

桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2023年10~11月および2024年3月)

Repeated Relative Gravity Measurements at Sakurajima Volcano (October–November 2023 and March 2024)

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

Takahito KAZAMA⁽¹⁾, Keigo YAMAMOTO, Kazumi OKADA⁽²⁾, Hiromitsu OSHIMA⁽²⁾,
Ryo OYANAGI⁽¹⁾, Mizuki KOHAMA⁽¹⁾, 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 27 gravity points around Sakurajima Volcano in October–November 2023 and March 2024, to monitor spatio-temporal mass variations associated with volcanic activity. The gravity points include 8 points where gravity values were measured for the first time in the last 10 years. The gravity values obtained from 1998 to 2024 showed a clear increase of up to +5.6 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ at the central part of the volcano. The gravity increase can be explained by the point mass increase of 1.4×10^{10} kg/yr under the center of the volcano at a depth of 4.0 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, 重力変化, 質量移動, 地殻変動, 陸水重力擾乱

Keywords: Sakurajima Volcano, gravity change, 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 μGal 以上も増加する傾向が見られた(山本ら, 1998; ただし1 $\mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8}$ m/s²)。同時期の水準測量

では地表の沈降が観測されていたものの、この沈降量は上述の重力増加を説明するには不十分であったため、この時期にはマグマだまり収縮に伴う地盤沈降だけでなく桜島内部で質量増加が起きていたと考えられている(石原ら, 1986; Oyanagi et al., 2023)。

南岳火口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いることが知られており、桜島直下の質量

増加が現代も継続していると示唆されている（風間ら, 2018; 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, 桜島では南岳火口の噴火活動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, 2023年10~11月および2024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。特に, 2023年秋には桜島島内での重力測定を拡充し, 8箇所の重力点で10年ぶりに相対重力値を取得した。本稿では2023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. 2023年度における相対重力測定

2023年度に相対重力測定を実施した重力点はFig. 1の丸印および橙色星印の計27地点である。このうち, 丸印は前年度にも測定を実施した重力点（風間ら, 2023）を意味しており, 相対重力測定の基準点であるSVOG（桜島火山観測所）を含めて計20点である。ただし, 曾於市のBM2789は水準点の亡失により測定できなかったため（3.1節参照）, 丸印のうち2023年度に測定できた地点は計19点であった。

これに加えて, 2023年度には桜島島内の8地点（Fig. 1dの橙色星印）でも重力測定を実施した。桜島島内では2013年度まで約40地点で相対重力値が測定されていたものの（山本ら, 2014）, 人員・時間・予算などの制約に伴って近年では緑色丸印の地点でのみ重力測定していた。本研究は桜島火山の重力変化をより稠密に把握するために, 重力点の空間密度を考慮してFig. 1dの8地点で10年ぶりに相対重力値を測定することとした。なお, 桜島南西部沿岸ではS12重力点（Fig. 1dの白色星印）で測定する計画だったが, S12周辺の草木が繁茂して測定が困難であったため, 隣接の重力点であるS10で測定を実施した。

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。各測定日における重力計の使用状況は以下の通りである。

- 2023年10月30日~11月8日には, 北海道大学のLaCoste重力計2台（G31・G791）, 京都大学理学研究科のLaCoste重力計1台（G534）, および京都

大学防災研究所桜島火山観測所のLaCoste重力計1台（G892）によって全27点の相対重力測定を集中的に実施した。

- 2024年3月4日~7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（計13点）における相対重力測定を実施した。このうち, G892重力計は2018年10月の重力測定中に故障し, それ以降測定できない状態になっていた。本研究は複数の予算を使用して2023年度上半期にG892重力計を修理し, 2023年10月より桜島での測定を再開した。G892重力計を含む各重力計の, 各重力点における配置は付録中のFig. A1に示した通りである。各重力点におけるG892重力計の配置は, 近年LaCoste重力計D58を設置していた場所と全く同じである（Fig. A1 in 風間ら, 2020; Fig. 4 in 風間ら, 2022）。これはG892重力計が測定不能となっていた2019~2022年の期間中, G892重力計の代替機としてD58重力計を使用していたことに由来する。

3. 2023年度の相対重力値の算出

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（バネの長さに対応） 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（e.g., 若林ら, 2022）。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。

