



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	風間, 卓仁
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 83, 9-23
Issue Date	2020-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.83.9
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77089
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_83_p9-23.pdf



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

風間 卓仁

京都大学大学院理学研究科

(2020 年 2 月 24 日受理)

Continuous gravity measurements using portable relative gravimeters: The system overview and a case study of the LaCoste G680 gravimeter

Takahito Kazama

Graduate School of Science, Kyoto University

(Received February 24, 2020)

Relative gravity data is continuously collected using different types of portable relative gravimeters on a trial basis, toward the future utilization of continuous relative gravity measurements for monitoring spatiotemporal mass variations associated with volcanic activities. The gravity data is first recorded using the Tera Term software installed to a Windows-based PC; although a typical LaCoste & Romberg gravimeter does not have any devices to transmit its gravity value digitally, its analog voltage output from its readout socket can be converted to serial data format using an appropriate analog-digital converter. The recorded gravity data is then sent to an Ubuntu-based computer periodically to draw graphs of gravity time series. The graphs are finally uploaded to a web server so as to monitor temporal gravity variations anytime and anywhere. The above system for continuous relative gravity measurement was applied to the LaCoste G680 gravimeter, which was installed at the Kyoto-A gravity point, Kyoto University in September 2017. The G680's gravity data in 2018 clearly showed time variations in short-period tide and annual instrumental drift. In particular, the instrumental drift was expressed by the linear gravity decrease of about 10 mGal/year and the additional annual gravity variation of about 1.5 mGal amplitude. These results suggest that typical LaCoste gravimeters can be utilized for continuous relative gravity measurements without major instrumental remodeling.



I. は じ め に

重力観測は火山内部の質量変動を理解するのに有効な手法の1つである。特に、重力値を連続的に観測することで、時間的に高い分解能で質量変動を把握することができる。これまで日本の火山地域では自由落下型絶対重力計による重力連続観測がしばしば実施され、三宅島や浅間山ではマグマ移動に伴う重力変化が検出されてきた (Furuya et al., 2003; Kazama et al., 2015)。しかしながら、火山灰や火山ガスなどの過酷な環境下で絶対重力観測を行うことは容易でなく、絶対重力連続観測を維持するためには定期的な保守作業が不可欠であった。

そこで近年では、可搬型相対重力計や超伝導重力計を用いた重力連続観測がいくつかの火山で実施されている (今西ほか, 2018; 三浦ほか, 2018)。これらの重力計はバネの長さ変化や超伝導球の位置変化から重力値を間接的に測定しており、動的な重力観測を行う絶対重力計に比べて保守頻度を下げることができる。実際、2015年桜島急膨張イベント時にはCG-3M相対重力計による相対重力連続観測が桜島有村で実施され、 $-5.86 \mu\text{Gal}$ という微小な重力変化を検出することに成功している (風間ほか, 2016)。その一方で、メンテナンスフリーで重力連続値を取得できるCG-3M重力計は日本にごくわずかししか現存しておらず、新規に連続観測用の重力計を購入することも経済的観点から難しい。以上の理由により、重力連続観測の実施されている国内の火山は数地点にとどまっており、その結果重力連続観測を用いた火山活動監視は十分になされていない。

本問題点を解決するため、筆者は近年ラコスト重力計による重力連続観測システムの構築に努めている。ラコスト重力計はゼロ長バネを用いた可搬型相対重力計であり、日本の火山地域では主にキャンペーン観測で広く用いられている。多くのラコスト重力計には電圧出力用ソケット (リードアウトと呼ばれる) が備わっているので、電圧値を連続的にモニターすることで重力変化を把握できると期待されるのである。そこで本稿では、まず第2章において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と、各相対重力計に応じた重力連続値の取得方法を述べる。また第3章では、この手法をラコスト重力計 G680 に適用し、京都大学で重力連続値を取得した実例を示す。

II. 可搬型相対重力計を用いた重力連続観測システム

筆者は2020年2月現在、箱根火山・阿蘇火山・桜島火山および京都大学にて可搬型相対重力計を用いた重力連続観測を実施している。各地点に設置されている重力計は機種が異なるものの、データ収録から監視に至る一連のプロセスを以下に統一することで安定的な重力連続観測を実現している。

- ・データ収録: 各相対重力計がシリアル通信フォーマットによって重力値等を出力する (2.1~2.3節で詳述)。各重力計には Windows OS 搭載のノート型コンピューターが接続されていて、重力計から送信された信号はターミナルエミュレーター Tera Term によって記録される。この際、

Tera Term のタイムスタンプ機能を利用し、重力データの受信時刻も同時に記録する。また、気圧変化に伴う重力変化を後ほど補正するため、同様の手法によって気圧データも取得する(2.4 節で詳述)。

- ・データ転送：Windows のタイムスケジューラー機能を用い、インターネット回線を経由して重力データをデータ保存用サーバーに定期的に転送する。火山周辺において有線のインターネット回線が利用できない場合にはモバイルルーターを導入し、携帯電話回線を経由してデータを転送する。
- ・データ解析：Ubuntu OS 搭載の解析用コンピューターがデータ保存用サーバーから重力データを定期的に取得し、潮汐補正・気圧補正・器械ドリフト補正などの初期解析を実施する。その上で、描画ソフトウェア GMT を用いて重力連続データをグラフ画像として描画する。
- ・データ監視：データ解析用コンピューターがウェブサーバーにグラフ画像を定期的にアップロードする。このグラフ画像はインターネットを経由して閲覧することができ、これにより重力データの準リアルタイム監視が可能となる。

1. CG-3M 重力計の重力データ取得

桜島火山では、2020 年 2 月現在 2 台の CG-3M 相対重力計が有村観測坑道局舎（南岳火口の南南東約 2.5 km）および黒神観測室（南岳火口の東約 4.0 km）にそれぞれ設置されている。CG-3M 重力計は 1 秒間隔で相対重力値を観測し、任意の時間（桜島火山では 50 秒間）の重力観測値を平均処理する。その後、相対重力の平均値・標準偏差および器械傾斜量（2 方向）などがシリアル通信のフォーマットで出力され、RS-232C ケーブルを経由してコンピューターに送信される。ただし、重力計内部におけるデータ処理に数秒を要するため、重力データの出力間隔は桜島火山の場合約 60 秒となっている。CG-3M 重力計ではこのようなデータ出力を回数制限なしに反復するよう設定できるので、結果的にメンテナンスフリーの重力連続観測システムを構築することができる (Fig. 1)。

