

桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測 2010年～2011年

井口正人*・太田雄策**・中尾 茂**
園田忠臣*・高山鐵朗*・市川信夫*

* 京都大学防災研究所

* 東北大学大学院理学研究科

* 鹿児島大学大学院理工学研究科

要 旨

GPS連続観測および高密度繰り返し観測により、昭和火口噴火再開以降の地盤変動の時空間分布を明らかにした。2009年10月から2010年3月に東西測線において1cm、南北測線において2cmの急速な伸長が検出された。2010年4月以降、南北測線は1cm前後の収縮、伸長、収縮を繰り返した。2009年10月から2010年3月の変動を引き起こした圧力源は始良カルデラの中央部の深さ12kmおよび北岳の直下6kmに求められた。体積増加量はそれぞれ、 $7.5 \times 10^6 \text{m}^3$ および $3.3 \times 10^5 \text{m}^3$ と求められた。

キーワード：桜島，始良カルデラ，GPS，地盤変動

1. はじめに

1993年ごろから始良カルデラ周辺の地盤は沈降もしくは停滞の状態（江頭・中村，1986；江頭，1989）から隆起に転じたことが水準測量により知られており（江頭・他，1997），その隆起は依然として継続中である（山本・他，2008）。上下変動に加え、水平変動においても始良カルデラ・桜島北部を中心とする地盤の膨張がGPS観測によって検出されている（井口・他，2008）。1996年から2007年までの水平変動に茂木モデルを適用して圧力源の深さは11kmに、体積変化量は $8 \times 10^7 \text{m}^3$ と求められている（井口・他，2008）。圧力源の位置や体積変化量は水準測量に基づく上下変動量から推定される量（山本・他，2008）とほぼ同じであり、この位置と深さはこれまでに求められている始良カルデラの膨張期における圧力源の位置（江頭・他，1997）ともほぼ一致している。

桜島の昭和火口では2006年6月に58年ぶりとなる噴火活動が再開したが、噴火再開から2009年9月までは桜島の東西測線において緩やかな伸長がみられただけであったが、2009年12月ごろから2010年3月にか

けて東西測線において1cm、南北測線において2cmの急速な伸長が検出された（井口・他，2010）。

本稿では、2010年4月から2011年7月までのGPS連続観測に基づく地盤変動とGPS稠密繰り返し観測から求められた圧力源の位置とその体積の時間変化について述べる。

2. 観測

2007年以降のGPSの連続および繰り返し観測点の位置をFig.1に示す。桜島島内の連続観測点にはいずれも2周波のGPS受信機（Leica AX1200, GMX902, GNSS1200+）が設置されており、サンプリング間隔はすべて1秒である（井口・他，2010）。始良カルデラ周辺の連続観測点YOSG, ONEG, KAIG, MAKI, YOSIの受信機は2010年6月から9月にLeica SR299/399EからGMX902GGに更新し、サンプリング間隔を1秒とした。

Fig.2にこれまでの繰り返し観測の実施時期を最近の爆発回数、A型地震の発生回数と併せて示した。南岳における爆発回数は2003年以降、年間10回以下と著しく減少したが、2006年に昭和火口において58年