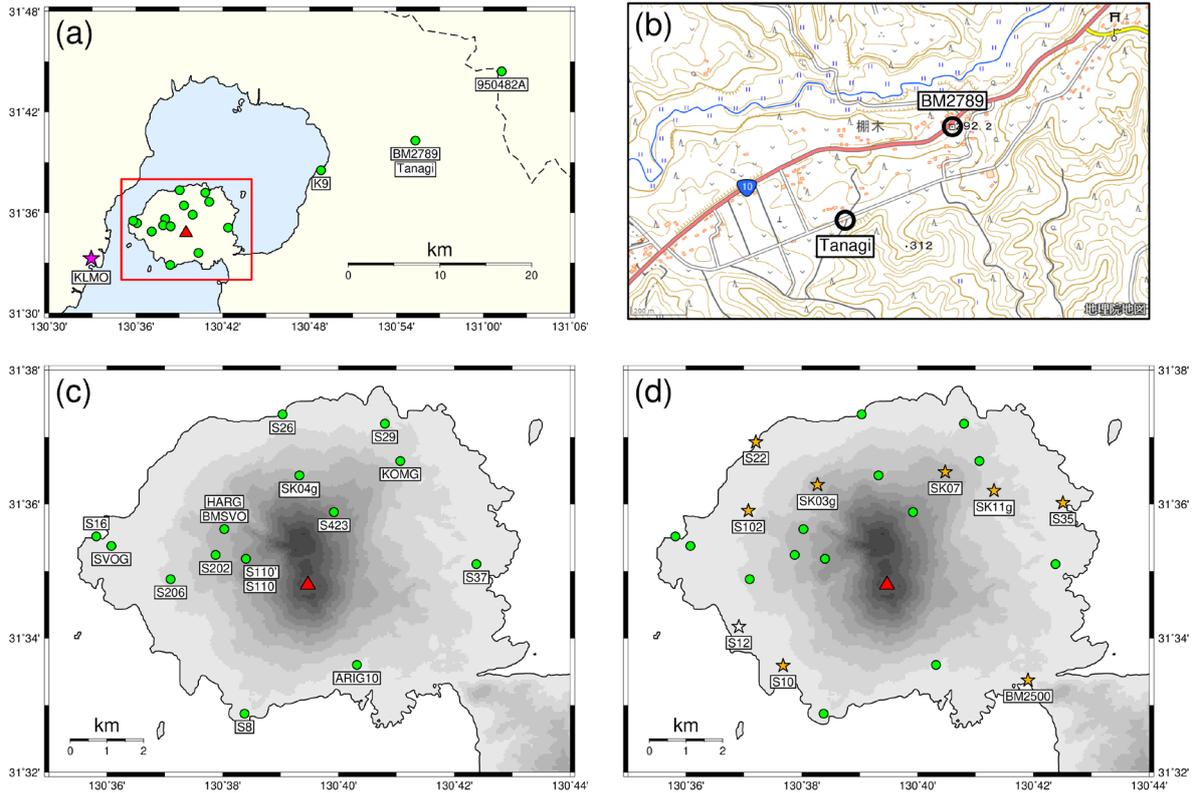


Fig. 1 Gravity points around Sakurajima Volcano. (a) The wide-area map around Sakurajima Volcano. Green circles and red triangles indicate the regular gravity points and Minami-dake Crater, respectively. A pink star, a red rectangle, and a dashed line indicate the location of the weather station at Kagoshima Local Meteorological Observatory (KLMO), the area of the panels (c)–(d), and the boundary between Kagoshima and Miyazaki Prefectures, respectively. (b) The topographic map of the Tanagi region, Soo City, provided by Geospatial Information Authority of Japan. Circles indicate the gravity points in the Tanagi region. (c)(d) Topographic maps of Sakurajima Volcano, contoured every 100 m altitude using the topographic data provided by Geospatial Information Authority of Japan. Green circles indicate the regular gravity points where we measured gravity values in FY2022 and FY2023. Orange stars indicate the additional gravity points where we measured gravity values in FY2023, for the first time in the last 10 years. A white star is the S12 ARIG10 gravity point, where we gave up measuring gravity in FY2023.

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: $\text{mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)。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、特定の年月のうち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。

3.1 曾於市棚木の相対重力値の取り扱い

鹿児島県曾於市末吉町諏訪方の棚木地区では、従来から国土地理院の一等水準点2789を重力点(重力点名BM2789; Fig. 1b)として利用してきた。しかし、2023年11月1日の重力測定時に、BM2789として利用していた金属標が亡失していることが判明した。この重力点は定食屋の駐車場に位置していたが、この定食屋の閉店(2022年)および取り壊し(2023年)に

伴って重力点が亡失したものと考えられる。

BM2789の亡失に先行して、我々は2022年10月27日にBM2789近隣の棚木公民館(重力点名Tanagi; Fig. 1b)でLaCoste重力計G534による相対重力測定を実施していた。これは上述の定食屋が2022年に閉店したことに伴い、BM2789の将来の亡失の可能性を想定していたためである。この際の重力測定値は風間ら(2023)に記載されており、Tanagiの相対重力値はSVOG基準で -39.000 mGal 、BM2789基準で -4.733 mGal であった。また、G534重力計の設置位置は風間ら(2023)のFig. 4の通りである。

そこで我々は、2023年11月1日の重力測定においてはTanagi重力点で4台のLaCoste重力計による相対重力測定を実施した。各重力計の位置は本稿のFig. A1の通りであり、G534重力計については前年と同じ位

Table 1 Relative gravity values measured around Sakurajima Volcano in October–November 2023 and March 2024 (unit: mGal). The observer is expressed by the order of the authorship in this article. (a) The gravity points where we measured gravity for the first time in the last 10 years. (b) The gravity value at BM2789 was calculated by adding the conversion value of +4.733 mGal to the gravity value observed at Tanagi.

Year/Month	2023/10–11	2023/10–11	2023/10–11	2023/10–11	2024/03	Note
Gravimeter	G31	G534	G791	G892	G534	
Observer	#4, #5	#1	#3, #1	#2, #1	#1	
SVOG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
S16	+6.135	+6.132	+6.141	+6.122	+6.128	(a)
S22	+2.734	+2.735	+2.742	+2.761	+2.738	(a)
S26	−11.499	−11.503	−11.479	−11.476	−11.489	
S29	−33.425	−33.447	−33.414	−33.408	−33.456	
S35	−26.444	−26.479	−26.440	−26.420		(a)
S37	−15.470	−15.478	−15.468	−15.456	−15.477	
BM2500	+9.052	+9.055	+9.055	+9.045		(a)
S8	−15.327	−15.332	−15.327	−15.306	−15.338	
S10	−5.887	−5.884	−5.882	−5.886		(a)
S102	−9.924	−9.946	−9.932	−9.923		(a)
BMSVO	−89.121	−89.110	−89.095	−89.106	−89.132	
HARG	−89.277	−89.264	−89.247	−89.246	−89.299	
S202	−60.738	−60.722	−60.712	−60.674	−60.728	
S206	−29.832	−29.817	−29.803	−29.790	−29.827	
S110	−113.993	−113.999	−113.981	−113.905		
S110'	−113.921	−113.923	−113.914	−113.850		
ARIG10	−14.104	−14.101	−14.090	−14.090	−14.108	
SK11g	−40.808	−40.839	−40.818	−40.795		(a)
SK07	−85.902	−85.881	−85.866	−85.832		(a)
SK04g	−76.235	−76.245	−76.212	−76.200		
SK03g	−85.073	−85.058	−85.040	−84.994		(a)
S423	−141.548	−141.547	−141.531	−141.479		
KOMG	−37.227	−37.225	−37.208	−37.212	−37.242	
K9	+19.553	+19.535	+19.543	+19.554		
BM2789	(−34.256)	(−34.271)	(−34.258)	(−34.224)		(b)
Tanagi	−38.989	−39.004	−38.991	−38.957		
950482A	−18.374	−18.388	−18.386	−18.355		

