

桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2022年10月および2023年2~3月)

Repeated Relative Gravity Measurements in Sakurajima Volcano (October 2022 and February-March 2023)

風間卓仁⁽¹⁾・大柳 諒⁽¹⁾・山本圭吾・岡田和見⁽²⁾・
大島弘光⁽²⁾・竹中悠亮・井口正人

Takahito KAZAMA⁽¹⁾, Ryo OYANAGI⁽¹⁾, Keigo YAMAMOTO, Kazumi OKADA⁽²⁾,
Hiromitsu OSHIMA⁽²⁾, Yusuke TAKENAKA 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 20 gravity points in and around Sakurajima Volcano in October 2022 and February-March 2023, to monitor spatiotemporal mass variations associated with volcanic activity. The gravity values obtained from 1998 to 2023 showed a clear increase of up to $+4.3 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ in the central part of the volcano. The gravity increase can be explained by the point mass increase of $8 \times 10^9 \text{ kg}/\text{yr}$ under the center of the volcano at a depth of 3.5 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, 陸水重力擾乱

Keywords: Sakurajima Volcano, relative gravity, mass redistribution, crustal deformation, hydrological gravity 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一つである。始良カルデラ南部に位置する桜島火山(鹿児島県)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 $100 \mu\text{Gal}$ 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 $-13 \sim -20 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ 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時間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、桜島中央部の相対重力値は近年も緩やかに増加しており(風間ら, 2018)、桜島直下の質量増加が現代においても継続していると示唆されている(大柳ら, 2019)。また、2006年6月には昭和火口からの噴火活動が再開し(井口ら, 2010; 宮城ら, 2010)、2015

年8月にはダイク貫入イベント (Hotta et al., 2016; 風間ら, 2016; Morishita et al., 2016) が発生するなど、桜島では南岳噴火の静穏化以降も依然として様々な火山活動が確認されている。このような火山活動の経過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・予測するためにも重力データの継続的な取得が必要である。

そこで我々は、2022年10月および2023年2~3月に桜島火山およびその周辺の重力点で相対重力のキャンペーン測定を実施した。本稿では2022年度に取得された相対重力値を全て示すとともに、南岳火口の

噴火静穏期に該当する1998年以降の経年的な重力時空間変化について議論する。

2. 2022年度における相対重力測定

2022年度に相対重力測定を実施した重力点はFig. 1の緑色丸印であり、SVOG (桜島火山観測所; 相対重力の基準点) を含む計20点である (点の記は付録1および風間ら, 2022を参照)。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。各測定日における重力測定の実施状況は以下の通りである。

