

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）

風間卓仁^{*1}・安部祐希^{*2}・原田昌武^{*2}・加藤照之^{*2}

Repeated relative gravity measurements in Hakone Volcano from July 2018 to October 2019

by

Takahito KAZAMA^{*1}, Yuki ABE^{*2}, Masatake HARADA^{*2} and Teruyuki KATO^{*2}

1. はじめに

重力観測は火山内部の質量移動を把握するのに最適な手法の1つである。例えば、2000年三宅島噴火の際には、北側山麓の測候所における絶対重力値の連続観測および島内の水準点約30点における相対重力値の繰り返し観測が実施され、これらの観測によって得られた重力時空間変化からマグマ移動や地下空洞形成といった質量変動がモデル化された (Furuya *et al.*, 2003)。また、2004年浅間山噴火の際には火口の東約4 kmの地点において絶対重力連続観測が実施され、陸水流動に伴う重力擾乱を物理モデルで補正することによって、火道内マグマの上昇/下降に伴う約5 μGal (ただし $1 \mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$) の重力変化が抽出された (Kazama *et al.*, 2015)。

本研究の研究対象である箱根火山においては、地下構造を把握する目的で1960年代以降定期的に相対重力計による多点重力測定が行われてきた (e.g., Yokoyama and Saito, 1965)。近年では、横山ほか (2002) が神山や駒ヶ岳において相対重力測定を実施し、神山直下にドーム状の基盤構造が潜在していることを示した。岩瀬ほか (2006) はA-10型絶対重力計を用いて温泉地学研究所の基台上で絶対重力測定を実施し、2006年7月の絶対重力値として $979\,776\,891.05 \pm 4.59 \mu\text{Gal}$ を得た。しかしながら、これらの重力測定は静的重力場の把握を主目的として行われており、重力時間変化の解明を目的とした高頻度な重力測定はこれまで実施されてこなかった。箱根火山では2001年以降数年に一回の頻度で群発地震が発生し、特に2015年には大涌谷で小規模な水蒸気噴火が発生する (e.g., Mannen *et al.*, 2018) など活発な火山活動が続いているため、重力時空間変化の観点から箱根火山直下の質量変動を継続的に把握すること

が重要である。

そこで我々は、箱根火山における重力時空間変動を検出することを目的として、箱根火山周辺の計10地点を重力点として選定し、2018年7月～2019年10月の期間内の計6日間において相対重力測定を実施した。本稿では第2章で重力点の位置を示し、第3-4章で2018年7月～2019年10月に実施した相対重力測定やデータ解析の詳細を述べる。その上で、第5章では相対重力値の推定結果を示し、その時間変化について考察する。

2. 重力点の選定

箱根火山で相対重力測定を実施するに当たり、我々は以下の3つの条件を満たす重力測線を事前に検討した。①箱根火山の活動域を含む、②火山活動に伴う地殻変動や重力変化の寄与を無視できるような遠方の重力点を含む、③各重力点の近傍で地殻変動観測が実施されている。条件①を満たすために、我々は2015年の火山活動時にダイクが貫入した領域 (Honda *et al.*, 2018; 本稿図1aの白線矩形) や、水蒸気噴火が発生した大涌谷 (Mannen *et al.*, 2018) の近傍に重力測定点を選定した。また、条件②を満たすために、我々は温泉地学研究所 (大涌谷の東約9 km) や芦ノ湖畔 (大涌谷の西約2.5 km) を重力点に選定した。さらに、条件③を満たすために、我々は電子基準点93068近傍の箱根中学校に重力点を選定し、他の場所についても精密水準測量 (村瀬ほか, 2018) の水準点ないしその近傍の点を重力点と定義した。

本研究で選定した重力点を図1～図4に黄色のピンで示し、重力点の座標値を表1に示す。まず、図1a

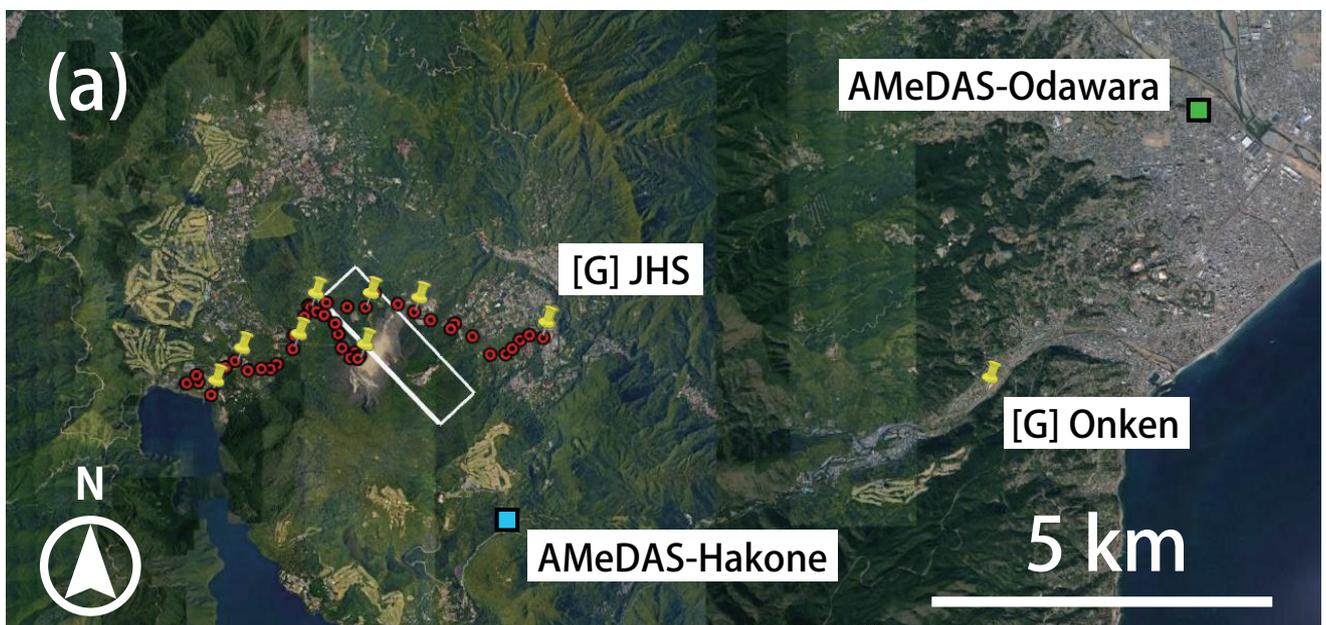
*1 京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

