

水準測量によって測定された桜島火山および始良カルデラ周辺域の 地盤上下変動 —2013年10月および11月測量の結果—

Vertical Ground Deformation in Sakurajima Volcano and around Aira Caldera Measured by Precise Leveling Survey Conducted in October and November 2013

山本圭吾・松島健⁽¹⁾・吉川慎⁽²⁾・大倉敬宏⁽²⁾・横尾亮彦⁽²⁾・相澤広記⁽¹⁾・井上寛之⁽²⁾・
三島壮智⁽²⁾・内田和也⁽¹⁾・園田忠臣・関健次郎・小松信太郎・堀田耕平⁽²⁾・
高橋温志⁽²⁾・豊福隆史⁽³⁾・浅野晴香⁽³⁾・成田次範⁽³⁾

Keigo YAMAMOTO, Takeshi MATSUSHIMA⁽¹⁾, Shin YOSHIKAWA⁽²⁾, Takahiro OHKURA⁽²⁾,
Akihiko YOKOO⁽²⁾, Koki AIZAWA⁽¹⁾, Hiroyuki INOUE⁽²⁾, Taketoshi MISHIMA⁽²⁾, Kazunari UCHIDA⁽¹⁾,
Tadaomi SONODA, Kenjiro SEKI, Shintaro KOMATSU, Kohei HOTTA⁽²⁾, Atsushi TAKAHASHI⁽²⁾,
Takashi TOYOFUKU⁽³⁾, Haruka ASANO⁽³⁾ and Tsugunori NARITA⁽³⁾

(1) 九州大学大学院理学研究院

(2) 京都大学大学院理学研究科

(3) 国土交通省国土地理院

(1) Faculty of Sciences, Kyushu University, Japan

(2) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

(3) Geospatial Information Authority of Japan

Synopsis

We conducted the precise leveling survey in Sakurajima volcano and around Aira caldera in October and November 2013. The obtained survey data are compared with those of the previous surveys conducted in October-December 2007 and November-December 2012, resulting in the relative vertical displacements of the bench marks. The resultant displacements show the ground uplift around Aira caldera as well as the ground subsidence near the central part of Sakurajima. These results indicate that the magma storage at the magma reservoir beneath Aira caldera is still progressing. On the other hand, they also suggest the increase of the amount of ejected magma at the magma reservoir beneath the center of Sakurajima volcano, reflecting the recent increase of 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