置に設置した。また、SVOG基準点に対するTanagi重力点の相対重力値はTable 1に示した通りである。さらにTable 1には、Tanagiに対するBM2789の相対重力値（+4.733 mGal; 2022年10月27日のG534重力計の測定値に基づく）をもとに、SVOGに対するBM2789の仮想的な相対重力値も括弧付きで記載している。

本稿ではこれ以降、2023年秋季においてもBM2789重力点で仮想的に重力測定が実施されたものとし、Table 1の括弧付きの値を用いてBM2789の重力時間変化を計算する。ただし、Tanagi重力点では4つの重

力計をそれぞれ70 cmずつ離して設置したため（Fig. A1），Tanagi重力点の中で水平方向の重力差が無視できないほど大きい場合には、Tanagi → BM2789の化成値が実際には重力計ごとに異なる可能性もある。本稿では最も単純な方法として全重力計に対して化成値が同じ（+4.733 mGal）である状況を仮定したが、今後Tanagi重力点で各重力計の設置場所どうしの水平重力差を測定できたならば、将来の論文中で各重力計の化成値を更新する可能性があることをここで付記しておく。

3.2 テアの取り扱い

2023年秋の相対重力測定においては、以下の2か所でテア（衝撃などに起因する重力値のステップ的な変化）が入ったと考えられる。

- G31 重力計は 2023 年 10 月 31 日に、SVOG → S16 → S206 → S202 → BMSVO → HARG → S110 → S110' というルートで往復測定を実施した。しかし、S110 重力点で復路の測定を行う直前に重力計本体を付近の石柱にぶつけたため、 $-50 \mu\text{Gal}$ 程度（測定者本人の試算による）のテアが入った。
- G791 重力計は 2023 年 11 月 2 日に、SVOG → S8 → ARIG10 → S37 → S29 → S26 → SK04g → S423 というルートで往復測定を実施した。しかし、ARIG10 重力点で往路の測定を終えた直後に重力計本体を収納ケースにぶつけたため、テアが入った可能性が測定者より指摘された。

そこで本研究は、上記2つの重力データの器械ドリフトをそれぞれ推定する際に、テアに相当する未知パラメータを1個増やした上で、観測方程式の逆解析に基づく最小二乗解析を個別に実施した（e.g., 付録1 in 風間ら, 2022; 付録2 in 風間ら, 2023）。この逆解析はMicrosoft Excel上で行い、計算結果のExcelファイルは電子付録のZIPファイル内に格納している（詳細は本稿の末尾を参照）。逆解析の結果、G31 重力計のテアは $-47 \mu\text{Gal}$ 、G791 重力計のテアは $-40 \mu\text{Gal}$ と計算された。なお、Table 1に記載された相対重力値は、このテアを補正した後の値である。

4. 1998年以降の相対重力時間変化

桜島火山では1975年からLaCoste重力計による相対重力キャンペーン測定が実施されてきた。このうち、1970年代～1990年代前半は桜島西岸のS16水準点がキャンペーン測定の始点・終点として使用され、南岳火口の噴火活動活発期に該当する1975～1992年には桜島島内の各重力点で時間に対して直線的な重力増加が観測されてきた。この重力増加は主に桜島直下におけるマグマ質量の増加を反映していると考えられている（Oyanagi et al., 2023）。その後、1990年代後半になると南岳火口の噴火活動が静穏化し、これと同時期の1998年には重力キャンペーン測定の始点・終点は利便性の観点から桜島火山観測所SVOGに移された。すなわち、1998年以降現在に至るまで相対重力キャンペーン測定は一貫してSVOGを基準として実施されており、この相対重力データを統合解析することで南岳静穏期における桜島直下の質量変動を把握できると期待される。また、桜島内部のマグマ輸送システムが南岳噴火活発期と同様なので

あれば、1998年以降の重力変化も時間的に直線的になるものと予想される。

そこで我々は、1998～2024年における各重力点の重力時間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相対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SVOG基準の相対重力値を Δg_{ij} と書くと、 Δg_{ij} は以下のように表現できる（風間ら, 2018）。

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

ただし、 a は相対重力の経年変化速度、 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・推定することにより、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、1998～2024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 と各重力計の切片値 b_j を推定する。

本稿で重力測定データを使用する重力計は、G31, G375, G534, G680, G682, G705, G791, G891, G892, G1090の計10台である。ただし、G680重力計については2019年度上半期にオーバーホールを実施し、この前後でスケールファクターが変化したことが分かっている（若林ら, 2022）。これは本稿においては、オーバーホールの前後で式(1)の切片 b_j が変化したことを意味する。そこで本稿では、オーバーホール前後のG680重力計をそれぞれ仮想的に「G680a重力計」「G680b重力計」と命名し、G680a重力計とG680b重力計の切片値を別々に推定する。

4.1 桜島中央部における相対重力時間変化

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、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山口付近；標高519 m）の相対重力時間変化を示している。この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増加しており、相対重力変化速度とその標準偏

