

桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2020年10月および2021年3月)

Repeated Relative Gravity Measurements in Sakurajima Volcano (October 2020 and March 2021)

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

Takahito KAZAMA⁽¹⁾, Keigo YAMAMOTO, Ryo OYANAGI⁽¹⁾, Kazumi OKADA⁽²⁾,
Hiromitsu OSHIMA⁽²⁾, Yusuke TAKENAKA, Tamaki WAKABAYASHI⁽¹⁾ 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 October 2020 and March 2021, to monitor spatiotemporal mass variations associated with volcanic activity. The gravity values obtained from 1998 to 2021 showed a clear increase of up to +4.3 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ in the central part of the volcano. The gravity increase was even observed by the LaCoste's G31 and G375 gravimeters; these gravimeters have been used at Sakurajima Volcano since 1975, and their temporal variations in reading values are negligibly small these days. These facts indicate that the gravity increase observed in the central Sakurajima is the actual one, because the artificial gravity change due to temporal variation of instrumental scale factor is expected to be small for the G31 and G375 gravimeters. 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, 陸水重力擾乱, スケール定数

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

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。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 $-13 \sim -20 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ 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, 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（Hotta et al., 2016; 風間ら, 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, 2020年10月および2021年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2020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.

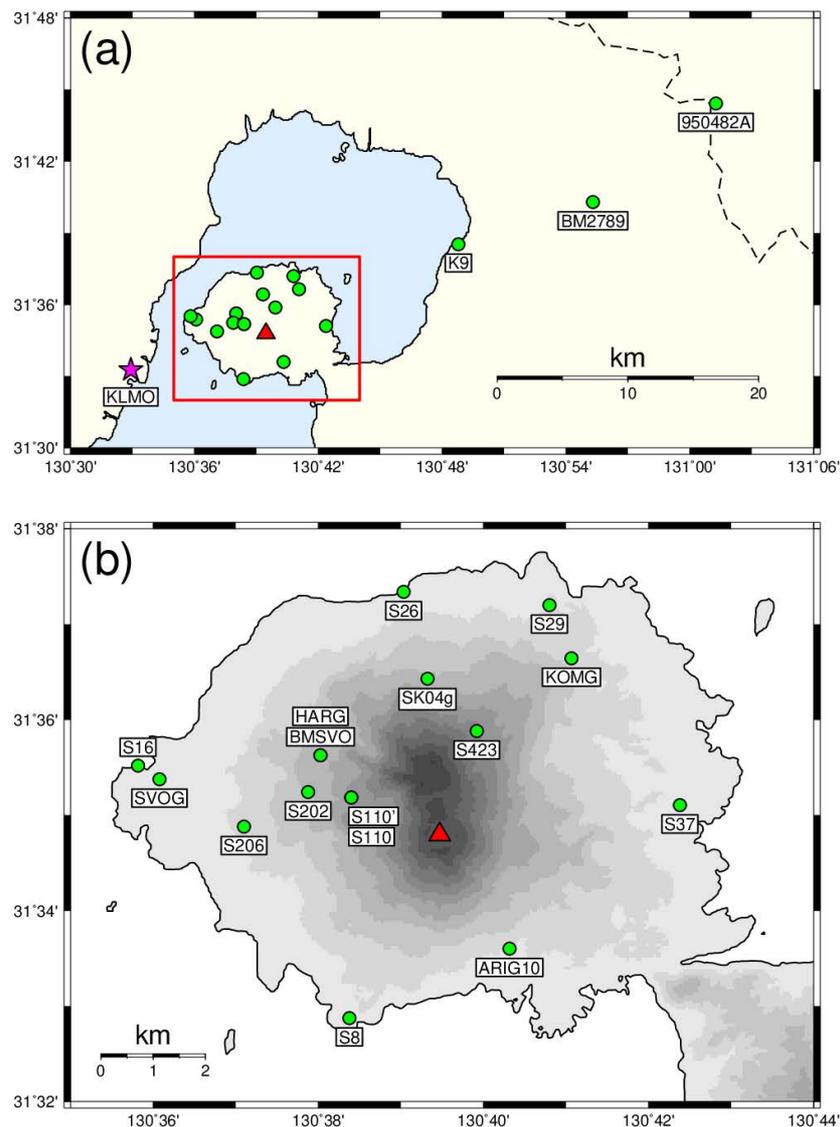


Fig. 1 Gravity points in and around Sakurajima Volcano. Green circles and red triangles indicate the gravity points and Minami-dake Crater, respectively. (a) The regional map around Sakurajima Volcano. A pink star, a red rectangle and a dashed line indicate the location of Kagoshima Local Meteorological 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.

2. 2020年度における繰り返し相対重力測定

2020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19点である。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ふ往復測定にて実施した。以下、各測定日における重力測定の実施状況を詳述する。

- 2020年10月26日～31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・D58）、および桜島火山観測所の1台のLaCoste重力計（G605）によって全19点の相対重力測定を集中的に実施した。
- 2021年3月2日～5日には、京都大学理学研究科の3台のLaCoste重力計（G534・G680・D58）、および桜島火山観測所の1台のLaCoste重力計（G605）を用いて、主要7重力点（SVOG・S16・BMSVO・HARG・S206・ARIG10・S423）における相対重力測定を実施した。

なお、各重力点における各相対重力計の配置は風間ら（2020a）のFig. A1に記されているものの、唯一G534重力計の配置に関してはこの図に記されていない。これは風間ら（2020）が2019年度にG534を用いた重力測定を桜島で実施しなかったためである。そこで本研究では、風間ら（2020）のFig. A1においてG680重力計の設置位置として示された場所にG534重力計を置き、各重力点における相対重力測定を実施した。

3. 2020年度の相対重力測定値の算出

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、SVOG基準の相対重力値を決定した。まず1つ目のプロセスは、読取値から重力値への変換である。そもそもLaCoste型相対重力計はその内部にバネを有しており、実際のフィールド測定では測定者が各重力点でダイヤル値（バネの長さに相当） x を読み取り記録する。フィールド測定の終了後、測定者は読取値→重力値の変換関数 $f(x)$ を用いて重力値 $g = f(x)$ を計算する。なお、この変換関数には重力計納入時に製造元から発行された変換表をそのまま使用する。

2つ目のプロセスはスケールファクター補正である。そもそも、各重力点における相対重力値は理想的には全ての相対重力計で同じ値を取るはずであるが、実際には観測誤差を超えるほどに乖離することが多い。これは、各々の相対重力計の変換関数 $f(x)$