桜島火山および始良カルデラ周辺域においては、

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

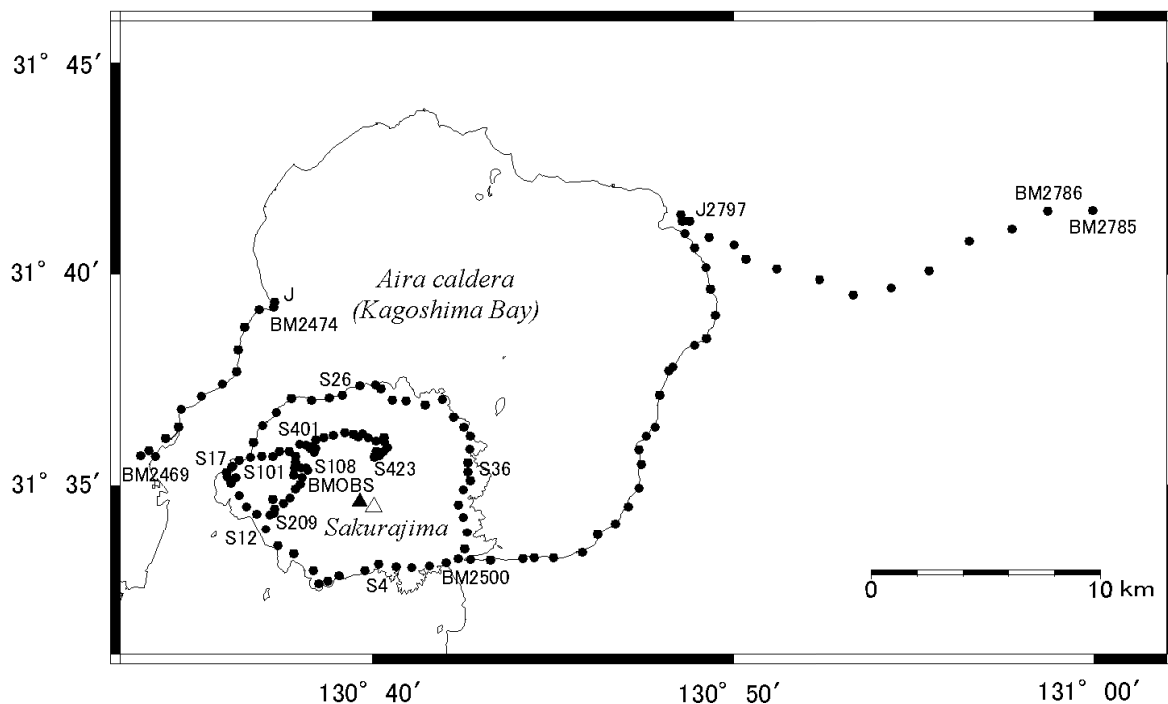


Fig. 1 Leveling bench marks measured in the October-November 2013 survey (solid circles). Solid and open triangles indicate the locations of the summit and Showa craters of Sakurajima volcano, respectively.

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, 2013) . 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 ; 井口, 2013 ; Iguchi et al., 2013) , 2010年以降は, 年間に800回を超える爆発的噴火が発生する状況が続いている.

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) , 2012年11月・12月(山本ら, 2013) と水準測量を行ってきたが, これらに引き続き2013年10月および11月に桜島火山および始良カルデラ周辺域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, 最新の桜島火山および始良カルデラ周辺

域における地盤の上下変動量について報告する.

2. 水準測量の概要

2013年10月および11月に水準測量を実施した路線をFig. 1に示す. 2012年11月および12月の前回測量(山本ら, 2013)と同様に, 海岸線に沿って桜島を一周する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) , 桜島北部山腹の北岳ルート(BM.S.401~BM.S.423) および桜島外の鹿児島湾西岸ルート(BM.2469~BM.2474~BM.J)において水準測量を実施した. また, これらに加え, 2007年10月-12月の測量(山本ら, 2008) から6年ぶりとなる鹿児島湾東岸ルート(BM.2500~J.2797) および曾於ルート(J.2797~BM.2785)の水準測量を実施した. これらの測量ルートの総延長は約117 kmであった.

これらの路線を, 大学合同測量班(期間: 2013年11月5日~22日)と国土地理院(期間: 2013年10月25日~11月7日および11月13日~26日)とで分担して測量を行った. 測量に使用した機材は, 自動読み取りデジタルレベル(Leica DNA03, 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BIS30A)である. 測量方法は, 各水準点間の往復測

