

開発中の投げ上げ式小型絶対重力計とその精度について About a small throw-up method absolute gravimeter under development

酒井 浩考^{1*}, 新谷 昌人¹, 坪川 恒也², セルギイ スビトロフ³, 田村 良明⁴
Hirotaka Sakai^{1*}, Akito Araya¹, Tsuneya Tsubokawa², Sergiy Svitlov³, Yoshiaki Tamura⁴

¹ 東京大学地震研究所, ² 真英計測, ³ エアランゲン・ニュルンベルク大学 (ドイツ), ⁴ 国立天文台水沢 VLBI 観測所
¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Shin-ei Keisoku, ³University of Erlangen-Nuremberg, Germany, ⁴National
Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa VLBI Observatory

重力測定は資源探査で地表での重力を測定することで、そこから地下の密度分布を推定し地質構造を把握する物理探査の目的でよく使用される手法である。その他の重力探査の利用法の一つとして、火山におけるマグマの移動を調査することがあり、重力変化は噴火予知や地下の密度構造の推定等に利用しようと試みられている。たとえば実際の火山の観測でよく用いられる手法では、絶対重力測定をふもとの基準点で行い、相対重力計を携帯して基準点と観測点を往復することで重力値を測定する方法がある [1]。この方法は観測に手間がかかり、時間精度が悪く、また火山活動時には、観測地点での測定に危険が伴うものである。

そのような中で、新谷ら (2007 年) は、これらの状況を改善するために小型絶対重力計の開発を行ってきた。この小型絶対重力計が完成し火山体に設置されれば、火山活動時でも継続的にデータを取得できるメリットがある。将来的には絶対重力計を複数配置した多点ネットワークで絶対重力計で同時に観測することにより、面的な重力変化がわかればマグマの活動が精密に分析できる。他にも深層ボアホールやプレート沈み込み帯の深海底に設置することができれば、地下深部の地震活動やプレート運動を、重力を使って調べることができる。これらのことから、絶対重力計の小型化が進めば、野外観測研究への様々な応用を可能にし、従来とは異なった重力観測手法を提供してくれるだろう。既存の装置では、落下方式のため落体を持ち上げる必要があるので短時間で繰り返し測定ができない等の問題がある。しかし投げ上げ方式の場合、落体を持ち上げる必要がないので繰り返し測定が可能となる。今回は既存の絶対重力計の自由落下装置と開発した投げ上げ装置を入れ替えることによって、その投げ上げ装置の重力加速度の分解能を調べた。

投げ上げ装置は、潮汐の重力変化を検出することができ、重力変化の分解能 g は $40 \mu \text{gal}$ であることが分かった。しかし重力の絶対値は重力の予想値とずれてしまい、重力の確度 σ_g は 3mgal であった。この誤差は投げ上げた際の反作用が干渉計に伝わったことにより生じたものである。この反作用を干渉計に伝わりにくくするために、いろいろと防振を変えてみた。すると同じ防振を用いることにより、振動の伝わり方に再現性があることが分かった。今後は投げ上げた際の反作用を打ち消す手法や、常に同じ振動になるよう適切な防振を見つけることができれば重力の確度が向上すると考えている。

[1] 大久保修平 (2001): 「ハイブリッド重力観測から見た、2000 年三宅島火山活動・伊豆諸島群発地震活動」, 地震ジャーナル, 31, pp47-58

キーワード: 測地学, 重力, 絶対重力計, 投げ上げ式, 地球潮汐, 火山

Keywords: geodesy, gravity, absolute gravimeter, throw-up method, earth tide, volcano

海底探査用重力偏差計システムの開発 3 Development of a gravity gradiometer system for submarine gravity prospecting 3

新谷 昌人^{1*}, 篠原 雅尚¹, 金沢 敏彦², 藤本 博己³, 山田 知朗¹, 飯笹 幸吉⁴, 石原 丈実⁵, 月岡 哲⁶
Akito Araya^{1*}, Masanao Shinohara¹, Toshihiko Kanazawa², Hiromi Fujimoto³, Tomoaki Yamada¹, Kokichi Iizasa⁴, Takemi Ishihara⁵, Satoshi Tsukioka⁶

¹ 東大地震研, ² 防災科研, ³ 東北大災害科学国際研, ⁴ 東大新領域, ⁵ 産総研地質情報, ⁶ 海洋研究開発機構
¹ERI, Univ. Tokyo, ²NIED, ³IRIDeS, Tohoku Univ., ⁴GSFS, Univ. Tokyo, ⁵Inst. Geol. Geoinf., AIST, ⁶JAMSTEC

Gravity surveys are extensively conducted for profiling the underground density structure on land, while their application to sea area has been difficult because of either wide-area seafloor observation or poor accuracy caused by instability of the platform such as ships and airplanes. We propose a hybrid gravity survey method using an autonomous underwater vehicle (AUV) containing both a gravimeter and a gravity gradiometer. This paper describes the development of the submersible gravity gradiometer for this purpose.