が不正確であるため、変換後の重力値 $g = f(x)$ が真の相対重力値と一致しないためである。相対重力計で正しい重力値を得るには、絶対重力計と相対重力計の比較観測により変換関数の補正係数 S を事前に検定しておき、各相対重力計の重力値を

$$g = S \cdot f(x) \quad (1)$$

として見積もればよい。このとき、補正係数 S を絶対スケールファクター（あるいは単にスケールファクター；SF）、読取値→重力値の変換時に定数 S を掛け合わせる作業のことをSF補正と呼ぶ。筆者らのこれまでの研究（風間ら、2018, 2019a, 2020a）においては、SF検定のなされている相対重力計については検定済みのSF値を用い、それ以外の重力計についてはSF補正を実施しない（つまり $S = 1.000000$ と仮定する）という対応を取ってきた。しかしながら、本稿においては相対重力データに含まれるSFの寄与を第6章でまとめて議論するため、ここでは全ての重力計についてSF値を $S = 1.000000$ とし、SF補正を実施しないものとする。また、第5章で桜島火山の重力時空間変化を議論する際には、過去の重力データについても一貫してSF補正を実施せず、かつSF未補正に伴う器差の影響を経験的に補正する（詳細は第5章を参照）。

3つ目のプロセスは器械高補正である。一般に相対重力計は重力点よりも高い位置に設置されるので、重力点の重力値を知るためには重力点～重力計間の鉛直重力差を補正する必要がある。そこで我々は、重力測定時に重力点～相対重力計間の比高（すなわち器械高）を測定し、重力読取値とともに野帳に記録した。その後のデータ解析においては、地球表面の重力鉛直勾配の代表値である $3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ （フリーエア勾配）を器械高に掛け合わせ、この値を器械高補正值として重力測定値に足し合わせた。

4つ目のプロセスは潮汐補正である。そもそも地球表面上には地球の自転や月の公転などに伴って潮汐力が働いており、この影響で重力値は日周～半日週の周期で最大 $150 \mu\text{Gal}$ もの振幅で時間変化している。この値はLaCoste重力計の観測精度（ $10 \mu\text{Gal}$ 程度；坪川、2005）よりも十分に大きく、潮汐重力変化を補正しなければ各重力点の重力値を正しく得ることができない。そこで本研究は、Tamura（1982）のプログラムを用いて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いた。

5つ目のプロセスは器械ドリフト補正である。理想的なバネは外力一定の状況下では常に同じ長さを保つと期待されるが、実際の相対重力計内部のバネは

完全な弾性体ではないためにわずかなクリープが発生する。これにより、相対重力計の重力測定値は一定の重力下であっても時間的に見かけ変化する（器械ドリフトと呼ばれる）ので、各重力点の正しい重力値を得るには器械ドリフトを適切に補正する必要がある。そこで本研究は、器械ドリフトが時間に対して1次の関数で表現できると仮定し、相対重力の往復測定データから器械ドリフト変化速度を推定した。その後、各重力点における重力測定値から器械ドリフトの寄与を補正し、SVOG基準の相対重力値を見積もった。なお、器械ドリフト補正に関する具体的な定式化は風間ら（2019b）に記載されている。

以上のプロセスによって決定したSVOG基準の相対重力値をTables 1-2に示す。Table 1は2020年10月に実施した相対重力集中観測の結果を、Table 2は2021年3月に実施した重力測定の結果を示しており、相対重力値の単位はmGalである。

4. 過去の相対重力データの整理

桜島火山では1975年以降数年おきに相対重力測定が実施され（e.g., 石原ら, 1986）, そこで得られた相対重力データをもとに南岳噴火活発期（1975年～1992年）の地下質量変動が議論されてきた（e.g., 大柳, 2021）。また、昭和火口の活動が再開した2006年以降は少なくとも年1回の相対重力測定が継続されており、筆者らのこれまでの報告（風間ら, 2018, 2019a, 2020a）においても2006年以降の重力時空間変動が繰り返し議論されてきた。一方、1995年～2005年ごろには数年おきに相対重力測定が実施されていたものの（e.g., 山本ら, 1998, 2003）, この時期は噴火活動が比較的静穏であったため、この時期の相対重力データはその前後の相対重力データと十分に比較されてこなかった。

そこで我々は、南岳噴火活発期（1975年～1992年）

Table 1 Gravity values measured in and around Sakurajima Volcano on 26-31 October 2020 (unit: mGal).
The “Dial Value” line indicates the reading value at the SVOG’s gravity point in mGal.

Gravimeter	G31	G534	G605	G791	D58
Observer	Oshima	Kazama	Yamamoto	Okada	Oyanagi
Dial Value	3046	2980	2854	3045	+90
Scale Factor	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S16	+6.139	+6.127	+6.148	+6.134	+6.168
S26	-11.523	-11.500	-11.474	-11.513	-11.564
S29	-33.443	-33.444	-33.472	-33.424	-33.599
S37	-15.489	-15.481	-15.452	-15.476	-15.554
S8	-15.350	-15.328	-15.299	-15.318	-15.388
BMSVO	-89.104	-89.112	-89.114	-89.089	-89.493
HARG	-89.268	-89.263	-89.268	-89.246	-89.642
S202	-60.732	-60.714	-60.735	-60.712	-60.988
S206	-29.827	-29.797	-29.833	-29.801	-29.937
S110	-113.986	-113.986	-114.093	-113.971	-114.454
S110'	-113.915	-113.914	-113.994	-113.912	-114.399
ARIG10	-14.114	-14.108	-14.081	-14.088	-14.161
SK04g	-76.235	-76.239	-76.269	-76.222	-76.580
S423	-141.569	-141.565	-141.610	-141.532	-142.124
KOMG	-37.224	-37.215	-37.234	-37.207	-37.401
K9	+19.553	+19.550	+19.569	+19.542	+19.674
BM2789	-34.218	-34.229	-34.246	-34.218	-34.380
950482A	-18.377	-18.365	-18.345	-18.363	-18.447

Table 2 Gravity values measured in and around Sakurajima Volcano on 2-5 March 2021 (unit: mGal).
The “Dial Value” line indicates the reading value at the SVOG’s gravity point in mGal.

