

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)

風間卓仁^{1)*}・吉川 慎²⁾・長縄和洋¹⁾・宮内佑典¹⁾・大倉敬宏²⁾・福田洋一¹⁾

¹⁾ 京都大学大学院理学研究科

²⁾ 京都大学地球熱学研究施設火山研究センター

Absolute gravity measurements and scale factor calibration of relative gravimeters in the northern part of Kumamoto Prefecture in August 2018

Takahito Kazama^{1)*}, Shin Yoshikawa²⁾, Kazuhiro Naganawa¹⁾, Yusuke Miyauchi¹⁾,
Takahiro Ohkura²⁾ and Yoichi Fukuda¹⁾

¹⁾ Graduate School of Science, Kyoto University

²⁾ Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University

Abstract

Absolute and relative gravity values were measured in the northern part of Kumamoto Prefecture in August 2018, in order to calibrate the scale factors of relative gravimeters and to observe spatiotemporal gravity variations in this area. Absolute gravity data were collected at two gravity points, Mashiki and HondoA (184 and 1166 m altitude, respectively), and both absolute gravity values were determined with about 2.6 μGal precision. The absolute gravity values and simultaneously measured relative gravity data were utilized in estimating the scale factors of five relative gravimeters under the least-square approach; accordingly, the scale factors were determined in the range of 0.996992 (LaCoste & Romberg D58) to 1.002390 (Scintrex CG6-18010054) within about 8×10^{-5} precision. By comparing the gravity values with past values, the absolute gravity at Mashiki was found to have decreased by 27 μGal since August 2016 because of ground uplift after the 2016 Kumamoto earthquake and hydrological mass decrease. In contrast, the gravity values at HondoA were found to have increased by 85 μGal since 2000, mainly because of ground subsidence associated with the 2016 Kumamoto earthquake and magma chamber deflation under Aso volcano.

Keywords: absolute gravity, relative gravity, scale factor, 2016 Kumamoto earthquake, Aso volcano

1. はじめに

地震・火山活動を質量移動や密度変化の観点から議論することは地震・火山の活動メカニズムを知る上で重要であり、その際に有効となる手法の1つが重力観測である。例えば2000年三宅島噴火の際には、単点における重力連続観測と島内広域の複数点における相対重力繰り返し測定を組み合わせることで、マグマ移動や地殻変動に伴う重力時空間変化が明らかになった (Furuya et al., 2003)。また、2011年東北地方太平洋沖地震の後に東日

本における重力観測を複数点で定期的実施することによって、余効変動のうち粘弾性変形の寄与が2014年以降に卓越してきたことが分かってきた (大久保・他, 2018)。

地震・火山地域における近年の重力観測では、絶対重力計や可搬型相対重力計といった重力計が広く用いられている (e.g., 風間, 2019)。このうち絶対重力計は、コーナーキューブ・リフレクタを真空槽内部で落下させ、その落下距離と落下時間を精密に測定することで重力加速

* e-mail: takujin@kugi.kyoto-u.ac.jp (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

度の絶対値を高精度および高確度で測定できる装置である。現時点で広く用いられている絶対重力計は FG5 という機種であり、その測定誤差は約 $2\mu\text{Gal}$ である（ただし $1\mu\text{Gal}=1\times 10^{-8}\text{m/s}^2$; Niebauer et al., 1995）。一方、可搬型相対重力計は恒温槽内部にバネを有しており、バネの長さ変化によって重力加速度の変化を測定できる装置である。LaCoste & Romberg 型重力計（ラコスト重力計）も可搬型相対重力計の 1 つであり、手動読取式のラコスト重力計の場合には現場でバネの伸びの大きさを読み取り、測定終了後に変換表（ラコスト重力計の出荷時に添付される）を用いることで読取値を相対重力値に変換する。この他、Scintrex 社製の重力計（CG5 や CG6 などがあり、本稿ではこれらを総称してシントレックス重力計と呼ぶ）やフィードバック式に改造された一部のラコスト重力計では読取値→重力値の変換を自動で行うので、重力測定者は相対重力値をその場で知ることができる。なお、どの相対重力計においてもその測定誤差は経験的に $10\mu\text{Gal}$ 程度と言われている（e.g., 坪川, 2005）。

ところで、2 つの重力点で絶対重力測定と相対重力測定を実施した場合、2 点間の重力差はそれぞれの測定から Δg_A および Δg_R と得られる。この 2 つの重力差は本来一致するはずであるが、一般に両者の値は測定誤差を超える範囲で乖離することが知られている。その主な原因は相対重力計のバネの経年劣化などに伴い、読取値→重力値の変換関数にずれが生じることである。この変換関数のずれは通常 0.01% 程度の桁になることが知られており（e.g., 中川・他, 1977; 山本・他, 2018）、例えば $\Delta g_A=200\text{mGal}$ （標高差約 1000 m の 2 地点における重力差に相当；ただし $1\text{mGal}=1\times 10^3\mu\text{Gal}=1\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ ）では $|\Delta g_A-\Delta g_R|\sim 20\mu\text{Gal}$ と相対重力計の測定誤差よりも大きくなる。このずれを補正するためには

$$\Delta g_A = c \cdot \Delta g_R \quad (1)$$

となるように定数 c を決定すればよく、この定数 c はスケールファクター（本稿では SF または SF 値と記す）、また定数 c を決定する作業はスケールファクター検定（SF 検定）あるいはスケール検定と呼ばれている。すなわち、相対重力計によって正しい相対重力値を得るためには定期的な SF 検定が重要であり、そのためには絶対重力と相対重力の比較観測が必要不可欠である。

著者が所属する京都大学理学研究科および火山研究センターでも多数の可搬型相対重力計を有しており、絶対重力計との並行観測による SF 検定を定期的実施する必要があった。実際、2016 年 3 月には同研究科の所有する絶対重力計 FG5-210 とラコスト相対重力計 LC-G680

の比較測定がニュージーランドにて行われ、LC-G680 の SF 値として 1.000305 ± 0.000043 が得られた（Fukuda et al., 2017）。しかしながら、LC-G680 以外の相対重力計については SF 検定が長らく実施されておらず、正しい相対重力値を得られない可能性が指摘されていた（風間・他, 2018）。そこで本研究は、2018 年 8 月に熊本県北部において絶対重力および相対重力の比較観測を実施し、複数の相対重力計に対して SF 値を決定した。なお、重力観測地点に熊本県北部を選んだ主な理由は、[1] 複数の機関が過去に同地域内で絶対重力観測を実施したことがあるため、[2] 同地域内の標高差を利用して約 200 mGal の重力差を測定できるため、[3] 過去の絶対重力測定値と比較することで地震・火山活動に伴う重力時間変化を検出できると期待されるためである。

本稿ではまず熊本県北部における地震・火山活動や重力観測の履歴を述べ（第 2 章）、絶対重力および相対重力の測定結果を示す（第 3～4 章）。また、重力データから相対重力計の SF 値を決定する方法やその計算結果について論述する（第 5 章）。その上で、過去の重力データが存在している地点については絶対重力や相対重力の時間変化量を見積もり、重力時間変化の要因について検討する（第 3 章および第 5 章）。

2. 熊本県北部における地震・火山活動および重力観測の履歴

熊本県北部は別府-島原地溝帯（多田, 1993; Takayama and Yoshida, 2007）に位置しており、近年地震・火山活動が活発な地域である。熊本県北東部に位置する阿蘇山中岳（Fig. 1 の黒色三角印）は 20 年前後の周期で火山活動が活発化することが知られており（須藤・他, 2006）、2014 年～2015 年にはマグマ噴火が、2015 年～2016 年には水蒸気噴火がそれぞれ複数回発生した（横尾・宮縁, 2015; Miyabuchi et al., 2018; Sato et al., 2018）。また、熊本県北西部の日奈久断層帯および布田川断層帯では 2016 年 4 月に熊本地震が発生し、震度 7 を 3 日間のうちに 2 回記録したほか（Suzuki et al., 2017）、国土地理院の電子基準点網 GEONET では最大 98 cm の水平変位が観測され（檜山・他, 2016）、この変位は最大 5 m の断層すべりによるものと解釈された（矢来・他, 2016）。

熊本県北東部の阿蘇カルデラ内に位置する複数の水準点では、阿蘇火山の活動監視を目的として 1964 年～2008 年に数年間隔で相対重力測定が実施されてきた（吉川・他, 2009）。2011 年以降になると、より短い時定数の質量変動を検出することを目的として、阿蘇火山周辺の水準点で年 3～4 回の頻度で相対重力測定が繰り返し行