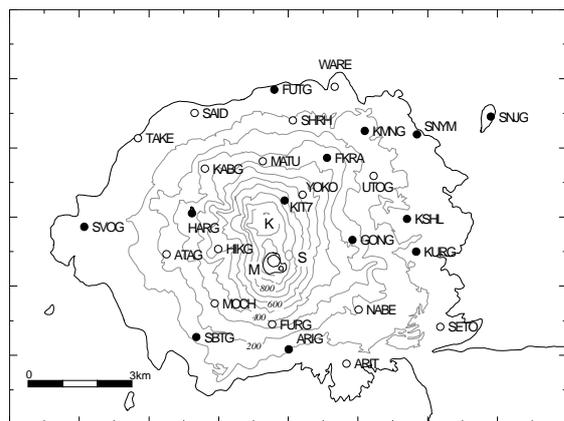
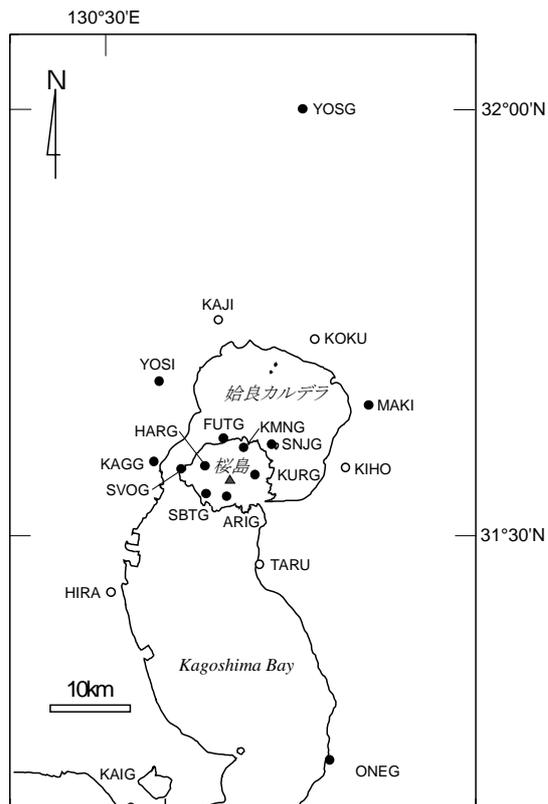


Fig. 1 Location of GPS stations and benchmarks. Dots and open circles indicate continuous GPS stations and benchmarks for campaigns, respectively. Top: GPS network around Aira caldera. Bottom: Sakurajima network.

ぶりとなる噴火活動が再開し、2009年10月以降、爆発発生頻度が急増している。一方、A型地震は2003年から2004年にかけて発生頻度が増加したが、昭和火口の噴火活動再開後は、2010年7月を除いて10回/月以下と少ない。繰り返し観測は1996年12月の初回の観測（第8回桜島火山の集中総合観測；井口・他，1998）からほぼ1年おきの冬季に実施してきた。

最後の繰り返し観測は2009年11月であるが、2009

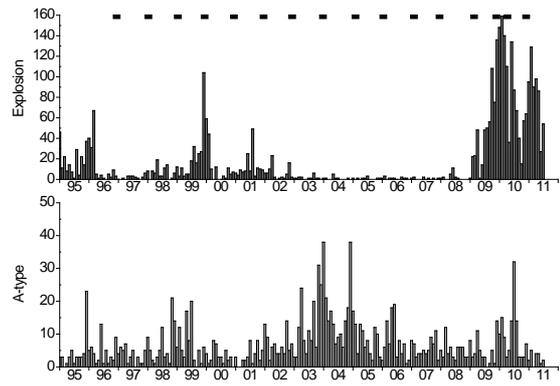


Fig. 2 Campaign period of GPS measurement and activity of Sakurajima volcano. Campaign periods are shown by bars at the top. Activity of the volcano is indicated by monthly numbers of explosion and A-type earthquake. Most of explosive eruptions occurred at Showa crater after 2008. Numbers until July 2011 are plotted.