Gravimeter	G534	G605	G680	D58
Observer	Kazama	Yamamoto	Kazama	Oyanagi & Wakabayashi
Dial Value	2977	2849	3021	+90
Scale Factor	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000
S16	+6.130	+6.132	+6.136	+6.152
BMSVO		-89.141		
HARG	-89.312	-89.300	-89.302	-89.533
S206	-29.830	-29.854	-29.832	-29.871
ARIG10	-14.117	-14.085	-14.131	-14.129
S423	-141.592	-141.636	-141.622	-141.997

と昭和火口活動再開以降（2006年以降）の間の重力時空間変化を連続的に理解するため、両者間の時期（1993年～2005年）に桜島火山で測定された相対重力データを改めて整理した。その結果、相対重力測定の時期や基準点について以下のことが分かった。

- 1997年2月，1997年4月，および1998年3月には，桜島西部沿岸のS16重力点を基準点とした相対重力測定が実施されていた（山本ら，1998）。この基準点の設定は，南岳噴火活発期（1975年～1992年）における基準点設定と一致している。
- 1998年7月，1999年7月，2001年9月，および2002年9月には，桜島西部山麓のSVOG重力点（桜島火山観測所）を基準点とした相対重力測定が実施されていた（山本ら，2003）。この基準点の設定は，昭和火口活動再開以降（2006年以降）における基準点設定と一致している。

そこで本稿では，従来の報告（風間ら，2018，2019a，2020a）で取りまとめてきた2006年以降の相対重力データだけでなく，1998年7月～2002年9月に取得された相対重力データを新たに用いて，南岳噴火静穏化以降における長期の重力時空間変動を推定することにする。これにより，本稿における重力変化の解析対象期間は1998年7月～2021年3月の約24年間となり，これまでの研究よりも長期の重力変化を一括に扱うことができるようになる。

5. 1998年以降の重力時空間変化

我々は1998年～2021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，

時刻 t_i に相対重力計 j を用いて測定された各重力点の相対重力値を Δg_{ij} と書くと， Δg_{ij} は以下のように表現できる。

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

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SF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器差を含んでいる（Tables 1-2参照）。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，SF起源の器差を経験的に補正する。次に，1998年～2021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，各観測方程式を逆計算し，重力経年変化速度 a と切片値 b_j を最小二乗的に推定する。

なお，解析対象期間内に桜島火山で重力測定を実施した相対重力計はTable 3の12台（全てLaCoste型）である。これに伴い，式(2)における未知パラメータの個数は，重力経年変化速度 a と合わせて最大13個となる。ただし，G680重力計（2017年7月～2021年3月に測定）は2019年度上半期にオーバーホールが実施され，この影響でSF値および相対重力値がステップ的に変化したことが分かっている（風間ら，2019b）。このため，本研究ではG680重力計をオーバーホール前後で異なる重力計（G680およびG680a；Table 3参照）とみなし，切片値 b_j をオーバーホール前後で別々に推定した。また，D58重力計（2018

Table 3 Relative gravity data used for calculating the time variation in relative gravity.

Gravimeter	Measured Data	
	First	Last
G31	2006/08	2020/10
G375	2006/08	2017/10
G534	2018/08	2021/03
G605	2014/10	2021/03
G680	2017/07	2018/10
G680a	2019/09	2021/03
G682	2007/10	2012/10
G705	1998/07	2002/09
G791	2016/10	2020/10
G891	2007/10	2012/11
G892	2009/10	2018/10
G1090	1998/07	2010/09

年8月～2021年3月に測定)については測定レンジ調整に起因する見かけ重力変化が重力測定値に含まれている可能性があるため(若林・風間, 2021), 重力変化の解析対象から除外した。

5.1 S110およびBMSVOの重力時間変化

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 の重力計ごとの差異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 $+4.3 \pm 1.4 \mu\text{Gal/yr}$, BMSVOで $+2.7 \pm 1.0 \mu\text{Gal/yr}$ である。特に, 本稿ではBMSVOにおける1998年～2002年の重力測定データが新たに解析対象に加えられたので, BMSVOの重力変化速度の標準偏差(≒推定誤差)が $1.3 \mu\text{Gal/yr}$ (風間ら, 2020a) から $1.0 \mu\text{Gal/yr}$ に改善している。

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。この重力変化の要因の1つには, 桜島火山内部に貯留されている陸水質量が年オーダーの時定数で時空間的に変動していることが考えられる。例えば, 2009年10月の相対重力値は全ての重力計で, かつ2つの重力点で共通して $50 \mu\text{Gal}$ 程度減少している。鹿児島地方気象台(Fig. 1の星印)の雨量観測によると, 2009年の年間降水量は 1530 mm/yr であり, 1991～2020年の年間降水量平均値(2435 mm/yr ; 気象庁, 2021)に比べて 900 mm/yr 程度少ない。一般に陸水貯留量は降水量に従って増減するので, 2009年には他の年に比べて桜島火山の陸水貯留量が減少していたものと考えられる。実際, 降水減少量(-900 mm)に水の無限平板の万有引力効果 $0.0419 \mu\text{Gal/mm}$ を掛け合わせると, 2009年の重力減少量は $-37.7 \mu\text{Gal}$ と計算でき, BMSVOやS110で観測された重力減少量の大部分を説明できる。

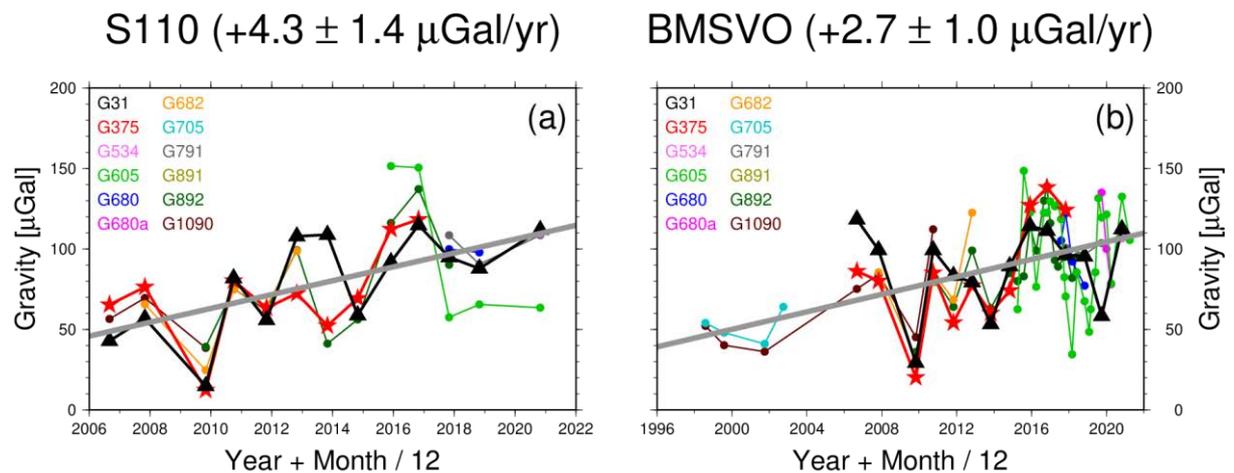


Fig. 2 Symbols and thick gray lines indicate the measured gravity values relative to the SVOG's reference gravity point and the regression lines to the observed gravity values, respectively. In particular, black triangles and red stars indicate the relative gravity values measured by the G31 and G375 gravimeters, respectively. The panels of (a) and (b) show the gravity variations at the S110 and BMSVO gravity points, respectively.

