HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	LaCoste & Romberg型相対重力計のリードアウト感度設定の標準化（2021年12月）
Author(s)	風間, 卓仁; 大柳, 諒; 山本, 圭吾 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 85, 11-24
Issue Date	2022-03-26
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.85.11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/84679
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_85_p11-24.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 85, March 2022, pp. 11 － 24
doi : 10. 14943 / gbhu. 85. 11

論説

LaCoste & Romberg 型相対重力計のリードアウト感度設定の標準化（2021 年 12 月）

風間卓仁[1]・大柳　諒[1]・山本圭吾[2]・岡田和見[3]・大島弘光[3]

[1] 京都大学大学院理学研究科

[2] 京都大学防災研究所火山活動研究センター

[3] 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

（2022 年 2 月 1 日受理）

Standardization of readout sensitivity of LaCoste & Romberg relative gravimeters in December 2021

Takahito Kazama[1], Ryo Oyanagi[1], Keigo Yamamoto[2], Kazumi Okada[3], Hiromitsu Oshima[3]

[1]Graduate School of Science, Kyoto University

[2]Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

[3]Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

（Received February 1, 2022）

We calibrated five LaCoste & Romberg relative gravimeters（serial numbers: G031, G534, G605, G680 and G791）belonging to Kyoto and Hokkaido Universities in December 2021, in order to standardize readout sensitivity of these gravimeters. The readout sensitivity can be calibrated by adjusting the offset angle for long level and turning the SENS screw on the upper surface of each gravimeter. When a galvanometer is connected to the readout socket on the right surface of each gravimeter, the resistance value of a low-pass filter circuit in the galvanometer also contributes to determining the current output sensitivity. As at October-November 2021, the current and voltage sensitivity values of the five gravimeters had been scattered in the range of 0.0526-0.0873 μA/μGal and 0.464-3.560 V/mGal, respectively. We therefore reduced the individual differences of the sensitivity values during the calibration in December 2021, and the current/voltage sensitivity values were standardized to be 0.0631-0.0664 μA/μGal and 2.689-2.953 V/mGal, respectively. Because the sensitivity variation to long level tilt was set to be as small as 2 μGal/sec, it is expected that any of the gravimeters can obtain stable gravity data during both continuous and campaign gravity measurements. We will use these gravimeters with the present status of readout sensitivity, to verify long-term stabilities associated with readout sensitivity and instrumental drift, and response characteristics to environmental disturbances such as microseism and teleseismic waves.

CC BY-NC
この論文はクリエイティブ・コモンズ 表示－非営利 4.0 国際ライセンスの下に提供されています．なお，抄録はクリエイティブコモンズの定めるCC0（パブリック・ドメイン提供）とします．

Ⅰ．は　じ　め　に

重力観測は火山内部の質量変動を把握するのに有効な方法の１つである．例えば鹿児島県に位置する桜島火山では，1975 年以降可搬型バネ式の相対重力計によって相対重力のキャンペーン観測が繰り返し実施され，桜島直下における経年的な質量増加が指摘されてきた（石原ほか，1986）．また，桜島南部の有村観測坑道局舎では 2008 年以降絶対重力や相対重力の連続観測が実施され，2015 年 8 月 15 日のダイク貫入イベント時には地面隆起などに伴う約 6 μGal の重力減少が観測された（風間ほか，2016）．

2022 年現在，火山地域において広く利用されている重力計は LaCoste ＆ Romberg 型相対重力計（ラコスト重力計）である．ラコスト重力計はその内部にバネを有しており，バネ長の変化を測定することで任意の 2 点間の重力差を知ることができる．このような重力測定を複数の重力点で繰り返し実施すれば，火山周辺における重力の時空間的な変化を把握できる（e.g.，風間ほか，2021）．また，ラコスト重力計には電圧値ないし電流値をモニターできるソケット（リードアウト）が付属していて，ここに任意の電圧ロガーを接続することでバネ位置の時間変化，すなわち重力時間変化を連続的に記録することができる．これにより，従来のキャンペーン相対重力測定では把握しきれなかった，より短い時定数の重力時間変化を検出できると期待される（風間，2020）．

一方，ラコスト重力計はバネの吊り方に斜め吊りを採用するなど，複雑な内部構造を有していることが知られている（e.g.，坪川，2005）．特に，リードアウトの出力感度（単位重力変化に対する電圧値ないし電流値の変化量）は後述の通り 3 つの機構によって決定されており，各ラコスト重力計に異なる感度検定法を適用すると各重力計の出力感度に個体差が生じうる．このことは，連続観測用のラコスト重力計の感度が低く設定されていた場合，火山活動に伴う重力変化の検出分解能が低下することを意味する．また，キャンペーン観測用のラコスト重力計の感度を高めに設定した場合には，屋外測定における地面振動への応答が大きくなる影響で安定的な重力測定が困難になる．以上のことから，ラコスト重力計を様々な用途で使用するためには，統一的な感度検定法によって適切な出力感度が設定されるべきである．

そこで，我々は桜島火山にて従来から使用されている 5 台のラコスト重力計について，リードアウト感度の設定状況を把握し，かつ感度検定を実施することで各重力計の感度を標準化した．本稿においては，まずラコスト重力計の原理と感度調整方法について述べ，2021 年 10 月時点における各重力計の感度の調査結果を示す．さらに，2021 年 12 月に実施した感度検定の方法や結果を詳述し，感度検定の前後において重力連続データの傾向にどのような変化が生じたかを解説する．

