



Title	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
Author(s)	若林, 環; 風間, 卓仁
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 84, 11-20
Issue Date	2021-03-26
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.84.11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/80696
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_84_p11-20.pdf



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

若林 環・風間 卓仁

京都大学大学院理学研究科

(2021 年 2 月 11 日 受理)

Relative scale factors of portable relative gravimeters, inferred from frequent campaign gravity data measured between Kyoto University and Mt. Hiei

Tamaki WAKABAYASHI, Takahito KAZAMA

Graduate School of Science, Kyoto University

(Received February 11, 2021)

Campaign relative gravity measurement is one of the most powerful methods to monitor spatiotemporal mass variations associated with volcanic activities. In order to quantify volcanic gravity variations accurately, the systematic gravity error due to scale factor should be corrected from original gravity data. We therefore determined relative scale factors of portable relative gravimeters, using relative gravity values measured at six gravity points between Kyoto University and Mt. Hiei in 2020 frequently. We here calculated the relative scale factor of each gravimeter by dividing the gravity value of the LC-G534 gravimeter by that of the corresponding gravimeter. The scale factor of the LC-G680 gravimeter relative to the LC-G534 gravimeter was obtained to be 0.999900 ± 0.000067 ; although the gravity difference between Kyoto University and Mt. Hiei (about 167 mGal) was not so large for the scale factor calibration, we succeeded in determining the G680's relative scale factor with small standard deviation because the measurement error of the gravity data became smaller thanks to the frequent gravity measurements. However, the relative scale factors for LC-G680 and D-58 as of 2020 were found to be different from those in 2018 by more than 0.0002. In addition, the standard deviations of the relative scale factors for LC-D58 and CG-5 were obtained to be greater than 0.0002. These results may be related to significant temporal variations in reading values, originating from the overhaul in 2019 (LC-G680), the manual adjustment of the reading range (LC-D58) and the large instrumental drift (CG-5). Our results also imply that scale factor values for LaCoste-type gravimeters can depend on their reading values, as mentioned in a previous study for Scintrex-type gravimeters.



I. は じ め に

火山地域においては火山活動把握のためにさまざまな地球物理学的観測が行われている。その中でも、重力観測は最も有効な手段の一つであり、火山内部における質量変動を直接的に捉えることができる。例えば、Furuya et al. (2003) は 2000 年噴火時の三宅島において絶対重力と相対重力のハイブリッド観測を実施し、マグマ質量移動や地下空隙形成といった火山内部の質量時空間変動を詳細に示した。また、Kazama et al. (2015) は、2004 年噴火時に浅間山で観測された絶対重力連続データから陸水起源の重力擾乱を取り除き、噴火現象に先行する火道内部のマグマ質量上昇プロセスを捉えた。

そもそも、重力計には絶対重力計と相対重力計の 2 種類がある。絶対重力計は重力の絶対値を測定できるものの、安定した基台や十分な広さを要することから屋外での観測には不向きである。一方、相対重力計は重力の相対値しか測定できないが、絶対重力計よりも小型であるため屋外での直接観測が可能である。また、火山周辺の複数の重力点において相対重力測定を繰り返すことで、火山活動に伴う重力時空間変化を把握することができる。本研究室においても、箱根・阿蘇・桜島の各火山において相対重力測定が繰り返し実施されている（風間ほか, 2019a, 2019b, 2020a）。

相対重力計は内部にバネを有しており、読取值（ばねの伸びに相当） x から重力値 g を推定する。読取值→重力値の変換には製造会社作成の変換表を用いるが、この変換表が正確でない場合には相対重力計から得られる g は正しい重力値にならない。相対重力計を用いて真の重力値を得るためには、 g にさらにスケールファクター（SF）と呼ばれる定数を掛け合わせる必要がある。この SF は絶対重力計と相対重力計の並行観測を実施することで、2 点間の相対重力差に対する絶対重力差の比として推定することができる（e.g., 中川ほか, 1977）。SF は時間変化することが知られていて、数年おきに再検定することが推奨されている（e.g., Onizawa, 2019）。しかしながら、本研究室の相対重力計においては SF の検定が十分に実施されておらず（ごく最近の例として、Fukuda et al., 2017; 風間ほか, 2019b）、SF の時間変化に至っては全く考慮されてこなかった。Onizawa (2019) は SF の時間変化を適切に補正しないと相対重力値に見かけの時間変化が含まれる可能性を指摘しており、火山内部の質量時空間変動を把握するためには SF の寄与を精度よく補正することが不可欠なのである。