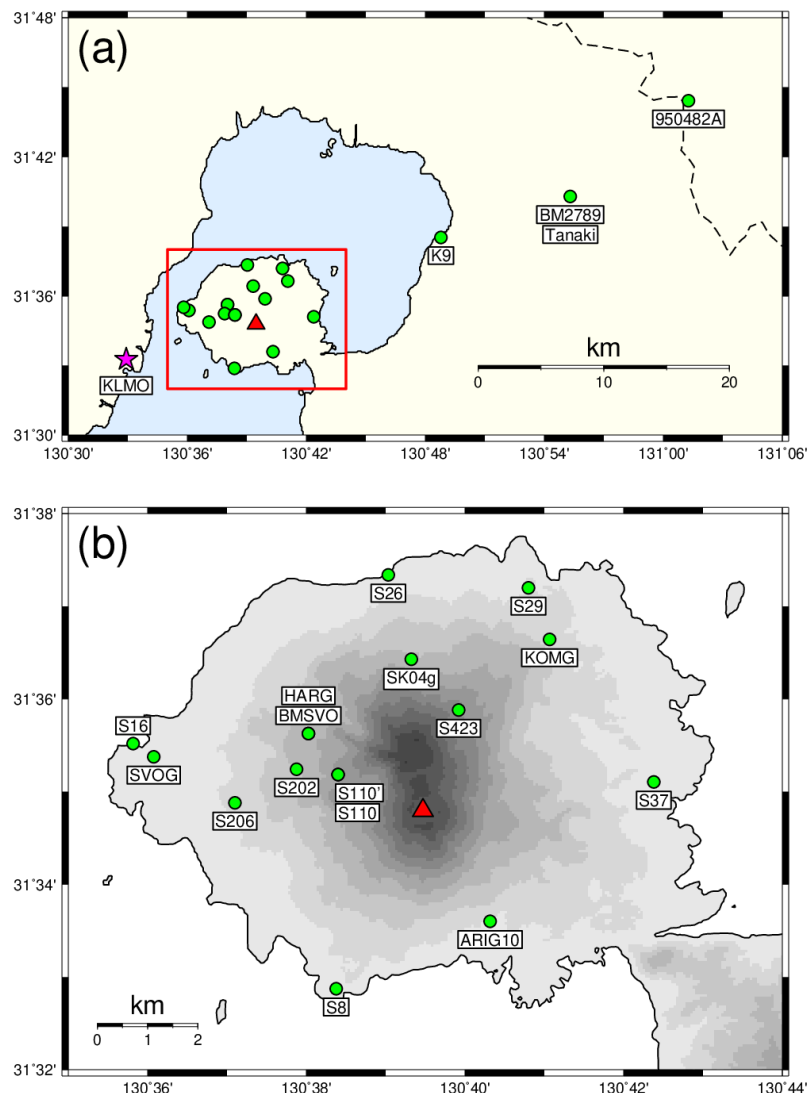


Fig. 1 Gravity points in and around Sakurajima Volcano. Green circles and red triangles indicate the gravity points and Minami-dake Crater, respectively. (a) The regional map around Sakurajima Volcano. A pink star, a red rectangle and a dashed line indicate the location of the weather station at Kagoshima Local Meteorological Observatory (KLMO), the area of the (b)'s panel and the boundary between Kagoshima and Miyazaki Prefectures, respectively. (b) The topographic map of Sakurajima Volcano, contoured every 100 m altitude. The topographic data was provided by Geospatial Information Authority of Japan.

- 2022年10月24日～29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2台のLaCoste重力計（G534・G680）、および京都大学防災研究所桜島火山観測所の1台のLaCoste重力計（G605）によって全20点の相対重力測定を集中的に実施した。
- 2023年2月28日～3月2日には、京都大学理学研究科のLaCoste重力計G534を用いて、桜島島内の主要重力点における相対重力測定を実施した。

3. 2022年度の相対重力測定値の算出

次に、我々は相対重力測定データを以下の5つのプロセスに沿って解析し（e.g., 風間, 2022）、SVOG基準の相対重力値を決定した。

- [1] 読取值から重力値への変換. 現場で記録した読取值（パネの長さに相当） x を、重力計メーカー作成の変換関数 $f(x)$ を用いて重力値 $g = f(x)$ に変換する。
- [2] スケールファクター補正. メーカー作成の変換関数 $f(x)$ が実際の変換関数と乖離している場合、この乖離を補正するためにスケールファクター S を掛け合わせ、 $g = S \cdot f(x)$ として重力値を再計算する。ただし、本稿では重力時間変化を推定する際にスケールファクターの寄与を同時に補正するので（次章で詳述）、この時点ではスケールファクター補正を行わないこととする。
- [3] 器械高補正. 現場で測定した器械高（重力点～相対重力計上面間の比高）に重力鉛直勾配（フリーエア勾配 $3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ を仮定する）を掛け合わせ、この値を各重力点の重力値に足し合わせる。
- [4] 潮汐補正. 各重力点および各時刻の潮汐重力変化量を予測計算し、実際に測定された重力値からこの潮汐予測値を差し引く。
- [5] 器械ドリフト補正. 各重力計および各日の器械ドリフトが線形的であると仮定し、器械ドリフト変化速度と、往復折り返し地点における重力ステップ変化量を推定する。ただし、2022年10月25日にG791重力計で測定された重力データについては、付録2に示す通り別の方法によって器械ドリフト等の寄与を補正している。

以上のプロセスにより決定したSVOG基準の相対重力値をTable 1に示す（単位: mGal）。各コラムは各年月に各重力計で測定された相対重力値を示しており、ある年月に複数の相対重力値が測定されている重力点については全測定値の平均値を記載している。

