

桜島火山における絶対重力測定（1998年～2002年）

山本圭吾・大久保修平*・古屋正人*・新谷昌人*・松本滋夫*・高山鐵朗・石原和弘

* 東京大学地震研究所

要 旨

桜島火山では、1975年以降、活発な山頂噴火活動に伴って重力の増加傾向が観測されてきた。桜島の重力場の時空変動を高精度にかつ絶対値で解明する事を目的とし、従来から用いていたラコスト重力計に加え、1998年よりFG5絶対重力計を用いた絶対重力測定を開始した。2002年までの測定の結果、従来観測されてきた重力の増加傾向が、近年ほぼ停止している事が明らかとなった。近年の山頂噴火活動静穏化を反映した現象であると考えられる。

キーワード： 桜島火山，絶対重力測定，地盤変動，噴火活動

1. はじめに

1955年に始まった桜島南岳の山頂噴火活動は、盛衰を繰り返しながら現在もなお続いている。活動は、1960年にピークに達した後一度衰退したが、1972年から再び活発化し、年間に500万～3000万トンの火山灰を放出する噴火活動が1992年頃まで続いた。

桜島火山および始良カルデラ周辺域では、ラコスト重力計を用いた精密相対重力測定が1975年开始され、その後、桜島火山の集中総合観測の一貫として1997年までに9回の測定が繰り返されてきた（田島ら，1975；山本ら，1998）。その結果、山頂噴火活動活発期に緩やかな地盤沈降と並行して、桜島および始良カルデラを中心とした重力の増加傾向が継続してきた事が明らかにされた。桜島中央部における重力増加は地盤沈降から期待される量の数倍に達しており、桜島中央部直下において密度および質量の増加現象が進行してきた事を示すものと考えられている（石原ら，1986；石原，1990；Yokoyama，1989）。

近年は、比較的火山灰放出量の少ない爆発を繰り返しており、1993年以降の年間火山灰放出量は、そ

れ以前15年間の約5分の1以下に減少し、始良カルデラの地盤は隆起に転じた。桜島の重力場の時空変動を高精度にかつ絶対値で追跡する事で火山体内部において生じている現象を解明する事を目指し、従来から行ってきたラコスト重力計による測定に加え、1998年よりmicro-g社製FG5絶対重力計を用いた絶対重力測定を開始した。FG5は、free-fallタイプの絶対重力計で、その測定精度は1-2 μgal ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$)と高精度である（Okubo et al., 1997）。本稿では、2002年までに得られた測定結果について述べ、最近の桜島火山の活動との関連について議論する。

2. 絶対重力測定

重力変化の中心が桜島中央部である事を考慮し、桜島内において山頂火口からの距離が異なる2個所でFG5絶対重力測定を行った（Fig. 1）。1箇所は、山頂火口から5.6 kmの桜島西端に位置する火山活動研究センター本館（SVO）であり、火口のより近い測定点は、火口から2.8 kmの桜島中腹に位置する同センターハルタ山観測室（HAR）である。初回の測定は1998年7月で、その後1999年7月、2001年

