京都大学防災研究所年報 第 62 号 B
DPRI Annuals, No. 62 B, 2019

桜島火山における繰り返し相対重力測定
（2018年5月～2019年2月）

Repeated Relative Gravity Measurements in Sakurajima Volcano
(May 2018-February 2019)

風間卓仁[(1)]・山本圭吾・大島弘光[(2)]・岡田和見[(2)]・
大柳 諒[(1)]・園田忠臣・井口正人

Takahito KAZAMA[(1)], Keigo YAMAMOTO, Hiromitsu OSHIMA[(2)], Kazumi OKADA[(2)],
Ryo OYANAGI[(1)], 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 repeatedly measured at 19 gravity points in and around Sakurajima Volcano in May 2018, August-October 2018 and January-February 2019, to monitor spatiotemporal mass variations associated with volcanism. The relative gravity values measured from 2006 to 2019 showed a clear increase in the central part of the volcano by up to +4.7 μGal/yr. The gravity increase can be explained by the point mass increase of 1.9×10^{10} kg/yr under the Kita-dake summit at the depth of 3 km below sea level. This result implies that volcanic mass continuously increases under Sakurajima Volcano, even during the quiet period of eruptive activities at the Minami-dake crater.

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．鹿児島県の姶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 μGal/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, 2014）．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; Morishita 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，2018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2018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

2018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．重力測定は昨年度の測定（風間ら，2018a）と同様，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．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読取値を重力値に変換し（2.1節で詳述），地球潮汐・器械高・器械ドリフトの寄与を重力値から補正した上でSVOG基準の相対重力値を算出した．

2018年10月23日～26日には，北海道大学の2台のLaCoste重力計（G31・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．ただし，G892は測定初日の10月23日夕方に測定不能の状態に陥ったため，重力値を測定できたのはSVOGを含め5つの重力点のみである．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，2018年5・8・9月および2019年1・2月には，桜島島内の主要重力点（SVOGを含めて全8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であり，かつ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5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3台の重力計（G534・G680・D58）が使用された．特に，G534とD58についてはこれまで桜島にて重力測定がなされたことはなく，今年度に初めて桜島における相対重力測定が実施された．これら5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．

2.1 スケールファクターについて

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，2つの重力点間におけるバネ長変化を読み取ることで2点間の重力差 Δg を間接的に把握することができる．重力測定データの解析時には各重力点におけるバネ長の読み取り値 x を重力値 g へ変換する作業を行うが，この作業時には重力計出荷時に添付される変換表が必要となる．この変換表を関数 f によって表現すると，読取値→重力値の変換作業は以下の数式のように書ける．

$$g = f(x) \tag{1}$$

このような変換を2つの重力点の読取値に適用することで，2点間の重力差を

$$\Delta g_R = g_{R2} - g_{R1} = f(x_2) - f(x_1) \tag{2}$$

として得ることができる．ただし，式(2)の添え字 R

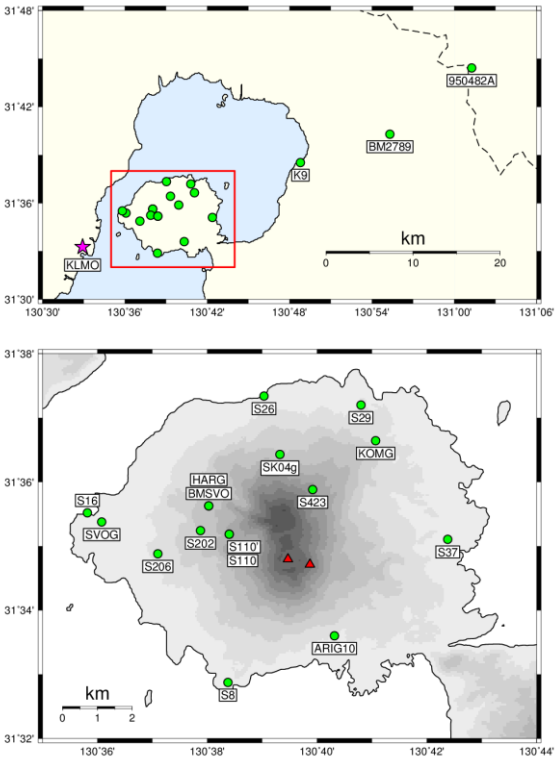

Fig. 1 Gravity points in and around Sakurajima Volcano (green circles). In the top panel, a pink star and a dashed line indicate Kagoshima Local Meteorological Observatory (KLMO) and the boundary of Kagoshima and Miyazaki Prefectures, respectively. The red rectangle also indicates the area of the bottom 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 craters, Minami-dake Crater (left) and Showa Crater (right).

