

# 富士山における2台のFG5による絶対重力測定(2022年9月) — 相対重力計検定ラインの構築およびFG5の器差検定 —

今西祐一<sup>1)\*</sup>・西山竜一<sup>1)</sup>・本多 亮<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学地震研究所・<sup>2)</sup> 山梨県富士山科学研究所

## Absolute Gravity Measurements in Mt. Fuji with two FG5 Gravimeters in September 2022: Establishment of Calibration Line for Relative Gravimeters and Calibration of Instrumental Offsets of FG5 Gravimeters

Yuichi Imanishi<sup>1)\*</sup>, Ryuichi Nishiyama<sup>1)</sup> and Ryo Honda<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

<sup>2)</sup> Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government

### Abstract

Absolute gravity measurements were conducted in Mt. Fuji using two sets of FG5 absolute gravimeters (serial numbers #109 and #241) in September 2022. First, the two gravimeters were operated simultaneously at the foot and the halfway point (the 5th station) of the mountain in order to determine the difference in gravity between the two points. Next, the two gravimeters were subject to comparative measurements at the foot of the mountain in order to calibrate relative instrumental offsets. From these experiments, values of gravity difference of  $(294,745.03 \pm 0.25)$   $\mu\text{Gal}$  (at 130.0cm above the floor) and  $(294,656.04 \pm 4.13)$   $\mu\text{Gal}$  (on the floor) were established between the foot and the halfway point of the mountain. This will provide an ideal opportunity for precisely calibrating the sensitivities of relative gravimeters.

**Keywords:** absolute gravity measurement, Mt. Fuji, instrumental offset, calibration

### 1. はじめに

一般に重力計は、絶対重力計と相対重力計とに大別される。絶対重力計は、自由落下する物体に対して、時間と長さ(落下距離)を測定することによって、重力加速度の絶対値を計測する装置である(Niebauer *et al.*, 1995)。これに対して相対重力計は、重力加速度の絶対値は単独ではわからないものの、絶対重力計よりも小型でポータブルであり、場所による重力の違いを測ることに用いられる。超伝導重力計のように、据え置き型で重力の時間変化を観測するものも、単独では重力の相対値しか得られないという意味で、相対重力計に分類される(Hinderer *et al.*, 2007)。重力測定/観測においては、これら2種類の装置を組み合わせることにより、空間的

あるいは時間的な重力の変化を調べることがしばしば行われる(大久保, 2001; Imanishi *et al.*, 2018)。

相対重力計における問題点の一つは、感度の正確な値が不明であることである。つまり、たとえば2地点の重力差として1 mGal ( $=10^{-5}\text{ms}^{-2}$ ) という測定値が得られたときに、それが正確に1.0000... mGalを表すということは必ずしも保証されない。それぞれの重力計には、メーカーから与えられた感度のテーブルが用意されているが、経年的な変化や読み取り値による変化(Onizawa, 2019; 若林・他, 2022)などの要因により、ある程度の誤差が生じることは避けられない。要求される測定精度が高くなるほど、必要な感度検定の精度も高くなり、最終的にはユーザーが自ら高精度の検定を行うことが必要

\*e-mail: imanishi@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

になる。

相対重力計の感度を検定する方法の一つに、重力加速度の絶対値の差が正確にわかっている2地点の間で測定を行い、読み取り値との比較を行うというものがある。その際、重力加速度の差が大きいほど、S/N比の観点から有利である。重力加速度の差を大きくとるために、南北に長距離移動することも行われるが (Nakagawa *et al.*, 1983), 移動時間が長くなることによって、装置の不規則なドリフトの影響が大きくなる恐れがある。なるべく短時間で移動できるよう、たとえば山岳の麓と中腹などに大きな標高差をもった2つの測定点を設定し、それぞれの絶対重力値を正確に決定しておけば、そうした検定の目的にとって理想的な測線を構築できると期待される。

一方、基準となるべき絶対重力計にも、別の種類の問題がある。長さや時間のそれぞれについての量子基準に基づいているので、絶対重力計には感度検定の問題は存在しない。しかし、測定の確度という点に関して、個体による系統差(器差)が存在することが知られている。絶対重力計 FG5 のメーカー公称確度は  $2\mu\text{Gal}$  であるが

(Niebauer *et al.*, 1995; Okubo *et al.*, 1997), 実際には数  $\mu\text{Gal}$  程度あるいはそれ以上の大きさの器差をもった個体もある。この程度の大きさの器差は、相対重力計の感度検定への影響は小さいが、超伝導重力計の機械的ドリフトを絶対重力測定によって検定しようとする際には重大な影響を与える (Francis *et al.*, 1998; 山佳・名和, 2020)。このような観点から、今西・他 (2021) は、地震研究所が所有する2台の絶対重力計 FG5 (シリアルナンバー#109 および#241) の器差の検定を行い、 $0.1\mu\text{Gal}$  オーダーでの検定精度を達成した。その後、2台のうちの1台 (シリアルナンバー#241) はメーカーによるオーバーホールを受けたため、器差は再び不定となった。絶対重力測定における長期的なトレーサビリティを確保するためには、オーバーホールを受けるごとに検定を実施することが必要である。

本研究では、以上のような考えから、2台の絶対重力計 FG5 (シリアルナンバー#109 および#241) を用いた実験を富士山において実施した。まず、富士山の山麓と中腹のそれぞれに FG5 を設置し (Fig. 1), 2 台を同時