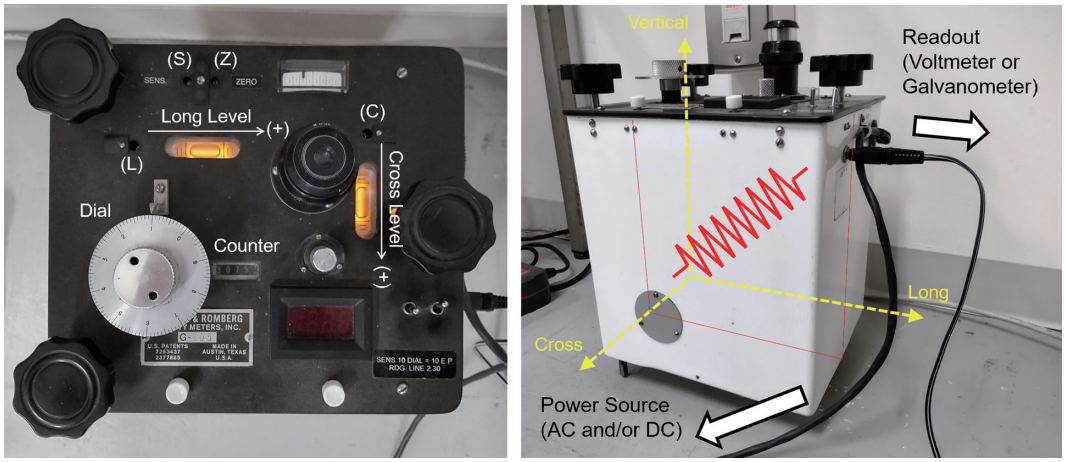


Fig. 1. Photographs of the LaCoste & Romberg's G605 gravimeter.

Ⅱ．ラコスト重力計の原理と感度調整

ラコスト重力計の上面および側面の写真を Fig. 1 に示す．ラコスト重力計は零位法を採用している重力計であり，キャンペーン観測においては以下の流れによって任意の 2 点間の重力差を測定できる．まず，重力点上に重力計を置き，2 方向のレベルの気泡を中心に合わせる．次に，リードアウトに検流計を接続し，検流計の電流値が 0 μA を示すまでダイヤルを回転させる．電流値が 0 μA を示したら，ダイヤルとカウンターに表示されている値を読取値として記録する．その後，別の重力点でも同様の操作を行い，種々の解析作業（読取値→重力値への変換，潮汐・器械高・器械ドリフト効果の補正など）を経て重力差を算出する．

ただし，器械の垂直方向が重力の鉛直方向と異なっている場合，重力計の読取値は真の重力値よりも小さくなり，正確な重力測定が困難になる．このような事態を避けるため，各レベルの気泡が中心に位置するときに読取値が最大となるよう，現場測定前に重力計を検定しておく必要がある（e.g., 渡邉，2017）．筆頭著者（風間）が所属する京都大学測地学研究室においては，以下の方法によってラコスト重力計を事前に検定している．なお，重力計を sec 単位で傾斜させる際には真鍮製の可搬型検定台を用いており，この検定台は渡邉（2017）の設計図に基づいて作成されたものである．

［1］Cross レベルの調整：傾斜角 ± 50 sec の範囲内で cross 方向に重力計を傾け，傾斜角と読取値の関係を記録する．読取値が最大となる傾斜角が cross レベルの中心から外れている場合，読取値最大の場所に cross レベルの気泡を合わせる．気泡位置の調整には cross レベル付属の六角ねじ（Fig. 1 の C）を回転させる．

［2］Reading line の調整：傾斜角 ± 30 sec の範囲内で long 方向に重力計を傾け，傾斜角と読取値の関係を記録する．読取値が最大となる傾斜角が long レベルの中心から外れている場合，

マイナスドライバーで ZERO ねじ（Fig. 1 の Z）を回転させて reading line を調整する．その後同様の操作を繰り返し，long レベルの気泡が中心に位置するときに読取値が最大になるように設定する．

［3］電流出力感度の確認：2 方向のレベルを中心に合わせ，検流計が −10 μA および +10 μA を示すときの読取値を記録する．その上で，読取値の差 Δg と電流値の差 Δi（= 20 μA）からリードアウトの電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ を算出する．

上述の通り，本研究室では現場測定前の検定において電流出力感度 S_i を確認するに留めており，毎回の検定時に S_i を調整することは実施していない．これは，cross レベルや reading line に比べて S_i の経時的な変化率が小さい，ということが経験的に分かっているためである．しかしながら，S_i の設定値が不適切な場合には，（S_i が大きすぎる場合）地面振動の影響で安定的な読取ができなかったり，（S_i が小さすぎる場合）読取値の分解能が下がったりするなどの問題が生じる．そのため，cross レベルや reading line だけでなく，感度 S_i についてもやはり定期的な検定が不可欠である．そもそも，ラコスト重力計の出力感度 S_i は，以下のような 3 つの機構の掛け合わせによって決定される．

① オフセット角の調整：ラコスト重力計のバネは long 方向に斜めに吊られており（Fig. 1），long 方向の傾斜角によって感度 S_i が変化する．Long レベルの気泡を大きく左方向に動かすと $S_i \to \infty$ となる場所（無定位点）が存在し，この付近では安定的な重力測定が不可能になる．Long レベルの気泡を無定位点から右方向に動かすと S_i は反比例的に小さくなる．なお，無定位点を基準とした long レベルの傾斜角はオフセット角と呼ばれ，本稿では $\Delta\theta$ と表現する．

② SENS ねじの調整：ラコスト重力計の上面には SENS と書かれたねじ（Fig. 1 の S）が存在し，このねじをマイナスドライバーで回転させることでリードアウトの出力感度 S_i を調整できる．

③ 検流計 RC 回路の抵抗値の調整：各重力計にはリードアウト出力を確認するための検流計が付属しており，一般に重力計と検流計のペアは固定化されている．各検流計には抵抗器とコンデンサで構成された RC 回路（ローパスフィルター）が接続されており，地面振動に伴うバネの小刻みな揺れを検流計上で低減させている．RC 回路内の抵抗器はダイヤル回転量に対する検流計の針の移動量（すなわち感度 S_i）を決定する役割も担っており，抵抗値を大きくすると S_i は小さくなる．

