

桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2017年5月～2018年2月)

Repeated Relative Gravity Measurements in Sakurajima Volcano (May 2017-February 2018)

風間卓仁⁽¹⁾・山本圭吾・平良真純⁽¹⁾・大島弘光⁽²⁾・
前川徳光⁽²⁾・岡田和見⁽²⁾・園田忠臣・井口正人

Takahito KAZAMA⁽¹⁾, Keigo YAMAMOTO, Masumi HIRAYOSHI⁽¹⁾, Hiromitsu OHSHIMA⁽²⁾,
Tokumitsu MAEKAWA⁽²⁾, Kazumi OKADA⁽²⁾, Tadaomi SONODA and Masato IGUCHI

(1) 京都大学大学院理学研究科

(2) 北海道大学大学院理学研究院

(1) Graduate School of Science, Kyoto University

(2) Graduate School of Science, Hokkaido University

Synopsis

Relative gravity values were measured at 19 gravity points in and around Sakurajima Volcano in May, July, September and October 2017, and February 2018, to monitor spatiotemporal mass variations associated with volcanism. The gravity values observed from 2006 to 2018 showed a clear increase in the central part of the volcano by up to +6.3 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$. The gravity increase suggests the existence of mass increase under the central Sakurajima without volume inflation, because the gravity increase cannot be fully explained by the ground subsidence which have been measured with leveling surveys. The mass increase value is calculated to be about $1\text{-}3 \times 10^{10}$ kg/yr, assuming that the point mass is located just under the S423 gravity point at the depth of 3-5 km below sea level. In order to more precisely model the mass increase and its spatiotemporal variation, the effects of hydrology and crustal deformation should be corrected from the observed gravity data.

キーワード: 桜島火山, 相対重力, 質量移動, 地殻変動, 陸水擾乱

Keywords: Sakurajima Volcano, relative gravity, mass redistribution, crustal deformation, hydrological disturbance

1. はじめに

重力観測は火山内部の質量移動を把握するのに最も有効な手段の1つである。鹿児島県の始良カルデラ南部に位置する桜島火山では、1975年以降数年おきにLaCoste型相対重力計による繰り返し重力測定が実施されてきた。南岳火口からの噴火が活発だった

1970年代～1990年代前半には、山頂部の重力値が100 μGal 以上も増加する傾向が見られた(山本ら, 1998)。また、同時期の地殻上下変位に対する重力変化の割合は-13 ~ -20 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ と計算されることが分かっており(風間ら, 2014)、マグマだまり収縮に伴う地盤沈降だけでなく桜島直下における質量増加が起きていたと考えられている(石原ら, 1986)。

南岳の噴火活動が静穏化した1990年代後半以降には、それまでのような大きな重力変化が観測されることはなくなった(山本ら, 2014a)。しかしながら、2006年6月には昭和火口からの噴火活動が再開し、2015年8月にはダイク貫入イベント(風間ら, 2016; Hotta et al., 2016)が発生するなど、桜島では依然として活発な火山活動が確認されている。このような火山活動の変遷を質量移動の観点から議論するには重力観測データが不可欠であり、現在および将来の質量移動プロセスを把握・予測するには重力観測データの継続的な取得が必要である。

そこで我々は、2017年度において複数回の相対重力測定を桜島火山およびその周辺で実施した。本稿では2017年度に取得された相対重力値を全て示すとともに、昭和火口活動再開(2006年)以降の経年的な重力時空間変化について議論する。

2. 繰り返し相対重力測定

2017年度に相対重力測定を実施した重力点をFig. 1に緑色丸印で示す。重力測定は基準重力点である桜島火山観測所SVOGを含めて桜島島内の16点、島外の3点で実施した。このうち、KOMGは高免観測坑道(2016年8月竣工)の基台上に位置する重力点であり、2017年度に初めて重力測定が行われた。全ての重力測定はSVOGを1日の始点および終点とし、これ以外の重力点を数箇所回るという往復測定にて実施した。各重力計の測定担当者は各往復測定が終了するたびに地球潮汐・器械高・器械ドリフトの寄与を補正し、SVOG基準の相対重力値を算出した。