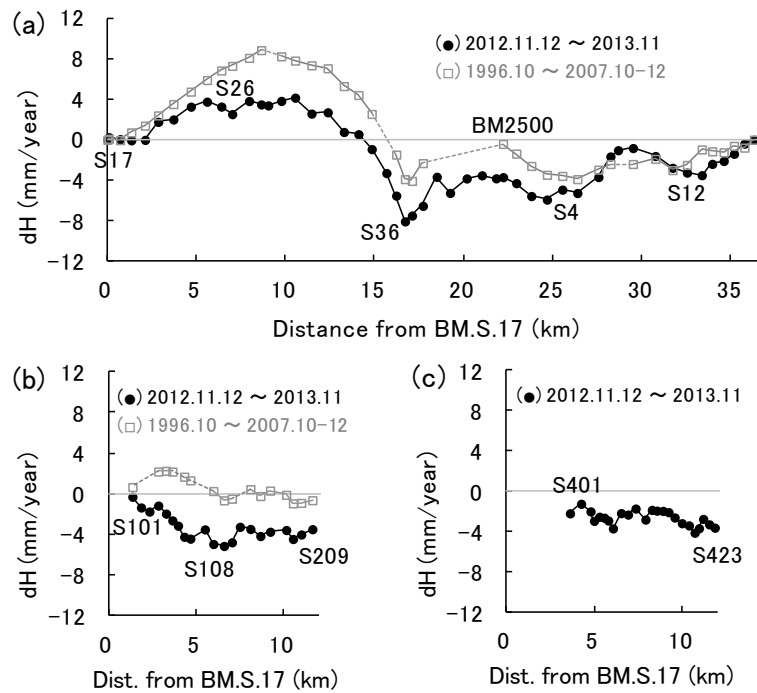


Fig. 2 Vertical displacement rates of the bench marks in Sakurajima volcano referred to BM.S.17 which is located at the western coast of Sakurajima during the period from November-December 2012 to November 2013 (solid circles). Vertical displacement rates during the period from October 1996 to October-December 2007 (open rectangles) are also plotted for comparison. (a): Sakurajima coast route, (b): Sakurajima western flank (Harutayama) route, (c): Sakurajima northern flank (Kitadake) route.

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、1 km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、鹿児島湾西岸ルート、鹿児島湾東岸ルートおよび曽於ルートにおいてそれぞれ ± 0.34 mm/km, ± 0.26 mm/km, ± 0.19 mm/km, ± 0.24 mm/km, ± 0.55 mm/km, ± 0.47 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；許容誤差12.1 mm）、3.2 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および鹿児島湾東岸ルート、曽於ルートについては、これまで行われてきた水準測量と同様、桜島西岸の水準点BM.S.17(袴腰検潮室)

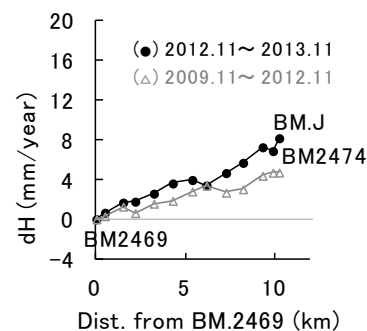


Fig. 3 Vertical displacement rates of the bench marks along Kagoshima Bay western coast route referred to BM.2469 which is located in Kagoshima city to the west of Sakurajima during the period from November 2012 to November 2013 (solid circles). Vertical displacement rates during the period from November 2009 to November 2012 (open triangles) are also plotted for comparison.

