

# LaCoste & Romberg型重力計を用いた重力加速度の相対測定

京都大学 大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻  
地球物理学教室 測地学研究室 助教

風間 卓仁 (かざま たかひと)  
takujin@kugi.kyoto-u.ac.jp

(2022年9月20日公開)

## 1 はじめに

LaCoste & Romberg型重力計（単に LaCoste 型重力計やラコスト重力計とも呼ばれる）はゼロ長バネを内蔵した可搬型の相対重力計で、異なる重力点間の重力差を測定するために用いられる。また、同様の測定を定期的に繰り返すことで、重力値の時空間変化を把握し、固体地球起源の質量変動を検出することができる。例えば、阿蘇火山や桜島火山では1960–70年代から LaCoste 型重力計による相対重力の繰り返し測定が継続されており（久保寺ほか, 1974; 田島ほか, 1975）、ここまでの半世紀に取得された重力データは火山活動の監視にも役立てられてきた。

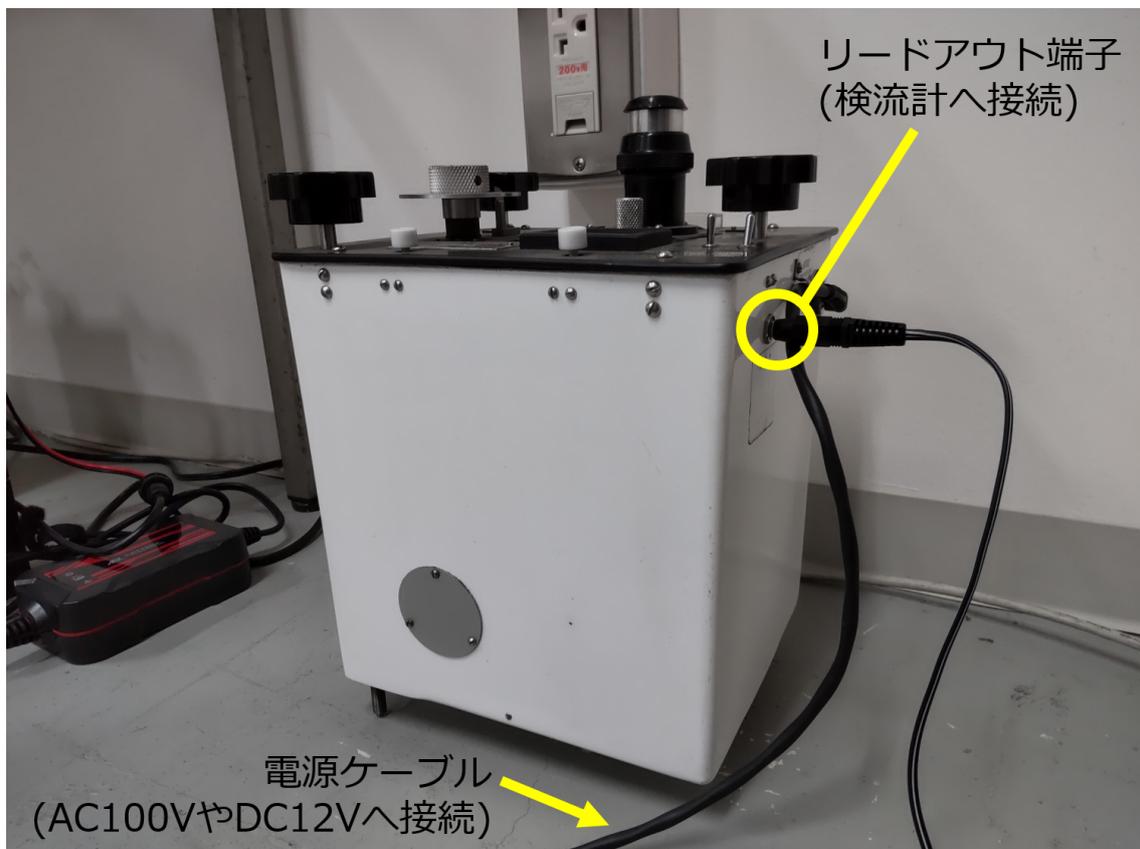
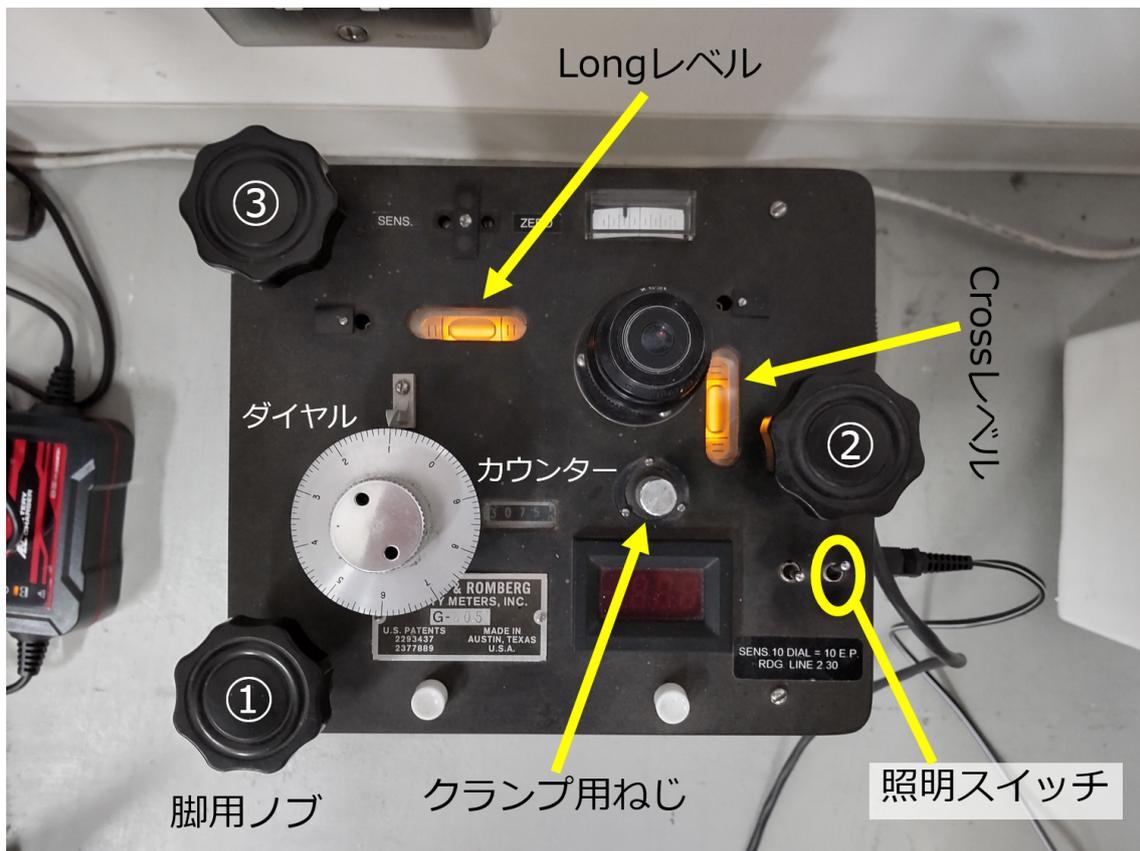
そもそも、可搬型相対重力計には LaCoste 型や Scintrex 型など複数の種類が存在する。このうち Scintrex 型ではボタン操作で重力値を自動で取得できるという強みがあるが、日本国内での利用台数はそれほど多くなく、相対重力の測定はいまだ LaCoste 型重力計が主流である。LaCoste 型は煩雑なマニュアル操作を要するものの、その扱いに慣れてしまえば測定精度約  $10 \mu\text{Gal}$  ( $= 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2 \simeq 1.0 \times 10^{-8} \text{ G}$ ) という高精度な相対重力値測定を実現できる (e.g., 坪川, 2005)。また、LaCoste 型重力計の相対重力データで時間変化を捉えたい場合には、過去のデータとの連続性という観点からも、将来にわたって LaCoste 型重力計による重力測定を続けていくことが重要である。

