

## 水準測量によって測定された桜島火山周辺域の地盤上下変動 —2012年11月および12月測量の結果—

### Vertical Ground Deformation in and around Sakurajima Volcano Measured by Precise Leveling Survey Conducted in November and December 2012

山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫  
大倉敬宏<sup>(1)</sup>・横尾亮彦<sup>(1)</sup>・吉川慎<sup>(1)</sup>・井上寛之<sup>(1)</sup>・諏訪博之<sup>(1)</sup>  
松島健<sup>(2)</sup>・藤田詩織<sup>(2)</sup>・神菌めぐみ<sup>(2)</sup>

Keigo YAMAMOTO, Tadaomi SONODA, Tetsuro TAKAYAMA, Nobuo ICHIKAWA,  
Takahiro OHKURA<sup>(1)</sup>, Akihiko YOKOO<sup>(1)</sup>, Shin YOSHIKAWA<sup>(1)</sup>, Hiroyuki INOUE<sup>(1)</sup>, Hiroyuki SUWA<sup>(1)</sup>,  
Takeshi MATSUSHIMA<sup>(2)</sup>, Shiori FUJITA<sup>(2)</sup> and Megumi KAMIZONO<sup>(2)</sup>

(1) 京都大学大学院理学研究科

(2) 九州大学大学院理学研究院

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

(2) Faculty of Sciences, Kyushu University

#### Synopsis

We conducted the precise leveling survey in and around Sakurajima volcano in November and December 2012. The survey data measured in Sakurajima are compared with those of the previous survey, resulting in the relative vertical displacements during the period from November 2011 to November-December 2012. The resultant displacements indicate the ground uplift at bench marks around the northern part of Sakurajima. From the analysis based on a spherical source model, the inflation source is located at 9.6 km depth beneath the center of Aira caldera. The relative vertical displacements around the western coast of Kagoshima Bay calculated during the period from November 2009 (the previous survey) to November 2012 also show the ground uplift near the center of Aira caldera. These results suggest that the magma storage at the magma reservoir beneath Aira caldera is progressing in spite of the recent increase of the volume of ejected magma associated with the eruptive activity at Showa crater.

**キーワード:** 桜島火山, 始良カルデラ, 精密水準測量, 地盤上下変動

**Keywords:** Sakurajima volcano, Aira caldera, precise leveling survey, vertical ground deformation

#### 1. はじめに

桜島火山周辺においては、1955年から始まった山頂噴火活動活発化以降、桜島の火山活動に伴う地盤の上下変動を測定するための水準測量が繰り返され

てきた (Yoshikawa, 1961; 江頭, 1967, 1971, 1989)。

1990年代以降においては、山頂噴火活動の静穏化に伴ってマグマの放出量が減り、始良カルデラ地下の深さ約10 kmに推定されるマグマ溜りの増圧によって桜島北部の地盤変動がそれまでの沈降から隆起