Table 1 Gravity values measured in and around Sakurajima Volcano on 23-26 October 2018

Sensor	G31	G605	G680	G791	G892
Observer	Oshima	Oyanagi	Kazama	Okada	Yamamoto
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S16		6.144	6.142	6.139	
S26	-11.510		-11.525	-11.497	
S29	-33.442		-33.463	-33.417	
S37	-15.484	-15.513	-15.505	-15.467	
S8	-15.340	-15.321	-15.341	-15.321	
BMSVO	-89.121	-89.179	-89.157	-89.101	
HARG	-89.290	-89.335	-89.309	-89.262	
S202	-60.739	-60.784	-60.746	-60.728	
S206	-29.836	-29.851	-29.819	-29.801	
S110	-114.010	-114.091	-114.034	-113.989	
S110'	-113.944	-114.015	-113.975	-113.942	
ARIG10	-14.111	-14.121	-14.113	-14.100	-14.115
SK04g	-76.264		-76.301	-76.227	
S423	-141.587	-141.661	-141.629	-141.554	
KOMG	-37.216	-37.271	-37.255	-37.227	
K9	19.565	19.575	19.553	19.551	19.530
BM2789	-34.229	-34.295	-34.256	-34.228	-34.239
950482A	-18.360	-18.402	-18.384	-18.355	-18.383

はその重力値がLaCoste型相対重力計で得られたことを，また添え字 1 および 2 は各重力点の番号を意味している．また，この式中では簡単のために潮汐・器械高・器械ドリフトの効果を無視している．

一方，各重力点では絶対重力計を用いた絶対重力測定も可能であり，それによって得られた絶対重力値（g_{A1}およびg_{A2}）から重力差を

$$\Delta g_A = g_{A2} - g_{A1} \quad (3)$$

として得ることもできる．2点間の重力差を相対重力と絶対重力という2つの方法で求めたので Δg_R と Δg_A は本来一致するはずであるが，実際両者には観測精度を超えたずれが生じることが多い．その原因の1つには，相対重力のデータ解析時における読取値→重力値の変換関数 f が現実と異なる可能性がある．というのも，変換関数 f は重力計出荷時点で製造元が作成した関数であり，相対重力計を使用し続けているとバネの経年劣化などに伴い0.01 %程度の桁で長期的に時間変化する．この影響を確実に補正しないと相対重力計によって正しい重力値を得られないので，絶対重力と相対重力の並行観測によって変換関数 f のずれの大きさを定期的に決定しておく必要がある．すなわち，絶対重力測定で得られた重力差 Δg_A が2点間の真の重力差であると仮定した上で，Δg_R と Δg_A のずれを補正するために以下の定数 c を決定すればよい．

$$\Delta g_A = c \cdot \Delta g_R \quad (4)$$

この定数 c はスケールファクターと呼ばれており，スケールファクターを掛け合わせることで正しい相対重力値 $c \cdot \Delta g_R$ を得ることができるのである．

ところで，2018年度の桜島相対重力測定においてはG534とD58という2つの相対重力計が初めて桜島で重力測定を実施した．これらの重力計は2017年度末にオーバーホールを経て京都大学理学研究科に納入されたものであり，事前にスケールファクターを決定しておく必要があった．そこで我々は2018年7月～8月に熊本県内において絶対重力と相対重力の比較測定を実施し，この2つの重力計のスケールファクターを決定した．この詳細については別論文にて議論するが，この比較測定によって得られた2つの重力計のスケールファクターは以下の通りである．

$$c(\mathrm{G534}) = 1.000232 \pm 0.000088 \quad (5)$$

$$c(\mathrm{D58}) = 0.996992 \pm 0.000085 \quad (6)$$

本研究ではこれらの値を用いてG534およびD58のスケール補正を実施しており，Tables 1 and 2に記載された重力値はスケール補正が既に施されているものである．

なお，京都大学理学研究科のG680については従来から，2016年3月にニュージーランドで決定されたス

Table 2 Gravity values measured in Sakurajima Volcano in May 2018, August-October 2018 and January-February 2019. The observer names of Kazama, Yamamoto and Oyanagi are abbreviated as K, Y and O respectively.