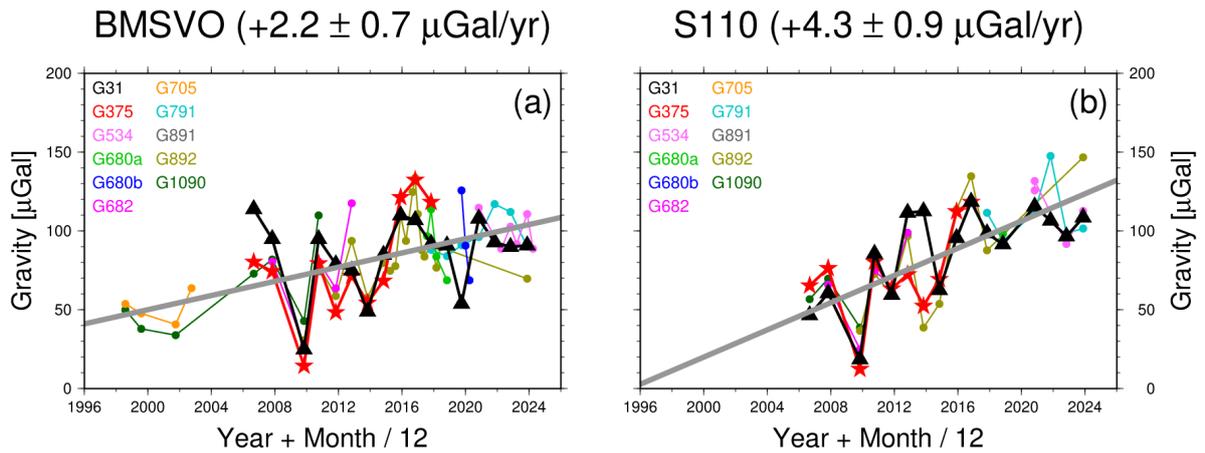


Fig. 2 Relative gravity variations observed at the central part of Sakurajima Volcano. Colored symbols indicate the measured gravity values relative to the SVOG's reference gravity point, and thick gray lines indicate the regression lines to the measured gravity values. The panels of (a) and (b) show the gravity variations at the BMSVO and S110 gravity points, respectively.

差はBMSVOで $+2.2 \pm 0.7 \mu\text{Gal/yr}$, S110で $+4.3 \pm 0.9 \mu\text{Gal/yr}$ 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（Fig. 1a星印の鹿児島地方気象台の気象データより；気象庁, 2024）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。

4.2 桜島遠方点における相対重力時間変化

Fig. 3はSVOGを基準とした桜島遠方2地点の重力時間変化を示している。相対重力変化速度はBM2789（標高292 m; 詳細は3.1節参照）で $-1.4 \pm 1.2 \mu\text{Gal/yr}$, 950482A（GEONET点「都城」; 標高166 m）で $-1.3 \pm 1.2 \mu\text{Gal/yr}$ である。遠方2地点における相対重力変化速度の標準偏差はFig. 2の2地点（BMSVOおよびS110）の標準偏差よりも大きくなっており、これは主に遠方2地点での重力データの取得期間が短いためである。それにもかかわらず、BM2789と950482Aでは標準偏差を超える程度に負の相対重力変化が確認でき、これは桜島西麓のSVOGに対して遠方点がわずかに重力減少していることを意味している。なお、BM2789と950482Aで標準偏差を超えるほどの重力変化が観測されたのは、これら2地点での重力測定を

開始して以降今回が初めてである。この原因としては、これら2地点で重力変化が大きくなってきたというわけではなく、重力データの取得期間が徐々に長くなってきたために標準偏差が低減してきたことが考えられる。

SVOGに対する桜島遠方点の重力減少の原因としては、「遠方点で絶対重力値が減少している」か、あるいは「SVOGで絶対重力値が増加している」という2つの可能性が考えられる。このうち前者の可能性については、950482A重力点の座標変化が参考となる。950482AではGEONET点による座標観測が連続的に行われているが、国土地理院のF5解（Takamatsu et al., 2023）によると、この地点の上下変位速度の大きさは 1 mm/yr よりも小さいことが分かっている。このことから、950482A重力点をはじめとした遠方点では、上下変位に伴う絶対重力変化は非常に小さいと予想される。すなわち、Fig. 3の相対重力変化は、桜島西麓のSVOGにおける絶対重力値の増加を反映しているものと考えられる。

5. 1998年以降の重力時間変化の空間分布

本章では各重力点における1998年以降の重力変化速度を地図上に図示し、重力変化速度の空間分布を把握する。この際、重力測定の延べ回数が20回を超える重力点のみを図示することとし、これにより重力変化速度の標準偏差の大きい重力点を結果的に除外することができる。

5.1 SVOG基準の相対重力時空間変動

Fig. 4aの緑色丸印は、上述の図示基準を満たした

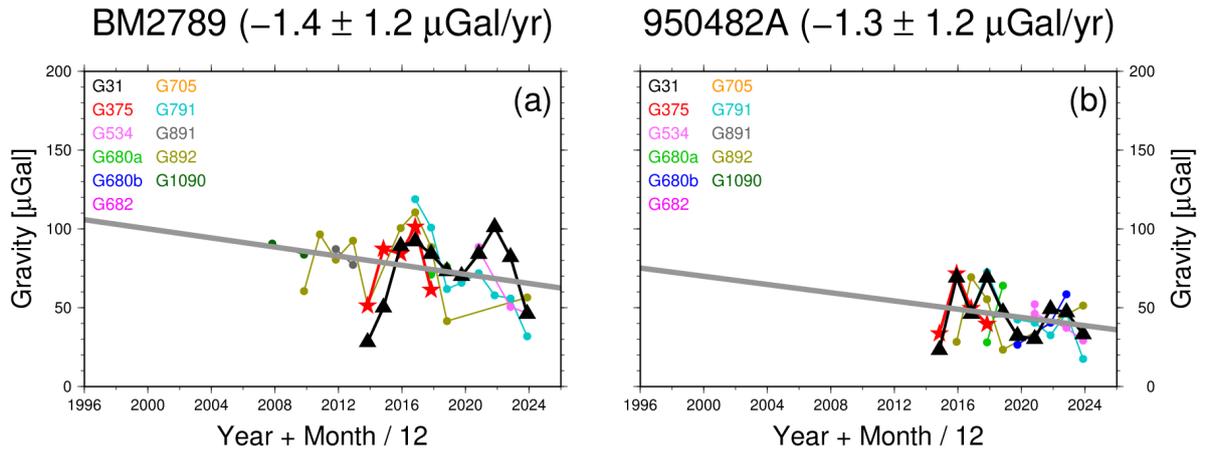


Fig. 3 Relative gravity variations observed at the gravity points far from Sakurajima Volcano. Colored symbols indicate the measured gravity values relative to the SVOG's reference gravity point, and thick gray lines indicate the regression lines to the measured gravity values. The panels of (a) and (b) show the gravity variations at the BM2789 and 950482A gravity points, respectively.