As compared to a gravimeter, a gravity gradiometer is sensitive to localized density structure as a spatial derivative of its gravitational field, and hence it is suited to survey on concentrated sources such as submarine ore deposits. In addition, any common noise to the gravity sensors, such as translation acceleration of the platform, has little effect on gravity gradiometer as the differential gravity acceleration, and therefore a gravity gradiometer is preferable as an on-board instrument in the underwater vehicle.

We operated the developed gradiometer at a quiet site on land and estimated its self-noise to be $6 \text{ E} (=6 \times 10^{-9} / \text{s}^2)$ in (2-50) mHz where gravity gradient signal is expected to be dominant when an AUV passes above a typical ore deposit. To reduce centrifugal error associated with rotation of the underwater vehicle, the gravity gradiometer was mounted on a two-dimensional forced gimbal controlled to be vertical with reference to fiber-optic gyroscopes and tiltmeters.

A sea trial observation was carried out on 7-9 September, 2012, in Sagami Bay at a depth of about 1,300 m using the AUV Urashima (JAMSTEC). The gravity gradiometer and the forced gimbal operated stably onboard the moving platform unless it involves large motions during turning and pitching. Design and resulted resolution, as well as discussion for improvements, will be presented.

Keywords: ore deposit, gravity survey, gravity gradiometer, forced gimbal, AUV

阿蘇火山に於ける自由落下干渉計型重力勾配計の開発

Development of a free-fall interferometric gravity-gradiometer for volcanological studies in the Mt Aso area

潮見 幸江^{1*}, 鍵山 恒臣¹, 吉川 慎¹

Sachie Shiomi^{1*}, Tsuneomi Kagiya¹, Shin Yoshikawa¹

¹ 京都大学火山研究センター

¹ Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University

To improve our knowledge on the process of volcanic eruptions, it is essential to observe time and spatial variations of subsurface density in volcanic areas. Gravity measurements, using relative and/or absolute gravimeters, are one of the widely-used methods to observe such subsurface density variations. Measured values of gravity include other effects that are not related to volcanic activities, such as influences of groundwater and diastrophism. These non-volcanic effects have to be removed by careful modellings. However, uncertainties in the modelling make it difficult to accurately identify the volcanic effects in the measured values of gravity. In order to improve the accuracy of the identification of volcanic effects, we propose to carry out measurements of vertical gravity gradients, simultaneously with gravity measurements.

A new type of gravity gradiometer that employs the method of free-fall interferometer had been developed at the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the Tokyo University from 2009 to 2012. After confirming the working principle of the gravity gradiometer, its prototype was moved to the Aso Volcanological Laboratory (AVL) of the Kyoto University. Further improvements and trial measurements have been carried out at the AVL so that it can be used for continuous observations in volcanic areas. We report the current status of the development and future prospects of the gravity-gradients measurements in the Mt Aso area.

重力計鉛直アレイ観測 -序報- Gravimetric vertical array observation -A preliminary report-

田中 俊行^{1*}, 本多亮¹, 浅井康広¹, 石井 紘¹
Toshiyuki Tanaka^{1*}, HONDA, Ryo¹, ASAI, Yasuhiro¹, ISHII, Hiroshi¹