そこで、我々は火山地域における真の重力時空間変動を把握することを最終目標に、本研究では火山重力測定に参加している複数の相対重力計について SF 検定を実施した。具体的には、我々はまず京都大学と比叡山頂の間において相対重力測定を繰り返し実施し、相対重力データに各種補正を施すことで京都大学基準の相対重力値を推定した（第 2 章）。その後、各相対重力計で得られた相対重力値を比較することで、ラコスト型相対重力計 G534 を基準とした各相対重力計の SF（相対 SF）を決定した（第 3 章）。最後に、本研究で得られた相対 SF を先行研究の結果と比較し、相対 SF の時間変化の可能性について考察した（第 4 章）。

Ⅱ．京都大学～比叡山頂間における相対重力測定

我々は京都府京都市と滋賀県大津市の境界部に位置する比叡山（標高 848 m）において、2020 年 4 月～12 月にかけて最大週 1 回の高頻度相対重力測定を実施した。SF 検定のために比叡山を測定対象地域としたのは、以下の 3 つの理由による。まず 1 つ目に、比叡山は京都大学の至近に位置しており（直線距離にして約 6 km）、高頻度の繰り返し重力測定を行うのに適しているためである。2 つ目に、京都大学～比叡山頂間では標高差（約 750 m）に伴う約 160 mGal の重力差が存在し、SF を推定するために必要な重力差（100 mGal 以上；Onizawa, 2019）を測定できるためである。3 つ目に、比叡山は非火山であり、火山活動に伴う重力変化を考慮しなくてよいためである。本研究で選定した重力点を Figure 1 に、およびその重力点の座標値を Table 1 に示す。京都大学（京都 A 国際基準点；風間ほか, 2020b）と比叡山頂の他に、標高ではほぼ等間隔となるように 4 つの重力点をこのルート上に選定した。

本研究で用いた重力計は 5 台であり、LaCoste & Romberg 型相対重力計が 4 台（LC-G534, LC-G605, LC-G680, LC-D58）、および Scintrex 型相対重力計が 1 台（CG5-150241330）である。これらの重力計を本研究で採用した理由は、これらの重力計が本研究室における各火山地域での繰り返し相対重力測定に使用されており（風間ほか, 2019a, 2019b, 2020a）、各火山での真の火山性重力変化を把握するためにはこれらの重力計の SF を精度よく決定すべきと判断したためである。この 5 台の重力計のうち、LC-G534, LC-G605, LC-G680 は現場におけるマニュアル操作によって重力読取值（ダイヤル値）を測定することができる。LC-D58 も以前は他の LaCoste 型重力計と同様にマニュアル操作によって読取值の測定を行っていたが、2017 年度に L and R Meter Service 社によってフィードバック式に改造され、現場でトラベルロック（クランプ）を解除しさえすれば重力値を直接測定できるようになった。また、CG5-150241330 もフィードバック方式によって重力値を直接測定でき、かつ潮汐や器械ドリフトなどの寄与を自動で補正することもできる。ただし、以下に述べる通り潮汐と器械ドリフトについては事後解析時に別途補正を行うため、現場測定においては潮汐と器械ドリフトの自動補正を無効化している。

我々はある 1 日の重力測定において 1 台あるいは 2 台の重力計を用い、京都大学と比叡山頂およびこの間の数点で重力読取值を往復測定した。その後、マニュアル測定タイプの相対重力計については製造会社作成の変換表を用いて読取值→重力値の変換を行い、さらに全ての相対重力計について器械高・潮汐・器械ドリフトの寄与を補正した（風間ほか, 2019a）。なお、本研究では 1 回の測定期間中（長くて 7 時間程度）に有意な気圧変化がないと仮定し、気圧変化に伴う重力変化を補正しなかった。我々はこのような重力測定を 2020 年 4 月 3 日～12 月 22 日の期間で計 30 回繰り返し、京都大学を基準とした各重力点における各重力計の相対重力値の平均値を算出した（Table 2）。

