7月16日以降である。7月17日～29日の沈降速度は大きく、 $-51\text{nrad/日}$ であったが、7月29日～9月17日の沈降速度は1/3以下の $-13\text{nrad/日}$ に低下しており、7月29日において、傾斜変化の折れ曲がり認められる (Fig.4c)。一方、ハルタ山の伸縮計や高免の傾斜計では折れ曲がり顕著ではない。この時期は2010年6年中旬から8月上旬にかけて桜島南西の浅部において微小なA型地震が多発した時期に相当する。

一般に隆起・膨張期にあるときはA型地震、あるいは火山構造成地震が発生しやすいが、地盤が沈降・収縮している時期はひずみが蓄積しにくく、地震活動度は低い。しかし、6月中旬以降は、ハルタ山や高免では地盤の沈降・収縮を示し、有村でも地盤変動は停滞から沈降へ遷移した時期であるにも関わらず、M1以下とはいえ、火山性地震の発生頻度が高かった。この理由について考察してみる。

有村観測坑道の傾斜計は7月29日～9月17日の沈降速度 $-13\text{nrad/日}$ のほぼ一定の割合で沈降傾斜を示している。一方、高免、ハルタ山の傾斜計は6月中旬から9月下旬まではそれぞれ、 $-12\text{nrad/日}$ および $-19\text{nrad/日}$ のほぼ一定速度の沈降傾斜を示している。この3点の傾斜変化が桜島中央火口丘下の同じ圧力源の収縮によるものとすれば、有村観測坑道の傾斜計は6月中旬から7月29日までの期間においても $-13\text{nrad/日}$ 程度の一定速度の沈降を示さなければならない。6月15日～7月15日における沈降傾斜は顕著でなく、7月16日～29日の期間において急激に沈降傾斜が進行した。これを説明するためには高免、ハルタ山には大きな影響を及ぼさないが、有村観測坑道の傾斜計には影響を及ぼす場所に別の増圧圧力源を仮定する必要がある。7月29日～9月17日の沈降速度 $-13\text{nrad/日}$ の直線を遡ると急速な沈降から停滞状態に変わった6月16日ころに傾斜変動曲線と交差する。そこで、6月16日から沈降速度 $-13\text{nrad/日}$ の一定速度の沈降に、隆起を引き起こす体積増加が加わったものとして、有村の傾斜計記録から $-13\text{nrad/日}$ の一定速度の沈降傾斜を差し引くことにより、体積増加の寄与による隆起傾斜変動を推定した。結果をFig.14に示す。この付加的傾斜量は急速に増加し、7月16日ごろにピークの $400\text{nrad}$ に達した。傾斜量が増加する過程においてA型地震の発生回数が増加した。7月16日以降の傾斜は沈降を示し、A型地震の発生数も減少した。6月下旬から7月中旬にかけてはハルタ山観測坑道の伸縮計の急速な収縮が一時的に伸長に転じ、微小な伸長が加わっていることが分かる (Fig.4b)。また、 $1\text{cm}$ 以下の微小な変位ではあるが、6月～7月にかけて桜島南部のGPS観測点ARIGにおいて東向きの変位が

検知されている (Fig.9)。この圧力源は高免、ハルタ山の傾斜変化には影響を及ぼしていないので、桜島南部の浅い場所にあるものと推定される。2009年10月からの隆起・膨張期において中央火口丘下のマグマ溜まりに余剰に蓄積されたマグマが南部の浅い場所に一時的に移動した結果、南部において張力場となり、南西部の浅い場所においてA型地震の活動が活発化したものと解釈される。

## 6. まとめ

地盤変動観測に基づいて、桜島の火山活動について考察してみた。2009年から2010年の火山活動は以下のように評価される。

- 1) 2009年9月からの地盤変動は2006年6月に昭和火口の噴火が再開してからは最大の変動であった。
- 2) 2009年9月以降の地盤変動は、2009年9月～2010年6月までの隆起・膨張期と2010年6月中旬～11月下旬までの沈降・収縮期に分けられる。11月下旬以降は再び隆起・膨張に転じている。
- 3) 隆起・膨張期においては爆発的な噴火活動が活発であり、マグマ供給量が多い。始良カルデラ下のマグマ溜まりが膨張し、その一部が桜島北部に供給され、さらにその一部が噴火活動によって放出されたと解釈される。
- 4) 沈降・収縮期では爆発回数と火山灰放出量は減少し、桜島へのマグマの供給はほぼ停止し、隆起・膨張期に桜島北部に蓄積されたマグマを緩やかに放出した時期と解釈できる。
- 5) 隆起・膨張期から沈降・収縮期へ遷移した2010年6月中旬～7月下旬に桜島の南西部において微小地震活動が活発化した。桜島北部では沈降・収縮、南部において局所的な隆起・膨張が起こっており、北部から南部へのマグマの移動が示唆される。