¹ 東濃地震科学研究所
¹ TRIES, ADEP

田中ほか(連合大会予稿、2012)で提唱した「重力計アレイ法」を試験的に実施したので、その結果と明らかになった問題点を報告する。使用した重力計は全て Microg LaCoste 社製で、連続観測用相対重力計の gPhone (#90 と #78) と絶対重力計 FG5#225 である(計3台)。gPhone のデータ処理方法や実際の陸水応答については Tanaka et al.(EPS, in press) を参照されたい。ここでは「重力計鉛直アレイ」と便宜上呼んでいるが、地表下 300m の gPhone#90 と、地上の gPhone#78 及び FG5#225 は、水平方向に 100m ずれている。このような重力計アレイを構築できる環境(瑞浪超深地層研究所)は世界的にも稀であり、重力連続観測における降水の影響を抑制し地下深部からのシグナルを stack できる手法を確立することは、沈み込み帯の密度変化や地層処分の研究に寄与できる可能性がある。重力計アレイは重力計調達の都合上 2012 年 10 月から約 2 ヶ月間構築した。残念ながら、この期間は瑞浪超深地層研究所の地下 500m における水平坑道(北坑道)掘削のための発破が頻繁に行われたため、地下 300m に設置した gPhone#90 のデータ品質は著しく悪い。しかし、深度 500m における水平南坑道での発破の影響はほぼ見えないこと、気圧補正のエラーが地上に比べて地下では一桁悪いことがわかった。今後は発破位置を考慮したアレイを構築する事や、原位置気圧ではなく立坑付近の気圧を採用するなどの改良を試みたい。また、アレイ観測ではないが、地下 300m での発破が無い時期のデータを再解析したところ、その降雨応答が地下 100m におけるそれと同程度であることがわかった。観測された時間雨量が同じでも、降り方(エリア、面積など)が同じでは無いので正確には更なる重力アレイ観測で確かめる必要はあるが、このことは地表下 100m 以浅に存在する不圧帯水層の分布が無限平板と仮定できる可能性を示している。FG5 による gPhone のドリフト評価は、今回は gPhone#78 の稼働期間が短期であった事や地震動による欠測が生じたために実施しなかった。

謝辞: 本研究は資源エネルギー庁の深地層研究施設整備促進補助金によって行われている。また、田中、本多、そして浅井は東大地震研の特定共同研究(B)の支援を受けている(独)日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターの堀内泰治、熊田宏治(現 東急建設)、橋詰茂の各氏には gPhone 保守及び降雨データに便宜を頂いた。

キーワード: 重力連続測定, 陸水, 降雨, 計測手法

Keywords: continuous gravity measurement, inland water, rainfall, measurement method

霧島火山新燃岳 2011年噴火のブルカノ式噴火期にみられた、顕著な短期的重力変化 Peculiar Gravity Change at the Kirishima Volcano during Vulcanian Eruption Phase in 2011

大久保 修平^{1*}, 田中 愛幸¹, 今西 祐一¹
Shuhei Okubo^{1*}, Yoshiyuki Tanaka¹, Yuichi Imanishi¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

[1] はじめに

霧島火山では、2011年1月26日、27日、新燃岳において準プリニー式噴火が発生し、約300年ぶりにマグマ噴火が始まった。新燃岳では引き続き火口内へ溶岩が流出するとともに、2月上旬まで、溶岩で満たされた山頂火口から爆発的噴火が繰り返して発生し、社会生活に大きな影響が及んだ。この噴火活動にともなうマグマの移動・蓄積過程を明らかにするために、固定点における絶対重力の連続観測を行った結果、準プリニー式噴火が収まり、ブルカノ式噴火が続いた2011年2月以降の約2か月間、噴火前に特徴的な重力変動が繰り返し発生していることを見出したので、それについて報告する。

[2] 絶対重力観測

観測点は東大霧島火山観測所であり、想定される深部マグマだまりからの水平距離が1 km程度という好条件の場所にある。用いた重力計はFG5絶対重力計で、おおむね50-100回の自由落下測定から30分ごとに1個の重力平均値が得られる。この30分平均値の誤差は地盤振動に依存するが、1-3 microgal程度であった。

[3] 短期的な重力シグナルと火山活動

2月には数度のブルカノ式噴火が発生しており、それに先立って絶対重力観測にも、タイムスケール7時間程度の短期的なシグナルが認められた。すなわち、噴火に先立つ約7時間前から重力の減少が開始し、それが噴火前の1-2時間前に増加に転じる事例が多く見られた。時系列をプロットするとV字型の変動として認められるものである。2月のブルカノ式噴火3回については、いずれもV字型の変動が確認できた。重力変動を詳細に検討すると、V字型の重力変動があっても噴火が起こっていない事例が10例程度みつけたが、それらのほとんどが、微噴火や、顕著な傾斜変動をともなうイベントを伴っていた。この傾斜変動は、噴火未遂イベントと考えられる。

V字型変動が統計的に有意であるか否かを、線形回帰のF検定をおこなったところ、過誤率1%以内で有意であると判定された。本講演では、このような重力変動を起こしうるメカニズムについても議論する。

キーワード: 絶対重力変化, 火山, ブルカノ式噴火, 連続観測

Keywords: absolute gravity change, volcano, vulcanian eruption, continuous measurement

GRACE衛星RL05データで見た地震後重力変化 The postseismic gravity changes observed with GRACE satellite.