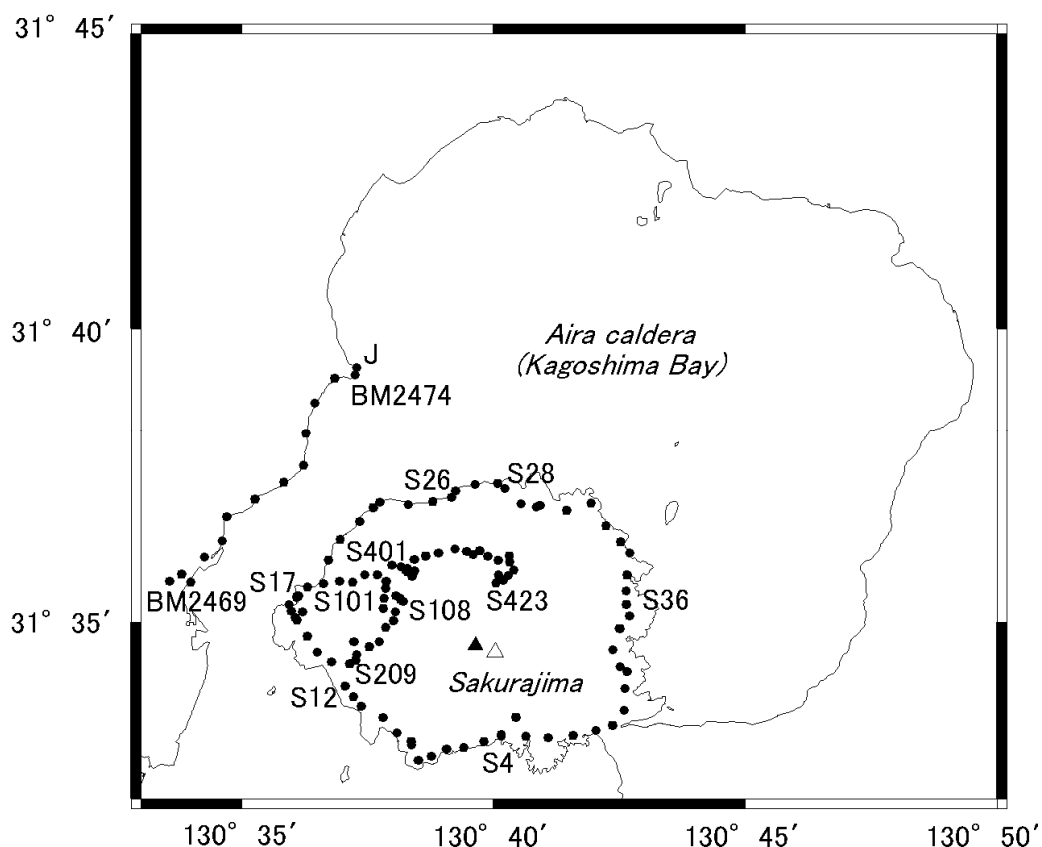


Fig. 1 Leveling bench marks measured in the November-December 2012 survey (solid circles). Solid and open triangles indicate the locations of the summit and Showa craters of Sakurajima volcano, respectively.

に転じたことが1991年から1996年の水準測量により確認された(江頭ら, 1997). この桜島北部の地盤隆起傾向は, 1996年以降も最近まで継続している(Yamamoto et al., 2013; 山本ら, 2012). 始良カルデラ地下のマグマ溜りにおける増圧は, GPS観測による水平変動においても始良カルデラ・桜島北部の地盤の膨張として検出されている(井口ら, 2008). 一方で, 噴火活動としては, 2006年6月から始まった昭和火口における噴火活動が近年激化する傾向が見られ(井口, 2011; 井口ら, 2011), 2010年, 2011年, 2012年と年間に1000回前後におよぶ爆発的噴火が発生した.

平成21年度より開始された「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」における課題「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」の一環として, 2009年11月および2010年4月(山本ら, 2010), 2010年11月(山本ら, 2011), 2011年11月(山本ら, 2012)と水準測量を行ってきたが, これらに引き続き2012年11月および12月に桜島火山周辺の水準測量路線において一等水準測量の繰返し観測を実施した. 本稿では, この測量の概要

および結果を示し, 最新の桜島火山における地盤の上下変動量について報告する.

## 2. 水準測量

2012年11月および12月に水準測量を実施した路線をFig. 1に示す. 桜島内においては, 2011年11月の前回測量(山本ら, 2012)と同様に, 桜島一周道路ルート(BM.S.17~BM.S.26~BM.S.36~BM.S.4~BM.S.17), 桜島西部山腹のハルタ山登山ルート(BM.S.101~BM.S.108~BM.S.209)および桜島北部山腹の北岳ルート(BM.S.401~BM.S.423)において水準測量を実施した. また, 桜島外においては, 2009年11月の測量(山本ら, 2010)から3年ぶりとなる鹿児島湾西岸ルート(BM.2469~BM.2474~BM.J)の水準測量を実施した. これらの測量ルートの総延長は67 kmであった.

これらの路線を, 大学合同で3測量班を構成し, 2012年11月6日~16日および12月3日~10日の日程で測量に当たった. 測量に使用した機材は, 自動読み取りデジタルレベル(Wild NA3003, Leica DNA03,

