



| | |
|------------------|---|
| Title | 屈斜路カルデラ地域における相対重力測定 |
| Author(s) | 丸藤, 大樹; Marufuji, Taiki; 名和, 一成 他 |
| Citation | 北海道大学地球物理学研究報告, 87, 1-10 |
| Issue Date | 2024-03-25 |
| DOI | https://doi.org/10.14943/gbhu.87.1 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/91406 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/ |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | GBHU_87_1-10.pdf |



屈斜路カルデラ地域における相対重力測定

丸藤大樹^{1,2}・名和一成²・高橋浩晃³

¹北海道大学大学院理学院

²産業技術総合研究所地質調査総合センター

³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

(2024年2月26日受理)

Relative gravity measurements around Kussharo caldera

Taiki MARUFUJI^{1,2}, Kazunari NAWA², Hiroaki TAKAHASHI³

¹ Graduate School of Science, Hokkaido University

² Geological Survey of Japan, AIST

³ Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received February 26, 2024)

Relative gravity measurements with CG-5 gravimeter were performed in the Kussharo Caldera area in 2022 and 2023. The measurement time at a gravity point was set to 90 min to decrease the effects from gravimeter transportation. It was found that the perturbation after 60 min to be less than $5 \mu\text{Gal}$ and good for measurement. Data with tidal, drift and scale factor corrections represented stable gravity values less than $10 \mu\text{Gal}$ changes at TOPT, KUTC, TNBT. The gravity increases of $80 \mu\text{Gal}$ at S049 was not explained by volcanic inflation modeling and might be due to artificial reasons.



I. はじめに

北海道大学弟子屈観測所では、2018年から2022年まで超伝導重力計による連続測定が行われていた(名和ほか, 2019). 連続測定データの解析により, 弟子屈観測所の重力は約4年の間 $\pm 5 \mu\text{Gal}$ と非常に安定していることが分かっている(丸藤ほか, 2023). 超伝導重力計の測定は終了したが, 弟子屈観測所を基準とした相対重力測定により, 屈斜路カルデラ周辺地域の重力変化を明らかにできる可能性がある.

屈斜路カルデラ中央部にあるアトサヌプリカルデラでは, 1993年から1995年に掛けて膨張性の地殻変動とそれに続く沈降が見られた. Fujiwara et al (2017) では, シル状の膨張源を推定することで, その変動を説明した. アトサヌプリカルデラでは, 2021年秋以降膨張性の地殻変動が検出されている(気象庁, 2023). この膨張現象に伴う重力変化をモニターするため, 弟子屈観測所を基点とする相対重力測定を実施したのでその結果を報告する.

II. 測定とデータ解析

相対重力測定は, 2023年6月19日~22日と9月12~14日に行った. 測定は2022年6月29日~7月1日にも行われているが(Fig. 1, Table 1), 測定時間として設定していた30分間では重力計運搬によるデータ擾乱が大きい状態での測定値となり, 誤差が大きいことが示唆されている(本多ほか, 2022). そこで, 2023年の測定では, 車での移動後の測定時間を延ばし, 重力計運搬によるデータ擾乱の影響を評価したうえで, 相対重力変化を検討する. 車での移動(20~50分)のあとには2分 \times 45回=90分間程度, 手持ちでの数分の移動のあとには2分 \times 15分=30分間程度記録し, それぞれを1回の測定とした. 利用した相対重力計はSCINTREX CG-5(#120340890)である. 1セットの測定データは毎秒の測定を120回(2分)行った平均として記録されるよう設定した.

