

## 伊豆大島における火山活動の解明と活動評価への適用に向けた合同重力観測

鬼澤真也<sup>1)\*</sup>・西山竜一<sup>2)</sup>・今西祐一<sup>2)</sup>・大久保修平<sup>2)</sup>・安藤 忍<sup>1)</sup>・長岡 優<sup>1)a)</sup>・島村哲也<sup>1)</sup>・平山康夫<sup>3)b)</sup>・石原昂典<sup>3)c)</sup>・松田健助<sup>3)d)</sup>・金子祐也<sup>3)</sup>・上田義浩<sup>3)b)</sup>・谷田部史堯<sup>3)</sup>・渡邊篤志<sup>2)</sup>・安藤美和子<sup>2)</sup>・坂下至功<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 気象庁気象研究所

<sup>2)</sup> 東京大学地震研究所

<sup>3)</sup> 気象庁地震火山部

a) 現在：神奈川県温泉地学研究所

b) 現在：気象庁東京管区气象台

c) 現在：気象庁大気海洋部

d) 現在：気象庁福岡管区气象台

## Cooperative Gravity Measurements in Izu-Oshima for Revealing Subsurface Volcanic Processes and Application to Evaluation of Volcanic Activities

Shin'ya Onizawa<sup>1)\*</sup>, Ryuichi Nishiyama<sup>2)</sup>, Yuichi Imanishi<sup>2)</sup>, Shuhei Okubo<sup>2)</sup>, Shinobu Ando<sup>1)</sup>, Yutaka Nagaoka<sup>1)a)</sup>, Tetsuya Shimamura<sup>1)</sup>, Yasuo Hirayama<sup>3)b)</sup>, Takanori Ishihara<sup>3)c)</sup>, Kensuke Matsuda<sup>3)d)</sup>, Yuya Kaneko<sup>3)</sup>, Yoshihiro Ueda<sup>3)b)</sup>, Fumiaki Yatabe<sup>3)</sup>, Atsushi Watanabe<sup>2)</sup>, Miwako Ando<sup>2)</sup> and Shikou Sakashita<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

<sup>2)</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

<sup>3)</sup> Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency

a) Currently at Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

b) Currently at Tokyo Regional Headquarters, Japan Meteorological Agency

c) Currently at Global Environment and Marine Department, Japan Meteorological Agency

d) Currently at Fukuoka Regional Headquarters, Japan Meteorological Agency

### Abstract

Microgravity measurements were conducted in Izu-Oshima volcano by Earthquake Research Institute (ERI), The University of Tokyo and Meteorological Research Institute (MRI), Japan Meteorological Agency in order to investigate subsurface volcanic processes. In 2018, ERI and MRI launched a cooperative observational study to better understand these processes and to apply the data to evaluation of volcanic activity. In the cooperative observation, hybrid absolute and relative gravity measurements were conducted to obtain the absolute gravity changes for the whole island. Further, it was intended for the data to be utilized for constraining instrumental properties such as the scale factor of relative gravimeters. The reading-dependent scale factor for the CG-5#033 relative gravimeter obtained in a previous study was checked using gravity values from the two absolute gravity sites at the volcano as well as additional calibration measurement data from sites of the Japan Gravity Standardization Net 2016. We verified that the scale factor correction worked effectively, so that apparent gravity changes of uncorrected data are sufficiently suppressed, and that the corrected gravity differences coincide well with the reference gravity differences obtained at the absolute

---

\*e-mail: sonizawa@mri-jma.go.jp (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

gravity sites. The hybrid absolute and relative gravity measurements conducted in November every year from 2018 to 2021 revealed the absolute gravity changes for the whole island. The observed yearly gravity changes reached a maximum of  $39\mu\text{Gal}$ . Relative gravity changes obtained by the CG-5 #033 since 2008 show large gravity disturbances of about  $80\mu\text{Gal}$ , particularly between sites with larger altitude differences. Such observed yearly absolute gravity changes and large relative gravity disturbances cannot be explained solely by the free-air effects predicted by GNSS ellipsoidal height changes and  $-0.3086\text{mGal/m}$  of vertical gradient of the normal gravity, and are probably caused by infiltration of meteoric water into the volcanic edifice. At the central cone, Mt. Mihara, where continuous subsidence is observed by GNSS, a continuous gravity increase has also been observed. The rate of the observed gravity increase is  $6.6\text{--}11.1\mu\text{Gal/year}$ , which is higher than  $3.5\text{--}3.6\mu\text{Gal/year}$ , the value predicted by free-air effects. Currently, the cause of such large residual gravity changes is uncertain. Possible causes include gravitational effects by a continuous contractive deformation and mass relocation due to frequent collapses of the crater wall, which occurred at Mt. Mihara, as well as mass addition at depth: specifically, magma intrusion into subsurface void spaces as often reported in basaltic volcanoes.

**Keywords:** gravity measurement, Izu-Oshima volcano, scale factor

## 1. はじめに

伊豆大島火山では、1986年のマグマ噴火からすでに36年が経過している。19世紀以降は噴出量  $10^7\text{ ton}$  オーダーの噴火を30–40年程の間隔で繰り返してきたこと(例えば、川辺, 1998)、マグマ蓄積を示唆する継続的な山体膨張が観測されてきたこと(例えば、鬼澤, 2013)から、次期噴火も視野に入れた準備を進めていく必要がある。重力は地下の質量・密度分布を反映することから、その時間変化を追跡することにより、マグマや地下水等の流体の蓄積・移動に関して、他観測項目では得られない独立した情報を抽出できる可能性を有している。

東京大学地震研究所、気象研究所の伊豆大島における精密重力観測の歴史は長く、1986年噴火の際には、割れ目噴火に伴う重力変化の検出とこれを説明するための開口断層に伴う重力変化の理論モデル構築(Okubo and Watanabe, 1989)、マグマ後退期の重力変化から後退したマグマの頭位(Watanabe *et al.*, 1998)や位置(小泉・他, 1988)の推定といった理論面及び同火山のマグマ活動の理解に貢献してきた。地震研究所では1986年噴火以降も精密観測を継続するとともに、近年は多くの火山で絶対重力計と相対重力計によるハイブリッド観測を実施している。特に、絶対重力計の導入は、相対重力測定における様々な不確定要因を低減するとともに、浅間山等の事例のように連続観測によって火道径やマグマ頭位変化を推定するまでに至っている(大久保, 2005)。一方、気象研究所は、2004年より伊豆大島における相対重力測定を再開した(高木・他, 2010)が、測定データや重力計特性の点で活動モニタリングに利用するには多くの課題を残していた。その後、重力計個体特性の評

価、天水浸透に伴うと推定される重力変化の検出、高さ変化に伴う重力変化の定量化等に取り組んできた。特に、Scintrex社製CG-5型重力計のスケールファクターの素性を明らかにし、見掛け上生じていた重力変化を抑え込むことにより、同重力計の活動モニタリングへの活用の道を開いてきた(Onizawa, 2019)。

このように、長年それぞれ独自の観測研究を実施してきた経緯があるものの、マグマ蓄積期から次期噴火に至るまでマグマ活動の解明に寄与し、火山活動評価に適用していくには、両機関の利点を活かした観測研究を進めることが望ましい。このような背景から、2018年より絶対・相対重力ハイブリッド観測をはじめとした両機関による合同観測研究を開始した。

合同観測では、地震研究所が主に絶対重力観測による重力基準の構築、気象研究所が主に相対重力測定による面的な重力変動パターンの把握に努めてきた。本報告は、合同観測の他、それ以前より実施してきた相対重力測定で得られた重力観測データと得られた知見について報告する。内容は以下の3点である：(A)山麓・山頂付近2点での絶対重力測定(地震研究所, 2章)、(B)絶対重力データを用いたCG-5型相対重力計のスケールファクターの検証・再較正(3章)、(C)絶対・相対測定によって得られた伊豆大島での重力時間変化(4章)。特に(B)については、相対重力計による面的測定の精度に関わる重要なポイントであり、合同観測によって初めて非常に良い精度を担保することに成功したため、詳述する。最後に、本合同観測研究を通しての伊豆大島の火山活動の解明や活動評価への適用に向けての課題について議論する(5章)。

なお、相対重力計については本稿に示す CG-5 型以外に LaCoste & Romberg (以下, LCR) 社製 D 型及び G 型も使用しており、これらについてもモニタリングへの

活用に向けてスケールファクターをはじめとした検定・較正作業を進めている。これらについては別の稿にて報告していく予定である。

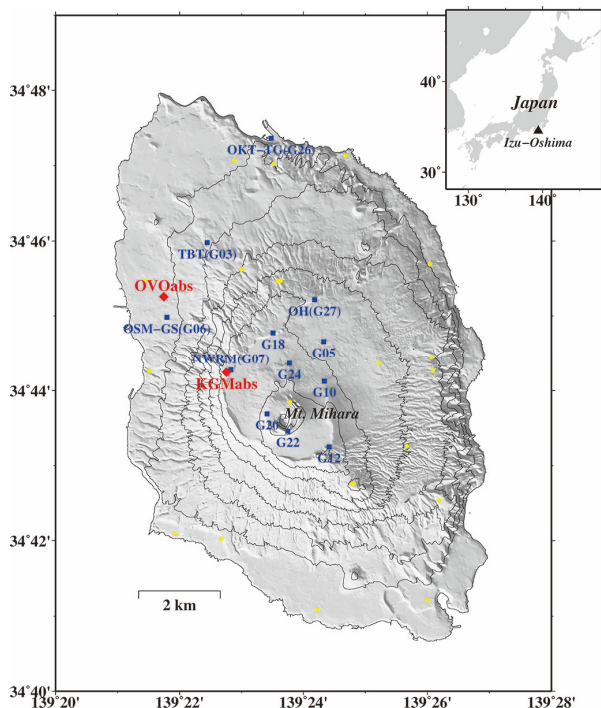


Fig. 1. Topographic relief map of Izu-Oshima volcano and gravity measurement sites. Red diamonds: absolute gravity sites established by ERI. Blue squares: relative gravity sites by MRI shown in Figs. 6–9 with site code. Yellow circles: other gravity sites shown in Fig. 5. The topographic contour interval is 100 m. The insert map shows the location of Izu-Oshima volcano.

## 2. 山麓・山頂付近での絶対重力観測

地震研究所では、山麓の伊豆大島火山観測所 (OVOabs, 標高 77 m) 及びカルデラ北西縁の鏡端局舎 (KGMabs, 標高 557 m) において、絶対重力測定を定期的に行ってきた (Fig. 1 の赤菱)。測定に用いた FG5 型絶対重力計は、真空槽の中で鏡を落下させ、その時々刻々の位置をレーザー干渉計によって精密に測定することで、鉛直方向の重力加速度を精密に測定する装置である (Fig. 2a)。FG5 型絶対重力計の公称精度はおよそ  $2 \mu\text{Gal}$  である (Niebauer *et al.*, 1995, Okubo *et al.*, 1997)。2017–2021 年での測定に用いた 2 台の装置 FG5#109, #241 に関しては、その器差がおよそ  $1.6 \mu\text{Gal}$  であることを確認している (今西・他, 2021)。

Table 1 に 2017–2021 年の測定値を示す。これらは、最低一日以上の観測期間に得られた各々の重力測定値に対して、潮汐補正 (GOTIC2; Matsumoto *et al.*, 2001 を使用) を施し平均化したものである。また、現地で測定された鉛直重力勾配値を用いて地面上の値に化成している。Table 1 によるとおよそ 5 年の間に、OVOabs にて最大  $23 \mu\text{Gal}$ 、KGMabs にて最大  $46 \mu\text{Gal}$  の重力変化が生じている。これらの絶対重力値の時間変化については、5.2 節で詳述するように、火山活動に伴う重力変化のみならず、降水浸透の影響が重畳していると考えられる。

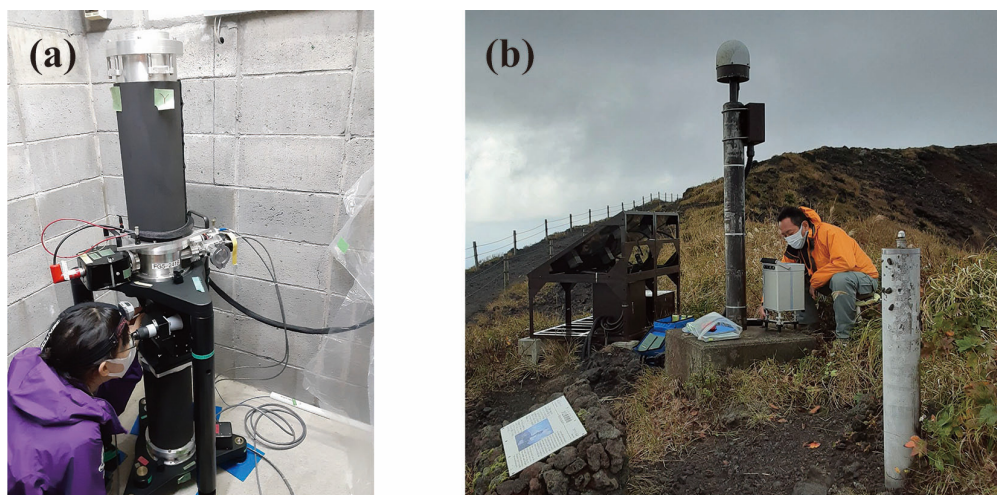


Fig. 2. Absolute and relative gravity measurements in Izu-Oshima volcano. (a) Absolute gravimeter FG5#241 at KGMabs. (b) Relative gravimeter CG-5#033 at GNSS site (G22) right next to the central pit crater of Mt. Mihara.