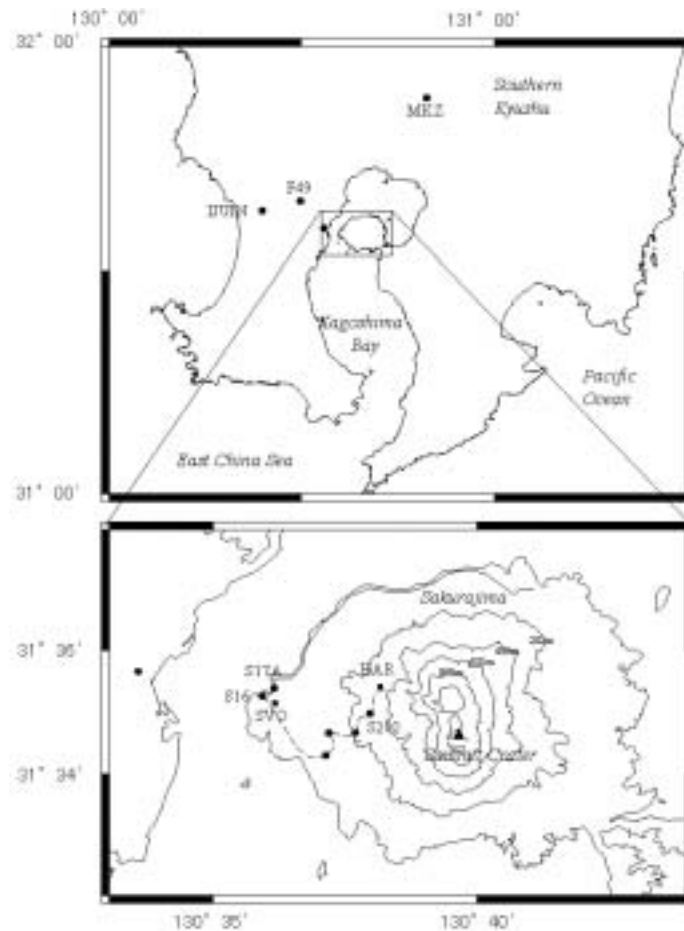


Fig. 1 Location map of the stations in and around Sakurajima volcano. Solid rectangles and solid circles denote the FG5 and the LaCoste gravity stations, respectively. Dashed curve: HAR leveling route, Thick solid curve: Northern Coast leveling route

9月（SVOのみ）、2002年3月（HARのみ）、2002年9月と測定を繰り返してきた。使用したFG5絶対重力計は東京大学地震研究所所有のもので、Serial Numberは1998年7月および1999年7月の測定にはNo. 109、その後の測定ではNo. 212の機材を用いた。それぞれの測定期間中は、SVOおよびHARそれぞれの測定点について2~4日間の連続運転を行い、30分毎の絶対重力値をデータとして取得した。

FG5による測定と並行して、ラコスト重力計を用い、桜島および始良カルデラ周辺域の10数点（Fig. 1）で相対重力測定を行った。1998年7月、1999年7月および2001年9月の測定にはラコストG型重力計3台（G458, G705, G1090）を、2002年9月の測定にはラコストG型重力計2台（G705, G875）を用いて測定を行った（なお、2002年3月はラコスト重力計による測定は行わなかった）。往復測定により得られたデータに、計器高補正・固体地球潮汐補正・スケール補正・ドリフト補正の各種補正を施し重力値を計算した。

噴火活動に伴う桜島周辺の地盤変動量を測定する事に加え、絶対重力測定点の比高変化を見積もる事を目的とし、重力測定と同時に精密一等水準測量を実施してきた。江頭ら（1997）による1996年10月の測量の後、SVOとHARを結ぶ測量路線（Fig. 1のHAR leveling route）では重力測定とほぼ同時期の1998年7月、1999年6月、2001年10月、2002年11月に、また桜島西部と北部を結ぶ路線（Fig. 1のNorthern Coast leveling route）では1999年4月、2001年11月、2002年11月と測量を行った。