各重力点の相対重力値を比べると、標高の高い重力点ほど重力値が小さくなっている。これは標高が高くなるにつれて地球重心からの距離が遠ざかるためである。一般に地球表面における重

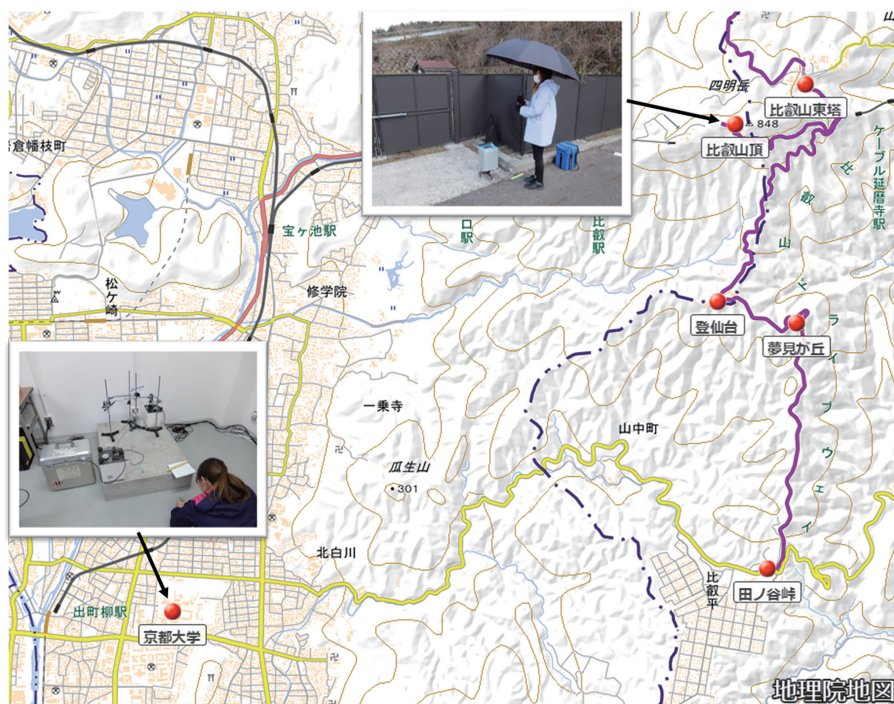


Fig. 1. The topographic map around Kyoto University, obtained from the website of Geospatial Information Authority of Japan. Red circles indicate the relative gravity points, and two photos show the relative gravity measurements at Kyoto University and Mt. Hiei.

Table 1. Coordinate values of gravity points.

	緯度 [deg]	経度 [deg]	標高 [m]
京都大学	35.02923	135.78359	60.8
田ノ谷峠	35.03366	135.83592	364.1
夢見が丘	35.05141	135.83867	512.1
登仙台	35.05306	135.83175	590.9
延暦寺東塔	35.06863	135.83946	682.8
比叡山頂	35.06571	135.83327	816.6

Table 2. Gravity values relative to the gravity point in Kyoto University, collected with five relative gravimeters in 2020 (unit: mGal).

重力計形式	LaCoste	LaCoste	LaCoste	LaCoste	CG-5
シリアル番号	G534	G605	G680	D58	150241330
測定回数	7	3	7	3	15
京都大学	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
田ノ谷峠	-66.867	-66.890	-66.882	-67.117	-66.942
夢見が丘	-98.957	-98.969	-98.960	-99.333	-99.053
登仙台	-115.117	-115.168	-115.118	-115.562	-115.257
延暦寺東塔	-135.865	-135.907	-135.875	-136.305	-135.955
比叡山頂	-167.193	-167.247	-167.218	-167.792	-167.367

力鉛直勾配にはフリーエア勾配 (-0.3086 mGal/m) が知られており、これに京都大学～比叡山頂間の標高差 (755.8 m) を掛け合わせると -233 mGal という重力差が計算される。一方で、実際に観測された重力差は -167 mGal 程度であり、観測値の方が計算値よりも約 3 割小さい。これは比叡山の質量が比叡山頂の重力値を強める向きに働いているためである。