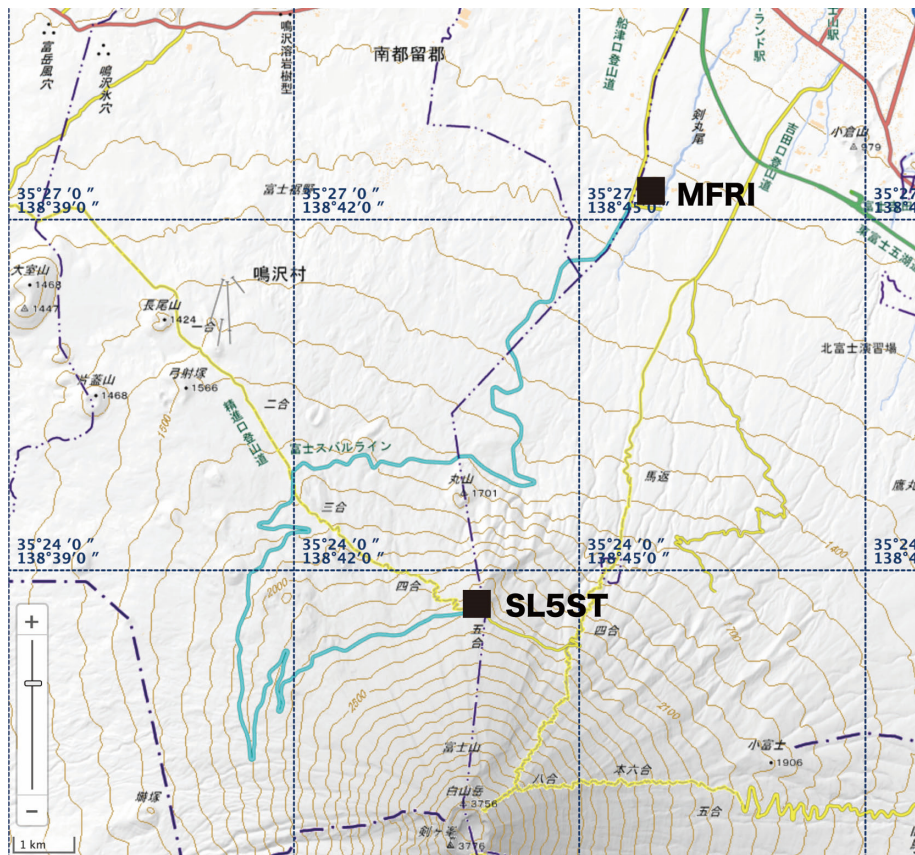


Fig. 1. Locations of absolute gravity sites (black squares) in this study. MFRI stands for Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government. SL5ST is the gravity station in Mt. Fuji 5th Station Administrative Office, Road Public Corporation, Yamanashi Prefecture. The original basemap was provided by Geospatial Information Authority of Japan.



Fig. 2. Absolute gravity measurements with FG5 #241 at MFRI-E in September 2022. To the left, the precise barometer Paroscscientific 1000-16B (serial number #81465) can be seen.

に稼働させることによって、2地点の重力加速度の絶対値の差を測定した。ここで山麓というのは、山梨県富士山科学研究所の重力計基台（標高 1,029 m）である。また、中腹というのは、富士スバルライン有料道路の終点にあたる5合目にある山梨県道路公社五合目管理棟（標高 2,298 m）である。2地点の標高の差は約 1,269 m、重力加速度の差は約 295 mGal である。自動車でも約 30 分で移動できる2地点でこれだけの重力差が得られるような場所は日本国内にはほとんどなく、相対重力計の検定ラインとして有用となることが期待される。次に、この測定に合わせて、富士山科学研究所内の2つの重力計基台において、今西・他（2021）の方法により2台のFG5の器差の検定を行った。検定によって得られた器差の情報は、山麓と中腹の重力差に反映されるべき補正量を与える。本稿では、これらの実験の結果について述べる。

## 2. 富士山の山麓および中腹における絶対重力測定

富士山の山麓と中腹における同時重力測定は、2022年9月21日から22日にかけて行った。当初の予定では、3日間の測定期間を想定していたが、台風の接近による影響のため、日程を短縮した。また、絶対重力計にも「高度順化」が必要と考えられたので、測定前日の20日は東京から富士山科学研究所まで装置を運搬するののみとし、一気に富士山5合目まで持ち上げることを避けた。

まず、山麓、つまり富士山科学研究所では、9月20日にFG5 #241を設置した。設置した場所は、環境生態実験棟の重力測定室内に2ヶ所ある基台のうちの東側である（Fig. 2）。以下では、今西・他（2021）にしたがって、この点をMFRI-Eと表記する（同様に、西側の基台の点をMFRI-Wとする）。測定室内の概念図は、今西・他（2021）のFig. 3を参照されたい。重力計の方位は、2021年の測定（今西・他，2021）と同一になるように、三脚の気泡レベル（bull's eye level）の位置が東向きになるようにした。重力計の機械高（Setup Height）についても、2021年の測定（今西・他，2021）と同一（131.5 mm）になるように調整した。本研究における一連の測定を通して、機械高はすべてこの値で統一した。重力加速度の鉛直勾配としては、 $2.956 \mu\text{Gal}/\text{cm}$  を使用した。この値は、2022年11月17日に、シントレックス重力計CG3を用いて測定したものであり、2021年の実験（今西・他，2021）で用いられた値（ $3.020 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ ）とは異なる。本研究で使用した重力加速度の鉛直勾配については、付録1に記述している。FG5による測定は、9月20日23:30（UTC）から9月22日05:40（UTC）まで、約30時間にわたってほぼ連続して行った。ドロップの時間間隔は10秒とした。潮汐の補正については、今西・他（2021）と同様に、海洋潮汐モデルに基づいて荷重効果を計算するプログラムであるGOTIC2



Fig. 3. Absolute gravity measurements with FG5 #109 at SL5ST in Mt. Fuji 5th Station Administrative Office, Road Public Corporation, Yamanashi Prefecture in September 2022.

(Matsumoto *et al.*, 2001) を使用して潮汐パラメーターを推定し、それを用いて予測値を計算して補正した。また、気圧の影響については、室内の床面に設置された精密気圧計 Paroscientific 1000-16B (シリアルナンバー #81465) のデータを使用し、今西・他 (2021) と同様にアドミッタンスを  $0.30 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$  として補正を行った。

次に、中腹、つまり富士山 5 合目では、9 月 21 日に FG5 #109 を設置した。設置した場所は、道路公社五合目管理棟内に設定した重力測定点である (Fig. 3)。以下では、この場所を SL5ST と表記する。重力計の方位は、bull's eye level の位置が北向きになるようにした。機械高は、MFRIE の FG5 #241 と同一になるようにした。重力加速度の鉛直勾配としては、現場での実測値 ( $3.627 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ ) を使用した。FG5 による測定は、9 月 21 日 03:24 (UTC) から 9 月 22 日 04:18 (UTC) まで、約 25 時間にわたって行った。ただし、途中で一部のパーツの電源が落ちるトラブルが発生したため、約 4 時間にわたって欠測があった。ドロップの時間間隔は 10 秒とした。潮汐の補正については、MFRIE の FG5 #241 と同じ方法をとった。大久保・他 (2004) は、2003 年に行われた富士山頂における絶対重力測定の際に、潮汐の観測値が計算値から大幅にずれていたことを指摘しているが、本研究ではそのような大幅なずれは見られなかった。気圧の影響についても、MFRIE と同様に、室内の