Table 1. Repeated absolute gravity measurements by FG5. The listed gravity values are converted to the ground level by using *in-situ* vertical gravity gradients from absolute measurements at a height of 130.0cm.

Site Vert. Grad.	OVOabs -0.329 mGal/m			KGMabs -0.360 mGal/m			Difference [mGal]		
	Campaign	Date	Gravi- meter	Abs. Grav. [mGal]	Stat. Err. [μGal]	Date		Gravi- meter	Abs. Grav. [mGal]
Mar., 2017	Mar. 4, 2017	FG5#212	979829.992	0.4	Mar. 15, 2017	FG5#212	979718.706	1.5	111.286
Nov., 2018	Nov. 15, 2018	FG5#241	979829.996	0.3	Nov. 20, 2018	FG5#241	979718.733	0.2	111.263
Nov., 2019	Nov. 7, 2019	FG5#241	979830.015	0.6	-	-	-	-	-
Nov., 2020	Nov. 19, 2020	FG5#241	979829.997	0.4	Nov. 24, 2020	FG5#241	979718.752	0.5	111.245
Nov., 2021	Nov. 9, 2021	FG5#109	979830.000	0.3	Nov. 12, 2021	FG5#109	979718.748	0.2	111.252

### 3. 絶対重力データを用いた CG-5#033 相対重力計のスケールファクターの検証・再較正

絶対重力計は優れた精度を有するものの、商用電源が確保できる屋内でしか測定を行えない。そこで島内の重力変化の様子を面的に把握するためには、絶対重力点などを基準とした相対重力測定を行う必要がある。

気象研究所は、伊豆大島における相対重力観測を長年に渡り実施しており、このうち Scintrex 社製 CG-5 型重力計 S/N : 300500033 (以下、CG-5#033) については、2008 年 7 月より使用している (Fig. 2b)。数 10 μGal 以内の微小な重力変化の検出を追求する精密測定においては、重力計の感度を規定するスケールファクターの検定が不可欠である。ここでは CG-5#033 のスケールファクターに関するこれまでの知見と、その検証、再較正について記述する。検証・再較正にあたっては、伊豆大島における合同観測で得られたデータの他、国土地理院が構築した日本重力基準網 2016 (以下、JGSN2016 ; 吉田・他, 2018) の重力点を利用した検定データも利用する。

#### 3.1 スケールファクター

CG-5 型重力計の場合、センサーからの出力信号を A/D 変換し、重力単位 [mGal] の出力を得るために、下記の変換を行っている：

$$g^{read} = GCAL1 \times AD_{out} + GCAL2 \times AD_{out}^2. \quad (1)$$

ここで、 $AD_{out}$  は A/D 変換出力、 $g^{read}$  は重力計が出力する重力読取値、 $GCAL1$  及び  $GCAL2$  は calibration factor と呼ばれる感度を規定するパラメータであり、個体毎に与えられるパラメータである (詳細は付録 1 参照)。しかし、このように換算され得られた重力読取値の精度は一概に十分なわけではなく、真の重力値を得るためには更なる較正が必要となる。重力読取値  $g^{read}$  を真の重力

値  $g^{true}$  へ変換する際の係数  $S$  をスケールファクターと呼び、下記で記述される：

$$g^{true} = S g^{read}. \quad (2)$$

CG-5 のような相対重力計の場合、個々の測定値 ( $g^{read}$  や  $g^{true}$ ) 自体に意味はなく、意味を持つのはあくまでも 2 測定間の重力差である。測定された重力差 (読取値の差) を  $\Delta g^{read}$ 、真の重力差を  $\Delta g^{true}$  とし、これらの変換係数を定数とみなした場合、

$$\Delta g^{true} = S^{int} \Delta g^{read} \quad (3)$$

と記述できる。ここでは係数  $S^{int}$  を区間スケールファクター (interval scale factor) と呼称し、これは理想的には 1 となるべきものである。この区間スケールファクターに要求される精度は実際に測定する重力差と求める測定誤差に依存し、一般に標高差 (すなわち重力差) の大きい火山地域ではより高精度な較正が求められる。本研究で対象とする伊豆大島の測定点の場合、山麓から山頂までの重力差は約 180 mGal であり、仮に測定する重力差に 10 μGal の精度を要求した場合、 $6 \times 10^{-5}$  の精度で区間スケールファクターを決定しなければならない。

これらスケールファクターの較正には重力値が既知である絶対重力点間を接続した検定が有用である。常に一定程度の測定誤差や参照する絶対重力値の不確かさが避けられない中でスケールファクターの推定誤差を抑制する観点からは、重力差の大きい重力点間での検定測量を実施することが望ましい。この観点から、CG-5#033 については、2012 年から 2017 年にかけて JGSN2016 の重力点を利用したスケール検定測量を実施し、その特性把握及び較正を行ってきた (Onizawa, 2019)。この成果を要約すると、1) スケールファクターは測定場所や時間

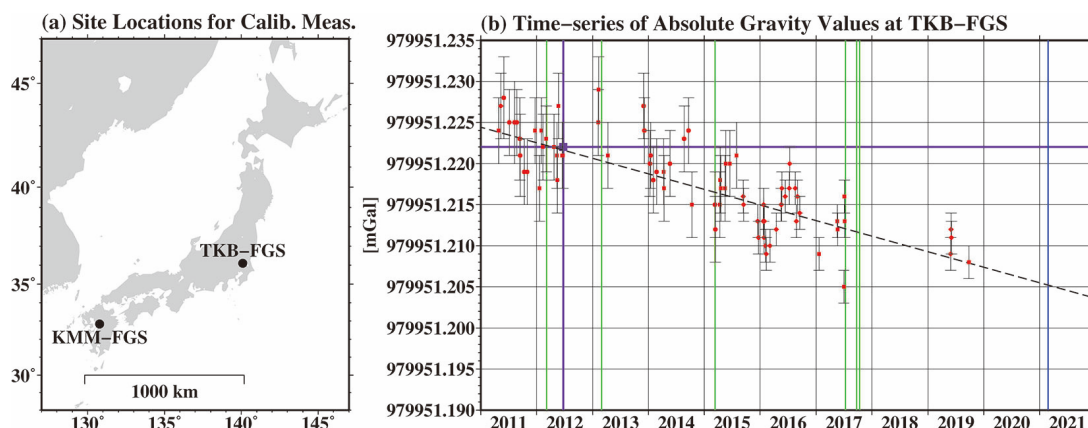


Fig. 3. (a) JGSN2016 site locations used for Feb. 2021 scale factor calibration measurements. (b) Temporal change in absolute gravity values at TKB-FGS provided by Geospatial Information Authority of Japan. Red symbols: absolute gravity values measured by FG5 gravimeters (circle: S/N: 104, square: S/N: 201, diamond: S/N: 203). Purple square: 979951.222 mGal, which is the official value for JGSN2016. The broken line indicates a linear regression of the temporal change. Green and blue vertical lines indicate the dates of the calibration measurements using JGSN2016 sites reported in Onizawa (2019) and conducted for this study, respectively.

によらず重力読取値に依存しており、このため読取値依存スケールファクターを導入すればスケール補正が可能である。さらに、2) 1日 100  $\mu$ Gal オーダーのドリフトにより読取値が時間的に変化していることから、同一測線でも繰り返し測定を実施した場合、スケールファクターについて見掛け上の時間変化が生じる。本検定データから読取値依存スケールファクター関係式を構築し(付録2参照)、これを実データに導入することにより、伊豆大島において見掛け上生じていた経年的な重力変化を抑制できることを示した。なお、CG-5#033の感度に関する設定パラメータ及び読取値依存スケールファクターに関する情報をTable A1及びTable A2にまとめる。

### 3.2 検証

#### 伊豆大島における検証

前節で記述したJGSN2016重力点を用いた検定測定により決定したスケールファクターの妥当性については、実際に精密測定を実施する伊豆大島においても実証できることが望ましい。これには2章で記した島内2ヶ所の絶対重力点(Fig. 1の赤菱)間の重力差を活用することができる。重力差はおよそ111 mGalでありJGSN2016重力点を用いた検定には及ばないが、絶対測定、相対測定を同時期に実施することにより、火山活動や地殻活動に伴う経年的な変化の他、天水浸透に伴う重力変化の影響を抑制できる面での利点が多い。本研究では、KGMabsでの絶対重力測定を実施しなかった2019年を除き、計4回の検定測定を実施した。このうち2018年、2020年、2021年は絶対重力測定と同時期に実施している。初回の2017年についてのみ、3月に測定された絶対重力値

を用いて、同年5月及び6月に実施した。

#### JGSN2016 重力点を用いた検証

併せて、CG-5#033の重力読取値はドリフトのため常に変化していることから、定期的な確認・校正が必要である。重力差の大きいJGSN2016を用いた検定測定は2017年以来実施できていなかったため、2021年2月にJGSN2016の筑波基準重力点(以下、TKB-FGS)と熊本基準重力点(以下、KMM-FGS)とを接続する検定測定も実施した(Fig. 3a)。茨城県つくば市の気象研究所重力点MRIを始点として、両基準重力点を一度に接続することは時間的に困難なため、2月26日にMRIとKMM-FGSを、2月27日にMRIとTKB-FGSとを接続する形で検定測定を実施した。TKB-FGSは茨城県つくば市の国土地理院構内に設置されている。一方、KMM-FGSについては、2017年検定測定(Onizawa, 2019)の時点では東海大学宇宙情報センターに設置されていたが、本観測の時点では九州測量専門学校へ移設されており、国土地理院より移設後の絶対重力値についてその成果が報告されている(<https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/top.html>)。両重力点間の重力差は約398 mGalである。

#### 結果

Table 2に、伊豆大島及びJGSN2016での検定データについて算出された重力差及び区間スケールファクターを示す。重力差約111 mGalの伊豆大島検定データで見ると、スケールファクター未補正の場合、参照重力差からのずれが最小18  $\mu$ Galから最大102  $\mu$ Gal、これに伴い算出される区間スケールファクターも理想値1からのずれが $(1.6-9.2) \times 10^{-4}$ と大きく、精密測定で求められる



Table 2. Verification and re-calibration for CG-5#033 scale factor.