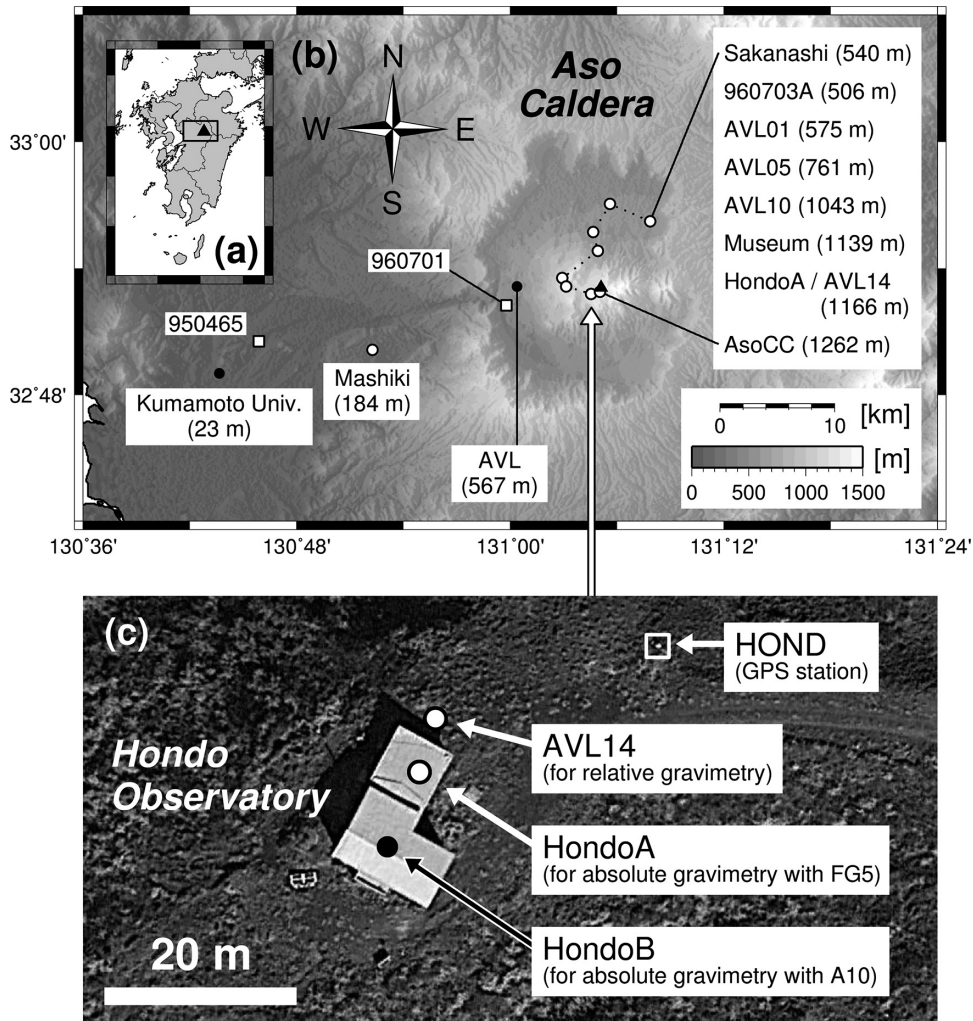


Fig. 1. (a) Map of Kyushu Island in western Japan. Triangle and square indicate summit of Aso volcano and map area of panel (b), respectively. (b) Topographic map of the northern part of Kumamoto Prefecture, drawn using a 50-m digital elevation model of Geospatial Information Authority of Japan. Black and white circles indicate gravity points where gravity data were collected and not collected, respectively, in August 2018. White squares and black triangle indicate GEONET stations and Nakadake crater of Aso volcano, respectively. (c) Satellite image of Hondo Observatory, derived from Google Earth Pro. Two white circles indicate gravity points, AVL14 and HondoA, where gravity data were collected in August 2018. Black circle indicates gravity point, HondoB (Sofyan et al., 2016), where gravity data were not collected in August 2018. Square drawn with white lines indicates GPS station, HOND (Fig. 5).

われてきた (Sofyan et al., 2016). 高頻度の相対重力繰り返し測定は 2019 年時点でも継続されており, 主に火山研究センター所有の 2 台のシントレックス相対重力計 (CG5-150241330 および CG6-18010054) が用いられている (宮内・他, 2019). また, いくつかの水準点では絶対重力計 A10-017 (測定誤差約 $10 \mu\text{Gal}$; Micro-g LaCoste, 2008) による絶対重力測定が繰り返し実施されてきたほか (Sofyan et al., 2016), 火山研究センター (南阿蘇村河陽) の重力点 AVL および本堂観測所 (阿蘇市黒川) の重力点 HondoA でも複数の絶対重力計 FG5 による絶対重力測定が定期的に行われている (菅野・他, 2009; 本稿

の Fig. 1 参照). なお, 火山研究センターは 2016 年の熊本地震で被災し 2019 年時点でも商用電源を利用できない状態にあるため, AVL では熊本地震以降 FG5 による絶対重力測定はなされていない.

熊本県北西部の熊本平野域では, 重力基準網の構築のために 1960 年代からいくつかの重力点が設置されてきた. 1961 年には国土地理院によって熊本大学黒髪キャンパス (熊本市中央区) に一等重力点「熊本」(Fig. 1b の Kumamoto Univ.) が設置され, それ以降研究者らが相対重力測定のためにこの重力点を利用してきた (中川・他, 1977). また, 1995 年には国土地理院が東海大学宇

Table 1. Parameters for absolute gravity measurements at Mashiki and HondoA.

Gravity point	Mashiki	HondoA
Latitude [deg]	32.8355	32.8795
Longitude [deg]	130.8710	131.0757
Elevation [m]	185.6	1152.0
Nominal pressure [hPa]	991.15	882.30
Barometric admittance [$\mu\text{Gal}/\text{hPa}$]	0.3	0.3
Vertical gravity gradient [$\mu\text{Gal}/\text{cm}$]	-3.225	-3.523
Transfer height [cm]	0.00	0.00
Polar position: X [arc-sec]	0.207158	0.211560
Polar position: Y [arc-sec]	0.380236	0.370514
Setup height [cm]	11.65	12.60

The parameters in the rows from “latitude” to “transfer height” are the same as those used in past gravity measurements. Polar position values are quoted from IERS Bulletin A. Setup height values were obtained during our absolute gravity measurements in August 2018.

宙情報センター（益城町杉堂）に基準重力点「熊本」（Fig. 1b の Mashiki）を新たに設置し、それ以降 FG5 による絶対重力測定が定期的実施されてきた（吉田・他, 2018）。この基準重力点では、2016 年熊本地震で AVL 重力点が使用できなくなって以降、京都大学が相対重力測定を定期的に行っており、火山活動に伴う重力時間変化を議論する際の重力不変点として利用されている（宮内・他, 2019）。この他、熊本地震の発生以降には可搬型相対重力計を用いた重力測定が熊本平野の広域で実施され、過去の相対重力データと統合することで地下密度分布を把握する研究が進められている（松本・他, 2016；盛川・他, 2017）。

3. 絶対重力測定

我々は 2018 年 8 月 20 日～22 日に東海大学宙情報センターの基準重力点「熊本」（本稿では Mashiki と記す）で、8 月 29 日～31 日に京都大学火山研究センター本堂観測所の重力点 HondoA で絶対重力計 FG5-210（京都大学理学研究科所有）による絶対重力測定を実施した。具体的には、コーナーキューブ・リフレクタの 1 回の落下ごとに Windows 用ソフトウェア g9（Micro-g LaCoste, 2012）にて絶対重力値を決定し、これを 10 秒おきに 100 回繰り返すことで 1 セットの絶対重力平均値を計算した。そして 1 セット 100 drops の測定を 30 分おきに繰り返し、これを 86 回（Mashiki）および 90 回（HondoA）繰り返すことによって絶対重力値の時系列（set gravity）を得た。測定の際に用いたパラメーターは Table 1 の通りであり、特に座標値や鉛直重力勾配値は過去の絶対重力測定における設定値と同じものを使用

した。この他の設定パラメーター、例えば潮汐変化に伴う重力変化の補正パラメーターなどについてはソフトウェア g9 の初期設定値（Micro-g LaCoste, 2012）を用いた。ただし、FG5 内蔵ルビジウム時計の周波数については 2018 年 8 月 21 日（Mashiki での絶対重力測定中）における実測値を利用した。この際、時計周波数は GPS 同期 10 MHz 時計を基準として周波数カウンターを用いて測定し、その実測値は $9999999.989939 \pm 0.000367 \text{ Hz}$ であった。なお、この値を 2018 年 11 月の測定値（ $9999999.990510 \pm 0.000045 \text{ Hz}$ ；著者らが 2018 年 11 月に南極・トロール基地で実測）と比較すると 3ヶ月間で $+0.000571 \text{ Hz}$ だけ変化したことになるが、この変化量は 2011～2012 年の測定結果（Fig. 4b in Kazama et al., 2013）と同様に十分に小さい。

ところで、FG5-210 の場合、重力計本体やコントローラーからの信号は主に PC カードを経由してノートパソコンに送られるが、コントローラー内蔵の気圧計のデータだけは RS232C ケーブルおよび RS232C-USB 変換ケーブルを経由して別系統で送信される。しかし、本測定の一部期間中には RS232C-USB 変換ケーブルの接続エラーにより気圧データを受信できなくなり、その影響で一部の重力データに対して気圧補正を適用できなくなる事態が発生した。そこで、我々は 2 重力点での絶対重力測定中に小型の気圧計 TR-73 U（ティアンドデイ社製）を用いて気圧値を連続観測し、現場で気圧補正できなかった set gravity データに対して事後解析で気圧補正を適用することにした。

Fig. 2 は Mashiki および HondoA で観測された気圧データであり、黒線が FG5 コントローラーの観測値

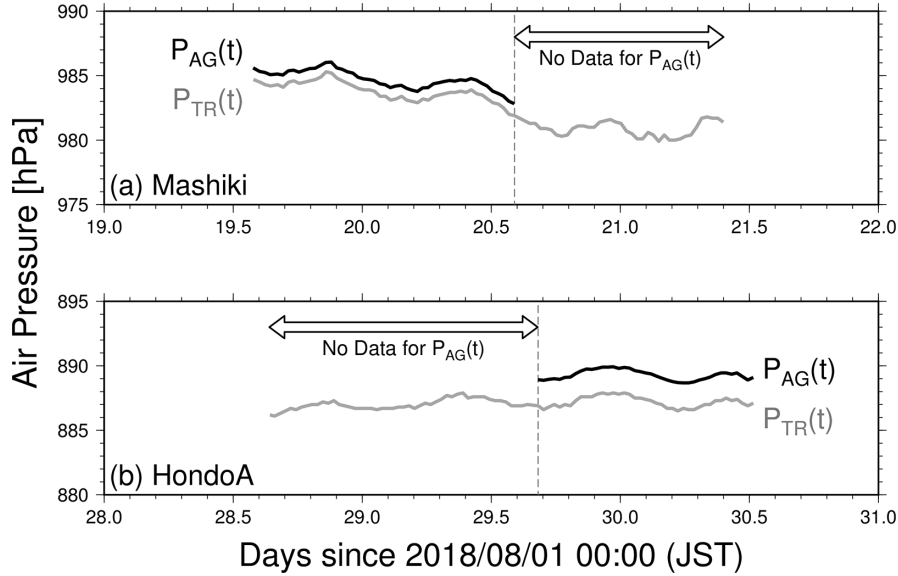


Fig. 2. Air pressure data collected at two absolute gravity points, Mashiki and HondoA (panels (a) and (b), respectively). Black lines indicate air pressure values collected in the controller of the FG5-210 absolute gravimeter. Gray lines indicate air pressure values collected with a portable barometer, TR-73U.