そこで本稿では、LaCoste 型重力計と検流計を用いて現場で読取値を測定し（リードアウト法）、その読取値から相対重力値を算出するまで一通りの手順を説明する。また、得られた相対重力値と、各重力点の座標値の情報を用いて、重力異常を算出する方法についても触れる。なお、精度の良い相対重力測定を実施するには重力計を事前に検定しておくことが重要であるが、本稿における詳細な説明は割愛し、他の文献 (e.g., 志知, 1985; 渡邊, 2017) に譲ることにする。

## 2 LaCoste 型重力計の外観

次ページに LaCoste 型重力計の外観を示す。重力計の上面には操作用のネジやダイヤルなどが並んでいて、脚の長さを調整するノブは3つある。次章で示す通り、普段は①と②のノブを回転することで重力計の水平を調整する。また、気泡型の傾斜計が2つ存在しており、奥行方向の傾斜量を確認するための傾斜計を cross レベル、左右方向の傾斜量を確認するための傾斜計を long レベルと呼ぶ。

右側面には電源ケーブルが接続されていて、バッテリーや電源装置へと繋がっている。また、右側面の手前側にはリードアウト用の端子が付いていて、ここに検流計を繋ぐことで重力計内部の針（ビームと呼ばれる）の位置を確認することができる。なお、この端子の形状はモノラルオーディオ端子と同一であり、市販のモノラルオーディオ端子を検流計に接続させることでビーム位置の確認を実現できる。



### 3 現場における読取値の測定

異なる重力点間の重力差を測定するためには、各重力点において以下のような作業を行えばよい。

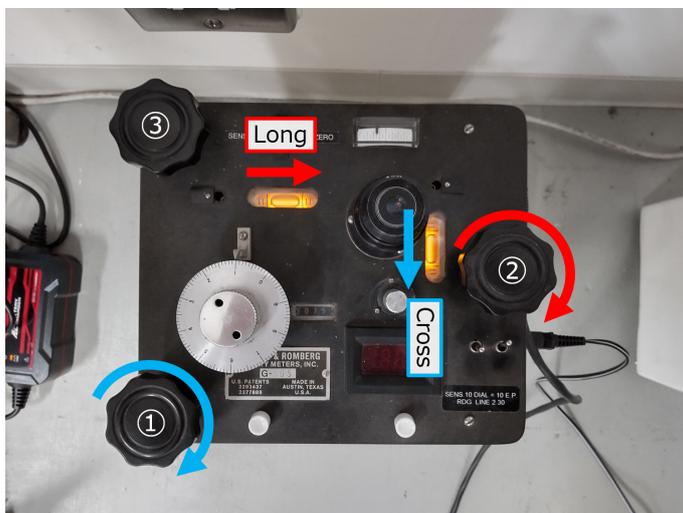
#### 3.1 重力計の設置

重力点の近傍に台（お皿）を置き、その上に重力計を設置する。重力計を箱から取り出す際には重力計を箱にぶつけないよう気を付ける。また、重力計をお皿の上に置く際にも、優しく静かに置く。（重力計に衝撃が加わると、重力値が飛んでしまったり、最悪器械が壊れてしまう可能性がある。）