Table 1. Location of gravity observation point.

| Observation Point | Longitude [deg. E] | Latitude [deg. N] | Height [m] |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------|
| TESI | 144.39920 | 43.48550 | 201 |
| TNBT | 144.38621 | 43.63572 | 172 |
| KUTC | 144.33835 | 43.54051 | 195 |
| TNIT | 144.5035 | 43.49719 | 166 |
| S049 | 144.44368 | 43.61814 | 173 |
| 0005 | 144.44897 | 43.50791 | 141 |
| TOPT | 144.32105 | 43.55847 | 130 |

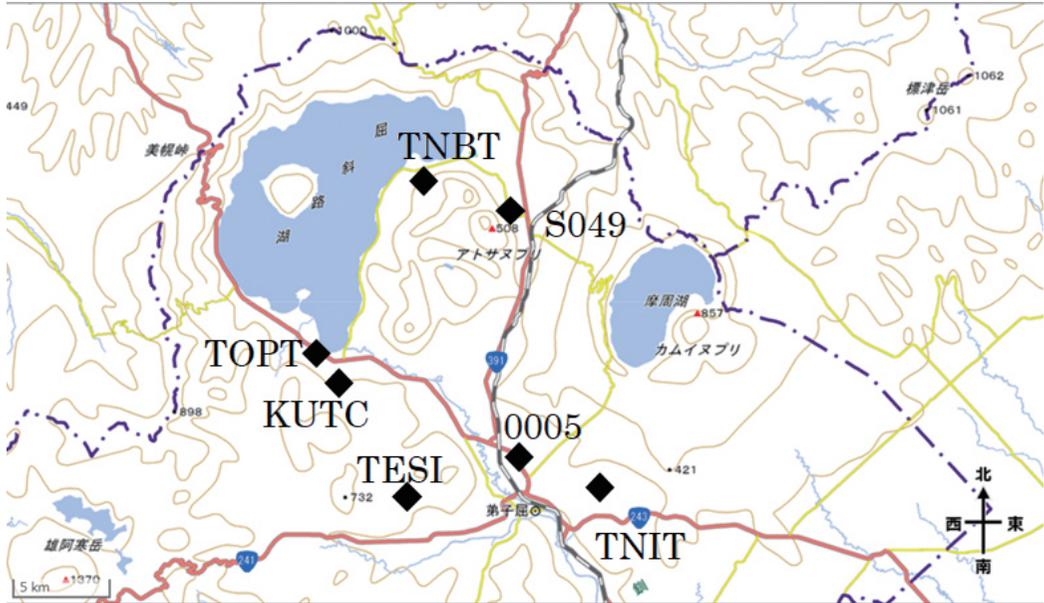


Fig. 1. Distribution of gravity observation points.

測定データに含まれている影響のうち、潮汐の影響はGOTIC2 (Matsumoto et al., 2001; Takanezawa et al., 2001) で補正した。器械ドリフトは、観測期間中の夜間に重力計を仁伏観測点 (TNBT) や弟子屈観測所 (TESI) で静置した際のデータと、他の測定点では日中の同一観測点での往復測定データから得られた勾配を用いて補正した。なお、TNBT 観測点で行われていた長期静置時 (2023年5~6月) の潮汐補正済みデータについて、重力値の時間変化率を計算すると Fig. 2 が得られ、変化率は約 0.6 mGal/day で概ね一定であることが分かった。

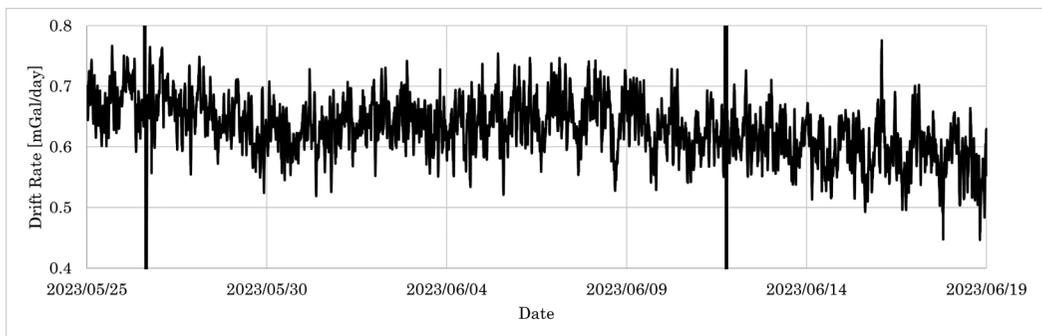


Fig. 2. Daily drift rate [mGal/day] during long-term static placement in TNBT. The tidal component data has been corrected by GOTIC2.

