

GPS観測から明らかになった桜島のマグマ活動

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***

* 北海道大学大学院理学研究院

** 東北大学大学院理学研究科

*** 鹿児島大学理学部

要 旨

1993年ごろからマグマの蓄積過程にある桜島においてGPSの連続観測および繰り返し観測を行ってきた。1996年から2007年までの繰り返し観測に基づく水平変動は始良カルデラの中央部を中心とする放射状のパターンを示し、茂木モデルを仮定した場合の力源の位置は始良カルデラの中央部の深さ11kmに求められた。マグマの供給量は約9000万 m^3 、平均的なマグマの供給率は690万 m^3 /年となる。1997年11月から1999年10月までと2004年10月から2005年2月までの期間では顕著な膨張が観測され、一時的にマグマの供給率が増加した。

キーワード：桜島火山，地盤変動，GPS，マグマ溜り

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1990年代初めの時期には、桜島および始良カルデラ周辺における地盤は、沈降を示していたが(江頭・中村, 1986; 江頭, 1988; 1989a; 1989b; 1995), 1992~1993年頃から隆起に転じ、始良カルデラ下深さ10km付近においてマグマの再蓄積が始まったことが1996年に実施された水準測量により指摘されている(江頭ら, 1998)。一方, 1995年には桜島島内におけるGPS連続観測網が整備され、始良カルデラ・桜島北部を中心とする地盤の膨張が観測されている(Kamo et al., 1997)。地盤の膨張期と停滞期は交互に繰り返されているが, 1997年11月から1999年10月までの地盤膨張期の圧力源の位置は、始良カルデラの中心に近い桜島北部の深さ8~9kmに求められている(Kriswati and Iguchi, 2003)。京都大学防災研究所火山活動研究センターは1996年に始良カルデラ周辺において繰り返し観測点を設置し、初回の測定を実施した(井口ら, 1998)。それ以降、ほぼ1年おきに測定を繰り返してきた。2007年に行われた第10回桜島火山の集中総合観測ではこれまでに設置した連続観測点と既設繰り返し点に加え、桜島島内に高密度繰り返し観測点を設置し、測定を行っ

た。本稿では、GPS繰り返し観測によって得られた1996年から2007年までの桜島及び始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について述べるとともに、GPS連続観測から推定される始良カルデラ下へのマグマ供給率の時間変化を明らかにする。最後に、最近の火山活動から推定されるマグマの動きと桜島島内における高密度観測網の必要性について述べる。

2. 観測

1996年から2007年までの期間において連続および繰り返しGPS観測を行ってきた観測点の位置をFig. 1に示す。桜島島内およびKAGG観測点では、1995年に設置したGPS受信機Leica SR299Eを2005年6月にAX1200に更新した。また、2006年4月には桜島北部にKMNGとSNJGに観測点を新設し、Leica GMX902を設置した。始良カルデラ周辺のKAJI, KOKU, KIHOと鹿児島湾南部のHIRA, TARUは繰り返し観測点である。今回の観測ではGPS受信機Trimble 4000SSIとアンテナTRM23903.00を使用した。YOSG, ONEG, KAIG, MAKI, YOSIではLeica SR299/399Eを使用している。