ラコスト重力計による測定結果の詳細は、今後別の機会に述べる事とし、以下本稿では、主にFG5による測定結果について報告する。

3. 重力測定における海洋潮汐補正

桜島は、周りを海洋（鹿児島湾）に囲まれ、その重力測定値は海洋潮汐の影響を多分に受けていることが推察される。このため、高精度重力測定には海

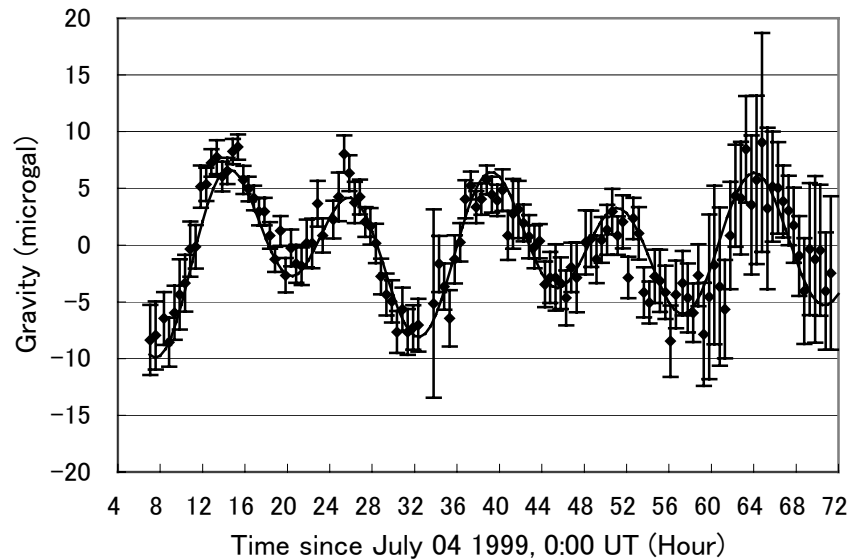


Fig. 2 The FG5 record observed at SVO in July 1999 (Solid diamonds with error bars). The absolute gravity values after correcting for solid earth tide, pole tide and barometric effects are plotted with respect to a value of 979,451,835.4 μgal . Solid curves are the theoretical ocean tides calculated by GOTIC2.

洋潮汐影響量の精密な補正が不可欠である。

Fig. 2 に、FG5 による 1999 年 7 月の測定で得られた SVO における絶対重力値の時系列データを示す。SVO は、海岸線から 300 m の距離に位置する (Fig. 1)。絶対重力測定値は、固体地球潮汐・極潮汐・気圧の補正 (Okubo et al., 1997) を行った後、その全測定期間中の平均値を差し引いてプロットしてある。5~10 μgal の振幅を持つ半日周期の重力変動が捉えられているが、海洋潮汐の影響によるものであると考えられる。桜島における海洋潮汐の重力影響量は、潮汐解析プログラム GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001) を用いて精密に計算できる事が分かっている (Yamamoto et al., 2001)。Fig. 2 中の実線は、GOTIC2 を用いて計算した理論海洋潮汐であるが、これと測定値は、振幅・位相ともに非常によく一致している事が分かる。このことから、FG5 絶対重力測定は振幅が数 μgal の海洋潮汐変動を検知する程の高精度な測定である事が分かると同時に、桜島における重力測定データ中の海洋潮汐影響量は GOTIC2 を用いて

正確に見積もる事が可能である事が分かる。桜島に限らず周りを海洋に囲まれた火山は世界中を見渡しても数多く、これらの火山における重力測定データでは、本稿で述べたような海洋潮汐の影響に注意する必要があるだろう。

4. FG5 による測定結果

Fig. 2 に示したような時系列データに対し、固体地球潮汐・極潮汐・気圧の補正に加え 3 章で議論した海洋潮汐補正を施した後、測定期間中での平均を取る事でその測定における絶対重力値を計算する。Table 1 には、この様にして計算した SVO および HAR の絶対重力値を各測定期間についてまとめた。また、Fig. 3 には、SVO, HAR それぞれについて、1998 年 7 月の測定値からの重力変化を時間推移としてプロットした。

SVO の絶対重力値は、1998 年 7 月から 1999 年 7 月の期間に 14.3 μgal の減少が測定された。それ以降、

Table 1 Results of the FG5 absolute gravity measurements

Observation time	SVO (μgal)	HAR (μgal)
Jul. 1998	979,452,262.0 ± 0.5	979,362,913.2 ± 0.5
Jul. 1999	979,452,247.7 ± 0.3	979,362,897.6 ± 0.6
Sep. 2001	979,452,246.4 ± 1.1	-
Mar. 2002	-	979,362,872.7 ± 0.4
Sep. 2002	979,452,244.9 ± 0.3	979,362,908.9 ± 0.3

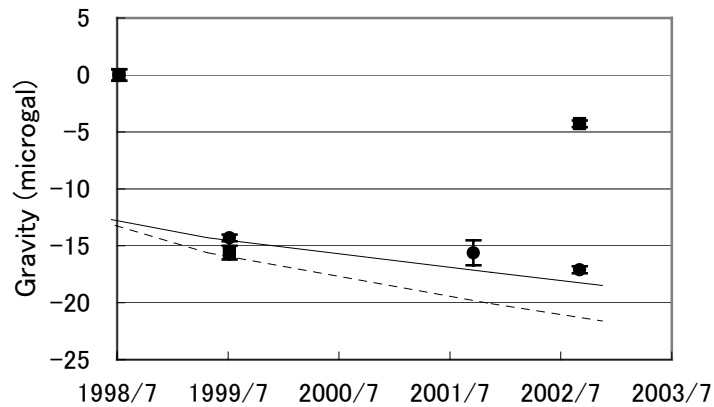


Fig. 3 Gravity changes from Jul. 1998 measurements. Note that the HAR data in Mar. 2002 is not displayed (out of the range). Solid circles with error bars: SVO, solid rectangles with error bars: HAR. Solid lines (for SVO) and broken lines (for HAR) are the estimated gravity changes caused by Mogi sources (see text).