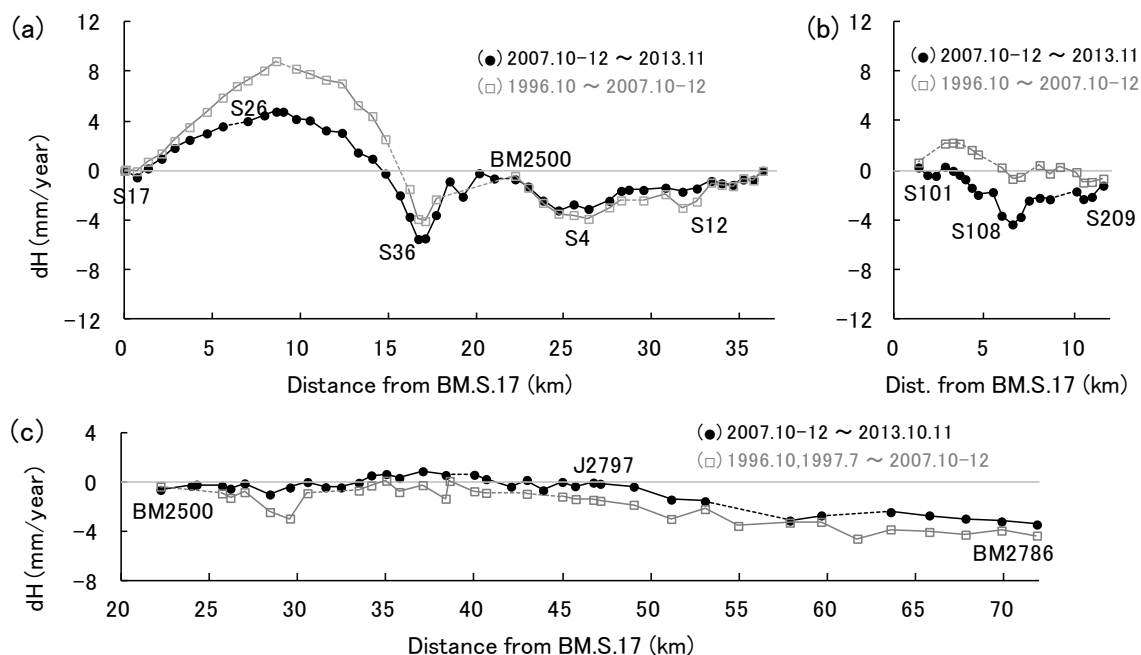


Fig. 4 Vertical displacement rates of the bench marks in Sakurajima volcano and around Aira caldera referred to BM.S.17 which is located at the western coast of Sakurajima during the period from October-December 2007 to October-November 2013 (solid circles). Vertical displacement rates during the period from October 1996 to October-December 2007 (open rectangles) are also plotted for comparison. (a): Sakurajima coast route, (b): Sakurajima western flank (Harutayama) route, (c): Kagoshima Bay eastern coast route and Soo route.

を不動点（基準）とし、各水準点の比高値を計算した。桜島内の測量ルートについては、計算された各水準点における比高値を前回の2012年11月・12月に行われた水準測量結果（山本ら、2013）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2012年11月・12月から2013年11月の期間の上下変動量を1年あたりの隆起速度として水準点BM.S.17からの路線距離に対してプロットして示した。

2012年11月・12月から2013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、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。桜島北部の地盤隆起は、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおける増圧を反映していると考えられ、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（江頭ら、1997）が、この期間も進行していることが推測される。しかしながら、2012年11月・12月～2013年11月の約1年間に桜島北部において測定された最大の隆起量は4.1 mmであり、その隆起速度は桜

島北部の地盤において始良カルデラ増圧期に平均的に見られる隆起速度に比べて半分程度と比較的小さい。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（例えば、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。

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中継点においては、最大で5.2 mmにおよぶ地盤の沈降が確認された（Figs. 2b and 2c）。桜島中央部付近における地盤沈降は、2007年～2009年および2010年～2011年の期間においても確認されている（山本ら、2010、2012）。このことは、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ことを示唆しており、近年の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。