田中 優作^{1*}, 日置 幸介¹
Yusaku Tanaka^{1*}, Kosuke Heki¹

¹ 北海道大学大学院理学院

¹ Graduate School of Science, Hokkaido University

There are several reports of the observations of gravity changes due to great earthquakes with data set of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite, but only Release 02-04 data are used in them. I reanalyzed the co- and postseismic gravity changes due to the three M9 class earthquakes, the 2004 Sumatra-Andaman, 2010 Chile (Maule), and 2011 Tohoku-oki earthquake, using Release 05 data set. I found that the every gravity change due to a huge earthquake has three steps. The gravity decreases immediately at the moment a huge earthquake occurs, continues to decrease slowly for a few months, and increases slowly taking more than a year after decreasing. That is, postseismic gravity changes have short-term and long-term components. But the their mechanisms are not clear.

衛星および地表重力データの結合による南極昭和基地周辺の重力場の精密決定 Precise gravity field determination around Syowa station, Antarctica, by combining satellite and in-situ gravity data

福田 洋一^{1*}, 野木 義史², 松崎 和也¹

Yoichi Fukuda^{1*}, Yoshifumi Nogi², Kazuya Matsuzaki¹

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 国立極地研究所

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²National Institute of Polar Research

昨年、JpGU2012年大会で、GOCE(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)による地球重力モデル(EGM: Earth Gravity Model)と日本の南極観測隊(JARE: Japanese Antarctic Research Expedition)による地表重力データを結合した南極昭和基地周辺の重力場決定について報告した。前回は、JARE-47により航空重力測定が実施された地域を中心に、船上重力、陸上重力については処理済みのデータを限定的に利用することで、バイアス補正などは施さず、長波長重力場の基準となるEGMとしてGOCEのTIM(time-wise solution) RL(Release)-3を使用し、LSC(Least Squares Collocation)法を用いた予備的な計算を行った。その後、未使用であった地表データや、より広範囲な船上重力データを含めることで対象領域を拡大し、また、データ処理手順を見直し、新たに重力場の決定を行ったので、今回はその結果について報告する。

昨年からの主な変更点は、1)船上重力、陸上重力を含めることで対象エリアを60-80°S, 20-60°Eに拡張したこと、2)船上重力データのない海域についてアルティメータによる重力データを利用したこと、3)陸上重力、船上重力データについてバイアス補正を行ったこと、などが挙げられる。LSC法による計算では、航空重力データより推定した経験的な共分散関数を用い、重力異常ならびにジオイド高を決定した。推定されたformal errorは、十分な地表重力データが存在する領域では、重力異常について数mgal、ジオイド高では10より良い値を示している。得られたジオイド高は、今後、グローバルな高さ基準への結合としても利用可能な精度に近づきつつある。

地上データについては、航空重力データはGOCE EGMとの一致も良いことから、バイアス補正等は必要ないと思われるが、船上重力、陸上重力データは、推定された重力異常との比較からもデータセットによって明らかなバイアスが認められた。これらについては、今後、可能な限りオリジナルのデータに遡って丁寧な補正が必要と思われる。一方、EGMについては、すでにGOCEに加えGRACEデータも含む複数のモデルも公開されており、また近く、GOCEの新しいモデルが公開される見通しである。今後、これらのモデルの検証も行いつつ、同地域の重力場のさらなる改善を進める予定である。

キーワード: GOCE, 重力異常, ジオイド, 南極, 昭和基地

Keywords: GOCE, Gravity anomaly, Geoid, Syowa Station, Antarctica

石垣島における超伝導重力計観測（その2）

Gravity observation using a superconducting gravimeter at Ishigakijima, Japan (part 2)

今西 祐一^{1*}, 名和 一成², 田村 良明³, 池田 博⁴, 宮地 竹史³, 田中 愛幸¹

Yuichi Imanishi^{1*}, Kazunari Nawa², Yoshiaki Tamura³, Hiroshi Ikeda⁴, Takeshi Miyaji³, Yoshiyuki Tanaka¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 産業技術総合研究所, ³ 国立天文台, ⁴ 筑波大学研究基盤総合センター低温部門