Fig. 2にこれまでの繰り返し観測の実施時期を最

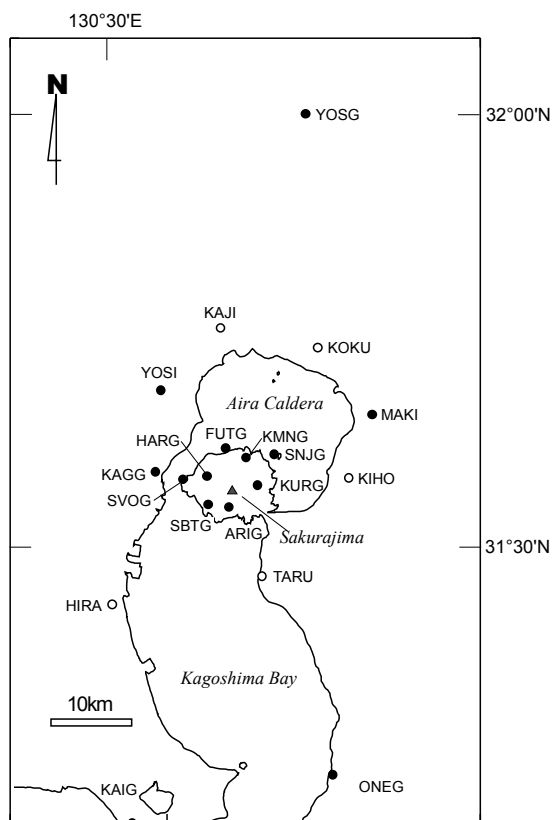


Fig. 1 Location of GPS stations. Solid and open circles indicate continuous and campaign sites, respectively.

近の南岳山頂火口における爆発回数, A型地震の発生回数と併せて示した。1996年12月の初回の観測からほぼ1年おきの冬季に繰り返し観測を実施してきた。南岳山頂火口における爆発回数は1999年12月に104回に達して以降, 減少傾向にあり, 2005年以降, 年間爆発回数は10回以下である。一方, A型地震の活動は2003年から2004年にかけて活動的となった。

2007年の観測は, 12月18, 19, 20日に行った。観測時間は60時間以上であり, サンプル間隔はYOSG, ONEG, KAIG, MAKI, YOSIでは15秒であるが, それ以外はすべて1秒である。記録されたデータはRINEX形式に変換し, 基線解析はSKI-Proバージョン2.5を用いて行った。

3. 観測結果

Fig. 3に1996年12月から2007年12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した。大隅半島南部のONEG観測点を固定として示してある。水平変位ベクトルは桜島の北部, 始良カルデラの中央部を中心に放射状に外側に変位し, HARG観測点において最も大きく8.5cmであった。始良カルデラの中央部か

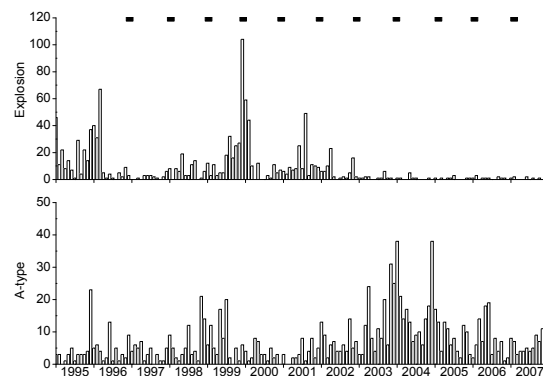


Fig. 2 Monthly numbers of explosive eruptions at Minamidake summit crater and A-type earthquakes. Lines at the top indicate periods of GPS campaign.

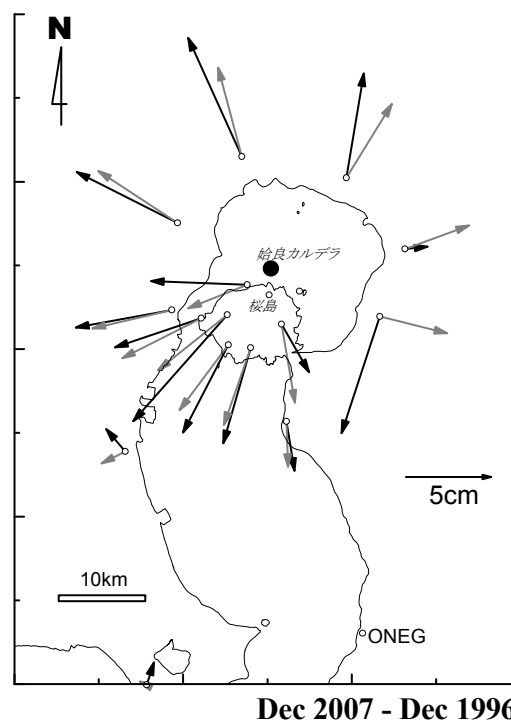


Fig. 3 Horizontal displacement vectors during the period from December 1996 to December 2007. Solid and gray arrows show observation and calculated vectors, respectively. Solid circle indicates location of the Mogi's pressure source.