*2 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田586

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第51巻, 25-36, 2019

表 1 箱根重力点の座標値および近隣水準点との対応。

Gravity Point		Latitude [deg]	Longitude [deg]	Altitude [m]	Nearest Leveling Point	
Name	詳細				Name	Distance [m]
Onken	温泉地学研究所	35.23832	139.12060	57	n.a.	n.a.
JHS-old	箱根中学校階段	35.24565	139.04924	554	93068A	18
JHS-new	箱根中学校玄関	35.24566	139.04902	556	93068A	33
SkatePark	旧スケート場	35.24922	139.02802	798	734-11B	0
Kamiyu	上湯バス停	35.24954	139.02073	868	734-10	0
T-junction	三叉路	35.24951	139.01181	937	734-07	0
Owakudani	大涌谷地蔵裏倉庫	35.24270	139.01981	1044	734-01	35
Ubako	姥子バス停	35.24410	139.00911	885	735-04	17
Togendai	桃源台駅駐車場	35.23791	138.99578	738	75-04	0
LakeArena	星槎レイクアリーナ	35.24221	138.99996	792	75-01A	38



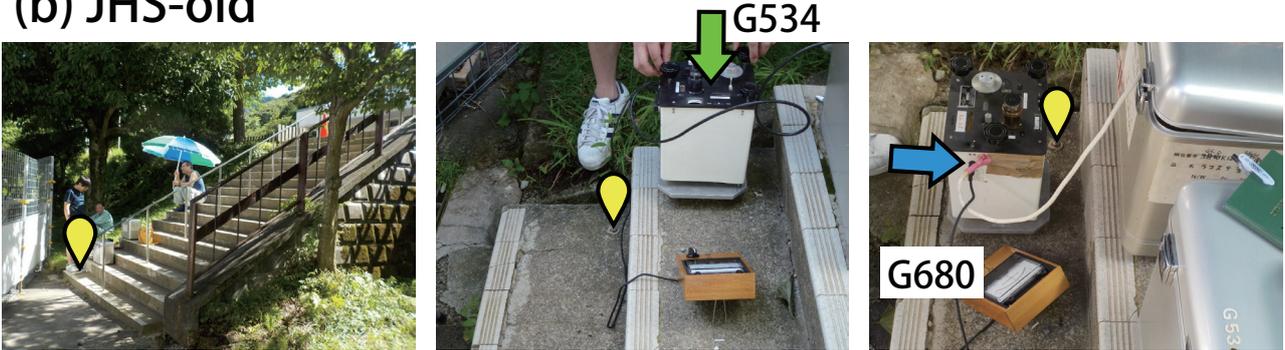
(b) Onken



図 1 (a) 箱根火山周辺の測地・気象観測点の分布。背景には Google Earth Pro の衛星画像を用いており、黄色ピンは重力点、赤色丸印は水準点 (村瀬ほか, 2018)、白線矩形は 2015 年箱根火山活動時の貫入ダイク (Honda *et al.*, 2018)、水色四角は箱根アメダス観測点、緑色四角は小田原アメダス観測点を示している。なお、貫入ダイクを示す矩形のうち、最も地表に近い 1 辺を白色太線で示している。(b) 温泉地学研究所の重力点 Onken の周囲の様子。黄色ピンは重力点の位置、緑色と青色の矢印はそれぞれラコスト重力計 G534 および G680 の設置方向を意味している。



(b) JHS-old



(c) JHS-new

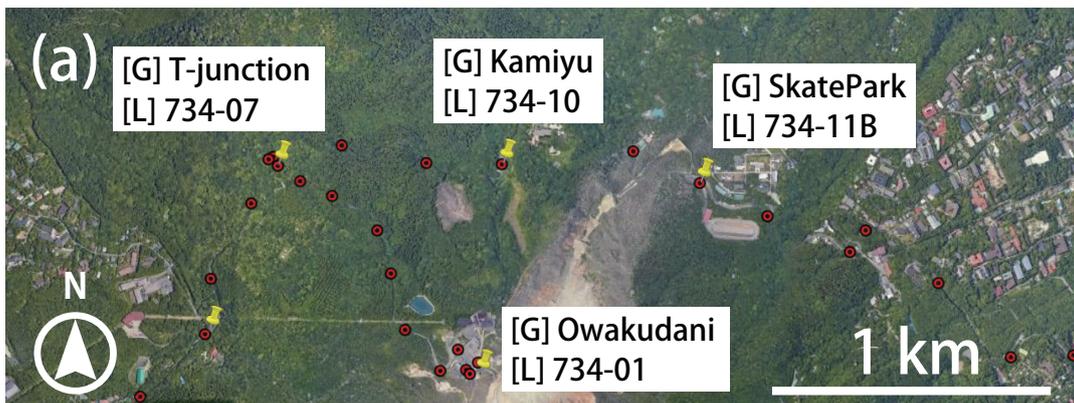


図2 (a) 箱根中学校の測地観測点の分布。背景には Google Earth Pro の衛星画像を用いており、黄色ピンは重力点 JHS-old および JHS-new、赤色丸印は電子基準点 93068 を示している。なお、図中では重力点および電子基準点を [G], [L] と略記している。(b) 箱根中学校屋外の重力点 JHS-old。(c) 箱根中学校玄関の重力点 JHS-new。図 (b)-(c) において、黄色ピンは重力点の位置、緑色と青色の矢印はそれぞれラコスト重力計 G534 および G680 の設置方向を意味している。

は箱根火山から小田原市に至る広域の衛星画像であり、重力点（黄色ピン）・地殻変動観測点（水準点および電子基準点；赤丸）・ダイク貫入位置（白線矩形；Honda *et al.*, 2018）を示している。なお、図 1a に描かれている重力点は 9 点であるが、箱根中学校（JHS）には旧点と新点を設けたため、重力点の数は合計 10 点である。このうち、温泉地学研究所の重力点 Onken の様子を、LaCoste & Romberg 型相対重力計（ラコスト重

力計）の設置位置と共に図 1b に示す。地震計基台表面に記載された赤色のマーカーを中心として、向かって左にラコスト重力計 G534 を、向かって右にラコスト重力計 G680 を設置している。なお、この 2 つの重力計の位置関係は他の重力点でも同じ設定にしている。