床面に設置された精密気圧計 Paroscientific 1000-16B (シリアルナンバー #146538) のデータを使用して補正を行った。その際のアドミッタンスとしては、測定点の標高を考慮した簡単な考察から、 $0.25 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$  という値を採用した (付録 2 を参照)。なお、東京での比較測定から、Paroscientific 1000-16B (シリアルナンバー #146538) は同型機 (シリアルナンバー #81465) より約  $0.02 \text{hPa}$  だけ系統的に大きい値を示すことがわかっている。気圧の重力への影響を表すアドミッタンスは  $0.2\text{--}0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$  程度であるので、気圧計の器差による誤差は  $0.01 \mu\text{Gal}$  以下の大きさととなり、本研究で山麓と中腹との重力差を決定する目的においては無視することができる。

以上のようにして山麓 (MFRIE) および中腹 (SL5ST) において得られた重力測定データを、Table 1 にまとめる。重力加速度の測定値は、絶対重力計を設置した床面から高さ  $130.0 \text{cm}$  の値として表示している。また、Fig. 4 に、それぞれの地点での測定値のヒストグラムを示す。ただし、SL5ST において、測定期間の最初の約 3 時間はレーザーが不安定だったので、それを除外して 9 月 21 日 06:53 (UTC) 以降のデータのみを使っている。また、SL5ST のデータと同等に比較するため、MFRIE についても 9 月 21 日 06:53 (UTC) から 9 月 22 日 04:18 (UTC) までの約 21.5 時間のデータのみを使っ

ている。MFRI-Eのほうが平均値の推定誤差が大きいのは、今西・他(2021)でも述べられているように、FG5 #109に比べてFG5 #241のほうがドロップごとのばらつきが大きくなる傾向があるためである。

これらの結果から計算すると、MFRI-EとSL5STとの重力加速度の差は、 $(294,746.14 \pm 0.21) \mu\text{Gal}$ となる。ただし、次節で述べるように、絶対重力計どうしの器差を補正する必要があるため、これはまだ最終結果ではない。

### 3. 富士山科学研究所における2台の絶対重力計の比較測定

前節で述べた、富士山の山麓と中腹における同時重力測定の際に、使用した2台の絶対重力計の器差を検定する目的で、富士山科学研究所において比較測定実験を

Table 1. Results of absolute gravity measurements at MFRI-E and SL5ST in September 2022. "Height" refers to the height of the floor at each site.

|  | MFRI-E         | SL5ST          |
|--|----------------|----------------|
| Latitude (deg)                                 | 35.45355       | 35.39487       |
| Longitude (deg)                                | 138.76257      | 138.73295      |
| Height (m)                                     | 1,029.39       | 2,298          |
| Instrument                                     | FG5 #241       | FG5 #109       |
| Number of Drops                                | 7,056          | 6,070          |
| Mean Gravity Value ( $\mu\text{Gal}$ )         | 979,565,852.97 | 979,271,106.82 |
| Standard Deviation ( $\mu\text{Gal}$ )         | 15.02          | 7.96           |
| Standard Error of the Mean ( $\mu\text{Gal}$ ) | 0.18           | 0.10           |

実施した。このような比較測定を富士山科学研究所において行うのは、2021年3月に続いて2回目である。実験を行ったのは、2022年9月26日から29日にかけてである。方法は、今西・他(2021)で説明されているのとほとんど同一である。つまり、実験の前半は2つの基台に1台ずつ重力計を置いて測定し、後半は重力計の位置を入れ替えて測定するというものである。本研究の方法が今西・他(2021)と異なる点は、以下の二点である。

一つは、重力計の位置を入れ替える際に、絶対重力計FG5の下部の基台、真空槽の基台、およびその脚(3個)を、入れ替えずにそのままにしたことである。つまり、重力計本体を構成するパーツのうち、真空槽、干渉計、およびスーパースプリングという、落体の自由落下とその測定に直接かかわるパーツは入れ替えるが、それ以外の構造部品は入れ替えないということである。これによって、重力計の位置を入れ替える作業に要する時間を大幅に短縮することができるだけでなく、基台上での重力計の水平位置と機械高を入れ替え前後で厳密に同一に保つことが可能となる。その一方で、2セットの重力計のパーツが一時的に混在して使われることになるが、このことによる測定結果への影響は無視できると考えている。

もう一つは、気圧補正のための精密気圧計を設置した位置が異なることである。2021年3月の実験の際は、室内のスペースによる制約のため、精密気圧計を前室の床から高さ94cmの所に置いていた。本研究の実験では、精密気圧計を、重力計と同じ部屋の床面に設置した。2つの実験の間での、気圧計の高さの違いは90.5cmである。富士山科学研究所の標高(約1,029m)において、気圧計の設置位置の高さ90.5cmの違いは、約0.098hPaの気圧差に相当する。気圧の重力への影響を表すアドミッタンスを $0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$ とすると、気圧計の設置位

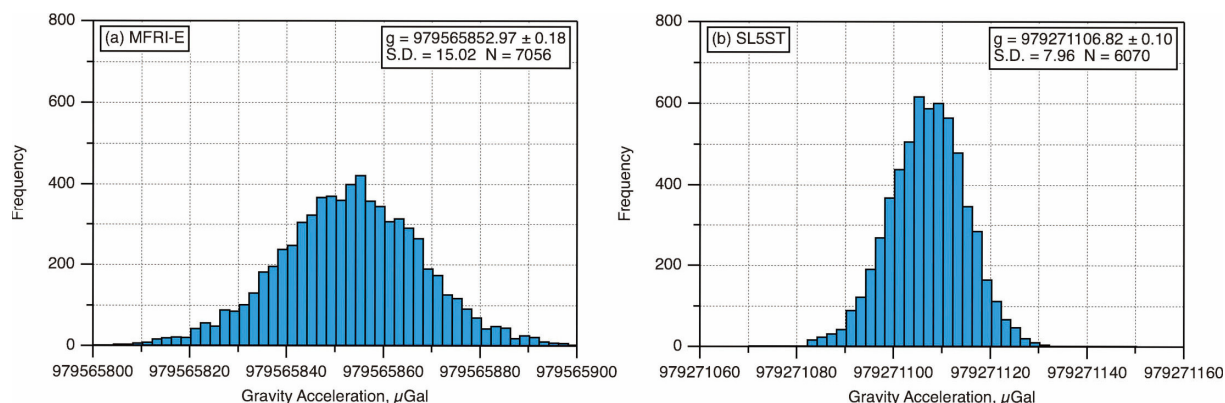


Fig. 4. Histograms of absolute gravity measurements at the two sites in Mt. Fuji in September 2022. (a) MFRI-E (FG5 #241). (b) SL5ST (FG5 #109).