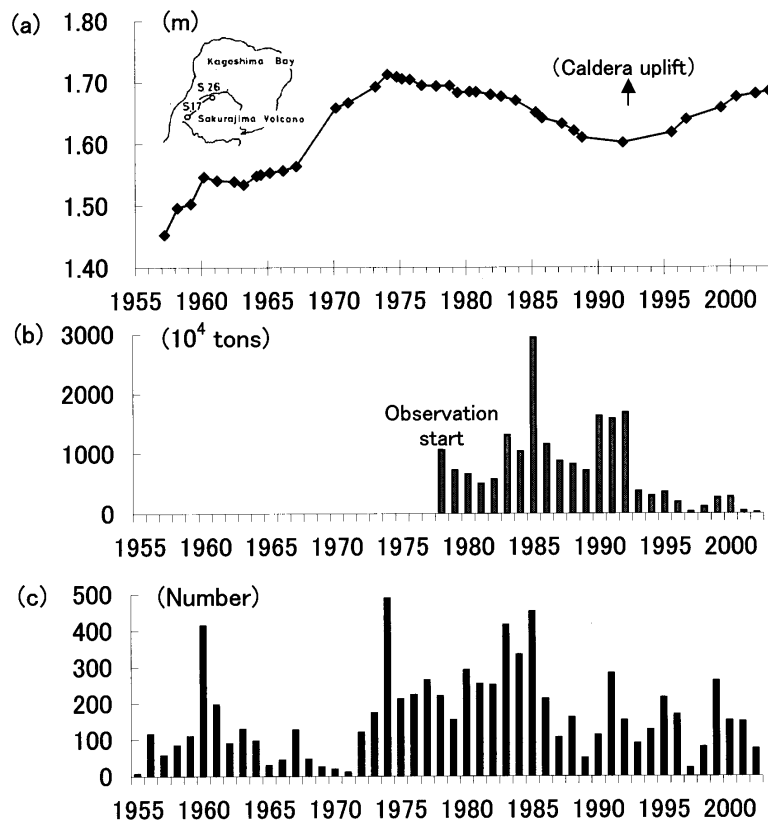


Fig. 4 Relations among (a) secular change of relative heights of bench mark S26, (b) yearly weights of estimated volcanic ash-fall deposits and (c) yearly number of explosive eruptions at the active crater of Sakurajima volcano

1999年7月から2001年9月の期間に $1.3 \mu\text{gal}$, 2001年9月から2002年9月の期間には $1.5 \mu\text{gal}$ の重力減少という結果が得られた。

一方, HAR では, 1998年7月から1999年7月の期間に $15.6 \mu\text{gal}$ の重力減少が測定された。その後,

1999年7月から2002年3月の期間に $24.9 \mu\text{gal}$ の重力減少, 2002年3月から2002年9月には逆に $36.2 \mu\text{gal}$ の重力増加が測定された。HAR の測定データに関しては, 2002年3月には測定機器トラブルにより系統差が生じている可能性, また 2002年9月には測