4. 1998年以降の重力時間変化

我々は1998年～2023年における各重力点の重力変化が直線的であると仮定し、この期間における各重力点の重力変化速度を以下のように推定した。まず、ある重力点で時刻 t_i に相対重力計 j を用いて測定された相対重力値を Δg_{ij} と書くと、 Δg_{ij} は以下のように表現できる（風間ら, 2018）。

$$\Delta g_{ij} = at_i + b_j \quad (1)$$

ただし、 a は重力経年変化速度、 b_j は時刻 $t = 0$ における重力計 j の相対重力値（すなわち切片値）である。本来切片値は重力変化速度と同様に重力計に依らないはずであるが、今回はデータ解析時にスケールファクターの寄与を補正していないため、各重力計で取得された重力値は系統的な器差を含んでいる（Table 1参照）。そこで本研究は、切片値を重力計ごとに b_j として別々に定義・推定し、スケールファクター起源の器差を経験的に補正する。次に、1998年～2023年の間に測定された相対重力値を Δg_{ij} に、year単位の時刻を t_i に代入し、各重力点に対して1個の観測方程式を作成する。最後に、各観測方程式を最小二乗法によって逆計算し、各重力点の重力経年変化速度 a と切片値 b_j を推定する。なお、LaCoste重力計G605の機器不良に伴いG605の測定値がばらつく事象が確認されたため、これ以降の解析ではG605の測定値を用いないこととする。

Fig. 2はSVOG（桜島西麓の桜島火山観測所；標高27 m）を基準とした、S110（桜島中央部の大正噴火口付近；標高519 m）およびBMSVO（桜島西部のハルタ山頂上；標高408 m）の重力時間変化を示している。図中では各重力計の測定値を丸印・三角印・星印で、重力経年変化の計算値を灰色太線で示しており、切片値 b_j の器差については補正済みである。対象期間の重力値は両重力点において経年的に上昇しており、重力変化速度とその標準偏差はS110で $+4.3 \pm 1.0 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ 、BMSVOで $+2.8 \pm 0.8 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ である。

なお、重力測定値（丸印・三角印・星印）は重力経年変化の計算値（灰色太線）の周囲をおよそ $\pm 50 \mu\text{Gal}$ の振幅で変動しているが、これは重力測定誤差や陸水起源の重力擾乱によるものと考えられる。特に、2009年10月の重力測定値は全ての重力計で減少を示しており、これは2009年の降水量が平年よりも900 mm程度少なかった（図1星印の鹿児島地方気象台の気象データより；気象庁, 2023）影響で陸水擾乱の寄与が小さかったことを示唆している。火山活動に伴う重力変化を今後より高精度に把握するためには、陸水モデルを用いて陸水重力擾乱を補正（e.g., 風間ら, 2014; Kazama et al., 2015）した上で、各重力計の測定誤差を精査する必要がある。

Table 1 Gravity values measured in and around Sakurajima Volcano in October 2022 and February-March 2023 (unit: mGal). The “Dial Value” line indicates the reading value at the SVOG’s gravity point in mGal.

Year/Month	2022/10	2022/10	2022/10	2022/10	2022/10	2023/02-03
Gravimeter	G31	G534	G605	G680	G791	G534
Observer	Oshima	Oyanagi	Yamamoto	Kazama	Okada	Kazama
Dial Value	3046.1	2948.9	2814.3	3003.6	3047.6	2946.3
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S16	+6.146	+6.127	+6.141	+6.153	+6.129	+6.121
S26	-11.491	-11.503	-11.521	-11.548	-11.490	-11.504
S29	-33.434	-33.455	-33.455		-33.441	-33.461
S37	-15.471	-15.492	-15.475	-15.526	-15.475	-15.480
S8	-15.332	-15.344	-15.310		-15.325	-15.328
BMSVO	-89.122	-89.118	-89.115		-89.073	-89.129
HARG	-89.281	-89.273	-89.270	-89.309	-89.239	-89.284
S202	-60.737	-60.736	-60.741		-60.714	-60.740
S206	-29.832	-29.809	-29.813	-29.822	-29.799	-29.819
S110	-114.005	-114.020	-114.056		-113.984	
S110'	-113.934	-113.941	-113.963		-113.916	
ARIG10	-14.096	-14.119	-14.086	-14.149	-14.096	-14.107
SK04g	-76.240	-76.268	-76.293		-76.235	-76.272
S423	-141.554	-141.571	-141.632		-141.544	-141.571
KOMG		-37.230	-37.221	-37.189		-37.230
K9	+19.575	+19.523	+19.588	+19.560	+19.537	
BM2789	-34.220	-34.267	-34.210		-34.234	
Tanaki		-39.000				
950482A	-18.360	-18.380	-18.330	-18.338	-18.357	