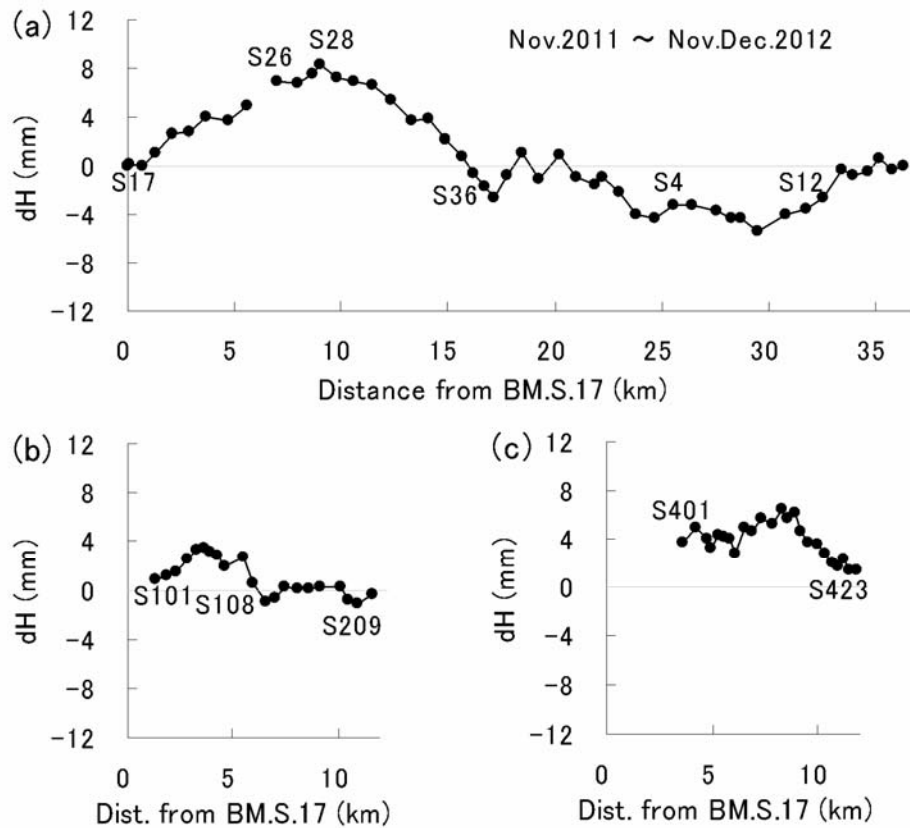


Fig. 2 Vertical displacements of the bench marks in Sakurajima volcano referred to BM.S.17 which is located at the western coast of Sakurajima during the period from November 2011 to November-December 2012. (a): Sakurajima coast route, (b): Sakurajima western flank (Harutayama) route, (c): Sakurajima northern flank (Kitadake) route.

ソキアSDL1X)およびインバールバーコード標尺 (Wild GPCL3, ソキアGS1)である。測量方法は、各水準点間の往復測量で、その往復差は水準点間距離をL kmとしたときの一等水準測量の許容誤差である $2.5 \times \sqrt{L}$  mm以内を、また水準環を形成する路線においては水準環閉塞誤差が水準環路線距離をS kmとしたときの一等水準測量の許容誤差である $2.0 \times \sqrt{S}$  mm以内を満たすようにした。実際の測量における誤差は、1km当りの平均自乗誤差が桜島一周道路ルート、ハルタ山登山ルート、北岳ルートおよび鹿児島湾西岸ルートにおいてそれぞれ $\pm 0.41$  mm/km,  $\pm 0.38$  mm/km,  $\pm 0.27$  mm/km,  $\pm 0.51$  mm/km, 水準環閉塞誤差は桜島一周道路ルートおよびハルタ山登山ルートにおいて時計回りにそれぞれ-2.3 mm (一周約36 km; 許容誤差12.1 mm), 2.9 mm (一周約15 km; 許容誤差7.6 mm) であり高精度の一等水準測量であった。

### 3. 測量結果

桜島内の測量ルートについては、これまで行われ

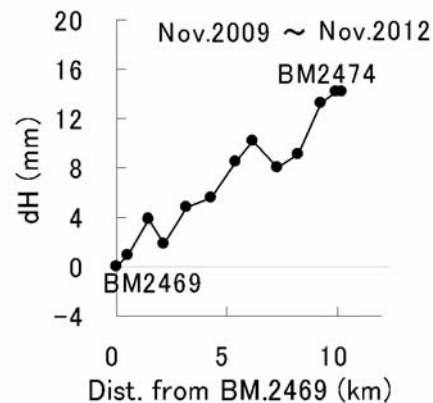


Fig. 3 Vertical displacements of the bench marks along Kagoshima Bay western coast route referred to BM.2469 which is located in Kagoshima city to the west of Sakurajima during the period from November 2009 to November 2012

