

桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測 —2011年～2012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の連続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。2010年11月から2011年11月までの桜島島内の地盤変動は南北方向の伸長が卓越しており、北岳の直下の深さ5kmに位置し、東西方向に走向をもつ鉛直開口割れ目の膨張により説明できる。2011年8月から11月にかけて南北方向への伸長が顕著であったが、11月から2012年3月までは東西方向への伸長となった。

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, 20012)。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

伸長が検出された(井口・他, 2010)。この地盤変動を引き起こした主圧力源は始良カルデラの中央部の深さ12kmに、また副力源が北岳の直下6kmに求められた(井口・他, 2011)。

本稿では、2011年7月から2012年6月までのGPS連続観測に基づく地盤変動の特徴と2011年11月に実施したGPS稠密繰り返し観測から求められた地盤変動パターンの特徴とそれを励起した圧力源について述べる。

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。桜島島内および始良カルデラ周辺の連続観測点にはいずれも2周波のGPS受信機(Leica AX1200, GMX902, GMX902GG, 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; 2011)。

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年ぶりとなる噴火活動が再開し、2009年10月以降、爆

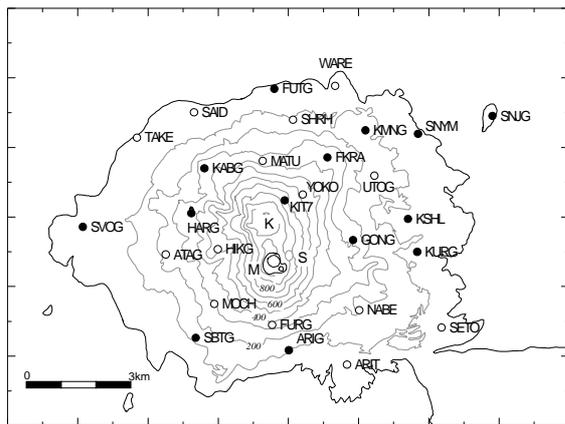
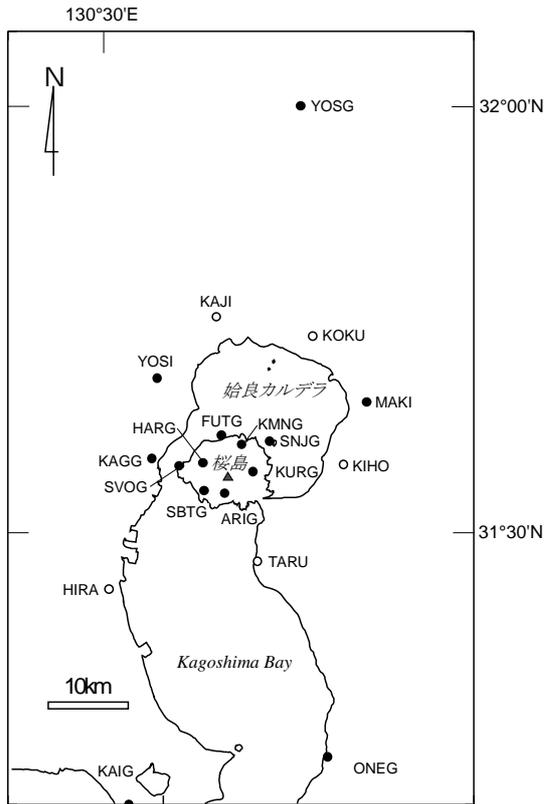


Fig. 1 Location of GPS stations and benchmarks. Dots and open circles indicate continuous GPS stations and benchmarks for campaigns, respectively. Top: GPS network around Aira caldera. Bottom: Sakurajima network.