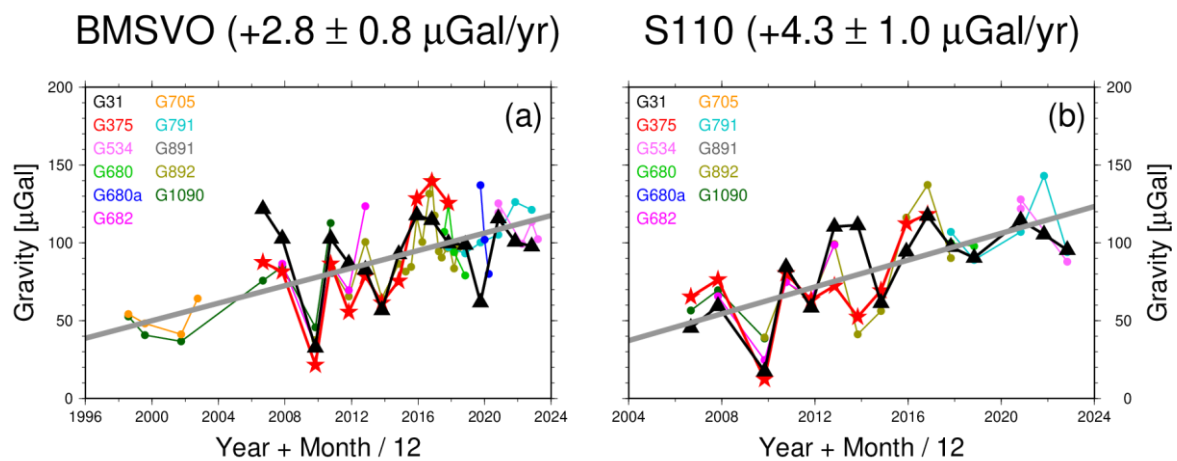


Fig. 2 Symbols and thick gray lines indicate the measured gravity values relative to the SVOG’s reference gravity point and the regression lines to the observed gravity values, respectively. The panels of (a) and (b) show the gravity variations at the BMSVO and S110 gravity points, respectively.

5. 1998年以降の重力時間変化の空間分布

Fig. 3の青色矢印は桜島島内の各重力点における1998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（宮崎県都市の電子基準点）に対するSVOGの重力経年変化速度は $-0.8 \pm 1.6 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ であった。本来桜島火山の活動に伴う重力変化を把握するには遠方の重力点を基準点とすべきであるが、今回は950482A～SVOG間の重力変化の誤差範囲に $0.0 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ が含まれている。そこで本稿では、Fig. 3の青色矢印が絶対重力値の時間変化と一致するものと仮定した上でこれ以降の議論を進める。

桜島島内の重力変化は火口に近いほど大きく、特に山頂西側直近のS110で最大値 $+4.3 \mu\text{Gal}/\text{yr}$ を取っている。そもそも山頂部で重力増加が大きいう特徴は南岳噴火活発期（1970年代～1990年代前半）に既に確認されていたが（e.g., 石原ら, 1986; 山本ら, 1998）, Fig. 3は「南岳噴火活動静穏化後の1998年以

降においても重力増加が継続している」ということを意味している（風間ら, 2018; 大柳ら, 2019）。

桜島中央部における重力増加の要因として、まず検討すべきなのは地殻変動の影響である。桜島北部の海拔下約10 kmには球状のマグマだまりが存在しており、約 $6.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ の速度で膨張していることがGNSS観測から明らかになっている（e.g., Takayama and Yoshida, 2007）。このマグマだまりの膨張に伴う重力変化は萩原(1977)の方法によって計算可能であるが、桜島では地面の隆起に伴って広域的な重力減少が期待されるため、Fig. 3の重力増加の特徴を説明することはできない。また、桜島中央部の海拔下約3 kmでは別のマグマだまりが収縮していると考えられているが、この浅部マグマだまりは収縮速度が小さいために桜島中央部の重力増加を十分に説明することができない（大柳ら, 2019）。