2017年10月23日~27日には、北海道大学の3台のLaCoste重力計(G31・G375・G791)、京都大学理学研究科の1台の重力計(G680)、および桜島火山観測所の2台の重力計(G605・G892)によって全19点の相対重力測定を実施した。各重力計によって測定された、SVOGに対する各重力点の相対重力値をTable 1に示す。なおこの表中では、同じ重力計で期間中に2回以上の測定がなされた点については全測定の平均値を示している。

また、2017年5・7・9月および2018年2月には、桜島島内の主要な重力点(SVOGを含めて全9点)において相対重力測定を実施した。これは、火山活動に伴う重力変化をより小さな時間分解能で把握するためだけでなく、陸水変動に伴う周期1年未満の重力擾乱(風間ら, 2014)を時空間的に細かい分解能で検出するためでもある。これら4回の測定では、桜島火山観測所の2台の重力計(G605・G892)、および京都大学理学研究科の1台の重力計(G680)が使用された。これら4回の測定における、SVOGに対する各重

力点の相対重力値をTable 2に示す。

3. 重力経年変化の計算方法

我々は2017年度に取得した上記の相対重力データに加え、昭和火口活動再開(2006年)以降に取得された全ての相対重力データを取りまとめ、この期間の各重力点における重力経年変化速度を以下のように計算した。

まず、ある重力点のSVOGに対する相対重力値が線形的に時間変化する場合、時刻 t_i の重力測定値 g_i は定数 a, b を用いて一般に以下のように書ける。

$$g_i = at_i + b \quad (1)$$

ただし、複数の重力計で重力値を測定する場合、

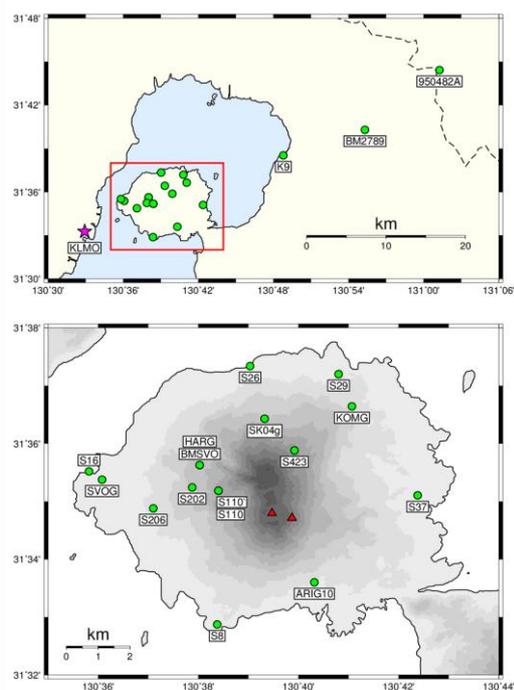


Fig. 1 Gravity points in and around Sakurajima Volcano (green circles). In the top panel, a pink star and a dashed line indicate Kagoshima Local Meteorological Observatory (KLMO) and the boundary of Kagoshima and Miyazaki Prefectures, respectively. The red rectangle also indicates the area of the bottom panel. In the bottom panel, the topography of Sakurajima Volcano, provided by Geospatial Information Authority of Japan, are colored every 100 m altitude. Two red triangles indicate two active crater, Minami-dake Crater (left) and Showa Crater (right).