一般に①のオフセット角 $\Delta\theta$ は 100 sec 前後に設定されることが多いものの，②や③の設定状況が各重力計で異なるため，感度 S_i も重力計ごとに異なっている．また，各ラコスト重力計はある特定の 1 人の測定者が測定や検定を担当してきたという歴史的経緯が存在するため，各重力計の感度は各測定者が現場で測定しやすい感度に設定されている．例えば，京都大学測地学研究室の所有するラコスト重力計は，$S_i = \Delta i/\Delta g$ を 20/300 = 0.0667 μA/μGal 程度に設定されている．一方，京都大学桜島火山観測所では感度を高めに（20/200 = 0.1000 μA/μGal 程度），北海道大学地震火山研究観測センターでは感度を低めに（20/400 = 0.0500 μA/μGal 程度）設定している．

Ⅲ．2021 年 10 月時点のラコスト重力計の感度

我々は 2021 年 10 月 23 日～31 日の桜島火山における相対重力集中観測の折に，5 台のラコスト重力計について cross レベルと reading line の検定，およびリードアウトの感度調査を実施した．対象とするラコスト重力計は，京都大学測地学研究室の G534 と G680，京都大学桜島火山観測所の G605，北海道大学地震火山研究観測センターの G031 と G791 である．具体的には，まず各重力計について cross レベルと reading line の検定（前章の［1］および［2］）を通常通り実施した．次に，前章［3］の方法によって，long レベルの気泡が中心に位置する（θ = 0 sec）ときの読取値変化量 Δg と電流出力感度 S_i = $\Delta i/\Delta g$ を記録した（ただし Δi = 20 μA）．さらに，重力計を long 方向に −50 ≤ θ ≤ +100 sec の範囲内で傾斜させ，器械傾斜量が θ の時の読取値変化量 Δg と電流出力感度 S_i を記録した．

Fig. 2 の青色星印は，各重力計の long レベル気泡を中心（θ = 0 sec）に合わせ，かつ検流計

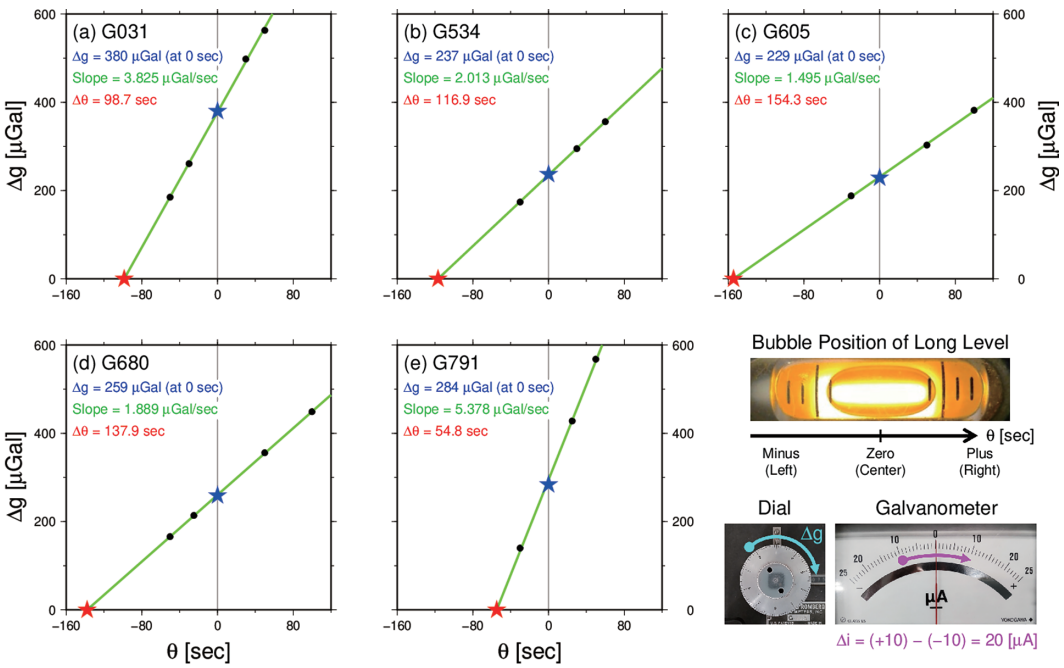


Fig. 2. The variation in reading value, Δg [μGal], corresponding to the variation in current output, Δi = 20 μA. In each panel, a blue star indicates the Δg's value when the long level is located at θ = 0 sec. Black circles indicate the Δg's values when the long level is located at any tilt value, θ [sec]. A green line indicates the regressing line to the blue star and black circles. A red star indicates the intersecting point between the regression line and the horizontal axis; the distance from the origin point to the red star corresponds to the offset angle, $\Delta\theta$ [sec]. (a) The G031 gravimeter. (b) The G534 gravimeter. (c) The G605 gravimeter. (d) The G680 gravimeter. (e) The G791 gravimeter.

の電流変化幅が Δi = 20 μA となるときの読取値変化量 Δg である．θ = 0 sec における各重力計の Δg は 200 ～ 400 μGal の範囲内にあり，桜島火山観測所所有の G605 重力計で最も小さく（229 μGal），北海道大学所有の G031 重力計で最も大きくなっている（380 μGal）．これは，桜島火山観測所で重力計の感度を高めに，および北海道大学で重力計の感度を低めに設定していることに対応している（前章の最終段落を参照）．なお，θ = 0 sec における各重力計の電流出力感度は $S_i = \Delta i/\Delta g$ で計算でき，それぞれ以下の値を取っている．G031：0.0526, G534：0.0844, G605：0.0873, G680：0.0772, G791：0.0704［μA/μGal］.