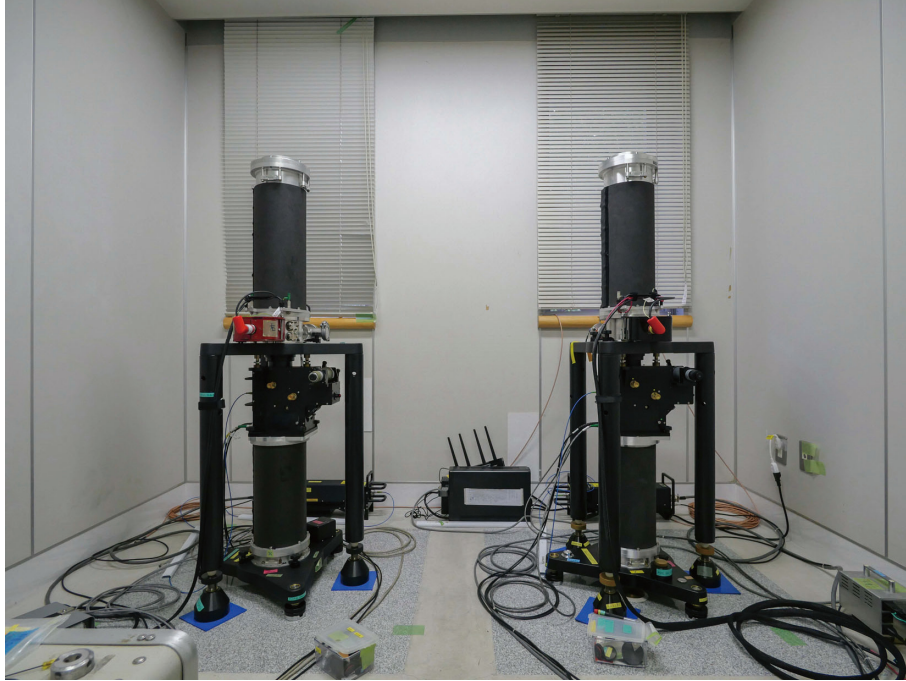


Fig. 5. Comparative measurements with absolute gravimeters FG5 #241 (left, MFRI-E) and FG5 #109 (right, MFRI-W) installed at Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government in September 2022.

置の違いによる差は  $0.03 \mu\text{Gal}$  となる。今後、同じ場所で同様の重力測定を行う際には、気圧計を床面に置くことを標準とする方針である。

実験では、今西・他 (2021) で行われたのと同様に、前半の9月26日から27日には、MFRI-WにFG5 #109、MFRI-EにFG5 #241を設置し (Fig. 5)、後半の9月28日から29日には、MFRI-Wに#241、MFRI-Eに#109を設置した。重力加速度の鉛直勾配の値としては、MFRI-Wにおいては  $2.979 \mu\text{Gal}/\text{cm}$  を使用し、MFRI-Eにおいては前述と同じく  $2.956 \mu\text{Gal}/\text{cm}$  を使用した (付録1)。今西・他 (2021) では、実験中に重力が時間変化することによる影響を避けるために、前半・後半それぞれに継続時間の短い測定期間 (セッション) を設定していた。実際、FG5 #241 は、前節で述べた測定のあと配置を変えずに同じ基台に設置されていたが、9月21日の  $979,565,852.97 \mu\text{Gal}$  から9月26日の  $979,565,858.99 \mu\text{Gal}$  への重力増加が観察された。この約  $6 \mu\text{Gal}$  の増加は、9月22-24日の多量の降雨 (山梨県河口湖のアメダス観測点において合計  $119 \text{mm}$  の降水量) と関係している可能性が高い。降雨による急激な重力増加は、その後ゆるやかな重力減少を伴うことも予想される。したがって、本研究でも、今西・他 (2021) と同様に、継続時間1日以内のセッションを設定することが適当である。具体的には、ドロップごとのばらつきの程度も考慮して、9月

26日09:11 (UTC) から9月26日23:30 (UTC) までの約14.3時間をセッション1とし、9月28日07:54 (UTC) から9月28日22:53 (UTC) までの約15.0時間をセッション2とした。

実験の結果を Table 2 および Fig. 6 に示す。測定地点のインデックス  $i$ 、装置のインデックス  $j$ 、セッションのインデックス  $k$  は、今西・他 (2021) で定義されているのと同じである。実験期間を通じて気象条件が比較的良く、地震などによる擾乱も少なかったため、いずれのセッション・重力計ともに均一で良好なデータが得られている。ドロップごとのばらつきが#109より#241のほうが大きい傾向があるのは前述の通りであり、防振機構 (スーパースプリング) の効力がこれら2台で異なっている可能性がある。本研究の結果は、今西・他 (2021) の結果よりも全体的にばらつきが小さく、平均値の推定誤差も小さくなっている。今西・他 (2021) の式 (10)-(13) にしたがって評価すると、MFRI-W と MFRI-E の重力差  $\delta$  は

$$\delta = (-4.81 \pm 0.15) \mu\text{Gal} \quad (1)$$

FG5 #109 と FG5 #241 の相対的な器差  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = (-1.46 \pm 0.15) \mu\text{Gal} \quad (2)$$

セッション1とセッション2の間の重力変化  $\Delta g$  は

Table 2. Results of absolute gravity measurements at Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government. A constant value of  $979,565,000 \mu\text{Gal}$  has been subtracted from the measured gravity values. See Imanishi et al. (2021) for notations.

| Session Index $k$ | Site Index $i$ | Instrument Index $j$ | Site   | Serial Number | Number of Drops | Mean Gravity ( $\mu\text{Gal}$ ) | Standard Deviation ( $\mu\text{Gal}$ ) | Standard Error ( $\mu\text{Gal}$ ) |
|-------------------|----------------|----------------------|--------|---------------|-----------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| 1                 | 1              | 1                    | MFRI-E | #241          | 2515            | 859.99                           | 8.21                                   | 0.16                               |
|                   | 2              | 2                    | MFRI-W | #109          | 2516            | 852.73                           | 5.10                                   | 0.10                               |
| 2                 | 1              | 2                    | MFRI-E | #109          | 2622            | 857.02                           | 5.98                                   | 0.12                               |
|                   | 2              | 1                    | MFRI-W | #241          | 2636            | 853.59                           | 10.54                                  | 0.21                               |