$P_{AG}(t)$, 灰色線が小型気圧計の観測値 $P_{TR}(t)$ である。 $P_{AG}(t)$ と $P_{TR}(t)$ は時間変化の形状がよく一致しているが、両者の間には主に器差に伴う系統的なずれが存在している。 $P_{AG}(t) - P_{TR}(t)$ の値を平均すると、Mashiki では 0.902 ± 0.065 hPa であり、HondoA では 2.076 ± 0.074 hPa となった。Mashiki と HondoA で $P_{AG}(t) - P_{TR}(t)$ の値に有意な違いが生じているが、これは重力計コントローラと小型気圧計の相対的な位置関係の違いによるものか、あるいは小型気圧計 TR-73U の系統誤差によるものと考えられる。ここで我々は全ての絶対重力データに気圧補正を適用するために、小型気圧計の気圧値 $P_{TR}(t)$ に 0.902 hPa (Mashiki) あるいは 2.076 hPa (HondoA) を足し合わせることで、 $P_{AG}(t)$ に相当する擬似的な気圧データを作成した。その上で、 $P_{AG}(t)$ が収録されていない時間帯については擬似気圧データを用いて set gravity データに対する気圧補正 (Micro-g LaCoste, 2012) を適用した。

3.1 Mashiki の絶対重力値

Fig. 3 は重力点 Mashiki の重力測定データや測定風景をまとめた図である。Fig. 3a は重力点 Mashiki の位置を示す金属標であり、この直上に絶対重力計 FG5-210 を Fig. 3b のように設置して絶対重力測定を実施した。Fig. 3e は気圧変化等の影響を補正した後の絶対重力値の時系列であり、1 set (=100 drops) の平均値 (すなわち set gravity) を黒丸で、および標準誤差を灰色線で示している。時間経過につれて誤差が大きくなっているのは、台

風 20 号 (絶対重力測定終了翌日の 8 月 23 日に四国に上陸) が日本に接近していた影響で強風に伴う地面振動が大きくなっていったためと考えられる。Fig. 3f は set gravity データのヒストグラムであり、set gravity データを積み付け平均することで 2018 年 8 月 20 日~22 日における Mashiki の絶対重力値の平均および標準偏差は $979\,511\,916.537 \pm 2.624$ μ Gal と得られた。

重力点 Mashiki では国土地理院が熊本地震後の 2016 年 8 月に FG5-203 を用いた絶対重力測定を実施している (吉田・他, 2018)。我々が絶対重力測定を再度行うまでの 2 年間で、Mashiki ではもともと以下の理由により重力値の増加が期待されていた。そもそも重力点 Mashiki は東海大学宇宙情報センター敷地内のアンテナ棟 (Fig. 3c) の内部床面に位置している。しかし、2017 年にアンテナ棟屋上に設置されていたパラボラアンテナが撤去され (Fig. 3d) 重力点上方で質量損失が起きたため、重力点では上向き万有引力を失い重力値が増加すると期待されたのである。坂田・他 (1988) によるとこのパラボラアンテナは開口直径 11 m であり、高さ約 25 m、総重量約 27 トンである。また、我々の現地での測量によると、重力点 Mashiki からアンテナ底面までの高さは約 4.5 m であった。ここで、アンテナ質量が重力点の直上 4.5 m で失われたと仮定すると、重力点における重力増加は 8.9 μ Gal と試算できる。また、アンテナ重心がアンテナ中央部にあったと仮定すると、重力点からアンテナ重心までの高さは $4.5 + 25/2 = 17$ m となり、この高さで 27

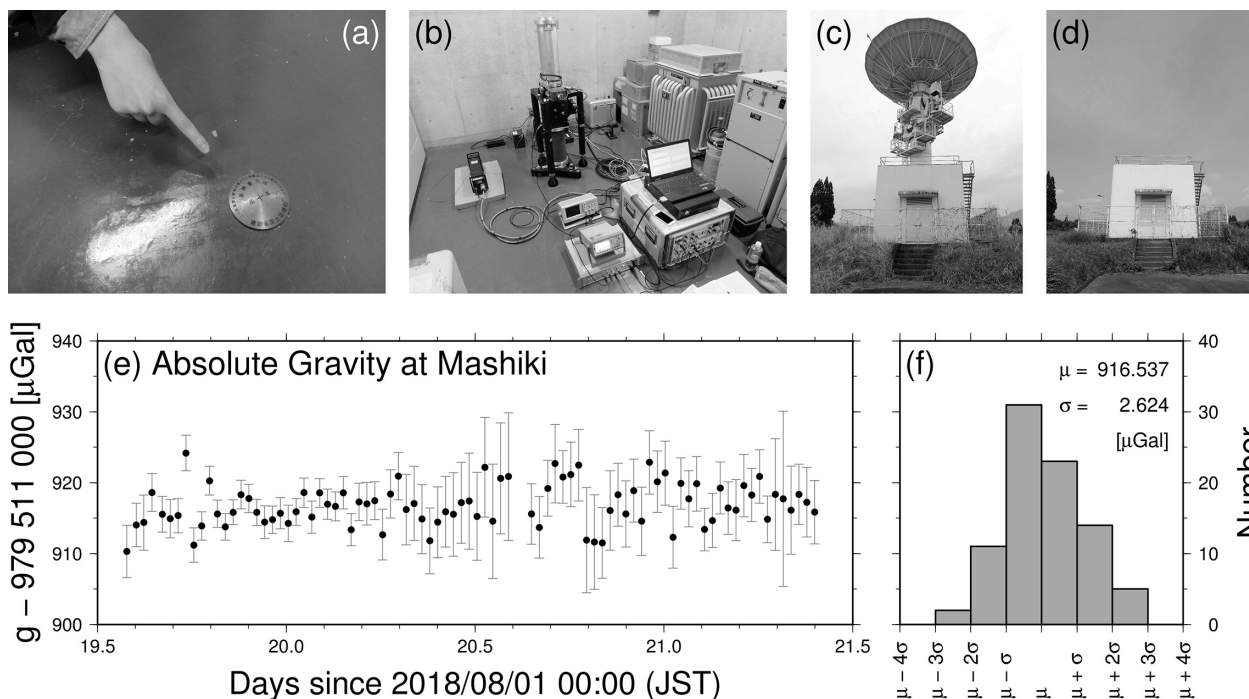


Fig. 3. Absolute gravity measurements at the Mashiki absolute gravity point. (a) Benchmark of gravity point. (b) FG5-210 absolute gravimeter, installed at gravity point on 20 August 2018. (c) Outward appearance of gravity point before absolute gravity was measured. An 11-m parabola antenna (Sakata et al., 1988) was located on the roof of the gravity point. (d) Outward appearance of gravity point when absolute gravity was measured in August 2018. Parabola antenna was removed in 2017 because of damage caused by strong vibrations during the 2016 Kumamoto earthquake. (e) Circles and error bars indicate set gravity and standard error values, respectively, obtained at Mashiki gravity point on 20–22 August 2018. (f) Histogram of set gravity data (the panel (e)). μ and σ indicate average and standard deviation of set gravity data, respectively. Note that value μ shown in the panel (f) means gravity value relative to 979 511 000 μGal .

トンの質量損失が起きた場合の重力増加は 0.6 μGal と試算できる。パラボラアンテナの構造上、実際のアンテナ重心は上記 2 例の間にあると予想されるので、重力点 Mashiki ではこの 2 年間で数 μGal の重力増加が起きたものと期待されていた。

しかしながら、2016 年 8 月の絶対重力値は 979 511 944 μGal であり (吉田・他, 2018)、我々が絶対重力測定を実施した 2018 年 8 月まで 2 年間で 27 μGal だけ重力値が減少していることが分かった。実際に観測された重力変化はアンテナ質量損失で期待される重力変化と正負が異なるだけでなく、重力変化の絶対値もおよそ 1 桁大きくなっている。このことから、観測された 27 μGal の重力減少はアンテナ質量の損失では説明できず、これとは別の要因によるものと考えられる。

重力減少の理由としてまず考えられるのが熊本地震の余効変動 (Moore et al., 2017) である。国土地理院電子基準点の「日々の座標値」 (<http://terras.gsi.go.jp/>よりダウンロード) によると、至近の電子基準点「熊本」(重力点の西約 10 km ; Fig. 1b の観測点番号 950465) と「長

陽」(重力点の東北東約 12 km ; Fig. 1b の観測点番号 960701) では 2016 年 8 月~2018 年 8 月の間にそれぞれ約 1.3 cm および 4.0 cm の地表隆起が観測された。プーゲー勾配として $-2.0 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ を仮定すると、これらの電子基準点で期待される重力変化量は $-2.6 \mu\text{Gal}$ および $-8.0 \mu\text{Gal}$ である。重力点 Mashiki でも同様の地表隆起が起きていた場合、重力値は数 μGal だけ減少すると考えられ、実際に観測された重力減少の一部を説明することが可能である。なお、余効変動に伴う Mashiki での重力変化を今後より正確に見積もるためには、Mashiki 至近の地殻変動データを入手するか、あるいは断層すべりや地下構造のモデル (Himematsu and Furuya, 2016 ; Moore et al., 2017) を用いて Mashiki の地殻変動および重力変化を数値計算することが必要である。

重力減少の理由としてもう 1 つ考えられるのが陸水変動起源の重力変化、すなわち陸水重力擾乱 (e.g., Kazama et al., 2015) である。気象庁のアメダス観測点の気象観測データ (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>より閲覧) によると、熊本空港内の観測点「益

