

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)

山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏⁽¹⁾
横尾亮彦⁽¹⁾・吉川慎⁽¹⁾・井上寛之⁽¹⁾・堀田耕平⁽¹⁾・松島健⁽²⁾
内田和也⁽²⁾・中元真美⁽²⁾

(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

要 旨

桜島火山において、2011年11月に一等水準測量の繰返し観測を実施した。この結果を2010年11月に行われた測量結果と比較することで、2010年11月から2011年11月の期間における地盤上下変動量を求めた。この期間の桜島北部における地盤上下変動量は3 mm以内であった。桜島北部の地盤においては、1991年以降、山頂噴火活動静穏化に伴い、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推定される地盤隆起が観測されてきたが、2010年4月～11月の期間に続きその地盤隆起がほぼ停滞していることが確認された。一方、桜島中央部に近い水準点においては、最大で約13 mmにおよぶ地盤の沈降が確認された。これは、桜島中央部直下のマグマ溜りにおける減圧、すなわちマグマの放出量が供給量を上まっただことを示唆しており、昭和火口における活発な噴火活動を反映しているものと考えられる。

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

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; 石原・江頭, 1978; 江頭ら, 1997)。それらの結果から、噴火活動に伴う地盤上下変動は、桜島北方の始良カルデラ地下の深さ約10 kmに推定される主マグマ溜りと桜島中央部直下約3 kmの深さに推定される副マグマ溜り内のマグマの貯留と放出に伴う現象として説明されている(江頭, 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、主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・他, 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(山本ら, 2008, 2010, 2011)。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(井口ら, 2011)、2010年、2011年と年間に1000回を超える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)と水準測量を行ってきたが、これらに引き続き2011年11月に桜島火山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、前回の測量である2010年11月の測量以降の期間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。