各重力計の相対重力値の違いに注目すると、比叡山頂では LC-G534 と LC-D58 の間で最大約 0.6 mGal だけ相対重力値が異なっている。これは本研究の解析時に SF の寄与を補正しなかったためであり、各重力計の SF の違いが相対重力値の器差として現れていると言える。例えば、比叡山頂における LC-G534 の相対重力値に対する LC-D58 の器差の比率は $+0.619 / 167.193 = +0.0037$ と計算されるので、LC-D58 の SF は LC-G534 に比べて 0.0037 だけ小さいと概算できる。

Ⅲ. 相対スケールファクターの推定

一般に SF は絶対重力計と相対重力計の並行観測によって推定することができる (Fukuda et al., 2017; 風間ほか, 2019b)。本研究の相対重力測線においては、京都大学では過去に絶対重力測定が実施されたことがあるが (風間ほか, 2020b)、比叡山頂ではこれまでに絶対重力の直接測定が行われた実績がない。そこで本研究は、絶対 SF と相対 SF という概念を導入し、京都大学～比叡山頂の相対重力データから相対 SF を推定する。

本研究で定義する絶対 SF は相対重力差に対する絶対重力差の比であり、先行研究における SF という用語と同義である。一方で相対 SF は、任意の相対重力計で得られた相対重力差を、ある基準となる相対重力計の重力差に換算するための比例係数である。本研究では、観測誤差や器械ドリフトの観点から相対重力計 LC-G534 が最も安定的に相対重力値を測定できているものと考え、LC-G534 を基準とした相対 SF を以下の通り推定した。まず、相対重力計 i を用いて重力点 j で観測された相対重力値の平均値 (Table 2) を g_i^j と表記する。研究対象期間内 (2020 年 4 月～12 月) において各重力点の相対重力値や相対 SF が時間変化しないものと仮定すると、相対重力計 i の相対 SF S_i は以下の式で定義される。

$$g_{G534}^j = g_i^j * S_i + b_i$$

ここで、 b_i は 2 台の重力計 (LC-G534 および相対重力計 i) の京都大学での観測誤差に伴う、重力値の系統的なずれを意味している。なお、上のような式は各重力計に対して 6 本ずつ (重力点数分) 作成できる。次に、各重力計に対して作成された 6 本の方程式を以下の観測方程式に代入した。

$$\vec{d} = \mathbb{G}\vec{m}$$

具体的には、データベクトル $\vec{d}$ に g_{G534}^j を、グリーン関数 $\mathbb{G}$ の 1 列目および 2 列目にそれぞれ g_i^j と 1 を、モデルベクトル $\vec{m}$ の 1 行目および 2 行目にそれぞれ S_i と b_i を代入した。その後、モデルパラメーター (S_i および b_i) を次式の重み付けなし最小二乗法によって推定した。

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

また、次のモデル分散共分散行列 $\mathbb{C}_m$ の対角成分の平方根を取ることで、それぞれのモデルパラメーター (S_i, b_i) の標準偏差 $(\Delta S_i, \Delta b_i)$ を算出した。

$$\mathbb{C}_m = \frac{(\vec{d} - \mathbb{G}\vec{m})^T (\vec{d} - \mathbb{G}\vec{m})}{n_d - n_m} (\mathbb{G}^T \mathbb{G})^{-1}$$

ここで、 n_d と n_m はデータおよびモデルの個数を意味していて、本研究の場合それぞれ6および2である。

Table 3 は本研究で推定された各相対重力計のモデルパラメーター (S_i, b_i) とその標準偏差 $(\Delta S_i, \Delta b_i)$ である。各重力計の相対 SF S_i はどれも1よりわずかに小さくなっており、これは各重力計で測定される相対重力値が LC-G534 のそれよりも大きくなっていることを意味している (Table 2 参照)。 S_i の値が1から最も離れているのは LC-D58 の $S_{D58} = 0.996507 = 1 - 0.003493$ であり、この値は前章で示した概算値 (0.0037) とほぼ等しくなっている。なお、本研究の相対 SF を先行研究と比較した結果については次章で別途示すこととし、本章ではこれ以降相対 SF の標準偏差 ΔS_i について議論する。