相対重力計 CG-5 は、錘を吊るした熔融水晶で作られたバネの伸びに対して、錘の位置を一定にする際に印加される電圧値に重力固有の定数をかけることで重力値が得られる。定数は、バネの状態変化や、読み取り値 (Onizawa et al., 2019) により変化することが予見される。このため、相対重力計と絶対重力計を用いた並行測定を行い、スケールファクター (S_F) の検定を行うことが望ましい。スケールファクターは相対重力差に対する絶対重力差の比とで与えられる。

本研究では、過去に絶対重力測定が行われている基準点間での相対重力測定からスケールファクターを求める。具体的な測定路線は、2022 年 9 月の富士山科学研究所—富士山 5 合目 (今西ほか, 2022), 2023 年 6 月の神岡 - 松代—富士山科学研究所 (今西ほか, 2023), 及び 2023 年 9 月の弟子屈観測所—国土地理院 KSR 基準重力点 (東経 144.848 度, 北緯 43.037 度, 標高 2.73 m) である。2023 年 9 月の相対重力測定データに対しては、東京大学地震研究所から提供していただいた 2018 年 5 月の KSR 点の絶対重力測定データ (今西, 私信) と, 2019 年 9 月の弟子屈観測所の絶対重力測定データ (今西ほか, 2020) を使用した。各観測で得られたスケールファクターの値と, その時使用した絶対重力値を Table 2 に示す。スケールファクターは測定により 10^{-4} のオーダーで変化していることが分かった。屈斜路カルデラ周辺地域の測定に最も時期が近かった 2023 年 9 月の値 0.999635 を用いて重力差を補正した。

Table 2. Scale factor of CG-5 (#120340890) obtained in this study.

| | 2022/09 | 2023/06 | 2023/09 |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| Absolute Gravity Difference [mGal] | 294.672 | 206.866 | 115.782 |
| Scale Factor | 0.999899 | 1.000424 | 0.999635 |

III. 測定結果

潮汐, ドリフト, スケールファクターの補正を行ったあとの各観測点での測定時の 90 分間の重力変化の様子は Fig. 3. の通りである。測定開始直後の重力値は、急激に非線形な変化をしているのに対して、測定開始から約 60 分以降の記録値は概ね安定しており、標準偏差は $5 \mu\text{Gal}$ 以内に収まっていた。また、観測点によって測定を開始してからの測定値の推移が異なるが、これは車の中や手で持ち運ぶ時の重力計の姿勢 (傾き) の違いが原因である可能性がある (例えば、高木ほか, 2018)。TNBT の定置測定データから推定したドリフトを用いて補正すると、複数回の測定を行った観測点では重力差は数 μGal ~ $20 \mu\text{Gal}$ 程度に収まった。

データ補正の結果得られた各観測点の TESI に対する重力差を Table 3. に示す。TNBT や屈斜路観測点 (KUTC), 弟子屈町役場屈斜路研修センター前 (TOPT) では $10 \mu\text{Gal}$ 以下の変化であったが、弟子屈観測所屋外点 (TESI-E), 仁多観測点 (TNIT), アトサヌプリ観測点 (S049) では 1 年間で数 $10 \mu\text{Gal}$ の大きな重力変化が検出された。