2. フィードバック式ラコスト重力計 D58 の重力データ取得

京都大学理学研究科 1 号館地下の重力計室にはラコスト重力計 D58 が設置されている。D58 は L and R Meter Service 社によってフィードバック式に改造された重力計で、無線規格 Bluetooth のシリアル通信を経由して相対重力値・器械傾斜量（2 方向）・恒温槽温度・バッテリー電圧を 2 Hz 間隔で出力する。D58 の各種データは器械通電時に常に無線出力され、事前のパラメーター設定も特に必要としない。また、任意の Bluetooth 搭載デバイスによって重力データを取得できるので、重力連続観測をワイヤレスの環境下で容易に実現することができる (Fig. 2)。

3. 一般的なラコスト重力計の重力データ取得

一般的なラコスト重力計は本体の右側面に電圧出力用ソケットを有していて、このソケットに

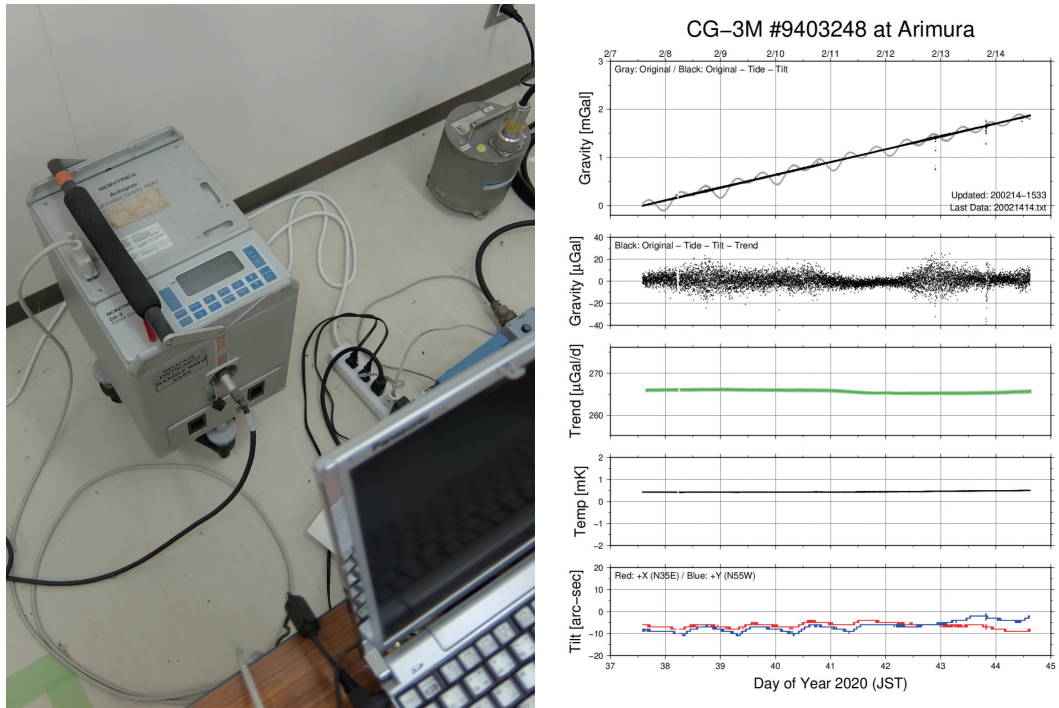


Fig. 1. The right graph indicates the continuous data collected by a CG-3M relative gravimeter (serial number: 9403248; see the left picture) at Arimura, Sakurajima Volcano from 7 to 14 February 2020. This graph was automatically created by the gravity observation system of this study.

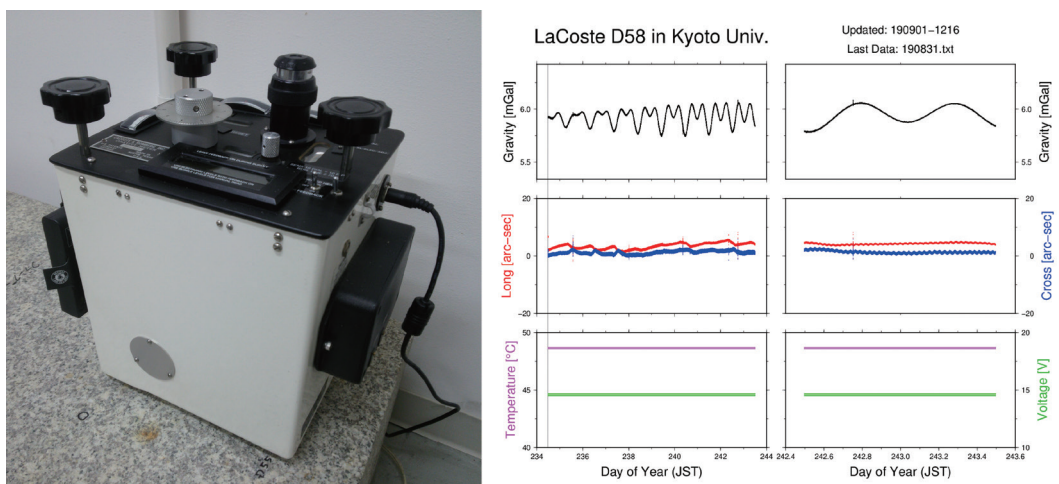


Fig. 2. The right graph indicates the continuous data collected by the D58 relative gravimeter (see the left picture) in Kyoto University from 23 August to 1 September 2019. This graph was automatically created by the gravity observation system of this study.