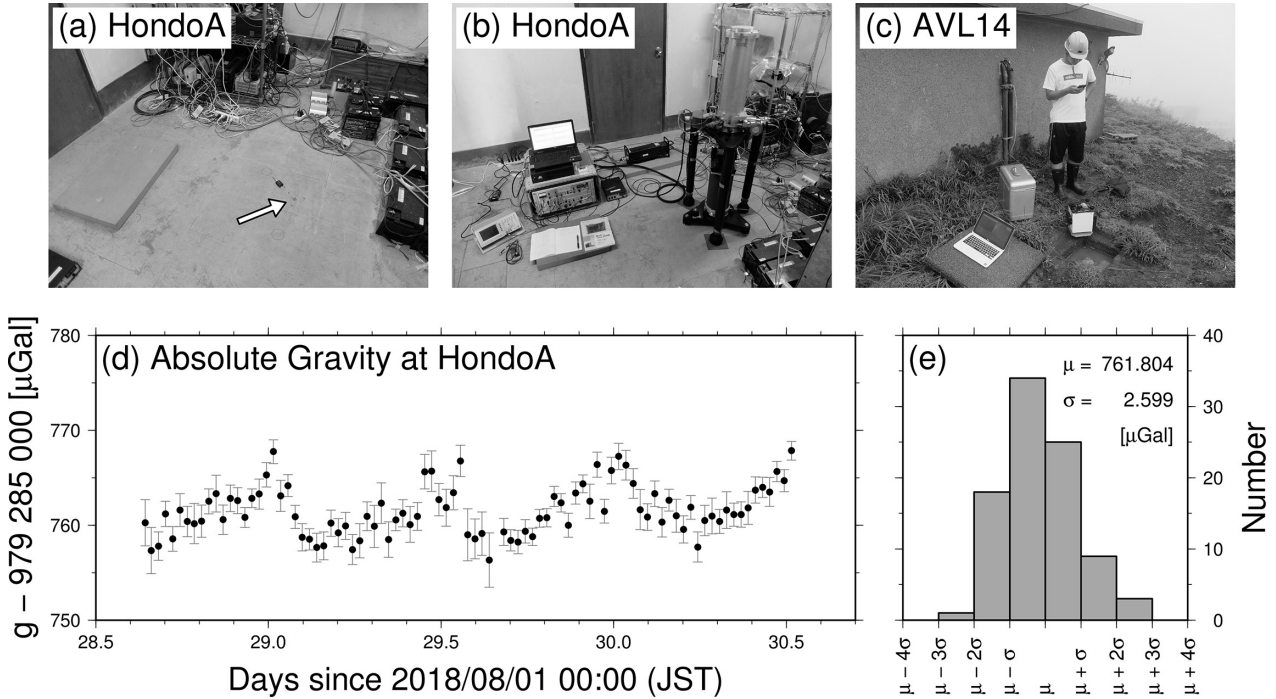


Fig. 4. Gravity measurements at HondoA/AVL14 gravity points. (a) White arrow points to the black mark on the floor, indicating the HondoA absolute gravity point. A black car key is positioned near the gravity point on the floor, and it indicates the direction of the tripod for the FG5's Superspring, which dumps ground vibrations during gravity measurements. (b) FG5-210 absolute gravimeter, installed at HondoA absolute gravity point on 29 August 2018. (c) Relative gravity measurement at AVL14 relative gravity point. HondoA absolute gravity point is located in the building. (d) Circles and error bars indicate set gravity and standard error values, respectively, obtained at HondoA absolute gravity point on 29–31 August 2018. (e) Histogram of the gravity data (the panel (d)). μ and σ indicate average and standard deviation of set gravity data, respectively. Note that value μ shown in the panel (e) means gravity value relative to 979 285 000 μGal .

城」(重力点の東約 1.5 km)における 2016 年 8 月～2018 年 7 月の総降水量は 4086.5 mm であり, 平年降水量の 2 年分 4409.8 mm よりも 323.3 mm 少ない. この降水量の差がそのまま長期的な陸水質量の減少につながっていると考えると, この地域の陸水重力擾乱は水のブーゲー効果の値 $0.0419 \mu\text{Gal}/\text{mm}$ を用いて $-13.5 \mu\text{Gal}$ と計算される. すなわち, 上述の地殻変動の影響と合わせると重力変化量は $-20 \mu\text{Gal}$ 程度と試算され, 実測された重力変化量 $-27 \mu\text{Gal}$ のほとんどを説明できるのである. なお, 今後重力点 Mashiki における陸水重力擾乱をより正確に見積もるためには, 重力点周辺の土壌透水性や周辺地形を考慮した数値モデリング (Kazama et al., 2015) が不可欠である.

3.2 HondoA の絶対重力値

Fig. 4 は重力点 HondoA の重力測定データや測定風景をまとめた図である. Fig. 4a の矢印が指し示す床面上の黒丸は重力点 HondoA の位置を意味しており, この直上に絶対重力計 FG5-210 を Fig. 4b のように設置して絶

対重力測定を実施した. Fig. 4d は気圧変化等の影響を補正した後の set gravity の時系列であり, 両振幅で約 $10 \mu\text{Gal}$ の半日周変動が観察できる. この原因としては, 解析ソフト g9 で潮汐変動を十分に補正できていないためと考えられる. というのも, 潮汐に伴う重力変化には, 月や太陽の潮汐力によって直接的に生じる固体潮汐と, 海洋の潮汐変動によって地球固体部分が 2 次的に変形する海洋荷重潮汐の 2 つがある. このうち固体潮汐に伴う重力変化については理論的に計算可能であるが (e.g., Timmen and Wenzel, 1995), 海洋荷重潮汐に伴う重力変化については海洋潮汐や地球構造などのモデルを用いて数値的に予測することが必要である (e.g., Matsumoto et al., 2000, 2001). しかし, 本研究では解析ソフト g9 でデフォルトとなっている Schwiderski (1980) の海洋潮汐モデルを使用しており, 瀬戸内海や有明海といった内海周辺の海洋荷重潮汐を十分に再現できていない可能性がある. その結果, 重力観測データに対する潮汐補正が十分になされないまま, set gravity の時系列 (Fig. 4d) に

半日周の潮汐変動が残ってしまったと考えられるのである。なお、Fig. 4d を Fig. 3e と比較すると、HondoA 観測点は九州内陸部に位置しているのに潮汐変動の取れ残りが大きく、一方の Mashiki 重力点は有明海に近いにもかかわらず set gravity に周期的な変動が見られない。この原因としては、標高の高い HondoA 重力点では海洋を見下ろす形になっているため海洋潮汐が万有引力変化の鉛直成分（すなわち重力変化）に強く効いている可能性や、あるいは Mashiki 重力点では台風 20 号の影響で測定誤差が大きかったために 10 μGal 未満の重力変化が明瞭に見えてない可能性が考えられる。

本来 HondoA の絶対重力値を正確に決定するためには、Schwidorski (1980) よりも再現性の高い海洋潮汐モデルを準備して (e.g., Matsumoto et al., 2000) 海洋荷重潮汐を精度良く補正する必要がある。しかしながら、本研究では丸 2 日間の絶対重力測定を HondoA にて実施しており、Fig. 4d の set gravity 時系列をそのまま平均することで短周期海洋荷重潮汐の影響を低減化できるものと期待される。また、Fig. 4d の set gravity に正弦関数 $f(t) = A + B\cos 4\pi t + C\sin 4\pi t$ (ただし t の単位は day) を回帰させることで絶対重力値 A を試算したが、 A の値は Fig. 4d の set gravity の平均値 (後述) と 0.3 μGal 以内で一致しており、この絶対重力値のずれは本章以降の議論に大きな影響を与えないことを確認している。そこで本稿では、Fig. 4d の set gravity 時系列にこれ以上の潮汐補正を適用することはせず、set gravity の重み付け平均によって HondoA の絶対重力値を決定することとした。その結果を示したのが Fig. 4e のヒストグラムであり、我々の 2018 年 8 月 29 日~31 日における絶対重力測定により、HondoA の絶対重力値の平均および標準偏差は $979\ 285\ 761.804 \pm 2.599\ \mu\text{Gal}$ と得られた。

HondoA では 2000 年 3 月に本論文の共著者である福田らによって FG5-210 (本研究で使用したものと同一絶対重力計) による絶対重力測定が、また 2004 年 7 月には東京大学地震研究所重力チームによって FG5-212 による絶対重力測定が実施された。このうち、2004 年 7 月の絶対重力データ (東京大学地震研究所、私信) については set gravity の標準偏差が 19.5 μGal と大きかったため、本論文ではこの絶対重力値を記載しないことにする。なお、2004 年 7 月の絶対重力データの誤差が大きかった原因としては、火山活動の活発化に伴う火山性地震や火山性微動の増加 (気象庁, 2004) に伴って、重力点 HondoA の地面振動が増大していたためと考えられる。一方、2000 年 3 月は阿蘇火山の静穏期に該当し (気象庁, 2004), set gravity の標準偏差も 8.1 μGal と 2004 年

よりも小さく得られている。このときの HondoA における絶対重力値の平均は $979\ 285\ 677\ \mu\text{Gal}$ であり、すなわち 2000 年 3 月~2018 年 8 月の 18 年 5 ヶ月間に +85 μGal だけ重力が変化したことになる。

この重力増加の原因としては、主に HondoA の地面沈降の影響が考えられる。Fig. 5 は本堂観測所に併設されている GPS 観測点 HOND (Fig. 1 参照) の座標変化を示している。この時系列は毎日の収録データをソフトウェア GipsyX (Bar-Sever, 2016) で解析することで得られたものであり、描画に当たっては ITRF2014 (Altamimi et al., 2016) から計算されるプレート運動の影響 (南北方向 -12.76 mm/yr; 東西方向 +25.79 mm/yr) を水平変位データから差し引いている (Fig. 5a-b)。この GPS 観測点は 2003 年 12 月の設置以降連続観測を継続しているが、これまで 2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震に伴う地震時地殻変動、および熊本地震に伴う余効変動を記録してきた。ここで HOND 観測点の鉛直変位に注目すると (Fig. 5c)、2016 年 4 月の熊本地震時に約 30 cm の沈降が観測されている他、それ以外の期間においても緩やかな沈降が継続しているのが分かる。熊本地震時の大きな沈降は、北東-南西方向に走向を持つ断層が HOND 観測点の西側で右横ずれ運動をしたことに起因している (矢来・他, 2016)。また、非地震時の緩やかな沈降は、主に阿蘇カルデラ南西部直下の海拔下 6 km に位置するマグマだまりが長期的に収縮しているため (須藤・他, 2006) と考えられる。2003 年 12 月の GPS 連続観測開始当初から 2018 年 8 月までの上下変位量は -36 cm に達しており、ここに -2.0 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ のブーゲー勾配を掛け合わせると本堂観測所では +72 μGal の重力変化が期待できる。2000 年 3 月 (最初の絶対重力測定) から 2003 年 12 月 (GPS 連続観測の開始) の間は GPS の連続観測データが存在していないものの、マグマだまり収縮に伴う緩やかな沈降がこの期間継続しているとすれば、2000 年 3 月~2018 年 8 月の沈降量は約 40 cm、重力増加量は約 80 μGal と予想される。この値は絶対重力測定で得られた重力増加量とほぼ等しいことから、HondoA の重力増加の大部分は地表面の沈降によって説明できると考えられるのである。なお、マグマだまり収縮・断層運動・陸水流動などに伴う重力変化を精度良くモデル化し (萩原, 1977; Okubo, 1992; Kazama et al., 2015) その値を重力観測データから差し引くことで、火山活動のうち地殻変動を生じないような質量変動現象 (例えば熱水量変動など) を検出できる可能性がある。この点については今後の研究で詳細な解析を実施する予定である。