Reference Gravity Difference		Calibration Measurements for CG-5#033									
Gravity Difference [mGal]	Date	No Scale Factor Correction			Scale Factor by Onizawa (2019)			Re-calibrated Scale Factor by This Study			
		Gravity Difference [mGal]	Dev. from Reference [mGal]	Estimated Inteval Scale Factor	Gravity Difference [mGal]	Dev. from Reference [mGal]	Estimated Inteval Scale Factor	Gravity Difference [mGal]	Dev. from Reference [mGal]	Estimated Inteval Scale Factor	
<b>Izu-Oshima Sites (OVOabs - KGM-abs)</b>											
Campaign: Mar., 2017	111.286	May 31, 2017	111.251	-0.035	1.000312	111.272	-0.014	1.000122	111.273	-0.013	1.000113
		Jun. 01, 2017	111.268	-0.018	1.000164	111.289	0.003	0.999974	111.290	0.004	0.999965
Campaign: Nov., 2018	111.263	Nov. 12, 2018	111.213	-0.050	1.000450	111.259	-0.004	1.000040	111.260	-0.003	1.000030
Campaign: Nov., 2020	111.245	Nov. 15, 2020	111.164	-0.081	1.000729	111.240	-0.005	1.000042	111.242	-0.003	1.000031
Campaign: Nov., 2021	111.252	Nov. 07, 2021	111.168	-0.084	1.000760	111.258	0.006	0.999947	111.259	0.007	0.999934
		Nov. 16, 2021	111.150	-0.102	1.000920	111.241	-0.011	1.000102	111.242	-0.010	1.000090
		<b>Average</b>		<b>-0.062</b>	<b>1.000556</b>	<b>Average</b>	<b>-0.004</b>	<b>1.000038</b>	<b>Average</b>	<b>-0.003</b>	<b>1.000027</b>
<b>JGSN2016 Sites (TKB-FGS - KMM-FGS)</b>											
JGSN2016 Official	397.966	Feb. 26, 2021	397.656	-0.310	1.000780	397.934	-0.032	1.000080	-	-	-
Modified in This Study	397.949		-	-	-	-	-	-	397.939	-0.010	1.000026

精度に達していない。併せて、2017年から2021年までのおよそ4年半の間に、参照重力差からのずれや区間スケールファクターの理想値1からのずれが時間とともに大きくなる様子が分かる。これはドリフトにより重力読取値が時間とともにずれていくに伴う見掛け上の症状であり、自然現象に伴う真の重力変化を検出するためには補正されるべきものである。これに対し、Onizawa (2019) で構築した読取値依存スケールファクターによる補正法 (付録 2) と決定したパラメータ (Table A2 の上段) を適用し補正した場合、検定データの誤差に起因するばらつきはあるものの、最大でも  $14 \mu\text{Gal}$ 、 $1.2 \times 10^{-4}$  となり大幅に改善されている。6回の平均で見れば、それぞれ  $-4 \mu\text{Gal}$ 、 $3.8 \times 10^{-5}$  であり、非常に良好に計算されている。併せて、これらが時間とともに顕著にずれていく傾向は認められない。また、2021年に実施したJGSN2016重力点での検定データについても、未補正では参照重力差からのずれが  $310 \mu\text{Gal}$  にも達しているが、Onizawa (2019) の適用によりおよそ1桁の改善が見られる。補正後も参照重力差から  $0.032 \mu\text{Gal}$  のずれが生じているが、これは後述するTKB-FGSの経年的な重力低下を反映できていないことが主要な原因と考えられる。

このようにCG-5#033ではドリフトにより常に読取レンジがずれ続けている中、Onizawa (2019) で構築した読取値依存スケールファクターの補正法と推定した補正係数が、全く独立のデータに対して有効に機能していることを確認できた。特に、実際に精密観測を実施する伊豆大島において有効に機能することを確認できた意義は大きい。

### 3.3 再較正

上述のとおり、Onizawa (2019) で決定したスケール

ファクターは、ほぼ測定誤差あるいは補正誤差の範囲内で有効に機能していると考えられるが、下記の理由から、本研究で得られた新しいデータも加えて再較正を実施することとした。

- ・新たな検定データが蓄積されたため、これらを反映させたいこと。特に伊豆大島については、絶対測定と相対測定を同時期に実施しているため、絶対重力値の経年変化や降水浸透に伴う変化の影響を最小限に留められていると考えられること。
- ・今後、LCR社製D型及びG型重力計のスケール検定にもここで示した絶対重力値を活用していくため、重力計間で齟齬が生じないように、可能な限り参照重力値を整合させておきたいこと。

なお、Onizawa (2019) におけるJGSN2016重力点を用いた2012~2017年検定では、TKB-FGSの絶対重力値として常にJGSN2016公称値の  $979951.222 \text{ mGal}$  (2012年6月24日測定) として扱ってきた。しかし、TKB-FGSでは、1) 地下水くみ上げに伴う上下変動に起因した絶対重力値の年周変化、2) 2011年東北地方太平洋沖地震以降は地盤の隆起に伴う経年的な絶対重力値の低下が報告されている (吉田・他, 2018)。Fig. 3bはその後の測定データも含め国土地理院より提供を受けたTKB-FGSの絶対重力値時系列データから、24時間以上の連続測定が実施されたデータのみを抽出して表示させたものである。図より明らかなように、経年的な重力低下が生じており、これを線形近似させると10年間で  $19 \mu\text{Gal}$  の重力低下となる (Fig. 3bの破線)。この経年変化についても可能な範囲で考慮するために、この機会に、これまでの検定測定時 (Fig. 3bの緑及び青縦線) のTKB-FGSの絶対重力値について線形近似による予測値を利

用することで再較正を実施することとした。例えば、前節で示した 2021 年 2 月の TKB-FGS と KMM-FGS を用いた検定 (Fig. 3b の青縦線) であれば、公称値に対して  $17\mu\text{Gal}$  低い。なお、線形フィッティング後の残差 RMS は  $3\mu\text{Gal}$  である。

Fig. 4 に再較正に用いたデータの重力読取値と算出される区間スケールファクターを示す。前節の検証結果から予想されるとおり、新たに加えた伊豆大島データ (赤) 及び熊本データ (青) は、Onizawa (2019) によるデータ (緑) と同一の直線状に乗る。これらのデータを用い新たに見積もった係数を Table A2 の下段に、これを用いて再計算した重力差及び区間スケールファクターを Table 2 の右列に示す。伊豆大島における参照重力差からのずれ及び区間スケールファクターについては劇的な変化はないが、いずれも新たなデータが反映される方向に修正されている。また、JGSN2016 重力点を用いた検定においては、参照重力差からのずれが  $-10\mu\text{Gal}$ 、区間スケールファクターの 1 からのずれも  $2.6\times 10^{-5}$  と、ともに大きく改善された。これは新たにデータを追加したことよりも、TKB-FGS の経年的な重力低下を反映させたことの寄与が大きい。

なお、伊豆大島における 2017 年 5 月、6 月や 2021 年 11 月のように同一のキャンペーン観測内で 2 回検定測定を実施した場合で、いずれも  $17\mu\text{Gal}$  の差異が生じている。これは様々な測定誤差あるいは潮汐等の補正に伴う誤差、期間中に降水があった場合にはその浸透に伴う変化等に起因すると思われる、スケールファクター検定測量に限らない精密測量データの測定・補正方法そのものに起因する問題である。

また、Fig. 4 に示す通り、今回新たに加えた検定データの読取値レンジはほぼ Onizawa (2019) で用いた読取値レンジ内に収まっており、これが新たな検定データが旧来のデータと良く合致した一因かもしれない。CG-5#033 の読取値は 1 日当たり数  $100\mu\text{Gal}$  のドリフトによ

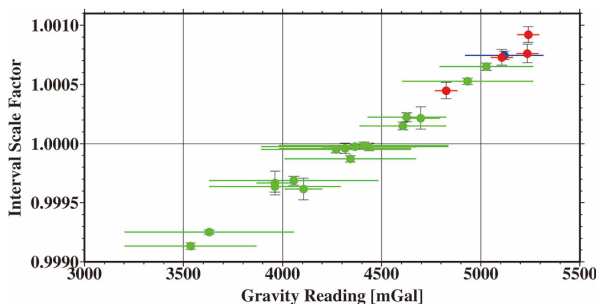


Fig. 4. Plots of interval scale factors for gravity readings of CG-5#033.

り常に増加しており、今後は時間とともにスケールファクター検定に用いた読取値レンジからは逸脱していくことになる。このため、今後も定期的な確認・較正が必要である。伊豆大島における将来の測定のための実践的な観点からは、より絶対重力値の大きい高緯度での検定測定を実施し、高読取レンジでのスケールファクターを事前に準備しておくことが望ましい。

#### 4. 伊豆大島火山における重力変化

ここでは上述のスケールファクター再較正を行った CG-5#033 によって得られた伊豆大島火山の絶対及び相対重力変化について示す。絶対重力変化は 2018 年以降、毎年 11 月に実施してきた全島的な絶対・相対ハイブリッド観測による。一方、相対重力変化は気象研究所にてより長期間、高頻度実施してきた観測の結果である。いずれも当該観測点で複数回測定した際の標準偏差が  $10\mu\text{Gal}$  以内のデータのみを使用している。

##### 4.1 全島的な絶対重力変化

2018 年から 2021 年まで毎年 11 月に絶対・相対ハイブリッド観測を実施してきた。このうち相対重力測定は、気象研究所、地震研究所、国土地理院の GNSS 観測点、水準点等の基準点 (Table 3) を利用し、概ね 10 日程度かけて全島的に実施している。これら CG-5#033 による相対重力測定の結果を 2 章で記した絶対重力測定の結果と接続することで、全島的な絶対重力値が得られる (Table A4 参照)。

ハイブリッド観測にて得られたデータの時間差を取ることにより、1 年毎の全島的な絶対重力の時間変化を追跡できた (Fig. 5 の上段)。2018 年 11 月から 2019 年 11 月の 1 年間では OVOabs にて  $19\mu\text{Gal}$  の増加が観測されたように全島的に重力値が増加し、変化量は最大で  $39\mu\text{Gal}$  に達している。一方、2019 年 11 月から 2020 年 11 月及び 2020 年 11 月から 2021 年 11 月では空間的に系統的な傾向はつかみづらいがいずれも重力低下傾向が認められ、後者についての変化量は  $30\mu\text{Gal}$  を越える。

##### 4.2 既定路線における相対重力変化

一方、気象研究所では 2017 年より山麓から山頂三原山へ至る測定路線を明確化し、全島的なハイブリッド観測よりも頻度を増やした年間数回程度の相対重力測定を実施している。この測定の主な目的は、1) 将来、三原山へマグマが上昇してきた際の重力変化の検出、2) 天水浸透に伴う重力変化の補正に活用するためのデータの取得である。また、ここでは示さないが、3) この重力幅の大きい路線において複数の重力計による同時観測を実施することにより、スケールファクターをはじめとする

Table 3. List of relative gravity sites.

Site	Institute	Latitude [deg]	Longitude [deg]	Altitude [m]
TBT	JMA	34.76627	139.37413	190
G05	MRI	34.74425	139.40544	480
NWRM	JMA	34.73794	139.38046	562
G09	MRI	34.73943	139.42021	438
G10	MRI	34.73533	139.40572	538
G11	JMA	34.72093	139.42781	405
G12	MRI	34.72066	139.40703	704
FTG	MRI	34.71255	139.41290	627
G18	MRI	34.74622	139.39186	555
G20	MRI	34.72815	139.39022	679
G22	MRI	34.72431	139.39584	742
G24	MRI	34.73939	139.39623	547
OKT-TG	MRI	34.78940	139.39131	1
G29	MRI	34.70156	139.36543	22
G30	MRI	34.73071	139.39636	684
G31	MRI	34.74372	139.40225	487
G32	MRI	34.77849	139.36097	40
10210	GSI	34.78366	139.39190	81
10212	GSI	34.78550	139.41132	25
10217	GSI	34.74069	139.43433	348
10220	GSI	34.70893	139.43642	321
10226	GSI	34.68473	139.40369	31
10228	GSI	34.70046	139.37785	59
10233	GSI	34.75789	139.35767	41
93051A	GSI	34.78442	139.38139	91
93055A	GSI	34.68678	139.43321	70
960594A	GSI	34.76154	139.43402	95
960595A	GSI	34.73762	139.35859	40
OSM-GS	GSI	34.74972	139.36333	75
YUBA	GSI	34.75781	139.39388	442
OVO	ERI	34.75420	139.36266	74
O-1001	ERI	34.73512	139.38535	538
O-1002N	ERI	34.73736	139.37930	554
O-1003	ERI	34.75787	139.39304	441
O-1004	ERI	34.76033	139.38329	301
O-1116	ERI	34.73770	139.43480	345
FK-105	ERI	34.71267	139.41361	628
OH	ERI	34.75361	139.40298	495
ERI-GPS-SJ	ERI	34.68759	139.39520	25

MRI: Meteorological Research Institute

JMA: Japan Meteorological Agency

GSI: Geospatial Information Authority of Japan

ERI: Earthquake Research Institute

重力計間の相対的な個体特性の把握とその較正に役立てることを見込んでいる。測定点の選定にあたっては、a) 気象研究所において旧来より測定が繰り返されていること、b) 特に地殻変動に伴う高さ変化の影響を把握するために、GNSS 観測点の基礎コンクリート上あるいは近接場所に GNSS 観測点があること、を条件とした (Fig. 6p)。また、本路線を明確化する以前にもこれらの測定

点のいずれかの組合せを接続した測定を多く実施している。これら選定した 6 観測点間の全組み合わせの相対重力変化の測定値について、CG-5#033 による測定を開始した 2008 年より Fig. 6a-o の青丸で示す (数値データは Table A5 参照)。なおここでは 1 回の往復測量にて直接的に重力差を測定したデータのみを示している。図中左端に記した測定点を基準とした各測定点での相対重力変化であり、標高順 (すなわち重力値順) に測定点を並べている。これらの図から下記の特徴を認識することができる。

- 1) 標高差の大きい観測点組合せにおいて重力差に大きな擾乱が生じている。例えば、最も標高差の大きい OKT-TG と G20 との組合せ (Fig. 6e) で見ると、その振幅は最大で約  $80 \mu\text{Gal}$  に達している。
- 2) 山頂 (G20) では経年的な重力増加が生じている。カルデラ縁の NWRM 及び OH を基準とした場合、その増加率はそれぞれ年率  $6.6 \mu\text{Gal}$  及び  $11.1 \mu\text{Gal}$  である (Fig. 6a, b)。