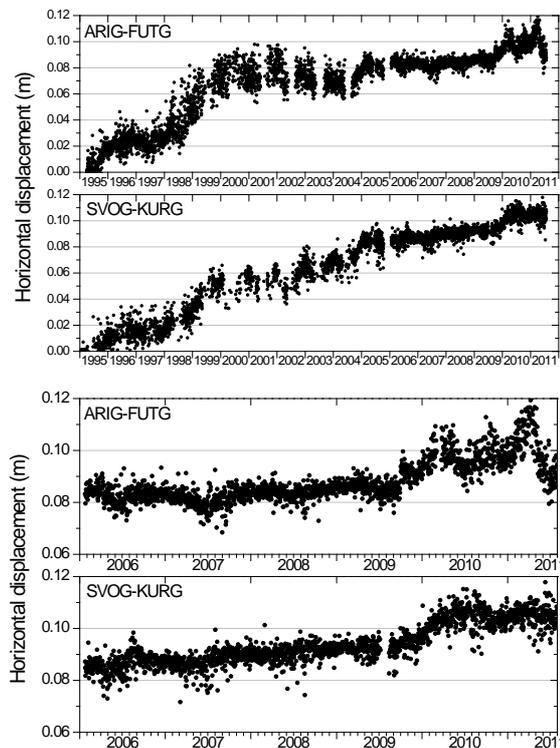


Fig. 3 Daily horizontal displacements along north-east baseline between ARIG and FUTG and east-west baseline between SVOG and KURG. Lower figure is enlargement after 2006.

年12月～2010年3月に東西および南北測線が急速に伸びたため2010年4月～5月にも臨時の繰り返し観測を行った（井口・他，2010）。2010年11月29日～12月2日の観測は例年冬季に実施している観測の繰り返し