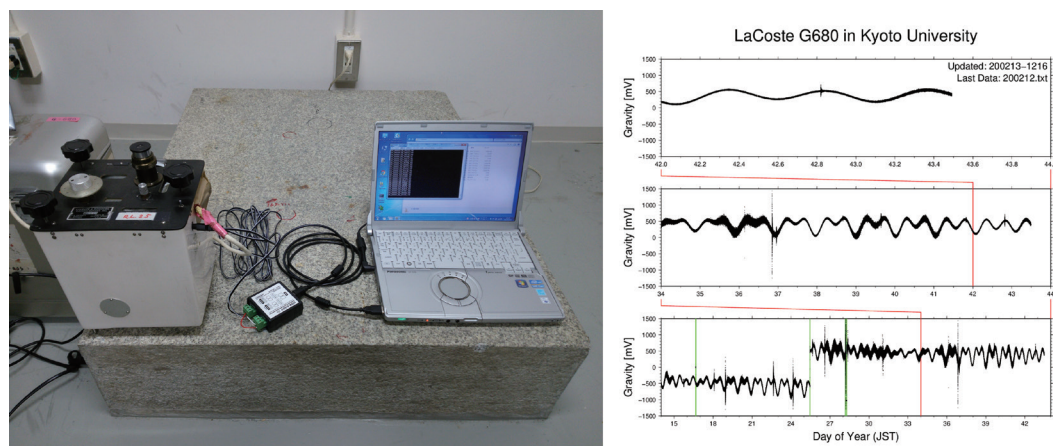


Fig. 3. The right graph indicates the continuous voltage data collected by a LaCoste & Romberg relative gravimeter (serial number: G680; see the left picture) in Kyoto University from 15 January to 13 February 2020. This graph was automatically created by the gravity observation system of this study.

3.5 mm モノラルミニプラグを差し込むことで電圧値を取り出すことができる。この電圧値は重力計内部のパネの位置を意味しており、重力計設置点における相対重力値と比例関係にある。（なお、一般的なラコスト重力計の重力測定機構については 3.1 節に詳述している。）本研究の場合、この電圧信号を電圧モニター装置 USB-045V（ヒューマンデータ社製）に入力し、USB ケーブルを経由してデータ収録用コンピューターに接続させている。

USB-045V は 2 つのチャンネルの電圧値をシリアル信号でコンピューターに伝送する装置であり、各チャンネルの電圧分解能は 0.3 mV、計測可能範囲は 0~5 V である。ただし、1 番のチャンネルにラコスト重力計の配線を接続し、2 番のチャンネルに 1 番のチャンネルの信号を正負反転で接続すれば、実質 -5~+5 V の範囲で電圧信号を受信できる。また、USB-045V による電圧信号の収録間隔や収録回数は、ターミナル画面から対話式で設定することができる。なお、この設定コマンドはテキストファイルとしてコンピューター内に保存しておけば、Tera Term の起動時に自動で読み込むことも可能である。以上のことから、USB-045V を用いることでマニュアル操作を介さずにラコスト重力計の電圧値取得を実現できるのである。

この電圧収録システムは箱根火山と阿蘇火山に適用済みで、それぞれラコスト重力計の D202 が神奈川県温泉地学研究所に、および G1016 が京都大学火山研究センター坂梨仮研究棟に設置されている。また、京都大学理学研究科 1 号館地下の重力計室にはラコスト重力計の G534 および G680 (Fig. 3) が設置されていて、同様のシステムによって電圧値の連続観測が実施されている。

4. 気圧データの取得

火山活動など固体地球起源の重力変化を把握するためには、気圧変化に伴う重力変化を補正する必要がある。そこで本研究では、温湿度気圧センサーモジュール RT-USB-THP（アールティ

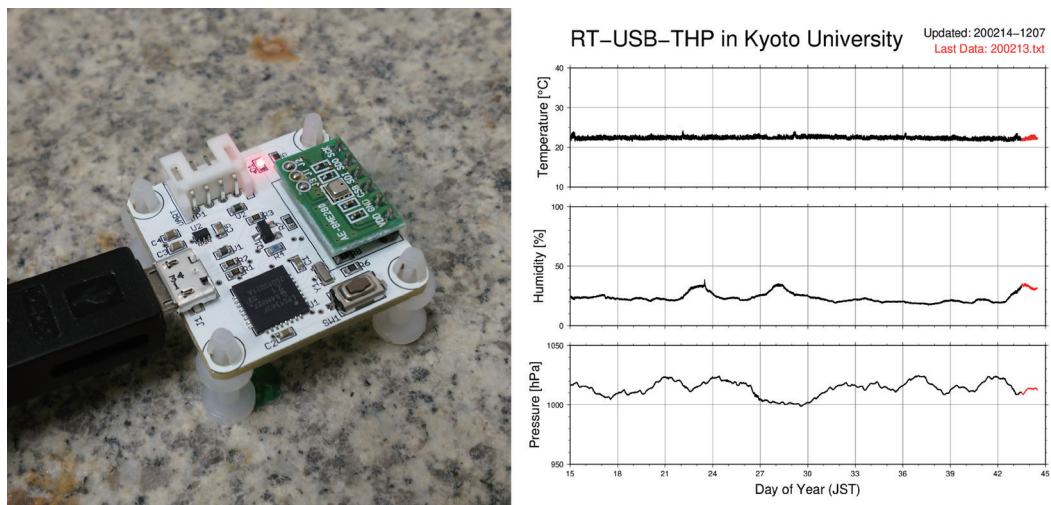


Fig. 4. The right graph indicates the continuous temperature/humidity/pressure data collected by a sensor module, RT-USB-THP (see the left picture) from 16 January to 14 February 2020. This graph was automatically created by the gravity observation system of this study.