Year	G605	G892	G534	G605	G680	D58	G534	G605	G605	G605
Month	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2019	2019
Sensor	5	5	8	8	8	8	9	9	1	2
Observer	K	Y	K	K	K	K	K	O	K	Y
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S16	6.147	6.128							6.148	6.157
S26							-11.516	-11.516		
S27							-15.506	-15.517		
BMSVO	-89.161	-89.086							-89.198	-89.184
HARG	-89.322	-89.223	-89.288	-89.278	-89.288	-89.294	-89.317	-89.341	-89.368	-89.345
S206	-29.845	-29.778	-29.801	-29.817	-29.808	-29.802			-29.863	-29.846
ARIG10	-14.099						-14.119	-14.145	-14.133	-14.137

ケールファクター値（Fukuda et al., 2017）

$$c(\mathrm{G680}) = 1.000305 \pm 0.000043 \qquad (7)$$

をスケール補正に用いている．この他の4つの重力計（G31・G605・G791・G892）についてはスケール補正を特に実施していない(すなわち $c = 1.000000$ を仮定している）か，あるいはスケールファクターに暫定的な値を用いている．そのため，これら4つの重力計では正しい相対重力値が得られていない可能性があるが，ある重力点の重力時間変化に注目するとスケールファクターの影響は十分に小さいことが分かっている（風間ら, 2018a）．本研究も同様に重力時間変化に着目するので，本稿ではこれら4つの重力計についてこれ以上のスケール補正を実施しないことにする．ただし，今後これら4つの重力計で正しい相対重力値を知る必要が生じた場合には，スケールファクターの精密な検定作業が不可欠である．

3. 2006年以降の経年的な重力時空間変化

3.1 BMSVOおよびS110の重力時間変化

本研究は2006年～2018年度末に得られた相対重力値を取りまとめ，風間ら（2018a）の方法を用いて各重力点の重力経年変化速度を計算した．Fig. 2はSVOG（桜島西麓; 標高27 m）を基準としたBMSVO（桜島西部のハルタ山頂上; 標高408 m）およびS110（桜島中央部の大正噴火火口付近; 標高519 m）の相対重力変化を示していて，観測値を丸印で，重力経年変化の計算値を黒色太線で示している．両重力点の相対重力観測値は陸水起源の重力擾乱の影響で±50 μGal程度の範囲でばらついているものの（風間ら, 2018a），約13年間の期間内で緩やかな重力増加を示している．直線回帰によって得られた重力経年変化速度はBMSVOで$+2.7 \pm 1.3$ μGal/yr，S110で$+4.7 \pm 1.5$ μGal/yrである．

ところで, Fig. 2によると他の重力計に比べてG605の相対重力値（緑線）のばらつきが特に大きいことが分かる．この原因としては2つの可能性が考えられ，まず1つにはG605が年4回前後の頻度で相対重力測定を実施しているために，周期1年前後の陸水重力擾乱が大きな振幅で検出されている可能性である．そもそも桜島火山を有する鹿児島県鹿児島市では平年で2526 mm/yrもの降水が観測されており（気象庁, 2019），陸水擾乱の概算値は水の無限平板がなす重力変化0.042 μGal/mmを掛け合わせることで106 μGalにも達する．この概算値はHARG（BMSVOに至近の屋内重力点）における絶対重力連続観測で得られた陸水擾乱の振幅に近く（風間ら, 2014），G605のばらつきが陸水擾乱によるものであるという可能性を示唆している．ただし，実際の年間降水量は年ごとに異なり，しかも陸水擾乱は地下水流動などの影響で1年未満の時定数で時々刻々と変化することが知られている（e.g., Hinderer et al., 2007）．観測された重力値から火山起源の重力変化のみを抽出するためには，物理モデルなどの客観的な手法によって陸水擾乱を適切に補正することが必要である（e.g., Kazama et al., 2015）．

もう1つの可能性は，他の重力計に比べてG605の観測誤差が大きいという可能性である．というのも，ここ数年は大学院生がG605の重力測定を主に担当しているが，相対重力測定の習熟度が低い学生の場合には観測誤差が大きくなる恐れがある．実際，2017年～2018年にG605で得られた相対重力値は他の重力計の値と大きく離れていて，G605だけ観測誤差が大きいことを示唆している．この問題の対策としては，