重力経年変化を中心とした振幅約50 μGal の重力変化 (Fig. 2) については、重力測定誤差が含まれている可能性も否定できない。特に、G605重力計の重力測定データ (緑色丸印) が重力経年変化の直線 (灰色太線) から外れる、という状況が複数の重力点で確認されている。例えば、S110重力点では2016年～2017年の間にG605重力計の重力値が $-100 \mu\text{Gal}$ 程度シフトしているが、他の重力計ではそのような重力変化は観察されない。一方、BMSVO重力点では2014年10月以降年数回の頻度でG605重力計による重力測定を実施しているが、G605の重力値は1-2年程度の短い時定数で変動しているように見える。この重力変化が陸水貯留量の季節変化によるものなのか、あるいは単に観測誤差によるものなのかは不明である。この点を解決するためには、まずは陸水モデルを用いて相対重力データに含まれる陸水重力変化を正確に補正する必要がある (e.g., 風間ら, 2014; Kazama et al., 2015)。その上で、G605重力計など特定の重力計で重力測定値がばらつくのであれば、今後その重力計に対してオーバーホールなどの大規模な内部点検が必要になるかもしれない。

5.2 重力経年変化の空間的分布

Fig. 3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 (宮崎県都城市の電子基準点; 2014年10月～2020年10月に測定) に対するSVOGの重力経年変化速度は $+1.1 \pm 2.5 \mu\text{Gal/yr}$ 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の重力変化速度の誤差がやや大きい。そこで、本節では桜島島内のSVOGを重力変化の基準点とし、島内における重力変化の空間分布に特に注目することにする。

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 $+4.3 \mu\text{Gal/yr}$ を取っている。そもそも山頂部で重力増加が大きいと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～2021年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。なお、本稿では第4章で述べた

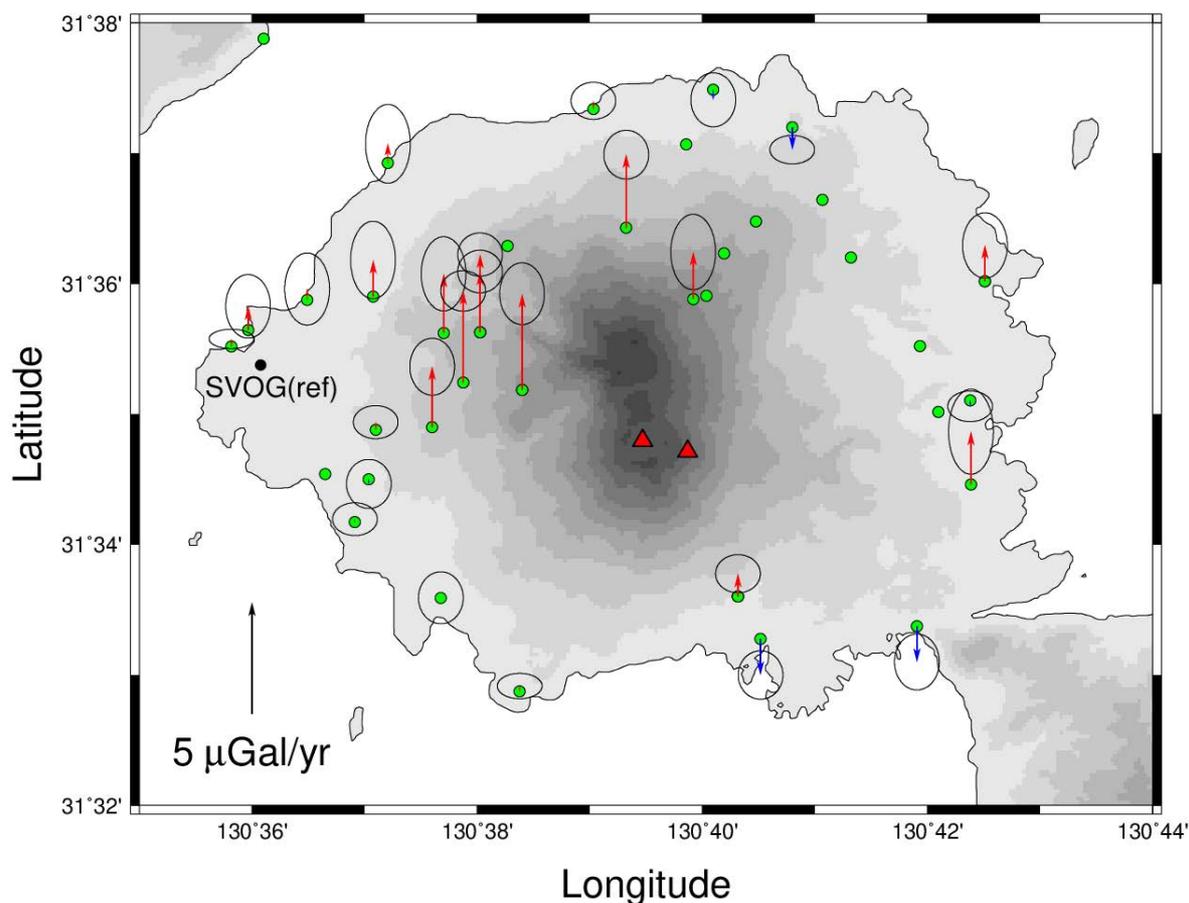


Fig. 3 Arrows and ellipses indicate the gravity variation rates relative to SVOG during 1998-2021 and those standard deviations, respectively.