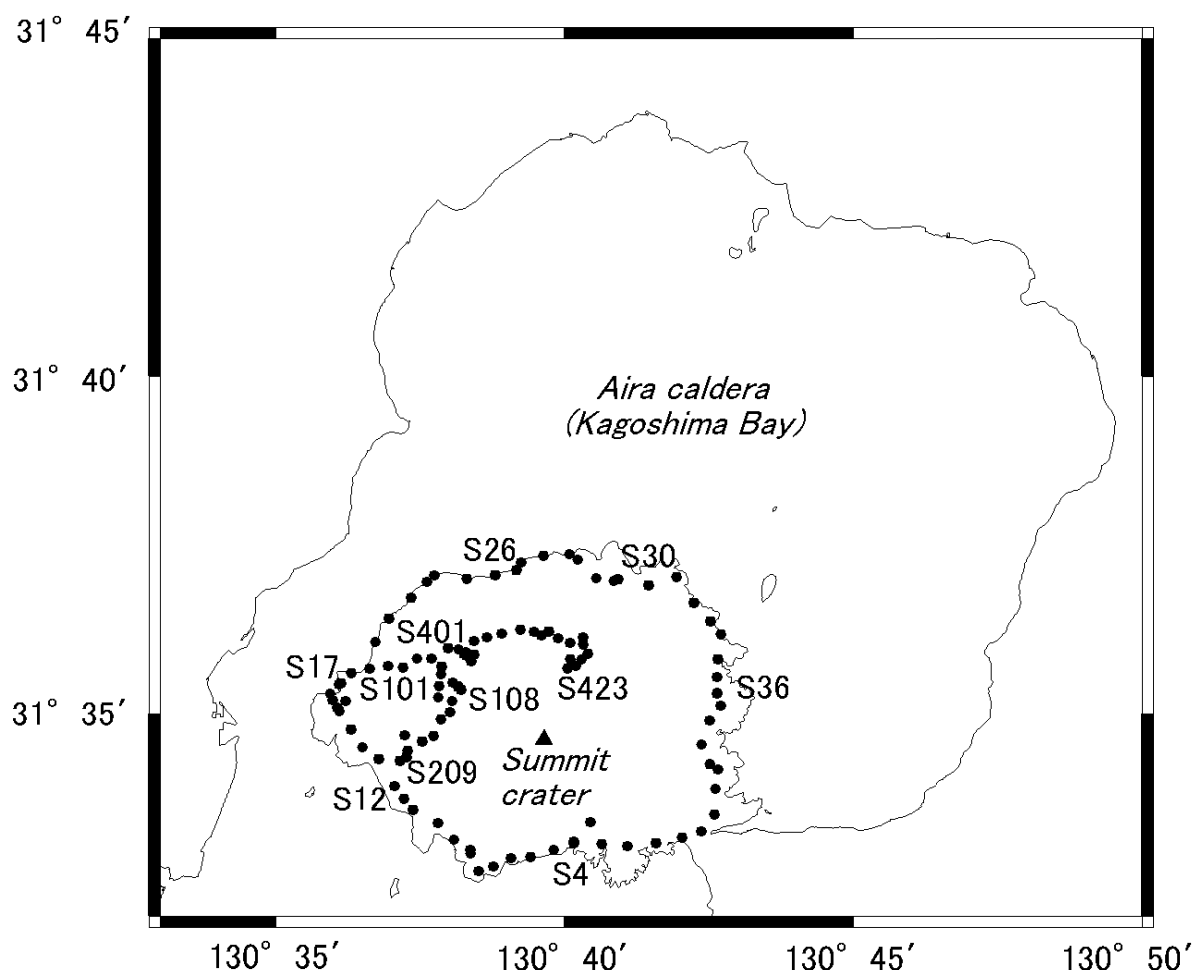


Fig. 1 Leveling bench marks measured in the November 2011 survey (solid circles). Solid triangle indicates the location of the summit crater of Sakurajima volcano.

2. 水準測量

2011年11月に水準測量を実施した路線をFig. 1に示す。2010年11月の前回測量と同様に、桜島一周道路ルート（BM.S.17～BM.S.26～BM.S.36～BM.S.4～BM.S.17）、桜島内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、その測量ルートの総延長は56 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、2011年11月7日～21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, NA3000, ソキアSDL1X)およびインバーバルバーコード標尺 (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および北岳ルートにおいてそれぞれ ± 0.39 mm/km, ± 0.39 mm/km, ± 0.52 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2.2 mm（一周約36 km）、2.3 mm（一周約15 km）であり高精度の一等水準測量と言える。

3. 測量結果

これまで桜島火山周辺で行われてきた水準測量（例えば、山本ら、2008, 2010, 2011）と同様に桜島西岸の水準点BM.S.17（袴腰検潮室）を不動点（基準）