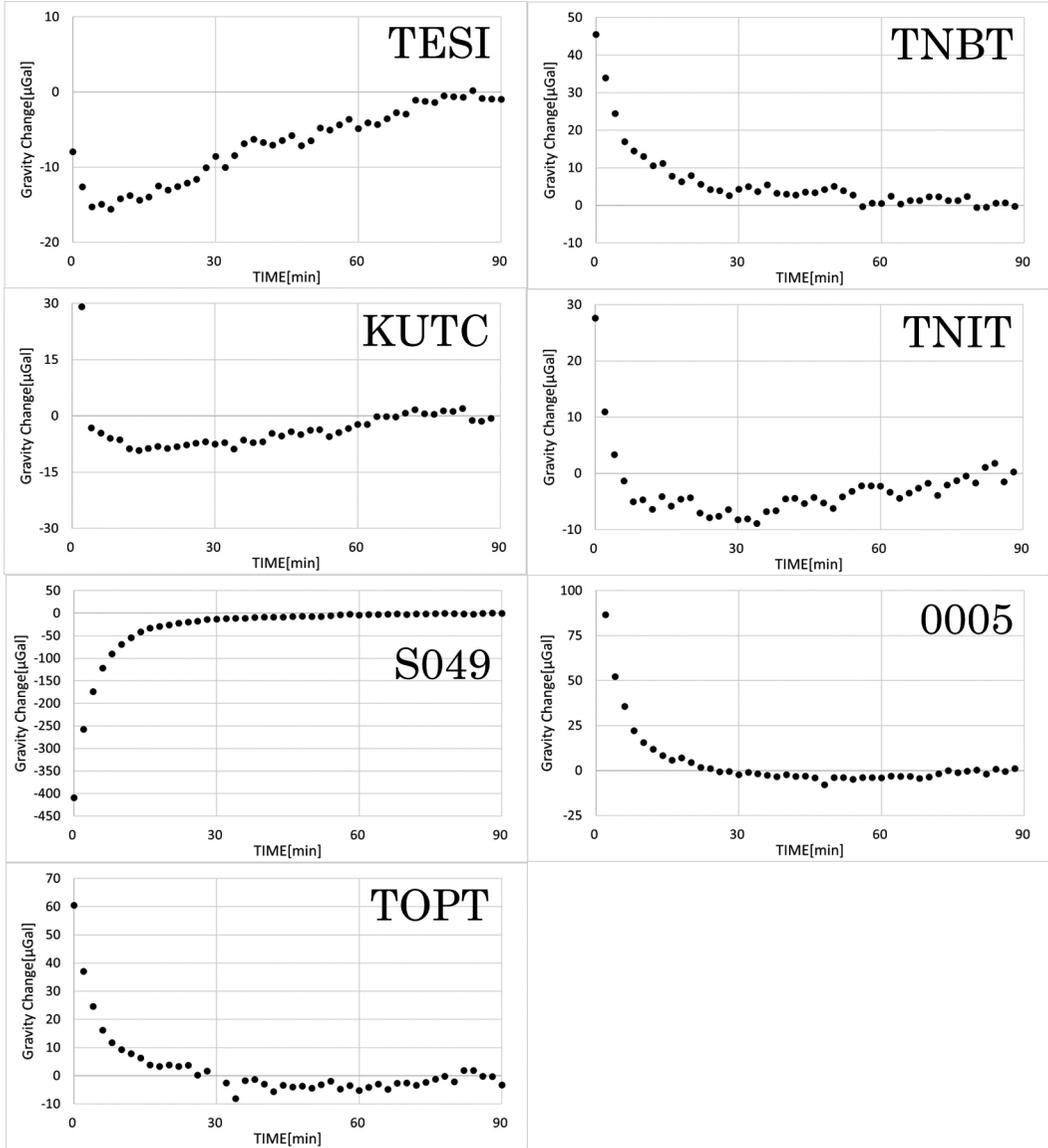


Fig. 3. The gravity change at each station after correction for tides, drift, and scale factor. The horizontal axis shows the elapsed time (minutes) since the start of the measurement.

Table 3. Gravity difference of each observation point obtained in this study. The gravity value at the Teshikaga Observatory (TESI) is used as a reference.

| Observation Point | Gravity Difference from TESI in 2022-6 [mGal] | Gravity Difference from TESI in 2023-6 [mGal] | Gravity Difference from TESI in 2023-9 [mGal] |
|-------------------|---|---|---|
| TESI | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TESI-E | 0.01 | 0.05 | - |
| TNBT | -20.42 | -20.42 | - |
| TNBT-E | -20.37 | -20.36 | - |
| KUTC | 8.52 | 8.53 | - |
| TNIT | 12.68 | 12.63 | 12.64 |
| S049 | -6.37 | -6.32 | -6.29 |
| 0005 | 14.61 | 14.62 | - |
| TOPT | 14.08 | 14.08 | - |