ら20km以上離れたHIRAやKAIG観測点では変動は顕著ではなかった。得られた水平変位から茂木モデル (Mogi, 1958) を仮定してグリッドサーチにより圧力源の位置を求めた。グリッドの間隔は100mとした。圧力源の位置は始良カルデラの中央部, 深さ11kmに求められた (Fig. 3)。また, 体積変化量は $8 \times 10^7 \text{m}^3$ となった。茂木モデルから計算される水平変位ベクトルは, 始良カルデラ東側の観測点において食い違

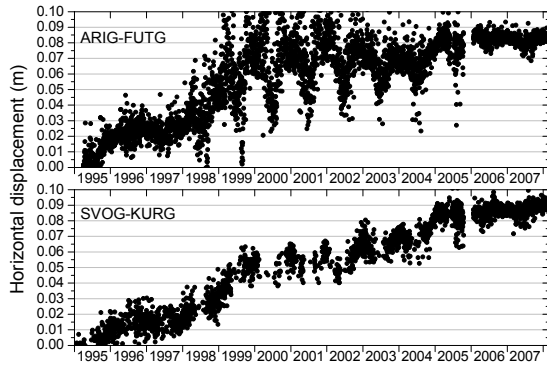


Fig. 4 Daily horizontal displacements of the north-south baseline (ARIG-FUTG) and east-west baseline (SVOG-KURG) during the period from 1995 to 2007

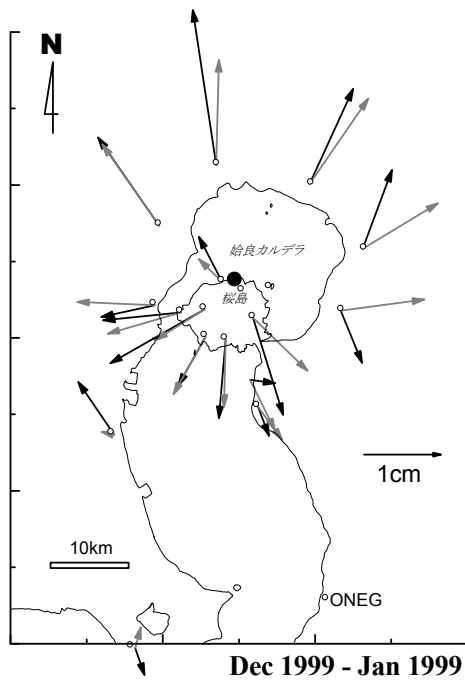


Fig. 5 Horizontal displacement vectors during the period from January to December 1999. Solid and gray arrows show observation and calculated vectors, respectively. Solid circle indicates location of the Mogi's pressure source.

いが大きいものの、観測された水平変位ベクトルとほぼ一致している。得られた圧力源の位置は1991年から1996年までの桜島および始良カルデラ周辺の上変動から求められた圧力源の位置（江頭ら，1998）とほぼ同じ位置である。

Fig. 4に桜島を南北（ARIG-FUTG）および東西（SVOG-KURG）に横切る基線での1995年から2007年までの相対水平変位量を示す。1日毎の解析結果である。これによると、南北および東西の基線とも11

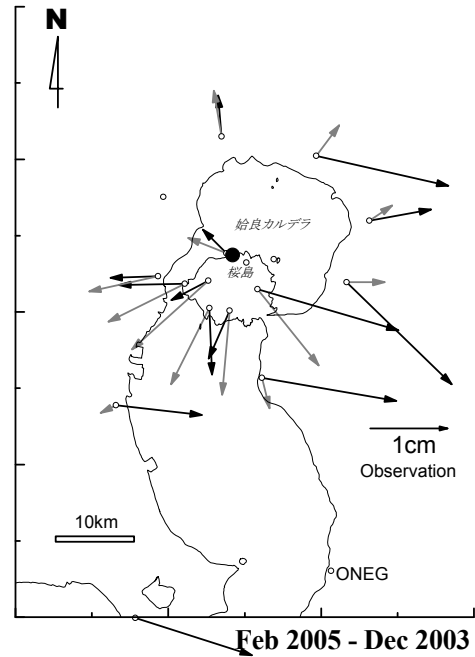


Fig. 6 Horizontal displacement vectors during the period from December 2003 to February 2005. Solid and gray arrows show observation and calculated vectors, respectively. Solid circle indicates location of the Mogi's pressure source.