通り、従来の報告（風間ら, 2018, 2019a, 2020a）よりも長期の重力データを用いて重力変化速度の推定がなされた。重力変化速度の大きさや空間分布については、従来の結果（例えば、風間ら, 2020a）と本研究の結果（Fig. 3）で大きな違いは見られない。一方、重力変化速度の標準偏差（Fig. 3の楕円）については多くの重力点で従来の結果よりも小さくなっており、解析対象期間を拡大したことで桜島火山の重力変化速度をより高精度に推定できたと言える。

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 6.5×10^6 m³/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。実際、大柳ら（2019）は2006年～2018年度末の重力変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北岳直下の海拔下3 kmにおける 1.9×10^{10} kg/yrの質量増加によって再現した。このような質量増加は南岳噴火活発期（1970年代～1990年代前半）の重力データからも示唆されており（石原ら, 1986; 大柳, 2021）、例えば火道内マグマ対流といった火山活動（e.g., Shinohara, 2008）を長期的な質量変動として捉えている可能性がある。火山内部の質量時空間変動を把握することは将来の火山活動を予測する上で非常に重要であるため、今後も継続的な重力測定が不可欠である。

6. スケールファクター（SF）に関する検討

本稿では第3章において、各相対重力計のSF値が $S = 1.000000$ であると仮定し、2020年度取得の相対重力データに対してSF補正を実施しなかった。また、第4章～第5章では過去の全ての相対重力データに対してSF値を $S = 1.000000$ で不変と仮定し、かつSF未補正によって生じる相対重力データの器差を経験的に補正した（式(2)）。しかしながら、近年の研究成果によると、バネ式相対重力計のSF値は経時的に

変化することがあり、この影響を確実に補正しないと偽の重力変化が観察される可能性がある指摘されている。

Onizawa（2019）は、気象研究所所有のScintrex型相対重力計CG5-300500033のSF検定を実施し、この重力計のSF値が読取値 x に応じて変化すること（すなわち $S = S(x)$ ）ことを示した。またOnizawa（2019）は、読取値 x が器械ドリフトで時間変化すること（すなわち $x(t)$ ）に伴い、この重力計のSFも時間的に変化している（すなわち $S = S(x(t))$ ）ことを示した。さらにOnizawa（2019）は、SFの時間変化を補正しないと相対重力値に見かけの重力変化が乗ってしまう可能性を指摘している。このことは、本稿第3章の式(1)で両辺を S で割ると、左辺の重力値が $g/S(x(t))$ となることで説明可能である。

本研究で調査対象としている桜島火山では、1975年以降約45年間に渡って相対重力測定が実施されてきた。しかしながら、これまで取得されてきた相対重力データにSF時間変化の寄与が残っているのであれば、桜島火山のこれまでの火山活動を見誤ってしまう恐れがある。そこで本章では、Onizawa（2019）の指摘を受けて、相対重力計のSFに関連して以下の3点を検討する。

- ① 桜島火山で重力測定を実施してきた各相対重力計について、読取値 x はどのように時間変化しているか？
- ② 読取値 x の時間変化が十分に小さい相対重力計では、桜島火山における相対重力測定値はどのように時間変化しているか？
- ③ 2020年度時点における各相対重力計のSFはどのような値を取っているか？

6.1 相対重力計の読取値時間変化

Onizawa（2019）は、SFの時間変化の原因は「SFが読取値に依存して変化すること」および「読取値が器械ドリフトによって時間変化すること」にあると指摘している。すなわち、読取値時間変化の小さな重力計ではSF時間変化も小さく、SF時間変化に伴う見かけ重力変化も小さいものと推測される。

Fig. 4は桜島火山で1975年以降重力測定に参加してきた相対重力計のうち、生データの残っている8台の重力計における読取値の時間変化 $x(t)$ を示している。2000年以前の読取値データが残っていた重力計は3台（G31, G375, G458）であり、この期間の読取値は100 mGal以内に収まっている。G31とG375については2000年以降も継続的に重力測定が実施されているが、両者とも読取値の不連続が2回確認できる。これはオーバーホール作業の際に読取値が人的に変えられたためであるが、それでもなおG31とG375の

Reading Value in Sakurajima Volcano [mGal]

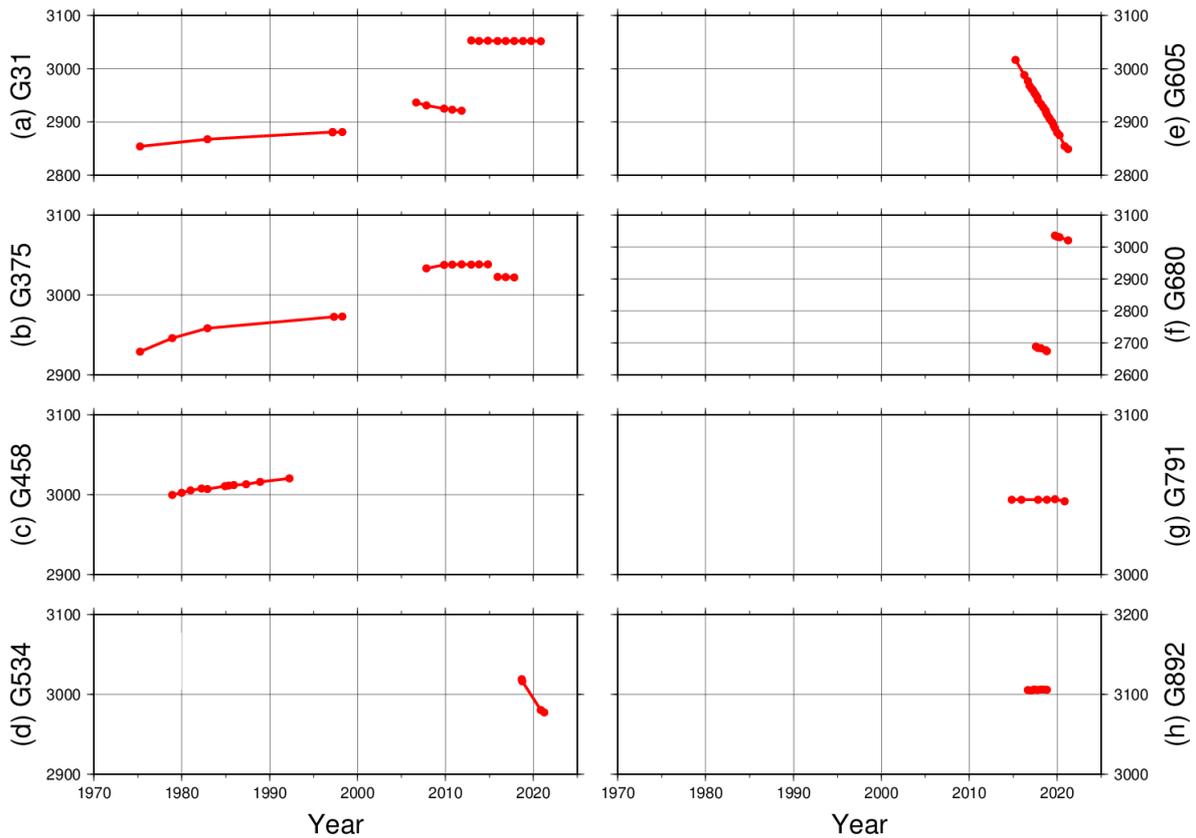


Fig. 4 Reading values measured by LaCoste relative gravimeters from 1975 to 2021. The panels of (a)-(c) and (d)-(h) indicate the reading values measured at the gravity points of S16 and SVOG, respectively. (a) G31, (b) G375, (c) G458, (d) G534, (e) G605, (f) G680, (g) G791, and (h) G892.