IV. 考 察

1 年間に $40 \mu\text{Gal}$ の重力増加が見られた TESI-E は、TESI に近接しているため、人為的な要因が考えられる。TNIT では 1 年間で $50 \mu\text{Gal}$ の重力減少、2023 年 6 月と 2023 年 9 月では $10 \mu\text{Gal}$ の増加であった。この観測点は 2021 年以降のアトサヌプリの膨張現象の変動中心から約 15 km 離れており、膨張に伴う水平変動は 1 cm 程度であることから (大園ほか, 2023)、火山活動以外の人為的な要因による重力変化と考えられる。この観測点の隣接地では当該期間に工事が行われていた。

アトサヌプリカルデラに位置する S049 では 1 年間で $80 \mu\text{Gal}$ 程の重力増加が見られている。観測期間中に、この測定点に隣接する国土地理院 S049GNSS 点で観測された隆起量は 2.3 cm 程であり (Fig. 4)、ここから推測されるフリーエア効果の大きさは約 $7 \mu\text{Gal}$ の重力減少となる。一方、2021 年以降に見られる膨張現象がマグマのシル状の貫入だと仮定すると、貫入マグマによる重力増加が期待される。ここでは、今般観測された重力増加量を検討するため、1993~1995 年の膨張イベント時に推定されたシルがもたらす重力増加量を計算する。開口部の位置や形状は Fujiwara et al. (2017) の推定結果を使用した (Fig. 5)。密度 ρ が 2670 kg/m^3 (市原・茂木, 2020) の半無限完全弾性体内に開口したシルに、開口部 (空洞) を満たす物質の密度 ρ' が 2300 kg/m^3 のマグマが充填されるモデルを考える。重力増加量とフリーエア効果による重力減少効果を大久保 (1994) に倣い以下のように求めた。

$$\Delta g(x, y) = G\Delta d[\rho T_g(\xi, \eta) + (\rho' - \rho)C_g(\xi, \eta)] - \beta\Delta h(x, y) \quad (1)$$

ここで、 x と y は観測点の(開口部分の長さ方向, 幅方向に対する)座標, G は万有引力定数 $6.674 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}^2$, Δd は開口量 [m], β はフリーエア勾配 ($3.086 \mu \text{ Gal/cm}$), Δh は地表の隆起量 (2.3 cm) を与える. 記号 \parallel は Chinnery の double vertical (Chinnery, 1961) で, 任意の関数 f について,

$$f(\xi, \eta) \parallel = f(x, y) - f(x, y - W) - f(x - L, y) + f(x - L, y - W) \quad (2)$$

で定義される. ここで, W は開口部の幅 [m], L は開口部の長さ [m] を示す. 式 (1) 中の T_g と c_g の項はそれぞれ, 開口変位, 密度差 ($\rho' - \rho$) の物質による空洞充填の効果を表しており, 以下の式

$$T_g = 2 \tan^{-1} \left(\frac{R + x + y}{d} \right) - d \left[\frac{y}{R(R+x)} + \frac{x}{R(R+y)} \right] \quad (3)$$

$$C_g = 2 \tan^{-1} \left(\frac{R + x + y}{d} \right) \quad (4)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2} \quad (5)$$

で求められる. ここで, d は開口部の深さ [m] を意味している.

計算の結果, 開口シルによる重力増加量は約 $11 \mu \text{ Gal}$ であり, 先述のフリーエア効果も考慮すると, S049 で見込まれる重力変化量は $\Delta g(x, y) = 4 \mu \text{ Gal}$ 程度であることが分かった. これは本研究の重力測定で得られている $80 \mu \text{ Gal}$ の増加と比較すると遥かに小さい. したがって, ア