Table 1 Gravity values measured in and around Sakurajima Volcano on 23-27 October 2017

Sensor	G31	G375	G605	G680	G791	G892
Observer	Ohshima	Maekawa	Hirayoshi	Kazama	Okada	Yamamoto
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S16	6.151	6.139	6.111	6.128	6.141	6.126
S26	-11.489	-11.504	-11.511	-11.491	-11.480	-11.508
S29	-33.432	-33.445	-33.444	-33.434	-33.415	-33.428
S37	-15.486	-15.485	-15.491	-15.487	-15.479	-15.491
S8	-15.337	-15.316	-15.313	-15.336	-15.324	-15.319
BMSVO	-89.120	-89.086	-89.176	-89.111	-89.097	-89.082
HARG	-89.279	-89.238	-89.334	-89.280	-89.248	-89.224
S202	-60.729	-60.700	-60.808	-60.740	-60.748	-60.727
S206	-29.827	-29.788	-29.822	-29.804	-29.807	-29.800
S110	-114.003	n/a	-114.099	-114.032	-113.971	-113.964
S110'	-113.932	n/a	n/a	-113.956	-113.921	-113.909
ARIG10	-14.108	-14.112	-14.145	-14.104	-14.098	-14.120
SK04g	-76.258	-76.256	-76.284	-76.269	-76.232	-76.245
S423	-141.552	-141.546	-141.642	-141.584	-141.535	-141.494
KOMG	n/a	-37.214	-37.263	n/a	-37.208	-37.190
K9	19.582	19.545	19.531	19.535	19.557	19.533
BM2789	-34.218	-34.240	-34.249	-34.260	-34.189	-34.192
950482A	-18.338	-18.357	-18.391	-18.420	-18.331	-18.351

Table 2 Gravity values measured in Sakurajima Volcano in May, July and September 2017, and February 2018. The observer names of Kazama, Hirayoshi and Yamamoto are abbreviated as K, H and Y, respectively.

Year	2017	2017	2017	2018	2017	2018	2017	2017	2018
Month	5	7	9	2	7	2	5	9	2
Day	30	10	1	23	10	27	30	1	23,27
Sensor	G605	G605	G605	G605	G680	G680	G892	G892	G892
Observer	K	K	H	H	K	K	Y	Y	Y
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S16	6.145	6.138	6.128	6.150	6.137	6.116	6.138	6.118	6.140
S26	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	-11.505	n/a	n/a	-11.500
BMSVO	-89.119	-89.128	-89.164	-89.212	-89.128	-89.141	-89.092	-89.086	-89.099
HARG	-89.280	-89.292	n/a	-89.361	-89.278	-89.290	-89.243	n/a	-89.231
S202	n/a	n/a	n/a	-60.824	n/a	n/a	n/a	n/a	-60.716
S206	-29.816	-29.829	-29.820	-29.866	-29.809	-29.829	-29.790	-29.788	-29.803
ARIG10	-14.076	-14.085	-14.106	-14.136	-14.128	-14.114	-14.116	-14.089	-14.087
KOMG	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	-37.259	n/a	n/a	-37.187

定数 b は重力計ごとに異なる値を持つ可能性がある。というのも、そもそもLaCoste型相対重力計にはゼロ長バネが内蔵されており、重力点間におけるバネの長さ変化を測定することによって間接的に重力差を把握することができる。バネ長→重力値の変換

は重力計出荷時に添付される変換表を用いて行われるが、この変換表中の変換定数はバネの経年劣化に伴い0.01 %の単位で長期的に時間変化することが知られている。つまり、変換定数のずれを補正しないままであると、同じ重力点間で重力測定したにもか

かわらず、各重力計の重力差に0.01 %単位のずれが生じる可能性がある。特に、重力値の器械差は標高の大きく異なる重力点間を往復測定する場合に大きくなる。例えば、標高差1000 mの2点間で相対重力測定を実施した場合、ブーゲー勾配-0.2 mGal/mを仮定すると重力差は-200 mGalとなる。このとき、変換定数のずれに伴う重力値の器械差は少なくとも200 mGal×0.01 % = 20 μGalとなり、相対重力計の観測精度 (~ 10 μGal) を超えてしまうのである。