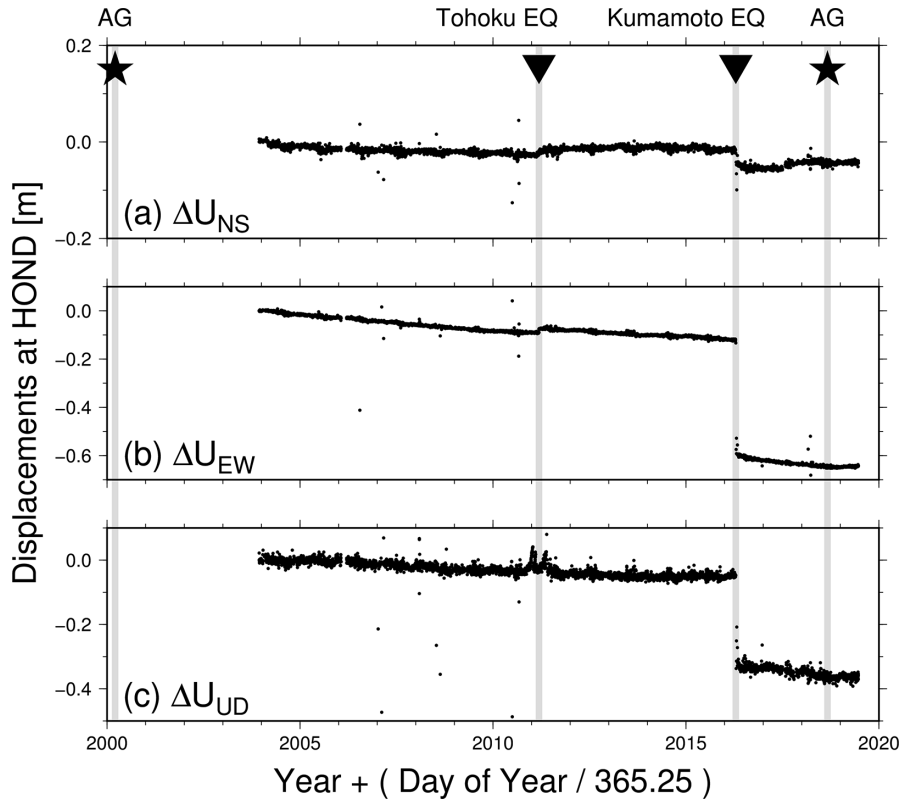


Fig. 5. Black dots indicate crustal displacements since 9 December, 2003, observed at GPS station, HOND (square in Fig. 1c). Stars indicate times when absolute gravity was measured at HondoA, and triangles indicate times when 2011 Tohoku and 2016 Kumamoto earthquakes occurred. (a) Latitudinal displacement. (b) Longitudinal displacement. (c) Vertical displacement.

4. 相対重力測定

我々は2018年8月の絶対重力測定の際に、熊本県北部の重力点において可搬型相対重力計を用いた相対重力測定を実施した。今回相対重力測定を実施した場所はFig. 1bの地形図に白丸で示している9箇所であり、この中には絶対重力測定を実施した2点（MashikiおよびHondoA）も含まれている。測定に用いた相対重力計は合計5台で、京都大学火山研究センター所有のシントレックス重力計が2台（CG5-150241330, CG6-18010054）および京都大学理学研究科所有のラコスト重力計が3台（LC-D58, LC-G534, LC-G680）である。このうち、ラコスト重力計LC-G534およびLC-G680は手動読み取り式であり、測定終了後に変換表を用いることで読取値を重力値に変換する。一方、2台のシントレックス重力計および改造型のラコスト重力計LC-D58（Fig. 4c）はフィードバック方式を採用しており、各重力計本体の液晶画面でその場の重力値を直接知ることができる。また、これら3台の重力計は重力測定値を内蔵メモリ等に逐次保存しており、測定終了後に重力値を連続データとして取得することも可能である。

各日の相対重力測定では、複数の重力点を結ぶ経路を往復し、各重力点の往路および復路の重力値を測定する方法を取った。また、器械高の変化に伴う重力変化を後ほど補正するため、各重力測定時には重力点～重力計上面間の高さを測定した。その日の相対重力測定が終了後に、（LC-G534およびLC-G680については読取値→重力値の変換を行った上で）器械高・固体潮汐・器械ドリフトに伴う重力変化を補正し、各重力点間の相対重力値を決定した。この際、重力勾配値 $3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ を器械高補正に使用し、時間に対して線形的な器械ドリフトを仮定した。なお、LC-680の読取値→重力値の変換の際には、2016年3月に決定されたSF値1.000305（Fukuda et al., 2017）を用い、変換後の重力値を1.000305倍した。この他の4つの重力計についてはSF値として1.000000を仮定し、事前のスケール補正を実施しなかった。

ところで、絶対重力点（MashikiおよびHondoA）で絶対重力測定を実施している期間においては、絶対重力点の直上で相対重力値を測定することが不可能であった。そこで、我々は絶対重力点の至近に補助点を設け、この補助点を相対重力測定に利用した。また、絶対重力

測定終了後には、LC-D58 を用いて絶対重力点に対する補助点の重力差を測定した。これにより、補助点を經由した相対重力測定を、あたかも絶対重力点を經由したかのようにみなすことができる。具体的には、絶対重力点 Mashiki では同じ建物内に補助点 Mashiki-Ho を仮設し、Mashiki に対する Mashiki-Ho の重力差として +10 μGal を得た。一方、絶対重力点 HondoA では建物外の至近に位置する水準点 AVL14 (Figs. 1 and 4c) を補助点と定義し、HondoA に対する AVL14 の重力差として -119 μGal を得た。

2018 年 8 月に得られた各重力点間の相対重力値 (単位: μGal) を Table 2 に示す。この表では絶対重力点 HondoA を基準とした相対重力値を示しており、補助点 (Mashiki-Ho および AVL14) での測定値は上述の重力差の値を用いて絶対重力点 (Mashiki および HondoA) での測定値に変換している。また、相対重力測定を複数回行った重力点についてはその測定結果を単純平均して表に示している。絶対重力計 FG5-210 で得られた HondoA~Mashiki 間の絶対重力差は 226155 μGal であり、標高差 (1166-184=982 m) に重力勾配値 2.3 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ を掛け合わせた場合の重力差とほぼ一致する。各相対重力計で得られた HondoA~Mashiki 間の相対重力値も絶対重力差 226155 μGal の前後の値を取っているが、特に CG6-18010054 は FG5-210 より 537 μGal も小さく、LC-D58 は FG5-210 より 663 μGal も大きい。このことは、CG6-18010054 で測定される重力値が真の重力値の 0.998 倍程度に縮小され、LC-D58 で測定される相対重力値が真の重力値の 1.003 倍程度に拡大されることを意味している。このように、本研究で用いた相対重力計は重力差の大きい重力点間で相対重力計の測定誤差 (~10 μGal) を超えるような相対重力値のずれを生じる可能性があるため、各相対重力計の SF 値を正確に決定しその影響を確実に補正することが重要である。

5. 相対重力計のスケールファクターの推定

Table 2 に示した通り、我々は重力点 8 点 (HondoA を除く) で 5 台の相対重力計を用いた相対重力測定を実施し、HondoA を基準とした計 26 個の相対重力値を取得した。この他、我々は HondoA と Mashiki で絶対重力測定を高い精度で実施し (Figs. 3 and 4), 2つの絶対重力点の重力差を 226155 μGal と決定した。ここで、絶対重力計 FG5-210 で得られた HondoA~Mashiki 間の重力差が真値であると仮定すると、本測定における未知パラメータは「HondoA と Mashiki を除く重力点 7 点の真の相対重力値」および「5 台の相対重力計の SF 値」の 12 個と設定できる。そこで、本章では計 26 個の相対重力観測データから観測方程式を構築した上で、観測方程式の逆計算によって計 12 個の未知パラメータを見積もり、かつこの結果について議論する。

5.1 観測方程式

そもそも、線形の逆問題は以下のような観測方程式に一般化することができる。

$$\mathbb{G}\vec{m} = \vec{d} \quad (2)$$

ここで、 \vec{d} はデータベクトル (次数 n_d とする)、 \vec{m} はモデルベクトル (次数 n_m とする)、 \mathbb{G} はグリーン関数行列 (n_d 行 \times n_m 列) である。いま \vec{m} が未知で、かつ $n_d \geq n_m$ の場合には、以下の逆計算によって \vec{m} の各要素を決定することができる。なお、この式はまさに重み付けなし最小二乗法の行列表現に他ならない。

$$\vec{m} = (\mathbb{G}^T \mathbb{G})^{-1} \mathbb{G}^T \vec{d} \quad (3)$$

本研究の場合、 $n_d=26$, $n_m=12$ である。すなわち、26 個の線型方程式を以下のように作成し、それを式 (2) の行列として表現することで、 \vec{m} に格納した 12 個の未知パラメータを式 (3) によって解けばよい。

まず、Mashiki の重力値を表す方程式は以下のように

Table 2. Gravity values relative to HondoA gravity point collected with five relative gravimeters and FG5-210 absolute gravimeter in August 2018.

Gravimeter	CG5-150241330	CG6-18010054	LC-D58	LC-G534	LC-G680	FG5-210
Mashiki	226296	225618	226818	226119	226147	226155
Sakanashi 960703A	150780	150308	151177	150617	150649	
AVL01	129777	129384				
AVL05	86302	86025	86463			
AVL10	24356	24272	24381			
Museum	5029	4988	5001			
HondoA	0	0	0	0	0	0
AsoCC	-20292	-20271	-20370		-20321	

書ける.

$$g_{Mashiki}^i \cdot c^j = g_{Mashiki} \quad (4)$$

ここで, g^i は相対重力計 j で得られた HondoA~重力点 i 間の相対重力値 (Table 2), c^j は相対重力計 j の SF 値, g_i は HondoA~重力点 i 間の真の相対重力値である. 上式の場合 $i=Mashiki$ であり, 右辺は絶対重力測定の結果 (Figs. 3 and 4) を用いて $g_{Mashiki}=226155 \mu\text{Gal}$ と書ける. すなわち, 左辺の $g_{Mashiki}^i$ は式 (2) の \mathbb{G} に, c^j は \vec{m} に, かつ右辺の $g_{Mashiki}$ は \vec{d} に格納すればよい. なお, HondoA~Mashiki 間では 5 台全ての相対重力計で相対重力測定がなされているので, Mashiki の重力値を表す方程式 (4) は 5 本作成できる.

次に, Mashiki 以外の重力点 7 点の重力値を表す方程式は以下のように書ける.

$$g^i \cdot c^j + (-1) \cdot g_i = 0 \quad (5)$$

この式を式 (2) と照らし合わせると, 左辺の g^i と -1 は \mathbb{G} に, c^j と g_i は \vec{m} に, かつ右辺の 0 は \vec{d} に格納させればよい. なお, HondoA, Mashiki 以外の重力点 7 点では計 21 個の相対重力値を測定している (Table 2), 式 (5) の方程式は全部で 21 本作成できる.