Fig. 2 の黒色丸印は，long レベルの傾斜角が任意の角度 θ の場合，検流計の電流変化幅が Δi = 20 μA となるときの読取値変化量 Δg である．どの重力計においても，Δg は θ の増加に伴って大きくなっていて，かつ両者の変化には線形性が存在することが分かる．これは，long レベルの気泡を右に動かすにつれて感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ が反比例的に小さくなることを反映している．ここで，各重力計の（θ,Δg）のデータセット（黒色丸印および青色星印）に直線を回帰させると，この回帰直線は緑線のように求められる．各重力計における回帰直線の傾きは 1.4 ～ 5.3 μGal/sec の範囲内にあり，特に北海道大学所有の G791 重力計で傾きが最も大きくなっている．このことは，G791 をキャンペーン観測や連続観測に用いた場合，器械が long 方向にわずかに傾いた場合でも感度が大きく変化することを意味している．

Fig. 2 の赤色星印は緑色の回帰直線が X 軸と交差する地点であり，$\Delta g \rightarrow 0$ μGal すなわち $S_i \rightarrow \infty$ となる無定位点の場所を示している．また，無定位点から θ = 0 sec までの傾斜量はオフセット角 $\Delta\theta$ そのものであり，2021 年 10 月時点で各重力計のオフセット角 $\Delta\theta$ がどのように設定されていたかを意味している．各重力計の $\Delta\theta$ は 54 ～ 154 sec の範囲内にあり，一般的に推奨されているオフセット角（= 100 sec）の周辺に設定されていることが分かる．しかしながら，G791 重力計のオフセット角は 5 台の重力計の中で最も小さく（54.8 sec），一般的なオフセット角の半分程度となっている．これは long レベルの気泡が少しでも左に移動すると G791 重力計が無定位付近の高感度状態になり，地面振動などに起因する小さな重力擾乱に対して検流計の針が大きく揺れ動いてしまうことを示唆している．G791 については θ の変化に対する Δg の変化の傾きが大きいことも分かっており（前段落参照），long レベルの傾斜変化に対して重力計の特性が大きく変化するような状態に陥っている．この状態を改善するためには，オフセット角 $\Delta\theta$ をより大きく，かつ θ に対する Δg 変化の傾きをより小さくするよう，G791 重力計を検定する必要がある．

Ⅳ．検流計の感度

前章で示した各ラコスト重力計の感度は，第 2 章で示した 3 つの効果（①～③）の掛け合わせによって決定されている．すなわち，「①～③のどの効果が各重力計の感度決定に大きく寄与しているのか」という点について，前章の結果のみから判断することは難しい．そもそも，①（オ

フセット角）と②（SENS ねじ）の寄与は重力計内部の設定によって，③（検流計抵抗）は重力計外部の寄与によって感度が決定されることを意味する．このうち，③については重力計と検流計の組み合わせを替えることでその寄与を定量化することができるので，その結果①〜③の効果の大小関係を判断できると期待される．

そこで，我々は 2021 年 10 月の桜島重力集中観測の折にラコスト重力計と検流計の組み合わせを変更し，各組合せにおける電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ を調査した．具体的には，各重力計の 2 方向のレベルを中心に合わせ，この重力計に任意の検流計を接続した．その後，検流計の電流値が Δi(= 20 μA) 変化するときの読取値変化量 Δg を測定し，感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ を算出した．以上の操作を全ての検流計に対して実施し，各検流計の感度の違いを比較した．この実験に使用した重力計は，前章と同じ 5 台のラコスト重力計（G031，G534，G605，G680，G791）である．また，検流計については各重力計に付属する 5 台の検流計に加え，北海道大学が所有する G375 重力計の検流計を本実験に使用した．これにより，重力計と検流計の組み合わせは 5×6 = 30 通りとなる．

Table 1 の上段は，各重力計（左側に記載）と各検流計（上側に記載）の組み合わせに対する電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ を示している．このうち，赤字で示されている値は，重力計―検流計の本来の組み合わせによって得られた感度の値を意味している．まず，G031 重力計および G031 用検流計の結果以外に注目すると，感度 S_i は重力計と検流計の組み合わせに関わらず 0.08 μA/μGal 前後の値を取っている．これは，G031 用検流計以外の検流計（G375 用，G534 用，G605 用，G680 用，G791 用）が同程度の感度を有していることを意味している．一方，G031 重力計に G031 用検流計を接続した場合の感度は 0.0422 μA/μGal であり，他の重力計に比べて半分程度となっている．これは G031 重力計の感度が低めに設定されているためであり，θ = 0 sec におけ

Table 1. The upper table shows the current sensitivity value, S_i [μA/μGal], for any combination of gravimeter and galvanometer. The lower table shows the ratio values of current sensitivity to that for the regular gravimeter-galvanometer combination. The red numbers in these tables indicate the sensitivity and ratio values for the regular gravimeter-galvanometer combinations.

S_i [μA/μGal]		Galvanometer					
		G031	G375	G534	G605	G680	G791
Gravimeter	G031	0.0422	0.0105	0.0104	0.0102	0.0102	0.0104
	G534	0.3559	0.0820	0.0816	0.0781	0.0781	0.0837
	G605	0.3935	0.0889	0.0943	0.0873	0.0873	0.0930
	G680	0.3483	0.0722	0.0772	0.0722	0.0772	0.0837
	G791	0.2833	0.0746	0.0719	0.0699	0.0699	0.0704

Ratio		Galvanometer					
		G031	G375	G534	G605	G680	G791
Gravimeter	G031	1.00	0.25	0.25	0.24	0.24	0.25
	G534	4.36	1.00	1.00	0.96	0.96	1.03
	G605	4.51	1.02	1.08	1.00	1.00	1.06
	G680	4.51	0.94	1.00	0.94	1.00	1.08
	G791	4.02	1.06	1.02	0.99	0.99	1.00