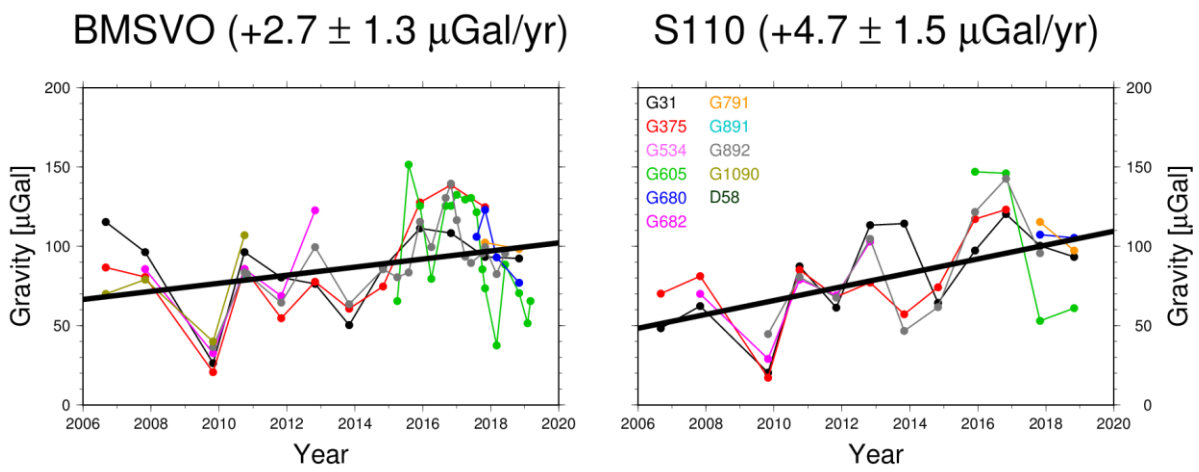

Fig. 2 Circles and thick solid lines indicate the observed gravity values relative to SVOG and the regression lines to the observed gravity values, respectively. The left and right panels show the gravity variations at BMSVO and S110, respectively.

操作方法が煩雑なLaCoste型相対重力計ではなく，重力測定が容易なフィードバック式相対重力計を学生が担当することを検討している．実際，2017年末にオーバーホールされたD58重力計は外観こそLaCoste型重力計と同等であるものの，フィードバック機構を用いた自動重力観測が可能である．また，無線規格Bluetoothを用いて任意のデバイスに2 Hzで重力値をリアルタイムで送信するので，重力測定値を連続的に保存することもできる．このような重力計をこれ以降の測定に活用することで，重力測定担当者の習熟度の影響を最小化できるものと考えられる．

3.2　桜島火山における重力時空間変化

Fig. 3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速度（桜島西麓のSVOG基準）を矢印で，重力経年変化速度の標準偏差を楕円で示している．桜島島内の重力変化は火口に近いほど大きく，西側山頂部のS110と西側山腹のS202で最大値+4.7 μGal/yrを取っている．また，昨年度末の時点で最大値を取っていた北側山頂部のS423（風間ら, 2018a）も+3.9 μGal/yrと依然大きな値を示している．つまり，南岳噴火活発期（1970年代～1990年代前半）と同様に（山本ら, 1998），2000年代以降においても桜島中央部での重力増加は継続していることが分かる．

このような重力時空間変化の主要因として，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が考えられる．実際，石原ら（1986）は1975年～1982年の相対重力データを解析し，南岳直下の海抜下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（2018b）は石原ら（1986）の解析手法を再検討することでより長期間の相対重力データを解析した結果，1975年～1992年には北岳直下の海抜下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．さらに，大柳ら（2019）は2006年～2018年度末の相対重力変化から地殻変動に伴う効果を差し引くことで，北岳直下の海抜下3 kmに1.9×10^{10} kg/yrの質量増加が起きていることを示した．このように，南岳噴火が静穏化した2000年代以降においても山体直下の質量増加は（その増加速度を3割～6割程度に減らしつつも）継続していると考えられる．この質量増加の今後の傾向を監視するためには継続的な相対重力測定が不可欠であり，地殻変動や陸水擾乱といった既知の重力変化の効果を適切に補正することが重要である．

4.　まとめ

我々は2018年5・8・9・10月および2019年1・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4.7 μGal/yrの重力増加が観測されていることが分かった．この重力増加は北岳直下の海抜下3 kmにおける1.9×10^{10} kg/yrの質量増加で説明可能であり，南岳噴火活発期（1970年代～1990年代前半）と同様に2000年代以降においても山体直下の質量増加は継続していると考えられる．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，質量変動源の推定を定期的に実施することで火山内部の質量変動の推移を監視していく必要がある．