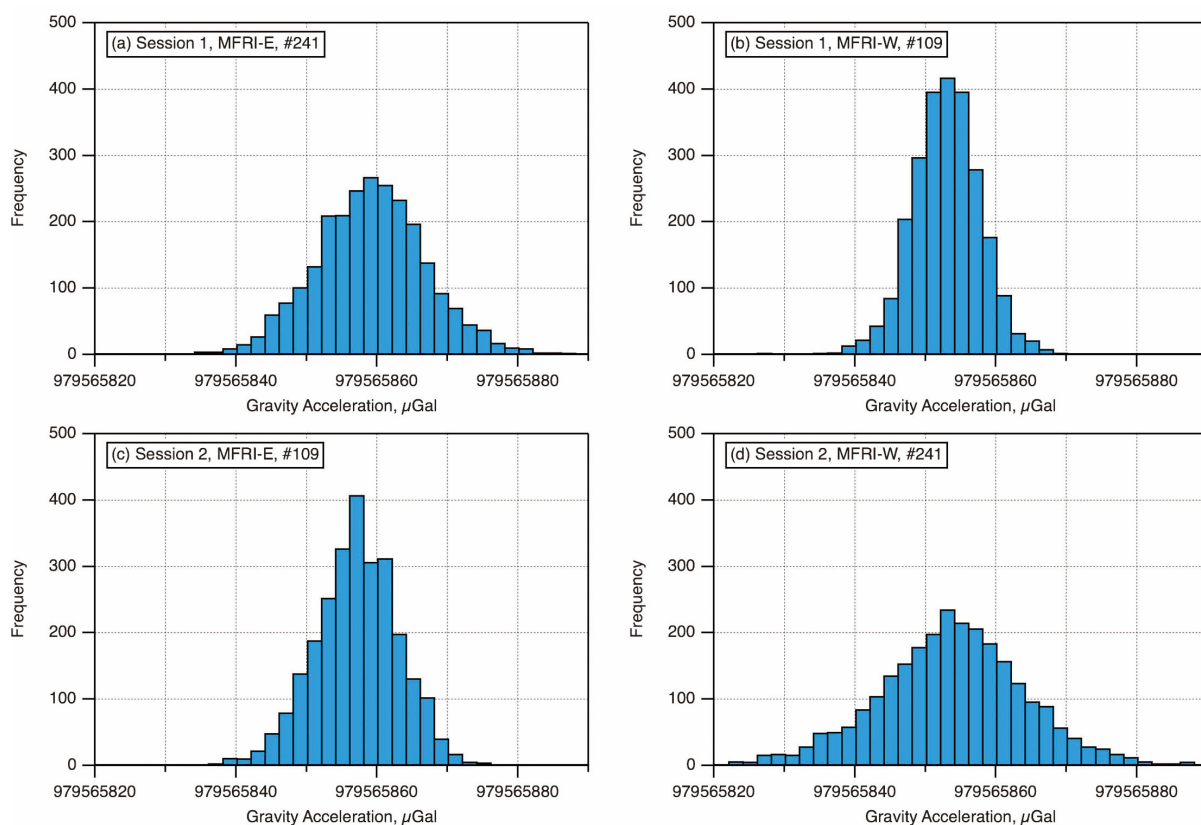


Fig. 6. Histograms of absolute gravity measurements with two FG5 gravimeters at MFRI in September 2022. (a) Session 1, FG5 #241 at MFRI-E. (b) Session 1, FG5 #109 at MFRI-W. (c) Session 2, FG5 #109 at MFRI-E. (d) Session 2, FG5 #241 at MFRI-W.

$$\Delta g = (-0.51 \pm 0.15) \mu\text{Gal} \quad (3)$$

という結果が得られた。  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\Delta g$  の定義は、今西・他 (2021) と同じである。  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\Delta g$  の推定誤差は一つの実験については同一であり、今西・他 (2021) では  $0.33 \mu\text{Gal}$  であったが、本研究ではそれよりも小さい  $0.15 \mu\text{Gal}$  となった。

式 (1) の右辺で、MFRI-W と MFRI-E の重力差  $\delta$  が負であることは、MFRI-E のほうが重力が大きいことを表す。2021年3月の検定実験においては、同じ値について  $(-5.42 \pm 0.33) \mu\text{Gal}$  という結果が得られていた

(付録 1 を参照)。本研究の結果は、推定誤差は小さくなったが、今西・他 (2021) の結果と誤差の範囲で一致するとは言えない。MFRI-W と MFRI-E の重力差がこの間に変化しなかったとすれば、いずれかの実験において測定に何らかの問題があった可能性がある。FG5 #109 は測定データの分布の skewness が大きくなる場合があり、今西・他 (2021) の Fig. 4 にもそのような傾向が見られる。skewness が大きいと、重力値の平均が真の値からシフトし、重力差などの推定にバイアスがかかるおそれがある。そのような問題は、今回の測定結果には見られない。いずれにしても、MFRI-E は

MFRI-W よりも約  $5\mu\text{Gal}$  だけ重力が大きいことはロバストな結果だと言えるが、もう一度同様の実験を行うことによって正確な重力差を確定する必要がある。

式 (2) の右辺で、FG5 #109 と FG5 #241 の相対的な器差  $\varepsilon$  が負であることは、FG5 #241 のほうが大きい値を示すことを表す。2021 年 3 月の検定実験においては、同じ値について、符号が反対の  $(+1.52 \pm 0.33)\mu\text{Gal}$  という結果が得られていた (付録 1 を参照)。FG5 #241 は、2021 年 5 月から 11 月にかけてオーバーホールを受けている。FG5 #109 を基準として、その器差が一定であったと仮定すると、FG5 #241 の器差は、オーバーホールの前後で  $3\mu\text{Gal}$  程度、変化したことがわかる。前節で、山麓 (富士山科学研究所 MFRI-E, FG5 #241) と中腹 (富士山 5 合目 SL5ST, FG5 #109) との重力加速度の差は  $(294,746.14 \pm 0.21)\mu\text{Gal}$  であったと述べたが、こうして得られた 2 台の絶対重力計の相対的な器差を補正すると、重力差の最終的な推定値は  $(294,744.68 \pm 0.25)\mu\text{Gal}$  となる。

セッション 1 とセッション 2 の間の重力変化としては、式 (3) のように、 $(0.51 \pm 0.15)\mu\text{Gal}$  の重力減少という結果になった。実験の直前にあった多量の降雨の影響が、この 2 日間の重力の時間変化として現れている可能性がある。