ダイヤル値は全期間を通して200 mGal程度の中に収まっている。

2000年以降に重力測定に参加した5台の重力計 (G534, G605, G680, G791, G892) のうち、G791とG892については器械ドリフトが小さく、読取値に大きな変化は見られない。一方、G534, G605, G680については読取値が小さくなるような負の器械ドリフトが確認でき (e.g., 風間, 2020b), 特にG605については読取値変化速度が -28 mGal/yrと最も大きい。また、G680ではオーバーホールに伴って読取値が $+362$ mGalもステップ的に増加しており、実際にこのオーバーホールの前後でSF値の変化が確認されている (風間ら, 2019b)。

このように、読取値時間変化には器械ドリフトやオーバーホールの影響が含まれており、その傾向や変化量は重力計ごとに大きく異なっていることが分かる。読取値時間変化はSF時間変化や重力見かけ変化に影響を及ぼすので (e.g., 風間ら, 2019b; Onizawa, 2019), 最終的な相対重力値だけでなく読取値の時間変化の状況も逐次監視していく必要がある。

6.2 G31およびG375の重力時間変化

相対重力計のSF変化が読取値のみに依存するのであれば、読取値時間変化の小さい重力計ではSF時間変化やそれに伴う見かけ重力変化も小さいものと期待される。実際、G31重力計とG375重力計は桜島火山にて40年以上重力測定に参加しており、全期間の読取値変化も200 mGal程度の中に収まっている (Fig. 4)。この2台の重力計では本研究の解析対象期間 (1998年~2021年) にオーバーホールに伴う読取値のステップが存在しているものの (Fig. 4a-b), そのステップ量は150 mGal以内でありG680の読取値ステップ変化量 (Fig. 4f) よりも小さい。すなわち、G31とG375については解析対象期間内のSF時間変化はわずかであり、桜島火山の実際の重力変化を観測しているものと期待される。

以上のような想定のもと、本節ではG31重力計およびG375重力計の重力時間変化に着目する。Fig. 3の黒色三角印と赤色星印は、それぞれG31およびG375で測定された相対重力値である。BMSVO重力点 (Fig. 3b) の場合、G31とG375の重力値は ± 50 μ Gal程度の

ばらつきが顕著であり、重力変化の長期的傾向は確認しづらい。一方、S110重力点 (Fig. 3a) ではG31とG375の重力値はBMSVOと同様にばらついているものの、長期的な増加傾向が明瞭に確認できる。

ここで我々は、この2台の重力計 (G31およびG375) の重力測定データのみを用いて、式(2)の方法で重力経年変化速度 a を計算した。その結果、S110 (Fig. 3a) の重力変化速度は $+4.9 \pm 1.3 \mu\text{Gal/yr}$ 、BMSVO (Fig. 3b) の重力変化速度は $+2.2 \pm 1.5 \mu\text{Gal/yr}$ と得られた。すなわちこの結果は、SF時間変化の寄与が小さいとされるG31・G375重力計においても、桜島中央部にける重力増加が標準偏差を超える範囲で確認できた、ということの意味する。また、これらの値は全重力計の測定データを用いた場合の変化速度 (Fig. 3の上部に記載) と誤差範囲内で一致していることから、桜島中央部における重力増加 (Figs. 3-4) は真の重力変化を示していると考えられる。

6.3 2020年度における各重力計の相対SF

桜島火山における重力時空間変化を定量的に正しく理解するには、各相対重力計のSF値やその読取值依存性を事前に把握し、これらの寄与を重力測定データから正確に補正する必要がある。このことを念頭に、本稿の一部の著者は長距離測線におけるSFの検定観測を別途実施している。2020年には茨城県～鹿児島県の4つの重力点で絶対重力と相対重力の比較測定を実施し、複数の相対重力計のSFとその読取值依存性を決定した (若林ら, 2021)。このような検定観測は絶対重力計による複数点での絶対重力測定を必須とするが、絶対測定が不足する状況下では相対重力計同士の比較測定からSFの相対値 (相対SFと呼ぶ) を推定する取り組みも実施されている (若林・風間, 2021)。

本研究の対象地域である桜島火山では、近年では有村観測坑道局舎 (Fig. 1のARIG10と同じ建物内) にて絶対重力測定が定期的実施されている (若林ら, 2021)。しかし、これ以外の重力点における絶対重力測定は10年以上前であり (e.g., Yamamoto et al., 2001; 風間ら, 2014)、測定時点から現在に至るまでに火山活動などに伴う重力変化も確認されている (Figs. 3-4)。そのため、過去の絶対重力測定値をそのままSF検定に使用することは不適切であり、この観点からSFの絶対値を桜島火山内の重力データのみで決定するのは困難である。

そこで本節では、2020年10月に桜島火山で取得された相対重力データ (Table 1) から各相対重力計間の相対SF (若林・風間, 2021) を計算する。ここで、基準の相対重力計を ref とすると、この相対重力計に対する任意の相対重力計 i の相対SFは

$$S(i \rightarrow ref) = \Delta g_{ref} / \Delta g_i \quad (3)$$

と計算できる。このうち、 Δg_i と Δg_{ref} はそれぞれ任意の重力計 i と基準重力計 ref によって測定された相対重力値である。本研究においては、各重力点で測定された ($\Delta g_i, \Delta g_{ref}$) を散布図の (X, Y) 軸に取り、この散布図に直線を回帰させることでこの直線の傾き、すなわち $S(i \rightarrow ref)$ を推定した。