#### 3.2 水平の調整

重力計が角度 $\theta$ だけ傾くと重力測定値は $g \cos \theta$ となり、重力は $-g(1 - \cos \theta)$ だけ見かけ変化してしまう。このようなことにならないよう、重力計の水平を調整し、重力の方向（鉛直）と重力計の垂直方向を合わせる。まず、①の脚を回して cross レベルの気泡を中心位置に合わせる。次に、②の脚を回して long レベルの気泡を中心位置に合わせる。この操作を念のため複数回繰り返すことで、両者の気泡を中心に合わせる。なお、脚の回転の向きと気泡の移動の向きの対応関係は下図の通りである。



### 3.3 クランプの解放

重力計内部のバネは、運搬時に衝撃を加えないようにクランプされた（トラベルロックがかかった）状態になっている。このタイミングで、測定に備えてクランプを解放する（アンクランプする）。クランプの解放の際には、クランプ用のねじを反時計回り（通常のねじを緩める向き）に回せばよい。これ以降、バネは自由に動ける状態なので、重力計に衝撃を加えないようにより一層気を付ける。



### 3.4 ダイヤルの回転

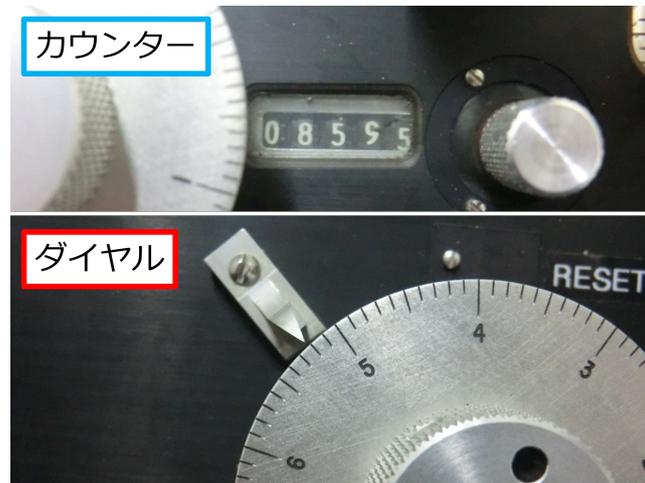
LaCoste 型重力計は偏位法ではなく零位法を採用しており、これにより細かい桁まで重力値を決定することができる（類似例：体重計と上皿天秤）。具体的には、重力計側面のリードアウト端子に検流計を接続し、検流計の針がちょうど  $0.0 \mu\text{A}$  を指し示すまでダイヤルを回転させればよい。この際、ダイヤルは必ず時計回りで回転させ、マイナス側から  $0.0 \mu\text{A}$  に近づけるようにする（ダイヤル内部の歯車には「遊び」があるので、右回りと左回りだと読取值（次節参照）が異なる値となってしまうため）。

なお、道路沿いでの測定や、脈動の大きな時間帯における測定では、地面振動の影響で検流計の針がわずかに揺れていることがある。このような場合、長時間針の様子を見ていても針がピタッと止まる保証はないので、針が  $0.0 \mu\text{A}$  を中心として左右均等に揺れるようなダイヤル値に合わせればよい。



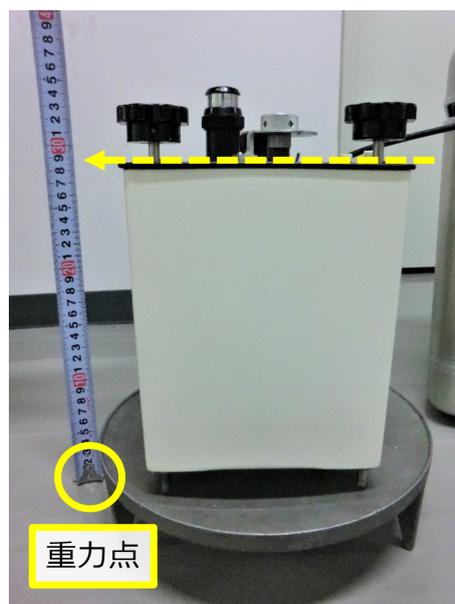
### 3.5 値の読み取り

検流計が  $0.0 \mu\text{A}$  となった時の、カウンターとダイヤルに示されている7桁の数値を読み取る（この読取値に各種補正を施すことで重力値を算出できる）。カウンターの最後の桁とダイヤルの最初の桁は共通なので、下図の場合には085952と読める。単位については、一般的なLaCoste-G型（分解能  $1 \mu\text{Gal}$ ）では  $0859.522 \text{ mGal}$ 、分解能の1桁高いLaCoste-D型（分解能  $0.1 \mu\text{Gal}$ ）では  $085.9522 \text{ mGal}$  となるので、このように小数点を付与した値を記録する。また、必要があれば複数回の読み取りを行い、値を読み取った時刻も毎回併記する。



### 3.6 器械高の測定

読取値を記録したら、クランプねじを時計回りに締めて重力計内部のバネを固定する。その後、重力点～重力計上面の高さを測定し、器械高として記録する。というのも、重力計そのものの高さが重力点より高い位置にあるので、読み取った値は実際の重力値よりも小さくなっている。次章でこの影響を補正する必要があるので、その補正のために器械の高さを測定しておく。なお、器械高測定の際に重力点（金属標）から鉛直にメジャーを伸ばす必要があるので、3.1節の段階では重力計を重力点の直上に置かないように気を付ける。



### 3.7 その他の値の記録

ここまで、記録野帳には 重力点名・時刻・読取値・器械高 が記録されているはずである。この他にも、必要に応じて以下の値を記録する：測定者・重力計製造番号・重力点座標値・天候・現場大気圧値・重力計内部温度・バッテリー電圧。