精密気圧計の設置位置が 2021 年 3 月の実験時と異なるという点に関しては、2021 年 3 月の結果と今回の結果とを比べる際に、2021 年 3 月の重力測定値に  $0.03\mu\text{Gal}$  を加える必要がある。このことは、本研究で推定された 2 つの測定点の間の重力差、および 2 台の重力計の間の器差には、影響を与えない。

#### 4. おわりに

本研究では、相対重力計の感度検定に使える測線を構築するため、富士山の山麓と中腹の 2 ヶ所において絶対重力の同時測定を行った。また、それに使用した 2 台の絶対重力計の器差の検定を、山麓において行った。最終結果として、山麓の点と中腹の点との重力加速度の差は  $(294,744.68 \pm 0.25)\mu\text{Gal}$  となった。この重力差の推定値は、短時間で移動可能な 2 地点間の重力差として十分な大きさであり、しかも  $10^{-6}$  の相対精度を有する。この結果、絶対重力値の決定という点に限れば、相対重力計の感度検定にとって理想的な測線を富士山に構築することができたと言えるだろう。

ただし、この重力差は、絶対重力計を設置した床面からの高さ  $130.0\text{cm}$  における値としての差である。実際に相対重力計を使って測定を行う際には、床面にじかに

重力計を置くのが普通であり、実用的な意味では、床面もしくは重力計のテストマスの位置における重力差がより重要であろう。たとえば、シントレックス CG-3 重力計の場合、三脚のセットアップによって多少変化するが、テストマスは床面からおおよそ  $25.0\text{cm}$  の位置にくる。床面からの高さ  $130.0\text{cm}$  における重力加速度の測定値を、本研究で使用した鉛直勾配 (付録 1) を使って床面からの高さ  $25.0\text{cm}$  における値に変換すると、MFRI-E では  $(979,566,161.81 \pm 2.27)\mu\text{Gal}$ 、SL5ST では  $(979,271,487.62 \pm 2.45)\mu\text{Gal}$  となる。したがって、床面からの高さ  $25.0\text{cm}$  で比較すれば、これらの点の間の重力差は  $(294,672.81 \pm 3.34)\mu\text{Gal}$  となる (重力計の器差を補正済み)。ここで誤差が大きくなった原因は、高さ  $130.0\text{cm}$  付近で測定した鉛直勾配を使ってより低い位置に変換する際に、誤差が増幅されることにある。相対精度が 1 ケタ落ちて  $10^{-5}$  になったとしても、相対重力計の感度検定ラインとして有用であることには変わりはない。

今西・他 (2021) は、絶対重力測定 of 長期的な連続性を確保するという観点から、系統誤差の要因となりうるルビジウム原子時計の周波数の測定を行い、経時変化について調べた。その結果、2 台の絶対重力計のうち、とくに FG5 #241 の原子時計の周波数には、長期的な低下傾向があることがわかった。本研究では、山麓における比較測定によって 2 台の絶対重力計の相対的な器差を検定しているので、かりに原子時計の周波数にずれがあったとしても、山麓と中腹の 2 ヶ所の重力の差の決定においてはその影響はない。今西・他 (2021) は、原子時計の周波数のずれによる影響を考慮に入れた場合には、2 台の絶対重力計の比較から得られた相対的な器差  $(1.62 \pm 0.33)\mu\text{Gal}$  は  $(2.11 \pm 0.33)\mu\text{Gal}$  と読みかえられるべきだと述べている。本研究における器差の検定結果も、今後実施する予定の原子時計の周波数測定の結果によっては、修正が必要となる可能性がある。

2 台の絶対重力計の器差を検定するための比較測定は、1 台をオーバーホールに出すごとに、同一の場所・方法で行うのが理想的である。私たちは、今後もおおよそ 2 年に 1 回の割合で、富士山科学研究所において同様の検定実験を行うことを計画している。そのようにすることで、同時に、この地点における長期的な重力変化のデータが蓄積されていく。富士山科学研究所の重力計基台における重力値は、たとえば FG5 #109 による MFRI-W での結果を見ると、2021 年 3 月の実験では  $(979,565,844.93 \pm 0.22)\mu\text{Gal}$  (付録 1; 気圧計の設置位置の違いを補正済み) だったのに対して、今回の実験 (9 月 26 日のデータ) では  $(979,565,852.73 \pm 0.10)\mu\text{Gal}$  となった。した



がって、2021年3月と比べて、今回の測定値は約8 $\mu$ Gal大きかったことになる。降雨の影響を含めて、このような重力変化を起こしている要因について詳しく調べることが必要である。

最後に、今回の絶対重力測定に合わせて、複数の研究機関により多数の相対重力計が富士山に持ち込まれ、山麓と中腹とを結ぶ往復測定や、山麓における連続測定が実施された。そのデータをもとにした相対重力計の感度検定などの分析については、本多・他(準備中)で詳しく議論されるはずである。

## 謝 辞

富士山5合目における絶対重力測定にあたっては、山梨県道路公社五合目管理棟の協力をいただきました。匿名の査読者からは有益なコメントをいただきました。本研究は、東京大学地震研究所共同利用(2022-B-04)、および文部科学省による「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)」の助成を受けたものです。