社製) をデータ収録用コンピューターに接続することで、重力観測点における気圧値を取得している。RT-USB-THP はボッシュ社製の温湿度気圧センサー BME280 を搭載しており、USB ケーブルを経由して温度・湿度・気圧値をシリアルフォーマットで送信する。温度・湿度・気圧の収録間隔はデフォルトで 1 Hz に設定されているが、ファームウェアを書き換えることで収録間隔を変更することも可能である。RT-USB-THP から送信されたシリアル信号は Tera Term によって収録することができるので、重力観測と同様のシステムを用いて温度・湿度・気圧データを処理することが可能である (Fig. 4)。

なお、アールティ社のウェブサイトによると、温湿度気圧センサーモジュール RT-USB-THP は 2020 年 2 月現在「在庫切れ」「生産予定なし」と記載されている。しかしながら、温湿度気圧センサー BME280 自体は容易に入手することができるので、例えば Arduino や Raspberry Pi といったマイクロコンピューターを用いれば、RT-USB-THP と同等の気圧連続観測システムを構築できると考えられる。

Ⅲ. ラコスト重力計 G680 による重力連続観測

本研究では京都大学大学院理学研究科所有のラコスト重力計 G680 (Fig. 3) について、2017 年 9 月以降理学研究科 1 号館 (吉田キャンパス北部構内) の地下重力計室基台 (京都 A と呼ばれている) に常時設置し、前章のシステムによって相対重力データを 1 秒間隔で取得している。本章では、2018 年～2019 年に取得された重力連続データを示し、特に 2018 年の重力データについては各種解析を実施した結果についても述べる。

1. 2018 年に取得された G680 の重力連続データ

Fig. 5c の黒丸は 2018 年の 1 年間に取得された G680 の重力連続データを電圧 [mV] の単位で示しており、1 Hz 間隔で収録されたデータのうち毎正時のデータのみを抽出したものである。また、赤線は G680 のダイヤルをマニュアルで回転させた日時を示している。そもそも、ラコスト重力計は零位法による測定システムを採用している相対重力計である。実際のフィールド観測では、重力計上面中央部に位置するダイヤルを回転させ、リードアウトの出力値（電圧値または電流値）がゼロになるように調整する。リードアウト出力値がゼロになったとき、重力計上面のカウンターおよびダイヤルに表示されている値を読み取ることで、各重力点における相対重力値を得ることができる。一方、今回の重力連続観測では、重力の時間変化（主に潮汐変動に起因）に伴ってバネの長さが時間変化し、それに伴ってリードアウト出力値も時間変化する。ただし、ラコスト重力計内蔵のゼロ長バネは長期的に僅かにクリープするので、その結果相対重力値やリードアウト出力値は見かけ変化する（器械ドリフトと呼ばれる）。G680 においては重力値が長期的に減少するような器械ドリフトが既に知られており、G680 の電圧出力値が電圧モニター装置 USB-045V の測定範囲（ $-5 \sim +5$ V）を逸脱する可能性があった。そこで本研究は、Fig. 5c の赤線の日時で G680 のダイヤルを回転し、電圧出力値が測定範囲内に収まるように調整したのである。

G680 の電圧値（Fig. 5c の黒丸）は潮汐変動に伴って ± 300 mV の振幅で小刻みに変動している。

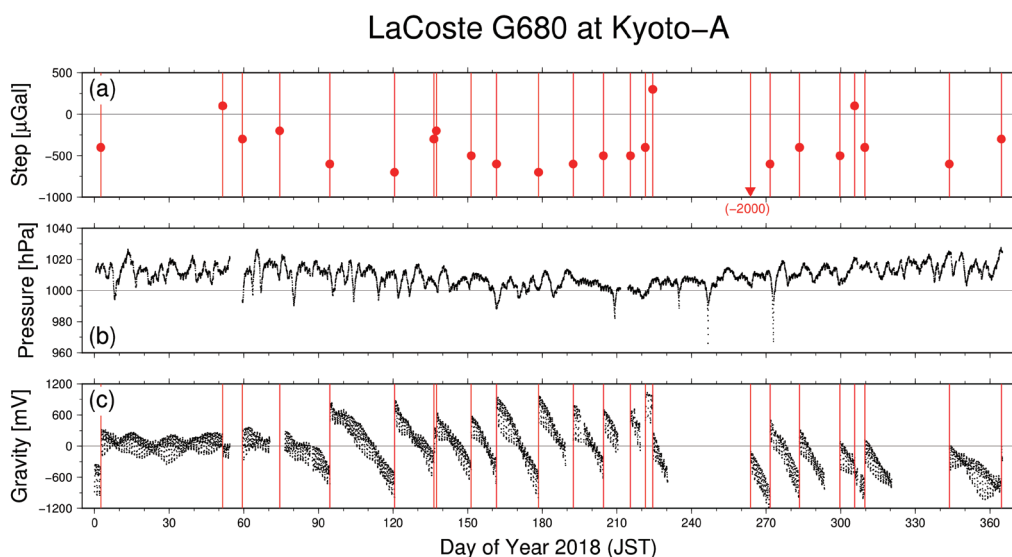


Fig. 5. The gravity and air pressure data collected at the Kyoto-A gravity point, Kyoto University in 2018. (a) Red lines indicate the times when the dial value of the G680 gravimeter was adjusted. Red circles and triangle indicate the step value of the dial. (b) Black dots indicate the continuous air pressure data (unit: hPa) collected by RT-USB-THP (see Fig. 4). (c) Black dots indicate the continuous gravity data (unit: mV) collected by the G680 gravimeter (see Fig. 3). Red lines indicate the times when the G680's dial value was adjusted.