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2010年11月であり、その1年後の2011年11月28日～12月1日に観測を行った。観

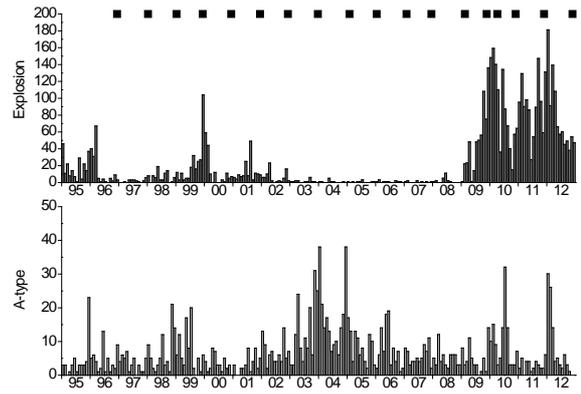


Fig. 2 Campaign periods of GPS measurement and activity of the Sakurajima volcano. Campaign periods are shown by bars at the top. Activity of the volcano is indicated by monthly numbers of explosion and A-type earthquake. Most of explosive eruptions occurred at the Showa crater after 2008. Numbers until December 2012 are plotted.

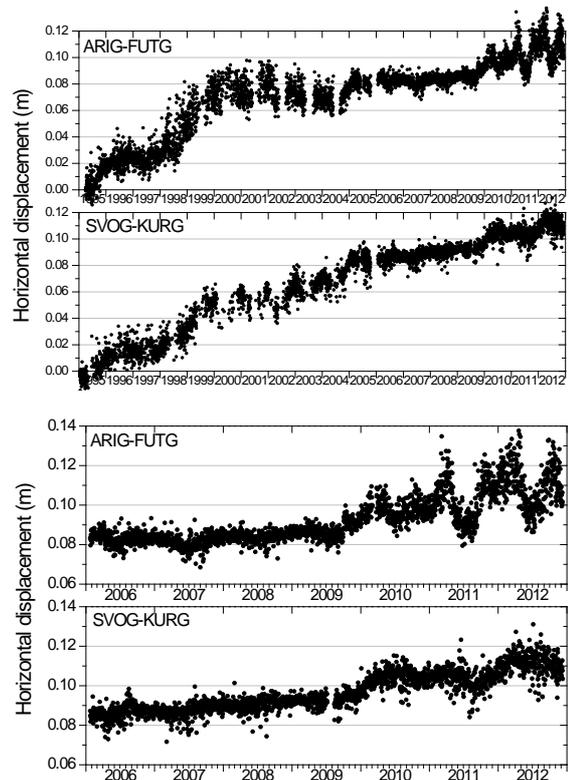


Fig. 3 Daily horizontal displacements along north-east baseline between ARIG and FUTG and east-west baseline between SVOG and KURG. Lower figure is enlargement after 2006.

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、サンプリング間隔は1秒である。また、記録されたデータはRINEX形式に変換し、Leica