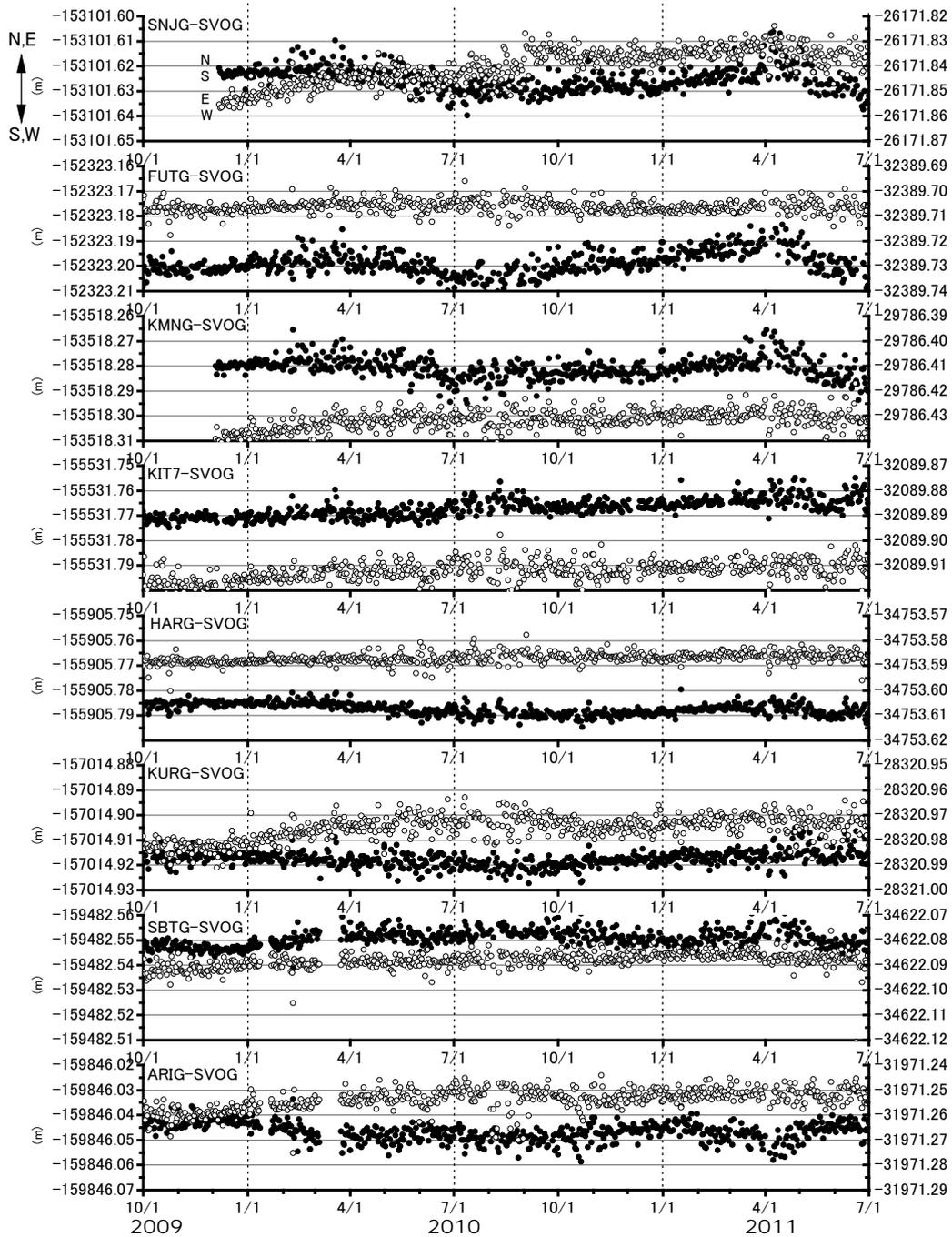


Fig. 4 Temporal change of location of GPS stations referred station SVOG. Dots and open circles represent north-south and east-west components in local Cartesian coordinate system, respectively. Origin of the Cartesian coordinate is located at 33°N and 131°E.

返しである。観測に使用した受信機は、Leica AX1200, Leica GNSS1200+, SR530, Trimble NetRSである。観測時間は60時間以上であり、サンプリング間隔は1秒とした。また、記録されたデータはRINEX形式に変換し、Leica GeoOfficeバージョン7.0を用いて基線解析を行った。

3. 連続観測による地盤変動の概要

Fig.3に桜島島内の東西および南北の基線における1995年以降の水平距離の日々の値を示す。東西の基線は桜島の東部のKURGと西部のSVOGからなり、南北の基線は南部のARIGと北部のFUTGである。東西の水平距離は約9546m、南北は約7525mである。Fig.3

に示した結果は自動解析によるものであり、1995年から2005年5月までは mono SKI ver1~2, 2005年6月

~2009年9月はRTD ver 3.0と3.5, 2009年10月以降は Spider ver 3.2.3により解析された。アルマナックは放送暦である。

1995年から2011年7月までに東西の基線は約11cm, 南北の基線も約11cm伸びた。最も、変動量が大きかったのは1997年11月から1999年10月までの期間であり、南北に約5cm, 東西に約4cmの変動がみられた。また、2004年10月から2005年2月にかけても顕著な変化が検出された。

昭和火口における噴火活動が再開した2006年から2010年にかけての東西および南北測線における水平距離の時間変化をFig.3に拡大して示す。2009年10月ごろから南北測線において伸張が見え始め、引き続き、2010年1月からは東西測線においても変化が見られるようになった。2009年12月から2010年3月にかけての増加量は東西基線で約1cm, 南北基線で約2cmである。その後、2010年5月から7月にかけて南北測線は0.8cm収縮した。2010年12月から2011年3月には1.0cm伸張, 2011年4月以降は再び収縮を示し、収縮量は7月までに1.4cmに達した。一方、2010年3月以降、東西測線の変化0.5cm以下にとどまっている。