桜島中央部の重力増加の要因としてもう1つ考えられるのが、桜島中央部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。大柳(2021)は南岳噴火活発期（1975年～1992年）の重力変

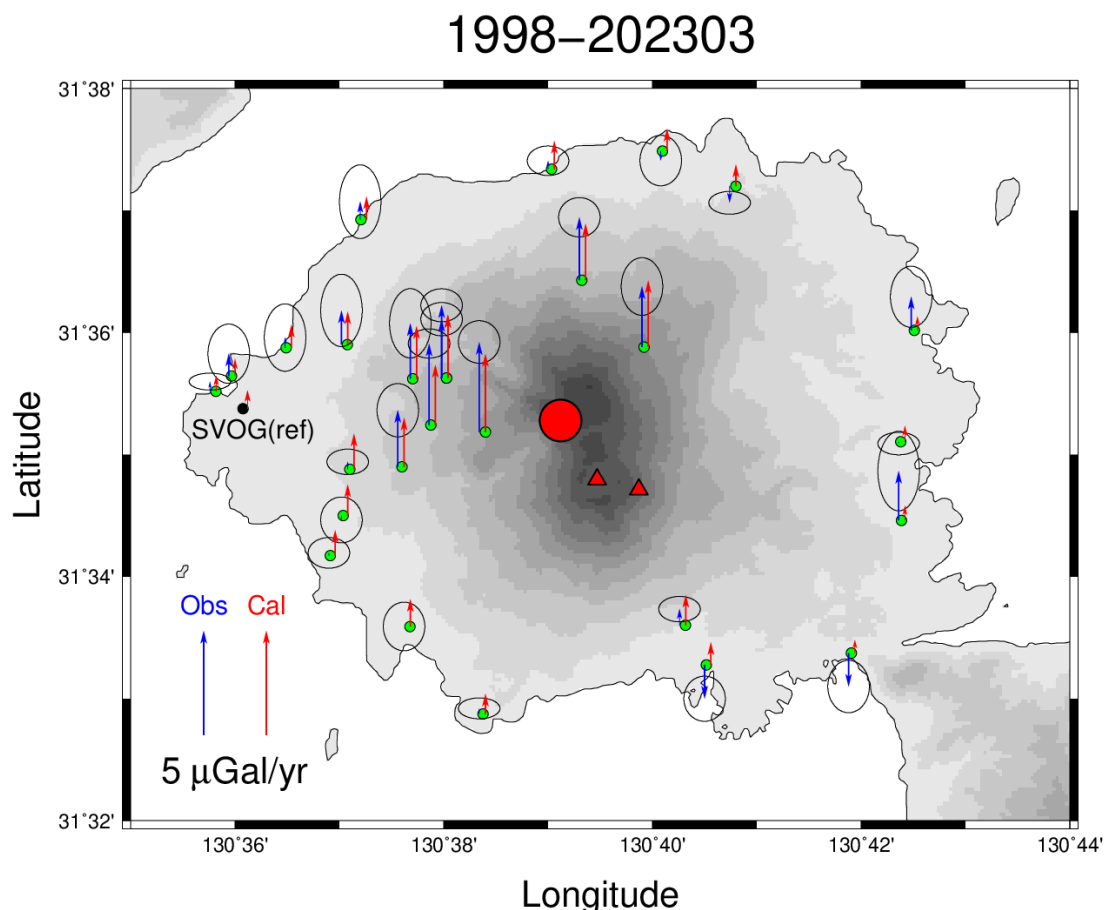


Fig. 3 Blue arrows and black ellipses indicate the observed gravity variation rates relative to SVOG during 1998-2023 and those standard deviations, respectively. Red arrows indicate the calculated gravity variation rates due to the point mass source located under the center of the volcano (the red circle).