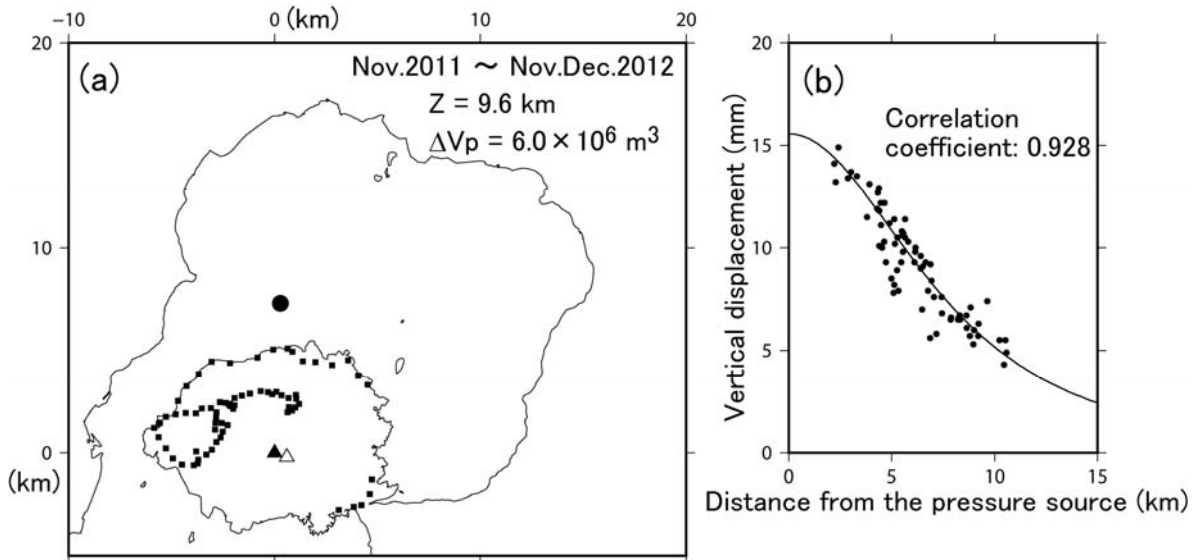


Fig. 4 (a) Horizontal location of the calculated pressure source (solid circle) by using the relative vertical displacement data during the period from November 2011 to November-December 2012.  $Z$  and  $\Delta V_p$  represent the depth and the deformation volume at the pressure source, respectively. Solid rectangles denote the bench marks used for the calculation. Solid and open triangles indicate the locations of the summit and Showa craters, respectively. (b) Comparison between measured vertical displacements (solid circles) and theoretical vertical displacements (solid line) versus radial distance from the pressure source.

てきた水準測量（例えば，山本ら，2010, 2011）と同様，桜島西岸の水準点BM.S.17（袴腰検潮室）を不動点（基準）とし，計算された各水準点の比高値を前回の2011年11月に行われた水準測量結果（山本ら，2012）と比較した．Fig. 2に，その結果求められた各水準点における2011年11月から2012年11月・12月の期間の上下変動量を水準点BM.S.17からの路線距離に対してプロットして示した．

2011年11月から2012年11月・12月の期間における桜島一周道路ルート（Fig. 2a）からは，この期間の最大の隆起域が，桜島北部付近にあることが確認される．その隆起分布のパターンは，1996年10月～2007年10月～12月の期間（山本ら，2008；Yamamoto et al., 2013）といった始良カルデラ増圧期に平均的に見られるパターンと概ね似通っている．2011年11月～2012年11月・12月の約1年間における最大の隆起量は，桜島北部の水準点BM.S.28（白浜）において測定された8.4 mmであり，その隆起速度も始良カルデラ増圧期の典型例と考えられる1996年～2007年の期間に見られたものにほぼ等しい．なお，これまでの水準測量で確認されてきたBM.S.36（東部，黒神）およびBM.S.4（南部，有村），BM.S.12（南西部，赤水）付近で認められる局所的な地盤沈降（江頭ら，1997）は，この期間の測量結果においても見

受けられる．また，ハルタ山登山ルート（Fig. 2b）および北岳ルート（Fig. 2c）においても，桜島北部に近づく領域で地盤の隆起が認められる．この期間，始良カルデラ地下のマグマ溜りに関するマグマの貯留が進行していることが推測される．

桜島外の鹿児島湾西岸ルートについては，このルートにおいてこれまで行われてきた水準測量（例えば，江頭ら，1997；山本ら，2010）と同様，このルートの南西端の水準点BM.2469（旧鹿児島県庁）を不動点（基準）とし，計算された各水準点の比高値を前回の2009年11月に行われた水準測量結果（山本ら，2010）と比較した．Fig. 3に，その結果求められた各水準点における2009年11月から2012年11月の期間の上下変動量を水準点BM.2469からの路線距離に対してプロットして示した．始良カルデラ中央部に近づくにしたがって地盤が隆起している様子が確認される．始良カルデラ地下のマグマ溜りに近いBM.2474（大崎鼻）の比高は，この3年間に約14 mmの増加（地盤隆起）であった．