#### 4.3 フリーエア効果との比較

伊豆大島火山ではマグマ蓄積によると考えられる経年的な山体膨張と 1 年程度の周期の膨張・収縮が生じている他、三原山での局所的沈降・収縮、カルデラ北部での沈降が継続している (例えば、鬼澤, 2013)。併せて、2011 年東北地方太平洋沖地震以降にはその余効変動も認められた。観測された重力の時間変化の原因を探る上で、これら地殻変動の重力変化への影響を見積もる必要がある。このうち最も影響が大きいと考えられる高さ変化に伴う重力変化 (フリーエア効果) については、GNSS 観測による楕円体高変化と正規重力の鉛直勾配 ( $-0.3086 \text{ mGal/m}$ ) から推算できる。

Fig. 7 に気象研究所及び気象庁が実施している GNSS 観測から選択した地点での楕円体高変化を、ハイブリッド重力観測を実施した時期 (ピンク) と併せて示す (GNSS 観測点位置は Fig. 1 参照)。ハイブリッド観測を実施した 2018 年以降では、1 年程度の周期の膨張・収縮に起因する隆起・沈降が重畳しているが、大局的には、全島的に大きな変化はなく、三原山 (G20, G22) やカルデラ北部 (G24) で局所的な沈降が生じている。1 年毎の変化量としては大きくても  $2 \text{ cm}$  程度であり、ここから期待されるフリーエア効果は  $10 \mu\text{Gal}$  にも満たず (Fig. 5 の下段)、観測された年間  $30 \mu\text{Gal}$  を越える重力変化を説明できない。併せて、既定路線にて特に標高差の大きい観測点間で認められる振幅の大きな擾乱 (Fig. 6 の青丸) は、期待されるフリーエア変化 (Fig. 6 の橙) とは大きく異なる。これら、実測された大きな重力変化



Nov. 2018 to Nov. 2019

Nov. 2019 to Nov. 2020

Nov. 2020 to Nov. 2021

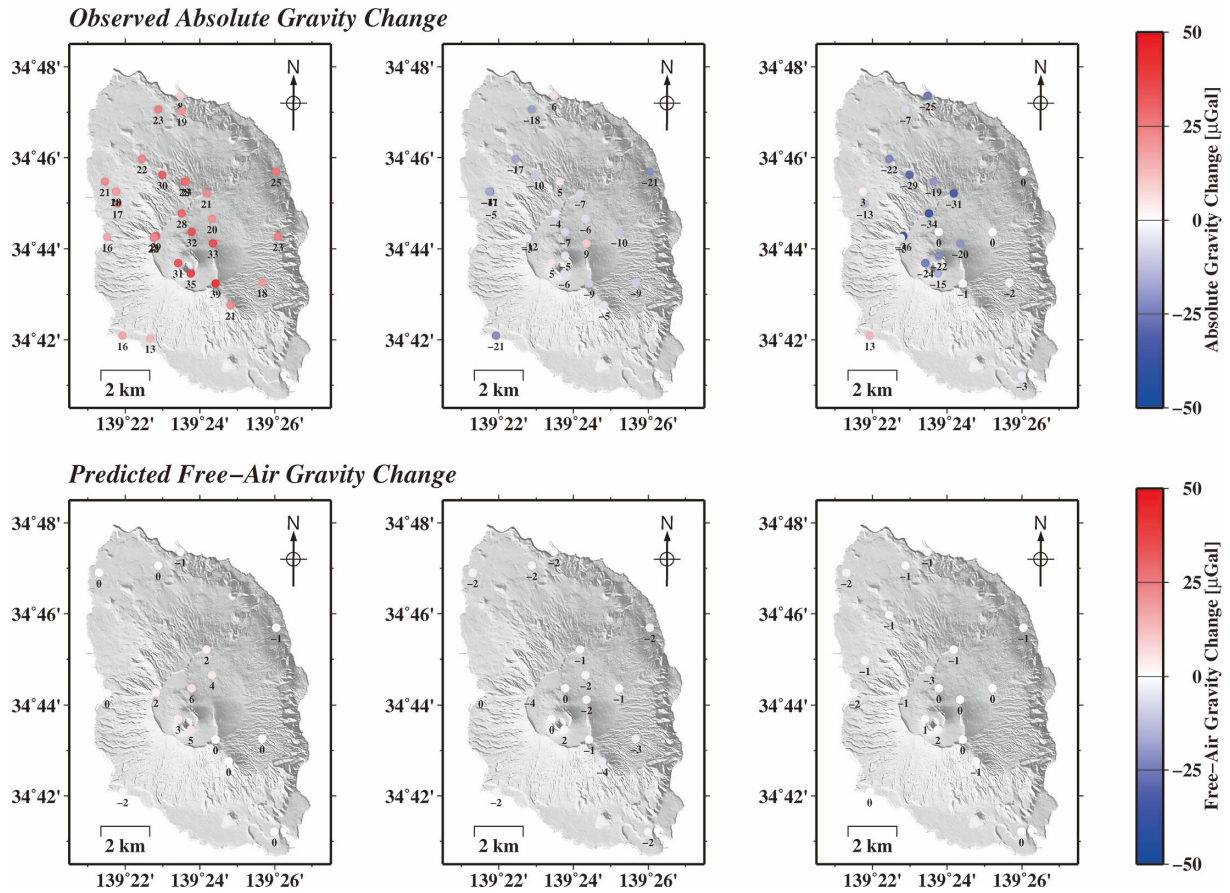


Fig. 5. Yearly observed gravity changes and predicted free-air gravity changes. Upper: observed absolute gravity changes by hybrid absolute and relative gravity measurements. Lower: free-air gravity changes predicted from GNSS ellipsoidal height changes and  $-0.3086 \text{ mGal/m}$  of a vertical gravity gradient of the normal gravity.

と予測されるフリーエア効果との乖離については、5.2節にて後述するように、これまでの予察的な検討から天水浸透が重力値に影響を与えている可能性が考えられる。

また、既定路線での相対重力測定にて認められる三原山 G20 における重力増加は、同観測点の経年的な沈降から予測されたものであるが、その増加率は NWRM 及び OH を基準とした場合、年率  $6.6 \mu\text{Gal}$  及び  $11.1 \mu\text{Gal}$  であり、沈降に伴うフリーエア効果から期待される年率  $3.5\text{--}3.6 \mu\text{Gal}$  を優に越える (Fig. 6a, b)。実測値からフリーエア効果を差し引いた残差重力変化は年率でそれぞれ  $3.0 \mu\text{Gal}$ ,  $7.6 \mu\text{Gal}$  であり、10 年を越える時間スケールにおいては明瞭な現象として現れてくる。

このような現象が生じている空間分布等を把握する目的で、比較的標高差が小さく、天水浸透の影響の大きいカルデラ地域についてさらに見てみる。Fig. 8 にはカルデラ北縁 (OH) を基準とした、カルデラ縁 (Fig. 8a-c)、カルデラ内 (Fig. 8d-f)、三原山 (Fig. 8g, h)

の観測点の重力変化を示す (数値データは Table A5 参照)。局所的な沈降が継続している三原山 (G20, G22; Fig. 8g, h) 及びカルデラ北部 (G24; Fig. 8e) を除き、予想されるフリーエア変化 (Fig. 8 の橙) は 14 年を通して高々  $10\text{--}20 \mu\text{Gal}$  程度である。測定誤差や除き切れていない天水浸透の影響もある中で、これらの観測点の重力変化は概ねフリーエア変化に乗っているか、あるいはそれより若干大きい程度に見受けられる。

相対的な沈降が明瞭なカルデラ北部 (G24) と三原山 (G20, G22) においては、いずれも経年的な重力増加を認識できる。特に三原山 (G20 及び G22) ではその変化率はフリーエア効果よりも明確に大きく、三原山での局所的な、あるいは三原山を中心とした現象に起因するものと推定される。フリーエア効果よりも大きい重力増加は、変形に伴う地下媒質の密度変化や地形変化等を見れば、地下での新たな質量の増加で解釈される。このような“地殻変動量に見合わない”重力変化は例えば

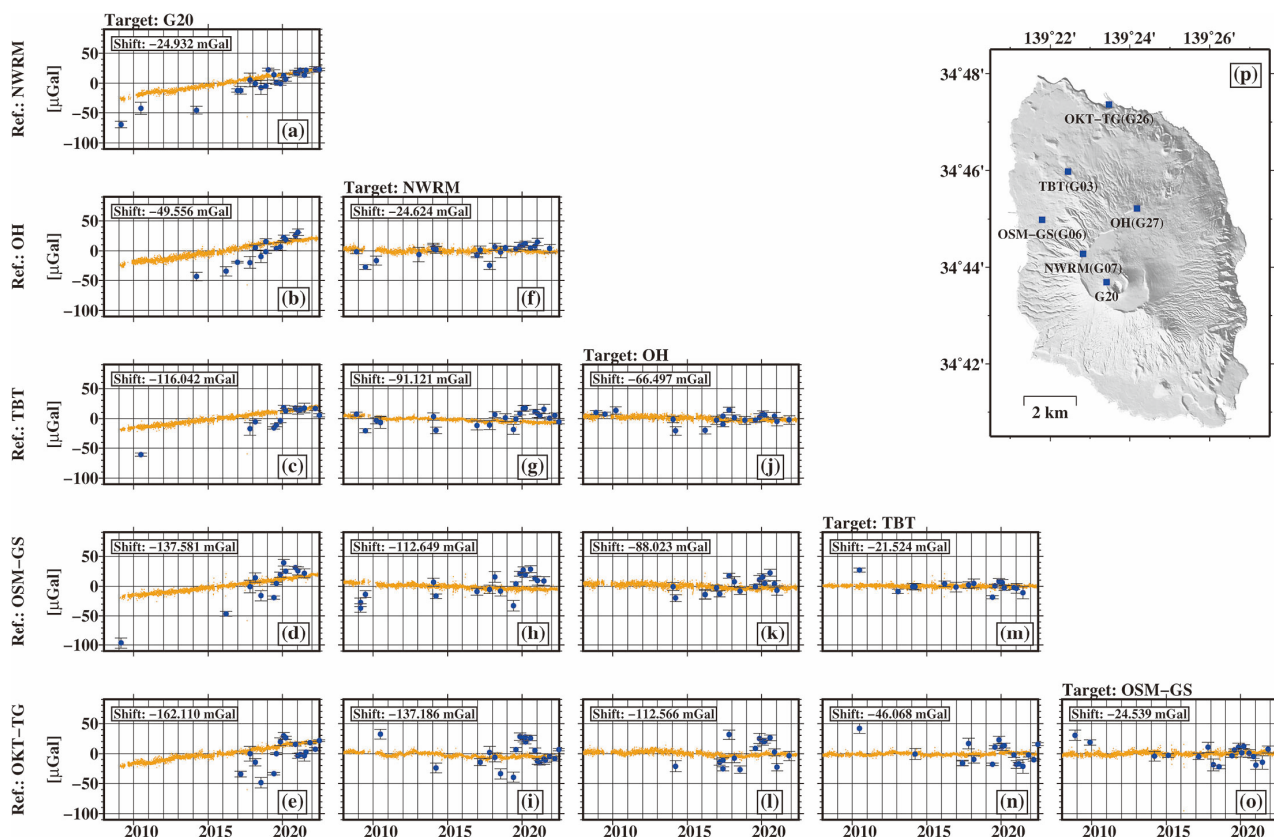


Fig. 6. Observed and predicted free-air relative gravity changes for selected site combinations. Blue circles: observed relative gravity changes by CG-5#033. Orange dots: free-air gravity changes predicted by using GNSS ellipsoidal height changes and  $-0.3086 \text{ mGal/m}$  of a vertical gravity gradient of the normal gravity. The map shows the site locations.