### 3.8 重力計の撤収

ここまでの作業が終わったら、バネのクランプを再度確認し、重力計を箱に収納する。この際にも、重力計を箱にぶつけないように気を付ける。

### 3.9 他重力点での読み取り

以上の測定を各重力点で繰り返し、1 測線におけるデータセットを収集する。なお、次章で器械ドリフトの寄与を補正するため、始点の重力点では少なくとも 2 回の測定を行う（例えば環状測定：A → B → C → D → A）。器械ドリフトの推定精度を上げるためには、全ての重力点で 2 回測定を行うことが望ましい（往復測定：A → B → C → D → D → C → B → A）。

## 4 相対重力値の算出

本章では、現場で記録した読取値から相対重力値を算出するまでの過程を説明する。

### 4.1 読取値→重力値の変換

現場で記録した読取値（カウンターとダイヤルで構成される 7 桁の数字）は言わば「バネの伸び」に相当する値であり、これを重力値に変換する必要がある。理想的なバネでは釣り合いの方程式  $mg = kx$  より  $g = (k/m)x$  という単純な比例関係を導出できるが、LaCoste 型重力計では  $x$  の全ての帯域に対して 1 つの比例係数 ( $k/m$ ) で表現することができない。読取値  $x$  → 重力値  $g$  の変換を  $g = f(x)$  と表記すると、関数  $f(x)$  の形状は重力計ごとに異なっており、その関数形状は重力計の製造メーカーによって定義されている。

ここでは、重力計メーカーによって作成された変換関数  $f(x)$  を用いて、現場読取値を重力値に変換する。例として、製造番号 G534 の LaCoste 型重力計におけるメーカー作成の変換表を以下に示す。メーカー作成の変換表では、一般的に 100 mGal ごとに  $x$  と  $g$  の対応関係が示されており、100 mGal ごとの傾き ( $= dg/dx$ ) は区間ごとにわずかに異なっている。

$x$ [mGal]	2800	2900	3000	3100	3200	3300
$g$ [mGal]	2819.937	2920.750	3021.574	3122.409	3223.253	3324.108
$dg/dx$	1.00813	1.00824	1.00835	1.00844	1.00855	—

例えば読取値が  $x = 3206.660$  mGal の場合、重力値  $g$  は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} f(3206.660) &= f(3200) + 1.00855 \times (3206.660 - 3200) \\ &= 3223.253 + 1.00855 \times 6.660 \\ &= 3229.970 \end{aligned} \tag{1}$$

## 4.2 スケールファクター補正

メーカー提供の変換関数  $f(x)$  は読取值  $x$  の一部区間に対してのみ検定されているため、読取值  $x$  の全領域に対して正しい変換関数になっているとは限らない。その結果、メーカー提供の変換関数  $f(x)$  を用いると、重力点間の重力差が系統誤差を含んだり器差を生じたりすることがある。このような事態を防ぐには、絶対重力値が既知の2点（A および B とする）の間で相対重力測定を行い、補正係数（スケールファクター） $S$  を決定しておけばよい。

$$S = \frac{\text{絶対重力差}}{\text{相対重力差}} = \frac{\Delta g_{abs}}{\Delta g_{rel}} = \frac{g_A^{abs} - g_B^{abs}}{g_A^{rel} - g_B^{rel}} = \frac{g_A^{abs} - g_B^{abs}}{f(x_A) - f(x_B)} \quad (2)$$

各重力計のスケールファクター  $S$  は論文に記載されている場合がある（e.g., Fukuda et al., 2017; 風間ほか, 2019）。例えば、風間ほか (2019) では G534 のファクター値を  $S = 1.000232$  と決定している。スケールファクター  $S$  が既知であれば、正しい重力値  $g'$  は以下のように計算できる。すなわち、**元の重力値  $g$  にスケールファクター  $S$  を掛け合わせればよい。**

$$g' = S \cdot g = S \cdot f(x) \quad (3)$$

文献値が無い場合には独自にスケールファクター検定を実施するべきであるが、それが困難である場合にはとりあえず  $S = 1.000000$  として次以降の解析に進む。

## 4.3 器械高補正

重力計の高さが重力点よりも高い場合、測定された重力値は重力点の重力値よりも小さくなっている。この影響を補正するため、**(器械高) × (重力鉛直勾配) の絶対値を足し合わせる**。器械高は現場で測定した重力点～重力計上面の高さを用い、重力鉛直勾配にはフリーエア勾配を用いる。フリーエア勾配 ( $\beta_F$  と記す) は地球重心から離れることに伴う重力変化の変化率のことであり、万有引力の式を微分することで以下のように概算できる。

$$\beta_F \simeq \frac{d}{dr} \left( \frac{GM}{r^2} \right)_{r=R} = \left( \frac{-2GM}{r^3} \right)_{r=R} = \left( \frac{-2g}{r} \right)_{r=R} \simeq -0.003086 \quad [\text{mGal/cm}] \quad (4)$$

## 4.4 潮汐補正

地球上では月や太陽との位置関係により潮汐力が働くため、地表重力は日周や半日周で変動する。最も振幅が大きい潮汐成分（分潮）は主太陰半日周潮 M2（周期 12.42 時間）で、中緯度における M2 分潮の振幅は約 60  $\mu\text{Gal}$  (zero-to-peak) である。また、潮汐にはこの他にも数多くの分潮が存在し、それらを足し合わせると潮汐重力変化の振幅は 300  $\mu\text{Gal}$  (peak-to-peak) を超えることもある。