る読取値変化量 Δg が大きいこと（Fig. 2 の青色星印）と対応している．

ここで，G031 重力計に他の重力計用の検流計を接続した場合に着目すると，このときの感度は約 0.01 μA/μGal であり，G031 用検流計に比べて 1/4 程度になっている．また，G031 用検流計を G031 以外の重力計に接続すると，感度は 0.30 μA/μGal 前後の値を取り，本来の重力計―検流計の組み合わせに比べて 4 倍程度になっている．これらの結果は，G031 用検流計の感度が他の検流計に比べて 4 倍程度に高く設定されていることを意味している．なお，Table 1 の下段は本来の重力計―検流計の組み合わせにおける感度を 1.00 に規格化したときの，他の重力計―検流計の組み合わせにおける感度の比率を示している．この表からも，G031 用検流計の感度が 4 倍程度高めに設定されていることが読み取れる．

そもそも，電流出力感度 S_i は第 2 章で示した 3 つの効果（①～③）の掛け合わせで決定されているが, G031 重力計の S_i は（本章の第 3 段落で言及した通り）他の重力計の 1/2 程度であった．また，重力計と検流計の組み合わせを替えることで検流計自身の感度寄与（効果③）を分離することができ，この実験によると（前段落で言及した通り）G031 用検流計の感度は他の検流計の 4 倍程度であった．これらのことから，G031 重力計の器械自身の感度（効果①および②）は他の重力計の 1/8 程度に低く設定されていると言える．G031 重力計の器械感度が低く設定されている理由は不明であるが，少なくとも 2012 年実施のオーバーホール以降は器械感度が低めだったことが分かっており，重力計保守業者のオーバーホール作業の一環で器械感度が低めに設定された可能性がある．また, G031 用検流計の感度が他の検流計の 4 倍程度に高いのは, このオーバーホール後にリードアウト感度 S_i を上げる目的で RC 回路の抵抗を低いものに付け替えたためと考えられる．

Ⅴ．2021 年 12 月におけるラコスト重力計の感度検定

第 3 章～第 4 章で示した通り，long レベル傾斜量 $\theta = 0$ sec における各ラコスト重力計の電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ は，2021 年 10 月時点で約 2 倍のファクターの範囲内で一致していることが確認された（Fig. 2 および Table 1 上段）．しかしながら，G031 と G791 の 2 台の重力計は他の重力計と異なる感度設定が適用されていることが分かった．具体的には，G791 重力計についてはオフセット角 $\Delta\theta$ が小さく，傾斜変化に対する感度変化の傾きが大きくなっていた（Fig. 2e）．また，G031 重力計については器械感度が他の重力計の 1/8 程度，検流計の感度が他の重力計の 4 倍程度に設定されていた（Table 1）．重力計の感度設定にこのような個体差が存在すると，火山活動起源の重力変化に対する分解能が各重力計で異なってきたり，器械傾斜変化や地面振動に対する安定性が特定の重力計だけで低下したりする恐れがある．今後の現場測定や連続観測に備えて全ての重力計の感度設定を統一しておけば，感度の違いに起因する上記の問題点を解消できると期待される．さらに，全ての重力計の感度設定が同じであれば普段の検定作業（第 2 章の [1] ～ [3]）における重力計ごとの固有の作業が不要になるので，感度設定の標準化は今後の重力計

の運用面においても有益であると考えられる．

そこで，我々は 2021 年 12 月 2 日～4 日に 5 台のラコスト重力計を検定し，全ての重力計の感度設定をできる限り統一させた．この際，long レベル傾斜量 θ = 0 sec における電流出力感度（Fig. 2 の青色星印を参照）は，京都大学測地学研究室の普段の感度設定に合わせて $S_i = \Delta i/\Delta g$ = 20/300 = 0.0667［μA/μGal］付近に設定した．また，傾斜変化に対する感度変化（Fig. 2 の緑線を参照）はできるだけ緩やかな方が安定的な重力測定を実現できるので，今回は京都大学測地学研究室所有の G534 重力計にならい，感度／傾斜の傾きを 2.0 μGal/sec 付近に設定することとした．これにより，感度無限大の傾斜角，すなわちオフセット角（Fig. 2 の赤色星印を参照）は $\Delta\theta$ = 300/2 = 150［sec］程度となる．今回実施した検定の具体的な工程は以下の通りであり，普段の検定（第 2 章の［1］～［3］）にいくつかの作業を加えることで各重力計の感度を調整した．

［1］Cross レベルの調整：傾斜角 ± 50 sec の範囲内で cross 方向に重力計を傾け，傾斜角と読取値の関係を記録する．読取値が最大となる傾斜角が cross レベルの中心から外れている場合，読取値最大の場所に cross レベルの気泡を合わせる．気泡位置の調整には cross レベル付属の六角ねじ（Fig. 1 の C）を回転させる．

［2］Long レベルの調整：重力計を long 方向に $-30 \le \theta \le +100$ sec の範囲内で傾斜させ，器械傾斜量 θ における読取値変化量 Δg を記録する．その後，(θ,Δg) の散布図に直線を回帰させ，この直線と X 軸の交差地点，すなわちオフセット角 $\Delta\theta$ を算出する．$\Delta\theta$ が 150 sec から外れている場合，$\Delta\theta$ = 150 sec の状態で long レベル気泡が中心に位置するよう，long レベル付属の六角ねじ（Fig. 1 の L）を調整する．

［3］Reading line の調整：傾斜角 ± 30 sec の範囲内で long 方向に重力計を傾け，傾斜角と読取値の関係を記録する．読取値が最大となる傾斜角が long レベルの中心から外れている場合，マイナスドライバーで ZERO ねじ（Fig. 1 の Z）を回転させて reading line を調整する．その後同様の操作を繰り返し，long レベルの気泡が中心に位置するときに読取値が最大になるように設定する．