Fig. 5の赤色丸印はG31重力計 (基準重力計) と他の重力計 i の相対重力値を散布図上にプロットしたものである。横軸は各重力計の相対重力値 Δg_i を、縦軸はG31重力計の相対重力値 Δg_{G31} を示している。ただし、重力計間の器差を明示するために、この図では縦軸に相対重力値の差分 $\Delta g_{G31} - \Delta g_i$ を取っている。G534とG31の器差は0.0 mGalの横線付近に散らばっており、この2つの重力計の間には器差がほとんどないことが分かる。一方、G605やG791ではG31との間に ± 0.1 mGal以内の器差が存在し、D58に至っては0.6 mGal近い器差が確認できる。このことは、先行研究においてD58重力計の絶対SFが1.0から大きく乖離していたこと (風間ら, 2019c; 若林・風間, 2021) と調和的である。

Fig. 5の緑線は、散布図 ($\Delta g_i, \Delta g_{G31} - \Delta g_i$) に対する回帰直線であり、この傾きが $S(i \rightarrow G31) - 1$ に相当する。回帰直線の傾きは、G534では標準偏差の範囲内で0.0となっているが、G605とD58では有意な負の値を、G791では有意な正の値を取っている。なお、 $S(i \rightarrow G31) - 1$ が負の値を取る場合、重力計 i の相対重力値 Δg_i は基準重力計G31の相対重力値 Δg_{G31} よりも大きいので (式(3)参照)、1.0より小さな相対SF値 $S(i \rightarrow G31)$ を Δg_i に掛け合わせることで Δg_{G31} との器差を解消することができる。

Table 4は5台の相対重力計における互いの相対SF値 $S(i \rightarrow ref)$ とその標準偏差を示しており、行方向には対象とする重力計 i を、列方向には基準とする重力計 ref を並べている。相対SFは1.0周辺の値を取っており、多くの重力計間の組み合わせにおいて1.0からのずれが 10^{-3} 未満となっている。これは、100 mGalの重力差を持つ2点間の相対重力測定で、重力計同士の器差が100 μGal 未満になることを意味している。一方、D58重力計と任意の重力計の間では相対SFの1.0からのずれが 4×10^3 前後にも達しており、この値はFig. 5dの傾向とも一致している。これはD58自身の絶対SFが1.0から大きく外れているためである (風間ら, 2019c; 若林・風間, 2021)。

相対SFの標準偏差に注目すると、多くの重力計間の組み合わせでは標準偏差が 10^{-5} の桁になっており、これは相対SFを高い精度で決定できたことを意味している。そもそも、桜島火山における重力点間の重

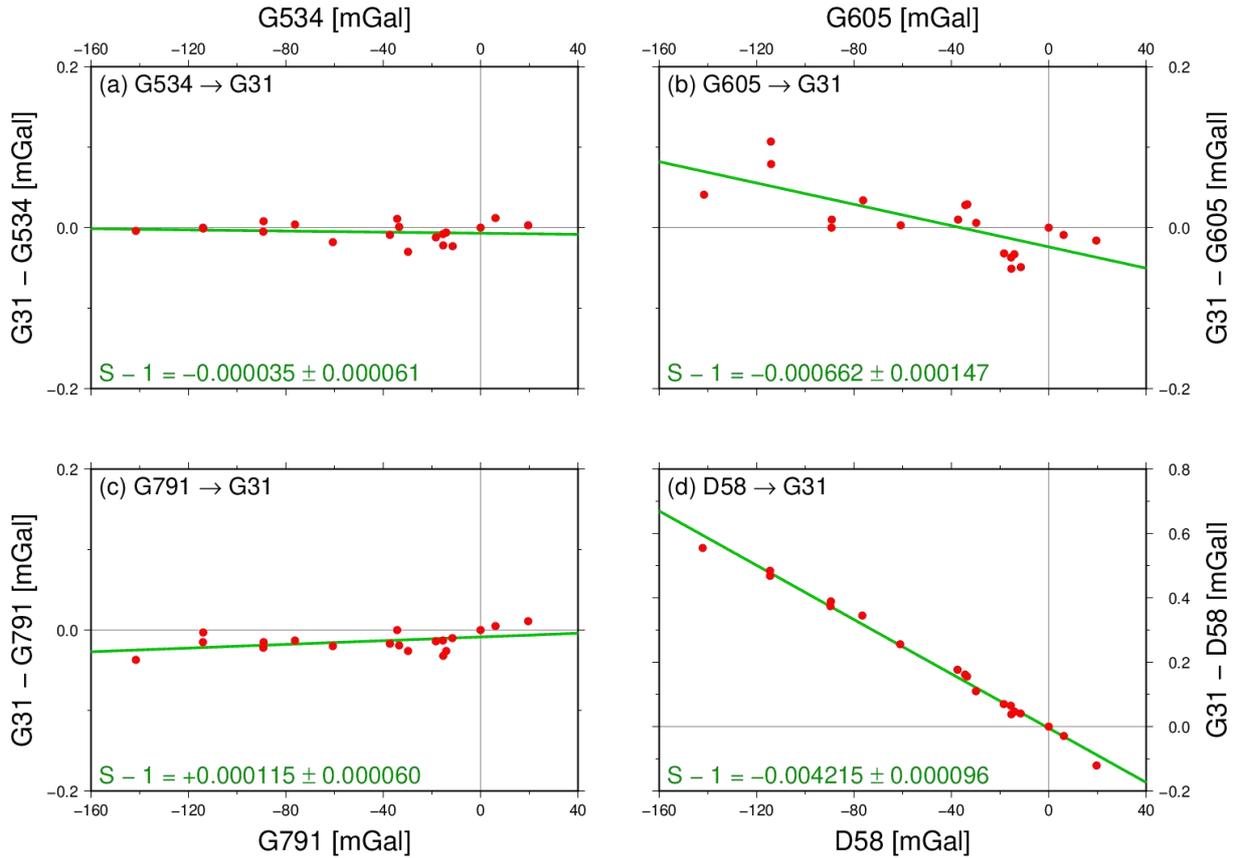


Fig. 5 The scatter diagrams to compare the relative gravity value of the G31 gravimeter (vertical) with those of the other gravimeters (horizontal). Red circles and green lines indicate the measured gravity data and the regression lines to the gravity data, respectively. (a) G534 vs. G31, (b) G605 vs. G31, (c) G791 vs. G31, and (d) D58 vs. G31.

力差は最大160 mGal程度であり (Table 1, Fig. 5), この重力差は他の火山よりも小さい (風間ら, 2019b, 2019c). それにもかかわらず相対SFを高精度に決定できたのは, 桜島火山の多くの重力点で相対重力計同士の比較測定を実施したためと考えられる. しかしながら, G605重力計の場合は相対SFの標準偏差が 1×10^{-4} よりも大きくなっており, これはG605の重力測定誤差が他の重力計よりも大きいため (Fig. 5b) と考えられる.