## 4. 議論

### 4.1 圧力源解析

桜島内における2011年11月～2012年11月・12月の

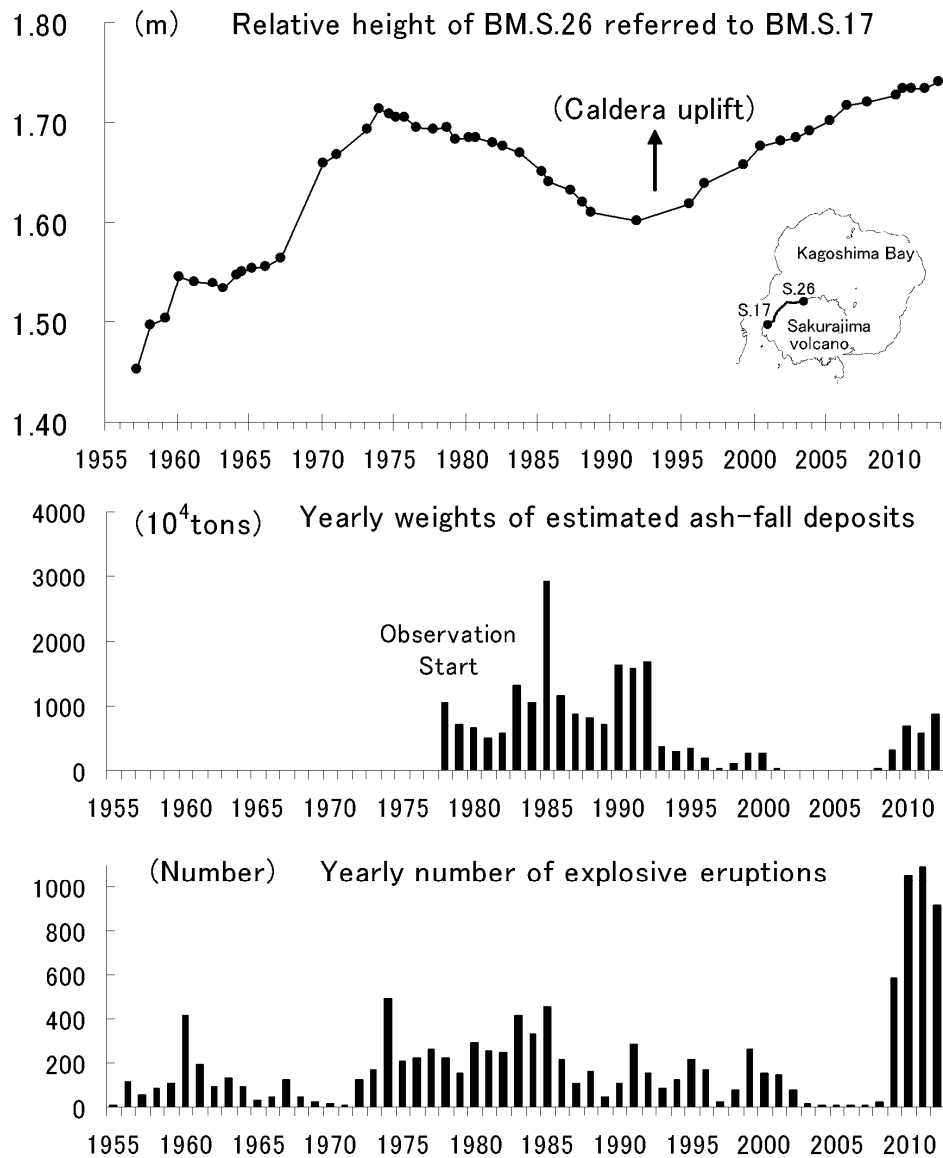


Fig. 5 Relation among secular change of relative heights of BM.S.26 referred to BM.S.17, yearly weights of estimated volcanic ash-fall deposits and yearly number of explosive eruptions at the summit and Showa craters of Sakurajima volcano.

期間の上下変動量データに対し、Mogi (1958) による球状圧力源モデルを適用し、江頭ら (1997) と同様な方法で圧力源の位置と体積変化を求めた。

Fig. 4に、計算された圧力源の位置と上下変動量の測定値と理論値の比較を図示した。始良カルデラ中央部地下約9.6 kmの深さに増圧源が求められ、圧力源における容積変動量 ( $\Delta V_p$ ) は、約600万立方メートルの容積増加 (マグマの貯留) と推定された (Fig. 4a)。計算された1圧力源モデルによって、観測された上下変動量はよく説明されていることが分かる (Fig. 4b)。なお、圧力源解析の計算は、局所的に

盤沈降が認められる桜島東部および南東部の水準点の上下変動量データを取り除いて行った。

鹿児島県が実施している桜島の降下火山灰の観測資料から降下火砕堆積物総量を推定する方法 (Eto, 1988) を用いると、圧力源解析を行った期間とほぼ同一の2011年12月～2012年11月の期間中の降下火砕堆積物量を密度 $2.5 \text{ g/cm}^3$ のDense Rock Equivalent (マグマ相当の岩石) に換算して、約370万立方メートルのマグマ放出量となる。計算された圧力源における容積増加量と合計して、約970万立方メートルのマグマがこの約1年間に始良カルデラ中央部直下のマグ