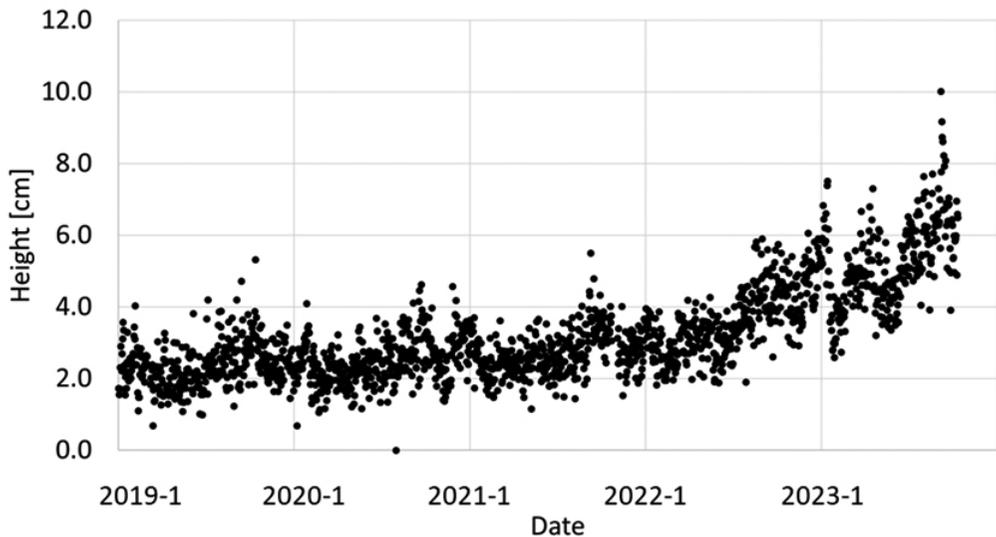


Fig. 4. The vertical crustal deformation observed at Atosanupuri (S049) GEONET GNSS station by F5 solution.

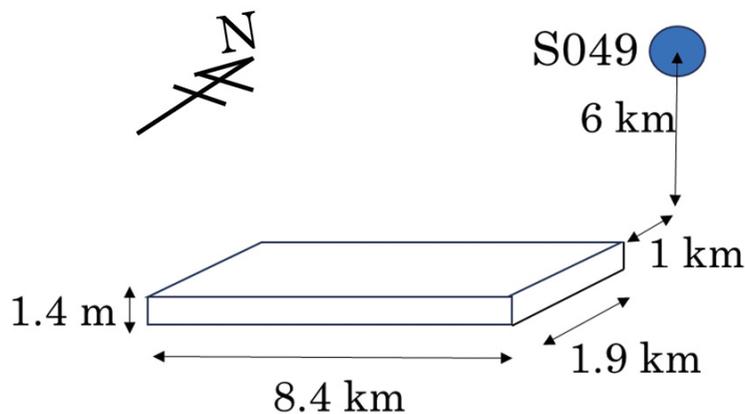


Fig. 5. Location and shape of the assuming sill used estimated the gravity change at the Atosanupuri (S049). Each parameter was quoted from Fujiwara et al (2017).

トサヌプリで検出された重力増加を火山性のイベントで説明することは難しく、非火山性の要因である可能性が高い。Photo 1 のように重力の測定ポイントはコンクリート製の土台である。仮に、この地下に貯水タンクがあった場合、水が溜まることによって重力変化が生じる可能性がある。例えば、1 辺 3 m のタンクがあり、水の体積が 18 m^3 増加したとき、直上の重力は $30 \mu\text{Gal}$ 程増加することになる。このように、観測点周辺の影響による重力値の変化を考慮する必要がある。



Photo. 1. Scene of the gravity measurement at the Atosanupuri (S049) station.