相対 SF の標準偏差 ΔS_i は、最も小さいもので LC-G680 の 0.000067 である。そもそも、SF を精度よく推定するためには大きな重力差を持つ重力点間で重力測定を行う必要がある。本研究室では過去にニュージーランドと熊本県で LC-G680 の絶対 SF を推定しており、その際の重力差はそれぞれ約500および230 mGal、絶対 SF の標準偏差はそれぞれ0.000043および0.000088であった (Fukuda et al., 2017; 風間ほか, 2019b)。一方、本研究における重力差は約170 mGal であり、熊本県の事例よりも小さい。それにもかかわらず本研究の ΔS_i の方が熊本県の事例より小さいのは、京都大学～比叡山頂間の重力測定を複数回繰り返したことにより、測定誤差の小さな相対重力値 (Table 2) を取得できたためと考えられる。

その一方で、LC-D58 および CG-5 の ΔS_i は 0.0002 を超えており、LC-G605 および LC-G680 の ΔS_i よりも2～3倍程度大きい。この原因の1つには、測定対象期間 (2020年4月～12月) において LC-D58 および CG-5 で実測された相対重力値が大きくばらついていることが影響していると考えられる。実際、複数回の重力測定データを平均化する際 (Table 2)、比叡山頂における相対重力値の標準偏差は以下のように得られた。LC-G534: 0.007 mGal, LC-G605: 0.002 mGal, LC-G680: 0.009 mGal, LC-D58: 0.034 mGal, CG-5: 0.012 mGal。このように、LC-D58 と CG-5 の重力測定値の標準偏差は 0.010 mGal を超えており、特に LC-D58 については標準偏差が特に大きいことが分かる。

そもそも、本解析では対象期間内で相対重力値 g_i^j が時間変化しないものと仮定しているが、もし g_i^j が時間変化しているのであれば各重力点の g_i^j の標準偏差はどの重力計でも同程度の値を有するはずである。しかしながら、本研究では LC-D58 と CG-5 の重力観測値の標準偏差が他の重力計のそれに比べて大きくなっており、これは偽の重力時間変化が LC-D58 と CG-5 の重力観測データに含まれている可能性を示唆している。実際、Onizawa (2019) は絶対 SF が読取値依

Table 3. Model parameters and their standard deviations for each relative gravimeter.

重力計形式	LaCoste	LaCoste	LaCoste	LaCoste	CG-5
シリアル番号	G534	G605	G680	D58	150241330
測定回数	7	3	7	3	15
S_i	1.000000	0.999671	0.999900	0.996507	0.999064
ΔS_i		± 0.000094	± 0.000067	± 0.000228	± 0.000202
b_i		-0.001560	-0.000832	0.005724	0.004676
Δb_i		± 0.010424	± 0.007413	± 0.025345	± 0.022446

存性を有していると指摘しており，長期的な器械ドリフトなどによって相対重力計の読取値が時間変化すると絶対 SF も時間変化し，結果的に伊豆大島の山麓～山頂間の相対重力値に偽の重力変化が含まれうることを示した．本研究においても同様に，対象期間内（2020 年 4 月～12 月）において LC-D58 と CG-5 の読取値が他の重力計に比べて大きく変化し，それに伴って相対 SF が時間的に変化することを想定すれば，LC-D58 と CG-5 における重力測定データのばらつきや相対 SF の標準偏差 ΔS_i が増大したことを説明できるのである．

なお，LC-D58 と CG-5 の読取値が時間変化する点については，それぞれの重力計で別の理由が考えられる．まず，CG-5 重力計は器械ドリフトの大きな機種であることが一般的に知られており（e.g., Onizawa, 2019），このことが読取値の時間変化につながったと考えられる．一方，LC-D58 は読取値の測定レンジが $-200 \sim +200$ mGal と狭く，この範囲を超えるような地域に移設する際には RESET ねじを手動で回すことで測定レンジを調整する必要がある．本研究の対象期間においては本論文の著者の 1 人（風間）が 2020 年 12 月 7 日に阿蘇火山で LC-D58 による重力測定を実施しており，その前後で測定レンジを調整した．この際，阿蘇火山訪問の前後で RESET ねじの位置が完全に一致しているという保証はなく，この位置のずれが読取値のステップ的な変化に繋がった可能性が考えられる．ただし，本研究において各重力計の読取値－相対 SF 間の依存性はまだ十分に解明できておらず，今後も比叡山における相対重力測定を継続する必要がある．