定点近傍の道路工事による影響を多分に受けている可能性があり、これらの結果をそのまま解釈するのは不適當であると考えられる。

5. 議論

5.1 桜島火山の噴火活動と地盤変動

1955年の山頂噴火活動活発化以降、桜島の地盤変動を調査するための水準測量が繰り返し行われてきた(江頭ら, 1997)。前述の通り、1998年以降も、絶対重力測定点の比高変化を見積もる目的も兼ね、水準測量を継続している。Fig. 4は、桜島西部の水準点S17を基準にした桜島北部の水準点S26の比高変化、および南岳火口から放出された降下火山灰の推定年間総量、南岳火口の年間爆発噴火回数の関係を表す図である。噴火活動に伴う地盤変動は、始良カルデラ中央部地下の深さ約10kmに推定される主マグマ溜りと桜島中央部地下約3kmの深さに推定される副マグマ溜り内のマグマの貯溜と放出に伴う現象として説明されている(江頭, 1989)。1973・74年以降の活発な噴火活動(Figs. 4b, 4c)によってマグマの放出量が増え、主マグマ溜り内の圧力が減少した結果1992年頃まで桜島北部の地盤が沈降している(Fig. 4a)。桜島北部付近の地盤は、1991年12月以降に逆転して隆起に転じている。これは、最近の南岳からの噴出物量の減少化(Fig. 4b)に伴い、始良カルデラ中央部直下の主マグマ溜りでマグマの貯溜が始まった事を示す現象と解釈されている(江頭ら, 1997)。

5.2 過去の重力測定結果

1975年以降繰り返し行われてきたラコスト重力計による精密相対重力測定により、山頂噴火活動活発期(Figs. 4b, 4c)に、桜島および始良カルデラを中心とした重力の増加傾向が継続してきた事が明らかにされている。桜島中央部では、その増加が年間15 μgal 以上に達した(石原ら, 1989)。

Fig. 5は、桜島中央部での重力増加傾向の物理的意味を検討するため、桜島西端の水準点S16を基準点とし、山頂火口に最も近い重力測定点の一つであるBMSVOにおける重力変化と水準測量による比高変化の関係を示した図である。1992年頃まで、活発な山頂噴火活動に伴う緩やかな地盤沈降と並行して、桜島中央部で170 μgal に及ぶ重力増加が進行してきた事が分かる。図中の直線Fはフリーエア勾配を、直線Bは地下の岩石密度を2.2 g/cm^3 とした場合のブーゲー勾配を示している。地下での質量の変化なしあるいは密度の変化なしに地盤が下降したとすれ

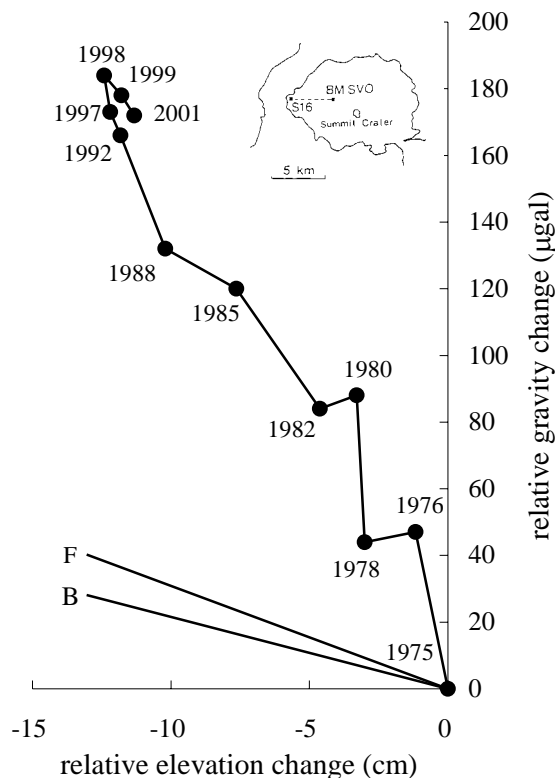


Fig. 5 Relation between relative gravity change and relative vertical displacement at BMSVO, taking the reference point of S16 located in western coast of Sakurajima

ば、直線FまたはBに沿って重力の増加が生じるはずである。測定された重力増加はこれらの直線より数倍大きく、桜島中央部地下で密度および質量の増加傾向が進行してきたと考えられる。石原ら(1986)は、密度の変化が山頂火口の地下3kmを中心とする球状の領域で生じたと仮定し、1975年から1982年の約8年間に2~3億トンの質量増加が生じたと推定した。

Fig. 5には、1998年以降のFG5絶対重力測定と並行して行われたラコスト重力計による測定結果を同時にプロットした。1993年以降の南岳からの噴出物量の減少(Fig. 4b)に対応するかの如く、桜島中央部における重力変化が小さくなった様に見える。桜島中央部の地盤は、北部の地盤が沈降から隆起に転じた1992年頃から6年程度遅れた1998年頃に沈降から隆起に転じているが、重力変化を詳細に見ると、この地盤変動傾向の転向に対応して重力増加が減少に転じている様に見える。