箱根中学校における重力点の位置を図 2a に示す。当初は電子基準点 93068 至近の階段上に重力点 JHS-old（図 2b）を置いていたが、その後この階段が改修工事の



(b) SkatePark



(c) Kamiyu



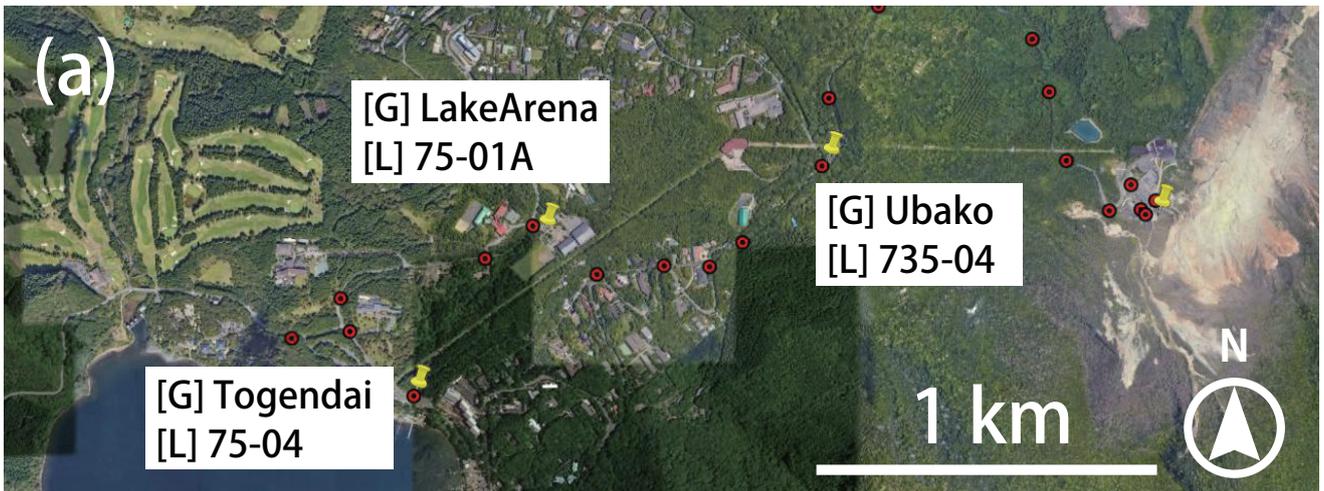
(d) T-junction



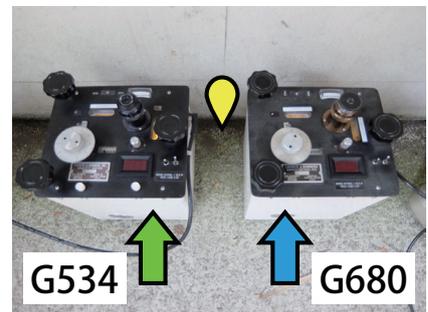
(e) Owakudani



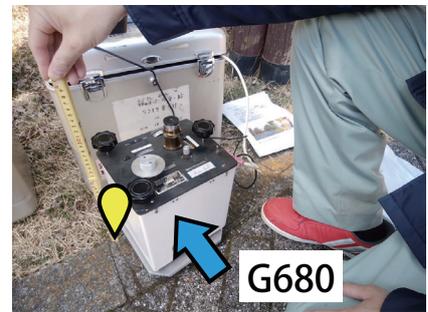
図3 (a) 大涌谷周辺の測地観測点の分布。背景には Google Earth Pro の衛星画像を用いており、黄色ピンは重力点、赤色丸印は水準点、[G] は重力点の名称、[L] は至近の水準点の名称を示している。(b) 旧スケート場入口付近の重力点 SkatePark。(c) 上湯バス停付近の重力点 Kamiyu。(d) 三叉路付近の重力点 T-junction。(e) 大涌谷の重力点 Owakudani。図 (b)-(e) において、黄色ピンは重力点の位置、緑色と青色の矢印はそれぞれラコスト重力計 G534 および G680 の設置方向を意味している。



(b) Ubako



(c) LakeArena



(d) Togendai



図4 (a) 芦ノ湖～大涌谷付近の測地観測点の分布。背景には Google Earth Pro の衛星画像を用いており、黄色ピンは重力点、赤色丸印は水準点、[G] は重力点の名称、[L] は至近の水準点の名称を示している。(b) 姥子バス停の重力点 Ubako。(c) 星槎レイクアリーナ敷地内の重力点 LakeArena。(d) 桃源台駅前駐車場の重力点 Togendai。図 (b)-(d) において、黄色ピンは重力点の位置、緑色と青色の矢印はそれぞれラコスト重力計 G534 および G680 の設置方向を意味している。

エリア内に位置していることが判明したため、我々は改修工事済みの校舎玄関付近に新たな重力点 JHS-new を選定した（図 2c）。なお、2019 年 10 月 17 日には 2 つの重力計（G534 および G680）を用いて新旧重力点間の重力差を測定した。これにより、今後新点 JHS-new で重力測定を実施した場合でも、新点～旧点間の重力差を加算することで、あたかも旧点 JHS-old における測定値とみなすことができる（第 5 章で詳述）。

図 3a の黄色ピンは、箱根中学校～大涌谷の測線上にある 4 つの重力点を示している。このうち、SkatePark（図 3b）・Kamiyu（図 3c）・T-junction（図 3d）については既存の水準点（村瀬ほか，2018）をそのまま重力点として利用している。一方、重力点 Owakudani は、観光客や道路交通による地面振動を避けるため、大涌谷延命地蔵尊裏手の倉庫入口に重力点を選定した。この重力点は、至近の水準点 734-01 から約 35 m 東側に位置している。

図 4a の黄色ピンは、大涌谷～芦ノ湖畔の測線のうち、三叉路（重力点 T-junction）よりも西側に位置する 3 つの重力点である。このうち、Togendai（図 4d）については既存の水準点 75-04 をそのまま重力点として利用している。一方、Ubako（図 4b）と LakeArena（図 4c）については水準点の至近に重力点を選定しており、重力点～至近水準点間の距離はそれぞれ約 17 m および約 38 m である。なお、これら 3 つの重力点のうち大涌谷から最も遠い点は Togendai（図 4d）であるが、実際の重力測定では道路の線形上 LakeArena（図 4c）を端点とし、LakeArena～Togendai～Ubako の順番で重力測定を実施している。