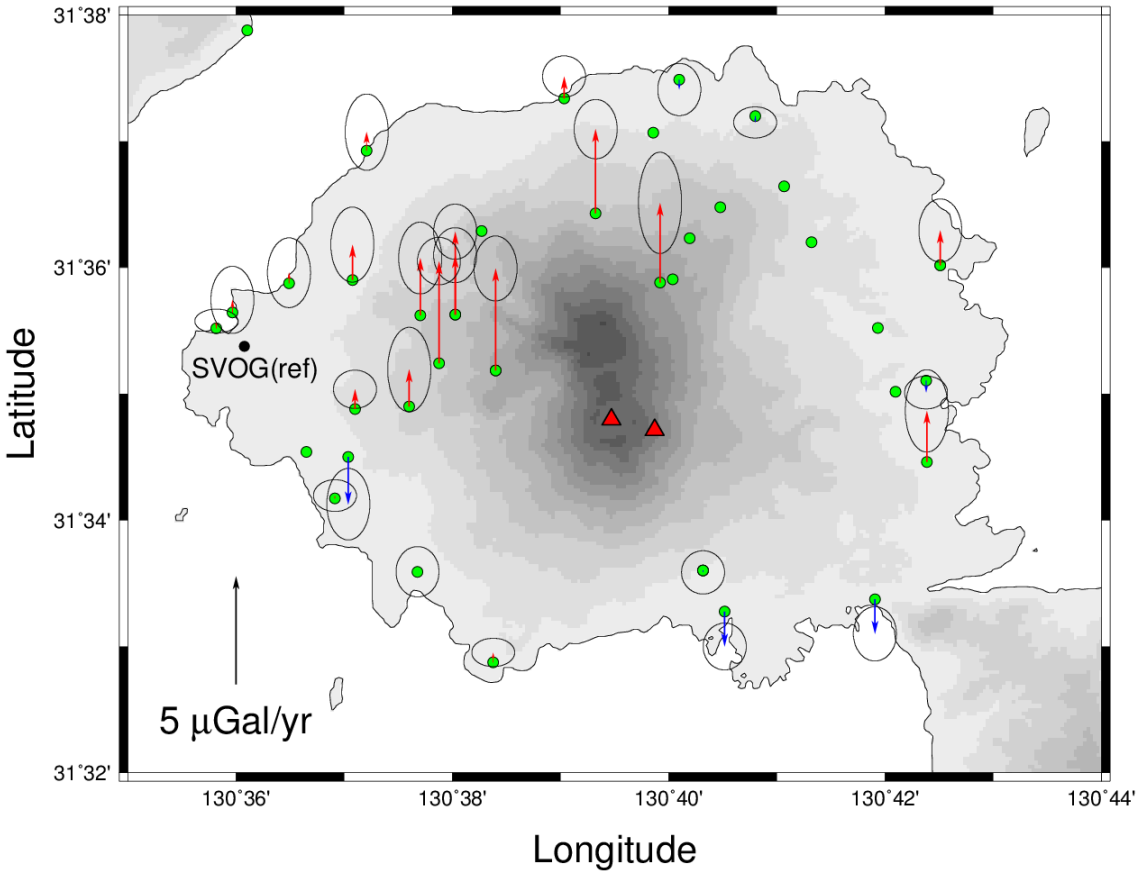

Fig. 3 Arrows and ellipses indicate the gravity variation rates relative to SVOG during 2006-2019 and those standard deviations, respectively.

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．LaCoste型相対重力計G534およびD58のスケールファクター検定においては大倉敬宏氏・吉川慎氏・長縄和洋氏（以上，京都大学理学研究科）にご協力いただいた．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.

大柳諒・風間卓仁・山本圭吾・大島弘光・岡田和見・園田忠臣・井口正人（2019）：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1990年代以降の重力時空間変化．日本地球惑星科学連合2019年大会，No. SVC38-P38.

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（2018a）：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）．京都大学防災研究所年報，第61B巻，pp. 330-336.

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（2018b）：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（2019）: 過去の気象データ検索, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php.

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・渡邉篤志・坂守・風間卓仁（2014）：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，No. 09.

Fukuda, Y., Takiguchi, H., Kazama, T., Nishijima, J., Gulyaev, S., Natusch, T., Amos, M., Stagpoole, V. and Pearson, C. (2017): New absolute gravity measurements in New Zealand. IAG Symposia, Vol. 148, pp. 95-101.

Hinderer, J., Crossley, D. and Warburton, R.J. (2007): Gravimetric Methods – Superconducting Gravity Meters, pp. 65-122. In: Schubert, G. (Ed.), Treatise on Geophysics, Elsevier, Amsterdam, 6054 pp.

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.

Morishita, Y., Kobayashi, T. and Yarai, H. (2016): Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, Geophys. Res. Lett., Vol. 43, pp. 4197-4204.

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：2019年6月14日）