このように, 相対重力計同士の重力測定値を散布図に描画したり, この散布図から相対SFを計算したりすることで, 各相対重力計の特性を詳しく理解することができる. 桜島火山では毎年秋に複数台の相対重力計によって相対重力の並行観測が実施されてきたので, 過去の測定データでも同様の解析を行うことで各重力計の特性や相対SFの時間変化を把握できると期待される. また, 次年度以降の重力観測においても相対SFの監視が必須であり, 特定の相対重力計 *ref* で絶対SF $S(ref \rightarrow AG)$ を別途検定すれば任意の相対重力計 *i* の絶対SFを

$$\begin{aligned}
 S(i \rightarrow AG) &= \Delta g_{AG} / \Delta g_i \\
 &= (\Delta g_{AG} / \Delta g_{ref}) \cdot (\Delta g_{ref} / \Delta g_i) \\
 &= S(ref \rightarrow AG) \cdot S(i \rightarrow ref) \quad (4)
 \end{aligned}$$

として間接的に推定することも可能になると考えられる.

7. まとめ

我々は2020年10月と2021年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18重力点の相対重力値を決定した. また, 我々は2006年以前に桜島で取得された相対重力データを整理し, 1998年7月~2021年3月の期間における相対重力の時空間変化を計算した. その結果, 桜島中央部ではこの期間に最大+4.3 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ の重力増加が観測され, この重力増加は地殻変動で説明できないほどに大きなものであることが分かった. なお, この重力増加は読取値時間変化の小さな相対重力計 (LaCoste G31およびG375) でも確認できることから, この重力増加

Table 4 Relative scale factor and its standard deviation for each pair of the LaCoste relative gravimeters.

	Reference Gravimeter (<i>ref</i>)				
	G31	G534	G605	G791	D58
Gravimeter (<i>i</i>)	G31	1.000035 ±0.000061	1.000662 ±0.000147	0.999885 ±0.000060	1.004233 ±0.000097
	G534	0.999965 ±0.000061	1.000627 ±0.000130	0.999849 ±0.000049	1.004197 ±0.000096
	G605	0.999338 ±0.000147	0.999373 ±0.000130	0.999223 ±0.000121	1.003568 ±0.000154
	G791	1.000115 ±0.000060	1.000151 ±0.000049	1.000777 ±0.000121	1.004348 ±0.000099
	D58	0.995785 ±0.000096	0.995820 ±0.000095	0.996444 ±0.000153	0.995670 ±0.000098

はSF時間変化に伴う見かけ重力変化ではなく、真の重力変化と考えられる。この重力増加は北岳直下の海拔下3 km付近における 10^{10} kg/yrオーダー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1990年代後半以降においても山体直下の質量増加が継続していることを示唆している。

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を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。また、過去～現在の質量変動を正確に理解するため、相対重力計や過去の相対重力データに対して今後以下のような対応が必要である。

- 陸水重力擾乱の補正：桜島の各重力点における陸水変動起源の重力変化を陸水モデルによって数値的に計算し、この計算値を重力測定値から差し引く。
- 相対SFの推定：桜島における相対重力の並行観測データを用いて各重力計の相対SFを計算し、相対SFの時間変化やそれに伴う見かけ重力変化を定量化する。
- 絶対SFの検定：これまで桜島火山の相対重力測定に参加してきた各相対重力計に対して、長距離測線における絶対SF検定を実施し、絶対SFおよびその読取値依存性やそれに伴う見かけ重力変化を定量化する。
- 地下質量変動のモデル化：SF時間変化に伴う見かけ重力変化を過去の重力観測データから補正し、補正後の重力データを用いて桜島火山内部における質量時空間変動をモデル化する。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省「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

- 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・山本圭吾・大島弘光・岡田和見・大柳諒・園田忠臣・井口正人 (2019a): 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), 京都大学防災研究所年報, 第62B巻, pp. 318-324.
- 風間卓仁・安部祐希・原田昌武・加藤照之 (2019b): 箱根火山における相対重力繰り返し測定 (2018年7月～2019年10月), 神奈川県温泉地学研究所報告, 第51巻, pp. 25-36.
- 風間卓仁・吉川慎・長縄和洋・宮内佑介・大倉敬宏・福田洋一 (2019c): 熊本県北部における絶対重力測定および相対重力計のスケールファクター検定 (2018年8月), 東京大学地震研究所彙報, 第94巻, pp. 13-28.
- 風間卓仁・山本圭吾・大柳諒・岡田和見・大島弘光・井口正人 (2020a): 桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2019年5月～2020年3月), 京都大学防災研究所年報, 第63B巻, pp. 108-117.
- 風間卓仁 (2020b): 可搬型相対重力計を用いた重力連続観測: システムの概要およびラコスト重力計G680による観測例, 北海道大学地球物理学研究報告, 第83巻, 9-23.
- 気象庁 (2021): 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.
- 坪川恒也 (2005): 重力の測定, 精密工学会誌, 第71巻, pp. 1335-1338.
- 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.
- 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・大久保修平・古屋正人・新谷昌人・松本滋夫・高山鐵朗・石原和弘 (2003): 桜島火山における絶対重力測定 (1998年～2002年), 京都大学防災研究所年報, 第64B巻, pp. 827-833.
- 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.
- 若林環・風間卓仁・福田洋一・安部祐希・吉川慎・大倉敬宏・今西祐一・西山竜一・山本圭吾 (2021): ラコスト型相対重力計のスケールファクターの読取値依存性, 日本地球惑星科学連合2021年大会, No. SGD01-08.
- 若林環・風間卓仁 (2021): 京都大学～比叡山頂間の高頻度キャンペーン重力データから推定された可搬型相対重力計の相対スケールファクター, 北海道大学地球物理学研究報告, 第84巻, pp. 11-20.
- 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.
- Onizawa, S. (2019): Apparent calibration shift of the Scintrex CG-5 gravimeter caused by reading-dependent scale factor and instrumental drift, *J. Geod.*, Vol. 93, pp. 1335-1345.
- Shinohara, H. (2008): Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity, *Rev. Geophys.*, Vol. 46, No. RG4005.
- Takayama, H. and A. Yoshida (2007): Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, No. B06413.
- Tamura, Y. (1982): A computer program for calculating the tide-generating force, *Publ. Int. Latitude Obs. Mizusawa*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-20.
- Yamamoto, K., Ishihara, K., Okubo, S. and 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, No. 9, pp. 1807-1810.
- 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: 2021年7月5日)