重力点である。我々は2023年秋季に例年よりも多くの重力点で測定を実施したため (Fig. 1d), 基準を満たす重力点は28点 (Fig. 3 in 風間ら, 2023) から32点に増えた。今回新たに基準を満たした重力点は桜島北側～東側の中腹に位置する4地点 (SK03g, SK07, KOMG, SK11g) であり, これによりこの地域の重力時空間変動をより面的に把握することができるようになった。

Fig. 4aの矢印は, 桜島西麓のSVOG重力点を基準とした各重力点の相対重力変化速度 (式(1)の a) である。桜島島内の相対重力変化速度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 (Oyanagi et al., 2023), Fig. 4a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)。

Fig. 4aの楕円は, 相対重力変化速度 a の標準偏差 (今後 σ_{rel} と記す) を示している。我々は桜島島内の8地点で2023年秋季に10年ぶりに測定を実施したため, これらの重力点では重力変化速度の標準偏差が大幅に低減している。例えば, 桜島北西のS102重力点では, 既存の2006～2013年の重力データを用いると相対重力変化速度は+1.6 \pm 1.7 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ と計算されていた (Fig. 3 in 風間ら, 2023)。しかし, 2023年秋季の重力測定値を加えることで, 今回S102重力点の相対重力変化速度は+2.1 \pm 0.9 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ と計算された。これにより, S102重力点では標準偏差が従来の約半分となり, かつ標準偏差を超えるような有意な相対重力変化が確認された。

5.2 遠方基準の絶対重力時空間変動

Fig. 4bの矢印は桜島から最も遠方に位置する950482A重力点を基準とした重力変化速度である。SVOGを基準とした950482Aの相対重力変化速度は-1.3 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ であったことから (Fig. 3b), Fig. 4bの重力変化速度 (950482A基準) はFig. 4aの相対重力変化速度 a (SVOG基準) に1.3 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ を足し合わせたものとなっている。また, 4.2節の議論より, 950482Aにおける上下変位は小さく, 950482Aでは地殻変動に伴う絶対重力変化は起きていないものと予想される。そのため, Fig. 4bの重力変化は桜島島内における絶対重力変化として解釈することができる。桜島における絶対重力変化速度は, 相対重力変化速度 (Fig. 4a) と同様に火口に近いほど大きく, 特に山頂西側直近のS110で最大値+5.6 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ を取っている。

Fig. 4bの楕円は絶対重力変化速度の標準偏差 (σ_{abs} と記す) で, 以下の式で計算される。

$$\sigma_{abs} = \sqrt{\sigma_{rel}^2 + \sigma_{ref}^2} \quad (2)$$

このうち, σ_{rel} は各重力点の相対重力変化速度 (SVOG基準) の標準偏差, σ_{ref} はSVOG～950482A間の相対重力変化速度の標準偏差である。 $\sigma_{ref} > 0$ (今回の場合は $\sigma_{ref} = 1.2 \mu\text{Gal}/\text{yr}$) であるため, 各重力点の σ_{abs} (Fig. 4bの楕円) は σ_{rel} (Fig. 4aの楕円) よりも大きくなっている。ただし, 相対重力変化 (Fig. 4a) を絶対重力変化 (Fig. 4b) に変換した際, 標準偏差の増加分よりも重力変化速度の増加分の方が大きかったため, Fig. 4bでは桜島沿岸の複数の重力点で標準偏差を超えるほどの有意な絶対重力増加が確認でき

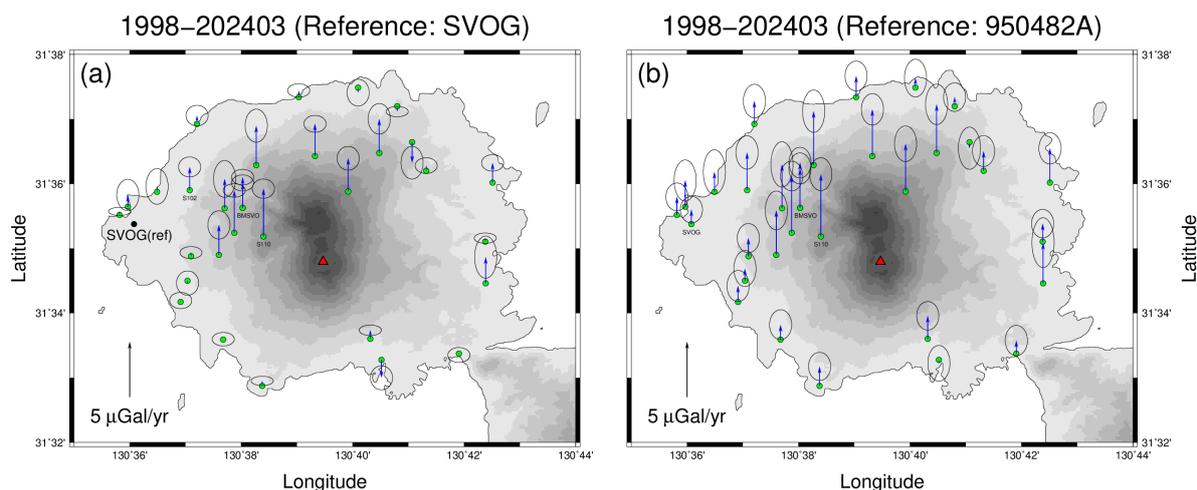


Fig. 4 Spatial distributions of gravity variation rate determined using the relative gravity change observed from 1998 to 2024. Blue arrows and black ellipses indicate the observed gravity variation rate and its standard deviation, respectively. (a) The gravity variation rate relative to the SVOG gravity point located at the western foot of Sakurajima Volcano. (b) The gravity variation rate relative to the 950482A gravity point, which is the farthest gravity point from Sakurajima Volcano.