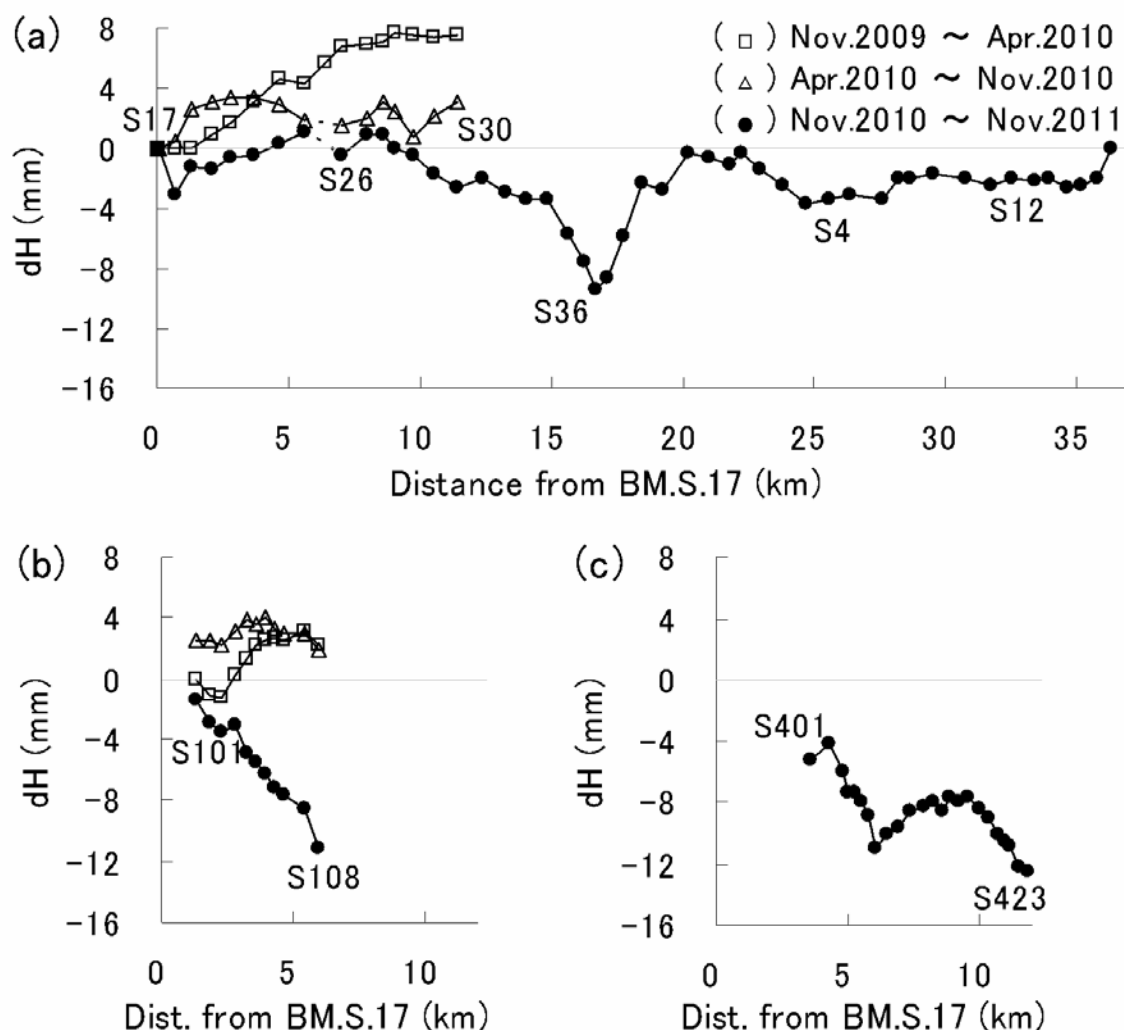


Fig. 2 Vertical displacements of bench marks in Sakurajima volcano referred to BM.S.17 which is located at the western coast of Sakurajima. (a): Sakurajima coast route, (b): Sakurajima western flank (Harutayama) route, (c): Sakurajima northern flank (Kitadake) route.

とし、計算された各水準点の比高値を前回の2010年11月に行われた水準測量結果と比較した。なお、北岳ルートはこの2010年11月の測量の際に新設された測量路線であり、今回の測量によって初めてその地盤上下変動量が求められた。Fig. 2に、その結果求められた各水準点における2010年11月から2011年11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（黒丸）。なお、ハルタ山登山ルートの2010年11月の測量結果については、水準環閉塞誤差が大きかったため（山本ら、2011）水準環としての誤差配分処理を行わず、2010年11月、2011年11月の両測量時に同一の標尺を使用しデータの高精度な比較が可能と考えられるBM.S.101からBM.S.108の区間の上下変動量のみをプロットし表示

した。また、同図には比較のために、2009年11月から2010年4月（白四角）および2010年4月から2010年11月（白三角）の期間の上下変動量（山本ら、2010, 2011）も併せて示した。

2010年11月から2011年11月の期間における桜島一周道路ルートの上下変動量（Fig. 2a）からは、桜島北部付近の地盤上下変動量は3 mm以内であったことが確認される。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）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認められる。桜島北部の地盤においては、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主マグマ溜りにおけるマグマの貯留（江