Fig.4に桜島島内の代表的な観測点のSVOGを固定

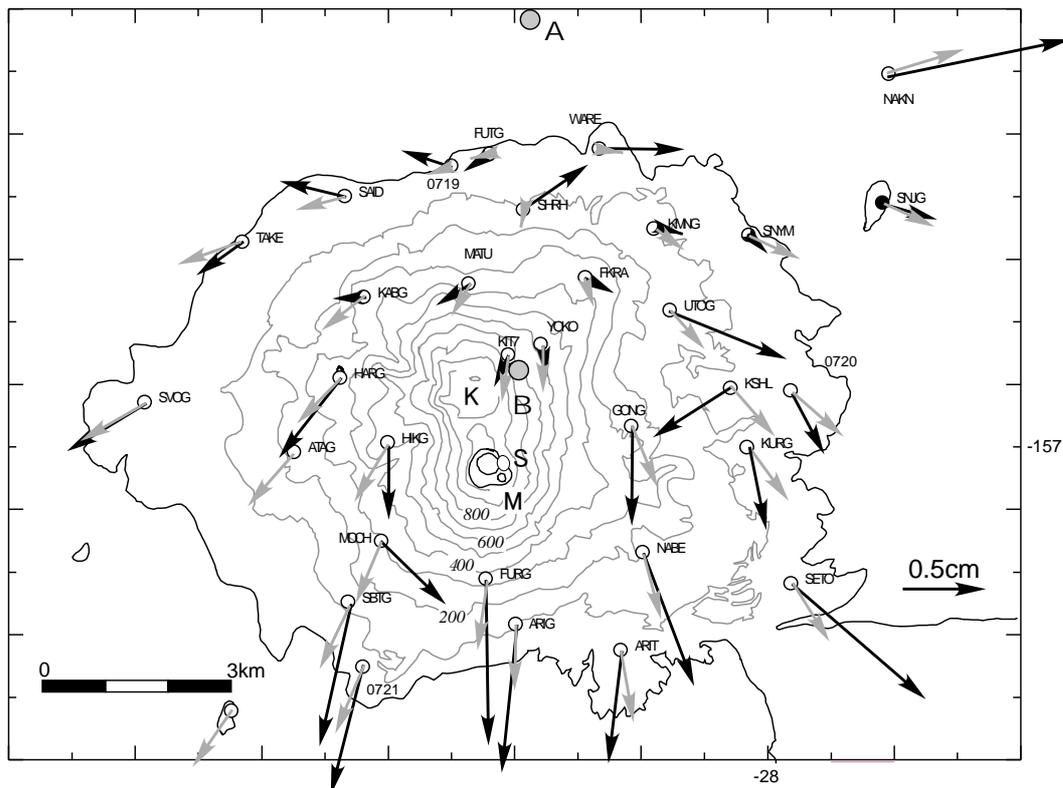
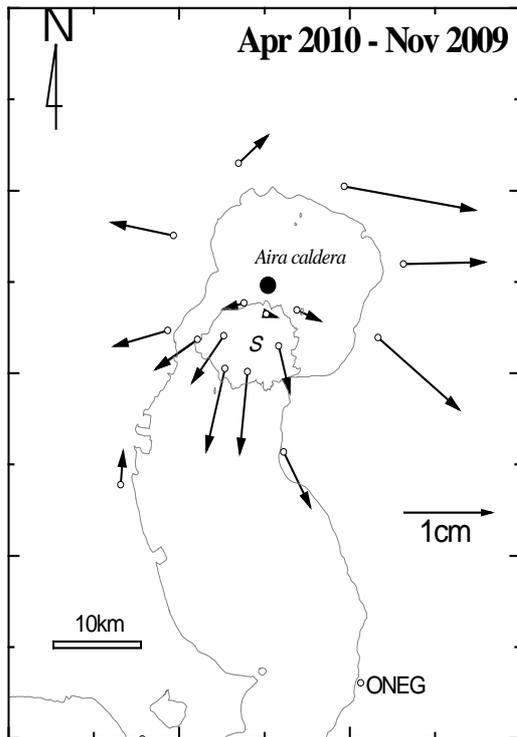


Fig. 5. Vectors of horizontal displacement around Aira caldera (top) and in Sakurajima (bottom). Horizontal displacement vectors are shown by arrows and the displacements are obtained by fixing the station ONEG. Top: Central cones of Sakurajima is indicated by "S". Dot is pressure source. Bottom: Black arrows are observed horizontal displacements and gray ones are obtained by assuming two pressure sources "A" and "B". Symbols "M", "K" and "S" indicate craters Minamidake, Kitadake and Showa, respectively.