## 謝辞

本研究には、地震及び火山噴火予知のための観測研究計画に基づいて実施された「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」に文部科学省から配当された経費を使用した。有村観測坑道における傾斜計および伸縮計のデータ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されたものである。関係省庁に深く感謝の意を表するものである。

## 参考文献

- 井口正人(2006): マグマの蓄積過程にある始良カルデラ, 月刊地球, 第28巻, 第2号, pp.115-121.
- 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, pp.1-18.
- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾茂・前野直・長尾潤・馬場幸二・大重吉輝・放生会正美(2008b): 桜島および始良カルデラ周辺におけるGPS観測, 第10回桜島火山の集中総合観測, pp.53-62.
- 井口正人・横尾亮彦・為栗健(2010): 桜島昭和火山噴火の規模について, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, pp.233-240.
- 石川秀雄・江頭庸夫・田中良和・植木貞人(1981): 桜島火山の噴火活動史, 自然災害特別研究 研究成果No.A-56-1, pp.153-179.
- 江頭庸夫(1988): 桜島火山周辺における地盤変動—1982年~1985年—, 第6回桜島火山の集中総合観測, 15-19.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・木股文昭・宮島力雄・小林和典(1997): 始良カルデラ地盤の再隆起—1991年12月~1996年10月—, 京大防災研年報, 第40号B-1, pp.49-60.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・木股文昭・宮島力雄・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・小林和典(1998a): 桜島火山周辺における水準測量結果について—1991年12月~1996年10月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, pp.15-29.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・園田忠惟・山本圭吾(1998b): 桜島火山周辺における光波測量結果—1992年1月~1996年12月—, 第9回桜島火山の集中総合観測, pp.31-37.
- 加茂幸介(1978): 桜島における噴火の前駆現象と予知, 火山, 第23巻, 53-64.
- 加茂幸介・西潔・高山鐵朗・植木貞人(1980): 桜島南方の地震活動と地震波異常伝播域, 第3回桜島火山の集中総合観測, pp.11-15.
- 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, pp.31-36.
- 佐々憲三(1956): 地震予知に関する2, 3の問題(II), 京都大学防災研究所設立5周年記念論文集, pp.3-7.
- 鈴木拓(1999): 1997年鹿児島県北西部地震の余震波を用いた桜島火山浅部におけるP波伝播異常の検出, 京都大学大学院理学研究科修士論文.
- 山本圭吾・他(2008): 桜島火山周辺における水準測量(2007年10月-12月), 第10回桜島火山の集中総合観測, pp.45-51.
- 横尾亮彦・井口正人・石原和弘(2007): 熱赤外線観測からみた桜島南岳山体斜面の熱活動, 火山, 第52巻, pp.121-126.
- Hidayati, S., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2007): Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira caldera, southern Kyushu, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 52, pp. 289-309.
- Ishihara, K. (1981): A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic materials ejected, Abstract 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism, p.143.
- Ishihara, K. (1990): Pressure Sources and Induced Ground Deformation associated with Explosive Eruptions at an Andesitic Volcano: Sakurajima Volcano, Japan, Magma Transport and Storage (Ed. M.P.Ryan), John Wiley and Sons, pp. 335-356.
- Kriswati, E. and Iguchi, M. (2003): Inflation of the Aira caldera prior to the 1999 eruptive activity at Sakurajima volcano detected by GPS network in south Kyushu. Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.46B, pp.817-826.
- Mogi, K. (1958): Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 38, pp. 99-134.
- Omori, F. (1918): The Sakura-Jima eruptions and earthquakes, II, Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm., 8(6).
- Yoshikawa, K. (1961): On the crustal movement accompanying with the recent activity of the volcano Sakurajima (Part 1), Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.48, pp.1-15.

## Evaluation of Volcanic Activity of Sakurajima Volcano in 2010

Masato IGUCHI, Yusaku OHTA\*, Sadato UEKI\*, Takeshi TAMEGURI, Tadaomi SONODA,

\* Graduate School of Science, Tohoku University

### **Synopsis**

Eruptive activity of Showa crater of Sakurajima gradually became active after resume of eruption in June 2006. In this paper, we examine increase in eruptive activity in 2010 by ground deformation and seismicity increase at SSW of the volcano. The ground deformation of Sakurajima was divided into 3 periods; inflation from September 30, 2009 to June 2010, deflation from June to November 2010 and re-inflation after November 2010. Explosive eruptions frequently occurred in the inflation period at a rate of 150 events/month from January to March 2010. In contrast, eruptive activity declined in deflation period. It is estimated that the ground deformation was caused by volume increase and decrease of source located beneath summit area from Minamidake to north flank of Kitadake. It is interpreted that magma was supplied to a magma reservoir below northern part of Sakurajima from Aira caldera and simultaneously ejected from the Showa crater in the inflation period. In the deflation period, the magma below the summit area slowly was ejected.

**Keywords:** Sakurajima volcano, Showa crater eruption, ground deformation, seismicity, magma supply system