

ラコスト型相対重力計を用いた小田原～富士山間における キャンペーン相対重力測定（2022年9月）

風間 卓仁¹, 岡田 和見²

1: 京都大学 大学院 理学研究科

2: 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12月8日公開, 2023年3月13日修正)

1 はじめに

可搬型相対重力計はキャンペーン重力測定に使用されており、この測定データを用いることで重力加速度（重力）の時空間分布や地下の質量変動を把握することができる。可搬型相対重力計にはバネが内蔵されており、現場での読取值 x とメーカー提供の変換関数 $f(x)$ を用いることで重力値 $g_R = f(x)$ を算出することができる。しかし、メーカー提供の変換関数 $f(x)$ が真の変換関数と乖離していると、得られた重力値 $g_R = f(x)$ は系統誤差を有し、複数の重力計間で重力値が異なる（器差が生じる）という事態が起こりうる。

このような事態を避けるために、各相対重力計に対して変換関数の検定観測がしばしば行われてきた (e.g., Nakagawa et al., 1983)。具体的には、絶対重力値が既知の2点間を相対重力測定で結び、2種類の重力差（絶対重力差 Δg_A および相対重力差 Δg_R ）の比を取ることで、変換関数 $f(x)$ の補正係数（スケールファクター） S を算出できる。

$$S = \frac{\Delta g_A}{\Delta g_R} \quad (1)$$

このとき、相対重力計の真の変換関数 $F(x)$ は以下のように表現でき、この変換関数を用いて真の相対重力値 g'_R を得ることができる。

$$g'_R = F(x) = S \cdot f(x) \quad (2)$$

ただし、スケールファクター S を精度よく決定するためには数 100 mGal 以上の重力差が必要である。また、近年ではスケールファクターが読取值ごとに異なる値を有することも分かってきており (Onizawa, 2019; 若林ほか, 2022)、スケールファクターの読取值依存性を定量化するためにはさらに広い読取值帯域における検定観測が必須となる。しかしながら、大きな読取值の差を稼ぐためには（例えば日本列島の南北重力差を活用するなど）一般に長距離測線での検定観測が必要であるが、時間的および経済的観点からこのような検定観測を頻繁に実施するのは難しい。

そこで、東京大学地震研究所特定共同研究 2022-B-04 では、富士山の標高差を活用して重力差約 295 mGal の検定測線が定義された (今西ほか, 2022)。この重力差は京都大学～阿蘇・桜島間の重力差とほぼ同じであるが (若林ほか, 2022)、富士山では同程度の重力差を1日で往復測定することができ、時間や旅費を大幅に節約できる。しかも、富士山周辺では小田原～箱根大涌谷～芦ノ湖間で半年おきに相対重力測定が実施されており (風間ほか, 2019)、この測定の起点である神奈川県温泉地学研究所と富士山五合目を結べば約 500 mGal もの重力差を1日で稼ぐことができる。

以上の観点から、我々はラコスト型相対重力計のスケールファクターを検定するために、2022年9月に小田原～富士山麓～富士山五合目の間でキャンペーン相対重力測定を実施した。本稿ではこの重力測定の概要や測定結果を述べ、該当重力計に対して算出されたスケールファクター値を示す。

2 相対重力測定およびデータ解析

我々は3台のラコスト型相対重力計を用いて2022年9月30日に小田原～富士山間の相対重力測定を実施した。使用したラコスト重力計は、北海道大学所有のG031とG791、および京都大学所有のG534である。測定を実施した重力点は、始点から順に神奈川県小田原市・神奈川県温泉地学研究所のONKEN重力点(図1)、山梨県富士吉田市・山梨県富士山科学研究所のMFRI-FGS重力点(図2)、および山梨県南都留郡鳴沢村・富士山五合目休憩所のSL5ST重力点(図3)である。なお、これらの重力点の座標値は表1の上部に示している。重力点間の移動時間(京都大学の公用車を使用)はONKEN～MFRI間で約1時間半、MFRI～SL5ST間で約30分であり、朝8時台にONKENで測定を開始してから夕方16時半までにONKENでの復路測定を終えることができた。