［4］SENS ねじの調整：重力計に G534 用検流計を接続し，2 方向のレベルを中心に合わせる．その上で，検流計が −10 μA および +10 μA を示すときの読取値を記録し，電流値変化量 Δi(= 20 μA）に対する読取値変化量 Δg を算出する．Δg が 300 μGal から大きく外れている場合，マイナスドライバーで SENS ねじ（Fig. 1 の S）を回転させることでリードアウト感度を調整する．その後同様の操作を繰り返し，読取値変化量が Δg = 300 μGal 付近に，すなわち感度が $S_i = \Delta i/\Delta g$ = 20/300 = 0.0667 μA/μGal 付近に位置するように設定する．なお，各検流計の感度（第 2 章の効果③）の違いが各重力計の感度調整に影響を与えることのないよう，本作業では全ての重力計に対して G534 用検流計を統一的に用いる．

Table 2 は本検定後における各重力計の設定状況を意味しており，上段から順にオフセット角 $\Delta\theta$，long レベル中心における読取値変化量 $\Delta g(\theta = 0)$，散布図 (θ,Δg) における回帰直線の傾き，読取値変化量 $\Delta g(\theta = 0)$ に対応する電流変化量 Δi，および θ = 0 sec における電流出力感度

Table 2. The setting status of the LaCoste & Romberg gravimeters, after the calibration performed on 2-4 December 2021.

Gravimeter		G031	G534	G605	G680	G791
$\Delta\theta$	[sec]	110.7	150.0	150.0	150.0	150.0
$\Delta g(\theta = 0)$	[μGal]	310	305	305	301	317
Slope	[μGal/sec]	2.800	2.033	2.033	2.007	2.113
Δi	[μA]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
$S_i = \Delta i/\Delta g$	[μA/μGal]	0.0645	0.0656	0.0656	0.0664	0.0631

$S_i = \Delta i/\Delta g$ を示している．各重力計の読取値変化量 $\Delta g(\theta = 0)$ は 301 ～ 317 μGal の範囲内，感度 S_i は 0.0631 ～ 0.0664 μA/μGal の範囲内にあり，それぞれ当初予定していた値（300 μGal および 0.06666… μA/μGal）にほぼ一致させることができた．また，G534・G605・G680・G791 の 4 台の重力計についてはオフセット角 $\Delta\theta$ を 150.0 sec に調整し，その結果散布図（θ,Δg）の傾きを当初の予定値である 2.0 μGal/sec 付近に設定することに成功した．

一方，G031 重力計のオフセット角 $\Delta\theta$ は 110.7 sec，散布図（θ,Δg）の傾きは 2.8 μGal/sec となり，他の重力計と異なる値となった．これは上記 [4] の作業で G031 重力計本体の出力感度を高める際，S_i = 0.06666… μA/μGal となる位置が SENS ねじの回転可能範囲を超えていたためである．G031 重力計の SENS ねじ可動範囲が他の重力計と異なっている理由は不明であるが，シリアル番号からも分かる通り G031 重力計は 5 台の重力計の中で最も古いので，G031 重力計の内部構造が 500 番台以降の重力計と異なっている可能性が考えられる．そこで，今回の検定においては G031 重力計に対してのみ [2] ～ [4] の作業を繰り返し，他の重力計よりオフセット角 $\Delta\theta$ を小さく取ることで他の重力計と同等の感度 S_i(= 0.0645 μA/μGal) を実現させた．この感度設定の影響により，G031 重力計の long レベル傾斜変化に対する感度変化量（Table 2 の Slope）は他の重力計の約 1.4 倍になっており，わずかな傾斜変化に対しても出力感度が変化しうる状態になっている．そのため，G031 重力計で野外観測や連続観測を行う際には，他の重力計を扱うとき以上に long レベル気泡位置を常に中心（$\theta = 0$ sec）に合わせておくよう配慮する必要がある．

Ⅵ．感度検定前後におけるラコスト重力計の潮汐重力変化

第 1 章で述べた通り，ラコスト重力計のリードアウト機構は重力連続観測にも利用可能である．具体的には，リードアウトに任意の電圧ロガーを接続すれば，重力計内部のバネの位置（すなわち重力時間変化）を電圧変化として記録することができる（e.g.，風間，2020）．ところで，本稿ではこれまでリードアウトに検流計を接続し，各重力計の電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ を確認・調整してきた．ラコスト重力計の出力感度は 3 つの効果（第 2 章の①～③）の掛け合わせによって決定されているが，このうち①と②では重力計本体自身の調整によって感度を決定することができる．すなわち，ラコスト重力計本体の感度検定によって，電流出力感度 S_i だけでなく電圧出

力感度（S_v と記述する）も変化するものと考えられる．

そこで，我々は 5 台のラコスト重力計について潮汐重力変化 $g(t)$ に伴うリードアウト電圧の時間変化 $V(t)$ を連続的に観測し，感度検定の実施前後で電圧出力感度 $S_v = \Delta V/\Delta g$ がどのように変化するかを調査した．リードアウト電圧の連続観測は京都大学理学部 1 号館地下の重力測定室（京都 A）において実施し，桜島重力集中観測直後の 2021 年 11 月 2 日より開始した．電圧値 $V(t)$ の収録には，G031 および G791 重力計についてはグラフテック社製の GL820 を，G534, G605, G680 重力計についてはヒューマンデータ社製の USB-045V を使用した．電圧収録の時間間隔については多くの重力計で 1 秒間隔としたが，G605 重力計のみ収録環境の都合上 10 秒間隔とした．このほか，我々は潮汐重力変化 $g(t)$ を直接的に観測するため，D058 相対重力計を同じ部屋に設置して出力データを連続的に収録した．この重力計は通常のラコスト重力計をフィードバック式に改造したものであり，相対重力値・器械傾斜量・内部温度・バッテリー電圧を Bluetooth 規格のシリアル通信によって 2 Hz 頻度で出力する（風間 , 2020；Fukuda et al., 2021）．