潮汐に伴う重力変化を補正するためには、各重力点における潮汐重力変化を事前に予測計算しておく必要がある。日本の重力業界でよく使用されているのは Tamura (1982) の方法であり、この論文の著者である田村良明氏が作成したソフトウェア TIDE4N によって潮汐重力変化を再現できる。相対重力計の重力観測値から潮汐の効果を差し引くためには、**潮汐重力変化の予測値（実際に観測されるであろう変動値）を重力観測値から差し引く必要がある。**

## 4.5 気圧補正（本稿では未実施）

気圧変化は大気質量の分布変化を意味するので、これにより万有引力や重力もわずかに変化する。気圧が高くなる（自分の頭の上で大気の質量が増える）場合、[1] 増えた大気質量に上向きに引っ張られて重力が減少する効果と、[2] 増えた大気質量が地表を押し沈めることで重力計が地球重心に近づき重力が増加する効果、の2つが生じる。地球の場合には[1]の効果の方が大きく、両者の効果を合算したときの重力応答は  $dg/dp \simeq -0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$  程度である。

気圧変化に伴う重力変化を補正する場合、各重力点で読み取りを行う際に現場気圧値  $p_{obs}$  も記録する必要がある。気圧補正の方法については、気圧の基準値の取り方によって以下の通り3つの手法が混在している。

- 地球海面上の標準気圧  $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$  を基準とし、 $dg/dp \cdot (p_{obs} - p_0)$  を重力観測値から差し引く。東京大学名誉教授・大久保修平氏のソフトウェア WORLDG ではこの手法を採用している。
- 各重力点の標高  $h$  における標準気圧  $p(h)$  (ISO規格2533:1975参照) を基準とし、 $dg/dp \cdot [p_{obs} - p(h)]$  を重力観測値から差し引く。絶対重力計 FG5 の収録ソフト g9 ではこの手法を採用している。
- 測線の始点における気圧測定値  $p_{init}$  を基準とし、 $dg/dp \cdot (p_{obs} - p_{init})$  を重力観測値から差し引く。渡邊 (2017) ではこの手法を採用している。

このように、気圧補正には複数の方法が存在しており、どの方法を採用するかによって補正量が変わってくる。ただし、1本の測線における気圧重力変化の大きさはせいぜい数  $\mu\text{Gal}$  であり、バネ式相対重力計の観測精度 ( $\sim 10 \mu\text{Gal}$ ; e.g., 坪川, 2005) よりも小さい。そこで、本稿では相対重力測定データにおける気圧重力変化の寄与は十分に小さいと考え、気圧重力変化の寄与を補正しないことにする。

## 4.6 器械ドリフト補正

理想的なバネは外力一定の状況下では常に同じ長さを保つと期待されるが、実際の相対重力計内部のバネは完全な弾性体ではないためにわずかなクリープが発生する。これにより、相対重力計の重力測定値は一定の重力下であっても時間的に見かけ変化するので、各重力点の正しい重力値を得るためには重力測定値の見かけ変化（器械ドリフトと呼ばれる）を適切に補正する必要がある。

器械ドリフトの寄与を補正する際には、「1本の測線における器械ドリフトが時間に対して線形的に変化する」と仮定する。以下では、環状測定と往復測定の場合において器械ドリフト速度  $a$  をどのように推定し、かつ器械ドリフトの寄与を具体的にどのように補正するかを説明する。

### 4.6.1 環状測定の場合

$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$  のようなルートで環状測定を行った状況を考える。重力点  $i$  における  $j$  回目の重力測定値（4.5節までの寄与を補正した後の値）を  $g_{ij}$ 、測定時刻を  $t_{ij}$  とすると、 $g_{ij}$  は以下のように表現できる。

$$g_{ij} = g_i + a(t_{ij} - t_{A1}) \quad (5)$$

ただし、右辺第1項の  $g_i$  は重力点  $i$  における真の重力値であり、1測線の時間内では時間変化しないものとする。なお、1測線における重力点の合計が  $i_{max}$  点である場合、この式の未知数は  $(g_A, g_B, \dots, g_{i_{max}}, a)$  の  $(i_{max} + 1)$  個、式の本数も  $(i, j) = (A, 1), (B, 1), \dots, (i_{max}, 1), (A, 2)$  の  $(i_{max} + 1)$  本である。

ここで、 $(i, j) = (A, 1), (A, 2)$  の式同士の差分を取ると、器械ドリフト速度  $a$  を算出できる。

$$a = \frac{g_{A2} - g_{A1}}{t_{A2} - t_{A1}} \quad (6)$$

この値を  $(i, j) = (i, 1)$  の各式に代入すれば、各重力点  $i$  の重力値  $g_i$  を一意に決定できる（環状測定では式の本数と未知数が一緒であるため）。

$$g_i = g_{i1} - \frac{g_{A2} - g_{A1}}{t_{A2} - t_{A1}} \cdot (t_{i1} - t_{A1}) \quad (7)$$

この式の右辺 2 項目が、器械ドリフトの補正項に該当する。

#### 4.6.2 往復測定の場合

A → B → C → D → D → C → B → A のようなルートで往復測定を行った状況を考える。このとき、重力点  $i$  における  $j$  回目の重力測定値  $g_{ij}$  を以下のように表現する。

$$\text{往路 } (j = 1) : \quad g_{i1} = g_i + a(t_{i1} - t_{A1}) \quad (8)$$

$$\text{復路 } (j = 2) : \quad g_{i2} = g_i + a(t_{i2} - t_{A1}) + b \quad (9)$$

ただし、 $b$  は折り返し時の重力ステップ変化量（専門用語でテアと呼ばれる）であり、往復測定における重力値のヒステリシスを反映している。（例えば火山の麓と山頂部を結ぶ往復測定の場合、標高差に伴う重力差が非常に大きくなり、バネの特性上ヒステリシスが大きくなることがある。）なお、1 測線における重力点の合計が  $i_{max}$  点である場合、この式の未知数は  $(g_A, g_B, \dots, g_{i_{max}}, a, b)$  の  $(i_{max} + 2)$  個、式の本数は  $(i, j) = (A, 1), (B, 1), \dots, (i_{max}, 1), (i_{max}, 2), \dots, (B, 2), (A, 2)$  の  $2 \cdot i_{max}$  本となる。