る。これにより、桜島中央部だけでなく、沿岸部を含めた桜島全域で重力が増加していることが分かる。

5.3 重力時空間変動の試行的再現

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. 4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。Oyanagi et al. (2023)は南岳噴火活発期 (1975~1992年) 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桜島中央部の海拔下約4 kmにおける $4.5 \times 10^{10} \text{ kg/yr}$ の質量増加によって再現した。また、Oyanagi et al. (2023)はこの質量増加の物理メカニズムとして、浅部マグマだまり内部に高密度の脱ガスマグマが蓄積し、さらに脱ガスマグマの体積収縮を補うように地下深部から新たなマグマ質量が供給さ

れるプロセスを挙げている。

そこで我々は、地殻変動を伴わないような質量増加が南岳噴火静穏期の1998~2024年においても桜島内部で継続している状況を想定し、絶対重力変化速度の空間分布 (Fig. 4b) を点的な質量増加によって試行的に再現した。点質量ソースの未知パラメータは3次元的位置座標と質量増加速度の4つであり、Oyanagi et al. (2023)のグリッドサーチ解析に基づくパラメータ推定結果を参考に試行錯誤的に決定した。その結果、北岳直下の海拔下4.0 kmに $1.4 \times 10^{10} \text{ kg/yr}$ の質量増加を置くことで、1998~2024年に観測された絶対重力変化の振幅や空間分布を概ね再現できることが分かった (Fig. 5)。今回試算された点質量ソースの位置は南岳噴火活発期 (Oyanagi et al., 2023) とほぼ同じであったが、質量増加速度については南岳噴火活発期の約3割となった。これは浅部マグマだまりにおける脱ガスマグマの蓄積速度やマグマ質量の深部からの供給速度が南岳噴火活発期に比べて低下したことを示唆しており、1990年代後半以降の噴火活動がそれ以前と比べて静穏であることと調和的である。ただし、本稿の試算においては地殻変動の寄与 (萩原, 1977) を補正しておらず、またパラメータの推定方法も試行錯誤的推定に留まっている。南岳噴火静穏期における桜島内部の質量変動をより高精度に決定するためには、今後の研究でこれらの点を改善する必要がある。

ところで、我々は毎年の京都大学防災研究所年報で前年度の重力測定結果を逐次報告しており、その中では点質量ソースの試算結果も示してきた。ただ

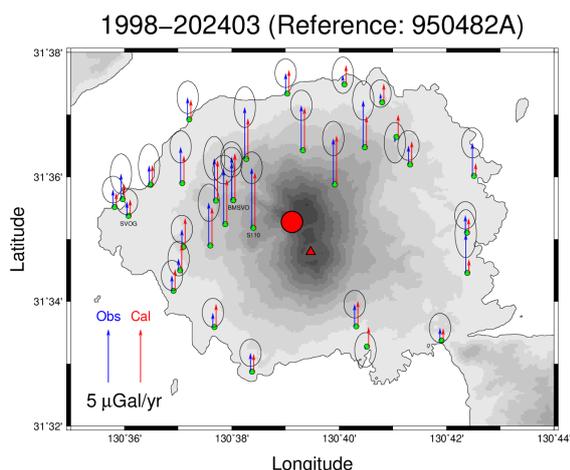


Fig. 5 Gravity variations due to the mass increase in Sakurajima Volcano. Blue arrows and black ellipses indicate the observed gravity variation rate relative to the 950482A gravity point and its standard deviation, respectively (Fig. 4b). Red arrows indicate the gravity variation rate due to the point mass source located under the center of the volcano (the red circle).

し、これまでの試算 (e.g., 風間ら, 2023) ではSVOG基準の相対重力変化速度のデータ (本稿のFig. 4aに相当) を利用しており、この影響で点質量ソースの深さや質量増加速度が本研究の試算結果よりも小さくなっていった。これは、SVOG基準の相対重力変化速度のデータを用いると、SVOGでの絶対重力変化が加味されず、桜島全体の重力変化速度が過小評価されるためである。すなわち、点質量ソースの深さや質量変動量を正確に推定するためには、本稿のように桜島島内の重力変化を絶対値で把握するべきである。そのためには、桜島島内や遠方点での相対重力測定を今後も継続し、長期の安定した重力変化を観測していく必要がある。

6. まとめ

我々は2023年10~11月と2024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27地点の相対重力値を決定した。また、各重力点における南岳噴火静穏期 (1998~2024年) の相対重力変化速度を計算し、これを遠方点基準の絶対重力変化速度に変換した。その結果、桜島島内ではこの期間に最大+5.6 $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ 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、桜島中央部直下の海拔下4.0 kmに 1.4×10^{10} kg/yrの質量増加を置くことで概ね再現できる。この質量増加の位置は南岳噴火活発期 (1975~1992年) とほぼ同じだが、質量増加速度は活発期の約3割と推定された。ただし、本稿の

質量変動源に関するパラメーターはあくまでも試行錯誤に基づく試算であり、今後はより詳細な解析が必要である。また、今後も桜島周辺での相対重力測定を継続し、長期の安定した重力変化を観測していく必要がある。

謝辞

2024年3月の重力測定では、京都大学学生の榎本倫太郎氏・高山祐輝氏・船津圭汰氏・村本空太氏・毛利智紀氏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)、東京大学地震研究所共同利用 (課題番号2022-B-04)、日本学術振興会科研費 (課題番号22K03777)、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。本稿の図は地理院地図および描画ソフト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.
- 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・大柳諒・岡田和見・大島弘光・井口正人 (2020): 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 (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.
- 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 (2023): 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), 京都大学防災研究所年報, 第66B巻, pp. 67–75.
- 気象庁 (2024): 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・植木真人・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.
- 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 (2022): LaCoste型およびScintrex型相対重力計におけるスケールファクターの読取値依存性の検定, 測地学会誌, 第68巻, pp. 49–68.
- 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.
- Oyanagi, R., Kazama, T., Kazahaya, R., Miyagi, I., Yamamoto, K. and Iguchi, M. (2023): Magma mass increase under Sakurajima Volcano, Japan, inferred from 1975 to 1992: An interpretation from volcanic gas studies, *Research Square*, doi:10.21203/rs.3.rs-2880929/v1.
- Takamatsu, N., Muramatsu, H., Abe, S., Hatanaka, Y., Furuya, T., Kakiage, Y., Ohashi, K., Kato, C., Ohno, K. and Kawamoto, S. (2023): New GEONET analysis strategy at GSI: daily coordinates of over 1300 GNSS CORS in Japan throughout the last quarter century, *Earth Planets Space*, Vol. 75, No. 49.
- Takayama, H. and Yoshida, A. (2007): Crustal deformation 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.