また、電圧値は2018年1月～2月 ($t < 60$ day) には0 V 周辺でほぼ平坦な長期変化をしていたが、それ以降は器械ドリフトに伴う重力減少が大きくなり、ダイヤル調整の回数が増えている。Fig. 5a の赤丸はダイヤルの回転量を [μGal] 単位で示しており、5月～8月 ($120 < t < 240$ day) には約10日おきに500 μGal 前後のダイヤル調整をしていたことが分かる。その後は阿蘇火山や桜島火山におけるキャンペーン観測（風間ほか, 2019a, 2019b）により連続データに欠測があるものの、12月 ($t > 330$ day) になると器械ドリフトに伴う重力減少はやや緩やかになっている。これらのことから、G680の器械ドリフトは年周的に変動しており、6月前後に器械ドリフトに伴う重力減少が最も大きくなることが示唆される。なお、Fig. 5b は重力計室で測定された気圧変化であるが、Fig. 5c の電圧変化の表示範囲 ($-1.2 \sim +1.2$ V) で見る限りでは気圧変化に伴う重力変化は顕著でない。

2. BAYTAP-G による潮汐・気圧応答解析

G680 のリードアウト出力値の時間変化から潮汐変動および気圧変化の寄与を差し引くため、本研究はBAYTAP-G (Tamura et al., 1991) による応答解析を実施した。ここでは、20個の分潮に対する電圧応答量と位相、気圧変化に対する電圧の即時応答量、およびダイヤル回転時にお

Table 1. The BAYTAP-G result of the gravity response to earth tide and air pressure change, estimated from the continuous gravity data of the LaCoste G680 relative gravimeter (Fig. 5c). Amplitude, phase and their RMSE (root-mean-square error) values are shown for each constituent.

Constituent	Amplitude [mV]	RMSE [mV]	Phase [deg]	RMSE [deg]
Q1	12.924	1.683	1.050	7.457
O1	68.889	1.617	-0.103	1.346
M1	8.269	2.425	-16.452	16.792
PI1	3.218	1.244	-61.871	22.156
P1	30.074	1.310	-1.369	2.493
S1	1.285	1.186	-178.876	53.207
K1	96.454	1.373	-0.963	0.814
PSI1	2.589	1.003	107.136	22.188
PHI1	1.682	1.170	-13.182	39.769
J1	6.310	1.218	6.196	11.059
OO1	1.991	1.693	-4.293	48.704
2N2	2.608	0.233	-2.717	5.126
N2	21.611	0.350	-2.578	0.928
M2	115.950	0.358	-1.366	0.177
LAMBDA2	1.073	0.343	-42.177	18.298
L2	4.012	0.441	17.346	6.303
T2	2.730	0.353	8.705	7.394
S2	53.613	0.353	-3.118	0.450
K2	16.421	0.410	-7.147	1.431
M3	2.034	0.183	1.186	5.171
Barometric	-0.899	0.344	0.000	0.000

ける電圧のステップ変化量を求めた。なお、ラコスト重力計は器械検定によってリードアウトの出力感度を調整することができるが（志知, 1985）、本対象期間においてはフィールド観測の前後に器械検定を実施しており、出力感度をこの期間内で一定に保つように努めた。そこで今回は、重力変化に対するリードアウト電圧値の感度が不変であると仮定した上で BAYTAP-G の解析を実施した。

Table 1 は BAYTAP-G によって得られた各分潮の振幅・位相、およびそれらの誤差を示している。また、この表の下端には気圧変化に対する電圧応答量とその誤差を記載している。最も振幅の大きい分潮は M2（主太陰半日周潮；角速度 28.9841042 deg/hour）の 115.950 ± 0.358 mV で、その次に大きい分潮が K1（日月合成日周潮；角速度 15.0410686 deg/hour）の 96.454 ± 1.373 mV

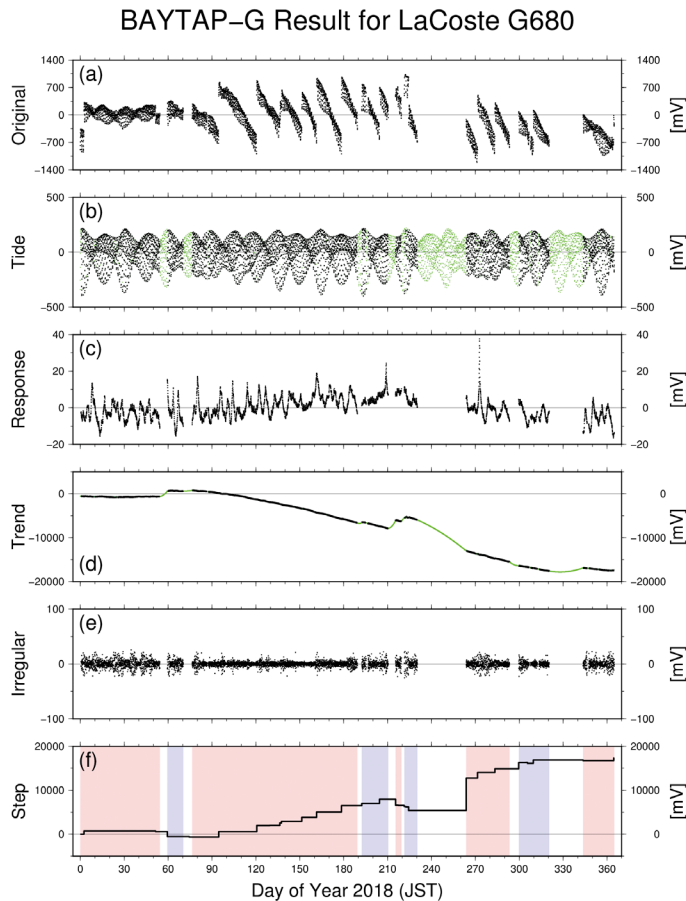


Fig. 6. The components of the G680's gravity change, separated using BAYTAP-G (Tamura et al., 1991). In each panel, black lines and dots indicate the component obtained from the original gravity data. Green lines and dots indicate the component synthesized by BAYTAP-G. Red and blue squares indicate the durations when the gravity data was continuously collected. (a) The original data. (b) The tidal component. (c) The response component for air pressure change. (d) The trend component. (e) The irregular component. (f) The step component.