ここで、各重力点  $i$  に対して (8) 式と (9) 式の差分を取ると、各重力点の重力値  $g_i$  に依存しないような以下の式を導出できる。

$$g_{i2} - g_{i1} = a(t_{i2} - t_{i1}) + b \quad (10)$$

$$\delta g_i = a \cdot \delta t_i + b \quad (11)$$

ただし、 $\delta t_i \equiv t_{i2} - t_{i1}$  は往復時刻差、 $\delta g_i \equiv g_{i2} - g_{i1}$  は往復重力差である。これらの値  $(\delta t_i, \delta g_i)$  は往復重力測定によって既知の値となっており、重力点数ぶんだけ  $i_{max}$  個の組み合わせが存在する。一方、この式において  $(a, b)$  は未知数であるが、 $(\delta t_i, \delta g_i)$  の散布図をプロットし、そのプロットに対して回帰直線を描けば最小二乗法的に  $(a, b)$  を推定できる。

器械ドリフトに関するパラメーター  $(a, b)$  を推定できれば、あとは以下の式（式 (8)–(9) を変形したもの）で器械ドリフトの寄与を補正し、各重力点の真の重力値  $g_i$  を計算できる。

$$\text{往路 } (j = 1) : \quad g_i = g_{i1} - a(t_{i1} - t_{A1}) \quad (12)$$

$$\text{復路 } (j = 2) : \quad g_i = g_{i2} - a(t_{i2} - t_{A1}) - b \quad (13)$$

各重力点の重力値  $g_i$  は、往路の測定データに基づく式 (12) と、復路の測定データに基づく式 (13) の両方から推定できる。理想的には式 (12) の  $g_i$  と式 (13) の  $g_i$  は同じ値となるはずであるが、実際には測定誤差の影響でそれぞれ異なる値となる。そのため、式 (12) の  $g_i$  と式 (13) の  $g_i$  を平均化することで、各重力点の重力値  $g_i$  を決定する。

#### 4.6.3 複雑な経路で測定を行った場合

測線の形状の関係で、例えば A → B → C → D → D → C → B → E → F → F → E → A のように 2 箇所での折り返しを必要とする測線も存在する。また、測線途中で重力計に衝撃が加わってしまった場合、そのタイミングでテアが入ったり、それ以降の器械ドリフト速度が変化してしまう場合もある。これらの場合、未知パラメーターと方程式系を自ら整理したうえで、観測方程式を逆解析（インバージョン）することで器械ドリフトの寄与を補正する必要がある。

## 4.7 始点に対する相対重力値の算出

器械ドリフト補正が終わったら、各重力点の重力値  $g_i$  から始点の重力値  $g_A$  を差し引くことで、始点を基準とした相対重力値  $\Delta g(A \rightarrow i)$  を算出する。というのも、始点の重力値  $g_A$  というのは始点の読取値に基づいた便宜的な値であり、相対重力計では重力点間の重力差（相対重力値）しか決定できないからである。

$$\Delta g(A \rightarrow i) = g_i - g_A \quad (14)$$

## 5 重力異常の算出

重力異常とは地下質量分布の積分値を重力の単位で表現したものであり、重力測定値と座標値を用いて算出することができる。本章では、各重力点の相対重力値  $\Delta g(A \rightarrow i)$  から重力異常を算出するまでの過程を説明する。

### 5.1 相対重力値の絶対値化

まず、始点の絶対重力値  $g_A^{abs}$  を用いて他点の相対重力値  $\Delta g(A \rightarrow i)$  を絶対値化する。

$$g_i^{abs} = g_A^{abs} + \Delta g(A \rightarrow i) \quad (15)$$

### 5.2 緯度補正

地球は赤道方向に扁平な回転楕円体に近い形状となっているため、極域の絶対重力値の方が赤道域よりも大きくなっている。地球を回転楕円体に近似したとき、地表面における絶対重力値は以下の正規重力式で計算できる（日本測地学会, 2004）。ただし、 $\phi$  は緯度を意味している。

$$\begin{aligned} \gamma(\phi) = & 978032.67715 \times (1 + 0.0052790414 \sin^2 \phi + 0.0000232718 \sin^4 \phi \\ & + 0.0000001262 \sin^6 \phi + 0.0000000007 \sin^8 \phi) \quad [\text{mGal}] \end{aligned} \quad (16)$$

重力点  $i$  の重力異常を求める際には、重力点の緯度の違いに伴う重力変化の寄与を補正する必要がある。具体的には、重力点の緯度  $\phi_i$  における正規重力  $\gamma(\phi_i)$  を計算し、これを  $g_i^{abs}$  から差し引けばよい。

### 5.3 フリーエア補正

各重力点の標高が海拔よりも高い場合、重力点が地球重心から離れる影響によって重力値が小さくなっている（フリーエア効果）。この影響を補正するには、重力点の標高  $h_i$  にフリーエア勾配 ( $\beta_F = -0.3086$  mGal/m) を掛け合わせ、それを  $g_i^{abs}$  から差し引けばよい。標高が正の場合には  $\beta_F h_i$  は負となるので、これを差し引くということは実際には絶対値  $|\beta_F h_i|$  を足し合わせることを意味する。