化から地殻変動に伴う効果を差し引き、その後の重力残差を桜島中央部の海拔下3.9 kmにおける 4.45×10^{10} kg/yrの質量増加によって再現した。実際、本研究で得られた1998年以降の重力時空間変化 (Fig. 3の青色矢印) についても、桜島中央部の海拔下3.5 kmに 8×10^9 kg/yrの質量増加を仮定することでよく再現できる (Fig. 3の赤丸は質量変動源の位置を、赤色矢印はこの質量変動から計算される重力変化を意味している)。地殻変動を付随しない質量増加の要因としては、例えば火道内マグマ対流に伴う脱ガスマグマの密度増加 (e.g., Shinohara, 2008) が想定されている。今後桜島直下の質量増加を定量的に把握し、かつ質量増加の要因を解明していくためには、本研究の相対重力測定を継続しながら、その重力データを火山ガスなどの火山観測データ (e.g., Shinohara et al., 2020) と比較することが不可欠である。

6. まとめ

我々は2022年10月と2023年2~3月に桜島火山周辺で相対重力測定を実施し、SVOG基準点に対する計19重力点の相対重力値を決定した。また、1998年~2023年の重力経年変化速度を計算したところ、桜島中央部ではこの期間に最大+4.3 μ Gal/yrの重力増加が観測されていることが分かった。この重力増加を説明するためにはマグマだまりの体積変化に伴う地殻変動だけでは不十分であり、桜島中央部の海拔下3.5 km付近における約 8×10^9 kg/yrの (地殻変動を伴わないような) 質量増加が必要である。この質量増加の原因には脱ガスマグマの密度増加などの物理プロセスが想定されるので、今後は相対重力測定を継続しながら他の火山観測データを用いて桜島火山活動を統合的に解釈することが不可欠である。

謝 辞

2022年度の測定では隠岐颯太氏・八木優明氏・小田雄大氏・西上直志氏に、および2023年度の測定では小川泰生氏 (いずれも京都大学学生) にご協力いただいた。本研究の一部は京都大学防災研究所一般共同研究 (課題番号2022G-08)、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 (第2次)」の助成を受けて遂行された。本稿の図は描画ソフトGMT (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。以上、ここに記して感謝いたします。

参考文献

井口正人・横尾亮彦・為栗健 (2010): 桜島昭和火口噴

火の規模について、京都大学防災研究所年報、第53B巻, pp. 233-240.

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.

大柳諒 (2021): 繰り返し相対重力測定データを用いた1975年~1992年における桜島火山内部の質量増加プロセスの研究, 京都大学大学院理学研究科修士論文, 44 pp.

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): 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 (2022): LaCoste & Romberg型重力計を用いた重力加速度の相対測定. 京都大学学術情報リポジトリ, 15 pp.

風間卓仁・大柳諒・山本圭吾・岡田和見・大島弘光・竹中悠亮・井口正人 (2022): 桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2021年10月および2022年3月), 京都大学防災研究所年報, 第65B巻, pp. 67-76.

気象庁 (2023): 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.

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, 第52巻, 2号, pp. 301-309.

宮城磯治・伊藤順一・篠原宏志・鹿児島地方気象台 (2010): 火山灰から見た2008年の桜島昭和火口の再活動過程. 火山, 第55巻, 1号, pp. 21-39.

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41B-1巻, pp. 153-160.

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 (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.

Hotta, K., Iguchi, M. and Tameguri, T. (2016): Rapid dike
intrusion into Sakurajima volcano on August 15, 2015,
as detected by multi-parameter ground deforma-
tion 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.

Shinohara, H. (2008): Excess degassing from volcanoes
and its role on eruptive and intrusive activity, *Rev.
Geophys.*, Vol. 46, No. RG4005.

Shinohara, H., Kazahaya, R., Ohminato, T., Kaneko, T.,
Tsunogai, U. and Morita, M. (2020): Variation of
volcanic gas composition at a poorly accessible volcano:
Sakurajima, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.
407, No. 107098.

Takayama, H. and Yoshida, A. (2007): Crustal defor-

mation in Kyushu derived from GEONET data, *J.
Geophys. Res.*, Vol. 112, No. B06413.

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.