その後、我々は現場で測定された読取値を重力値に変換し、器械高・潮汐変動・器械ドリフトの寄与を補正したのちに、ONKEN基準の相対重力値を算出した(データ解析方法の詳細は風間(2022)を参照)。ただし、後ほど各重力計のスケールファクターを見積もるため、読取値→重力値の変換にはメーカー提供の変換関数をそのまま用い、解析時にはスケールファクターの寄与を補正しなかった(すなわち、解析上はスケールファクターの値を便宜的に1.000000とした)。また、器械高補正時には典型的なフリーエア勾配値 $-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ を全ての重力点に使用した。

なお、山梨県富士山科学研究所には複数の重力点が存在している(今西ほか, 2021)。富士山研の環境生態実験棟には2つの基台が存在しており(図2c)、向かって左の基台の中心にはMFRI-E重力点がある。また、向かって右側の基台の中心には赤色マーカーで記されたMFRI-W重力点がある他に、中心近くには国土地理院の基準重力点「富士吉田」の金属標が存在している。本稿では国土地理院の金属標をMFRI-FGSと命名し、この直上の相対重力値を決定した。

3 相対重力値およびスケールファクター

ONKEN重力点を基準としたMFRI-FGS重力点およびSL5ST重力点の相対重力値を表1の下部に示す。相対重力値はMFRI-FGS重力点で -210.8 mGal 程度、SL5ST重力点で -505.4 mGal 程度であった。ただし、各重力点では3つの重力計の間に $161 \mu\text{Gal}$ および $202 \mu\text{Gal}$ の器差が存在している。これは各重力計のスケールファクターが1.0ではないこと、および各重力計のスケールファクターが互いに異なっていることを意味している。

表2の上部は各重力点間の絶対重力差を取りまとめている。今西ほか(2022)は2022年9月21日～22日にSL5ST重力点で、および9月26日～27日にMFRI-W重力点で絶対重力計FG5-109による絶対重力測定を実施した。この測定値に基づくと、2点間の絶対重力差は $-294745.91 \mu\text{Gal}$ と計算できる。ただし、この重力差は重力点高さ130 cmにおける絶対重力値の差分なので、絶対重力値を高さ130 cmから高さ0 cmに化成すると、MFRI-W～SL5ST間の絶対重力差は $-294661.67 \mu\text{Gal}$ と計算できる。また、MFRI-W重力点(床面上)とMFRI-FGS重力点(金属標上)では高さが1.3 cm異なること(今西ほか, 2021)を考慮すると、MFRI-W～MFRI-FGS間の鉛直重力差は $-3.93 \mu\text{Gal}$ 、およびMFRI-FGS～SL5ST間の絶対重力差は $\Delta g_A = -294657.74 \mu\text{Gal}$ と計算できる。

ここで、表1の相対重力データを用いてMFRI-FGS～SL5ST間の相対重力差 Δg_R を求め、かつ上述の絶対重力差 Δg_A との比を取ると、各重力計のスケールファクター S を式(1)によって推定することができる。表2の下部はこのようにして推定された各重力計のスケールファクター S を示しており、重力計ごとに異なる値を有していることが分かる。若林ほか(2022)によるとG534重力計のスケールファクターは1.0001～1.0003の範囲の値を有しており、本研究のスケールファクター値(1.00014848)は若林らの結果とも調和的である。

4 さいごに

我々は3台のラコスト型相対重力計を検定するため、2022年9月に小田原～富士山麓～富士山五合目の測線で相対重力測定を実施した。我々の相対重力測定および今西ほか(2022)の絶対重力測定に基づくスケールファクターの値は表2のように推定でき、G534重力計に関しては先行研究(若林ほか, 2022)の値と調和的であることを確認した。ただし、本稿ではスケールファクターの読取值依存性(Onizawa, 2019; 若林ほか, 2022)について十分に検討していないので、本測定で得られたデータを用いてスケールファクターについて今後より深い議論が必要である。また、本測定データを用いれば小田原・温泉地学研究所の絶対重力値を決定することができ、これを過去の絶対重力測定値(岩瀬ほか, 2006)と比較すれば小田原および箱根地域の重力時空間変動や箱根火山活動に関わる質量変動を把握できるものと期待される。