ここまでの補正をまとめると以下の通りとなり、この数式によって定義される重力値のことを **フリーエア重力異常** と呼ぶ。

$$g_i^F = g_i^{abs} - \gamma(\phi_i) - \beta_F h_i \quad (17)$$

フリーエア重力異常は、地表面下の質量分布を反映した値になっている。

## 5.4 ブーゲー補正

海拔～地表面間の質量を厚さ  $h_i$ 、密度  $\rho$  の無限平板（ブーゲー板）で近似すると、このブーゲー板の万有引力（ブーゲー効果）は以下のように計算できる。

$$\int_x \int_y \frac{G \rho dx dy h_i}{r^2} \cdot \frac{z}{r} = \dots = 2\pi\rho G h_i \quad (18)$$

ただし、 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  であり、点  $(0, 0, z)$  は重力点直上における任意の点である。上式の通り、ブーゲー効果の比例係数は  $2\pi\rho G$  であり、例えば水 ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) の場合この比例係数の値は  $0.0419 \text{ mGal/m}$  となる。

このブーゲー板の寄与をフリーエア重力異常値から差し引くことで海拔～地表面間の質量の寄与を除去することができ（ブーゲー補正）、以下の **単純ブーゲー重力異常** を求めることができる。

$$g_i^B = g_i^F - 2\pi\rho G h_i \quad (19)$$

単純ブーゲー重力異常は海拔下の質量分布を反映した値になっている。なお、ブーゲー補正の際には密度  $\rho$  に  $2000, 2300, 2670 \text{ kg/m}^3$  などの値が用いられ、このときの比例係数  $2\pi\rho G$  はそれぞれ  $0.0838, 0.0964, 0.1119 \text{ mGal/m}$  となる。

## 5.5 その他の寄与の補正（本稿では未実施）

上で述べたブーゲー補正は、「重力点周辺の地形が標高  $h_i$  で平坦である」という理想的な状況を仮定している。しかし、実際の地形には凹凸が存在するので、上記の理想状態を実現するためには凸部 ( $z > h_i$  となる地形部分) を削り、かつ凹部 ( $z < h_i$  で地形が存在していない部分) を密度  $\rho$  の媒質で埋める必要がある。このような作業をコンピューター上で数値的に実施することを地形補正と呼び、単純ブーゲー重力異常にさらに地形補正を適用した値を **完全ブーゲー重力異常** と呼ぶ。

また、より正確な重力異常を計算するためには、大気質量分布の寄与を補正したり（大気補正）、地球曲率の寄与を考慮する必要がある。ただし、これらの計算はより複雑なので (e.g., 地質調査所重力探査グループ, 1989)、本稿ではこれらの補正・寄与に関する解説を省略する。

## 6 データ解析例

表1は、2022年8月の西日本検定測線において、LaCoste型重力計G534で測定された読取値や器械高を示している。この測定は2022年8月3日～7日の4泊5日で、京都市・南阿蘇村・熊本市・鹿児島市桜島（横山および有村）の各重力点を往復することで実施されたものである。

表2はデータ解析の一連の流れを示しており、変換関数  $f(x)$  には本稿6ページに記載のものを、スケールファクターには  $1.000232$  (風間ほか, 2019) を、器械高補正の重力鉛直勾配にはフリーエア勾配  $\beta_F$  の絶対値である  $0.003086 \text{ mGal/cm}$  を、潮汐重力変化の計算には田村良明氏作成のソフトウェア TIDE4N を使用した。また、器械ドリフトに関わるパラメーター  $(a, b)$  を最小二乗法で推定した結果、ドリフト速度は  $-0.00338 \text{ mGal/hr}$ 、折り返し時のテアは  $+0.00463 \text{ mGal}$  であった。

表3は、表2で決定された相対重力値を用いて、各重力点の重力異常を計算するプロセスを示している。ここでは、京大内の重力点 KYOTO-A の絶対重力値として  $979706.777 \text{ mGal}$  (若林ほか, revised) を、フリーエア効果の重力鉛直勾配には  $\beta_F = -0.3086 \text{ mGal/m}$  を、ブーゲー効果の比例係数  $2\pi\rho G$  には  $+0.1119 \text{ mGal/m}$  ( $\rho = 2670 \text{ kg/m}^3$  に基づく) を使用した。なお、最終的に得られたブーゲー重力異常の値は、産総研(2009)の計算結果と  $\pm 2 \text{ mGal}$  程度の範囲内で一致することを確認している。

表 1: 2022 年 8 月の西日本検定測線における読取値の記録。

Point	Year	Month	Day	Hour	Minute	Reading [mGal]	Height [cm]	SN	Observer
KYOTO-A	2022	8	3	12	56	3206.660	21.9	G534	Kazama
AVL	2022	8	4	9	40	2921.281	21.8	G534	Kazama
KUMAMOTO	2022	8	4	13	34	3054.045	20.6	G534	Kazama
SVOG	2022	8	5	8	59	2953.777	21.4	G534	Kazama
ARIG10	2022	8	5	12	41	2939.818	20.8	G534	Kazama
ARIG10	2022	8	5	13	26	2939.811	20.8	G534	Kazama
SVOG	2022	8	5	15	2	2953.793	21.4	G534	Kazama
KUMAMOTO	2022	8	6	11	5	3053.896	20.6	G534	Kazama
AVL	2022	8	6	13	34	2921.122	21.9	G534	Kazama
KYOTO-A	2022	8	7	10	29	3206.309	21.8	G534	Kazama