であった．また，気圧応答は -0.899 ± 0.344 mV/hPa であり，その大きさは電圧モニター装置 USB-045V の電圧分解能 (0.3 mV) の約 3 倍であった．

また，Fig. 6 は BAYTAP-G によってオリジナルデータから分離された，潮汐変動や気圧応答といった各成分の時間変化である．Fig. 6b-f の黒丸および黒線はオリジナルデータ (Fig. 6a) から得られた各成分の分離結果であり，緑丸および緑線は欠測期間に対する各成分の予測値を示している．BAYTAP-G で得られたトレンド成分 (Fig. 6d; 主に G680 重力計の器械ドリフトを反映した成分) に着目すると，元データの存在する期間 (黒線) については電圧値が滑らかに変化していることが分かる．一方で，欠測期間 (緑線) ではトレンド成分の大きな変化が予測されており，例えば $t \sim 55, 210, 240, 330$ day の時刻でステップ的な電圧変化がトレンド成分に含まれている．この原因は，BAYTAP-G では欠測期間が長くなるとステップ変化量 (Fig. 6f) を正しく求めることができないためと考えられる．前節では G680 の器械ドリフトが年周変化していることを指摘したが (Fig. 5c), BAYTAP-G の解析ではトレンド成分の年周性が結果的に不明瞭になっている．

3. G680 の器械ドリフトの長期的傾向

そこで本研究は，ラコスト重力計 G680 の器械ドリフト $y(t)$ が以下の線形および年周期的な関数で表現できるものと仮定する．

$$y(t) = a + b \cdot t + c \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) + d \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$$

このうち， $T=365.0$ day であり， (a, b, c, d) は未知パラメーターである．さらに，本研究は 1 年間の重力連続観測を 9 個の期間 (Fig. 6f の赤色および青色矩形領域；データ欠測期間が 2 日以上継続するたびに期間を分割した) に分け，各期間に対して上式の a が個別の値を有することを認める．その上で，計 12 個の未知パラメーターを最小二乗法によって見積もり，BAYTAP-G のトレンド成分 (Fig. 6d) を上式の年周関数に回帰させた．

Fig. 7a の黒線は BAYTAP-G のトレンド成分を上式に回帰させた結果であり，年間を通して年周期的関数 (緑色太線) によく一致していることが分かる．上式の未知パラメーターのうち，ドリフトの経年変化速度は $b = -53.92 \pm 0.15$ mV/day，余弦成分の振幅は $c = -1230.7 \pm 11.8$ mV，正弦成分の振幅は $d = 2597.8 \pm 9.9$ mV，すなわち年周成分の振幅は $\sqrt{c^2 + d^2} = 2874.6 \pm 14.0$ mV と推定された．つまりこれらの結果は，G680 の器械ドリフトが約 20 V/year の速度で長期的に減少しながら (ピンク色太線)， ± 2.87 V 程度の振幅で年周変化していることを意味する．これらの変動を合成すると，器械ドリフトは 1 月～2 月 ($0 < t < 60$ day) にほぼ平坦となり，7 月～8 月 ($180 < t < 240$ day) に最大の減少速度を取る (緑色太線)．このことは，実際の観測データで見られていた傾向 (Fig. 5c) と一致している．

なお，可搬型相対重力計の器械ドリフトが年周変化するという事実は，村田 (2010) などで既に指摘されている．年周変化の原因については気温変化による説や気圧変化による説などが提案

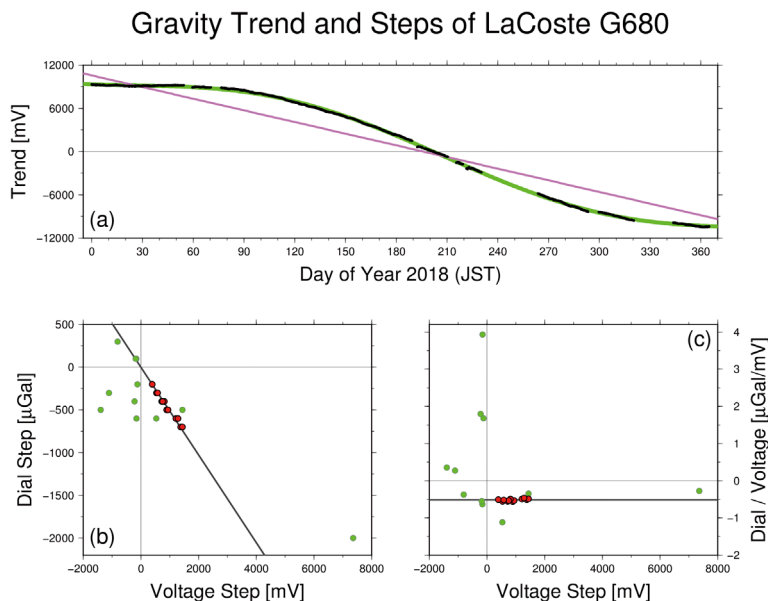


Fig. 7. Gravity trend and steps of the G680 gravimeter. (a) Black lines indicate the trend component of the BAYTAP-G's result (Fig. 6d), which were fitted to the annual function (the green line). A pink line indicates the linear component of the annual gravity change. (b) Circles indicate the step values of voltage and dial. In particular, red circles indicate the values obtained when the dial value was adjusted without significant data missing. A black line indicates the function of $y = -0.5135x$ (see the panel (c)). (c) Circles indicate the response value of dial step to voltage step. In particular, red circles indicate the values obtained when the dial value was adjusted without significant data missing; the response values of the red circles were averaged to be $-0.5135 \pm 0.0295 \mu\text{Gal/mV}$ (the black line).

されているが (村田, 2010), 現時点でその物理メカニズムに関する十分な理解はなされていない。

4. G680 の電圧出力値の感度

ところで, 2018年の1年間にはG680に対して計24回のダイヤル回転作業を実施しており (Fig. 5の赤線), このうち約半数の作業時には数分程度の欠測期間の内にダイヤル回転を済ませている。この際のダイヤル回転量 [μGal] は野帳に記録されており, かつこの時の電圧出力値のステップ変化量 [mV] はBAYTAP-Gによって Fig. 6fの黒線のように得られている。つまり, ダイヤル回転時の回転量と電圧変化量を照合すれば, 電圧変化に対する重力変化の応答量 (すなわち感度) を決定できると期待される。

Fig. 7bはダイヤル回転作業時の電圧変化とダイヤル回転量の対応関係を示している。そもそもG680の場合, 電圧出力値は器械ドリフトに伴って長期的に減少するので (Fig. 7a), それを解消させるためには定期的に電圧出力値に正のステップを与える必要があった。そのためにはダイヤルをマイナス方向に回転させる必要があるため, 結果的に Fig. 7bでは第4象限にプロットされるデータが多くなる。このうち, 欠測期間1時間未満のダイヤル回転作業におけるデータ (計