IV. 先行研究との比較

本研究で用いた相対重力計については本研究室においてこれまで複数回の SF 検定がなされてきた．例えば，風間ほか（2019b）は 2018 年 8 月に熊本県北部の益城町～阿蘇山頂（重力差：約 230 mGal）において絶対重力計との比較測定を実施し，複数の相対重力計の絶対 SF を推定した．また，2020 年 9 月には本稿の著者ら（若林・風間）が京都～阿蘇～桜島（重力差：約 270 mGal）で複数の相対重力計による相対重力測定を実施した（今後別論文にて詳述予定）．そこで我々は，2018 年に決定された絶対 SF（Table 3 in 風間ほか，2019b）を LC-G534 基準の相対 SF に換算したほか，2020 年 9 月の相対重力測定値から LC-G534 基準の相対 SF を新たに推定した．

Table 4 は本研究で決定された相対 SF を 2018 年 8 月および 2020 年 9 月の相対 SF と比較したものである。まず、2020 年 9 月の相対 SF は全ての重力計で本研究の SF と誤差範囲内で一致している。これは相対重力値の測定期間や測定レンジが両方で共通しているためであり、本研究で得られた相対 SF が妥当なものであると言える。

次に 2018 年 8 月と本研究の相対 SF の違いに着目すると、相対 SF の変化が最も大きいのは LC-D58 であり、その変化量は -0.000253 である。これは 200 mGal の重力差がある 2 点間（約 1000 m の標高差に相当）のキャンペーン相対重力測定において、約 2 年間で約 $51 \mu\text{Gal}$ の偽の重力変化が観測される可能性を示している。前章で述べた通り、LC-D58 は RESET ねじのマニュアル回転によって測定レンジを調整する必要がある。2018 年～2020 年の間における RESET ねじの調整が SF の変化に繋がった可能性がある。ただし、2018 年 8 月の相対 SF については誤差伝播の影響で、また本研究の相対 SF は相対重力測定値のばらつきの影響で標準偏差 (ΔS_i) が大きくなっている。そのため、今回得られた LC-D58 の相対 SF 変化については、今後の継続的な SF 検定によって再検証する必要がある。

2018 年 8 月と本研究の相対 SF の差が 2 番目に大きい重力計は LC-G680 であり、相対 SF の変化量は -0.000249 である。そもそも、LC-G680 は 2019 年上半期にオーバーホールを実施しており、その際の読取値変化が相対 SF の変化に繋がった可能性がある（風間ほか, 2019a）。実際、京都大学における LC-G680 の読取値は、オーバーホールの前後で 2921.8 mGal（2019 年 3 月）から 3288.6 mGal（2019 年 6 月）に変化した。このステップ的な読取値変化（+366.8 mGal）が相対 SF 変化に繋がったと仮定すると、読取値に対する相対 SF の変化率は $-6.8 \times 10^{-7} / \text{mGal}$ となる。この値は気象研究所所有の Scintrex 型相対重力計で得られた読取値—絶対 SF の変化率（ $+4.9 \times 10^{-7} / \text{mGal}$; Table 4 in Onizawa, 2019）と同じオーダーであり、LaCoste & Romberg 型相対重力計においても SF の読取値依存性が存在することを示唆している。これまで火山地域では LaCoste 型相対重力計を用いた相対重力測定が頻繁に実施されてきたが、LaCoste 型相対重力計においても器械ドリフト等により読取値が時間変化するのであれば、過去に火山地域で観測された相対重力時間変化にも SF 時間変化に伴う偽の重力変化が含まれている恐れがある。このことを検証するためには、広い読取値の帯域（例えば日本列島の南北に長い測線）で SF 検定を実施

Table 4. Relative scale factors estimated in previous and this studies.