表 2: 2022 年 8 月の西日本検定測線における相対重力値の解析プロセス。

Point	Year	Month	Day	Hour	Minute	Reading [mGal]	Converted [mGal]	①Scaled [mGal]	Height [cm]	②H-cor [mGal]	Tide [mGal]	③T-cor [mGal]	Corrected [mGal]
						$x$	$f(x)$	$\times 1.000232$		$\times 0.003086$		$\times (-1)$	①+②+③
KYOTO-A	2022	8	3	12	56	3206.660	3229.970	3230.719	21.9	0.068	-0.038	0.038	3230.825
AVL	2022	8	4	9	40	2921.281	2942.206	2942.889	21.8	0.067	0.019	-0.019	2942.937
KUMAMOTO	2022	8	4	13	34	3054.045	3076.070	3076.784	20.6	0.064	-0.014	0.014	3076.861
SVOG	2022	8	5	8	59	2953.777	2974.970	2975.660	21.4	0.066	-0.031	0.031	2975.757
ARIG10	2022	8	5	12	41	2939.818	2960.896	2961.583	20.8	0.064	0.016	-0.016	2961.631
ARIG10	2022	8	5	13	26	2939.811	2960.889	2961.576	20.8	0.064	0.013	-0.013	2961.627
SVOG	2022	8	5	15	2	2953.793	2974.986	2975.676	21.4	0.066	0.000	0.000	2975.742
KUMAMOTO	2022	8	6	11	5	3053.896	3075.920	3076.634	20.6	0.064	-0.022	0.022	3076.719
AVL	2022	8	6	13	34	2921.122	2942.046	2942.729	21.9	0.068	0.027	-0.027	2942.769
KYOTO-A	2022	8	7	10	29	3206.309	3229.616	3230.365	21.8	0.067	-0.075	0.075	3230.508

Point	Time [hr]	Corrected [mGal]	D-time [hr]	D-grav [mGal]	Drift [mGal]	Tare [mGal]	Corrected [mGal]	Average [mGal]	Relative [mGal]
		④			⑤	⑥	④-⑤-⑥		
KYOTO-A	0.000	3230.825	93.550	-0.317	0.000	0.000	3230.825	3230.822	0.000
AVL	20.733	2942.937	51.900	-0.168	-0.070	0.000	2943.007	2943.009	-287.814
KUMAMOTO	24.633	3076.861	45.517	-0.142	-0.083	0.000	3076.945	3076.948	-153.874
SVOG	44.050	2975.757	6.050	-0.015	-0.149	0.000	2975.906	2975.907	-254.915
ARIG10	47.750	2961.631	0.750	-0.004	-0.162	0.000	2961.793	2961.790	-269.033
ARIG10	48.500	2961.627			-0.164	0.005	2961.787		
SVOG	50.100	2975.742			-0.170	0.005	2975.907		
KUMAMOTO	70.150	3076.719			-0.237	0.005	3076.952		
AVL	72.633	2942.769			-0.246	0.005	2943.010		
KYOTO-A	93.550	3230.508			-0.317	0.005	3230.820		

Drift rate:  $-0.00338$  mGal/hr

Tare:  $+0.00463$  mGal

表 3: 2022 年 8 月西日本検定測線における各重力点の重力異常値。

Point	Relative [mGal]	①Absolute [mGal]	Latitude [deg]	$\sin(\text{Lat})$	②Normal [mGal]	Height [m]	③FA-eff [mGal]	④Freeair [mGal]	⑤BG-eff [mGal]	Bouguer [mGal]
		+979706.777	$\phi$	$\sin \phi$	$\gamma(\phi)$	$h$	$-0.3086 \cdot h$	①-②-③	+0.1119 · $h$	④-⑤
KYOTO-A	0.000	979706.777	35.02939	0.574	979736.241	60.8	-18.763	-10.701	6.802	-17.503
AVL	-287.814	979418.963	32.88559	0.543	979556.780	564.8	-174.297	36.481	63.186	-26.705
KUMAMOTO	-153.874	979552.903	32.84204	0.542	979553.193	54.6	-16.850	16.559	6.108	10.451
SVOG	-254.915	979451.862	31.58963	0.524	979451.140	27.3	-8.425	9.147	3.054	6.093
ARIG10	-269.033	979437.744	31.56018	0.523	979448.766	82.4	-25.429	14.407	9.218	5.189

## 参考文献

- 風間ほか (2019): 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.
- 久保寺ほか (1974): 阿蘇火山における重力値の繰返し測定. 火山, 19(2), 123–125.
- 産業技術総合研究所 (2009): 重力データベース (GALILEO). <https://gbank.gsj.jp/gravdb/>
- 志知 (1985): 重力計の現地と特性および調整法. 60 pp.
- 地質調査所重力探査グループ (1989): 地質調査所重力補正標準手順 SPEC1988 について. 地質調査所月報, 40(11), 601–611.
- 田島ほか (1975): 桜島および鹿児島湾周辺における重力精密測定. 桜島火山の総合調査報告—昭和49年12月～昭和50年3月—, 11, 50–57.
- 坪川 (2005): 重力の測定. 精密工学会誌, 71(11), 1335–1338.
- 日本測地学会 (2004): Web テキスト測地学 新装訂版. <https://geod.jpn.org/web-text/>
- 若林ほか (20xx): LaCoste 型および Scintrex 型相対重力計におけるスケールファクターの読取值依存性の検定. 測地学会誌, revised.
- 渡邊 (2017): LaCoste 重力計. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/atsushi/tips/lacoste/index.html>
- Fukuda et al. (2017): New absolute gravity measurements in New Zealand. IAG Symposia, 148, 95–101.
- ISO 2533 (1975): Standard Atmosphere. 108 pp.
- Tamura (1982): A computer program for calculating the tide-generating force. Publ. Int. Latitude Obs. Mizusawa, 16(1), 1–20.

## 更新履歴

2022年9月20日：本稿を京都大学学術情報リポジトリ (KURENAI) 上で公開。