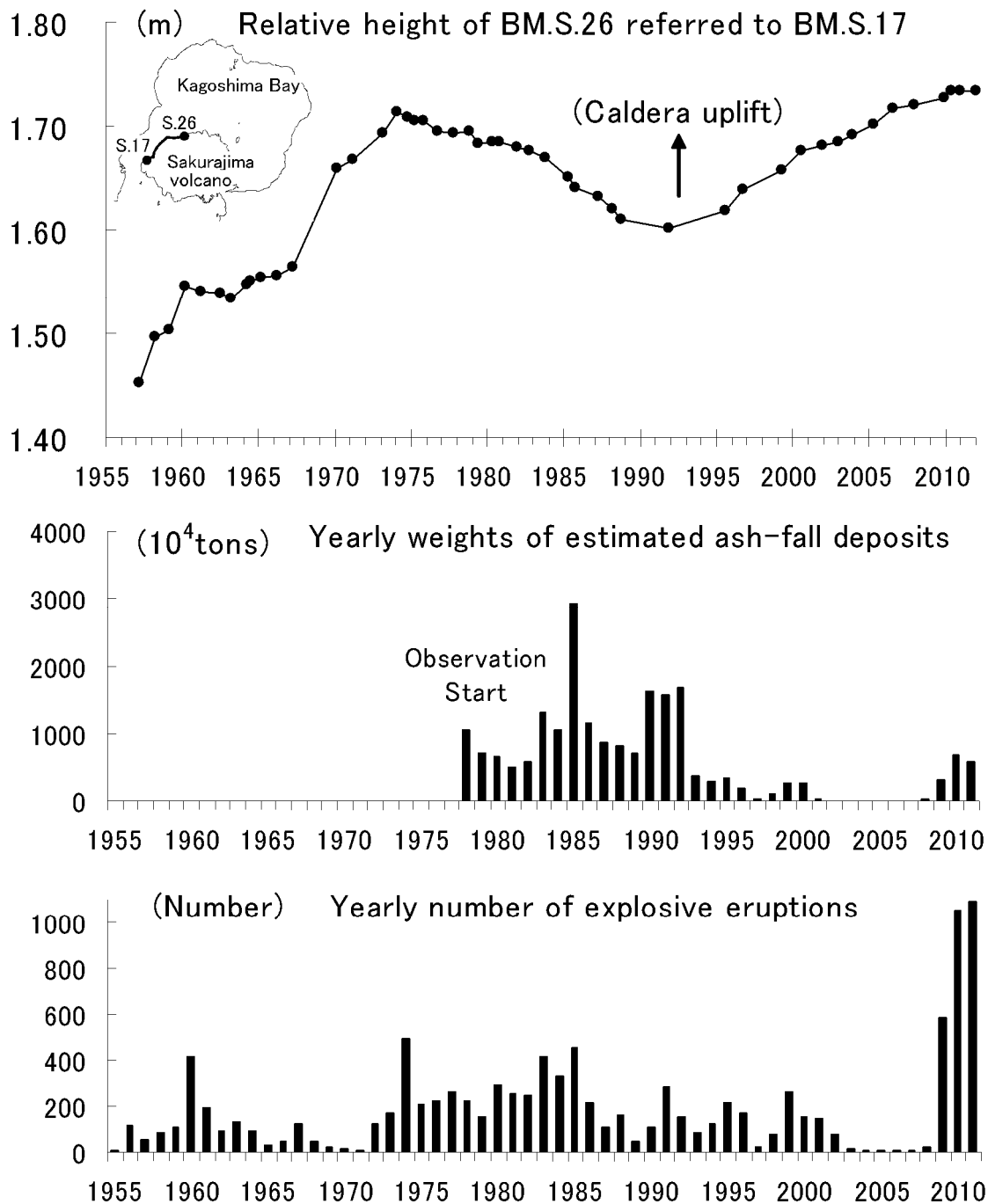


Fig. 3 Relation among secular change of relative heights of BM.S.26 referred to BM.S.17, yearly weights of estimated volcanic ash-fall deposits and yearly number of explosive eruptions at the active summit and Showa craters of Sakurajima volcano.