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2012年11月に行われた水準測量結果（山本

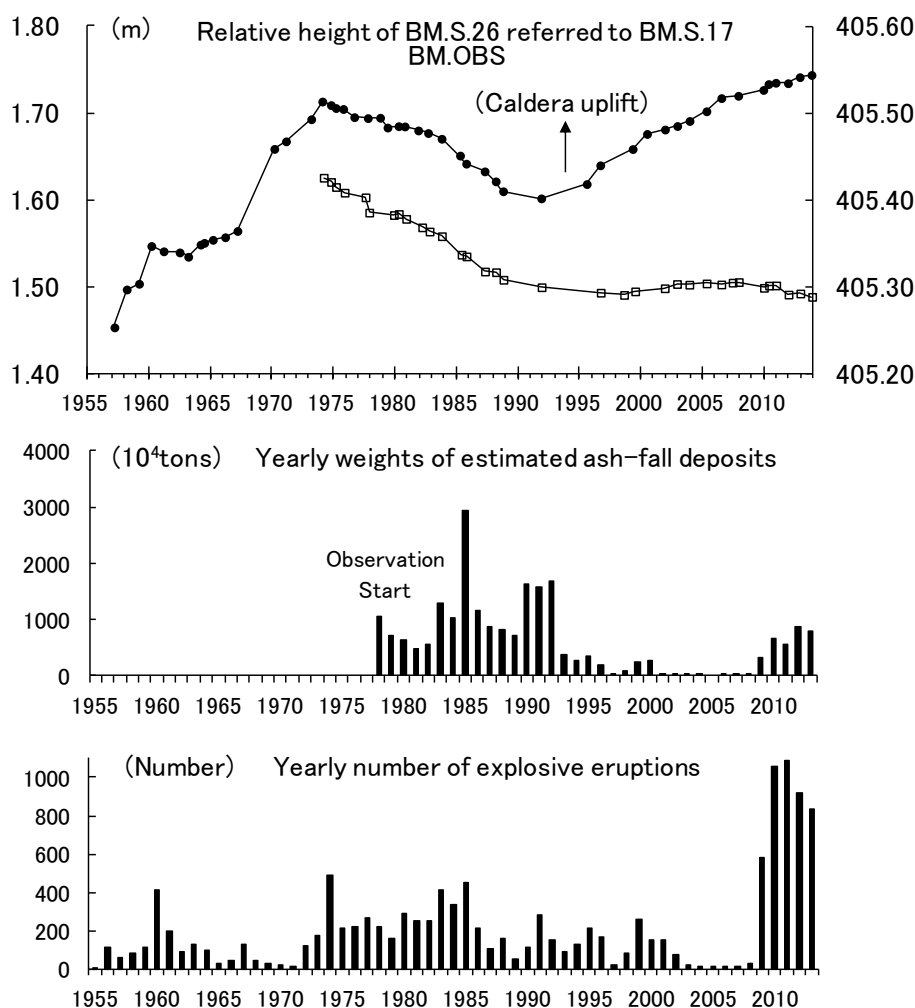


Fig. 5 Relation among secular change of relative heights of BM.S.26 (solid circles: refer to the left-hand side vertical axis) and BM.OBS (open rectangles: refer to the right-hand side vertical axis) referred to BM.S.17, yearly weights of estimated volcanic ash-fall deposits and yearly number of explosive eruptions at the summit and Showa craters of Sakurajima volcano.

ら, 2013) 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2012年11月から2013年11月の期間の上下変動量を1年あたりの隆起速度として水準点BM.2469からの路線距離に対してプロットして示した. 2009年11月~2012年11月の期間(山本ら, 2013)と同様に, 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1年間に約6.9 mmの増加(地盤隆起)であった.

鹿児島湾東岸ルートおよび曾於ルートにおける水準測量は, 2007年10月-12月(山本ら, 2008)の測量から約6年ぶりの実施であった. これらの測量ルートおよび桜島内の測量ルートについて, 水準点BM.S.17

を基準とし計算された各水準点の比高値を2007年10月-12月の水準測量結果と比較することで, 2007年10月-12月から2013年11月の約6年間の期間の上下変動量を計算し, 1年あたりの隆起速度として水準点BM.S.17からの路線距離に対してプロットして示した(Fig. 4). 桜島一周道路ルート(Fig. 4a)からは, 桜島北部付近の地盤の隆起が確認されるが, 一方で, 桜島中央部に近いハルタ山登山ルート(Fig. 4b)の水準点においては, この6年間の期間においても地盤の沈降傾向であることが確認される(Figs. 4b). 桜島中央部付近における地盤沈降は, 1996年10月~2007年10月-12月の期間(山本ら, 2008; Yamamoto et al., 2013)には見られなかった現象であり, 2007年10月-12月から2013年11月の期間において桜島中央部