5.2 スケールファクターの推定結果

Table 3 の Estimated value コラムは, 式 (3) で計算されたモデルパラメーター (\vec{m}_e と記す) のうち 5 台の相対重力計の SF 値の推定結果 c^j と, その標準偏差を示している. なお, SF 値の標準偏差はモデルの分散共分散行列

$$C_m = \frac{(\vec{d} - \mathbb{G}\vec{m}_e)^T (\vec{d} - \mathbb{G}\vec{m}_e)}{n_d - n_m} (\mathbb{G}^T \mathbb{G})^{-1} \quad (6)$$

の各成分のうち, 対角成分の平方根を取ることで計算している. SF 推定値は 5 台全ての相対重力計で 1.000000 近辺の値を取っているが, LC-G680 を除く 4 台の重力計

では標準偏差の範囲を超えるほど有意に 1.000000 から外れている. SF 値が最も大きいのは CG6-18010054 の 1.002390 であり, これは CG6 重力計に表示される重力値が真の値よりも $1/1.002390 \cong 0.9976$ 倍だけ小さく表示されることを意味している. また, SF 値が最も小さいのは LC-D58 の 0.996992 であり, これは D58 重力計に表示される重力値が真の値よりも $1/0.996992 \cong 1.0031$ 倍だけ大きく表示されることを意味している. これらの結果は今回熊本県で測定された相対重力値 (Table 2) の特徴ともよく一致している. 一般に相対重力計の SF 値は 10^{-4} の桁で 1 から外れることが多いが (e.g., 中川・他, 1977; Fukuda et al., 2017), 本研究で用いた CG6-18010054 と LC-D58 はそれよりも 1 桁大きい 10^{-3} の桁で 1 から外れている. 実はこの 2 つの重力計は共通して納品・改造からの経過時間が浅く, このことが SF 値の大ききなずれに関係しているかもしれない (e.g., Meurers, 2018). というのも, CG6-18010054 は 2017 年度末に京都大学火山研究センターに新規納入された重力計であり, 2018 年 3 月に阿蘇火山において初回の相対重力測定が実施された. また, LC-D58 はもともと京都大学理学研究科が所有していた手動読取式の重力計であったが, 2017 年度に L and R Repair Service 社によってフィードバック式に改造され, 2018 年 2 月に初めて試験観測が実施された. 両重力計とも初回の測定から今回の測定 (2018 年 8 月) まで半年程度しか経過しておらず, このことが SF 値の大ききなずれに関係しているかもしれないのである. そのため, この 2 つの重力計については今後も頻繁に SF 値を検定し, 今回の SF 値の妥当性や SF 値の時間変化 (e.g., Meurers, 2018) を監視していく必要があると考えられる.

Table 3 の Estimated value コラムの標準偏差に着目すると, 標準偏差はどの重力計でも 0.00008 (8×10^{-5}) 程度になっていて, 相対重力観測データが多い重力計ほど (Table 2 参照) 標準偏差が 10^{-6} の桁で小さくなって

Table 3. Scale factors and standard deviations of five relative gravimeters.

Gravimeter	Old value	Estimated value	New value
CG5-150241330	1.000000	0.999339 ± 0.000082	0.999339 ± 0.000082
CG6-18010054	1.000000	1.002390 ± 0.000082	1.002390 ± 0.000082
LC-D58	1.000000	0.996992 ± 0.000085	0.996992 ± 0.000085
LC-G534	1.000000	1.000232 ± 0.000088	1.000232 ± 0.000088
LC-G680	1.000305 ± 0.000043	1.000076 ± 0.000088	1.000381 ± 0.000098

The “old value” column indicates scale factor assumed in initial data processing. The “estimated value” column indicates scale factor obtained in least-square calculation. The “new value” column indicates updated scale factor for each relative gravimeter as of August 2018.

いる。すなわちこの結果は、SF 値をより正確に決定するには多くの相対重力測定を実施することが必要である、ということの意味している。しかしながら、本研究の SF 値の標準偏差は先行研究（中川・他, 1977；Fukuda et al., 2017）よりもやや大きく、先行研究と同じほどに SF 値を精度良く決定しているとは言いがたい。先行研究よりも標準偏差が大きい理由としては、絶対重力の測定点が 2 点（Mashiki および HondoA）と少なかった点や、2 点間の絶対重力差が約 200 mGal とさほど大きくなかった点が挙げられる。例えば Fukuda et al. (2017) は 2016 年 3 月にニュージーランドの重力点 8 点で絶対重力・相対重力の比較測定を実施し、約 850 mGal という重力差を活用して LC-G680 の SF 値を標準偏差 4×10^{-5} の精度で決定した。また、中川・他 (1977) は根室から那覇までの計 17 点における相対重力測定で最大約 1600 mGal の大きな重力差を測定し、その結果相対重力計 8 台の SF 値を標準偏差 2×10^{-5} の精度で決定することに成功した。本研究では日程や予算の都合上 Mashiki と HondoA の 2 点のみで絶対重力・相対重力の比較測定を実施したが、将来的には例えば京都大学吉田キャンパス（竹本・他, 1998）で重力測定を行うことで HondoA との重力差約 420 mGal を取得し、各相対重力計の SF 値を本研究よりも正確に決定できると期待される。

なお、第 4 章で述べた通り、本研究のデータ処理では LC-G680 の SF 値として 2016 年 3 月の値 1.000305 (Fukuda et al., 2017) を使用してきた (Table 3 の Old value)。また、本研究の逆計算ではこの SF 値からのずれとして 1.000076 という値が得られた (Table 3 の

Estimated value)。すなわち、2018 年 8 月時点における LC-G680 の SF 値は $1.000305 \times 1.000076 \cong 1.000381$ と計算できる (Table 3 の New value)。Old value と New value の差は 0.000076 であり、これは 200 mGal の重力差をもつ 2 点間（Mashiki～HondoA 間に相当）で相対重力測定を実施した時に相対重力値の系統誤差 15.2 μ Gal が生じることを意味している。この系統誤差は相対重力計の一般的な測定誤差（ $\sim 10 \mu$ Gal）と同程度であり、熊本県北部の地域内における相対重力測定では相対重力値の最終結果にそれほど大きな影響を与えないものと予想される。しかしながら、今後 LC-G680 を用いて 200 mGal を超えるような重力差を測定する場合、使用する SF 値の違いによっては数十 μ Gal の系統誤差が生じる恐れがあるので注意が必要である。

5.3 相対重力値の推定結果

Table 4 の左側には、式 (3) で計算されたモデルパラメーター \vec{m}_e のうち、HondoA を基準とした各重力点の相対重力値 g_i 、およびその標準偏差を示している。標準偏差が最も大きい地点は重力点 960703A の 26 μ Gal であり、その原因は 960703A で測定した重力計が LC-D58 の 1 台のみであったため、および LC-D58 自身の測定誤差が大きかったためと考えられる（後者については次段落で詳述）。その他の重力点における標準偏差は 10 μ Gal 台であり、経験的に知られている相対重力計の測定誤差（ $\sim 10 \mu$ Gal）と同程度になっている。その中でも、多数の相対重力計で重力値を測定した地点では特に標準偏差が小さく、例えば Sakanashi では 12 μ Gal, AsoCC では 11 μ Gal となっている。すなわち、各重力点の重力値を

Table 4. Relative gravity values at gravity points in the northern part of Kumamoto Prefecture.

Gravity Point	g_i [μ Gal]	$g_i^i \cdot c^j - g_i$ [μ Gal]				
		CG5	CG6	LC-D58	LC-G534	LC-G680
Mashiki	226155	-9	3	-20	16	9
Sakanashi	150676 \pm 12	4	-8	46	-24	-16
960703A	148995 \pm 26			0		
AVL01	129692 \pm 18	-1	2			
AVL05	86226 \pm 14	19	4	-24		
AVL10	24326 \pm 13	14	4	-19		
Museum	5004 \pm 13	22	-4	-19		
HondoA	0	0	0	0	0	0
AsoCC	-20307 \pm 11	29	-12	-2		-16
Absolute average		14	5	18	20	13

The g_i column indicates gravity values (relative to HondoA gravity point) and standard deviation obtained in least-square calculation. Note that relative gravity value at Mashiki (226155 μ Gal) was determined with absolute gravity measurements at Mashiki and HondoA in August 2018 (Figs. 3-4). The $(g_i^i \cdot c^j - g_i)$ column indicates the difference between measured and calculated gravity values ($g_i^i \cdot c^j$ and g_i , respectively).

精度良く推定するには、多くの相対重力計で重力値を測定することが重要である。

Table 4の右側には、相対重力の測定値と推定値の差、すなわち $g^i \cdot c^j - g_i$ を示している。この値は式(5)の通り理想的には0になるが、実際には測定値の測定誤差の影響で0でない値を持っている。 $g^i \cdot c^j - g_i$ が最も小さい重力計はCG6-18010054で、 $g^i \cdot c^j - g_i$ の絶対値の平均は5 μGal である。5.2節で述べた通りCG6-18010054はSF値が1から大きく外れている重力計であったが、SF値を正確に決定しさえすればCG6-18010054によって各重力点の相対重力値の真値を5 μGal 程度の誤差で決定できる、ということもTable 4の結果は意味している。この他の重力計における $g^i \cdot c^j - g_i$ の平均値は、CG5-150241330とLC-G680がそれぞれ14 μGal , 13 μGal であり、経験的に知られている相対重力計の測定誤差 (~10 μGal) と同程度である。一方、LC-D58とLC-G534についてはそれぞれ18 μGal , 20 μGal であり、他の3つの重力計に比べて測定値と推定値の差が大きい。特に、LC-D58については多くの重力点で $|g^i \cdot c^j - g_i|$ が19 μGal を超えていて、重力点Sakanashiに至っては46 μGal に達している。なお、重力点960703AにおけるLC-D58の $g^i \cdot c^j - g_i$ は厳密に0 μGal となっているが、これは重力点960703Aで重力計LC-D58のみが重力値を測定したため、重力計LC-D58の測定誤差が重力点960703Aの重力値推定誤差に押し付けられているものと考えられる。重力点960703Aの推定誤差(26 μGal)を重力計LC-D58の測定誤差として扱った場合、LC-D58における $|g^i \cdot c^j - g_i|$ の平均は18 μGal から22 μGal に上昇し、5つの重力計の中で最も測定誤差が大きいと判断される。LC-D58の測定誤差が大きい理由については現時点では不明であるが、今後現場測定時やデータ解析時にLC-D58の重力値の安定性を逐次確認すべきである。例えば、現場測定でバネを一度クランプして再度解放した時に重力値が元の値と一致するかを毎回確認する、電子的に取得した重力データを統計的に処理することで重力測定値の平均や誤差を決定する、などの工夫が必要である。

