桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測

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*

* 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

桜島火山では2006年6月に58年ぶりとなる噴火活動が再開した。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。 2006年6月から2009年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年の終わりごろから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。この変動を引き起こした力源は桜島の北岸から姶良 カルデラの中心部に位置すると推定されるが,副力源が桜島北部に存在する可能性もある。

キーワード: 桜島, 姶良カルデラ, GPS, 地盤変動

1. はじめに

桜島南岳山頂火口における爆発的噴火活動が活発 であった1974年から1992年には、桜島北部および始 良カルデラ周辺の地盤は, 沈降もしくは停滞状態を 示していたが(江頭・中村, 1986;江頭, 1989), 1992~1993年頃から隆起に転じ、姶良カルデラ中央 部の深さ10km付近においてマグマの再蓄積が始ま ったことが1996年集中総合観測において実施された 水準測量により指摘されている(江頭・他, 1997)。 桜島北部および姶良カルデラ周辺地盤の隆起はその 後も継続中である(山本・他, 2008)。上下変動に 加え、水平変動においても姶良カルデラ・桜島北部 を中心とする地盤の膨張が1995年に整備されたGPS 観測網(Kamo et al., 1997)によって検出されている。 地盤の膨張期と停滞期は交互に繰り返されており, 膨張速度が速かった時期は1997年11月から1999年10 月までと2004年10月から2005年2月までの時期であ った。この2つの変動速度の速い時期を含む1996年か ら2007年までの水平変動は姶良カルデラの中央部を 中心として外向きに放射状のパターンを示し、茂木 モデルを仮定した場合の圧力源の深さは11km,体積

変化量は8×10⁷m³となり,姶良カルデラ下へのマグ マの供給率は800万m³/年である(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 ている姶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。

2007年の集中総合観測(井口・他,2008)ではこ れまでに設置された繰り返し点(井口・他,1998) に加え,桜島島内に高密度繰り返し観測点を増設し, 京都大学防災研究所は,その1年後に再測を行った。 2009年から始まっ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「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」では, 桜島の北東部に連続観測点を順次増設するとともに, 繰り返し観測を実施した。本稿では,昭和火口噴火 が再開した2006年6月以降の桜島及び姶良カルデラ 周辺の地盤変動の特徴とその地盤変動を引き起こし た圧力源,さらにGPS連続観測から推定される姶良 カルデラ下へのマグマ供給率の時間変化について述 べる。



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.

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KAGG観測点で は1995年にGPS連続観測用に設置された受信機Leica SR299Eは2005年6月にAX1200に更新した。また, 2006年4月には桜島北部のKMNGとSNJGに観測点を



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.



Fig. 3 Daily horizontal displacements. Upper and lower figures indicate changes of horizontal distances of north-east baseline between ARIG and FUTG and east-west baseline between SVOG and KURG, respectively.

新設し, Leica GMX902を設置した。さらに,2009年 8月にはGONGとKIT7に,2009年11月にはKSHL, SNYM, FKRAにLeica GNSS1200+を増設し,連続観 測網を強化した。サンプリング間隔はすべて1秒で ある。姶良カルデラ周辺のYOSG,ONEG,KAIG, MAKI,YOSIではLeica SR299/399Eを使用しサンプリ ング間隔は15秒である。また,KAJI,KOKU,KIHO と鹿児島湾南部のHIRA,TARUは繰り返し観測点で ある。

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7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



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

ら2004年にかけて発生頻度が増加した。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。

第10回桜島火山の集中総合観測(2007年12月)に おける測量後は、2009年2月、2009年11月、2010年4 月~5月に行った。繰り返し観測に使用した受信機は、 Leica AX1200、Leica GNSS1200+、SR530、Trimble 4000SSIとアンテナTRM23903.00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

桜島における地盤変動の概要を述べるために, Fig.3に桜島島内の東西および南北の基線における



Fig. 5 Horizontal displacement vector during the period from December 2007 to November 2009



Fig. 6 Horizontal displacement vector for 3 months from the end of 2009. The horizontal displacements are referred to SVOG at the western part of the Sakurajima. Horizontal displacements at the continuous observation sites shown by dots were obtained from the data during the period from December 2009 to March 2010. Vectors at the campaign stations were from November 2009 to April 2010.

1995年以降の水平距離の変化を日々の値により示す。 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2010年3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



Fig. 7 Horizontal displacement vector referred to point near the center of Aira caldera (shown by FIX) for 3 months from the end of 2009. Dashed semi-circle indicate distance where maximum horizontal displacements are obtained by assuming Mogi's source located at the "FIX" point.

化が検出された。

昭和火口における噴火活動は2006年6月に58年ぶ りに再開したが、2006年6月以降は東西測線において は緩やかな伸長は見られるものの南北測線において は顕著な変動は見られないか、やや収縮傾向にあっ た。ところが、2009年終わりごろから2010年3月にか けて東西基線で1cm、南北基線で約2cmのひずみ速度 の速い伸長が観測された。

Fig.4に2006年以降のSVOGを基準としたときの桜 島島内の連続観測点の南北および東西への水平変位 量を示す。いずれの観測点においても2009年9月以前 は大きな変動は見られない。2009年10月ごろから ARIG, FUTG, KMNG, SBTGなどの観測点において 東方向への変位が始まった。引き続き,2010年1月か ら南北成分にも変化が見られるようになり,FUTG は北へ,ARIG, KMNG,SBTGは南へ変位した。Fig.3 の水平変位は水平2成分の変位を合成したものであ り,2010年1月ごろから顕著となっている。この地盤 変動は2010年4月にはほぼ停止した。