頭ら、1997)を反映すると考えられる地盤隆起が最近まで継続して観測されてきたが、2010年4月～11月の期間 (Fig. 2a中の白三角)に続きその地盤隆起がほぼ停滞していることが確認された。一方で、桜島中央部に近いハルタ山登山ルートおよび北岳ルートの水準点においては、この期間、最大で約13 mm

におよぶ地盤の沈降が確認された (Figs. 2b and 2c)。これは、桜島中央部直下の副マグマ溜りにおける減圧、すなわちマグマの放出量が供給量を上まったことを示唆しているものと考えられ、昭和火口における活発な噴火活動を反映しているのではないと思われる。

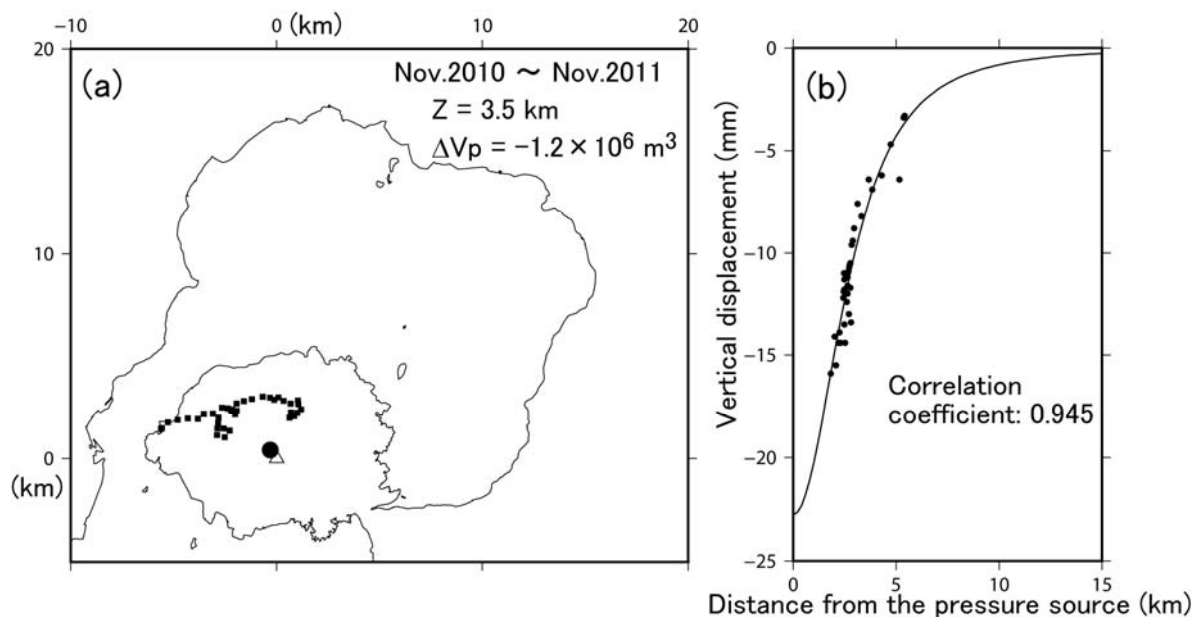


Fig. 4 (a) Horizontal location of the calculated pressure source (solid circle) by using the relative vertical displacement data during the period from November 2010 to November 2011. Z and ΔV_p represent the depth and the deformation volume at the pressure source, respectively. Solid rectangles denote the bench marks used for the calculation. Open triangle indicates the location of the summit crater. (b) Comparison between measured vertical displacements (solid circles) and theoretical vertical displacements (solid line) versus radial distance from the pressure source.

4. 地盤上下変動の経年変化

Fig. 3に、BM.S.17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。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1991年以降の山頂噴火活動静穏化に伴った桜島の北部の地盤の再隆起現象が明瞭に確認される。

BM.S.26の隆起状態は、2006年に1973・74年頃の隆起状態を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。山本ら（2010）で指摘されている通り、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ポテンシャルをすでに持っている状態であると推測される。

2009年以降、昭和火口における噴火活動が特に活発化し、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. 3から見て取れる。一方で、前述の通り桜島北部の地盤は、2010年4月以降の期間においてそれまでの隆起傾向

がほぼ停滞しており、また桜島中央部付近の地盤は2010年11月～2011年11月の期間において沈降が観測された。桜島内に設置されている傾斜計や伸縮計の連続観測データによると、昭和火口における噴火活動の盛衰に伴って、数日から数ヶ月といった水準測量の間隔より更に短い時間間隔で中央火口丘を中心とした地盤変動が生じていることも確認されている（井口、2011）。桜島火山の噴火ポテンシャルの評価においても今後の噴火活動の変化に伴う地盤変動の推移に細心の注意を払っていく必要があると考えられる。