V. ま と め

2022年から2023年にかけて相対重力測定を屈斜路カルデラ周辺地域で3回実施した。重力計を静置し90分の測定を行った結果、測定開始から60分以上経過すると重力計運搬後のデータ擾乱の影響が小さくなって数値が安定し、標準偏差 $5\ \mu\text{Gal}$ 以内の測定が行えることが分かった。アトサヌプリ近傍にあるS049と弟子屈観測所屋外TESI-E、仁多TNITで数 $10\ \mu\text{Gal}$ 程の大きな重力変化が見られたが、これらを火山性の原因で説明するのは困難であり、非火山性の測定点近傍のローカルな影響によるものと考えられる。

本研究では、屈斜路カルデラ周辺地域で火山性の原因と思われるような大きな重力変化は検出されなかった。しかし、アトサヌプリ火山では膨張収縮現象が観測されていることから、重力データの蓄積は重要であり、本研究で得られた重力測定の方法、測定結果を今後の研究で活用されることが期待される。

電子付録 重力測定値をgeojsonフォーマットの電子付録として掲載した。

謝辞 重力測定を行うにあたり、北海道大学大学院の岡田和見氏、山梨県富士山科学研究所の本多亮氏、北海道立総合研究機構の岡大輔氏、岡崎紀俊氏にご協力いただきました。絶対重力測定の結果を東京大学地震研究所の今西祐一氏から提供していただきました。国土地理院GEONET観測網のF5解を利用しました。また、地図の作成には、地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>, 2024年2月18日閲覧) を使用しました。

文 献

- Chinnery, M. A., 1961. The deformation of ground around surface faults, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 51, 355-372.
- Fujiwara, S., M. Murakami, T. Nishimura, M. Tobita, H. Yarai and T. Kobayashi, 2017. Volcanic deformation of Atosanupuri volcanic complex in the Kussharo caldera, Japan, from 1993 to 2016 revealed by HERS-1, ALOS, and ALOS-2 radar interferometry, *Earth, Planets and Space*, 69(78).
- 本多亮・丸藤大樹・岡田和見・岡大輔・名和一成, 2022. 屈斜路カルデラ周辺地域の重力点結合, 日本測地学会第138回講演会予稿集, 109-110.
- 市原寛・茂木透, 2020. 屈斜路カルデラ中の地震断層域における比抵抗・密度・地質構造の統合的解釈, *Conductivity Anomaly 2020年論文集研究会*, 33-36.
- 今西祐一・西山竜一, 2020. 弟子屈における絶対重力測定 (2019年および2020年), 東京大学地震研究所彙報, 95, 9-13.
- 今西祐一・西山竜一・本多亮, 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—, 東大地震研彙報, 97, 1-11.
- 今西祐一・本多亮・丸藤大樹・西山竜一・名和一成, 2023. 3つの地点における絶対重力測定によるシントレックスCG-3M重力計の非線形感度曲線の検定, 日本測地学会第140回講演会予稿集, 41-42.
- 丸藤大樹・名和一成・高橋浩晃, 2023. 超伝導重力計で観測された重力季節変化のモデル化, 北海道大学地球物理研究報告, 86, 13-21.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, 2001. GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect, 測地学会誌, 47, 243-248.

- 名和一成・池田博・岡田和見・高橋浩晃・岡大輔, 2019. iGrav 型超伝導重力計 (#17) の道東カルデラ火山地域への移設: 苫小牧から札幌・南新川を経て弟子屈へ, 北海道大学地球物理学研究報告, 82, 19-24.
- 大園真子・高橋浩晃・松田瑞希・山口照寛・岡田和見, 2023. 北海道東部屈斜路カルデラで発生する非正常地殻変動, 日本火山学会 2023 年度秋季大会講演予稿集, 98.
- 大久保修平, 1994. 地震及び火山噴火によって生じる重力とポテンシャルの変化—ディスロケーション理論に基づく定式化, 測地学会誌, 40, 1-16.
- 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>.
- 札幌管区気象台, 2023. アトサプリの火山活動解説資料 (令和 5 年 9 月), 気象庁火山活動解説資料 (令和 5 年 9 月).
- 高木朗充・宮城洋介・小澤拓・本多亮・高橋浩晃, 2018. CG-5 重力計の登山を伴う野外調査時における重力値安定性の基礎調査, 北海道大学地球物理学研究報告, 81, 1-10.
- Takanezawa, T., K. Matsumoto, M. Ooe, and I. Naito, 2001. Effects of the long-period ocean tide on Earth rotation, gravity and crustal deformation predicted by global, barotropic model—periods from Mtm to Sa-, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 545-550.