重力計形式		LaCoste	LaCoste	LaCoste	LaCoste	CG-5
シリアル番号		G534	G605	G680	D58	150241330
益城～阿蘇山頂 (2018 年 8 月)	S_i	1.000000		1.000149	0.996760	0.999107
	ΔS_i	± 0.000124		± 0.000132	± 0.000122	± 0.000120
京都～阿蘇～桜島 (2020 年 9 月)	S_i	1.000000	0.999683	0.999850		0.999074
	ΔS_i		± 0.000059	± 0.000056		± 0.000064
京都大学～比叡山頂 (2020 年 4 ～ 12 月)	S_i	1.000000	0.999671	0.999900	0.996507	0.999064
	ΔS_i		± 0.000094	± 0.000067	± 0.000228	± 0.000202

して LaCoste 型相対重力計の読取値—SF の依存性を明らかにした上で、読取値および SF の時間変化を考慮して過去の重力測定データを再解析する必要がある。

V. 結 論

我々は京都大学～比叡山頂の間に 6 つの重力点を設定し (Fig. 1, Table 1), 2020 年 4 月～12 月の期間中に 5 台の相対重力計を用いて高頻度なキャンペーン相対重力測定を実施した。その後、この相対重力データに各種補正を施すことで京都大学基準の相対重力値を計算し (Table 2), 観測方程式の逆解析によって LC-G534 相対重力計を基準とした各重力計の相対 SF を推定した (Table 3)。

その結果, LC-G680 重力計の相対 SF は $S_{G680} = 0.999900 \pm 0.000067$ となり, 10^{-4} 未満の小さな標準偏差で相対 SF を推定することに成功した。京都大学～比叡山頂間の重力差がそれほど大きくない (約 167 mGal) にもかかわらず LC-G680 の相対 SF を高精度に推定できたのは, キャンペーン重力測定を高頻度に繰り返すことで各重力点の相対重力値の観測誤差を低減できたためと考えられる。その一方で, 本研究で得た LC-G680 の相対 SF は 2018 年の値 (風間ほか, 2019b) から -0.000249 だけ変化していることが分かった (Table 4)。これは 2019 年度実施のオーバーホールによって LC-G680 の読取値にステップが生じたためと考えられ, LaCoste & Romberg 型相対重力計においても SF の読取値依存性 (Onizawa, 2019) が存在する可能性を示唆している。

LC-D58 重力計および CG-5 重力計の相対 SF の標準偏差は 0.0002 程度となり, 他の重力計のそれより 1 桁程度大きくなった (Table 3)。また, LC-D58 については 2018 年 (風間ほか, 2019a) から 2020 年 (本研究) にかけて相対 SF が -0.000253 だけ時間変化していることも明らかになった (Table 4)。これらの解析結果は, LC-D58 や CG-5 の読取値が時間変化することでこれらの重力計の SF が時間変化した可能性を示唆しており, それぞれ RESET ねじの調整 (LC-D58) や大きな器械ドリフト (CG-5) が影響していると考えられる。

今後相対重力計の読取値—SF の依存性をさらに明らかにするためには, 京都大学～比叡山頂間の相対重力測定を繰り返し, 相対重力値の観測精度や相対 SF の推定精度を向上させる必要がある。また, より広い読取値帯域 (例えば日本列島の南北に長い測線) において絶対重力と相対重力の比較測定を実施し, この重力データから絶対 SF を高精度に推定する必要がある。これらの SF 検定によって SF の読取値依存性を定量化できた後には, 火山地域における過去の重力測定データから SF の寄与を完全に除去し, 真の火山性重力変化を抽出することができると期待される。

謝辞 比叡山における相対重力繰り返し測定では、一部の測定回において京都大学大学院の長縄和洋氏と大柳諒氏に測定作業を補助いただいた。また、相対重力データの一部は京都大学学部3回生向け実習科目「地球惑星科学課題演習D A」の実習の一環で取得された。Figure 1の作成にあたっては、国土地理院ウェブサイトの地理院地図に掲載されている地形図を用い、地理院地図のシステムを利用して重力点位置を示す赤色丸印を挿入した。

文 献

- 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.
- 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・安部祐希・原田昌武・加藤照之, 2019a. 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, 51, 25-36.
- 風間卓仁・吉川慎・長縄和洋・宮内佑典・大倉敬宏・福田洋一, 2019b. 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), 地震研究所彙報, 94, 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, 63 (B), 108-117.
- 風間卓仁, 2020b. 京都大学吉田キャンパス北部構内に存在する2つの絶対重力基準点について, 京都大学測地学研究室技術報告, 1, 1-7.
- 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・友田文好・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.
- Onizawa, S., Apparent calibration shift of the Scintrex CG-5 gravimeter caused by reading-dependent scale factor and instrumental drift, 2019. J. Geod., 93, 1335-1345, doi: 10.1007/s00190-019-01247-9.