付録 1

毎年10月の相対重力測定では、例年19箇所の重力
点で測定を実施している。この重力点の記は風間ら
(2022)の付録に記載されている。

さらに2022年10月27日の測定では、国土地理院一
等水準点BM2789の至近に重力点Tanakiを新設した。
これはBM2789の将来的な移設や廃点の可能性を想
定したためである。BM2789は桜島遠方の重力不変点
として扱われることもあるので、この地域での継続
的な重力測定の重要性を鑑みて、今回重力点Tanaki
を新設した。重力点Tanakiは鹿児島県曾於市の棚木
公民館の敷地内にあり、G534重力計による測定の様
子はFig. 4に示す通りである。

今後本研究では、水準点BM2789での測定が可能で
ある限り毎年の測定を継続し、その上でG534重力計
については重力点Tanakiでの測定も毎年実施する。
もしBM2789での測定ができなくなった場合には、
Tanakiを化成点として利用することで、この地域に
おける相対重力測定を継続させる予定である。

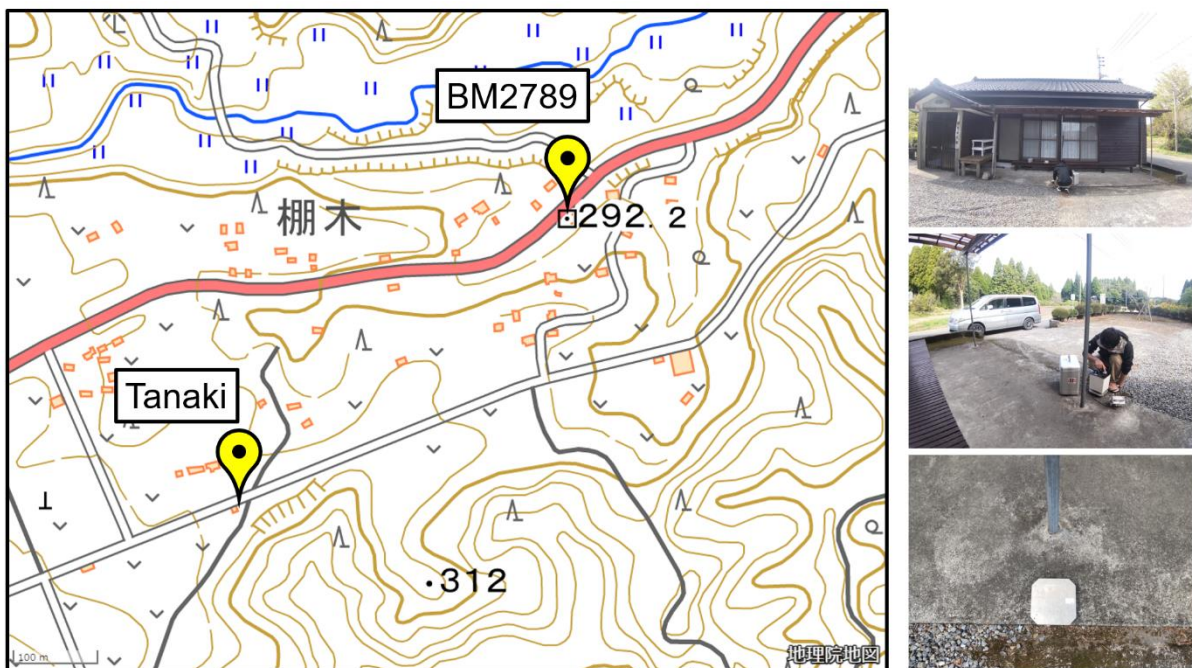


Fig. 4 The left map shows the positions of two gravity points, BM2789 and Tanaki, located in Soo City, Kagoshima Prefecture. The map was derived from the website of Geospatial Information Authority of Japan. Right pictures show the relative gravity measurement by the LaCoste-G534 gravimeter at the Tanaki gravity point on October 27, 2022.

付録 2

本研究の相対重力測定データは第3章の方法で実施したが、2022年10月25日にG791重力計で測定された重力データについては以下の方法で解析した。

2022年10月25日のG791の重力測定は、SVOG - S16 - S206 - S202 - HARG - BMSVO - S110 - S110'のルートで実施された。ただし、S110における復路測定終了後の13:30頃に、G791の収納箱を斜面にぶつけてしまうという事故が発生した。本来であればS110重力点とS110'重力点で再測定が必要であるが、当日の測定スケジュールの関係上、我々はそれ以降も予定通り測定を続けることにした。その結果、復路のBMSVO以降の重力測定において、読取値に大きな正のステップが生じていることが確認された。

この重力データを解析するにあたり、我々は第3章の[1]-[4]の項目については通常と同じ解析方法を取った上で、項目[5]の器械ドリフトについては以下の観測方程式を立てることで各係数(A_i , B , C , D , E)を最小二乗法により推定した。なお、本手法を用いた重力値の推定は風間ら(2022)の付録でも実施されている。

$$g_i(t) = A_i + B \cdot (t - t_0) + C \cdot H(t - t_1) + [D \cdot (t - t_2) + E] \cdot H(t - t_2) \quad (2)$$