3. 相対重力測定

我々は 2018 年 7 月～2019 年 10 月の期間中の計 6 日間、箱根火山周辺の重力点（第 2 章参照）で相対重力値を測定した。測定に用いた重力計は京都大学理学研究科所有のラコスト重力計 2 台（G534 および G680）であり、G534 は 2017 年度中に、G680 は 2019 年度上期にオーバーホールを済ませている。なお、ラコスト重力計を含め、可搬型パネ式相対重力計の観測精度は 10 μ Gal 程度と言われている（坪川，2005）。

実際の測定においては、ある日の朝に重力測線の起点（Onken または LakeArena）にて重力値および器械高を測定し、測線上の次の重力点に移動して同様の測定を実施する。その後、昼ごろまでに全重力点での測定を済ませたら、今度は測線上を逆向きに移動しながら各重力点での測定を再度実施し、夕方までに全重力点での復路の

測定を終了させる。なお、各重力点で器械高を測定するのは器械高変化に伴う重力変化を補正するためであり、1 日内で重力値を往復測定するのは器械ドリフトに伴う重力値の見かけ変化を補正するためである（次章で詳述）。以降、各日の重力測定に関する詳細を述べる。なお、2 つの相対重力計の測定実施日や測定箇所は表 2 および表 3 にも記載している。

- 2018 年 7 月 10 日には温泉地学研究所を起点として箱根中学校の旧点を含む計 6 点（Onken, JHS-old, SkatePark, Kamiyu, T-junction, Owakudani）で重力測定を実施した。重力測定には 2 台のラコスト重力計（G534, G680）を用いた。
- 2019 年 3 月 14 日には温泉地学研究所を起点として箱根中学校の新点を含む計 6 点（Onken, JHS-new, SkatePark, Kamiyu, T-junction, Owakudani）で重力測定を実施した。重力測定には 2 台のラコスト重力計（G534, G680）を用いた。
- 2019 年 3 月 15 日には星槎レイクアリーナ箱根を起点とした計 4 点（LakeArena, Togendai, Ubako, Owakudani）で重力測定を実施した。重力測定には 2 台のラコスト重力計（G534, G680）を用いた。
- 2019 年 5 月 31 日には、5 月 19 日に箱根山の噴火警戒レベルが 1 から 2 に引き上げられたことを受けて、緊急で重力測定を実施した。測定に使用した重力計は G534 の 1 台のみであり、G680 はオーバーホール中であったため使用できなかった。重力測定は起点の温泉地学研究所を含め計 9 点で実施したが、駒ヶ岳から大涌谷にかけての地震活動が活発化し大涌谷への立ち入りが認められなかったため、重力点 Owakudani では重力測定を実施できなかった。
- 2019 年 10 月 16 日には温泉地学研究所～箱根中学校～大涌谷の測線で重力測定することを計画していたが、台風 19 号の上陸に伴う 10 月 12 日の大雨によって箱根町内の多くの道路が通行止めになった。また、重力測定時の道路迂回に長時間を要したため、この日の重力測定は起点を含めて 4 点（Onken, T-junction, Owakudani, Ubako）に留まった。なお、重力測定に用いた重力計は G534 と G680 の 2 台であった。
- 2019 年 10 月 17 日には、2 台のラコスト重力計（G534, G680）を用いて温泉地学研究所および箱根中学校新旧点の計 3 点（Onken, JHS-old, JHS-new）で重力測定を実施した。

この他、2019 年 1 月 22 日には別のラコスト重力計

D58 を用いて箱根中学校の新旧重力点間 (JHS-old ~ JHS-new) の相対重力測定を実施した。しかしながら、中学校の改修工事に伴う地面振動の影響で、重力測定値の標準偏差が通常時の 10 倍程度 (数十 μGal) にまで大きくなった。このことから、新旧重力点間の重力差を精度良く見積もることは不可能と判断したため、これ以降 2019 年 1 月 22 日の測定結果を本稿内で紹介することは控える。

4. 相対重力データ解析

我々は取得した相対重力データを以下の 5 つのプロセスに沿って解析し、最終的な相対重力値を見積もった。まず 1 つ目は読取値から重力値への変換である。そもそも、ラコスト重力計は内部にバネを有しており、実際のフィールド測定では測定者が各重力点でバネの長さ x を読み取り記録する。フィールド測定の終了後、読取値 \rightarrow 重力値の変換関数 $f(x)$ を用いて重力値 $g=f(x)$ を計算する。なお、この変換関数には重力計納入時に製造元から発行された変換表を用いる。

2 つ目のプロセスはスケールファクター補正である。製造後長期間が経過すると、相対重力計内部のバネが経年的に劣化するなどして変換関数 $f(x)$ が製造時の値からわずかに変化することが知られている (e.g., 中川ほか, 1977)。相対重力計で正しい重力値を得るためには、絶対重力計と相対重力計の比較観測により変換関数の補正係数 c を事前に決定しておき、重力値を $g=c \cdot f(x)$ として見積もればよい。このとき、補正係数 c をスケールファクター、読取値 \rightarrow 重力値の変換時に定数 c を掛け合わせる作業のことをスケールファクター補正と呼ぶ。実際、本研究で使用した 2 つのラコスト重力計は製造から 30 年以上が経過し、スケールファクターの寄与が無視できないことが判明していた。そこで、2016 年 ~ 2018 年にこれらの重力計のスケールファクター検定観測が行われ、G534 のスケールファクターが 1.000232 (風間ほか)、G680 のスケールファクターが 1.000305 (Fukuda *et al.*, 2017) と推定された。そこで本研究では、2016 年 ~ 2018 年に推定されたこれらの値を用いて、箱根火山で取得したデータのスケールファクター補正を実施する。

3 つ目のプロセスは器械高補正である。一般に重力計は重力点よりも高い位置に設置されるので、重力点の重力値を知るためには重力点 ~ 重力計間の重力差を補正する必要がある。そこで我々は、現場の重力測定時に重力点 ~ 重力計間の比高 (すなわち器械高) を別途測定し、重力読取値とともに野帳に記録した。その後のデータ解

析においては、地球表面の重力鉛直勾配の代表値である $3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ (フリーエア勾配) を器械高に掛け合わせ、この値を器械高補正值として重力測定値に足し合わせた。