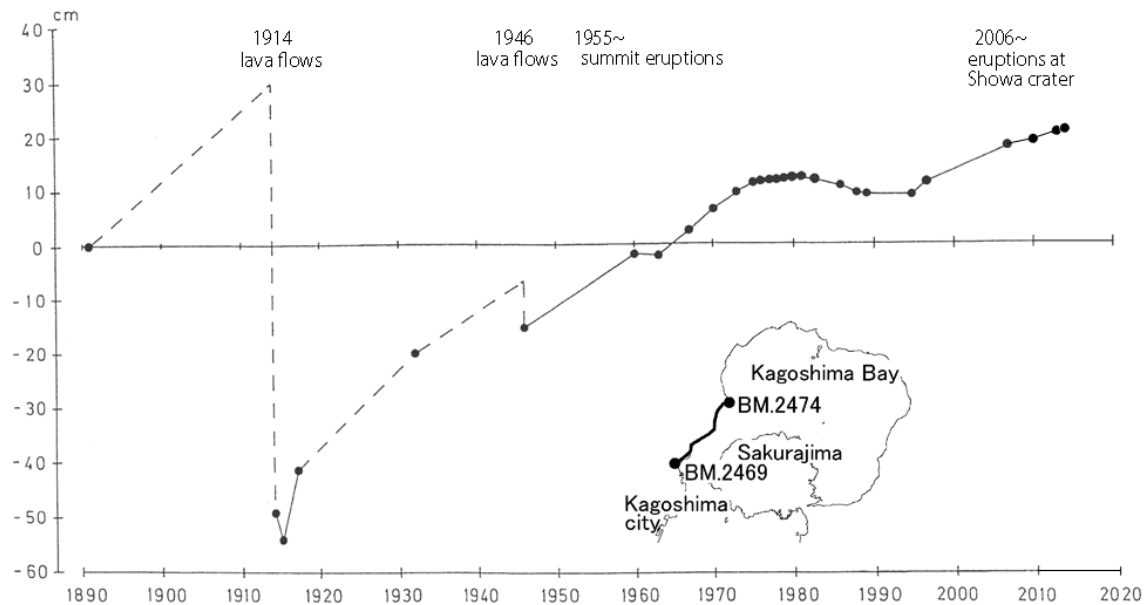


Fig. 6 Secular changes of relative heights of BM.2474 referred to BM.2469 and volcanic activity at Sakurajima volcano (modified from Fig. 1 in Eto et al., (1997)).

直下のマグマ溜りにおいて減圧傾向となっていることが示唆される。桜島外の路線における上下変動量 (Fig. 4c) からは、曾於ルート (BM.J.2797~BM.2785) の区間において顕著に見られるように始良カルデラの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分かる。始良カルデラから離れたBM.2786から見ると、桜島北部の地盤はこの6年間で最大で48.0 mm隆起した。

4. 議論

4.1 地盤上下変動の経年変化

Fig. 5に、BM.S.17 (袴腰検潮室) を基準とした桜島北部のBM.S.26 (松浦神社) および桜島中央部に近いBM.OBS (ハルタ山観測室) 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や桜島中央部付近の地盤上下変動が観測されてきたが (例えば、江頭ら, 1997), 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、桜島北部における地盤隆起が依然として進行していることが確認される。BM.S.26の隆起状態は、1970年代後半および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。

一方で、桜島中央部付近の地盤は、1998年以降は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した若干の隆起が観測されていたが、2007年以降、第3章中にも記述したように沈降傾向となってきたことが確認される。

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。大正大噴火後の100年間で、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付近の地盤隆起が進み、2013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 (佐々, 1956) の9割程度を回復した状態となっていることが見て取れる。

これらの隆起状態を鑑みると、山本ら (2013) でも指摘されたように、現在は、1970年代後半以降に

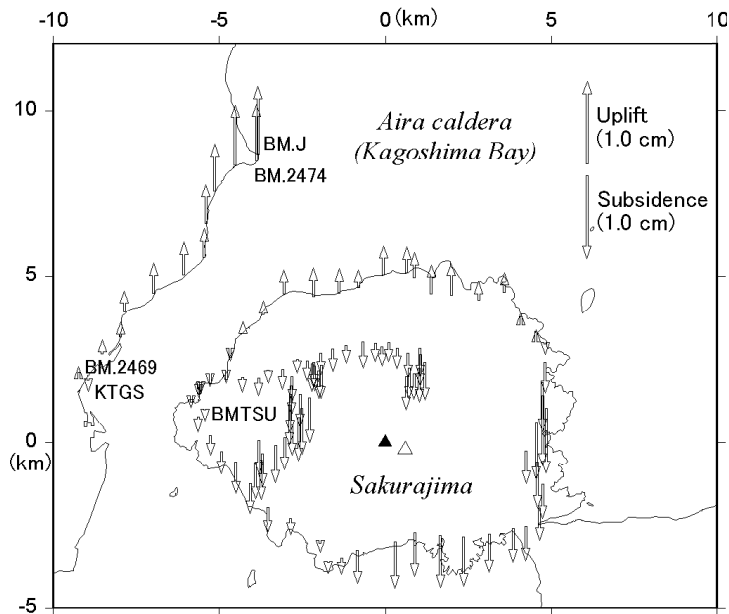


Fig. 7 Distributions of the vertical displacements of the bench marks in and around Sakurajima volcano referred to BM.2469 which is located in Kagoshima city to the west of Sakurajima during the period from November-December 2012 to November 2013. The leveling data in Sakurajima and of Kagoshima Bay 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.