5.3 FG5の測定結果と噴火活動

FG5による絶対重力測定を行ってきた1998年以

降は、山頂からの噴出物量の減少に伴い、始良カルデラ直下の主マグマ溜りで増圧が生じてきた期間である (Fig. 4a)。この増圧源により、SVO, HAR においてどれ程の重力変化が生じるのかを見積もってみた。

Northern Coast leveling route で行われた水準測量データにつき、1996年10月～1999年4月、1999年4月～2001年11月、2001年11月～2002年11月の期間それぞれの比高変化に茂木モデル (Mogi, 1958) を適用し増圧源を決定、その後、萩原 (1977) の式を用いマグマ溜り内の密度を 2.67 g/cm^3 と仮定して SVO, HAR における重力変化を計算した (Table 2)。Fig. 3 の実線および破線は、この茂木モデルの重力変化を、それぞれ SVO, HAR について、1999年4月の水準測量時に重力値が1999年7月の重力測定値であるものとプロットしたものである。1998年7月から1999年7月の間に SVO および HAR の双方で約 $15 \text{ } \mu\text{gal}$ の重力減少が測定されたが、これらは増圧源では説明できない。一方、1999年7月以降の SVO における絶対重力測定結果は、この増圧源による重力変化でほぼ説明される事が分かる。この期間 SVO においては顕著な絶対重力変化が生じていないと言える。1998年から1999年の絶対重力値減少の原因については现阶段で明らかではないが、絶対重力計機材の一部が異なることによる系統差である可能性も否定できない。

SVO に対する HAR の相対的な重力変化を見てみると、1998年7月から1999年7月の期間に $1.3 \text{ } \mu\text{gal}$ の減少である。精密一等水準測量によるこの2測定点間の同期間における比高変化は、SVO に対し HAR が 5.0mm の隆起であり、これからフリーエア勾配を用いて重力変化に換算すると約 $1.5 \text{ } \mu\text{gal}$ の減少となる。この事は、上記の重力変化は比高変化による重力変化でほぼ説明できること、すなわち地下の密度または質量の増減による重力変化が2測定点間で相対的にはほぼ生じていないことを意味する。2001年9月の測定結果においては、測定精度が劣るが、FG5による測定と並行して行っているラコスト重力計の測定結果 (Fig. 5) から、やはりこの事を支持する結果が得られている。過去に測定されてきた桜島中央部における密度および質量の増加現象は、現在ほぼ停止しているものと考えられる。前述の通り、現在の桜島火山の山頂噴火活動は、比較的静穏な時期に相当する。噴火活動活発時に見られた桜島中央部直下における密度増加現象は、噴火時に脱ガスして密度の高くなった残余マグマが付加・蓄積することにより生じるのではないかと考えられている。この仮説によれば、噴火活動静穏化とともに密度増加が停

Table 2 Gravity changes caused by Mogi sources

Period	SVO (μgal)	HAR (μgal)
Oct.1996-Apr.1999	-4.7	-7.4
Apr.1999-Nov.2001	-3.0	-4.5
Nov.2001-Nov.2002	-1.1	-1.5

止することは妥当な現象であると思われる。

桜島では潮汐変化や降水量の影響で地下水位が変化する場所がある事が報告されている (石原ら, 1999)。測定点により重力測定値にその影響が現れる可能性がある。SVO および HAR における測定値にその影響は現れていないが、地下水位変化の重力測定への影響は今後の解明すべき課題である。

6. まとめ

1998年7月より桜島火山において FG5 とラコスト重力計を組み合わせた絶対重力測定を行ってきた。過去、山頂噴火活動が活発な時期に重力測定が行われてきたが、本稿の重力測定により山頂噴火活動が比較的静穏な時期の重力変化が高精度にかつ絶対値として得られた。このデータは、今後噴火活動活発時に絶対重力測定を行う際の基礎となるものと考えられる。測定結果の検討から以下のような知見が得られた。