した時の水平変位を示す。最も大きい変位を示した2009年終わりから2010年3月まででは、桜島北部の観測点SNJG, FUTG, KMNG, KIT7において北東向きの変位が、南部 (SBTG, ARIG) において南東向きの変位が観測された。また、東部のKURGは東向きの変位が卓越していることが分かる。

2010年4月～8月では桜島北部の観測点SNJG, FUTG, KMNG, KIT7にのみ変動がみられる。SNJG, FUTG, KMNGは南向きであるが、KIT7はやや北向きを示した。桜島北部における収縮と考えられる。

2010年12月以降については、桜島北部の観測点SNJG, FUTG, KMNGにおいて2010年12月から2011年3月にかけて北向きの変位がみられ、4月以降は反転して1cmを超える南向きに変わった。変位量は小さいが、同様のパターンはKIT7およびHARG観測点でも見られる。一方、桜島南部にあるARIGでは2010年12月から2011年3月にかけて南向き、4月以降は北向きとなり、北部にある観測点とは逆の動きを示した。東部にある観測点KURGには顕著な変化が見られなかった。2009年終わりから2010年3月までの最大の変動と比較すると、東西成分に大きな変化はみられず、南北成分が卓越していること、桜島北部の観測点の変動が大きいことが指摘できる。

4. 繰り返し観測結果

Fig.5に2009年11月から2010年4月までの期間において観測された連続観測点および繰り返し観測点における水平変位ベクトルを示す。桜島の山頂から40 km離れた大隅半島のONEGを固定として示してある。始良カルデラ周辺では始良カルデラ中央部を中心として外向きの放射状の水平変位ベクトルが得られた。このパターンは1996年から2007年のパターン (井口・他, 2008) と同様であり、始良カルデラ下の圧力源の体積膨張が推定される。桜島島内では (Fig.5 下図), 水平変動量は北部で小さく、南部で大きいことが分かる。また、ベクトルの方向は南北成分では南向きを示すが、東西成分では東部において東向き、西部において西向きを示す。これらの変位特性からこれまでと同様に始良カルデラの中央部に圧力源が存在することが推定できる。茂木モデルを水平変動に適用し、グリッドサーチにより圧力源の位置を求めたところ、Fig.5のAの位置の深さ12kmに求めることができた。また、体積増加量は $7.5 \times 10^6 \text{m}^3$ と計算された。この位置の圧力源は地盤変動を概略説明できるが、理論値が系統的に北部において大きく、南部において小さい。

これを補うために桜島島内に付加的な圧力源を置くことにし、グリッドサーチによりその位置と体積

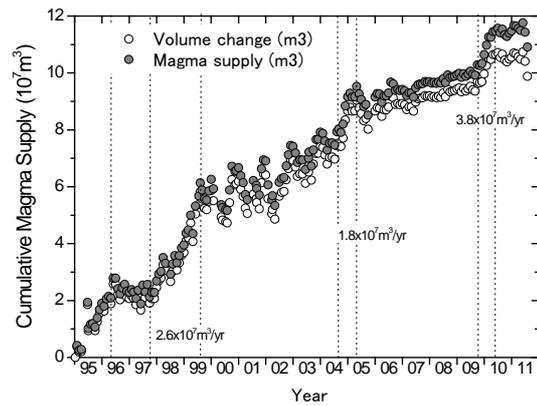


Fig. 6 Temporal volume change of magma reservoir beneath Aira caldera and Cumulative magma supply to the reservoir