なお、今西ほか(2022)は2022年9月20日～29日の期間において、富士山科学研究所や富士山五合目休憩所にある複数の重力点で絶対重力測定を複数回実施している。そのため、今西ほか(2022)に記載されている絶対重力値のうちどれを参照するかによって、MFRI-FGS～SL5ST間の絶対重力差 Δg_A や各重力計のスケールファクター S の計算結果がわずかに変化するようである。本稿においては、特定の絶対重力計(FG5-109)で取得された絶対重力値に着目し、2022年9月21日～22日にSL5ST重力点で測定された絶対重力値と、9月26日～27日にMFRI-W重力点で測定された絶対重力値を使用した(表2)。しかしながら、測定日時の異なる絶対重力値の組み合わせを使用することで、陸水変動といった重力時間変化の寄与が無視できなくなる可能性もある。このように、今西ほか(2022)の絶対重力値を引用してスケールファクターを推定する際には、使用する絶対重力値の選択や重力時間変化の定量的評価に注意を要する。

付録

本稿にはZIP形式で圧縮されたデータファイルを添付している。各重力計について2つのファイルが準備されており、Gxxx-220930.datが現場読取值をまとめたデータファイル、およびGxxx-220930.txtが各種補正を施した後の相対重力値の解析結果である(xxxは各重力計の製造番号)。データファイルには各重力計の変換関数 $f(x)$ や、各重力点における読取時刻・読取值・器械高などの情報が記載されている。スケールファクターの読取值依存性を検証する際には、このデータファイルまで戻って読取值を確認すれば、読取值とスケールファクターの対応関係を見出せるはずである。

謝辞

本測定は東京大学地震研究所特定共同研究2022-B-04「重力観測の高度化に基づく固体地球ダイナミクス研究の新展開」の助成を受けて実施された。また、本研究は文部科学省「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)」、JSPS科研費22K03777、および京都大学防災研究所一般共同研究2022G-08の研究の一環で実施された。

本測定を実施するにあたり、安部祐希氏(神奈川県温泉地学研究所)、本多亮氏(山梨県富士山科学研究所)、および山梨県道路公社五合目管理棟の皆さまにご協力いただいた。本稿の執筆にあたり、今西祐一氏(東京大学地震研究所)には富士山五合目休憩所の外観写真(Fig. 3c)をご提供いただいた。

参考文献

- 今西ほか (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. doi: 10.11366/sokuchi.67.18
- 今西ほか (2022): 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—, 東京大学地震研究所彙報, 97, 1–11. doi: 10.15083/0002005972
- 岩瀬ほか (2006): A-10 型絶対重力計で得られた温泉地学研究所の絶対重力値, 神奈川県温泉地学研究所報告, 38, 27–30.
- 風間ほか (2019): 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 (2022): LaCoste & Romberg 型重力計を用いた重力加速度の相対測定, 京都大学学術情報リポジトリ, 15 pp. doi: 10.14989/276327
- Nakagawa et al. (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.
- Onizawa (2019): Apparent calibration shift of the Scintrex CG-5 gravimeter caused by reading-dependent scale factor and instrumental drift, J. Geod., 93, 1335–1345. doi: 10.1007/s00190-019-01247-9
- 若林ほか (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值依存性の検定, 測地学会誌, 68, 49–68. doi: 10.11366/sokuchi.68.49

更新履歴

2022 年 12 月 8 日 (初版): 本稿を京都大学学術情報リポジトリ (KURENAI) 上で公開。

2023 年 3 月 13 日 (第 2 版): 参考文献 (今西ほか, 2022; 若林ほか, 2022) の詳細情報や、絶対重力データの使用に関する注意点を追記。