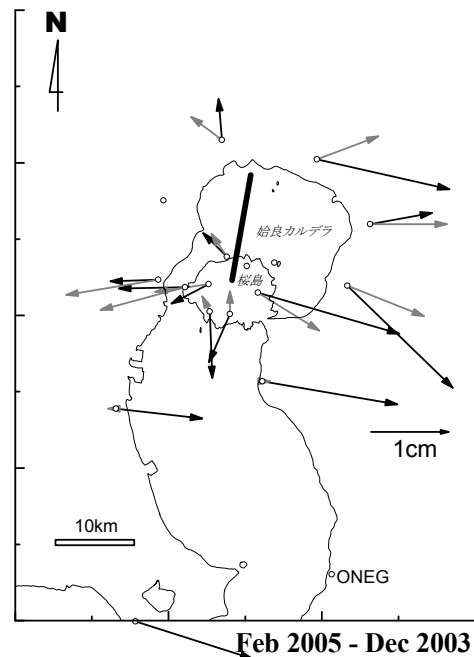


Fig. 7 Horizontal displacement vectors during the period from December 2003 to February 2005. Line indicates location of tensile crack. Solid arrows show observation vectors, and gray ones are based on tensile crack model.

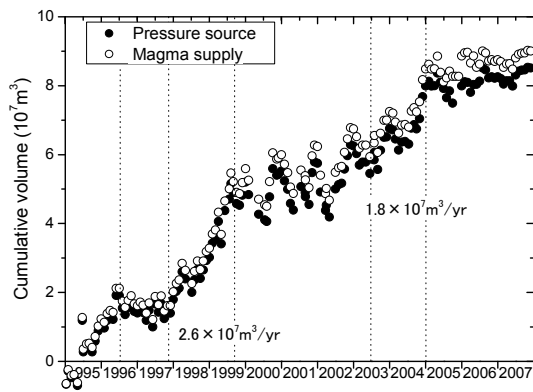


Fig. 8 Cumulative volume change of the pressure source beneath the Aira caldera and cumulative magma supply for 13 years from 1995

年間に約9cmの水平変位が検出されている。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、南北基線において約5cm、東西基線では約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動が検出された。そこで、これら2つの期間に対応する繰り返し観測期間、1999年1月から12月までと2003年12月から2005年2月までの期間における地盤変動の水平変位ベクトルをONEG固定としてFig. 5とFig. 6に示した。いずれの期間でも桜島北部から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がみられる。同様に茂木モデル (Mogi, 1958) を仮定して圧力源の位置を求めてみた。1999年1月から12月までの期間では桜島の北岸付近の深さ9kmに求められた (Fig. 5)。また、2003年12月から2005年2月までの期間では、圧力源の水平位置は同様に桜島の北部の海岸線付近であったが、深さは6kmに求められた (Fig. 6)。1996年から2007年までの平均的な圧力源の位置と比べ、やや桜島に近い場所に求められる傾向がみられる。

Fig. 6に示すように2003年12月から2005年2月までの期間では、桜島の東西の観測点において東西成分が大きい傾向がみられ、開口割れ目の拡大によって地盤変動が引き起こされている可能性がある。そこで開口割れ目モデルに基づいて開口割れ目の水平位置、走向、長さを求めた。Hidayati et al. (2007)に従い、深さ6~9kmにおける鉛直方向の開口割れ目を仮定した。水平変動ベクトルはOkada(1985)に基づいて計算した。Fig. 7に結果を示す。桜島の南部の観測点において水平変動ベクトルの向きが反転しているが、桜島の東西にある観測点では観測値と理論値のフィッティングが改善されている。開口割れ目の中心の位置はFig. 3に示した茂木モデルから決められた圧力源の位置とほぼ同じであるが、そこを中心に南北

方向へ長さ14kmの開口割れ目があるという解が得られた。また、体積変化量は $9.2 \times 10^6 \text{m}^3$ と見積もられるので、開口割れ目は約0.2m開いたことになる。