ハワイのキラウエア火山等で観測され、既存の空隙内へのマグマの浸透や排出で解釈されている（例えば、Johnson *et al.*, 2010）。三原山で観測される現象は10年を越える時間スケールで見れば変化量は非常に大きくなり、安定火道等の空隙内へのマグマの注入等で説明できるかについては、量的な観点、他の観測項目での検出の可否の観点からも検討を進める必要がある。併せて、GNSS 観測によれば三原山では沈降だけでなく観測点間の線ひずみにて年率およそ  $1 \times 10^{-5}$  で中央火孔が閉じるセンスの収縮が観測されている（鬼澤, 2013）。また、三原山火孔壁の崩落と岩塊の火孔底への堆積の影響も加わっているかもしれない。マグマ上昇・下降をはじめとする火山活動に伴う重力変化を検出し、活動評価に結び付けていくためには、今後はこれらの影響を定量化していく必要がある。

## 5. 火山活動の解明と活動評価への適用に向けて

共同観測研究の成果は、マグマ活動をはじめとした地下過程の解明や火山活動評価への実践面での適用へ繋がっていかねばならない。これらを実現していく上で、

測定からデータ補正、解釈に至るまで解決していくべき課題を列挙する。

### 5.1 測定及び重力計較正

#### Scintrex CG-5 型重力計による測定

火山活動に伴い生じる微小な重力変化の検出を目指した精密重力観測では、重力計の公称精度ぎりぎりの分解能で測定を行い、得られたデータを吟味する。このため1台のみでの測定では得られた測定結果の真偽を検討・判断し難いため、一般には複数台の重力計を用いて測定を実施することが多い。この観点から、気象研究所では本報告で示した Scintrex CG-5 重力計の他に、LCR D 型、G 型重力計、Scintrex CG-3M 型重力計も用いて観測を行ってきた。このうち、Scintrex CG-5 重力計による測定の利点は、1) 測定手順さえ間違わなければ測定者にかかわらずある一定の精度での測定を実現できること、2) CG-5#033 の場合は、見掛け上のスケールファクターの時間変化が生じているものの、読取値に対するスケールファクター依存性がほぼ線形で表現しうるように素性が比較的素直なため較正しやすいことである。しかし、CG-5 型重力計はバネ型の相対重力計



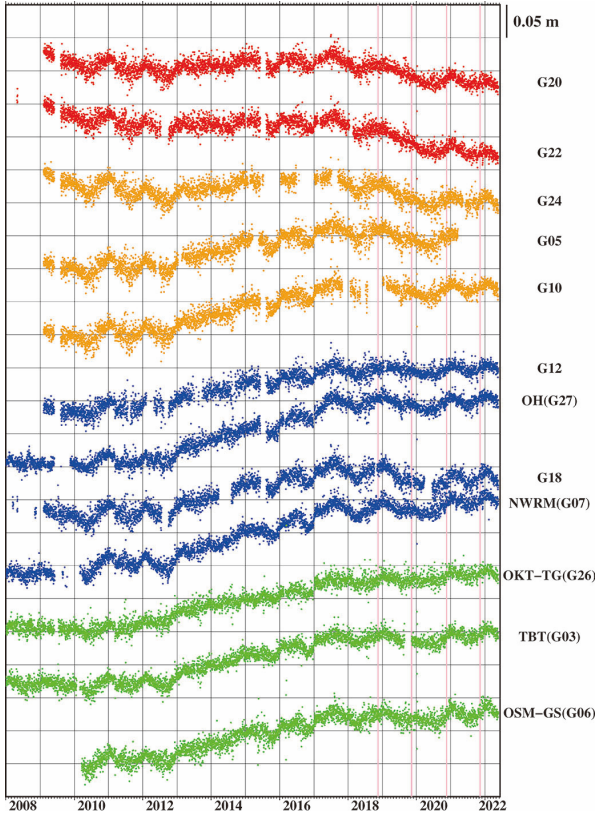


Fig. 7. GNSS ellipsoidal height changes for selected sites. Colored dots indicate the ellipsoidal heights of the GNSS sites at Mt. Mihara (red), inside the caldera (orange), at the caldera rim (blue) and in flank areas (green). One vertical division is 0.05 m. Pink vertical lines indicate the dates of yearly hybrid absolute and relative gravity measurements.

であるため、バネの塑性変形等に伴う読取値の誤差要因を極力抑える必要がある。特に、重力値の異なる複数の点を巡る相対重力測定では、重力計を設置してから安定するまでに時間を要する (Reudink *et al.*, 2014) ことが問題である。中でも、フィールド測定時の実践的な観点からは、安定化までにどれだけ待たなければならないのかの判断が難しい。そこで、これに対する方策として、「各測定点における重力変化が重力計のドリフトレートに乗るまで測定を行う」という方針の下、以下の操作手順を構築した。

- ・測定時には CG-5 重力計が内部機能として有する固体潮汐補正の機能を有効にして測定する。これは、上述のドリフトを確認する上で妨げとなる潮汐の影響を可能な限り取り除くためである (なお、事後の解析の際には、一旦未補正データに戻し、海洋潮汐荷重も含めた補正を実施している)。
- ・新たな観測点への到着後、まず CG-5 本体を測定位置

に設置、レベルを取り、測定姿勢で安定化させる。

- ・最初の 20 分程度は自動連続測定させておく。
- ・その後、手動測定に切り替えて、1 回 1 回データを確認 (野帳にメモ) しながら、測定値の時間変化が重力計のドリフトレートに乗ることを確認する。仮にドリフトレートが  $\sim 0.4 \text{ mGal/day}$  であった場合、10 分当たり  $3 \mu\text{Gal}$  の増加が見込まれる。このため 10 分前の測定値と照らしながら、測定値の変化具合を判断する。実際には、測定誤差により 1 回 1 回の測定値にばらつきがあることから、1 回条件を満たせばよい訳ではない。近年は解析にて最後の 5 データを使用するため、この 5 データを平均して重力計のドリフトレートに乗ることを確認し、測定を終了させる。
- ・極力 1 日の測定を効率的に進めるために、往復測量の始点では前日のうちに重力計を設置し安定化させておき、1 回目の測定の時間を短縮する。

このような方法により測定した場合、1 観測点あたり 1 時間あるいはそれ以上要する場合もある。このため、作業効率が非常に悪く 1 日あたりの観測点数を増やせない。これが同重力計による測定の最大の課題となっている。併せて、その形状から重心が高いためか、強風時の測定ではばらつきが大きくなる。特に緊急時の迅速な対応を実現するためには、効率的な測定や耐環境性が課題になると思われる。

#### LCR 重力計による測定

これら効率的な測定や強風下での測定の観点では、LCR 社製重力計による測定の方が望ましい。このため、1986 年噴火当時から利用されている LCR 社製 D 型重力計 (S/N : 109) の他、試験的な測定とオーバーホールを経て 2020 年より G 型重力計 (S/N : 918) も使用を開始し、LCR 重力計 2 台を主体とした観測を実現できるよう準備を進めている。これを実現する上で 2 つの課題がある。1 点は測定者に係る問題である。LCR 重力計は Scintrex 社製重力計に較べれば測定に熟練を要すると言われており、測定可能な人員を増やしていく必要がある。もう 1 点は個体特性の較正に係る問題である。伊豆大島において並行観測を実施した CG-5#033 との比較を行っているが、重力計間の測定結果がまだ十分に合致していない。これは、元々スケールファクターがダイヤルレンジに対して線形でないことや periodic error あるいは circular error と呼ばれるダイヤルの回転に伴う周期的な誤差要因をはらんでおり (例えば, Becker *et al.*, 1987; Valliant, 1991), これらをまだ十分に較正できていないことが原因として挙げられる。これら LCR 重力計についても、本稿で記した絶対重力点での検定測量や

## Reference: OH

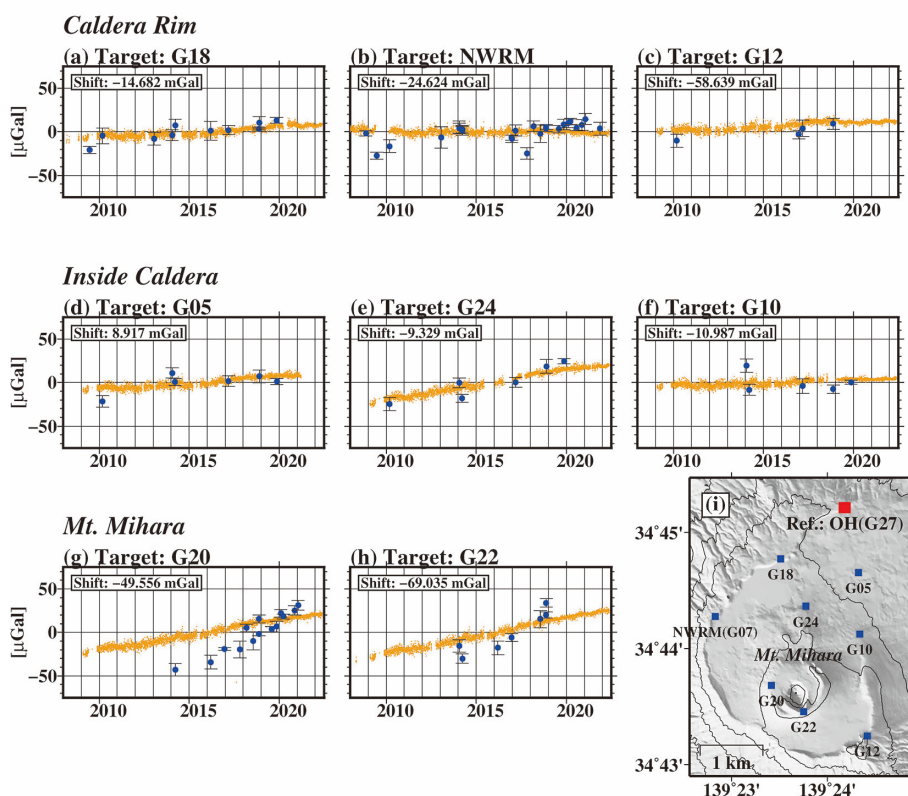


Fig. 8. Observed and predicted free-air relative gravity changes for sites in and around the caldera region. The reference site is OH at the northern caldera rim. Notations are the same as in Fig. 6.

スケールファクターの較正がなされた CG-5#033 との同時観測を実施している。今後はこれらのデータを活用した較正により、活動モニタリングへ活用できるようになるはずである。

## 5.2 天水浸透に伴う重力変化の評価

火山活動に伴う重力変化を検出・議論しようとした際、次に障害になるのが天水浸透に伴う重力変化である。伊豆大島における天水浸透に伴う重力変化に関する予察的な検討については、鬼澤・他 (2014, 2016) によって行われている。Fig. 9a, b は 2004 年から 2014 年までの山麓 (OKT-TG 及び OSM-GS) を基準としたカルデラ北縁 (OH) の重力変化である。なおここで示すデータは、前節までに記述した様な絶対スケールファクターやその時間変化の補正はなされていないこと、往復差によるデータ選択基準が緩いこと、同一キャンペーン内での複数の往復測量結果を接続したデータも含まれていることに留意されたい。そのような状況の中、重力計間の相対スケールファクター等の実施可能な補正を施し重力計間の整合性を高めることにより、系統的な重力変化を認識することができたものである。測定された相対重力変化

は、年間降水量の時間変化 (Fig. 9c の赤丸) と類似したパターンのようにも見える。伊豆大島においては地下水位が海水準程度と低く不飽和層が発達していることから、この重力変化の原因の可能性として、天水の浸透による不飽和層中の水分飽和度の変化が挙げられる。そこで、Onizawa *et al.* (2009) にて熱水シミュレータ STAR (Pritchett, 1995: 付録 5 参照) を利用し行った定常状態での地下水流動モデル (Fig. 10) を初期値として、実測された 30 日毎の降水量の時間変化 (Fig. 9c の青バー) を与えるシミュレーション計算を行った (Fig. 9d)。実施した計算は天水浸透量が降水量の 100% (実線) または 50% (破線)、鉛直浸透率が  $3 \times 10^{-12} \text{m}^2$  (緑) または  $3 \times 10^{-14} \text{m}^2$  (赤) の組合せの 4 パターンである。Fig. 9d は山体内の空隙中の水分濃度分布の時間変化から算出される重力変化である。計算結果からは、大局的には重力変化の振幅は天水浸透量に、時間スケールは浸透率に支配されると推察される。重力変化の振幅を十分に説明するまでには至っていないものの、浸透量 100%、浸透率  $3 \times 10^{-14} \text{m}^2$  の組合せ (赤実線) において重力変化の時間的変動パターンが概ね再現され、天水の

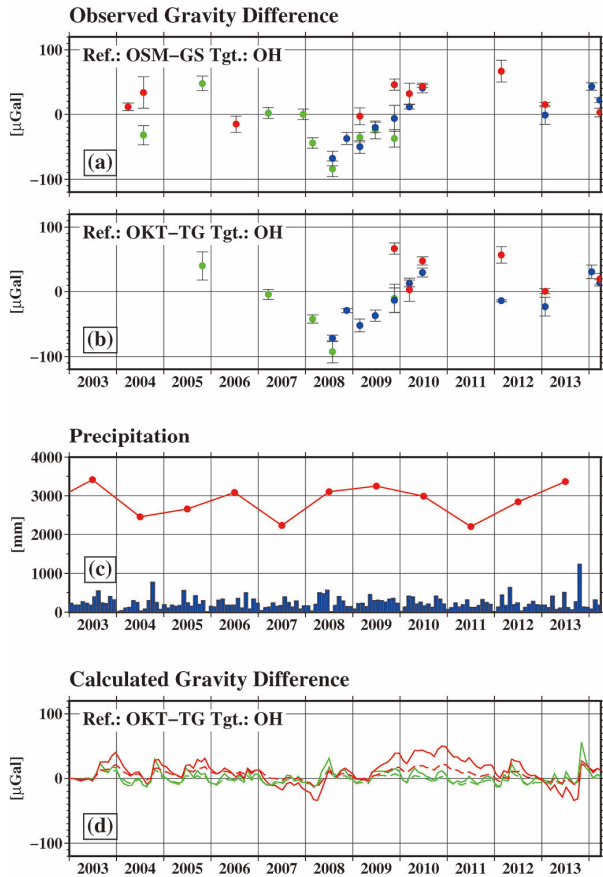


Fig. 9. Preliminary calculations of gravity changes caused by meteoric water infiltration. (a) and (b) observed gravity changes. Red circles: D#109. Blue circles: CG-5#033. Green circles: CG-3M#454. (c) Observed precipitation. (d) Calculated gravity difference.