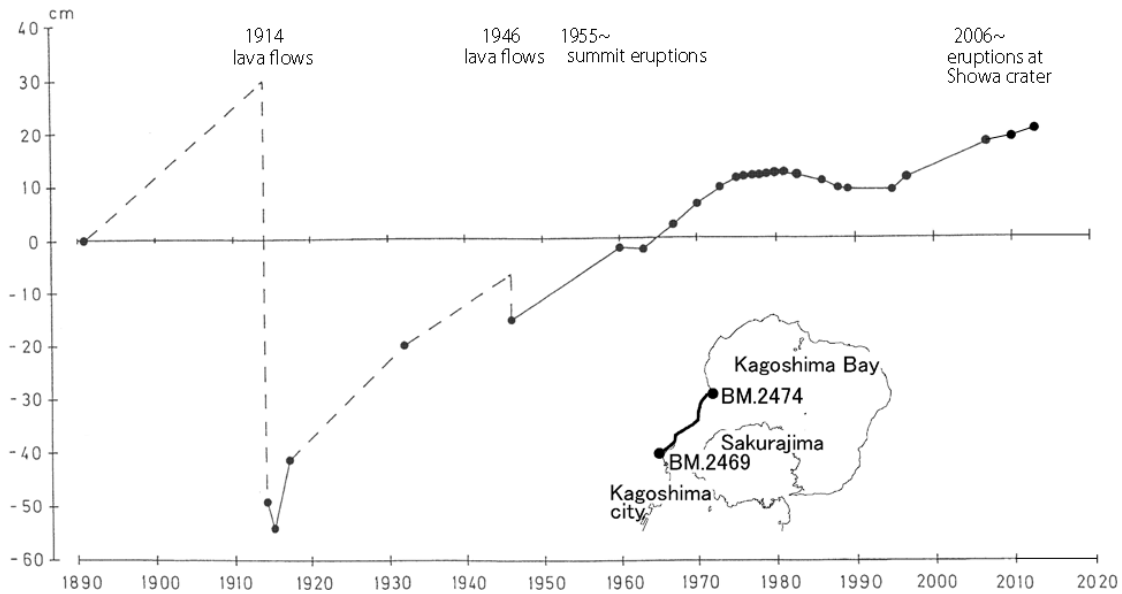


Fig. 6 Secular changes of relative heights of BM.2474 referred to BM.2469 and volcanic activity at Sakurajima volcano (modified from Fig. 1 in Eto et al., (1997)).

マ溜りに地下深部から供給されたものと推定される。このマグマ供給率は、Ishihara (1981) の指摘した噴火活動静穏期のマグマ供給率である年間約1,000万立方メートルにほぼ等しいものであった。

#### 4.2 地盤上下変動の経年変化

Fig. 5に、BM.S.17（袴腰検潮室）を基準にした桜島北部のBM.S.26（松浦神社）の1957年以降の比高変化、山頂火口および昭和火口から放出された降下火山灰の推定年間総量および山頂火口および昭和火口における年間の爆発的噴火回数を示した。過去に桜島火山の噴火活動の盛衰に伴う桜島北部の地盤上下変動が観測されてきたが（例えば、江頭ら（1997）参照）、最近においては1993年頃からの山頂噴火活動の静穏化に伴い再開した始良カルデラ地下のマグマ溜りにおけるマグマの貯留を反映すると考えられる桜島北部の地盤の隆起現象が明瞭に確認される。

2009年以降、昭和火口における噴火活動が激化し、それに伴い降下火山灰量の推定年間総量（マグマの放出量）も増加傾向であることがFig. 5から見て取れる。このような状況のなか、Fig. 5からも認められるように2010年4月～2011年11月の比較的最近の期間の水準測量データにおいては顕著な桜島北部の地盤隆起は見られていなかった（山本ら、2012）。しかし、その後沈降に転ずるようなことはなく今回の水準測量で再び桜島北部における地盤隆起が進行したことが確認された。BM.S.26の隆起状態は、1970年代

および1980年代の活発な山頂噴火活動の開始期である1973・74年頃の隆起状態を2006年にほぼ回復した後も更に隆起が継続した状態となっている。

Fig. 6に、BM.2469（旧鹿児島県庁）を基準としたBM.2474（大崎鼻）の比高の経年変化を示した。この測量ルートにおいては、1891年から120年近くの長きに渡り水準測量データが存在しており、途中1914年の桜島大正大噴火や1946年の昭和噴火の溶岩流出を経験している。1990年代以降の始良カルデラ地下のマグマ溜りにおけるマグマの貯留に伴ったBM.2474付近の地盤の隆起が進み、2012年11月の時点では、大正大噴火の直前において推定されている比高の9割程度を回復した状態となっている。