13 個) を赤丸で示すと、対象データは原点を通る直線上に乗ることが分かる。また、Fig. 7c は縦軸に感度(ダイヤル回転量を電圧変化量で割った値)を取っており、Fig. 7b に赤丸で示したデータは Fig. 7c で傾き 0 の直線上に並ぶ。これらの結果は、G680 重力計の感度が 2018 年の 1 年間を通して一定であったことを示している。

ここで、対象の 13 個のデータ (Fig. 7c の赤丸) から感度の平均値を計算すると、 $-0.5135 \pm 0.0295 \mu\text{Gal}/\text{mV}$ と得られる。このことは、ダイヤル回転作業時の電圧変化—ダイヤル回転量の関係から、G680 の電圧出力感度を 5.7 % の精度で決定することができた、ということの意味している。また、今回得られた感度の平均値を用いると、3.2 節～3.3 節で示した結果は以下のように言い換えることができる。

- ・ G680 で観測された M2 分潮の振幅は $59.54 \mu\text{Gal}$ 、K1 分潮の振幅は $49.53 \mu\text{Gal}$ 、気圧応答は $-0.462 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$ である。
- ・ G680 のドリフトの経年変化速度は $-27.69 \mu\text{Gal}/\text{day}$ 、年周変動の振幅は $1476.1 \mu\text{Gal}$ である。

このうち、潮汐・気圧変動に対する重力応答量については、重力観測点周辺の媒質組成が劇的に変化しない限り、時間的に不変であると期待される。実際、1980 年代～1990 年代には京都大学理学研究科 4 号館 (本稿の G680 と同様、吉田キャンパス北部構内にある) で超伝導重力計による重力連続観測が実施されていた (竹本ほか, 1998)。今後この超伝導重力データに対しても BAYTAP-G による潮汐・気圧応答解析を適用することで、G680 の潮汐・気圧応答の妥当性を検証する予定である。また、本研究では G680 と同地点に D58 重力計 (Fig. 2) を設置しており、しかも D58 は (電圧値ではなく) 相対重力値を直接出力できる重力計である。今後 D58 の重力変化を G680 の電圧変化と直接比較することで、G680 の感度を容易に推定できるものと期待される。

なお、他のラコスト重力計による相対重力連続観測においても、今回と同様に電圧変化—ダイヤル回転量の関係から感度を推定することが可能である。すなわち、本研究の提案する重力連続観測システム (第 2 章) は一般的なラコスト重力計に対しても適用可能であり、「ラコスト重力計を改造することなく」「単純かつ安価なシステムによって」重力値そのものを把握できる、ということの意味している。

5. 2019 年に取得された G680 の重力連続データ

Fig. 8 は 2019 年 3 月 2 日～4 日に取得された電圧値の時間変化である。電圧値は 3 月 2 日の正午頃まで潮汐に伴う滑らかな変動を示したが、根室半島南東沖で 12 時 22 分 (Fig. 8a の赤線) に発生したマグニチュード 6.2 (気象庁暫定値) の地震の震動によって重力計内部のバネが揺らされ、その結果電圧値も 14 時ごろまで振動した。その後の電圧値は地震前と同様に振幅 300 mV 程度の潮汐変動を示したものの、一部の時間帯では潮汐変動に加えて階段状の電圧変化が確認された (青色三角印)。当時の筆者は 3 月 4 日の午前中にこの階段状の電圧変化に気づき、その日の 13 時ごろ (Fig. 8c の緑線) に G680 のバネのトラベルロック (クランプ) を開け閉めしたり、ダイヤル

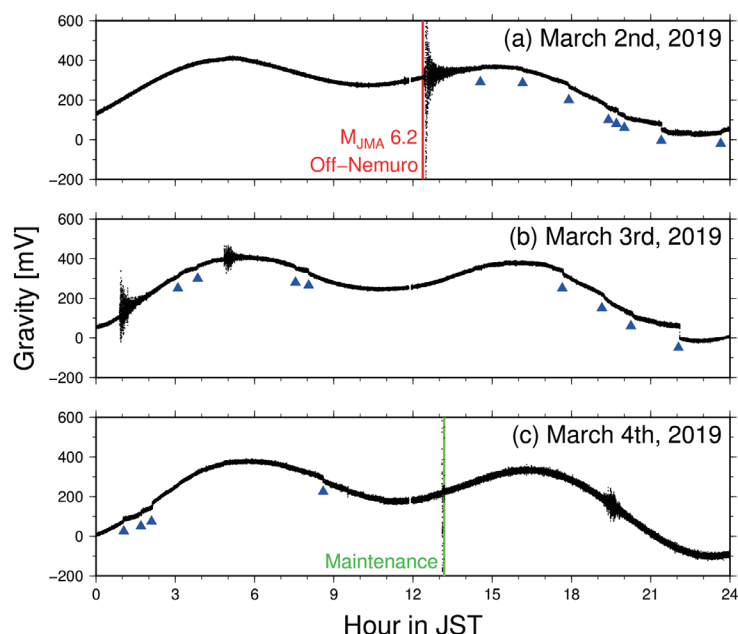


Fig. 8. The continuous gravity change obtained by the G680 gravimeter at Kyoto-A from 2 to 4 March 2019. Red and green lines indicate the times of the Off-Nemuro earthquake (M_{JMA} 6.2) and the G680's maintenance, respectively. Blue triangles indicate the times when voltage steps were observed. (a) 2 March 2019. (b) 3 March 2019. (c) 4 March 2019.