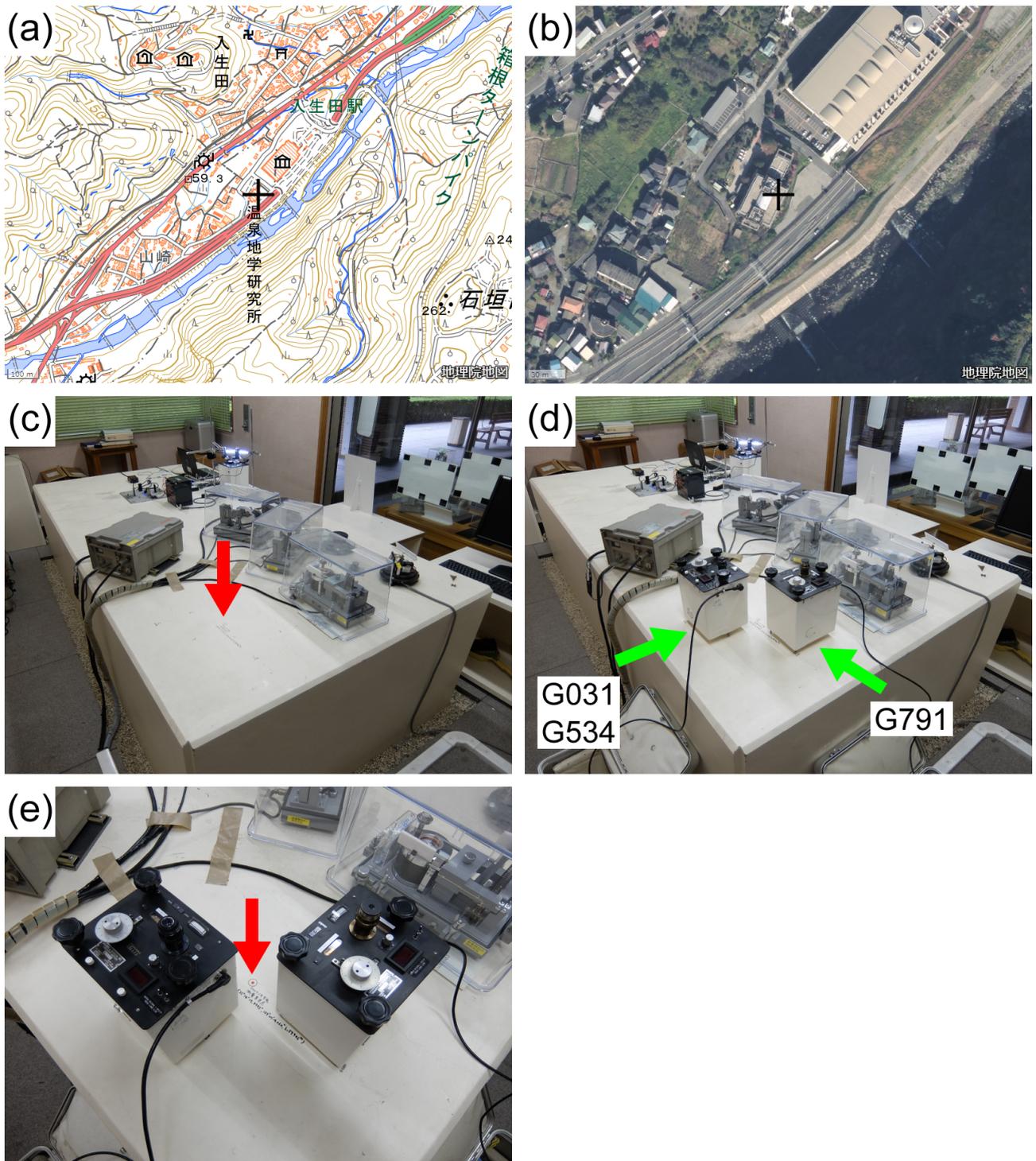


図 1: 神奈川県温泉地学研究所の ONKEN 重力点 (赤矢印) における相対重力測定の様子。(a)–(b) は地理院地図ウェブサイトより。緑矢印は各相対重力計の設置方向を意味している。