これらの隆起状態を鑑みると、現在は、1970年代以降に生じた活発な山頂噴火活動と同様な活動を起こすだけのポテンシャルをすでに持っている状態であり、また大正大噴火と同様な規模の噴火活動を起こすポテンシャルも獲得しつつある状態であると推察される。

#### 4.3 桜島直下への多量のマグマ貫入の可能性について

石原・江頭（1978）は、桜島内とその対岸にある鹿児島湾西岸ルートのそれぞれにおける水準測量データについて検潮観測データを用いて接続し、鹿児島港を不動として、活発な山頂噴火活動を開始した1972年前後の地盤上下変動の特徴を示した。それに

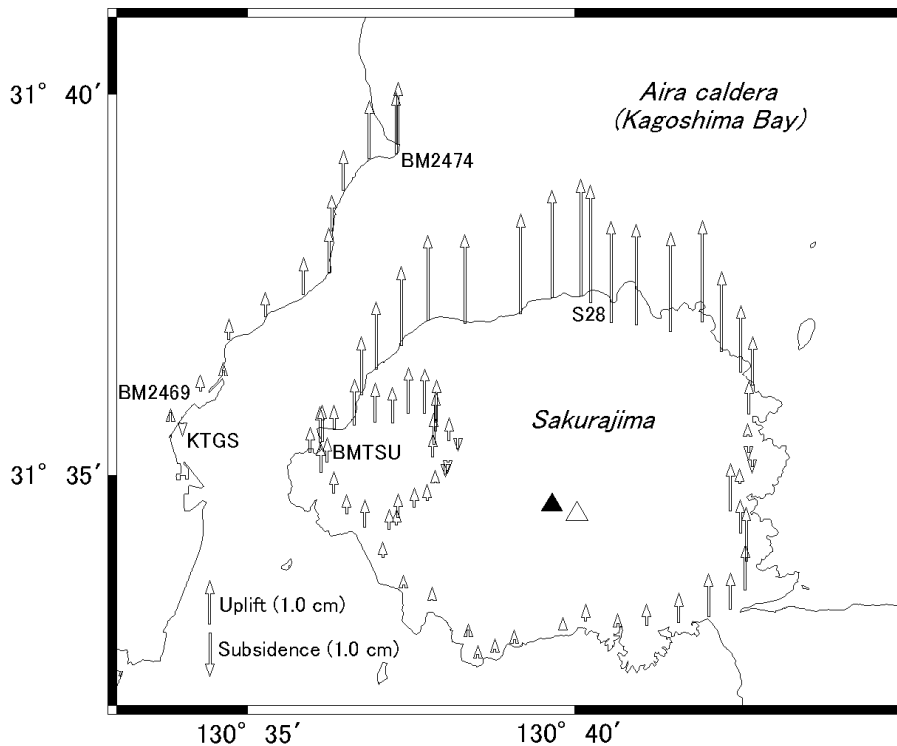


Fig. 7 Distributions of the vertical displacements of the bench marks in and around Sakurajima volcano referred to BM.2469 which is located in Kagoshima city to the west of Sakurajima during the period from November 2009 to November-December 2012. The leveling data in Sakurajima and of Kagoshima Bay western coast route are connected by using the continuous GPS observation data (see text). Solid and open triangles indicate the locations of the summit and Showa craters of Sakurajima volcano, respectively.

よると、静穏期である1965～71年の期間では、始良カルデラ中央部地下の圧源へのマグマの供給により始良カルデラ中央部を中心とした同心円状の地盤隆起を生じるが、一方で山頂噴火活動が再開し活発化する1971～74年の期間では、始良カルデラ中央部地下から桜島火山へマグマが移動し、桜島火山が他のカルデラ縁部に対して相対的に隆起、桜島中央部から南部の地盤が沈降から隆起に転じることを示した。

2009年11月から2012年11月・12月の期間について、桜島内と鹿児島湾西岸ルートの水準測量データについてGPS連続観測データ（井口，私信）を用いて接続し、水準点BM.2469を不動点として計算した地盤上下変動量の分布をFig. 7に示した。接続に用いたGPS観測点は、桜島内の水準点BMTSUおよび鹿児島湾西岸ルートの水準点KTGSのそれぞれの近傍にあり、両GPS観測点の高度差の測定精度は数mm以下程度であると考えられる（井口，私信）。

この約3年間の期間の最大の隆起量は、桜島北部の水準点BM.S.28における26.8 mmであるが、桜島中央部付近や南部の地盤には顕著な隆起は見られておらず、その上下変動量分布のパターンは、石原・江頭