を適当に回転させたりするなどの操作を実施した。その結果、この保守作業の後には階段状の電圧変化は確認されなくなり、電圧値の時系列は地震前と同様の滑らかな潮汐変化を描いた。

以上のことから、3月2日の地震以降3月4日の保守作業時までに確認された階段状の電圧変化は、実際の重力変化によるものではなく、器械内部の不具合による偽の重力変化であると考えられる。このような階段状の偽の重力変化が生じる要因としては、真の重力変化（例えば潮汐変動）に伴ってバネが器械内部で移動する際、重力計内部の何らかの機構でバネが引っかかることによりバネの滑らかな移動が妨げられている可能性が考えられる。また、このような不具合が地震後に励起され、かつ保守作業後に解消する理由は不明である。しかしながら、大きな遠地震が発生するとバネが可動域の端に張り付いて動かなくなる、という事象がG680で観察されることがあり、この事象が上述の不具合を誘発した可能性もある。

G680 重力計に関する上述の不具合がこれ以降も続くようであれば、連続観測で得られる電圧値に偽の変動が含まれる恐れがある。また、野外でのキャンペーン相対重力測定においては、読取値がばらついたり、あるいは読取値を安定的に読み取るまでに通常より長時間を要する可能性がある。このような事態を防ぐため、筆者の研究室では2019年4月にG680をL and R Meter Service社に送り、G680のオーバーホールを依頼した。G680のオーバーホールは2019年5月までに終了し、6月11日より重力連続測定を再開した。それ以降の連続データを見る限り、2019

年3月のような階段状の偽の重力変化は観察されておらず（例えば Fig. 3 のグラフ）、G680 の不具合はオーバーホールによって解決したようである。

このように、本研究は2019年3月にラコスト重力計 G680 の不具合に直面したものの、リードアウト電圧値を連続観測していたおかげでこの不具合に気づくことができ、その後のオーバーホールによってこの不具合を解決するに至った。このことは、ラコスト重力計の電圧連続観測が重力時間変化の監視だけでなく、重力計そのものの健康診断に有効であることを意味している。

V. ま と め

本研究は火山地域における相対重力の連続観測を実現するため、可搬型相対重力計を用いた相対重力連続観測システムを構築した。重力値の出力方式は相対重力計の機種ごとに異なるものの、それぞれの出力データをシリアル信号に一般化することで、ノート PC および Tera Term を用いたデータ収録システムに共通化することができる。収録された重力データは定期的かつ自動的に転送および初期解析がなされ、その結果はグラフ画像としてウェブサーバーにアップロードされる。以上のシステムにより、各地点の重力変化を任意の場所から準リアルタイムで監視することができる。

本研究はこのシステムをラコスト重力計 G680 に適用し、2017 年 9 月以降電圧のリードアウト値（器械中のバネの位置、すなわちその地点の相対重力値を反映）を連続的に収録した。本研究は2018年の1年間に観測された電圧連続データを BAYTAP-G によって処理し、潮汐変動、気圧変動、器械ドリフト、ダイヤル回転に伴うステップ変化などに分離した。このうち、器械ドリフトは経年的に減少しており、かつ年周期的に変化していることが分かった。また、ダイヤル回転量と電圧ステップ変化量を照合することにより、G680 重力計の感度は $-0.5135 \pm 0.0295 \mu\text{Gal}/\text{mV}$ と推定された。そもそもラコスト重力計のリードアウト連続観測では出力値の飽和を防ぐために定期的なダイヤル回転を必要とするが、今回はこのダイヤル回転に関する情報を活用することで感度の推定に成功した。すなわちこの結果は、ラコスト重力計を改造することなく、単純かつ安価なシステムによってラコスト重力計から重力値そのものを把握することができる、ということの意味している。

一方、2019 年 3 月には、真の重力変化や器械保守によるものではない、偽のステップ的な重力変化が収録された。本研究はこの重力変化が G680 重力計の器械不具合を示唆していると考え、2019 年度上期に G680 のオーバーホールを依頼した。その結果、2019 年 6 月以降には偽のステップ的な重力変化が収録されることは無くなった。以上のことから、ラコスト重力計の電圧連続観測は重力時間変化の監視だけでなく、重力計そのものの健康診断に有効であると言える。

今後筆者は本稿の相対重力連続観測システムを火山活動域に適用し、火山活動に伴う重力変化の検出を目指す。具体的には、現在箱根火山と阿蘇火山の山麓に設置されているラコスト重力計（D202 および G1016）を、それぞれ火口近傍（大涌谷および阿蘇中岳第一火口）に移設する予定

である。また、BAYTAP-G による潮汐・気圧・ステップ推定や電圧値→重力値の変換係数の推定を完全自動化することで、潮汐・気圧補正後の重力残差を [μGal] 単位で直接把握し、将来の火山活動に伴う重力変化を容易に監視できるようにする予定である。

謝辞 山本圭吾氏（京都大学防災研究所桜島火山観測所）には、桜島火山の2地点におけるCG-3M 相対重力連続観測にご協力いただいた。また、安部祐希氏（神奈川県温泉地学研究所）および吉川慎氏（京都大学火山研究センター）には、それぞれ箱根火山および阿蘇火山の山麓におけるラコスト相対重力連続観測にご協力いただいた。

文 献

- 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.
- 今西祐一・池田博・村山貴彦・大久保修平, 2018. 小型超伝導重力計 iGrav #028 による霧島火山における重力観測, 日本測地学会第 130 回講演会要旨集, 145-146.
- 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・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*, 61, 593-604, doi: 10.18940/kazan.61.4_593.
- 風間卓仁・吉川慎・長縄和洋・宮内佑介・大倉敬宏・福田洋一, 2019a. 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*, 94, 13-28.
- 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, 2019b. 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*, 62B, 318-324.
- 三浦哲・金悦希・出町知嗣・中尾茂・木村一洋・森田裕一, 2018. 霧島山高千穂河原における重力連続観測, 日本測地学会第 130 回講演会要旨集, 143-144.
- 村田泰章, 2010. シントレックス CG-3M 重力計のドリフトレート of 年周期変動, 日本測地学会第 114 回講演会要旨集, 137-138.
- 志知龍一, 1985. 重力計の原理と特性および調整法, 名古屋大学理学部付属地震予知観測地域センター, 60 pp.
- 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*, B-1, 77-85.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro, 1991. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb05697.x.