4. 繰り返し観測結果

Fig.5に2007年12月から2009年11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。桜島西部のSVOGを固定として示してある。この期間ではFig.6に示すように水平変動量は小さく、桜島島内のすべての観測点において4mm以下であった。

次に連続観測によって急速な変位がみられた2009 年11月から2010年4月の期間についてFig.6に連続観

測及び繰り返し観測に基づく水平変位ベクトルを示 す。同様にSVOGを固定とした。SVOGに相対的に桜 島北部の点は東北東に,東部の点は東へ,南部の点 は東南東から南東へ変位していることが分かる。 Fig.7に1996年12月から2007年12月の期間の水平変動 量から求めた圧力力源の位置(井口・他, 2008)を 固定点とした水平変位ベクトルを示す。桜島北部の 観測点において変動は小さく5mm以下であった。 NAKNにおいて東方向に変動が大きいが、本観測点 は安永噴火の海底噴火で噴出した島嶼であり、観測 は小型船舶を必要とするために2009年11月の測量に おいて観測時間が不十分であった可能性がある。固 定点から6~7km程度以上離れると変位量は大きく なり、1~2cmであった。変位ベクトルは、桜島の南 西部において南南西を, 南部ではほぼ南を, 南東部 では南南東を示した。

5. 議論

Fig.7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 桜島北部から姶良カルデラの中央部付近であること が推定される。この場所は,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である(江 頭・他,1997)。また,GPSによる1997年以降の水 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)。この期間 の地盤変動は主として桜島北部から姶良カルデラの 中央部に位置する力源により励起されたと考えられ る。

ただし、Fig.7において固定とした点の深さ10kmに 力源があるとすれば、水平変動が最大となるのは距 離7km付近であるが、距離7kmよりも南側で水平変動 が大きくなっており、力源はさらに深い場所にある か、固定点よりも南側に位置する可能性がある。も しくは、姶良カルデラ中央部の膨張力源に加え、桜 島の北~北東部に別の膨張力源を考慮する必要があ るのかも知れない。Hidayati et al. (2007)は桜島南 西部のA型地震の発生と上下変動の空間分布を関連 付け、桜島の北方あるいは北東側から中央火口丘下 を経て南西部へマグマが移動してくるモデルを提唱 しており、2009年以降の昭和火口における噴火活動 期においてもマグマが桜島の北~北東部に供給され、 力源が顕在化してきたことは十分考えうる。

桜島の北部から北東部に移動した力源または副力 源を考慮するにしても主たる力源はこれまでと同様 に桜島の北岸から姶良カルデラの中央部に位置して いると考えられるので, Fig.3に示した東西測線にお ける1995年から2010年3月までの1日毎の水平変位量



Fig. 8 Temporal volume change of magma reservoir beneath Aira caldera and Cumulative magma supply to the reservoir

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 置は姶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(*Δ*h)と体積変化量(*Δ*V)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2010年3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.8に示した。1995年から2010年3月までの 約15年間で10.5×10⁷m³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11.3× 10⁷m³となる。年間平均値は0.74×10⁷m³となり、これ までに見積もられているマグマの供給率1×107m3/年 (Ishihara, 1981)とほぼ同等かやや少ない程度である。 これまでに知られている水平変位速度の大きい時期, すなわち1997年11月から1999年10月までの期間およ び2004年10月から2005年2月までの期間ではマグマ の供給率はそれぞれ、2.6×10⁷m³/年と1.8×10⁷m³/年 となり、平均的なマグマ供給率に比べ2倍程度大きい が、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3.8×107m3/年となり、1995年 から2010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1×10⁷m³/年(Ishihara, 1981)と比 べても4倍弱速い。桜島北岸から姶良カルデラ中央部 に位置する力源の膨張に加え, 桜島の北部から北東 部に位置するより浅い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姶 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・江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・他 (1998):桜島および姶良カルデラ周辺における GPS観測,第9回桜島火山の集中総合観測,pp.39-46. 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 よび姶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.

- 江頭庸夫(1989): 噴火活動に伴う桜島火山および 姶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.
- Kamo, K, Iguchi, M. and Ishihara, K. (1997) : Inflation of volcano Sakurajima detected by automated monitoring system of GPS network, Program manual '97 IUGG IAG International Symposium on Current Crustal Movement and Hazard Reduction in East Asia and South-east Asia November 4-7, 1997, Wuhan, China, p.38
- 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.
- Hidayati, S., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2007): Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira caldera, southern Kyushu, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 52, pp.289-309.

GPS Observation after the Beginning of Eruptive Activity at Showa Crater of Sakurajima Volcano

Masato IGUCHI*, Sadato UEKI**, 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

Eruptive activity at Showa crater of Sakurajima volcano resumed in June 2006 after 58 years dormancy of the crater. Temporal and spatial distribution of horizontal displacements are made clear by continuous GPS observation and campaigns with high density network after the beginning of resume of the eruptivity at the crater. No significant deformation was detected except gradual extension of baseline in the east-west direction before 2009. Rapid extension was detected during the period from January to March 2010. East-west and north-south baselines showed extension by 1 cm and 2 cm, respectively. The ground deformation was caused mainly by deep pressure source at a depth around 10 km at north coast or in the center of Aira caldera. It is possible that additional pressure source at northern part of the volcano affected the ground deformation.

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