（1978）における1971～74年のパターンとはなっていない。近い将来、始良カルデラ中央部地下から桜島火山への多量のマグマの移動が生じ、その結果桜島火山が他のカルデラ縁部に対して相対的に隆起を生じることも予想されるが、今後このような地盤上下変動量分布の推移について注視してゆく必要があると考えられる。

## 5. おわりに

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」における課題「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」の一環として2012年11月および12月に一等水準測量の繰返し観測を実施した。測量結果の検討から得られた知見は次の通りである。

[1] 桜島内においては、2011年11月の測量結果との比較から、2011年11月～2012年11月・12月の期間において、桜島北部の地盤の隆起が確認された。その隆起分布のパターンおよび隆起速度は、1996年～2007年の期間といった始良カルデラ増圧期に平

均的に見られるパターンおよび隆起速度と概ね似通っている。

- [2] 茂木モデルに基づき、桜島内の2011年11月～2012年11月・12月の期間の上下変動量データから圧力源の位置を求めると、始良カルデラ中央部地下約9.6 kmの深さに増圧源のあることが推定された。
- [3] 圧力源における容積増加量の見積りにこの期間の降下火山灰量を加えて推定すると、始良カルデラ地下のマグマ溜りへのマグマ供給率が年間約970万立方メートルとなる。Ishihara (1981) の指摘した噴火活動静穏期のマグマ供給率である年間約1,000万立方メートルにほぼ等しい供給量であった。
- [4] 桜島外の鹿児島湾西岸路線においても、2009年11月の測量結果と比較した結果、2009年11月～2012年11月の期間に始良カルデラ内部を中心とした地盤の隆起が進行していることが確認された。
- [5] これらの結果は、昭和火口における噴火活動が激化している現在も、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおけるマグマの貯留が進行していることを示している。

## 謝 辞

水準測量の実施に際しては、防災研究所附属火山活動研究センターのスタッフ諸氏にお世話になった。ここに厚く感謝の意を表します。本研究は文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けました。

## 参考文献

- 井口正人 (2011) : 桜島火山の噴火活動—2010年6月～2011年7月—, 「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」平成22年度報告書, pp. 1-8.
- 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 (2011) : 2010年桜島火山活動を考える, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, pp. 171-183.
- 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 (2008) : 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.
- 石原和弘・江頭庸夫 (1978) : 桜島火山近傍の垂直地盤変動と山頂噴火活動の関係について, 京都大学防災研究所年報, 第21号B-1, pp. 153-162.

- 江頭庸夫 (1967) : 火山性地盤変動 (III) 始良カルデラ周辺の地盤変動と桜島の火山活動, 火山, 12, pp. 80-88.
- 江頭庸夫 (1971) : 火山性地盤変動 (V) 桜島火山における地殻変動観測, 京都大学防災研究所年報, 第14号A, pp. 97-106.
- 江頭庸夫 (1989) : 噴火活動に伴う桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-1, pp. 29-39.
- 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) : 始良カルデラの地盤の再隆起—1991年12月～1996年10月—, 京都大学防災研究所年報, 第40号B-1, pp. 49-60.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川 慎・井上寛之・松島 健・内田和也 (2010) : 桜島火山周辺における水準測量 (2009年11月および2010年4月), 京都大学防災研究所年報, 第53号B, pp. 227-232.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川 慎・井上寛之・横尾亮彦・松島 健・内田和也・中元真美 (2011) : 桜島火山周辺における水準測量 (2010年11月), 「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」平成22年度報告書, pp. 29-34.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・横尾亮彦・吉川 慎・井上寛之・堀田耕平・松島 健・内田和也・中元真美 (2012) : 水準測量による桜島火山の地盤上下変動 (2010年11月～2011年11月), 京都大学防災研究所年報, 第55号B, pp. 155-161.
- 山本圭吾・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・大倉敬宏・吉川 慎・松島 健・内田和也・中元真美・平岡喜文・塩谷俊治・根本盛行 (2008) : 水準測量による桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤上下変動—1996年10月から2007年10月—12月まで—, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp. 247-252.
- Eto, T. (1988): An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima volcano, Kagoshima International Conference on Volcanoes Proceedings, pp. 448-451.
- Ishihara, K. (1981): A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic material ejected, Abstract, 1981 IAVCEI Symposium —Arc Volcanism—, 143.
- Mogi, K. (1958): Relations between the eruption of various volcanoes and deformations of the ground



surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., 36, pp. 99-134.

Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K. and Nakamoto, M. (2013): Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996-2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull.

Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, pp. 137-151.

Yoshikawa, K. (1961): On the crustal movement accompanying with the recent activity of the Volcano Sakurajima (part 1), Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 48.

(論文受理日 : 2013年6月11日)