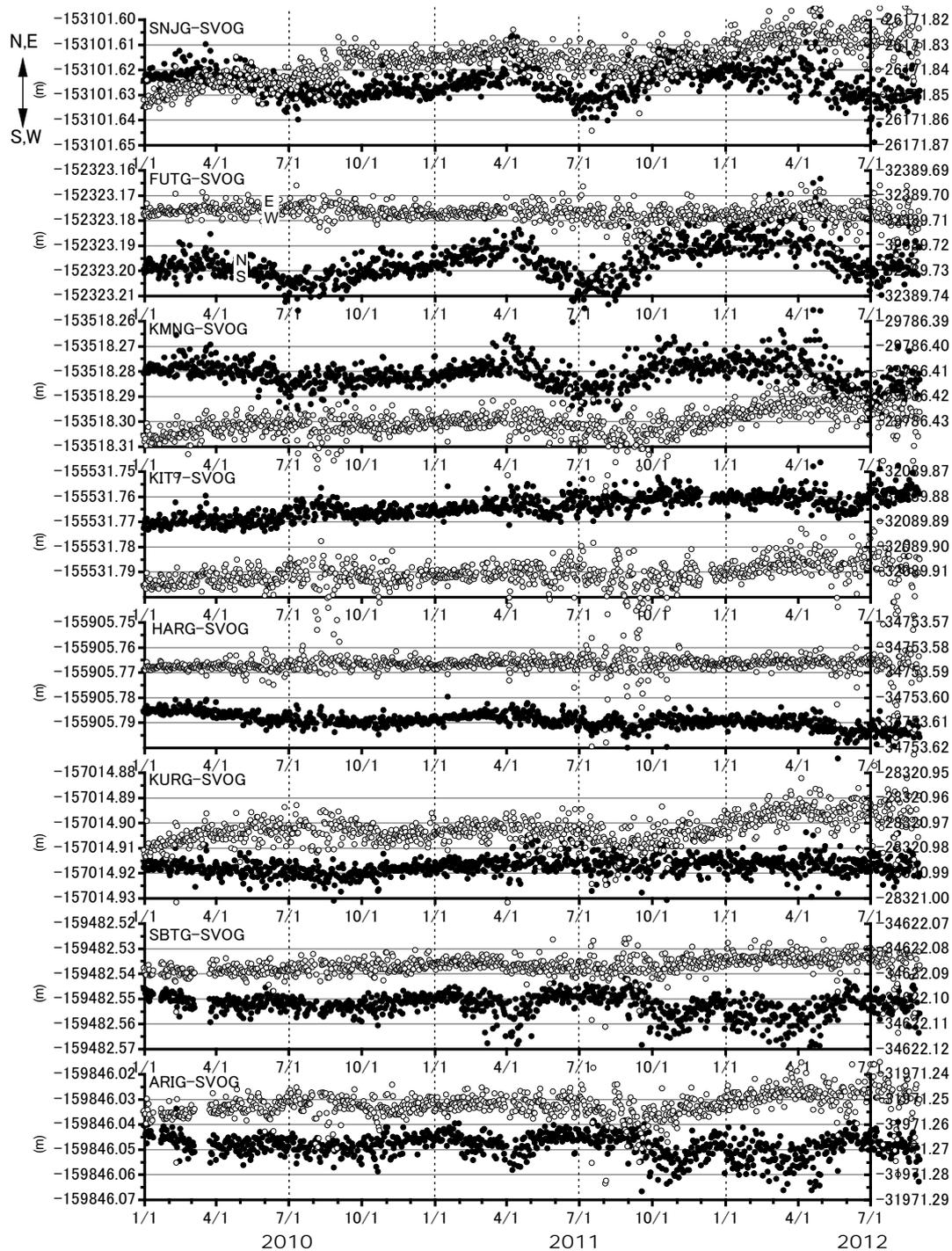


Fig. 4 Temporal change of location of GPS stations referred station SVOG. Dots and open circles represent north-south and east-west components, respectively, in local Cartesian coordinate system. Origin of the Cartesian coordinate is located at 33°N and 131°E.

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1995年以降の桜島島内の東西および南北の水平基線長の日々の値の変化を示す。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 ver.1~2, 2005年6月~2009年9月はRTD ver. 3.0と3.5, 2009年10月以降は