変換定数のずれに伴う重力値の器械差を最小化するには、絶対重力値が既知である2点間を往復測定し、変換定数のずれの量 (スケールファクター) を事前に算出しておく必要がある。しかしながら、スケールファクターの算出は全ての重力計で頻繁に行われているわけではなく、そもそも2つの絶対重力点で逐次絶対重力測定がなされている例も非常に少ない。そこで本研究では、式(1)の切片値 b が重力計ごとに異なる値を有すると仮定する。つまり、重力計 j の切片値を b_j と書くと、時刻 t_i にこの重力計で測定された重力値 g_{ij} は以下のように表現できる。

$$g_{ij} = at_i + b_j \quad (2)$$

全重力計による全期間の重力測定値の個数 (つまり数式の個数) を N 、および重力計の個数を J とすると、未知パラメーターの数は $J+1$ 個となり、 $N \geq J+1$ のときに最小二乗法によって未知パラメーターを解くことができる。本研究では以上のような方法で、各重力点における2006年~2018年2月の重力経年変化速度 a を算出した。

なお、上記の算出方法においては、各重力計のス

ケールファクターが対象期間中 (2006年~2018年2月) で変化しないことを仮定している。また、厳密には重力変化速度 a にも器械差が存在するが、 b_j の器械差に比べて非常に小さいので無視している。というのも、対象期間中の重力変化速度が10 μGal/yr未満であることから、 a の器械差は10 μGal/yr×0.01 % = 1 nGal/yr程度と、相対重力計の観測精度 (~ 10 μGal) に比べて十分小さいからである。

4. 2006年以降の経年的な重力時空間変化

4.1 BMSVOおよびS423の重力時間変化

2006年以降にBMSVO (桜島西部のハルタ山頂上; 標高408 m) とS423 (桜島北岳水準測線の最高地点; 標高609 m) で測定されたSVOG基準の相対重力値を丸印で、および前章の方法で得られた重力経年変化を黒色太線でFig. 2に示す。なおこの図中には、2017年度に重力測定を実施したG31・G375・G605・G680・G791・G892のデータの他に、2017年度以前に重力測定が実施されたG682・G891・G1090のデータも示してある。

対象期間 (2006年~2018年2月) の重力値はどちらの重力点でも上昇しており、重力変化速度およびその標準偏差はBMSVOで 3.6 ± 1.3 μGal/yr、S423で 6.3 ± 2.5 μGal/yrである。

また、各重力計で測定された重力値は回帰直線を中心として最大約50 μGalばらついている。この原因としては、陸水起源の重力擾乱が重力観測値に含まれていることが考えられる (風間ら, 2014; Kazama et al., 2015)。例えば、BMSVOでは2009年10月の重力値が他の年に比べて50 μGal程度小さくなってい

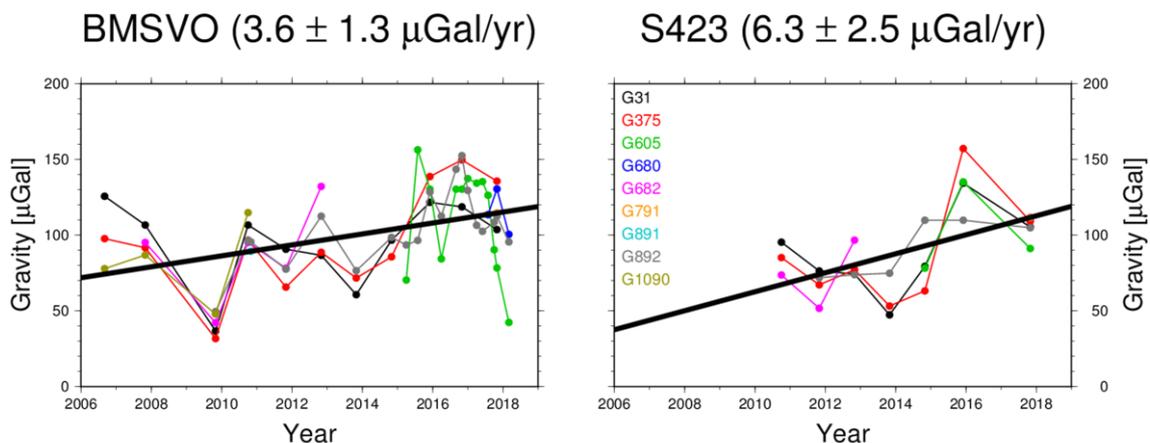


Fig. 2 Circles and thick solid lines indicate the observed gravity values relative to SVOG and the regression lines to the observed gravity values, respectively. The left and right panels show the gravity variations at BMSVO and S423, respectively.