4. マグマ供給量

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基線SVOG-KURGの相対的水平変位量 (Δd) と圧力源の体積変化量 (ΔV) には

$$\Delta V = 9.64 \times 10^8 \Delta d \quad (1)$$

となる関係がある。1996年から2007年までの期間において圧力源の位置の多少の変化はみられるものの、ここでは始良カルデラの中央部に茂木モデルで近似できる圧力源があるものと考えて、桜島を東西横切る基線における水平変位の日々の値から上記の関係を用いて圧力源における体積変化量を求めた。1995年から2007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. 8に示した。1995年から2007年までの13年間で約 $8.5 \times 10^7 \text{m}^3$ の体積増加が見積られ、マグマの供給量としては約 $9.0 \times 10^7 \text{m}^3$ となる。年間供給量の平均値は $6.9 \times 10^6 \text{m}^3$ となり、これまでに見積もられているマグマの平均的な供給率 $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ (Ishihara, 1981) と比べるとやや少ない。先に述べた水平変位速度の大きい時期、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、 $2.6 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ と $1.8 \times 10^7 \text{m}^3/\text{年}$ となり、Ishihara(1981)が求めた平均的なマグマ供給率に比べて2倍程度、1995年から2007年までの平均的なマグマ供給率に比べると3倍程度大きい。一方、1996年2月から1997年10月までは地盤変動は検出限界以下であり、火山灰放出もほとんどみられず、始良カルデラへのマグマの供給は一時的に停止していたと考えられる。また、2000年から2003年にかけての期間も変動量が小さい。始良カルデラへのマグマの供給は一定ではなく、供給期と停止期を2~3年の間隔で繰り返しているように見える。

5. 今後の予測とまとめ

1996年に実施された水準測量・辺長測量によって示されたように始良カルデラの再隆起・膨張が1992~1993年ごろから始まった (江頭ら, 1998)。今回の観測により、桜島火山ではその北岸から始良カルデラの中央部を中心とする顕著な地盤の膨張が検出されており、桜島は本格的なマグマ蓄積期に入った

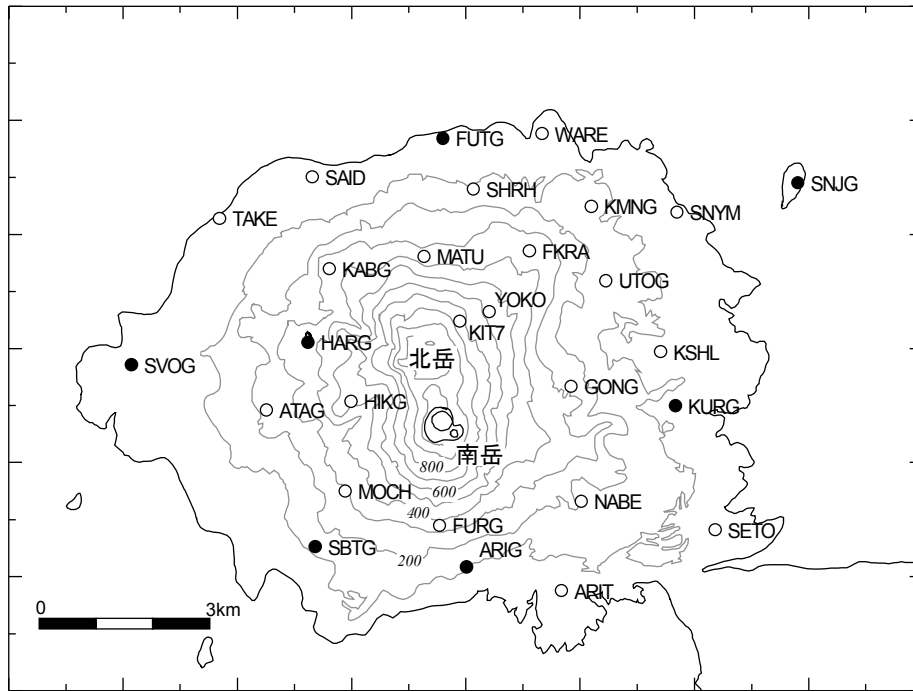


Fig. 8 A new GPS network at Sakurajima volcano. Open circles indicate campaign sites newly installed in December 2007. Solid circles show continuous GPS station.