4 つ目のプロセスは潮汐補正である。そもそも地球表面上には地球の自転や月の公転などに伴って潮汐力が働いており、この影響で重力値は日周 ~ 半日周の周期で最大 $150 \mu\text{Gal}$ も時間変化している。この値はラコスト重力計の観測精度 ($10 \mu\text{Gal}$ 程度) よりも十分に大きく、潮汐重力変化を補正しなければ各重力点の重力値を正しく得ることができない。そこで本研究は、Tamura(1982) のプログラムを用いて各重力点および各時刻の潮汐重力変化量を予測計算し、実際の重力観測値からこの潮汐予測値を差し引いた。

5 つ目のプロセスは器械ドリフト補正である。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。そこで本研究は、器械ドリフトが時間に対して 1 次の関数で表現できると仮定し、以下のような方法で器械ドリフトを補正する。

まず、説明上の簡単化のために重力点が A, B, C の 3 点存在し、かつ $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ のように 6 回の重力測定を実施した状況を考える。このとき、重力点 i における j 回目の重力測定値 g_{ij} は以下のように表現できる。

$$g_{A1} = g_A \quad (1-1)$$

$$g_{B2} = g_B + a (t_2 - t_1) \quad (1-2)$$

$$g_{C3} = g_C + a (t_3 - t_1) \quad (1-3)$$

$$g_{C4} = g_C + a (t_4 - t_1) + b \quad (1-4)$$

$$g_{B5} = g_B + a (t_5 - t_1) + b \quad (1-5)$$

$$g_{A6} = g_A + a (t_6 - t_1) + b \quad (1-6)$$

ここで、右辺の第 1 項は各重力点の真の重力値 g_i 、第 2 項は器械ドリフトの時間変化成分、第 3 項は器械ドリフトの往復差成分を意味している。また、 t_j は j 回目の測定時刻、 a および b は器械ドリフトに関する未知パラメーターである。

次に、上記 6 式で同じ重力点に関する 2 式同士を差し引くと以下の 3 式が得られる。

$$g_{A6} - g_{A1} = a (t_6 - t_1) + b \quad (2-A)$$

$$g_{B5} - g_{B2} = a (t_5 - t_2) + b \quad (2-B)$$

表2 ラコスト重力計 G534 で取得された相対重力値 (単位: μGal)。

Year	2018	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019
Month	7	3	3	3	5	10	10	10
Day	10	14	15	All	31	16	17	All
Ref. Point	Onken	Onken	LakeArena	Onken	Onken	Onken	Onken	Onken
Onken	0	0		0	0	0	0	0
JHS-old	-93588				-93588		-93578	-93578
JHS-new		-94624		-94602	-94608		-94605	-94605
SkatePark	-146138	-146175		-146141	-146154			
Kamiyu	-159332	-159361		-159325	-159347			
T-junction	-175799	-175816		-175776	-175803	-175774		-175774
Owakudani	-200386	-200432	-54004	-200432		-200383		-200383
Ubako			-17506	-163934	-163898	-163872		-163872
Togendai			11211	-135217	-135184			
LakeArena			0	-146428	-146395			
Max. Error	7	4	10	10	7	13	3	13

$$g_{C4} - g_{C3} = a(t_4 - t_3) + b \quad (2-C)$$

このうち、左辺は重力測定値の往復差、右辺の括弧内は往復測定の時刻差を意味しており、どちらも既知量である。すなわち、時刻差を X 軸、重力差を Y 軸とする 2 次元グラフを描画すると、グラフ上の 3 点を通る直線の傾きが a 、および Y 切片が b となる。ただし、実際の重力測定値 g_{ij} は測定誤差を含んでいるので、グラフ上の 3 点は一直線上には並ばないことが多い。このような場合には、グラフ上の点に直線回帰を適用すれば最適なパラメーター (a, b) を 1 組得ることができる。

以上の方法で (a, b) を決定すれば、各重力点の重力値 (g_A, g_B, g_C) を式 (1-1) ~ (1-6) から計算できる。ただし、上述の通り重力測定値 g_{ij} は測定誤差を含んでいるので、例えば式 (1-1) から得られる g_A と、式 (1-6) から得られる g_A の値が異なる場合がある。この際には両式から得られる g_A の値を平均化することで、これを g_A の代表値とすればよい。最後に、重力測線の起点の重力値を差し引くことで、起点に対する相対重力値を $\Delta g_{A \rightarrow B} = g_B - g_A$ および $\Delta g_{A \rightarrow C} = g_C - g_A$ のように決定できるのである。なお、本稿では説明上の簡単化のために重力点数が 3 点の場合について説明したが、重力点が 4 点以上存在する場合についても全く同じ方法で相対重力値を決定できる。

5. 測定結果および考察

前章の解析方法によって得られた相対重力値 (単位: μGal) を表 2 と表 3 に示す。表 2 はラコスト重力計 G534 で、表 3 はラコスト重力計 G680 で得られた相対重力値である。表の各コラムは各年月日の重力測定結果を意味しており、各コラムの上部には相対重力の

基準重力点 (Reference Point) を、また各コラムの下部には器械ドリフト推定における重力測定値と回帰直線のずれの最大値 (Maximum Error) を記している。なお、2019 年 3 月と 10 月については各月で 2 回の相対重力測定が実施されたため、表中にはこの 2 回の測定結果を結合したコラムを追加しており、このコラムについては日 (Day) を All と記している。

器械ドリフト推定における重力測定値と回帰直線のずれの最大値 (Maximum Error) は 1 ~ 19 μGal であり、一般的な相対重力計の観測誤差 (10 μGal 程度; 坪川, 2005) の 2 倍以内に収まっている。このことから、2018 年 7 月 ~ 2019 年 10 月の測定では相対重力計の性能に匹敵するような高精度な相対重力値を取得できたと言える。なお、2018 年 7 月と 2019 年 3 月には G680 で Maximum Error が 15 μGal を超えているが、最大誤差を取った地点は両日とも上湯バス停重力点 Kamiyu であった。このことは、G680 重力計および Kamiyu 重力点という組み合わせで特に測定誤差が大きくなることを示しているが、その明確な理由については現時点では不明である。ただし、Kamiyu 重力点は県道に近接していることから、車の通過に伴う地面振動が G680 の重力測定誤差を拡大させていたのかもしれない。実際の重力測定でより正確な重力値を取得するには、現場で十分な測定時間を確保した上で、交通の影響が少ない時間帯に重力値を読み取る必要がある。