付 録

Fig. A1は各重力点における各重力計の測定位置を示しており, 今後の重力測定において点の記として利用可能である. 2023年秋季には8箇所の重力点で10年ぶりに重力測定を実施したため, この図中にはこれら8地点の詳細も記載している. また, これまでの重力測定の履歴を残す意図により, 2023年度に重力測定を実施しなかった重力点・重力計についても図中に記載している.

本稿にはZIPファイルを添付しており, この中のGravityDataフォルダ内には2023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. フォルダ構造はGravityData/yyyymm-G###となっており, yyyy mmは測定年月を, ###はLaCoste重力計のシリアル番号を意味している. yyyy-mm-G###フォルダ内には, 相対重力測定の生データ (拡張子はtxt) と解析結果 (拡張子は1st) を格納している. また, 測定中にテアが生じた重力計についてはMicrosoft Excelでテアの推定を行っており (第3章参照), フォルダ内に該当のExcelファイル (拡張子はxlsx) も格納している.

ZIPファイル内のFiguresフォルダ内には, 本稿で掲載した図の生データ (拡張子はpng) を格納している. 図のファイル名は本稿の図番号と一致させているが, 点の記 (Fig. A1) については本稿の各ページへの分割に合わせてfigA1.png, figA2.png, figA3.pngという3つの図を個別に保存している.

(論文受理日: 2024年8月31日)

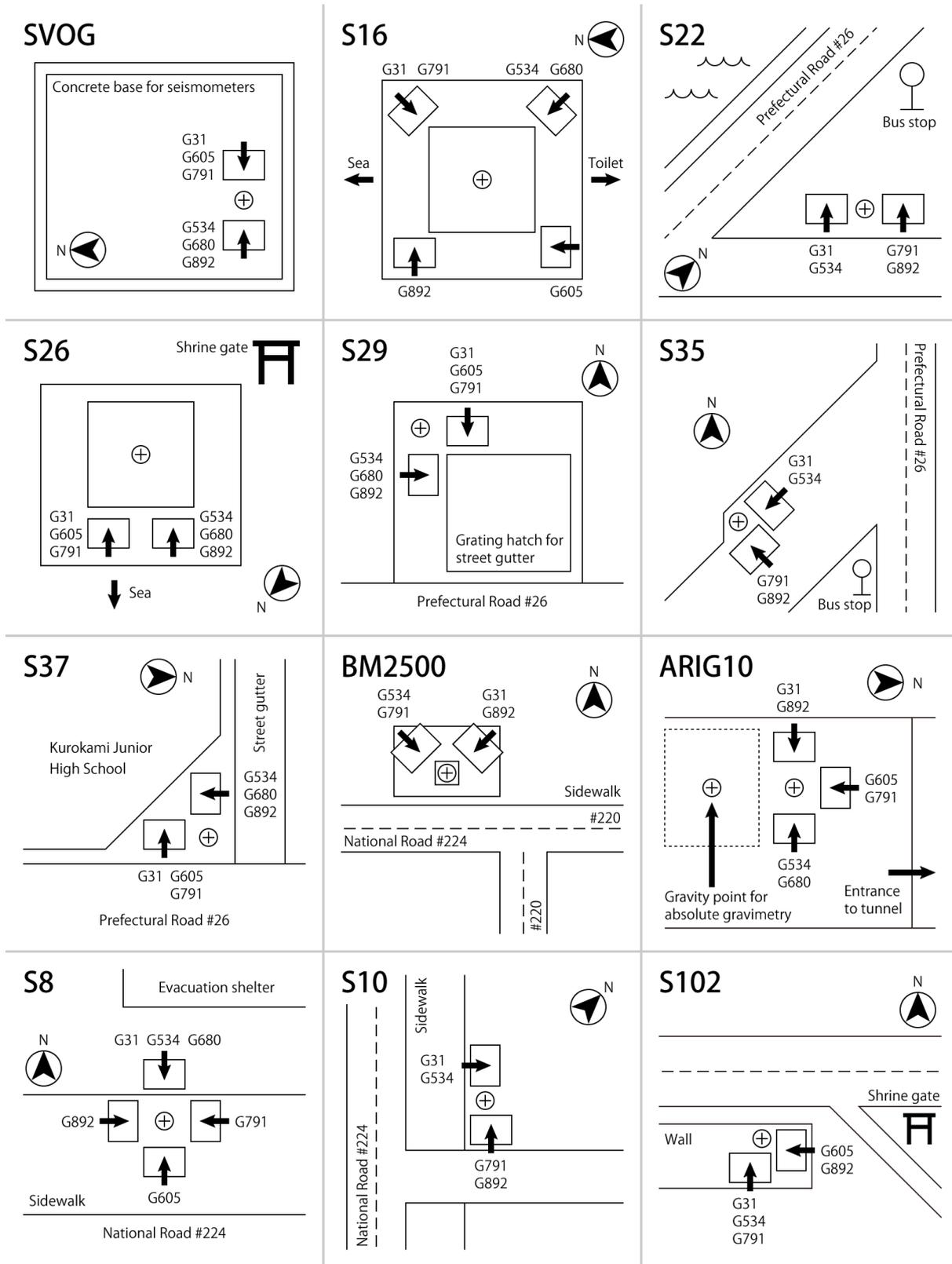


Fig. A1 Locations of relative gravimeters at each gravity point.