山体への浸透が観測される重力変化をもたらしていると考えられる。Fig. 6 の標高差の大きい観測点間にて見られる重力差の大きな擾乱はこれを反映したものと予想され、火山活動に伴う全島的、長期的な重力変化を議論するためにはこの評価、補正が不可欠である。

なお、本計算で用いた熱水シミュレータ STAR は元来地熱開発への使用目的のため、空隙内の多成分の流体の相変化や溶存成分等も計算できるため計算コストが非常に大きく、標準状態の水の流動のみが本質となる本研究での実践の用途には向かない。迅速な火山活動監視・評価への適用を考えた場合、Kazama *et al.* (2015) をはじめとする一連の研究によって進展してきたより計算コストの小さな 1~3 次元水文学シミュレーションを利用することが望ましい。また、降雨に対する重力変動の応答を何らかの関数でモデル化して、関数に現れる未知パラメータを逆問題として解くといったデータ同化を念頭に置いた経験的補正方法 (西山・他, 2020) を導入することも有用かもしれない。

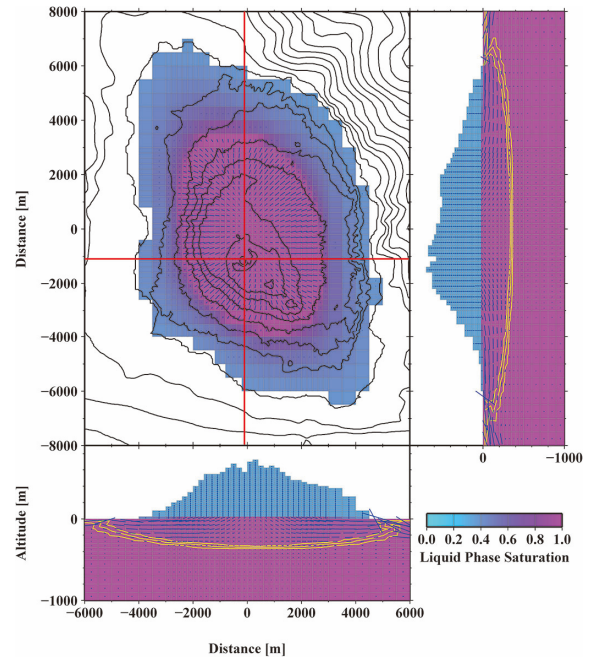


Fig. 10. Initial state for groundwater flow simulation considering meteoric water infiltration.

### 5.3 火山活動に伴う重力変化の検出と活動評価

伊豆大島では 1986 年噴火以降、マグマ溜まりへのマグマの蓄積によると考えられる全島的な山体膨張が観測されてきた。地殻変動と重力とを連成させた観測・解析からはマグマ溜まり内の情報の抽出が期待され、気象研究所では GNSS と重力観測を継続している。観測されている山体膨張は山麓から山頂に至る全島的かつ長期的な現象であることから、前節に記した天水浸透に伴う重力変化を補正することにより、火山活動に伴う重力変化を検出することが次の課題である。

併せて、地殻変動に現れない、あるいは見合わない異常の検出が重力観測のもう一つの大きな意義である。伊豆大島では 1986 年から始まる一連の活動の中でマグマ後退期のマグマ頭位の推定が行われた (Watanabe *et al.*, 1998)。顕著な地殻変動を伴わず質量の増加/減少を示唆する重力変化は、エトナ、キラウエア、三宅島等、特に玄武岩あるいは玄武岩質安山岩の活動を行っている火山で報告されており、地下の空隙中へのマグマの浸透・排出や新たな空隙の形成で解釈される (例えば, Rymer *et al.*, 1993; Furuya *et al.*, 2003; Johnson *et al.*, 2010)。4.3 節に記した三原山 (G20, G22) での重力増加については、この観点を含めて原因を追究していくことが次の課題である。定量化に当たっては、三原山では沈降の他、火孔が閉じるセンスの収縮も観測されていることから、高繊細な地形変化の把握や媒質の変形のモデル化なども



必要になるかもしれない。

科学的な記録が残っている 1876 年噴火以降、1986 年の割れ目噴火を除きすべての噴火は三原山で発生してきた。併せて、三原山ではマグマ上昇による火孔底上昇とマグマ溢流、活動低下時のマグマ後退・火孔底低下という活動を繰り返しており、これは安定した火道が形成されていることを示唆するものである。浅間山の場合、2004 年噴火に伴い実施された絶対重力連続観測によってマグマ上昇・下降に伴う重力変化を検出するとともに、火道径やマグマ頭位の推定にまで至っている（大久保、2005）。伊豆大島三原山において、安定火道中のマグマの上昇・下降は将来も起こり得る活動と考えられ、このような連続観測は、火山活動監視・評価、マグマ活動の解明の点で大きく寄与するであろう。

## 6. まとめ

伊豆大島火山の火山活動の解明と活動評価への適用に向けて、東京大学地震研究所及び気象研究所では精密重力観測を行っており、2018 年より合同観測研究を実施してきた。このうち本稿では、繰り返し実施してきた絶対重力測定結果と相対重力測定に用いている CG-5#033 に関するスケールファクターの検証・再校正及び伊豆大島火山での繰り返し測定によって得られた結果の特徴について示した。

- ・ JGSN2016 重力点を用いて決定したスケールファクター（Onizawa, 2019）について、伊豆大島及び新たに JGSN2016 の絶対重力値を用いて検証を行い、その妥当性が確認された。併せて、将来への活用に向けて、これら新たな検定データも併せてスケールファクターの再校正を行った。
- ・ 2018 年から 2021 年に毎年 11 月に実施してきた絶対・相対ハイブリッド観測から全島の絶対重力の時間変化を明らかにした。
- ・ 山麓から山頂に至る既定路線での相対重力測定では、特に観測点間標高差の大きい場合に重力差に振幅の大きな擾乱が認められる。
- ・ これら観測された重力変化量は、測定点の上下変動から期待される重力変化（フリーエア効果）より大きい。これらは、天水浸透に伴う重力変化である可能性が考えられる。
- ・ 相対重力変化でみられる三原山での重力増加は、同観測点の経年的な沈降から予想されたものであるが、その増加率はフリーエア効果から期待される値よりも大きい。

## 謝 辞

国土地理院測地部物理測地課の皆様には日本重力基準網についての情報、データをご提供頂くとともに、検定測定のための便宜を図って頂きました。熊本基準重力点での測定においては、九州測量専門学校の皆様にご協力頂きました。伊豆大島における観測では、東京航空局東京空港事務所、伊豆大島区検察庁、大島町教育文化課の皆様のご協力を頂きました。査読者である東京大学地震研究所の青木陽介博士には原稿を改善するための建設的なご助言を頂きました。本研究は東京大学地震研究所共同利用（2018-G-12, 2020-G-13, 2021-G-04, 2022-G-05）の援助を受けました。記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- Becker, M., E. Groten, A. Lambert, J. O. Liard and S. Nakai, 1987, An intercomparison of LaCoste and Romberg Model-D gravimeters: results of the International D-meter Campaign 1983, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **89**, 499-526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb05181.x>
- Furuya, M., S. Okubo, W. Sun, Y. Tanaka, J. Oikawa, H. Watanabe and T. Maekawa, 2003, Spatiotemporal gravity changes at Miyakejima Volcano, Japan: Caldera collapse, explosive eruptions and magma movement. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **108**, 2219. <https://doi.org/10.1029/2002JB001989>
- 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—東京及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>
- Johnson, D. J., A. A. Eggers, M. Bagnardi, M. Battaglia, M. P. Poland and A. Miklius, 2010, Shallow magma accumulation at Kilauea Volcano, Hawai'i, revealed by microgravity survey, *Geology*, **38**, 1139-1142. <https://doi.org/10.1130/G31323.1>
- 川辺禎久, 1998, 伊豆大島火山地質図, 火山地質図 10, 地質調査所.
- Kazama, T., S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka and E. Koyama, 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. <https://doi.org/10.1002/2014JB011563>
- 小泉岳司・福井敬一・橋本徹夫・干場充之・清野政明・里村幹夫, 1988, 伊豆大島における重力変化—1985 年 11 月～1988 年 5 月—, *火山*, **33**, 291-303. [https://doi.org/10.18940/kazanc.33.4\\_291](https://doi.org/10.18940/kazanc.33.4_291)
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe M, 2001, GOTIC2: a program for computation of oceanic tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Jpn.*, **47**, 243-248. <https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.47.243>
- Matsushima, N., 2011, Estimation of permeability and degassing depth of Iwodake volcano at Satsuma-Iwojima, Japan, by thermal observation and numerical simulation, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **202**, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.02.005>
- Niebauer, T.M., G.S. Sasagawa, J.E. Faller, R.L. Hilt and F. Klipping, 1995, A new generation of absolute gravimeters,

- Metrologia*, **32**, 159–180. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/3/004>
- 西山竜一・今西祐一・鬼澤真也・大久保修平・安藤美和子・渡邊篤志・坂下至功・長岡 優・田中愛幸・渡辺秀文, 2020, 伊豆大島 2010 年代の重力変動について, 地球惑星科学連合 2020 年大会, SVC45 P16.
- 大久保修平, 2005, 重力変化から火山活動を探る—観測・理論・解析, *火山*, **50**, S49–S58. [https://doi.org/10.18940/kazan.50.Special\\_S49](https://doi.org/10.18940/kazan.50.Special_S49)
- 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>
- Okubo, S. and H. Watanabe, 1989, Gravity change caused by a fissure eruption, *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 445–448. <https://doi.org/10.1029/GL016i005p00445>
- 鬼澤真也, 2013, 伊豆大島における地殻変動観測, 気象研究所技術報告, **69**, 24–35. <https://doi.org/10.11483/mritechrepo.69>
- 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>
- Onizawa, S., N. Matsushima, T. Ishido, H. Hase, S. Takakura and Y. Nishi, 2009, Self-potential distribution on active volcano controlled by three-dimensional resistivity structure, Izu-Oshima, Japan, *Geophys. J. Int.*, **178**, 1164–1181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04203.x>
- 鬼澤真也・高木朗充・福井敬一・安藤 忍, 2014, 伊豆大島火山のマグマ蓄積期における重力変化, 地球惑星科学連合 2014 年大会, SVC55 P10.
- 鬼澤真也・高木朗充・松島喜雄・安藤 忍・福井敬一・平山康夫, 2016, 伊豆大島火山における重力変化, 日本火山学会 2016 年秋季大会, A3–07.
- Pritchett, J.W., 1995, STAR: A geothermal reservoir simulation system, in *Proceedings of World Geothermal Congress 1995*, pp. 2959–2963, Int. Geothermal Assoc., Florence.
- Reudink, R., R. Klees, O. Francis, J. Kusche, R. Schlesinger, A. Shabanloui, N. Sneeuw and L. Timmen, 2014, High tilt susceptibility of the Scintrex CG-5 relative gravimeters, *J. Geod.*, **88**, 617–622. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0705-0>
- Rymer, H., J. B. Murray, G. C. Brown, F. Ferrucci and W. J. McGuire, 1993, Mechanisms of magma eruption and emplacement at Mt Etna between 1989 and 1992, *Nature*, **361**, 439–441. <https://doi.org/10.1038/361439a0>
- Scintrex Ltd., 2010, CG-5 Scintrex autograv system operation manual, part # 867700 Revision 7, Scintrex Limited, Concord.
- 高木朗充・福井敬一・山里 平・藤原健治・加治屋秋実, 2010, 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定, 気象研究所研究報告, **61**, 1–11. <https://doi.org/10.2467/mripapers.61.1>
- Valliant, H. D., 1991, Gravity meter calibration at LaCoste and Romberg, *Geophysics*, **56**, 705–711.
- Watanabe, H., S. Okubo, S. Sakashita and T. Maekawa, 1998, Drain-back process of basaltic magma in the summit conduit detected by microgravity observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2865–2868. <https://doi.org/10.1029/98GL02216>
- 吉田賢司・矢萩智裕・平岡喜文・宮原伐折羅・山本宏章, 2018, 日本重力基準網 2016 (JGSN2016) の構築, 国土地理院時