ここで、温泉地学研究所 Onken を基準とした相対重力値に注目すると、箱根山上の重力値は Onken よりも小さく、大涌谷 Owakudani で最も小さな値 ($-200 \times 10^3 \mu\text{Gal}$ 程度) となっている。これは地球表面の重力鉛直勾配が負の値を取るためであり、箱根山上の各重力

表3 ラコスト重力計 G680 で取得された相対重力値 (単位: μGal)。

Year	2018	2019	2019	2019	2019	2019	2019
Month	7	3	3	3	10	10	10
Day	10	14	15	All	16	17	All
Ref. Point	Onken	Onken	LakeArena	Onken	Onken	Onken	Onken
Onken	0	0		0	0	0	0
JHS-old	-93561					-93621	-93621
JHS-new		-94570		-94570		-94626	-94626
SkatePark	-146087	-146136		-146136			
Kamiyu	-159273	-159320		-159320			
T-junction	-175710	-175789		-175789	-175813		-175813
Owakudani	-200345	-200368	-54005	-200368	-200402		-200402
Ubako			-17483	-163846	-163902		-163902
Togendai			11208	-135155			
LakeArena			0	-146363			
Max. Error	18	19	9	19	1	10	10

点の標高が Onken よりも高いことを反映している。また、Onken ~ Owakudani 間の相対重力値を標高差 (987 m) で割ると、 $-2.03 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ という勾配値が得られる。この勾配の絶対値はフリーエア勾配 ($-3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$) の絶対値よりも小さいが、この原因は箱根火山自身の質量が Owakudani 重力点で下向き万有引力 (つまり重力増加) をもたらしているためである。なお、本研究で得られた勾配値 ($-2.03 \mu\text{Gal}/\text{cm}$) を物理的に検証するには、地形分布や地下密度構造に伴う重力空間分布を定量的にモデル化する必要がある (e.g., 横山ほか, 2002)。

次に、箱根中学校における新旧 2 つの重力点 (JHS-new および JHS-old) の重力差に着目すると、新点 JHS-new の方が旧点 JHS-old よりも重力値が $1000 \mu\text{Gal}$ 程度小さくなっている。この原因は、前段落で述べたのと同様に、JHS-new の標高が JHS-old よりも高いためである。また、JHS-new に対する JHS-old の重力差は、G534 で $+1024 \mu\text{Gal}$ (2019 年 5 月 31 日と 10 月 17 日の測定値の平均より)、G680 で $+1005 \mu\text{Gal}$ (2019 年 10 月 17 日の測定値より) である。新旧 2 地点間の重力差が 2 つの重力計で異なる理由は、新点 JHS-new における 2 つの重力計の設置場所が水平方向に約 2 m 離れており (図 2c)、この 2 地点間の重力差を無視できないためと考えられる。一方で、旧点 JHS-old については金属標のごく近傍に 2 つの重力計を設置したため (図 2b)、重力計の設置場所による重力値の違いは十分無視できると考えられる。

そもそも、重力観測によって各重力点の重力値およびその時間変化を精度良く知るためには、重力点に関して以下の条件が満たされている必要がある。[1] 重力点直下の地盤が安定していて地面振動が少ない、[2] 複数の

重力計を重力点周辺に置いたときに重力計の設置場所による重力差が十分に小さい、[3] 重力点に破損や亡失の恐れがない。箱根中学校の 2 つの重力点についてこの 3 つの条件を当てはめると、[1] については建物屋内に位置している新点、[2] については前段落の通り旧点、[3] については建物改修工事済みの新点の方が有利である。新点は条件 [2] において不利であるが、新点での重力測定値に新点 ~ 旧点間の重力差を足し合わせれば旧点の重力値を見積もることができ、条件 [2] の問題点も解決される。そこで本研究では、今後箱根中学校では新点 JHS-new での重力測定を実施し、かつデータ解析時に新点 ~ 旧点間の重力差 (G534 では $+1024 \mu\text{Gal}$ 、G680 では $+1005 \mu\text{Gal}$; これらの重力差は時間的に変化しないと仮定) を足し合わせることで、旧点 JHS-old で重力を測定したとみなすことにする。

5.1. 相対重力値の器差

図 5 は 2 台のラコスト重力計で得られた相対重力値のうち、G534 の重力値 $g(G534)$ を X 軸に、G680 と G534 の重力差 $g(G680) - g(G534)$ を Y 軸にプロットしたグラフである。本研究で使用した 2 つの重力計については 2016 年 ~ 2018 年にかけてスケールファクターの校正観測が実施されているので (Fukuda *et al.*, 2017; 風間ほか)、本来であれば 2 つの重力計で得られた測定値は完全に一致し、全ての測定値が X 軸に乗るはずである。しかしながら、実際の 2018 年 7 月 ~ 2019 年 3 月の測定値では、 $g(G534)$ の絶対値が大きくなるにつれて $g(G680) - g(G534)$ の値が X 軸から次第に離れていく様子が分かる。この原因としては、G534 および G680 のスケールファクターが先行研究内 (Fukuda

et al., 2017; 風間ほか) で十分な精度で決定できていない可能性が考えられる。また、2018年7月と2019年3月の測定値に原点を通るような1本の直線を回帰させると、その傾きは -0.000306 ± 0.000035 と計算できる(図5の青色破線)。このことは、G680とG534のスケールファクターの相対的なずれが0.000306であることを意味しており、「G680の真のスケールファクターがFukuda et al. (2017)の推定値よりも大きい」または「G534の真のスケールファクターが風間ほかの推定値よりも小さい」という可能性を示唆している。すなわち、今後これらの相対重力計を用いて正しい相対重力値を得るためには、絶対重力・相対重力の並行観測の実施、あるいは過去の並行観測データの再解析などを通して、2台のスケールファクターを精度良く再決定すべきである。