- (1) 測定期間中少なくとも1999年から2002年の間の SVO における重力変化は、始良カルデラ直下の増圧源による重力変化でほぼ説明できる。この期間、SVO では顕著な絶対重力変化は生じなかった。
- (2) SVO に対する HAR の相対的な重力変化から、過去に観測されていた桜島中央部における重力増加が、近年はほぼ停止している事が明らかとなった。近年の山頂噴火活動静穏化を反映した現象であると考えられる。

謝辞

絶対重力測定および水準測量に際しては、京都大学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った。また、海洋潮汐の計算には国立天文台の松本晃治氏が作成したプログラム GOTIC2 を使用した。記して、謝意を表します。本研究成果は、京都大学防災研究所一般共同研究 (11G-02, 12G-11, 13G-06) および東京大学地震研究所共同利用 (1998-G-04, 1999-G-11, 2000-G-09) によるものである。

参考文献

- 石原和弘 (1990) : 地盤変動・重力等の測定によるマグマ活動の検知, 火山, Vol. 34, pp. S235-S246.
- 石原和弘・沢田宗久・大久保修平・植木貞人・宮野宏樹・前川徳光 (1989) : 桜島および鹿児島湾周辺における重力精密測定, 第7回桜島火山の集中総合観測, pp. 33-39.
- 石原和弘・園田忠惟・江頭庸夫 (1999) : 桜島持木水位観測井の水位変化, 京都大学防災研究所共同研究 (9P-5) 報告書, pp. 9-19.
- 石原和弘・横山泉・前川徳光・田島広一 (1986) : 桜島および鹿児島湾周辺における重力精密測定, 第5回桜島火山の集中総合観測, pp. 33-40.
- 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・Hendrasto, M.・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.
- 田島広一・萩原幸男・大川史郎・横山泉 (1975) : 桜島および鹿児島湾周辺における重力精密測定, 桜島火山の総合調査報告, pp. 50-57.
- 萩原幸男 (1977) : 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 52, pp. 301-309.
- 山本圭吾・高山鐵朗・石原和弘・大島弘光・前川徳光・植木貞人・沢田宗久・及川純 (1998) : 桜島および始良カルデラ周辺における重力変化, 京都大学防災研究所年報, 第41号 B-1, pp. 153-160.
- Matsumoto K., Sato T., Takanezawa T., Ooe M. (2001): GOTIC2: a program for computation of oceanic tidal loading effect, Jour. Geod. Soc. Jpn., Vol. 47, pp. 243-248.
- Mogi, K., (1958): Relations between the eruption of various volcanoes and deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, pp. 99-134.
- Okubo S., Yoshida S., Sato T., Tamura Y., Imanishi Y. (1997): Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5 – Comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide, Geophys. Res. Lett., Vol. 24, pp. 489-492.
- Yamamoto K., Ishihara K., Okubo S., Araya A. (2001): Accurate evaluation of ocean tide loading effects for gravity in nearshore region: the FG5 measurements at Sakurajima volcano in Kagoshima Bay, Japan, Geophys. Res. Lett., Vol. 28, pp. 1807-1810.
- Yokoyama, I. (1989): Microgravity and height changes caused by volcanic activity: four Japanese examples, Bull. Volcanol., Vol. 51, pp. 333-345.

Absolute Gravity Measurements at Sakurajima Volcano During the Period 1998-2002

Keigo YAMAMOTO, Shuhei OKUBO*, Masato FURUYA*, Akito ARAYA*, Shigeo MATSUMOTO*, Tetsuro TAKAYAMA, and Kazuhiro ISHIHARA

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Synopsis

In Sakurajima volcano, Southern Kyushu, Japan, the remarkable gravity increase has been observed in the central region of the volcano during the period of active stage with continuous summit eruptions since 1975. To clarify both special and time changes of gravity field accurately and in the absolute sense, we began the FG5 absolute gravity measurements combined with those using LaCoste gravimeters in 1998. As the result of the evaluation of observed gravity changes during the period from 1998 to 2002, it is found that the gravity increase observed since 1975 stops during almost all of our observation periods. This phenomenon seems to relate to the decreased activities of summit eruptions in recent years.

Keywords: Sakurajima volcano, absolute gravity measurements, ground deformation, eruptive activity