変化を求めた。付加的な圧力源は、始良カルデラ中央部に位置する圧力源Aの膨張による南向きの水平変動を桜島北部において打ち消し、南部において増加させるものでなければならず、桜島の中央火口丘下に位置するはずである。結果として、付加的な圧力源は、北岳のほぼ直下の深さ6kmに求められ (Fig. 5下図のB), 体積増加量として $3.3 \times 10^5 \text{m}^3$ が得られた。

5. 議論

Fig.5に示す水平変動パターンから2009年11月から2010年4月までの地盤変動を励起した力源の位置は始良カルデラの中央部付近と桜島北部にあることが推定される。始良カルデラの中央部は桜島の地盤の隆起期における上下変動を励起する力源の位置する場所である (江頭・他, 1997)。また、GPSによる1997年～1999年, 1997年～2007年の水平変動の力源の位置も同様の場所に求められている (Kriswati et al., 2003; 井口・他, 2008)。圧力源Aの体積変化はBよりも20倍大きく、この期間の地盤変動は主として始良カルデラの中央部に位置する力源により励起されたと考えられる。

始良カルデラの中央部の圧力源に加えて、北岳の直下にも圧力源Bが推定された。桜島島内の膨張率が最も大きかったのは、2009年10月頃から2010年3月頃にかけてである (Fig.3)。この時期には桜島島内の傾斜計で中央火口丘方向の地盤の隆起と伸張ひずみが最も早く進行した時期である (井口, 2011, 本報告)。また、時期は異なるが、2010年11月～2011年2月の隆起・膨張を引き起こした圧力源の位置は傾斜ベクトルの交点の位置から北岳の直下にあると推定されている (井口, 2011, 本報告)。GPS観測によって得られた水平変位の分布から得られた圧力源の

位置 (Fig.5下図のB) と傾斜ベクトルの方向から得られた圧力源は、その決定精度のあいまいさを考慮すると同じものであると考えた方が妥当であり、桜島島内の圧力源は北岳付近に存在することになる。2009年10月から2010年3月までのハルタ山観測坑道におけるひずみ変化量は南岳火口方向において 1.2×10^{-6} 、直交方向において 0.7×10^{-6} である。始良カルデラ中央部の深さ12kmにある圧力源の $7.5 \times 10^6 \text{m}^3$ の体積膨張によるハルタ山観測坑道におけるひずみ変化は火口方向において 0.76×10^{-6} 、直交方向において 0.33×10^{-6} と見積もられるので、ハルタ山において観測されたひずみ変化の約半分は始良カルデラ中央部の深さ12kmにある圧力源の膨張により引き起こされたものであり、残り半分が北岳付近の地下の圧力源の膨張により引き起こされたことになる。

桜島の北岳付近の地下に副力源を考慮するにしても主たる力源はこれまでと同様に始良カルデラの中央部に位置していると考えられる。そこで、Fig.3に示した東西測線における1995年から2011年7月までの1日毎の水平変位量からこの力源の体積変化量の推移を見積もってみた。1996年から2007年までの水平変位量から圧力源の位置は始良カルデラ中央部の深さ11kmに求められ、桜島を東西に横切る測線SVOG-KURGの相対的水平変位量 (Δh) と体積変化量 (ΔV) には

$$\Delta V = 9.64 \times 10^8 \Delta h$$

となる関係があることになる (井口・他, 2008)。1995年から2011年7月までの期間における圧力源の体積変化量および火山灰放出量を考慮したマグマの供給量をFig.6に示した。1995年から2011年7月までの約16年間で $10.4 \times 10^7 \text{m}^3$ の体積増加が見積られ、火山灰放出量を考慮したマグマの供給量としては $11.8 \times 10^7 \text{m}^3$ となる。年間平均値は $0.72 \times 10^7 \text{m}^3$ となり、これまでに見積もられているマグマの供給率 $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ (Ishihara, 1981) とほぼ同等かやや少ない。これまで知られている水平変位速度の大きい時期; 1997年11月から1999年10月までおよび2004年10月から2005年2月までのマグマの供給率はそれぞれ、 $2.6 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ と $1.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ であり、平均的なマグマ供給率に比べ2倍程度大きい。2010年1月から3月までの地盤変動ではそれに対応するマグマ供給率は $3.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ となり、1995年から2011年までの平均供給率の5倍程度、南岳活動期のマグマの供給率 $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ (Ishihara, 1981) と比べても4倍弱速い。始良カルデラ中央部に位置する力源Aの膨張に加え、北岳の直下の圧力源Bも同時に膨張したため、見かけ上供給率が大きく見積もられた可能性もある。