一方、2019年10月の測定値はグラフ中の第3象限内に位置しており、多くの測定値が第2象限内に位置していた2018年7月～2019年3月の測定値の傾向と

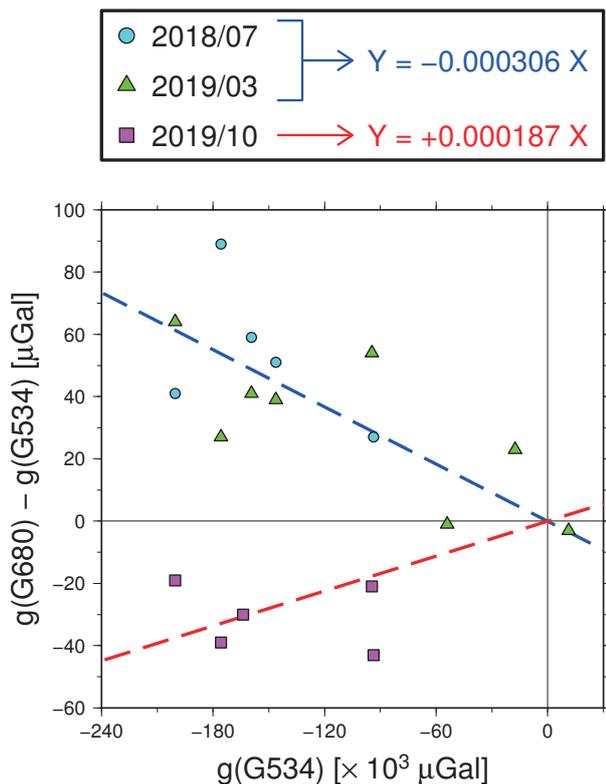


図5 G534の相対重力値 $g(G534)$ に対する相対重力値の器差 $g(G680)-g(G534)$ 。水色丸印は2018年7月、緑色三角印は2019年3月、ピンク色四角印は2019年10月に測定された相対重力データを示している。また、青色破線は2018年7月～2019年3月の相対重力データに対する回帰直線、赤色破線は2019年10月の相対重力データに対する回帰直線を示している。

異なっている。この原因としては、2019年度上期実施のG680のオーバーホールの影響で、G680のスケールファクターが時間変化した可能性が考えられる。実際に2019年10月の測定値に原点を通るような1本の直線を回帰させると、その傾きは $+0.000187 \pm 0.000047$ と計算できる(図5の赤色破線)。つまり、G534(本研究の対象期間中にオーバーホール未実施)のスケールファクターの時間変化を無視できると仮定すると、G680の実際のスケールファクターはオーバーホール前後で $(+0.000187) - (-0.000306) = 0.000493$ だけ小さくなったと考えられるのである。このことは、G680で取得された相対重力値は2019年度上期を挟んで連続性が失われており、2019年度上期の前後におけるG680の相対重力時間変化は偽の変動を含んでいる、ということの意味している。この問題点を解決するためには、オーバーホール前後(2018年度まで、および2019年度下期以降)でG680のスケールファクターを別々に推定し、その上で過去にG680で取得された重力データを再解析する必要がある。

5.2. 大涌谷の相対重力時間変化

図6aは温泉地学研究所Onkenを基準点とした大涌谷Owakudaniの相対重力値の時間変化を示している。なお、G680については2019年度上期の前後で重力変化の連続性が失われているので(前小節参照)、この図ではG534の相対重力変化のみを示している。また、このグラフでは2018年7月におけるOwakudaniの相対重力値を基準値に取っており、Owakudaniの重力測定値と器械ドリフトとのずれを誤差バーとして描いている。大涌谷の相対重力値は2018年7月と2019年10月でほぼ同じ値を取っているが、2019年3月の重力値はそれらよりも50 μGal 程度小さくなっている。重力減少の理由として一般的に挙げられるのが「地面隆起」や「重力点直下の質量減少」であるが、今回の場合最も可能性が高いのは陸水質量の減少である。一般に降水量は夏～秋に多く冬～春に少ないため、地中の陸水貯留量は年周期的に変化する。また、火山頂上部の降水量は山麓部よりも多くなる傾向があり、しかも降水に対する重力応答は地形形状の影響で頂上部の方が大きくなる(風間ほか, 2014)。その結果、陸水変動起源の重力擾乱は山麓部よりも頂上部の方が大きくなるので、山麓～頂上間の相対重力測定では陸水重力擾乱が相殺されずに残ってしまうのである。

実際に箱根芦之湯(図1aの水色四角)の降水量は年周期的に変動しており、しかも小田原(図1aの緑色四角)

の降水量に対して約2.1倍も多い(図6b)。このことから、山麓～山頂間(今回の場合は Onken～Owakudani)の相対重力値にも年周期的な陸水重力擾乱が含まれていると考えられる。今回観測された相対重力変化(図6a)を今後より定量的に評価するには、陸水重力擾乱の時空間変動を精度よくモデル化する必要がある(e.g., 風間ほか, 2014)。また、陸水重力擾乱の高精度なモデル化が実現できれば、重力測定値から陸水擾乱の寄与を補正し、かつ火山活動に伴う重力変化が抽出できるものと期待される(e.g., Kazama *et al.*, 2015)。

6. まとめ

我々は箱根火山の地下質量変動を把握するため、箱根火山周辺の計10点において2018年7月～2019年10月に相対重力の繰り返し測定を実施した。この期間内に実施した相対重力測定は計6回で、測定には京都大学所有のラコスト重力計G534およびG680を用いた。本研究における主な結論は以下の2点である。

- 温泉地学研究所 Onken に対する大涌谷 Owakudani の重力値は夏～秋に増加、および冬～春に減少という傾向を示しており、箱根山内部における陸水収支の年周変動を反映していると考えられる。本研究で観測された重力変化を今後定量的に評価するには、陸水変動に伴う重力変化を陸水モデル(e.g., 風間ほか, 2014; Kazama *et al.*, 2015)に即して精度良く再現することが必要である。また、陸水起源の重力変化を観測データから差し引くことで火山活動起源の重力変化を抽出し、箱根火山の活動推移を質量変動の観点から議論できるものと期待される。
- 2台のラコスト重力計(G534 および G680)で得られた相対重力値には観測誤差を超えるほどの有意な器差が存在し、かつ器差の傾向は2019年上期の前後で変化していることが分かった。この原因としては、両重力計のスケールファクターが先行研究内(Fukuda *et al.*, 2017; 風間ほか)で十分な精度で決定できていないこと、および2019年上期におけるG680のオーバーホールによってG680のスケールファクターが時間変化したことが考えられる。今後は絶対重力・相対重力の並行観測を実施するなどして、両重力計のスケールファクターを精度良く決定する必要がある。なお、本稿内で示したG680の相対重力値(表3)は2019年上期の前後で連続性が失われているので、今後G680の測定値を用いて重力時間変化を議論する際には注意を要する。