報, **131**, 53–93.(Received October 20, 2022)  
(Accepted December 25, 2022)

## 付録 1 CG-5 型重力計の感度

CG-5 型重力計は溶融水晶でできたバネの伸びにより重力を検知するものである。バネは可変コンデンサーの片方の極板に取り付けられ、重力値に応じて変化する静電容量に対して、フィードバック回路によりこの極板をゼロ位置に戻す際に印加される電圧出力を検知することにより重力を測定している。検定電圧で規格化されたフィードバック直流電圧の A/D 変換出力  $AD_{out}$  から重力単位 [mGal] の読取值  $g^{read}$  への変換は下記のように表現される：

$$g^{read} = GCAL1 \times AD_{out} + GCAL2 \times AD_{out}^2.$$

ここで感度を規定する  $GCAL1$  及び  $GCAL2$  は calibration factor と呼ばれ、個体毎に与えられるパラメータである (Scintrex Ltd., 2010)。これら  $GCAL1$  及び  $GCAL2$  はメーカーにて検定され重力計内部に設定された上で出荷されるが、その後ユーザにて変更することも可能である。

CG-5#033 の場合、メーカー出荷時に設定されたパラメータを変更せずに使用している。ただし、2010 年に生じたディスプレイモジュール故障の修理のためメーカーへ発送した際、calibration factor も再検定により変更されている。これら CG-5#033 についての calibration factor の履歴を Table A1 にまとめる。なお、両期間で異なる calibration factor に対して得られた重力読取值について感度に対する条件を揃えるためには補正が必要である。表中 “Factor for adjusting to setting in Period 2” の値は、Period 1 での重力読取值を Period 2 での感度設定に換算するための係数である。

## 付録 2 読取值依存スケールファクターの表現と較正

式 (2) に記したスケールファクター  $S$  が定数ではなく、読取值に依存する場合、これを多項式で表現すると

$$S(g^{read}) = \sum_{j=0}^J c_j (g^{read})^j$$

Table A1. Calibration factor settings for CG-5#033 gravimeter.

Period	Date setting	Calibration factors		Factor for adjusting to setting in Period 2
		GCAL1	GCAL2	
1	October 12, 2004	8200.007	0	1.000819
2	October 19, 2011	8206.725	0	-

$$g^{corr} = S(g^{read}) g^{read}$$

と書ける。ここで  $S(g^{read})$  及び  $g^{corr}$  はそれぞれ読取値依存スケールファクター、スケールファクター補正後の重力読取値、 $j (= 0, \dots, J)$  は多項式の次数、 $c_j$  は各次の係数である。

ここで、観測点 1, 2 の組合せに対する重力差を想定した場合、補正後の重力読取値の差  $\Delta g_{21}^{corr}$  が真の重力差  $\Delta g_{21}^{true}$  と等しくなるべきことから

$$\begin{aligned} \Delta g_{21}^{true} &= \Delta g_{21}^{corr} \\ &= S(g_2^{read}) g_2^{read} - S(g_1^{read}) g_1^{read} \end{aligned}$$

と記述される。さらに CG-5#033 については Fig. 4 のように重力読取値に対して区間スケールファクターがほぼ直線上に乗ることから、重力読取値に対する線形のスケールファクターを仮定すると

$$S(g_i^{read}) = c_0 + c_1 g_i^{read}$$

と記述できる。従って、

$$\Delta g_{21}^{true} = c_0(g_2^{read} - g_1^{read}) + c_1((g_2^{read})^2 - (g_1^{read})^2)$$

と表現できる。

較正にあたっては、これを  $c_0$  及び  $c_1$  を未知数とした観測方程式とし、絶対重力点間の重力差を既知の真値  $\Delta g_{21}^{true}$  とみなして、利用可能な観測点組合せに対して解けばよい。Table A2 に記した係数  $c_0$  及び  $c_1$  はこのようにして決定したパラメータである。なお、Onizawa (2019) や本研究で実施した検定測量はすべて Table A1 の Period 2 内であり、ここに示す係数  $c_0$  及び  $c_1$  も同期間の calibration factor に対するものである。

### 付録 3 GNSS 移設・更新に伴う重力接続

本研究における重力観測には多くの GNSS 観測点を利用しているが、気象研究所の GNSS 観測点は基礎・支

柱も含めて老朽化が進んでいたため、本稿で示す期間中にも隣接場所への移設を伴う更新作業を行ってきた。これら移設更新では、旧観測点撤去前に新観測点を設置し、新旧観測点間の GNSS データ接続のための並行観測期間を設けた。GNSS 観測点の基礎上で実施する重力測定においても、この GNSS 並行観測期間中に接続測定を行い、新旧観測点間のオフセット量を算出した。Table A3 に CG-5#033 での測定による旧観測点から新観測点へ重力値を接続するためのオフセット量をまとめた。

### 付録 4 観測点情報及び測定データ

Fig. 5 に示した 1 年毎の絶対重力時間変化の基となった島内観測点の絶対重力値リストを Table A4 に、また、Figs. 6, 8 にプロットした観測点間の重力差の時系列データについては Table A5 に取りまとめた。

なお、Figs. 5, 6, 8 に図示したデータ及び Table A4, A5 にまとめた数値データは、Table A3 に示したオフセット量をすでに加味した結果である。いずれのデータに対してオフセット処理を実施したかを追跡できるよう、Table A4, A5 の備考欄にはその旨を記載している。

### 付録 5 STAR 地熱貯留層シミュレータ

本シミュレータは地熱貯留層の変動予測等の地熱開発の用途に開発されたものであり、不均質媒質中の空隙内流体の非定常な流動と熱輸送を数値的に計算するものである。基礎方程式は、ダルシー流を仮定した質量保存則とエネルギー保存則に基づく。対象領域は有限差分グリッドによって離散化され、任意の地形が表現されるほか、母岩となる周辺媒質はグリッド毎に空隙率、浸透率、熱伝導率等の物性を与えることが出来る。一方、空隙内流体については、水・空気等の「多成分」、液相・固相等の「多相」を取り扱うことができ、対象とする用途や温度・圧力条件に応じて適切な状態方程式を選択し利用することができる。これらを与えられた初期条件、境界条件のもと方程式を解き、空隙内流体の温度、圧力、液相飽和度等の空間分布と時間分布を計算する。基礎方程式も含めた本ソフトウェアの概要については、Matsushima (2011) を参照されたい。

Table A2. Coefficients for reading-dependent scale factor for CG-5#033 gravimeter. The values given in parentheses are the standard deviations of the estimated coefficients.

$c_0$	$c_1$
<b>Onizawa (2019)</b>	
0.9956492001 (0.0000919565)	0.0000004932 (0.000000107)
<b>Corrected in this study</b>	
0.9956249347 (0.0000778341)	0.0000004967 (0.000000089)

伊豆大島における合同重力観測

Table A3. Offset gravity values observed by CG-5#033 for adjusting from old to new measurement points associated with GNSS replacements.

Site	Gravity Difference			Measurement Date	
	(Old)	(New)	(New) - (Old) [mGal]		Error [mGal]
G10	G10A	G10D	-0.110	0.002	2019-03-29
G12	G12C	G12D	0.893	0.002	2019-03-06
G18	G18B	G18C	0.030	0.004	2021-03-14
G20	G20B	G20C	0.431	0.001	2019-03-16

Table A4. List of absolute gravity values obtained by yearly hybrid absolute and relative measurements.

Site	2018	2019	2020	2021	Remarks
	Nov. 12-22 Gravity [mGal]	Nov. 5-16 Gravity [mGal]	Nov. 13-21 Gravity [mGal]	Nov. 6-16 Gravity [mGal]	
TBT	979808.251	979808.273	979808.255	979808.232	
G05	979750.669	979750.690	979750.683		
NWRM	979717.131	979717.161	979717.148	979717.112	
G09		979756.803	979756.792	979756.791	
G10	979730.753 *	979730.786	979730.795	979730.775	*G10A: Offset corrections adjusting to G10D have been done.
G11	979762.624	979762.643	979762.633	979762.630	
G12	979683.117 *	979683.156	979683.147	979683.145	*G12C: Offset corrections adjusting to G12D have been done.
FTG	979699.055			979699.064	
G18	979727.073 *	979727.102 *	979727.097 *	979727.063	*G18B: Offset corrections adjusting to G18C have been done.
G20	979692.197 *	979692.228	979692.234	979692.210	*G20B: Offset corrections adjusting to G20C have been done.
G22	979672.738	979672.774	979672.768	979672.752	
G24	979732.435	979732.468	979732.461	979732.461	
OKT-TG	979854.313	979854.322	979854.328	979854.302	
G29	979830.954	979830.970	979830.949	979830.962	
G30		979694.169	979694.164	979694.141	
G31				979749.145	
G32				979839.524	
10210	979837.136	979837.155			
10212	979847.427				
10217	979772.945				
10220	979776.170				
10226	979827.966				
10228	979822.733	979822.746			
10233	979837.103	979837.125			
93051A	979833.145	979833.169	979833.151	979833.143	
93055A	979827.931		979827.949	979827.945	
960594A	979828.332	979828.357	979828.336	979828.336	
960595A	979835.656	979835.672		979835.666	
OSM-GS	979829.772	979829.789	979829.784	979829.770	
YUBA	979752.865	979752.889	979752.894	979752.874	
OVO	979830.157	979830.178	979830.136		
O-1001	979732.845				
O-1002N	979718.701	979718.729			
O-1003	979753.415	979753.443			
O-1004	979784.669	979784.699	979784.689	979784.659	
O-1116	979773.787	979773.811			
FK-105	979700.138	979700.160	979700.154		
OH	979741.750	979741.772	979741.764	979741.732	
ERI-GPS-SJ	979827.637				

Table A5. List of observed gravity differences for selected site combinations shown in Figs. 6 and 8.

**Fig. 6a**

Reference Site: NWRM			
Target Site: G20			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2009/02/21	-25.002	0.005	G20B*
2010/06/24	-24.975	0.010	
2014/03/24	-24.978	0.006	
2016/12/21	-24.945	0.003	
2017/03/10	-24.945	0.006	
2017/10/26	-24.927	0.011	
2018/03/07	-24.933	0.005	
2018/07/24	-24.940	0.012	
2018/11/17	-24.938	0.004	
2019/01/18	-24.910	0.003	
2019/06/06	-24.919	0.009	G20C
2019/08/01	-24.931	0.003	
2019/11/12	-24.934	0.003	
2020/02/04	-24.920	0.004	
2020/03/26	-24.926	0.004	
2020/11/13	-24.915	0.004	
2021/01/19	-24.916	0.005	
2021/03/11	-24.911	0.004	
2021/06/21	-24.919	0.003	
2021/08/05	-24.911	0.003	
2022/03/16	-24.910	0.005	
2022/06/23	-24.910	0.002	

\*Offset corrections adjusting to G20C have been done.

**Figs. 6b and 8g**

Reference Site: OH			
Target Site: G20			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2014/03/24	-49.599	0.007	G20B*
2016/03/17	-49.591	0.008	
2016/12/21	-49.575	0.002	
2017/10/26	-49.576	0.010	
2018/03/07	-49.551	0.004	
2018/07/24	-49.566	0.010	
2018/11/17	-49.558	0.002	
2018/11/19	-49.541	0.004	
2019/08/01	-49.552	0.003	G20C
2019/11/12	-49.550	0.006	
2020/02/04	-49.534	0.004	
2020/03/26	-49.538	0.003	
2020/11/13	-49.531	0.005	
2021/01/19	-49.525	0.006	

\*Offset corrections adjusting to G20C have been done.

**Fig. 6c**

Reference Site: TBT			
Target Site: G20			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/06/24	-116.102	0.003	G20B*
2017/10/26	-116.059	0.010	
2018/03/07	-116.047	0.002	
2019/06/06	-116.058	0.002	G20C
2019/08/01	-116.053	0.003	
2019/11/12	-116.046	0.003	
2020/02/04	-116.024	0.004	
2020/03/26	-116.030	0.004	
2020/11/13	-116.025	0.003	
2021/01/19	-116.028	0.006	
2021/03/11	-116.027	0.003	
2021/06/21	-116.025	0.008	
2022/03/16	-116.025	0.003	
2022/06/23	-116.036	0.003	

\*Offset corrections adjusting to G20C have been done.