て、しかもこの重力減少は全ての重力計で同期している。実際、鹿児島地方気象台 (SVOGの南西6.3 km) における2009年の年間降水量は1530 mm/yrであり、2006~2017年の年間降水量平均値 (2526 mm/yr) に比べて1000 mm/yr程度少ない (気象庁, 2018)。2009年の降水量の減少は同年の桜島内部の陸水量の減少を示唆し、それに伴い重力値も減少することが考えられる。厚さ1 mm の水の無限平板がなす重力変化は0.0419 $\mu\text{Gal}/\text{mm}$ なので、2006年の重力減少量は $0.0419 \mu\text{Gal}/\text{mm} \times 1000 \text{ mm} = 41.9 \mu\text{Gal}$ と予想され、実際にBMSVOで観測された重力減少量 (~50 μGal) に近いことが分かる。

このように、桜島火山で観測された相対重力値には陸水擾乱の影響が含まれており、火山活動に伴う重力変化を議論する上で大きなノイズになっている。今後の解析において、桜島の地形や不均質構造をも考慮に入れた陸水擾乱のモデル化が不可欠である (風間ら, 2014 ; Kazama et al., 2015)。

4.2 桜島火山における重力時空間変化

Fig. 3には桜島島内の各重力点における2006年以降の重力経年変化(桜島西麓のSVOG基準)を矢印で、

重力経年変化の標準偏差を楕円で示している。なお、最も遠方の重力点950482A(宮崎県都城市の電子基準点)に対するSVOGの重力経年変化速度は $-0.5 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ と十分に小さいので、Fig. 3の図は遠方点を基準とした桜島島内の重力変化と判断して差し支えない。桜島島内の重力変化は中央部に近いほどその上昇量が大きくなっており、S423で最大値 $6.3 \pm 2.5 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ を取っている。この重力時空間変化の要因としては、以下の3つの可能性が考えられる。

まず1つに、前述の陸水擾乱の影響が経年変化の値にも含まれている可能性である。例えば、桜島中央部で陸水貯留量が経年的に増大すれば、Fig. 3のような重力時空間分布を説明できる。しかしながら、一般に10年以上の長期的な時間スケールでは陸水収支は均衡状態に至っている (風間ら, 2014)、局地的に陸水量が経年変化していることは考えにくい。また、Fig. 2を見る限り、陸水擾乱は重力経年変化の値に大きなバイアスを与えているわけではなく、重力経年変化の誤差を増大させるだけと考えられる。

2つ目は、桜島中央部の地面の沈降が重力増加として観測されている可能性である。例えば、ブーゲー勾配として $-2.0 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ (媒質密度 $2.6 \text{ g}/\text{cm}^3$) を仮定