Fig. 3 は感度検定前後の潮汐重力変化を示しており，左側は検定前の 2021 年 11 月 21 日～ 22 日，右側は検定後の 2021 年 12 月 7 日～ 8 日における重力変化である．各観測期間の月齢はそれぞれ 16.2 ～ 17.2 および 2.8 ～ 3.8 であり，両期間とも大潮の時期に当たっている．そのため，D058 重力計で観測された潮汐重力変化（Fig. 3 の赤色曲線）は両期間とも大きく，その振幅 Δg は peak-to-peak で 254 および 285 μGal となっている．

Fig. 3 の左下は感度検定前（2021 年 11 月 21 日～ 22 日）に観測された各ラコスト重力計のリードアウト電圧 $V(t)$ であり，縦軸の表示単位は G031 重力計（水色で表示）のみ［×0.1 V］，他の重力計（黒色で表示）は［V］である．表示単位からも分かる通り，G031 重力計の電圧出力は他の重力計よりも 1 桁程度小さくなっている．ここで，我々は D058 重力計の重力変化 $g(t)$ と各ラコスト重力計の電圧変化 $V(t)$ の散布図に直線を回帰させ，この回帰直線の傾きから各重力計の電圧出力感度 $S_v = \partial V/\partial g$ を推定した．その結果，G031 を除く 4 台の重力計の電圧出力感度は 3.0 V/mGal 程度であるのに対し，G031 重力計の電圧出力感度は 0.46 V/mGal であることが分かった．すなわち，G031 重力計本体の電圧出力は他の重力計の約 15 % となっており，このことは G031 重力計本体の電流出力が他の重力計の約 1/8 倍に設定されていたこと（第 4 章参照）と調和的である．

一方，Fig. 3 の右下は感度検定後（2021 年 12 月 7 日～ 8 日）に観測された各ラコスト重力計のリードアウト電圧 $V(t)$ であり，縦軸の表示単位は全重力計共通で［V］である．なお，検定後の $V(t)$ は検定前よりも太く描画されているが，これは冬型の気圧配置が強まった影響で脈動の影響が大きくなったためである．各重力計の電圧出力感度 $S_v = \partial V/\partial g$ は 2.6 ～ 3.0 V/mGal の範囲内にあり，検定前の感度範囲（0.4 ～ 3.6 V/mGal；G031 重力計を除外したとしても 2.7 ～ 3.6 V/mGal）に比べて全ての重力計の電圧出力感度がよく一致していることが分かる．これは 2021 年 12 月 2 日～ 4 日に実施した電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ の標準化により，電圧出力感度 $S_v = \partial V/\partial g$ も全ての重力計でほぼ統一できたことを意味している．

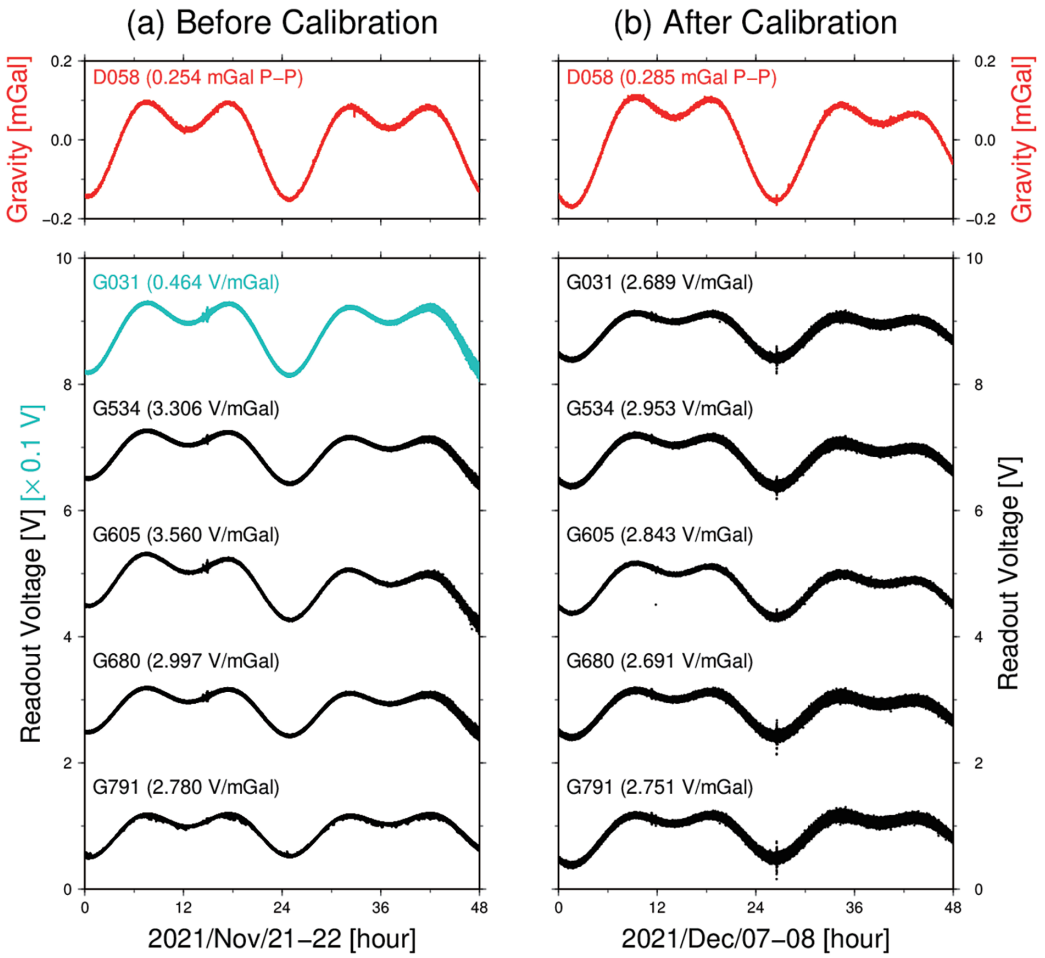


Fig. 3. The time variation in readout voltage due to tidal gravity change. The left panel (a) shows the tidal time series on 21–22 November 2021, before the calibration performed on 2–4 December 2021. The right panel (b) shows the tidal time series on 7–8 December 2021, after the calibration performed on 2–4 December 2021. The upper panels indicate the tidal gravity changes observed by the D058's feedback-type relative gravimeter. The lower panels indicate the time variations in readout voltage values observed by five LaCoste & Romberg gravimeters.