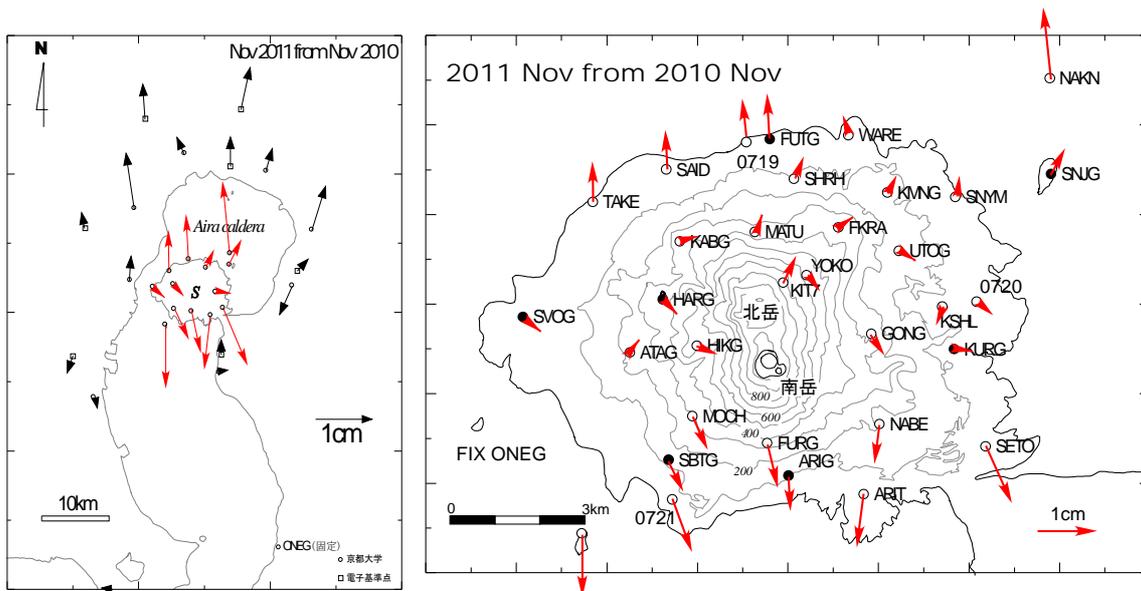


Fig. 5 Temporal volume change of magma reservoir beneath the Aira caldera and cumulative magma supply to the reservoir

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2012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2012年まで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、東西測線の変化量は0.5cm以下にとどまっている。

2011年8～9月から11月にかけて南北測線は急速に2.5cm膨張した。東西測線においても2012年3月までに1.6cmの伸張が観測された。2012年3月以降、東西測線には大きな変化がなかったが、南北測線は6月まで収縮を続け、収縮量は2.7cmに達した。

Fig.4に桜島島内の代表的な観測点の水平変位を示す。桜島西部のSVOGを固定した。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変位が観測されたのは2009年10月頃から2010年3月までであり、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た。

2011年8月から桜島北部の観測点SNJG, FUTG, KMNGにおいて北向きの変動が現れ始め、10月までで約2cmに達した。南部のSBTGとARIGでは9月ごろから南向きの変動がみられ、11月までに約1cmに達した。中央火口丘に近いKIT7とHARGでは大きな変化は見られなかった。2011年8月から11月は南北方向に割れる変位が卓越する時期であった。

桜島の東部のKURGでは8月頃から東向きの変位が観測された。この変位は2012年3月まで続き、変位量は1.8cmとなった。2011年8月から始まった桜島北部の観測点の北向きの変位と南部の観測点の南向きの変位は2011年11月頃に停止し、2011年11月から2012年3月までは、北東部のSNJG, KMNG, 南東部のARIGは東向きの変位を示したので、桜島東部の観測点が相対的に東へ変位したことになる。

2012年4月にKURGの東進は停止した。4月から7月までは、桜島北部の観測点は南向きへ、南部の観測点は北向きに変位しており、この時期は桜島が南北方向に収縮した時期といえる。この変位パターンは2010年と2011年の4月から7月頃の変動とよく似ている。

4. 繰り返し観測結果

これまでと同様に11月にFig.1に示した観測点において繰り返し観測を実施した結果に基づく、Fig.5に2010年11月から2011年11月までの期間に観測された

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した。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。1996年から2007年ま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(井口・他, 2008), この変位パターンは, 2009年11月から2010年4月までの膨張速度の速い時期にも観測された(井口・他, 2011)。2010年11月から2011年11月までの期間の変位パターンはこれらとは異なり, 桜島の中央火口丘から北の観測点は北へ, 南の観測点は南へ変位しており, 南北方向への伸長が卓越している。

この変位パターンについて球状圧力源 (Mogi, 1958) を適用するのは妥当ではなく, 開口割れ目モデル (Okada, 1985) を適用するのが適切であると考えられる。そこで, 開口割れ目モデルを桜島島内の水平変動に適用し, グリッドサーチにより開口割れ目の位置, 上端の深さ, 割れ目の長さ, dip角およびstrike方向を求めた。開口割れ目は北岳直下を通るN80°の走向をもつ垂直の割れ目である。また, 割れ目の上端の深さは5kmと求められた。割れ目の長さは数キロメートル以上であるが, 十分な精度で拘束することができなかった。始良カルデラ全体の変位についても南北方向の伸長が卓越しており, 始良カルデラ中央部を中心とする放射状の水平変位ベクトルではないので, 始良カルデラの中央部に位置する開口割れ目で説明できるものと思われる。