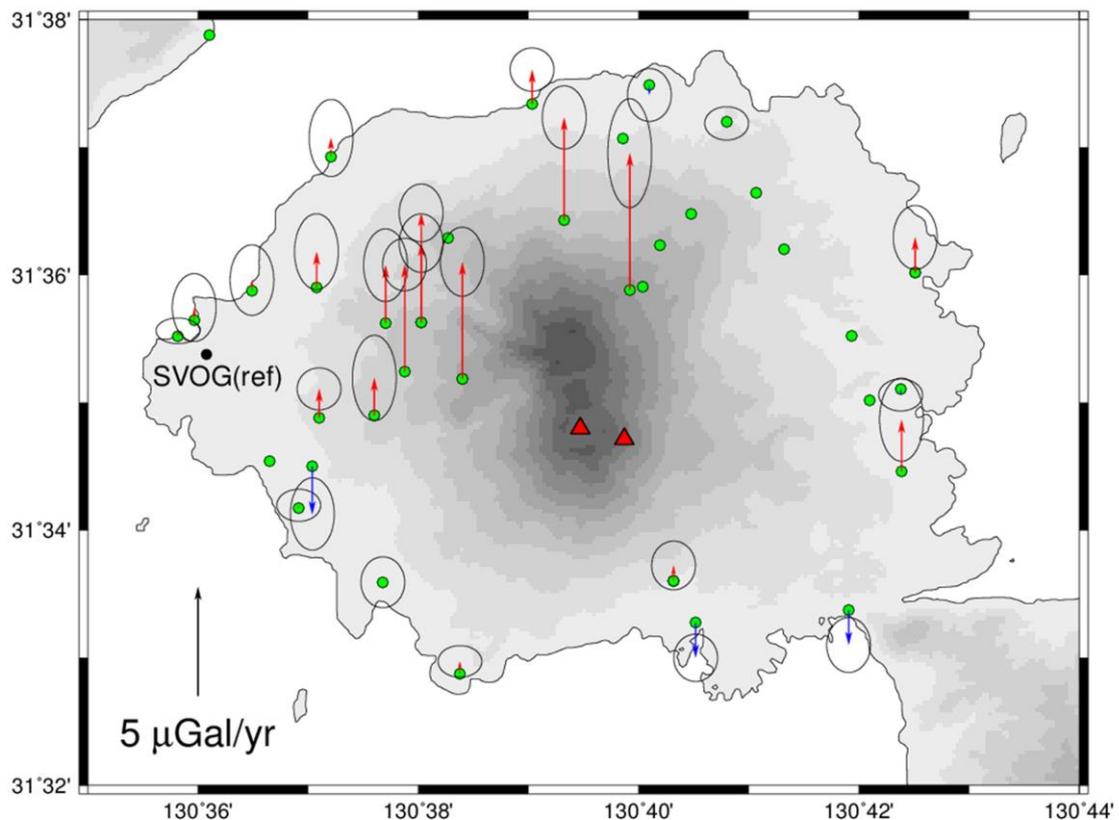


Fig. 3 Arrows and ellipses indicate the gravity variation rates relative to SVOG during 2006-2018 and those standard deviations, respectively.

した場合、BMSVOが西麓に対して-1.8 cm/yrの速度で沈降すればBMSVOの重力減少 (3.6 μ Gal/yr) を説明できる。山本ら (2014b) のFig. 5によると、BMSVOは2006~2013年にかけて桜島西麓のS17に対しておよそ-0.25 cm/yrの速度で沈降していたことが分かる。桜島中央部は確かに西麓に対して沈降しているが、その沈降量は重力変化から期待される量の2割にも満たない。つまり、桜島中央部で2006年以降に観測されている重力増加は地盤沈降で説明するには不十分であり、別の主要な原因が存在すると考えられる。

そこで第3の可能性は、桜島直下で地殻変動を伴わないような質量増加が起きている可能性である。実際、石原ら (1986) は1975~1982年の相対重力データを解析し、南岳直下の海拔下3 kmに 3.2×10^{10} kg/yrの質量増加が起きていたことを示した。また、風間ら (2018) は石原ら (1986) の解析手法を再検討するなどしてより長期間の相対重力データを解析した結果、1975~1992年には北岳直下の海拔下5 kmに 6.0×10^{10} kg/yrもの質量増加が起きていたことを示した。これら2つの先行研究と同様に本研究でも桜島中央部で重力増加が確認されたということは、主な噴火活動が南岳火口から昭和火口に遷移した2006年以降についても桜島直下の質量増加が継続していることを意味している。

ここで、S423 (最も大きな重力増加が観測された重力点) の直下で体積変化や地殻変動を伴わないような点的な質量増加が起きたと仮定し、2006年~2018年2月におけるS423の重力変化量から点質量源の質量増加量を試算する。点質量源の深さとしては石原ら (1986) で示された海拔下3 km、および風間ら (2018) で示された海拔下5 kmという値を用い、万有引力の計算においてはS423の標高 (609 m) を考慮する。その結果、質量増加量は海拔下3 kmのときに 1.2×10^{10} kg/yr、海拔下5 kmのときに 3.0×10^{10} kg/yrと試算された。これを先述の先行研究と比較すると、2006年~2018年2月の質量増加量は南岳噴火活発期 (1970年代~1990年代前半) と同じ桁ではあるものの、およそ1/3から半分程度であることが分かる。