Ⅶ. ま と め

我々は京都大学および北海道大学が所有する 5 台のラコスト型相対重力計（G031, G534, G605, G680, G791）について，2021 年 10 月～ 11 月にリードアウト出力感度を調査した．各重力計とペアになっている検流計を各重力計のリードアウトに接続したところ，電流変化 Δi = 20 μA に対する読取値変化量 Δg は 229 ～ 380 μGal，電流出力感度 S_i = $\Delta i/\Delta g$ は 0.0526 ～ 0.0873

μA/μGal と得られた．また，リードアウトに電圧ロガーを接続して潮汐重力変化を 2 日間連続観測した結果，各重力計の電圧出力感度 $S_v = \partial V/\partial g$ は 0.464 ～ 3.560 V/mGal と得られた．特に，G031 重力計の電流および電圧出力感度（S_i および S_v）は，それぞれ他の重力計の約 1/2 倍および約 1/8 倍であることが分かった．これは G031 重力計の本体感度が他の重力計の 1/8 倍程度に，および G031 用検流計の感度が他の検流計の 4 倍程度に設定されていることを意味する．一方，G791 重力計の long レベル傾斜量 θ に対する読取値 Δg の変化速度 $d(\Delta g)/d\theta$ は他の重力計よりも数倍大きく，無定位点までのオフセット角 $\Delta\theta$ は他の重力計よりも 1/2 ～ 1/3 倍程度に小さいことが分かった．このことは，long レベルのわずかな傾斜変化に対して出力感度が劇的に変化することを意味しており，野外観測などにおいて G791 重力計が不安定な状態に陥りやすいことを示唆している．

次に，我々は 2021 年 12 月 2 日～ 4 日に 5 台の相対重力計を検定し，リードアウト出力感度の設定をできる限り標準化した．この感度検定の結果，電流変化 $\Delta i = 20$ μA（G534 用検流計を用いた場合）に対する読取値変化量 Δg は 301 ～ 317 μGal，電流出力感度 $S_i = \Delta i/\Delta g$ は 0.0631 ～ 0.0664 μA/μGal，電圧出力感度 $S_v = \partial V/\partial g$ は 2.689 ～ 2.953 V/mGal となり，重力計ごとのばらつきを低減させることに成功した．ただし，G031 重力計のオフセット角 $\Delta\theta$ については他の重力計（150.0 sec）よりも小さな値（110.7 sec）に設定せざるを得なかった．これは G031 重力計本体の出力感度を高める際，リードアウト回路の SENS ネジの調整だけでは出力感度を十分に高めることができなかったためである．この影響により，G031 重力計は他の重力計に比べて long レベルの傾斜変化に対する感度変化が大きい状態になっているので，G031 重力計を用いて野外観測や連続観測を行う際には long レベルの気泡位置に注意を払う必要がある．

このように，本研究の感度検定により，2021 年末時点における long レベル中央部（$\theta = 0$ sec）のリードアウト出力感度は 5 台のラコスト重力計全てで統一された．今後は重力計をこの感度設定の状態のままで野外キャンペーン重力測定に適用し，野外測定時における重力計の安定性を評価する予定である．なお，G031 用検流計の感度は依然として他の検流計よりも 4 倍程度高い状態のままなので，今後 RC 回路の抵抗を大きいものに取り替えることで G031 用検流計の感度を他の検流計と同等にすることを現在検討している．また，京都大学理学部 1 号館地下におけるリードアウト電圧の連続観測は 2022 年 1 月時点でも実施しており，これ以降も観測を継続する予定である．今後は連続観測データを収集しながら，出力感度や器械ドリフトの長期安定性や，地面振動（脈動や遠地地震）に対する応答の器械差などを評価する予定である．

謝辞　北海道大学のラコスト重力計（G031 および G791）の使用にあたっては，青山裕教授・高橋浩晃教授にご協力いただいた．ラコスト重力計用の可搬型検定台は渡邉（2017）に記載の設計図を参考に，京都大学理学研究科研究機器開発支援室によって作成された．本研究の一部は，文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）」および京都大学教育研究振興財団の助成を受けて遂行された．本稿の図は描画ソフト GMT（Wessel and Smith,

1998）を用いて作成された．以上，ここに記して感謝いたします．

文　献

Fukuda, Y., J. Okuno, K. Doi, and C.-K. Lee, 2021. Gravity observations at Jang Bogo Station, Antarctica, and scale factor calibrations of different relative gravimeters, Polar Science, 29, 100702, doi：10.1016/j.polar.2021.100702.

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，33-40.

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，2020. 可搬型相対重力計を用いた重力連続観測：システムの概要およびラコスト重力計G680による観測例，北海道大学地球物理学研究報告，83, 9-23, doi：10.14943/gbhu.83.9.

風間卓仁・山本圭吾・大柳諒・岡田和見・大島弘光・竹中悠亮・若林環・井口正人，2021. 桜島火山における繰り返し相対重力測定（2020年10月および2021年3月），京都大学防災研究所年報，64B, 73-85.

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.

渡邉篤志，2017. LaCoste重力計，https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/atsushi/tips/lacoste/index.html.

Wessel, P., and W.H.F. Smith, 1998. New, improved version of generic mapping tools released, Eos, Trans. Am. Geophys. Union, 79, 47, 579-579, doi：10.1029/98EO00426.