¹ERI, The University of Tokyo, ²AIST, ³NAOJ, ⁴University of Tsukuba

私たちは、八重山諸島の地下で発生する長期的スロースリップの信号を検出することを目的として、2012年2月に国立天文台 VERA 石垣島観測局（沖縄県石垣市）に超伝導重力計を設置した。観測開始から約1年が経過したが、最初の1ヶ月は温度制御が不安定であったため重力計の状態はあまり良くなかった。2012年9月末には、台風17号の接近にともなって約1日にわたって停電があった。これによって観測システムには被害はなかったものの、停電の前後で重力値に大きなオフセットが出た。2013年1月7日には、与那国島近海でM5.4の地震が発生し、重力値に小さいオフセットが出た。これらの問題を除けば、ほぼ均一で連続した重力変化のデータが得られている。

観測開始から現在までに、2012年5月から6月にかけてと、2012年12月から2013年1月にかけて、2度のスロースリップイベントが発生している。これらのイベントに関係する重力変化の信号を検出するためには、大気、海洋、地下水などの補正を精密に行う必要があるが、これらが相互に関連して複雑な応答を示しているらしく、モデリングが難しい部分がある。簡易的な補正に基づく予備的な結論ではあるが、2度のイベントともに、GPSデータから推定される発生時期におおむね符合して重力の減少（2マイクロガル程度）が記録されており、その少し前から重力が増加する（2マイクロガル程度）傾向が見られている。これは、スロースリップにともなう地殻変動による重力変化が現れているだけでなく、その発生に関連した地下の何らかの質量移動がとらえられている可能性がある。

キーワード: 超伝導重力計, スロースリップ, 石垣島

Keywords: superconducting gravimeter, slow slip, Ishigakijima

八丈島の温泉地域における gPhone-133 重力計を用いた連続観測 Continuous gravity observation using a gPhone-133 at a hot spring area of Hachijojima, Japan

名和 一成^{1*}, 杉原 光彦¹, 西 祐司¹, 石戸 経土¹, 安川 香澄¹, 阪口 圭一¹
Kazunari Nawa^{1*}, Mituhiko Sugihara¹, Yuji Nishi¹, Tsuneo Ishido¹, Kasumi Yasukawa¹, Keiichi Sakaguchi¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST

重力計は地下の質量変化を検出するのに有用な物理探査ツールである。我々は温泉地域における地下水の状態をモニタリングする目的で、八丈島の中之郷地区で重力連続観測を実施した。新たに導入した gPhone 重力計の性能評価、観測点のノイズレベル評価を目的として、2011年2月から3月にかけて島内各所で試験観測を実施した(名和・杉原、日本測地学会講演会、2011)。その後、2011年11月から2012年2月までのおよそ4カ月間 gPhone-109 重力計による観測を実施した(名和ほか、JpGU Meeting 2012)。今回、2012年8月から12月にかけて、gPhone-133 重力計を用いて、昨年度と同様4カ月間の連続観測を実施した。重力データの補正や解釈に必要な、気圧、降雨、土壌水分などの気象データと水位、水温などの観測井モニタリングデータも同様に取得した。昨年度の観測の結果、2011年12月と2012年2月に通常の変動幅より大きな1程度(注)の水温低下と、その約3日後の5 μ Gal 程度の重力減少が捉えられた。さらなるデータの蓄積・再現性の確認が課題であったが、今回の gPhone-133 重力計の観測期間中にも、同様な現象を捉えることができた。この重力変化をもたらす原因を探るため、気象・土壌水分データから地下浅部の不飽和領域の水分変化による重力変化を計算したが、大きくても1 μ Gal 未満であった。解析期間中、潮位と水位が単調に減少していたが、機械的ドリフトが大いため、観測データからそれらの影響を分離することはできなかった。観測された被圧帯の水温の低下は、重力変化も生じていることから、不圧帯の地下水の移動を伴うものであることが示唆される。過去1年以上の潮位と中之郷観測井の温度、水位の関係をみると、潮位変化に少し遅れて水位が変化し、その後、温度が変化していることが見出された。現象を引き起こす原因の1つとして坑内流動を考えているが、八丈島周辺の潮位変化が中之郷のそれをトリガーしているのかもしれない。

本研究は環境省委託事業の地球温暖化対策技術開発事業として実施されました。

キーワード: 重力モニタリング, 土壌水分, 地下水, 潮位, 降雨, 気圧

Keywords: gravity monitoring, soil moisture, ground water, sea level, rain fall, atmospheric pressure