ただしこの結果はあくまで試算であり、Fig. 3の重力時空間分布の結果を利用すれば質量増加量だけでなく質量増加源の3次元的位置も拘束できると期待される。ただしその際には、地殻変動や陸水変動など、既知の重力変化の寄与を適切に補正することが不可欠である。それに加えて、今後も桜島内外の重力点にて相対重力測定を繰り返し、火山活動と重力変化の対応関係を注意深く監視し続ける必要がある。

5. まとめ

我々は2017年5・7・9・10月および2018年2月に桜島周辺の19の重力点で相対重力測定を実施した。本研究で取得した重力データを過去の重力データとともに解析した結果、2006年の昭和火口活動再開以降、桜島中央部では最大6.3 μ Gal/yrの重力上昇が観測されていることが分かった。また、この重力上昇量は地殻変動だけでは十分に説明することができず、桜島中央部直下に 2×10^{10} kg/yr前後の質量増加が必要であることが試算された。今後は桜島内外における相対重力測定を継続するとともに、重力データから地殻変動や陸水擾乱の影響を補正した上で、客観的な手法によって質量変動源の推定を行う必要がある。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会の科学研究費助成事業 (課題番号: 15K17749)、および文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の助成を受けて遂行された。また、本稿の図は描画ソフトGMT (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。

参考文献

- 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の精密測定, 第5回桜島火山の集中総合観測, pp. 33-40.
- 風間卓仁・山本圭吾・福田洋一・井口正人 (2014) : 相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性: 桜島火山を例に, 測地学会誌, 第60巻, 2号, pp. 73-89.
- 風間卓仁・栗原剛志・山本圭吾・井口正人・福田洋一 (2016) : 2015年8月15日桜島膨張イベント時にCG-3M重力計で観測された相対重力および傾斜の連続的な時間変化, 火山, 第61巻, 4号, pp. 593-604.
- 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人 (2018) : 繰り返し相対重力観測で明らかになった桜島火山における1970年代以降の重力時空間変化, 日本地球惑星科学連合2018年大会, No. SVC41-36.
- 気象庁 (2018) : 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2018年6月12日閲覧.
- 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) : 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定, 第9回桜島火山の集中総合観測, pp. 47-55.
- 山本圭吾・大島弘光・前川徳光・及川純・園田忠臣

- 大久保修平・田中愛幸・今西祐一・渡邊篤志・坂守・風間卓仁 (2014a) : 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定 (2013年10月および11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2013年度報告書, 09.
- 山本圭吾・松島健・吉川慎・大倉敬宏・横尾亮彦・相澤広記・井上寛之・三島壮智・内田和也・園田忠臣・関健次郎・小松信太郎・堀田耕平・高橋温志・豊福隆史・浅野晴香・成田次範 (2014b) : 水準測量によって測定された桜島火山および始良カルデラ周辺域の地盤上下変動—2013年10月および11月測量の結果—, 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2013年度報告書, 06.
- Hotta, K., Iguchi, M. and Tameguri, T. (2016): Rapid dike intrusion into Sakurajima volcano on August 15, 2015, as detected by multi-parameter ground deformation observations, *Earth Planets Space*, Vol. 68, No. 68.
- Kazama, T., Okubo, S., Sugano, T., Matsumoto, S., Sun, W., Tanaka, Y. and Koyama, E. (2015): Absolute gravity change associated with magma mass movement in the conduit of Asama Volcano (Central Japan), revealed by physical modeling of hydrological gravity disturbances, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 120, pp. 1263-1287.
- Wessel, P. and Smith, W.H. F. (1998), New, improved version of generic mapping tools released, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 79, No. 47, pp. 579-579.

(論文受理日 : 2018年6月13日)