5. 圧力源解析

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2010年11月～2011年11月の期間の上下変動量データから圧力源の位置と体積変化を求めた。

この期間に確認された顕著な地盤上下変動は、桜島中央部に近いハルタ山登山ルートおよび北岳ルートの水準点において観測された地盤沈降（Fig. 2）であることから、計算にはこれらの水準点におけるデータを用い解析を行った。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。桜島中央部地下約3.5 kmの深さに減圧源が求められ、圧力源における容積変動量 (ΔV_p) は、約120万立方メートルの容積減少と推定された (Fig. 4a)。計算された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)。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、2010年11月～2011年11月の期間中の降下火砕堆積物量を密度2.5 g/cm³の Dense Rock Equivalent (マグマ相当の岩石) に換算すると、約190万立方メートルのマグマ放出量となる。この期間、桜島中央部直下のマグマ溜りにおける容積減少量とほぼ同量 (あるいはそれに若干の地下深部からのマグマの供給を加えた量) のマグマが噴火活動によって地表に放出されたものと考えられる。

6. 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2011年11月に一等水準測量の繰返し観測を実施した。2010年11月の前回測量の際に桜島北部山腹に新設した桜島北岳ルートでは、今回の測量によって初めて地盤上下変動量が求められた。測量結果の検討から得られた知見は次の通りである。

- [1] 桜島北部における地盤上下変動量は、2010年11月～2011年11月の期間において3 mm以内であった。1991年以降桜島北部では、山頂噴火活動静穏化に伴い、始良カルデラ地下の主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地盤隆起が観測されてきたが、2010年4月～11月の期間に引き続きその地盤隆起がほぼ停滞していることが確認された。
- [2] 桜島中央部に近い水準点では、2010年11月～2011年11月の期間、最大で約13 mmにおよぶ地盤沈降が確認された。桜島中央部直下のマグマ溜りにおける減圧、すなわちマグマの放出量が供給量を上まったことを示唆しており、昭和火口における活発な噴火活動を反映しているものと考えられる。
- [3] 茂木モデルを適用し、圧力源の位置を求めると、桜島中央部地下約3.5 kmの深さに減圧源が推定された。圧力源における容積変動量と降下火山灰量との比較検討から、桜島中央部直下のマグマ溜りにおける容積減少量とほぼ同量かそれに若干の地下深部からのマグマの供給を加えた量のマグマが噴火活動によって地表に放出されたものと考えられる。

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・高山鉄朗・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.
- 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.
- 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.
- 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.

（論文受理日：2012年6月8日）

Vertical Ground Deformation in Sakurajima Volcano Measured by Precise Leveling Surveys (during November 2010 - November 2011)

Keigo YAMAMOTO, Tadaomi SONODA, Tetsuro TAKAYAMA, Nobuo ICHIKAWA, Takahiro OHKURA⁽¹⁾, Akihiko YOKOO⁽¹⁾, Shin YOSHIKAWA⁽¹⁾, Hiroyuki INOUE⁽¹⁾, Kohei HOTTA⁽¹⁾, Takeshi MATSUSHIMA⁽²⁾, Kazunari UCHIDA⁽²⁾, and Manami NAKAMOTO⁽²⁾

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

(2) Faculty of Sciences, Kyushu University

Synopsis

We conducted the precise leveling survey in Sakurajima volcano in November 2011, in order to evaluate the vertical ground deformation associated with the recent eruptive activity of this volcano. The measured survey data are compared with those of the previous survey conducted in November 2010, resulting in the relative vertical displacements of the bench marks during November 2010 - November 2011. No remarkable vertical displacements are obtained during this period at bench marks around the northern part of Sakurajima, where the ground uplifts which reflect the inflation of the magma reservoir beneath Aira caldera have been observed since 1991. On the other hand, the resultant displacements indicate the ground subsidence near the central part of this volcano. This subsidence is thought to reflect the deflation of the magma reservoir located beneath the summit crater, caused by the recent increase of the volume of ejected magma associated with the eruptive activity at Showa crater.

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