5. 議論

Fig.5に示す水平変動パターンから2010年11月から2011年11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, 2009年~2010年の水平変動の力源の位置も同様の場所に求められており, 球状圧力源により説明可能な変動であった(Kriswati et al., 2003; 井口・他, 2008; 井口・他, 2011)。一方, 2010年11月から2011年11月までの変動は等方的ではなく, 南北方向の伸長が卓越しているところに特徴がある。

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が推定された。この北岳下の圧力源は, 2009年10月から2010年3月においては等方的であったが(井口・他, 2011), 2010年11月から2011年11月までの変動は南北方向への伸長が卓越しており, 開口割れ目で近似される。

桜島の北岳付近の地下に副力源を考慮するにして

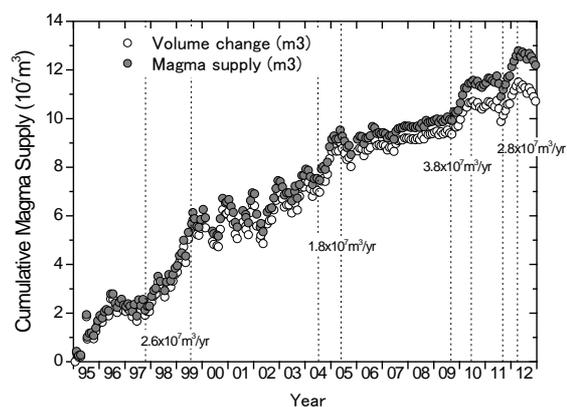


Fig. 6 Temporal volume change of magma reservoir beneath the Aira caldera and cumulative magma supply to the reservoir

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2012年までの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(井口・他, 2008)。2007年以降にもこの関係が成り立つものとして, 2012年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2012年の18年間で $11.5 \times 10^7 \text{m}^3$ 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 $12.7 \times 10^7 \text{m}^3$ となる。年間平均値は $0.73 \times 10^7 \text{m}^3$ 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) よりやや少ない。1995年から2005年までのマグマ供給率は $0.9 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ であり, 平均的なマグマ供給率と同等であるが, 2005年から2009年前半までのマグマの供給率が $0.3 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ と大きく減少したためである。一方, 時期によって変化が大きい, 2009年後半以降の平均的なマグマ供給率は $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ 程度であり, 始良カルデラにおける平均的なマグマ供給率に戻っている。

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, 2004年10月から2005年2月までおよび2009年12月から2010年3月のマグマの供給率は平均的なマグマ供給率に比べ2~4倍程度大きい, 2011年11月から2012年3月までの地盤変動でもそれに対応するマグマ供給率は $2.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ となり, 1995年から2012年までの平均供給率の4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3倍弱速い。始良カルデラ中央部に位置する力源の膨張に加え、北岳の直下の圧力源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がある。

5. まとめ

2010年11月から2011年11月までの地盤変動は南北方向の伸長が卓越し、桜島の北岳直下深さ5kmにある東西方向の開口割れ目の膨張が推定された。それに続く2011年11月から2012年3月までの期間では、東西方向の伸長が卓越する地盤変動が観測された。地盤変動速度だけでなく、時期によって変動パターンが変化することが指摘できる。

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.
井口正人(2012): 桜島火山の噴火活動—2011年7~2012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23年度報告書(本報告)。

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.53-61.

井口正人・植木貞人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鐵朗・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.

井口正人・植木貞人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫(2011): 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22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.

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.

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.
Okada, Y. (1985) Surface deformation due to shear and

tensile faults in a half-space, Bull. Seis. Soc. Am.,
Vol.75, pp.1135-1154.

GPS Observation after the Beginning of Eruptive Activity at Showa Crater of Sakurajima Volcano in 2011 and 2012

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. Extension in the north-south direction was dominant during the period from November 2010 to November 2011. The ground deformation could be modeled by a vertical tensile fault striking in the east-west direction, located at a depth of 5 km beneath the Kitadake cone. Following inflation was dominated by an extension in the east-west direction during the period from November 2011 to March 2012.

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