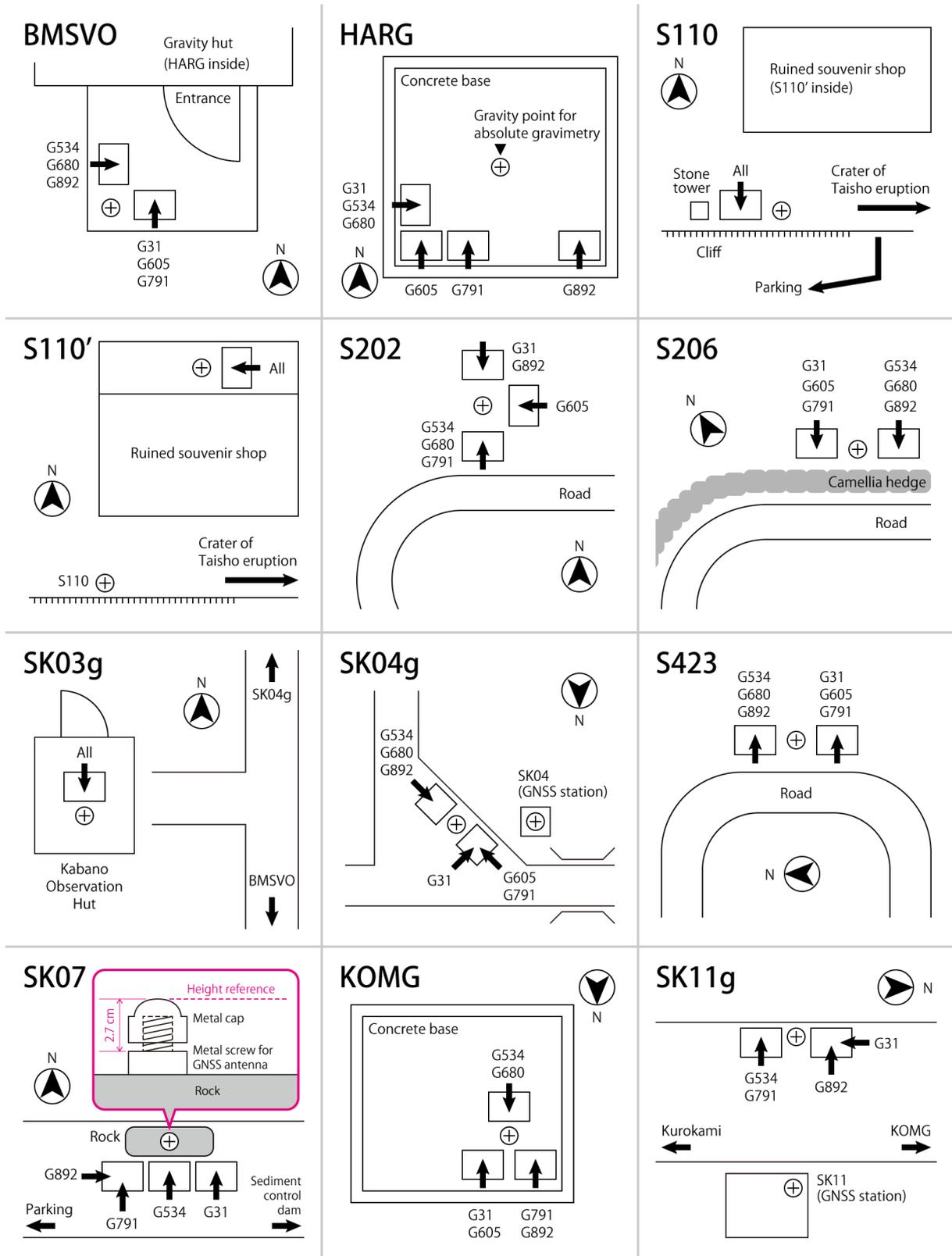
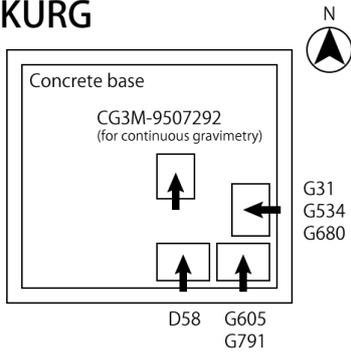
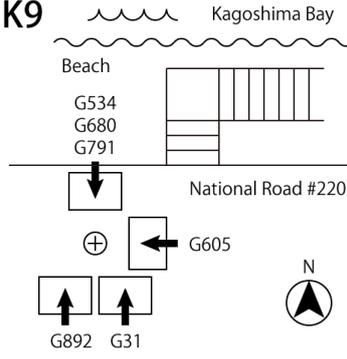


Fig. A1 (cont.)

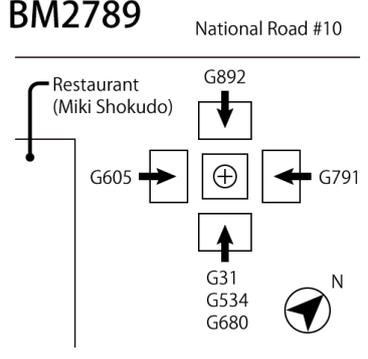
KURG



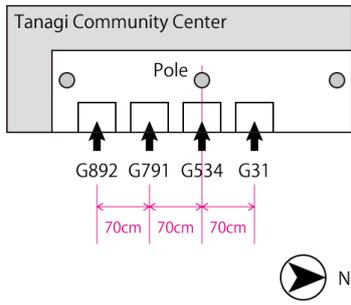
K9



BM2789



Tanagi



950482A

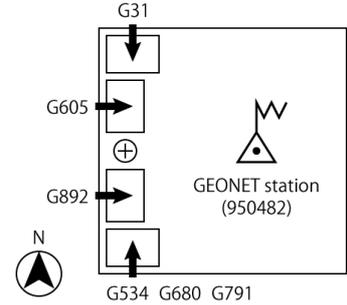


Fig. A1 (cont.)