5.4 相対重力値の時間変化

AVL01, AVL05, AVL10については1981年以降数年おきに相対重力測定が実施されており、その結果は吉川・他(2009)にまとめられている。この先行研究では、2008年11月に7台の相対重力計を用いた相対重力測定を実施し、各重力計で得られた相対重力値の平均値を算出している。このうち、AVL01に対する2008年11月時点の相対重力値は、AVL05で-43591 μGal , AVL10で-105533 μGal と得られている。なお、この先行研究

においては7台の重力計の相対重力値が $\pm 30 \mu\text{Gal}$ 以内で一致しており、SF値の違いによる各重力計の重力値の差は本研究(Table 2)よりも十分に小さいと考えられる。一方、我々は2018年8月に5台の相対重力計を用いて相対重力測定を実施し、AVL01基準の相対重力値としてAVL05で-43466 μGal , AVL10で-105366 μGal を得た(Table 4)。これらの値を差し引くと、重力点AVL01および2008年を基準とした約10年間の重力時間変化は、AVL05で+125 μGal , AVL10で+167 μGal と計算できる。

阿蘇火山の山麓(AVL01)に対する阿蘇山頂周辺(AVL05, AVL10)における重力増加の原因の1つには、2016年熊本地震時の地殻変動の影響が考えられる。Fig. 6のベクトルはGPS連続観測点で得られた熊本地震時の鉛直変位量を示しており、熊本地震の前後10日間の鉛直座標平均値を差し引いたものである。阿蘇山頂部では黒色の矢印、すなわち熊本地震時に沈降したGPS観測点が多いことが分かる。いま注目している重力点3点(AVL01, AVL05, AVL10)ではGPS連続観測は実施されていないものの、近隣にはそれぞれ960703, OHJO, ASM2というGPS観測点が存在している。GPS点960703を基準とした熊本地震時の鉛直変位量は、OHJOで-11.6cm, ASM2で-22.5cmである。このような鉛直変位が各重力点でも起きたと仮定し、鉛直勾配として-2.0 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ を使用すると、AVL05では+23 μGal , AVL10では+45 μGal の重力変化が期待される。このように、阿蘇山頂周辺部における重力増加の一部は熊本地震時の地面沈降によって説明可能である。しかしながら、観測された重力増加量は熊本地震で期待される重力増加量より102 μGal (AVL05) および122 μGal (AVL10) も大きいため、この残差分については熊本地震以外の影響を考慮する必要がある。

阿蘇山麓に対する山頂部の重力増加の原因として他に考えられるのが、熊本地震時以外の期間における阿蘇山頂部の定常的な地面沈降の影響である。3.2節およびFig. 5で触れた通り、阿蘇山頂部では深部マグマだまりの長期的な収縮に伴って定常的な地面沈降が観測されている(須藤・他, 2006)。Fig. 5cはHondoA近隣のGPS点HOND(詳細な位置はFig. 1を参照)における上下変位を示しているが、熊本地震時の大きな沈降を取り除くと、HONDでは2008年~2018年の10年間で約10cmだけ緩やかに沈降している。このような沈降がAVL05やAVL10でも起きていると仮定すると、これらの重力点では重力増加が期待できる。しかしながら、この影響に伴う重力変化はせいぜい+20 μGal であり、AVL05や

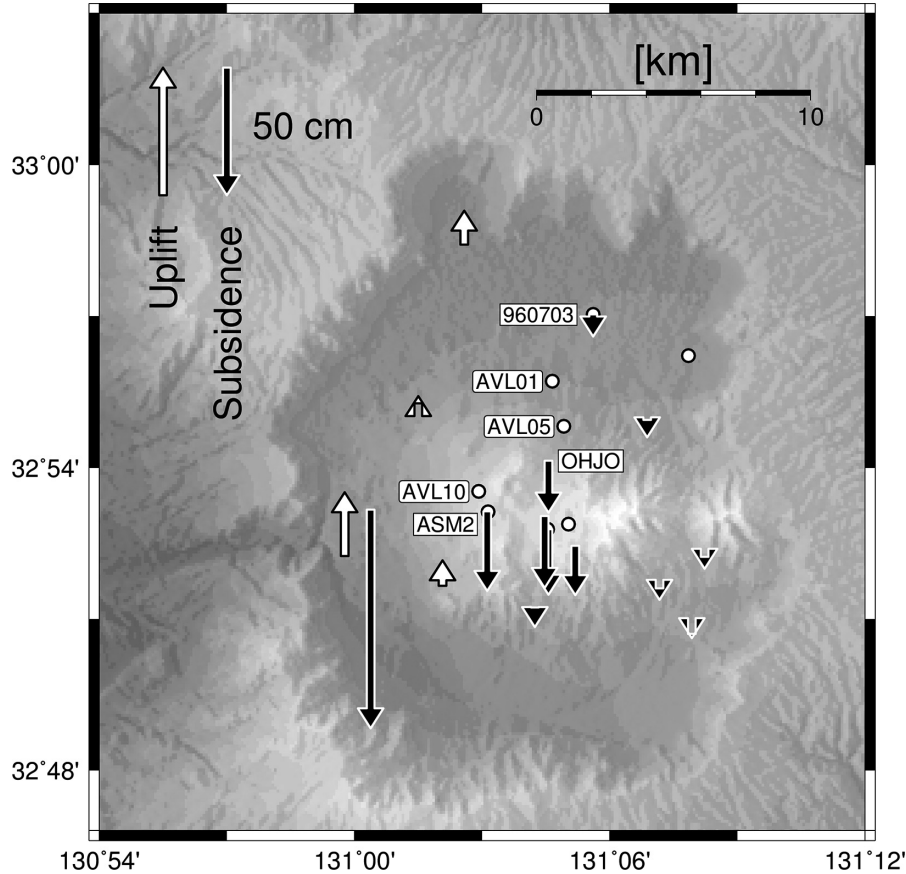


Fig. 6. White and black arrows indicate GPS stations where ground uplift and subsidence, respectively, were observed during the 2016 Kumamoto earthquake. White circles indicate gravity points where gravity data were collected in this study.

AVL10 で実際に観測された重力増加量を十分に説明することはできない。

阿蘇山麓 (AVL01) に対する阿蘇山頂部 (AVL05, AVL10) の大きな重力増加の原因として、この他に予想されるのは「AVL05 や AVL10 の近傍直下に地殻変動を伴わないような質量増加が存在する」「重力基準点 AVL01 の近傍直下に地殻変動を伴わないような質量減少が存在する」などの可能性である。そもそも阿蘇地域では 2011 年以降相対重力測定が継続的に実施され、そこで得られた重力時空間変化をもとに質量変動モデルの構築が進められている (宮内・他, 2019)。今後、地下水・熱水・マグマといった質量分布 (e.g., 須藤・他, 2006; Kanda et al., 2008) の時空間変化をモデル化することで、阿蘇山麓に対する山頂部の重力増加を再現できるものと期待される。また、2008 年以前の相対重力測定値 (吉川・他, 2009) についても本研究と同様の枠組みでデータ解析を行うことで、より長期的な時間スケールで阿蘇山周辺の質量時空間変動を把握できると期待される。

6. まとめ

我々は熊本県北部において 2018 年 8 月に絶対重力・相対重力の同時測定を実施し、重力点 9 点の重力値および相対重力計 5 台のスケールファクター (SF 値) を決定した。本研究の結果を箇条書きで示すと以下の通りである。

- ・絶対重力点 Mashiki における 2018 年 8 月 20 日～22 日の絶対重力値は $979\,511\,916.537 \pm 2.624 \mu\text{Gal}$ と得られた。この値は 2016 年 8 月の値よりも $27 \mu\text{Gal}$ だけ小さく、その理由には熊本地震 (2016 年 4 月発生) の余効変動に伴う地面隆起の影響や、陸水質量減少の影響が考えられる。
- ・絶対重力点 HondoA における 2018 年 8 月 29 日～31 日の絶対重力値は $979\,285\,761.804 \pm 2.599 \mu\text{Gal}$ と得られた。この値は 2000 年 3 月の値よりも $85 \mu\text{Gal}$ だけ大きく、その理由には熊本地震やマグマだまり収縮に伴う地面沈降の影響が考えられる。
- ・相対重力計 5 台の SF 値は観測方程式の逆計算によって Table 3 の通り得られた。このうち、SF 値が最も

大きかったのはシントレックス重力計 CG6-18010054 の 1.002390 ± 0.000082 , SF 値が最も小さかったのはラコスト重力計 LC-D58 の 0.996992 ± 0.000085 であった。

相対重力点7点の相対重力値は観測方程式の逆計算によって Table 4 の通り得られた。このうち, AVL05 および AVL10 の相対重力値 (AVL01 基準) は 2008 年 11 月よりもそれぞれ $125 \mu\text{Gal}$, $167 \mu\text{Gal}$ だけ大きくなっており, その一因には熊本地震やマグマだまり収縮に伴う地面沈降の影響が考えられる。しかしながら, これら2つの寄与だけでは観測された重力増加を十分には説明できないので, 今後これ以外の寄与について定量的に検証する必要がある。

なお, 本研究で得られた各相対重力計の SF 値 (Table 3) は, 本地域における今後の相対重力測定データに対して適用できると期待される。しかしながら, 相対重力計内蔵バネの経年劣化に伴って SF 値が長期的には時間変化する可能性もあるので, 今後も定期的に SF 値の検定を実施すべきである。また, 本研究の対象領域である熊本県北部では有意な重力時間変化が観測されているので, 今後も同様の絶対・相対重力測定を継続し, 地震・火山・陸水変動に伴う重力変化を監視およびモデル化していく必要がある。

謝 辞

本研究の重力測定に当たっては, 日本学術振興会の科学研究費助成事業 (課題番号: 15K17749; 研究代表者: 風間卓仁) 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」の助成を受けた。Mashiki および HondoA での絶対重力測定においては, それぞれ国土地理院測地部物理測地課と東京大学地震研究所重力チームに絶対重力測定の設定パラメーターに関する資料をご提供いただいた。絶対重力点 Mashiki における重力測定では東海大学宇宙情報センターの皆さまに, また一部の相対重力測定では市村美沙氏 (元・京都大学大学院理学系研究科, 現・国土地理院) にご協力いただいた。

本研究の重力時間変化の解釈に当たっては, 2000 年 3 月および 2004 年 7 月に HondoA で測定された絶対重力値を参照した (3.2 節参照)。これらの絶対重力測定は, 火山噴火予知計画における東京大学地震研究所と京都大学大学院理学研究科の共同研究, および日本学術振興会の科学研究費助成事業 (課題番号: 09304043, 15204040; 研究代表者: 川勝均) の助成をもとに実施されたものである。また, 地殻変動の寄与を議論する際には, 阿蘇火山周辺に設置された GPS 観測点の変位データ (Figs.