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。一方で、桜島中央部付近の地盤が沈降傾向、すなわち桜島中央部直下のマグマ溜りにおいてマグマの放出量が供給量を上まってきた。これがさらに進行すれば、始良カルデラ地下のマグマ溜まりにおいてもマグマの放出が卓越する状態となる可能性がある。この桜島中央部付近の地盤沈降傾向は、1970年代後半以降に生じたような活発な山頂噴火活動と同様な活動への移行の初期状態を示しているのかもしれない。

4.2 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力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（山本ら，2013）に引き続き、2012年11月・12月から2013年11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（例えば、井口ら，2013）のデータを用いて接続し、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以内程度であると考えられる（井口，私信）。

この約1年間の期間の最大の隆起量は、鹿児島湾西岸ルートの北端にある水準点BM.Jにおける8.2 mmであるが、桜島中央部付近や南部では地盤沈降傾向であり、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年のパターンに見られるような顕著な地盤隆起とはなっていない。

Fig. 5に示された桜島北部の地盤隆起状態は、1つ

の可能性として近い将来、1971～74年に見られたような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とそれに伴う桜島火山全体の隆起、その後に1970年代後半以降に生じたような活発な噴火活動への移行が生じることを予想させる。Fig. 7の結果からは、このような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、現段階においては生じていないことが確認される。

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2013年10月および11月に一等水準測量の繰返し観測を実施した。鹿児島湾東岸ルートおよび曾於ルートにおける水準測量は、2007年10月-12月の測量から約6年ぶりの実施であった。測量結果の検討から得られた知見は次の通りである。

- [1] 2012年11月・12月の測量結果との比較から、2012年11月・12月～2013年11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と概ね似通っているが、隆起速度については平均的に見られる隆起速度の半分程度と比較的小さいものであった。また、鹿児島湾西岸ルートにおいても、始良カルデラ中央部に近づくに従って地盤が隆起していることが確認された。
- [2] 一方、桜島中央部付近では、2012年11月・12月～2013年11月の期間において地盤の沈降が確認された。このような桜島中央部付近における地盤沈降は、昭和火口の噴火活動が活発化してきた2007年～2009年および2010年～2011年の期間における水準測量結果においても確認されている。
- [3] 鹿児島湾東岸ルートおよび曾於ルートについて、2007年10月-12月の測量結果との比較から、2007年10月-12月～2013年10月・11月の期間において、始良カルデラ中央部に近づくに従って地盤が隆起していることが確認された。一方で、桜島中央部付近では、この6年間の期間においても地盤が沈降傾向であることが確認された。
- [4] これらの結果は、現在も始良カルデラ地下のマグマ溜りにおいてマグマの貯留が継続して進行していることを示している。一方で、桜島直下のマグマ溜りにおいてはマグマの放出量が増大する傾向となってきたことを示唆しており、近年の昭和火口における噴火活動の活発化を反映したもの

であると考えられる。

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りました。また、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所および鹿児島森林管理署には、測量時の道路通行に際してお世話になりました。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」における「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（課題番号1809）」の支援を受けました。

参考文献

- 井口正人（2013）：桜島火山の噴火活動－2012年7月～2013年6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24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・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・堀田耕平（2013）：桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測－2012年～2013年－，「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24年度報告書，pp. 49-54.
- 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.
- 佐々憲三（1956）：地震予知に関する2, 3の問題（II）

- (地殻変動観測について), 京都大学防災研究所設立記念論文集, pp. 3-7.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鉄朗・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・高山鉄朗・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・高山鉄朗・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・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫・大倉敬宏・横尾亮彦・吉川 慎・井上寛之・諏訪博之・松島 健・藤田詩織・神薊めぐみ (2013): 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—, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp. 187-195.
- 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.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S. and Nakao, S. (2013): Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 58, pp. 115-135.
- 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: 2014年6月11日)