## 参考文献

- Francis, O., T.M. Niebauer, G. Sasagawa, F. Kloppling, and J. Gschwind, 1998, Calibration of a superconducting gravimeter by comparison with an absolute gravimeter FG5 in Boulder, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 7, 1075–1078. <https://doi.org/10.1029/98GL00712>
- Hinderer, J., D. Crossley, R.J. Warburton, 2007, Gravimetric Methods – Superconducting Gravity Meters, in “Treatise of Geophysics”, edited by G. Schubert, pp. 66–122.
- 今西祐一, 西山竜一, 本多 亮, 田村良明, 2021, 絶対重力計FG5 #109と#241の器差の検定について—東京および富士山における相互比較—, *測地学会誌*, **67**, 18–28. <https://doi.org/10.11366/sokuchi.67.18>
- Imanishi Y., K. Nawa, Y. Tamura, H. Ikeda, R. Honda, T. Okuda, M. Okubo, 2018, Combined use of a superconducting gravimeter and Scintrex gravimeters for hydrological correction of precise gravity measurements: a superhybrid gravimetry, in “International Association of Geodesy Symposia”, Springer, Berlin, Heidelberg, 2018. [https://doi.org/10.1007/1345\\_2018\\_31](https://doi.org/10.1007/1345_2018_31)
- 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. <https://doi.org/10.11366/sokuchi.47.243>
- Nakagawa, I., S. Nakai, R. Shichi, H. Tajima, S. Izutuya, Y. Kono, T. Higashi, H. Fujimoto, M. Murakami, K. Tajima and M. Funaki, 1983, Precise calibration of scale values of LaCoste & Romberg gravimeters and international gravimetric connections along the circum pacific zone (final report), Final report on “Precise calibration of scale values of LaCoste & Romberg gravimeters and contribution to the reform of the international gravity standardization net 1971”, 117 pp.
- Niebauer, T.M., G.S. Sasagawa, J.E. Faller, R.L. Hilt, and F. Kloppling, 1995, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, **32**, 159–180.
- 大久保修平, 2001, ハイブリッド重力観測で追う地震・火山活動 – 2000年三宅島火山活動と伊豆諸島群発地震活動, *地震ジャーナル*, **31**, 47–58.
- 大久保修平・高木朗充・新谷昌人・松本滋夫・福井敬一・孫文科, 2004, 富士山頂における絶対重力測定, *月刊地球号外*, **48**, 56–61.
- Okubo, S., S. Yoshida, T. Sato, Y. Tamura and Y. Imanishi, 1997, Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5 – Comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 489–492. <https://doi.org/10.1029/97GL00217>
- Onizawa, S., 2019, Apparent calibration shift of the Scintrex CG-5 gravimeter caused by reading-dependent scale factor and instrumental drift, *J. Geod.*, **93**, 1335–1345. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01247-9>
- 若林 環・風間卓仁・福田洋一・安部祐希・吉川 慎・大倉敬宏・今西祐一・西山竜一・山本圭吾, 2022, 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値依存性の検定, *測地学会誌*, **68**, 印刷中.
- 山佳典史・名和一成, 2020, 2年間の超伝導重力計観測データから推定される道東・弟子屈の季節的・経年的重力変化, *測地学会誌*, **66**, 16–22. <https://doi.org/10.11366/sokuchi.66.16>

(Received October 18, 2022)

(Accepted December 6, 2022)

## 付 録

### 1. 重力加速度の鉛直勾配について

絶対重力計 FG5 の場合、落体は地上からの高さ約130 cm から約110 cm まで、約20 cm の距離を落下する。この落下の間に重力加速度が変化することを考慮に入れるため、別途測定しておいた重力加速度の鉛直勾配の値を FG5 のコントローラーに入力する必要がある。地表における重力加速度の鉛直勾配(絶対値)は、地形が平坦であれば3.08 $\mu$ Gal/cm 付近の値をとるが、場所によってはそれから大きく異なる場合もある。入力した鉛直勾配が真の値からずれていると、測定された重力加速度にも誤差(0.1 $\mu$ Gal/cm のずれに対して1 $\mu$ Gal のオーダー)が生じるので、できるだけ正確な鉛直勾配の測定値を得ることが重要になる。

本研究では、富士山の山麓(MFRI-W および MFRI-E)と中腹(SL5ST)において絶対重力測定を実施するにあたり、重力加速度の鉛直勾配をそれぞれの場所で測定した。測定に用いた重力計は、シントレックス CG-3 重力計である。それをエレベーター付き三脚(HEWLETT PACKARD 10753B LASER TRIPOD)にのせ、エレベーターを上下に動かすことにより、重力値の変化を測定した。エレベーターを最も下げた状態と最も上げた状態において、CG-3 重力計のテストマスの位置(重力計の上面から20.1 cm)は、それぞれ床面からの高さ約

Table A1. Results of absolute gravity measurements at Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government in March 2021. A constant value of 979,565,000  $\mu\text{Gal}$  has been subtracted from the measured gravity values. These are the updates of Table 2 in Imanishi et al. (2021).

| Session Index $k$ | Site Index $i$ | Instrument Index $j$ | Site   | Serial Number | Number of Drops | Mean Gravity ( $\mu\text{Gal}$ ) | Standard Deviation ( $\mu\text{Gal}$ ) | Standard Error ( $\mu\text{Gal}$ ) |
|-------------------|----------------|----------------------|--------|---------------|-----------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| 1                 | 1              | 1                    | MFRI-E | #241          | 1346            | 848.79                           | 18.22                                  | 0.50                               |
|                   | 2              | 2                    | MFRI-W | #109          | 2230            | 844.90                           | 9.08                                   | 0.19                               |
| 2                 | 1              | 2                    | MFRI-E | #109          | 2561            | 851.67                           | 11.12                                  | 0.22                               |
|                   | 2              | 1                    | MFRI-W | #241          | 2217            | 844.73                           | 16.06                                  | 0.34                               |

108 cm および約 148 cm にあり、FG5 の落体の移動範囲をカバーしている。CG-3 重力計の READ TIME (1 回の測定積分時間) は 100 s とし、エレベーター位置を下、上、下の順に変えながら、それぞれ 10–15 サンプル程度のデータを取得した。重力計の床面からの高さは、位置を変えるごとに測定した。得られたデータには、潮汐と気圧の補正を行った。また、エレベーターを動かすのにもなって三脚の「脚」の部分による引力が変化するので、エレベーターを上げたときの測定値には 0.03  $\mu\text{Gal}$  を加算した。勾配測定の前後に、重力計を床面に置いて 30 分から 1 時間程度の測定を行い、CG-3 の線形ドリフトのレートを推定した。勾配測定を行なっている間はドリフトレートが一定であったと仮定して、ドリフトの補正を行なった。

3 つの地点における重力加速度の鉛直勾配の推定値は、それぞれ、MFRI-W において (2.979  $\pm$  0.019)  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ 、MFRI-E において (2.956  $\pm$  0.022)  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ 、SL5ST において (3.627  $\pm$  0.023)  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$  となった。MFRI-W は国土地理院の重力基準点 FGS (基準点コード GR0533816-FJY) と同じ基台上、約 9 cm 離れたところにある。国土地理院による FGS における勾配の測定値は 3.020  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$  (誤差表示なし) であり (国土地理院, 2018)、本研究の結果とほぼ一致している。MFRI-E における勾配は、これよりも有意に小さく、重力加速度の絶対値が異なることともあわせて、MFRI-W と MFRI-E とで周囲の地形の影響が異なっていることが示唆される。SL5ST における勾配は、地形が平坦である場合の値 3.08  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$  よりも約 0.55  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$  大きく、独立峰的な地形をもつ富士山の中腹という特殊な条件の影響が現れていると考えられる。