**Fig. 6d**

Reference Site: OSM-GS			
Target Site: G20			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2009/02/21	-137.678	0.009	G20B*
2016/03/17	-137.628	0.004	
2017/10/26	-137.582	0.010	
2018/03/07	-137.567	0.008	
2018/07/24	-137.598	0.009	
2019/06/06	-137.601	0.003	G20C
2019/08/01	-137.577	0.002	
2019/11/12	-137.562	0.004	
2020/02/04	-137.543	0.005	
2020/03/26	-137.557	0.003	
2020/11/13	-137.551	0.002	
2021/01/19	-137.556	0.007	
2021/06/21	-137.560	0.008	

\*Offset corrections adjusting to G20C have been done.

**Fig. 6e**

Reference Site: OKT-TG			
Target Site: G20			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2017/03/10	-162.144	0.005	G20B*
2017/10/26	-162.111	0.012	
2018/03/07	-162.125	0.006	
2018/07/24	-162.159	0.009	
2019/06/06	-162.144	0.002	G20C
2019/08/01	-162.110	0.002	
2019/11/12	-162.091	0.006	
2020/02/04	-162.081	0.005	
2020/03/26	-162.084	0.003	
2020/11/13	-162.095	0.003	
2021/01/19	-162.114	0.004	
2021/03/11	-162.112	0.002	
2021/06/21	-162.114	0.009	
2021/08/05	-162.108	0.003	
2021/11/13	-162.093	0.002	
2022/03/16	-162.103	0.003	
2022/06/23	-162.089	0.001	

\*Offset corrections adjusting to G20C have been done.

**Figs. 6f and 8b**

Reference Site: OH			
Target Site: NWRM			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2008/11/16	-24.626	0.003	
2009/06/21	-24.651	0.004	
2010/03/13	-24.641	0.007	
2013/01/23	-24.630	0.012	
2014/01/21	-24.619	0.007	
2014/01/22	-24.620	0.006	
2014/03/24	-24.622	0.004	
2014/03/25	-24.622	0.006	
2016/12/21	-24.631	0.003	
2016/12/22	-24.632	0.004	
2017/03/11	-24.623	0.006	
2017/10/26	-24.649	0.006	
2018/03/07	-24.618	0.006	
2018/07/24	-24.626	0.010	
2018/11/17	-24.620	0.004	
2018/11/20	-24.619	0.003	
2019/08/01	-24.621	0.004	
2019/11/12	-24.616	0.006	
2020/02/04	-24.614	0.005	
2020/03/26	-24.612	0.004	
2020/07/28	-24.620	0.003	
2020/11/13	-24.616	0.006	
2021/01/19	-24.609	0.006	
2021/11/12	-24.621	0.007	

**Fig. 6g**

Reference Site: TBT			
Target Site: NWRM			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2008/11/16	-91.114	0.003	
2009/06/21	-91.141	0.003	
2010/03/13	-91.124	0.005	
2010/06/24	-91.128	0.010	
2010/06/25	-91.127	0.010	
2014/01/21	-91.118	0.006	
2014/03/25	-91.141	0.005	
2016/12/22	-91.132	0.008	
2017/10/26	-91.132	0.007	
2018/03/07	-91.114	0.005	
2018/11/20	-91.119	0.006	
2019/06/06	-91.139	0.009	
2019/08/01	-91.122	0.004	
2019/11/12	-91.112	0.003	
2020/02/04	-91.104	0.005	
2020/03/26	-91.104	0.005	
2020/11/13	-91.110	0.004	
2021/01/19	-91.112	0.007	
2021/03/11	-91.116	0.004	
2021/06/21	-91.105	0.008	
2021/11/12	-91.121	0.003	
2022/03/16	-91.116	0.004	
2022/06/23	-91.127	0.003	



伊豆大島における合同重力観測

Table A5. Continued.

**Fig.6h**

Reference Site: OSM-GS			
Target Site: NWRM			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2009/02/21	-112.676	0.007	
2009/02/22	-112.686	0.007	
2009/06/26	-112.663	0.006	
2014/01/21	-112.643	0.007	
2014/03/25	-112.666	0.004	
2016/12/22	-112.659	0.006	
2017/10/26	-112.655	0.007	
2018/03/07	-112.634	0.009	
2018/07/24	-112.658	0.008	
2019/06/06	-112.682	0.009	
2019/08/01	-112.646	0.004	
2019/11/12	-112.629	0.004	
2020/02/04	-112.623	0.006	
2020/03/26	-112.631	0.004	
2020/07/28	-112.621	0.006	
2020/11/13	-112.636	0.004	
2021/01/19	-112.640	0.007	
2021/06/21	-112.641	0.007	

**Fig.6i**

Reference Site: OKT-TG			
Target Site: NWRM			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/06/25	-137.153	0.008	
2014/03/25	-137.210	0.008	
2017/03/10	-137.200	0.006	
2017/10/26	-137.184	0.010	
2018/03/07	-137.192	0.008	
2018/07/24	-137.219	0.009	
2019/06/06	-137.225	0.008	
2019/08/01	-137.179	0.003	
2019/11/12	-137.157	0.006	
2020/02/04	-137.161	0.006	
2020/03/26	-137.158	0.004	
2020/03/27	-137.166	0.003	
2020/07/28	-137.160	0.005	
2020/11/13	-137.180	0.004	
2021/01/19	-137.198	0.005	
2021/03/11	-137.201	0.004	
2021/06/21	-137.195	0.009	
2021/08/05	-137.197	0.003	
2021/11/12	-137.191	0.004	
2022/03/16	-137.194	0.004	
2022/06/23	-137.179	0.002	

**Fig.6j**

Reference Site: TBT			
Target Site: OH			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2008/11/16	-66.488	0.004	
2009/06/21	-66.490	0.003	
2010/03/13	-66.484	0.006	
2014/01/21	-66.499	0.005	
2014/03/25	-66.518	0.007	
2016/03/16	-66.517	0.006	
2016/12/22	-66.500	0.007	
2017/05/31	-66.494	0.003	
2017/06/01	-66.507	0.004	
2017/10/26	-66.483	0.004	
2018/03/07	-66.496	0.004	
2018/11/20	-66.501	0.006	
2019/08/01	-66.501	0.004	
2019/11/12	-66.496	0.006	
2020/02/04	-66.490	0.005	
2020/03/26	-66.492	0.004	
2020/11/13	-66.494	0.006	
2021/01/19	-66.503	0.007	
2021/11/12	-66.500	0.007	

**Fig.6k**

Reference Site: OSM-GS			
Target Site: OH			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2014/01/21	-88.024	0.006	
2014/03/25	-88.044	0.006	
2016/03/16	-88.038	0.007	
2016/03/17	-88.037	0.008	
2016/12/22	-88.027	0.005	
2017/03/08	-88.036	0.005	
2017/10/26	-88.006	0.004	
2018/03/07	-88.016	0.009	
2018/07/24	-88.032	0.006	
2019/08/01	-88.025	0.003	
2019/11/12	-88.013	0.007	
2020/02/04	-88.008	0.006	
2020/03/26	-88.019	0.003	
2020/07/28	-88.001	0.006	
2020/11/13	-88.020	0.005	
2021/01/19	-88.031	0.008	

**Fig.6l**

Reference Site: OKT-TG			
Target Site: OH			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2014/03/25	-112.587	0.009	
2017/03/08	-112.580	0.005	
2017/05/31	-112.577	0.004	
2017/06/01	-112.591	0.004	
2017/10/26	-112.535	0.008	
2018/03/07	-112.574	0.007	
2018/07/24	-112.593	0.006	
2019/08/01	-112.558	0.003	
2019/11/12	-112.541	0.008	
2020/02/04	-112.546	0.006	
2020/03/26	-112.546	0.003	
2020/07/28	-112.540	0.005	
2020/11/13	-112.564	0.006	
2021/01/19	-112.589	0.006	
2021/11/12	-112.570	0.008	

**Fig.6m**

Reference Site: OSM-GS			
Target Site: TBT			
Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/06/23	-21.497	0.004	
2013/01/24	-21.533	0.004	
2014/01/21	-21.525	0.005	
2014/03/25	-21.525	0.005	
2016/03/16	-21.520	0.005	
2016/12/22	-21.526	0.008	
2017/10/26	-21.523	0.005	
2018/03/07	-21.520	0.008	
2019/06/06	-21.543	0.003	
2019/08/01	-21.524	0.003	
2019/11/12	-21.517	0.005	
2020/02/04	-21.519	0.006	
2020/03/26	-21.527	0.005	
2020/11/13	-21.526	0.003	
2021/01/19	-21.528	0.008	
2021/06/21	-21.535	0.010	

Table A5. Continued.

**Fig.6n**Reference Site: OKT-TG  
Target Site: TBT

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/06/25	-46.026	0.008	
2014/03/25	-46.069	0.009	
2017/05/31	-46.083	0.004	
2017/06/01	-46.084	0.004	
2017/10/26	-46.051	0.009	
2018/03/07	-46.078	0.006	
2019/06/06	-46.086	0.002	
2019/08/01	-46.057	0.003	
2019/11/12	-46.045	0.006	
2020/02/04	-46.057	0.006	
2020/03/26	-46.055	0.004	
2020/11/13	-46.070	0.004	
2021/01/19	-46.086	0.007	
2021/03/11	-46.085	0.002	
2021/06/21	-46.089	0.012	
2021/11/12	-46.070	0.004	
2022/03/16	-46.078	0.002	
2022/06/23	-46.052	0.002	

**Fig.6o**Reference Site: OKT-TG  
Target Site: OSM-GS

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2008/11/15	-24.509	0.009	
2009/11/18	-24.521	0.005	
2014/03/25	-24.543	0.008	
2015/02/19	-24.542	0.003	
2017/03/08	-24.544	0.005	
2017/10/26	-24.529	0.008	
2018/03/07	-24.558	0.010	
2018/07/24	-24.561	0.003	
2019/06/06	-24.543	0.003	
2019/08/01	-24.533	0.002	
2019/11/12	-24.529	0.007	
2020/02/04	-24.538	0.007	
2020/03/26	-24.528	0.003	
2020/07/28	-24.539	0.006	
2020/11/13	-24.544	0.003	
2021/01/19	-24.558	0.007	
2021/06/21	-24.554	0.011	
2021/11/09	-24.532	0.006	

**Fig. 8a**Reference Site: OH  
Target Site: G18

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2009/06/21	-14.703	0.004	G18B*
2010/03/13	-14.686	0.009	
2013/01/23	-14.690	0.007	
2014/01/21	-14.686	0.006	
2014/03/25	-14.674	0.007	
2016/03/16	-14.681	0.011	
2017/03/11	-14.680	0.005	
2018/11/17	-14.679	0.002	
2018/11/21	-14.672	0.007	
2019/11/08	-14.669	0.003	

\*Offset corrections adjusting to G18C have been done.

**Fig. 8c**Reference Site: OH  
Target Site: G12

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/03/12	-58.650	0.007	G12C*
2016/12/21	-58.642	0.005	
2017/03/11	-58.635	0.009	
2018/11/19	-58.630	0.006	

\*Offset corrections adjusting to G12D have been done.

**Fig. 8d**Reference Site: OH  
Target Site: G05

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/03/12	8.895	0.007	
2014/01/22	8.928	0.006	
2014/03/22	8.918	0.004	
2017/03/11	8.919	0.006	
2018/11/21	8.924	0.007	
2019/11/15	8.918	0.003	

**Fig. 8e**Reference Site: OH  
Target Site: G24

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2010/03/12	-9.353	0.007	
2014/01/22	-9.329	0.006	
2014/03/22	-9.347	0.005	
2017/03/11	-9.328	0.006	
2018/11/21	-9.310	0.008	
2019/11/15	-9.304	0.003	

**Fig. 8f**Reference Site: OH  
Target Site: G10

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2014/01/22	-10.967	0.008	G10A*
2014/03/22	-10.995	0.006	
2017/03/11	-10.991	0.008	
2018/11/19	-10.994	0.005	
2019/11/15	-10.986	0.002	G10D

\*Offset corrections adjusting to G10D have been done.

**Fig. 8h**Reference Site: OH  
Target Site: G22

Date	Grav. Diff. [mGal]	Error [mGal]	Remarks
2014/01/22	-69.051	0.007	
2014/03/24	-69.065	0.005	
2016/03/17	-69.053	0.008	
2016/12/21	-69.041	0.005	
2018/07/24	-69.020	0.010	
2018/11/17	-69.015	0.003	
2018/11/19	-69.001	0.005	