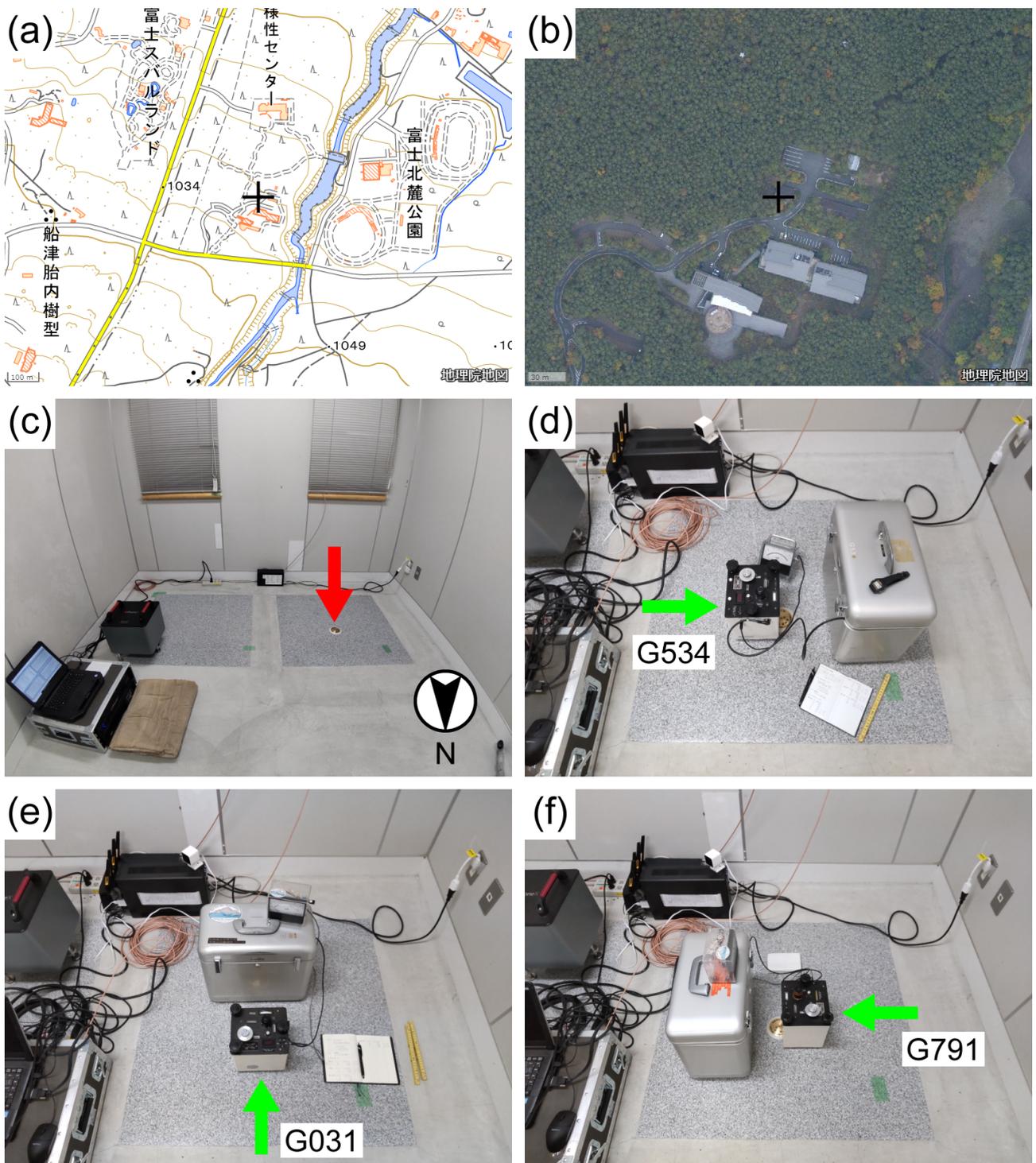


図 2: 山梨県富士山科学研究所の MFRI-FGS 重力点 (赤矢印が指し示す金属標) における相対重力測定の様子。(a)–(b) は地理院地図ウェブサイトより。緑矢印は各相対重力計の設置方向を意味している。