5. まとめ

桜島におけるGPS連続観測によって2009年終わりごろから2010年3月までに2006年6月の昭和火口噴火活動再開以降で最も大きい地盤変動が検出された。この地盤変動の変動量そのものは大きくないが、変動速度は過去の南岳活動期よりも大きい。また、高密度繰り返し観測の結果を合わせることでこの期間の水平地盤変動の空間分布が明らかとなった。この地盤変動を引き起こした主圧力源は桜島北岸から始良カルデラの中央部にあるが、副力源が桜島の北部から北東部にある可能性が指摘できる。

謝 辞

GPS繰り返し観測は鹿児島県土地家屋調査士会鹿児島支部、鹿児島県公共嘱託土地家屋調査士協会鹿児島支所、かごしま青年土地家屋調査士会の会員の皆様にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。また、GPS基準点の新設および既設基準点の使用につきましては以下の方々にお世話になりました。鹿児島市役所安心安全課、同道路整備課、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所、鹿児島森林管理署、鹿児島県教育委員会、鹿児島県立青少年研修センター総務課、鹿児島県立福山高等学校、鹿児島県立錦江湾高等学校、加治木町教育委員会および同町立永原小学校、霧島市役所都市計画課、輝北町役場総務課、名古屋大学太陽地球環境研究所附属鹿児島観測所。火山灰重量は鹿児島県のデータによるものである。また、桜島島内にある国土地理院の電子基準点のデータを使用した。本研究の実施には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)」を使用した。

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 (本報告書) .
- 井口正人・高山鉄朗・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.53-61.
- 井口正人・植木貞人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫 (2010) : 桜島昭和火口噴火開

- 始以降のGPS観測, 「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21年度報告書, pp.47-53.
- 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・中村貞美 (1986) : 桜島火山周辺における地盤変動—1974年-1982年—, 第5回桜島火山の集中総合観測 (昭和57年10月-12月), pp.11-21.
- 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 (1997) : 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.
- 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) 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.
- 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.
- Ishihara, K. (1981) : A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic material ejected, Abstract, 1981 IAVCEI Symposium -Arc Volcanism-, p. 143.
- 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.

GPS Observation after the Beginning of Eruptive Activity at Showa Crater of Sakurajima Volcano in 2010 and 2011

Masato IGUCHI*, Yusaku OHTA**, Shigeru NAKAO***
Tadaomi SONODA*, Tetsuro TAKAYAMA* and Nobuo ICHIKAWA*

* Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

** Graduate School of Science, Tohoku University

*** Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

Synopsis

Temporal and spatial distribution of horizontal displacements are investigated by continuous GPS observation and campaigns with high density network after the beginning of resume of the eruptivity at the Showa crater of Sakurajima volcano. Rapid extension was detected during the period from October 2009 to March 2010. East-west and north-south baselines showed extension by 1 cm and 2 cm, respectively. After the significant deformation, the north-south baseline showed contraction, extension and contraction during the period from April 2010 to July 2011. The ground deformation during the period from October 2009 to March 2010 was caused by two pressure sources at a depth around 12 km beneath the center of the Aira caldera and at a depth of 6 km beneath the Kitadake cone. Increases in volume are estimated to be $7.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $3.3 \times 10^5 \text{ m}^3$, respectively.

Keywords: Sakurajima volcano, Aira caldera, GPS, ground deformation