今西・他 (2021) は、2021 年 3 月の絶対重力測定において、MFRI-W、MFRI-E の両方に、重力加速度の鉛直勾配として国土地理院による測定値 3.020  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$  を適用していた。2021 年 3 月から 2022 年 9 月にかけて鉛直

勾配が時間的に変化しなかったと仮定して、今回の新たな鉛直勾配の測定値を 2021 年 3 月の絶対重力測定データに適用して再処理を行うと、MFRI-W および MFRI-E における重力値は Table A1 のようにアップデートされる。これを用いると、2021 年の実験時点において、MFRI-W と MFRI-E の重力差  $\delta$  は

$$\delta = (-5.42 \pm 0.33) \mu\text{Gal} \quad (\text{A1})$$

FG5 #109 と FG5 #241 の相対的な器差  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = (+1.52 \pm 0.33) \mu\text{Gal} \quad (\text{A2})$$

セッション 1 とセッション 2 の間の重力変化  $\Delta g$  は

$$\Delta g = (+1.35 \pm 0.33) \mu\text{Gal} \quad (\text{A3})$$

のように修正される。

## 2. 富士山における気圧補正について

精密重力測定において、現地で記録された気圧データ (平均値からの変化分) に一定のファクターを乗じたものが、気圧の影響の補正量として用いられる。このファクターはアドミッタンスと呼ばれ、測定地点の標高や気温などによって変化する。過去に重力の連続観測が実施されたことがあり、経験的に決定されたアドミッタンスが既知である場合は、その値を使用するのが適当である。それが不明である場合は、通常は 0.3  $\mu\text{Gal}/\text{hPa}$  という値が用いられる。アドミッタンスがこの程度の値をとることは、次のような簡単な考察から導かれる。測定地点は平坦な地表面上にあるとし、大気は等温かつ 1 次元的な構造であると仮定する。また、測定地点の上方の大気による引力のみを考える。測定地点の上方の高さ  $z$  から  $z + dz$  の範囲の大気の無限平板 (プーゲー板) による上向きの引力の加速度  $d\alpha$  は

$$d\alpha = 2\pi G\rho dz$$

で与えられる。ここで $G$ は万有引力定数、 $\rho$ は大気ของความ密度である。大気のスケーラハイトを $H$ 、測定地点の標高を $z_1$ とすると、大気による上向きの引力は、上式を高さ $z_1$ から無限大まで積分して

$$\alpha = \int_{z_1}^{\infty} 2\pi G\rho dz = 2\pi GH\rho_1$$

となる。ここで $\rho_1$ は測定地点の標高における大気ของความ密度である。気体の状態方程式を用いると、

$$\alpha = 2\pi GH \frac{p_1}{RT}$$

となる。ここで $R$ は気体定数、 $T$ は大気ของความ温度、 $p_1$ は測定地点における気圧である。したがって、 $p_1$ の変化 $\Delta p_1$ に対する重力加速度の変化 $\Delta\alpha$ の割合を表すアドミッタンスとしては、

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta p_1} = 2\pi GH \frac{1}{RT}$$

が得られる。 $H = 8 \times 10^3$  m、 $R = 287$  m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>、 $T = 300$  Kとすると、

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta p_1} = 3.9 \times 10^{-11} \text{ms}^{-2}\text{Pa}^{-1}$$

つまり 0.39  $\mu\text{Gal/hPa}$  となる。実際には、大気荷重による固体地球の変形の影響(直接の引力に比べて、大きさは1ケタ程度小さく、センスが逆)や、大気が実際には1次元的ではないことなどから、通常、(0.30–0.35)  $\mu\text{Gal/hPa}$  程度の値が観察される。今西・他(2021)においても、富士山科学研究所における重力データの気圧補正に、0.30  $\mu\text{Gal/hPa}$  という値が用いられた。仮にアドミッタンスの値に 0.01  $\mu\text{Gal/hPa}$  程度の誤差があったとしても、重力測定期間中によほど大きな気圧変動がなければ、気圧補正による誤差はほとんどの場合、無視できる。

富士山5合目では、過去に重力の連続観測が実施されたことがないので、大気補正のアドミッタンスの経験値というものがない。富士山5合目においては、アドミッタンスの値の選択に関して、注意が必要である。引力を及ぼす大気は、重力計の上方だけでなく、下方に

も存在するからである。上と同じような考え方から、測定地点の上方にある大気による上向きの引力は、

$$\alpha_{\text{UP}} = \int_{z_2}^{\infty} 2\pi G\rho dz = 2\pi GH\rho_2$$

で与えられる。ここで $z_2$ は富士山5合目の標高、 $\rho_2$ はそこでの大気ของความ密度である。一方、測定地点の下方にある大気による下向きの引力は、富士山麓から上方のみを考えると、

$$\alpha_{\text{DOWN}} = \int_{z_1}^{z_2} 2\pi G\rho dz = 2\pi GH(\rho_1 - \rho_2)$$

で与えられる。 $z_1$ は富士山麓の標高、 $\rho_1$ はそこでの大気ของความ密度である。これらを合わせた上向きの引力は

$$\alpha = \alpha_{\text{UP}} - \alpha_{\text{DOWN}} = 2\pi GH(2\rho_2 - \rho_1)$$

となる。したがって、

$$\alpha = 2\pi GH \frac{p_2}{RT} \left[ 2 - \exp\left(\frac{-(z_1 - z_2)}{H}\right) \right]$$

となる。 $p_2$ は富士山5合目における気圧である。現地気圧の変化 $\Delta p_2$ に対するアドミッタンスは

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta p_2} = 2\pi GH \frac{1}{RT} \left[ 2 - \exp\left(\frac{-(z_1 - z_2)}{H}\right) \right]$$

となる。 $z_1 = 1,029$  m、 $z_2 = 2,298$  mを代入すると、上式の大括弧内は 0.828 となる。富士山麓において大気補正のアドミッタンスとして 0.30  $\mu\text{Gal/hPa}$  という値を使うとすれば、それに 0.828 を乗じた値 0.25  $\mu\text{Gal/hPa}$  が、5合目におけるアドミッタンスとして適当であることがわかる。

本研究においては、富士山5合目における大気の影響の補正に、以上のように近似的に導かれたアドミッタンスを使用するが、より高精度の補正のためには、詳細な地形、山体の荷重変形、大気ของความ密度の2次元/3次元的分布などを考慮した補正方法の開発が必要である。

#### 参考文献

国土地理院 (2018), 基準点成果等閲覧サービス, <<https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/>>, (参照 February 28, 2021)