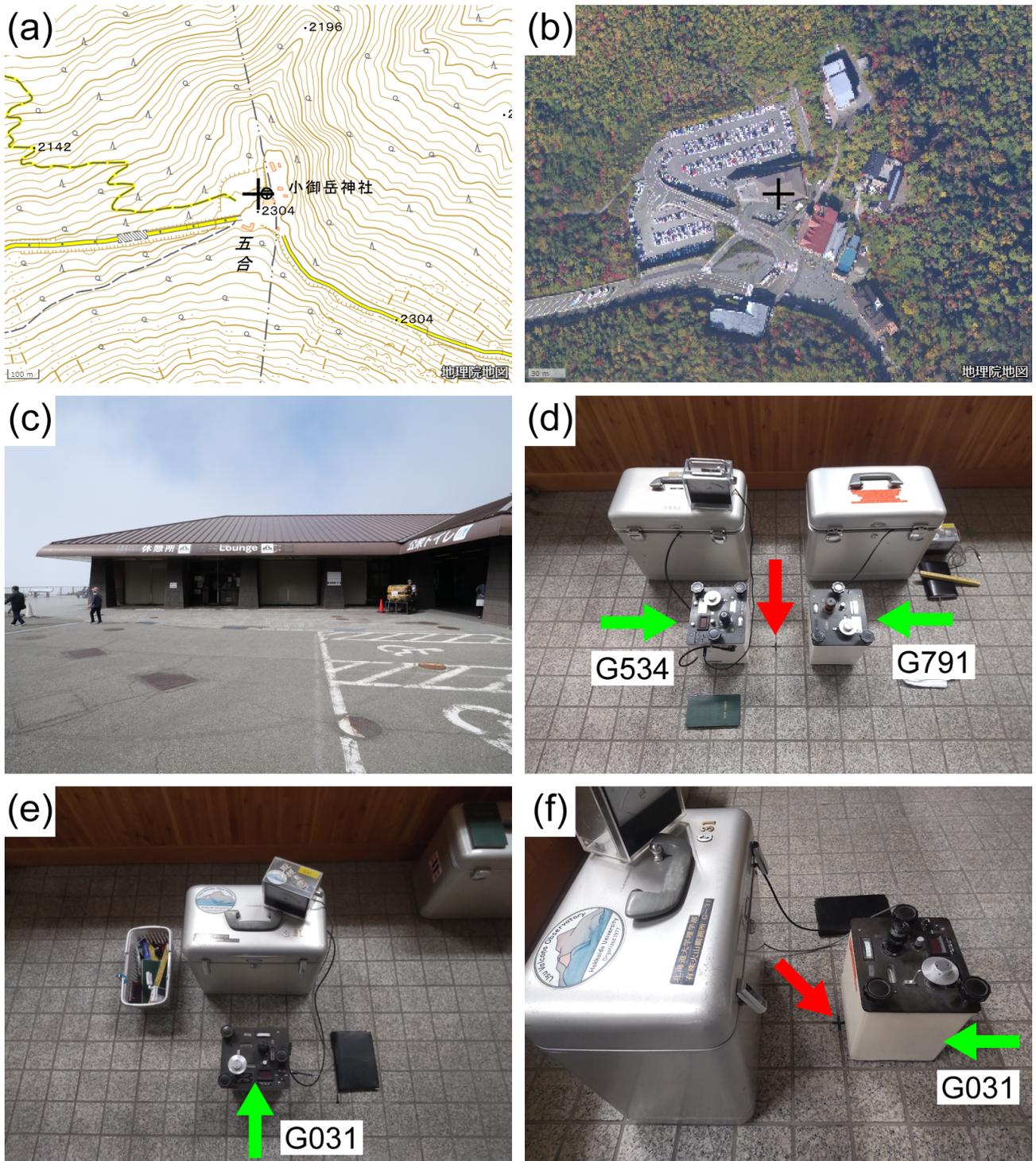


図 3: 富士山五合目休憩所の SL5ST 重力点 (赤矢印) における相対重力測定の様子。(a)–(b) は地理院地図ウェブサイトより。(c) は東京大学地震研究所・今西祐一氏の撮影による。緑矢印は各相対重力計の設置方向を意味している。

表 1: 各重力点の座標値と、各重力点で 2022 年 9 月に測定された相対重力値。座標値出典に関する記号は、(a) 地理院地図ウェブサイト、および (b) 基準点成果等閲覧サービスを意味している。

各重力点の座標値

重力点名	ONKEN	MFRI-FGS	SL5ST
緯度 [deg]	35.238241	35.453539	35.394822
経度 [deg]	139.120495	138.762560	138.732841
標高 [m]	57.3	1029.39	2298.3
座標値出典	(a)	(b)	(a)

各重力点の相対重力値 [mGal]

重力点名	ONKEN	MFRI-FGS	SL5ST
G031	0.000	-210.739	-505.362
G534	0.000	-210.819	-505.433
G791	0.000	-210.900	-505.564

表 2: 重力点間の重力差と、各重力計のスケールファクター。出典に関する記号は、(a) 今西ほか (2022)、(b) 今西ほか (2021)、および (c) 基準点成果等閲覧サービスを意味している。

	MFRI-FGS	MFRI-W	SL5ST	Scale factor	Reference
AG at 130 cm height		979565852.73	979271106.82		(a)
AG difference		0.00	-294745.91		
Gravity gradient		-2.979	-3.627		(a)
AG 0 cm height		979566240.00	979271578.33		
AG difference		0.00	-294661.67		
Benchmark height	1.3				(b)
Gravity gradient	-3.020				(c)
AG difference	-3.93	0.00			
AG at 0 cm height	979566236.07				
AG difference	0.00		-294657.74		
RG difference by G031	0		-294623	1.00011793	
RG difference by G534	0		-294614	1.00014848	
RG difference by G791	0		-294664	0.99997877	