5-6) を利用した。この GPS 観測点網は及川純氏 (東京大学地震研究所) のご尽力により構築されたものである。

本論文の執筆に当たっては, 描画ソフト GMT (Wessel and Smith, 1998) を用いて各図を作成した。また, 原稿の修正においては今西祐一氏より細部に渡る有益な助言をいただいた。以上, ここに記して感謝いたします。

参考文献

- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux, 2016, ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Bar-Sever, Y.E., 2016, Real-time GNSS positioning with JPL's new GIPSYx software, *AGU Fall Meeting*, G44A-04.
- Fukuda, Y., H. Takiguchi, T. Kazama, J. Nishijima, S. Gulyaev, T. Natusch, M. Amos, V. Stagpoole and C. Pearson, 2017, New absolute gravity measurements in New Zealand, *IAG Symposia*, **148**, 95–101, doi:10.1007/1345_2017_18.
- Furuya, M., S. Okubo, W. Sun, Y. Tanaka, J. Oikawa, H. Watanabe and T. Maekawa, 2003, Spatiotemporal gravity changes at Miyakejima Volcano, Japan: Caldera collapse, explosive eruptions and magma movement, *J. Geophys. Res.*, **108** (B4), 2219, doi:10.1029/2002JB001989.
- 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, *地震研究所彙報*, **52**, 301–309.
- Himematsu, Y. and M. Furuya, 2016, Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: evidence for dynamic slip partitioning, *Earth Planets Space*, **68**, 169, doi:10.1186/s40623-016-0545-7.
- 檜山洋平・川元智司・古屋智秋・甲斐玲子・山口和典・鈴木啓・菅富美男・嵯峨 論, 2016, GEONET による熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, **128**, 163–168.
- Kanda, W., Y. Tanaka, M. Utsugi, S. Takakura, T. Hashimoto and H. Inoue, 2008, A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake crater, Aso volcano, as inferred from magnetotelluric surveys, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 32–45, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.01.022.
- 風間卓仁, 2019, 日本の火山地域における重力観測の現状と陸水擾乱問題, *火山*, **64**, 189–212, doi:10.18940/kazan.64.3_189.
- Kazama, T., H. Hayakawa, T. Higashi, S. Ohsono, S. Iwanami, T. Hanyu, H. Ota, K. Doi, Y. Aoyama, Y. Fukuda, J. Nishijima and K. Shibuya, 2013, Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde, East Antarctica, *Polar Science*, **7**, 260–277, doi:10.1016/j.polar.2013.07.001.
- Kazama, T., S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka and E. Koyama, 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*, **120**, 1263–1287, doi:10.1002/2014JB011563.
- 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*, **61B**, 330–336.
- 気象庁, 2004, 阿蘇山 (平成16年 (2004年) 年報), 火山活動解

- 説資料, 19p., https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php (2019年9月30日閲覧).
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe, 2000, Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, *J. Oceanography*, **56**, 567-581, doi:10.1023/A:1011157212596.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, 2001, GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc. Japan*, **47**, 243-248 doi:10.11366/sokuchi1954.47.243.
- 松本なゆた・平松良浩・澤田明宏, 2016, 重力異常により検出した断層構造と2016年熊本地震の余震分布の関係, 日本地球惑星科学連合2016年大会, MIS34-P25.
- Meurers, B., 2018, Scintrex CG5 used for superconducting gravimeter calibration, *Geod. Geodyn.*, **9**, 197-203, doi:10.1016/j.geog.2017.02.009.
- Micro-g LaCoste, 2008, A-10 Portable Gravimeter User's Manual, 59 pp.
- Micro-g LaCoste, 2012, g9 User's Manual, 53 pp.
- Miyabuchi, Y., Y. Iizuka, C. Hara, A. Yokoo and T. Ohkura, 2018, The September 14, 2015 phreatomagmatic eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan: Eruption sequence inferred from ballistic, pyroclastic density current and fallout deposits, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **351**, 45-56, doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.12.009.
- 宮内佑典・風間卓仁・福田洋一・吉川 慎・大倉敬宏・西島潤・藤光康宏, 2019, 相対重力計で観測された熊本県阿蘇地域における重力変化 (2015~2018年), 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-P30.
- Moore, J.D.P., H. Yu, C. Tang, T. Wang, S. Barbot, D. Peng, S. Masuti, J. Dauwels, Y. Hsu, V. Lambert, P. Nanjundiah, S. Wei, E. Lindsey, L. Feng and B. Shibasaki, 2017, Imaging the distribution of transient viscosity after the 2016 Mw 7.1 Kumamoto earthquake, *Science*, **356**, 163-167, doi:10.1126/science.aal3422.
- 盛川 仁・野口竜也・駒澤正夫・有村翔也・田村充宏・中山圭・荒木 俊・宮本 崇・飯山かほり・秦 吉弥・吉見雅行・香川敬生・後藤浩之, 2017, 益城町市街地における重力探査に基づく重力基盤構造の推定, 平成28年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P30.
- 中川一郎・里村幹夫・福田洋一・中井新二・瀬戸孝夫・太島和雄・井内 登・萩原幸男・田島広一・井筒屋貞勝・柳沢道夫・花田英夫・友田好文・藤本博巳・古田俊夫・大川史郎, 1977, ラコスト重力計(G型)の定数検定, 測地学会誌, **23**, 63-73, doi:10.11366/sokuchi1954.23.63.
- Niebauer, T. M., G. S. Sasagawa, J. E. Faller, R. Hilt and F. Klopping, 1995, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, **32** (3), 159-180, doi:10.1088/0026-1394/32/3/004.
- Okubo, S., 1992, Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half-space, *J. Geophys. Res.*, **97** (B5), 7137-7144, doi:10.1029/92JB00178.
- 大久保修平・高木 悠・張 新林・今西祐一・田中愛幸・三浦哲・植木貞人・大島弘光・前川徳光・岡田和見・渡邊篤志・安藤美和子, 2018, 2011年東北地方太平洋沖地震後の東日本広域重力変動一粘弾性変形の検出, 日本測地学会第130回講演会要旨集, 155-156.
- 坂田俊文・下田陽久・松前義昭・腰坂三郎・猪野俊雄・遠藤和仁・岡本 博・長尾利彦・小山隆弘・村田 徹, 1988, 東海大学宇宙情報センターの設備, *NEC 技報*, **41**, 86-106.
- Sato, E., K. Fukui and T. Shimbori, 2018, Aso volcano eruption on October 8, 2016, observed by weather radars, *Earth Planets Space*, **70**, 105, doi:10.1186/s40623-018-0879-4.
- Schwiderski, E. W., 1980, On charting global ocean tides, *Rev. Geophys.*, **18**, 243-268, doi:10.1029/RG018i001p00243.
- Sofyan, Y., J. Nishijima, Y. Fujimitsu, S. Yoshikawa, T. Kagiya and T. Ohkura, 2016, The oscillation model of hydrothermal dynamics beneath Aso volcano, southwest Japan after small eruption on May 2011: A new understanding model using repeated absolute and relative gravity measurement, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **310**, 172-185, doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.12.012.
- 須藤靖明・筒井智樹・中坊 真・吉川美由紀・吉川 慎・井上寛之, 2006, 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり: 長期間の変動と圧力源の位置, *火山*, **51**, 291-309, doi:10.18940/kazan.51.5_291.
- 菅野貴之・大久保修平・松本滋夫・吉川 慎・大倉敬宏・井上寛之, 2009, 阿蘇火山における絶対重力測定, 第4回阿蘇火山の集中総合観測報告書, 23-27.
- Suzuki, W., S. Aoi, T. Kunugi, H. Kubo, N. Morikawa, H. Nakamura, T. Kimura and H. Fujiwara, 2017, Strong motions observed by K-NET and KiK-net during the 2016 Kumamoto earthquake sequence, *Earth Planets Space*, **69**, 19, doi:10.1186/s40623-017-0604-8.
- 多田 亮, 1993, 九州中部地方の地殻変動とテクトニクス: 別府-島原地溝の分裂拡大, *地質学論集*, **41**, 1-12.
- Takayama, H. and A. Yoshida, 2007, Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data, *J. Geophys. Res.*, **112**, B06413, doi:10.1029/2006JB004690.
- 竹本修三・東 敏博・向井厚志・福田洋一・田中貴光, 1998, 超伝導重力計を用いた京都における重力の時間的変化の精密観測 (1988~1997), 京都大学防災研究所年報, **41** (B-1), 77-85.
- Timmen, L. and W.G. Wenzel, 1995, Worldwide Synthetic Gravity Tide Parameters, *IAG Symposia*, **113**, 92-101, doi:10.1007/978-3-642-79721-7_11.
- 坪川恒也, 2005, 重力の測定, *精密工学会誌*, **71**, 1335-1338, doi:10.2493/jjspe.71.1335.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New, improved version of generic mapping tools released, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, 579, doi:10.1029/98EO00426.
- 山本宏章・宮原伐折羅・吉田賢司・菅原安宏・宮崎隆幸, 2018, 国土地理院の重力測量, *国土地理院時報*, **131**, 21-52.
- 矢来博司・小林知勝・森下 遊・藤原 智・檜山洋平・川元智司・上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅, 2016, 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, *国土地理院時報*, **128**, 169-176.
- 横尾亮彦・宮縁育夫, 2015, 2014年11月から始まった阿蘇火山中岳第一火口の噴火活動, *火山*, **60**, 275-278, doi:10.18940/kazan.60.2_275.
- 吉田賢司・矢萩智裕・平岡喜文・宮原伐折羅・山本宏章・宮崎隆幸, 2018, *国土地理院時報*, **131**, 53-93.
- 吉川 慎・大倉敬宏・大島弘光・前川徳光・植木貞人・菅野貴之・松本滋夫・内田和也, 2009, 阿蘇火山周辺における精密重力測定 (2008年11月), 第4回阿蘇火山の集中総合観測報告書, 18-22.

(Received August 13, 2019)

(Accepted November 25, 2019)