ただし、 $g_i(t)$ は時刻 t における重力点 i の相対重力測定値、 t_0 は往路の測定開始時刻(8:47)、 $H(x)$ はヘビサイド関数、 t_1 はS110'における折り返し時刻

(12:30)、 t_2 は事故発生時刻(13:30)である。また、 A_i は重力点 i の重力値、 B は通常の器械ドリフト速度、 C は往復折り返し地点における重力ステップ変化量、 D は事故に伴う追加の器械ドリフト速度、 E は事故に伴う重力ステップ変化量である。なお、観測データの個数は16個(往路8個+復路8個)、未知パラメータの個数は12個(重力点が8点あるため A_i は8個+その他のパラメーターが4個)である。

Table 2は本手法で計算された各係数の値である。事故に伴う重力ステップ変化量は $E = +179.8 \mu\text{Gal}$ であり、これは現場読取値が事故直後にプラス方向に大きくジャンプしたことと調和的である。また、事故に伴う追加の器械ドリフト速度は $D = -32.3 \mu\text{Gal/hr}$ と計算されたので、事故に伴う急激な読取値変化は $\text{abs}(E/D) = 5.57 \text{ hr}$ で収束するものと試算できる。

本研究では、G791重力計で2022年10月25日に測定された相対重力値としてTable 2の値を使用した。その上で、別日に測定された相対重力値や、通常の解析で得られた相対重力値を参照することで、G791重力計の最終的な相対重力値としてTable 1を得た。

付録 3

添付の圧縮ファイルGravityData.zipは、桜島火山における2022年度の相対重力測定データとその解析結果を格納している。GravityData.zip内部のフォルダ構造は yyyy/mm/Gxxx/aaa となっており、フォルダ名の詳細は以下の通りである。

Table 2 The modeled parameters for the relative gravity data measured with the LaCoste-G791 gravimeter on October 25, 2022.

Parameter	Point	Unit	Modeled	Relative
A_i (Gravity value)	SVOG	mGal	3100.395	0.000
	S16	mGal	3106.515	+6.120
	S206	mGal	3070.574	-29.821
	S202	mGal	3039.656	-60.739
	HARG	mGal	3011.130	-89.266
	BMSVO	mGal	3011.285	-89.110
	S110	mGal	2986.389	-114.006
	S110'	mGal	2986.458	-113.937
B (Drift)		mGal/hr	+0.002588	
C (Tare)		mGal	+0.000580	
D (Additional drift)		mGal/hr	-0.032313	
E (Additional tare)		mGal	+0.179864	

- **yyyymm**: 測定年月を意味する6桁の数字. 本稿の場合には202210と202302という2つのフォルダが配置されている.
- **Gxxx**: 重力計の製造番号を意味する4文字. 年月に合わせて最大5個のフォルダ (G031, G534, G605, G680, G791)が配置されている.
- **aaa**: **obs**または**cal**. **obs**は測定データ用のフォルダ, **cal**は解析結果用のフォルダである.

obsフォルダ内には, 各測定者によって取りまとめられた測定データが任意のファイル名で格納されている. このファイルはテキスト形式になっていて, 各重力点における測定年月日・読取值・器械高のほか, 潮汐解析に用いた各重力点の緯度・経度や, 読取值を重力値に変換するための変換関数 $f(x)$ が記載されている.

calフォルダ内には測定データの解析結果が任意のファイル名で格納されており, この解析は測定者自身によって実施されたものである. このファイルはテキスト形式になっていて, 読取值→重力値の変換・器械高補正・潮汐補正・器械ドリフト補正の詳細や, 最終的な相対重力値が記載されている. 本稿では, この解析結果に記載されている相対重力値をTable 1として示しているが, ある年月に複数の相対重力値が測定されている重力点については各解析結果の平均値をTable 1に示している. なお, 2022年10月25日にG791で取得された重力データは本稿付録2の方法で解析しており, GravityData.zip内には付録2の解析結果を格納していないので注意を要する.

(論文受理日 : 2023年8月31日)