と判断できる。桜島では最近の噴火は南岳山頂火口およびその山腹において発生しており、顕著な噴火の前には多量のマグマが始良カルデラ下のマグマ溜りから南岳に向けて移動することが予想される。2003年11月に桜島の南西域において発生した地震活動について、Hidayati et al. (2007)は始良カルデラ下に蓄積されたマグマが桜島の北東海域の新島付近から南西方向にのびる開口割れ目に沿って移動し、その結果として桜島南西部の開口割れ目先端において地震活動が活発化したものと解釈した。また、Fig. 5に示したように2004年10月から2005年2月までの膨張期では南北方向の開口割れ目に沿って始良カルデラから桜島南岳へ向かってマグマが移動した可能性も考えられる。桜島へマグマが貫入してくれば、始良カルデラを中心とする圧力源だけでは説明できない地盤の変動が観測されるはずであり、それを検出するためにはより稠密な観測網を構築する必要がある。

そこで、2007年の集中総合観測において桜島島内に20点の繰り返し観測点を増設し、初回の観測を行った (Fig. 9)。使用したGPS受信機はLeica AX1200, SR520, SR399, Trimble NetRSで、サンプリングはすべて1秒とした。桜島では2006年6月に昭和火口において58年ぶりに噴火が発生し、2008年2月には火砕流も発生するなど、これまでの南岳山頂火口の活動とは異なる様式の活動が現れ始めている。GPSの稠密観測を実施することによりマグマの移動に伴う詳細な地盤変動が検出できる可能性がある。

謝 辞

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からは観測機材、人員について多大なご協力をいただきました。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下記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등학교、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、鹿屋市役所、名古屋大学太陽地球環境研究所附属鹿児島観測所。

参考文献

- 井口正人・江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・田中穰・愛甲華子・竹内省吾 (1998) : 桜島および始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.
- 江頭庸夫 (1988) : 桜島火山周辺における地盤変動—1982年 - 1985年—, 第6回桜島火山の集中総合観測 (昭和60年10月-12月), pp. 15-19.
- 江頭庸夫 (1989a) : 桜島火山周辺における地盤変動—1985年 - 1988年—, 第7回桜島火山の集中総合観

- 測 (昭和63年10月-12月) , pp. 13-19.
- 江頭庸夫 (1989b) : 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 (1995) : 桜島火山周辺における地盤変動—1988年 - 1991・92年—, 第8回桜島火山の集中総合観測 (平成3年10月-平成4年3月) , pp. 15-21.
- 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 (1998) : 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.
- 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.
- Ishihara, K. (1981) : A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic material ejected, Abstract, 1981 IAVCEI Symposium -Arc Volcanism-, p. 143.
- Kamo, K, Iguchi, M. and Ishihara, K. (1997) : Inflation of volcano Sakurajima detected by automated monitoring system of GPS network, Proceedings IUGG IAG International Symposium on Current Crustal Movement and Hazard Reduction in East Asia and South-east Asia, November 4-7, 1997, Wuhan, China, pp.629-640.
- 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.
- 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.

Movement of Magma at Sakurajima Volcano Revealed by GPS Observation

Masato IGUCHI, Tetsuro TAKAYAMA, Tomoya YAMAZAKI, Mitsuhiro TADA, Atsuo SUZUKI*, Sadato UEKI**, Yusaku OHTA** and Shigeru NAKAO***

* Graduate School of Science, Hokkaido University

** Graduate School of Science, Tohoku University

*** Faculty of Science, Kagoshima University

Synopsis

In addition to continuous GPS observation, campaigns have been conducted since 1996 at Sakurajima volcano and around Aira caldera, where magma has been stored the magma reservoir since 1993. Horizontal displacement vectors during the period from 1996 to 2007 show outward radial pattern from the center of Aira caldera. Mogi's pressure source was located at a depth of 11 km beneath the caldera. It is estimated that magma of $9 \times 10^7 \text{m}^3$ was supplied and average supply rate was $6.9 \times 10^6 \text{m}^3/\text{year}$. Remarkable inflation of the ground was observed during the periods from November 1997 to October 1999 and from October 2004 to February 2005.

Keywords: Sakurajima volcano, ground deformation, GPS, magma reservoir