我々は今後も定期的に箱根火山周辺で相対重力測定を実施し、箱根火山の重力時空間変化を監視する予定である。具体的には、今回使用したものと同一2台の相対重力計(G534 および G680)を用いて、JHS-oldを除く計9箇所の重力点(図1～4; 表1)で毎年2回の相対重力測定を実施することを計画している。重力測定の時期は3月および10月を想定しており(2019年についても同時期に測定済み; 表2～3参照)、これにより陸水変動起源の年周期的な重力擾乱を低減し(e.g., Sun *et al.*, 2010)、火山活動起源の重力変化をより直接的に把握できるものと期待される。

謝辞

日本大学の村瀬雅之氏には箱根火山に設置された水準点(村瀬ほか, 2018)の座標値を提供いただいた。本稿の重力点・水準点の描画にはGoogle Earth Proの衛星画像データをおよびグラフの作成には描画ソフトGMT(Wessel and Smith, 1998)を使用した。第5章の議論においては、気象庁アメダス観測点(箱根および

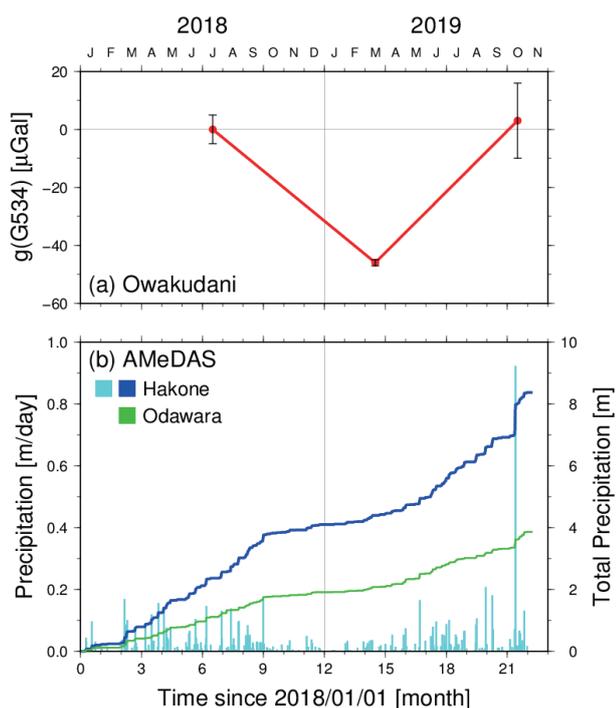


図6 (a) ラコスト重力計 G534 で観測された、温泉地学研究所 Onken に対する大涌谷 Owakudani の相対重力時間変化。この図では2018年7月の相対重力値を基準値に取っており、Owakudaniの重力測定値と器械ドリフトとのずれを誤差バーとして描いている。(b) 水色棒グラフと青色実線は箱根アメダス観測点における日別降水量および通算降水量、緑色実線は小田原アメダス観測点における通算降水量を示している。

小田原) の降水データを気象庁ウェブサイトよりダウンロードし、図 6b として描画した。原稿の修正に当たっては、道家涼介氏と本多亮氏より細部に渡る有益な助言を頂いた。以上、ここに記して感謝いたします。

参考文献

- Fukuda Y., Takiguchi H., Kazama T., Nishijima J., Gulyaev S., Natusch T., Amos M., Stagpoole V., Pearson C. (2017) New absolute gravity measurements in New Zealand, IAG Symposia, 148, 95-101.
- Furuya M., Okubo S., Sun W., Tanaka Y., Oikawa J., Watanabe H., Maekawa T. (2003) Spatiotemporal gravity changes at Miyakejima Volcano, Japan: Caldera collapse, explosive eruptions and magma movement, *J. Geophys. Res.*, 108 (B4), 2219.
- Honda R., Yukutake Y., Morita Y., Sakai S., Itadera K., Kokubo K. (2018) Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model, *Earth Planets Space*, 70, 117.
- 岩瀬康行・江口孝雄・鈴木攻祐・本多亮・棚田俊收 (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. *湿地研報告*, 38, 27-30.
- 風間卓仁・山本圭吾・福田洋一・井口正人 (2014) 相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性: 桜島火山を例に, *測地学会誌*, 60, 73-89.
- Kazama T., Okubo S., Sugano T., Matsumoto S., Sun W., Tanaka Y., Koyama E. (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.
- 風間卓仁・吉川慎・長縄和洋・宮内佑典・大倉敬宏・福田洋一 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), *東大地震研彙報*.
- Mannen K., Yukutake Y., Kikugawa G., Harada M., Itadera K., Takenaka J. (2018) Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan: geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis, *Earth Planets Space*, 70, 68.
- 村瀬雅之・森濟・李楊・片野凱斗・原田昌武・道家涼介・萬年一剛・安部祐希・竹中潤・松島健・手操佳子・内田和也・森田花織・古賀勇輝・中元真美・宮町凜太郎・市村美沙 (2018) 精密水準測量によって検出された箱根火山 2015 年噴火後の上下変動 (2015-2017), *日本地球惑星科学連合 2018 年大会*, SVC41-P26.
- 中川一郎・里村幹夫・福田洋一・中井新二・瀬戸孝夫・太島和雄・井内登・萩原幸男・田島広一・井筒屋貞勝・柳沢道夫・花田英夫・友田好文・藤本博巳・古田俊夫・大川史郎 (1977) ラコスト重力計 (G 型) の定数検定, *測地学会誌*, 23, 63-73.
- Sun W., Miura S., Sato T., Sugano T., Freymueller J., Kaufman M., Larsen C.F., Cross R., Inazu D. (2010) Gravity measurements in southeastern Alaska reveal negative gravity rate of change caused by glacial isostatic adjustment, *J. Geophys. Res.*, 115, B12406.
- Tamura Y. (1982) A computer program for calculating the tide-generating force, *Publ. Int. Latitude Obs. Mizusawa*, 16 (1), 1-20.
- 坪川恒也 (2005) 重力の測定, *精密工学会誌*, 71, 1335-1338.
- Wessel P., Smith W.H.F. (1998) New, improved version of generic mapping tools released, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579-579.
- Yokoyama I., Saito T. (1965) Preliminary report on a gravimetric survey on Volcano Hakone, Japan. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, VII-2, 239-245.
- 横山泉・棚田俊收・萬年一剛 (2002) 箱根火山地域における補足的重力測定 (1999 年), *湿地研報告*, 33, 1-10.