

重力地震学～人工衛星 GRACE が描く新しい地震像～ The new insight for earthquakes, based on the satellite gravimetry.

田中 優作^{1*}; 日置 幸介¹; 松尾 功二²
TANAKA, Yusaku^{1*}; HEKI, Kosuke¹; MATSUO, Koji²

¹ 北海道大学大学院理学院, ² 国土地理院

¹Graduate School of Science, Hokkaido University, ²Geospatial Information Authority of Japan

2002年に打ち上げられた重力衛星 GRACE は地球科学の様々な分野に新しい知見を齎し続けている。その内、地震に関連しては、2004年スマトラアンダマン地震を始め、2010年マウレ地震、2011年東北沖地震などが引き起こした地震時や地震後の重力変化について報告されている。今回は、この地震に伴う重力変化の研究に関して、話題を三つに分けて講演する。尚、話題1が先行研究の紹介、話題2と話題3が本研究による発見である。

(1) 話題1: 2004年スマトラアンダマン地震、2010年マウレ地震、そして2011年東北沖地震の地震時の重力変化。これらの超巨大逆断層型地震は、震央の背弧側で大きな負の重力変化が観測された。そのメカニズムは、おそらく地中での密度変化によるものであろうと、先行研究で既に分かっている。

(2) 話題2: 2004年スマトラアンダマン地震、2010年マウレ地震、そして2011年東北沖地震の地震後の重力変化。2012年に公開された GRACE のデータを用いて、2010年マウレ地震と2007年に報告された2004年スマトラアンダマン地震の地震後重力変化を解析した結果、地震後重力変化は二段階で進む事が見出された。この傾向は、2011年東北沖地震の地震後重力変化にも見られた。この二つの段階は、それぞれアフタースリップと粘性緩和に起因する現象であろうと推測される。ここでは、その観測結果と、推測されるメカニズムについて紹介し、GRACE がアフタースリップと粘性緩和を分離して捉え得る新しい手段であることを説明する。

(3) 話題3: 2013年オホーツク深発地震の地震時重力変化。深発地震では、重力変化は地表の鉛直変位に起因する事が GRACE の観測から示された。これは深発地震に伴う地殻変動が、GRACE を用いる事によって面的に捉えられる事を示唆している。

以上の事から、GRACE は、浅発地震では地震時に地下の密度変化を、地震後にアフタースリップと粘性緩和を分離して捉え得る事に加え、深発地震では地震時の地殻変動を面的に捉える手段として使える、現状唯一の方法だと言う事が出来る。

キーワード: GRACE, 地震後重力変化, 地震時重力変化, アフタースリップ, 粘弾性緩和, 深発地震

Keywords: GRACE, Postseismic gravity changes, Coseismic gravity changes, Afterslip, Viscoelastic relaxation, Deep-focus earthquakes

重力と地形のアドミッタンスからみた月のリソスフェア Admittance between gravity and topography show the moon's lithosphere

三枝 優輝^{1*}; 日置 幸介²
SAEGUSA, Yuki^{1*}; HEKI, Kosuke²

¹ 北海道大学理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学理学研究院自然史科学部門

¹Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, ²Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

地球の衛星である月は、原始地球に火星程度の大きさを持つ巨大隕石が衝突し、その時に生じた破片が集積し冷却することで形成されたと考えられている（ジャイアントインパクト説）。また月は、太陽系の長い歴史を表面に記録し、保存している最も接近しやすい天体なので、太陽系惑星の進化の歴史を解読するための重要な鍵となる。惑星がどのように形成され進化したかを調査することで、その惑星の内部構造、熱エネルギーの収支、冷却時の物質の分化の特徴を理解することができる。

そのため月の探査は今日までに数多くされてきた。ガリレオ・ガリレイによる光学望遠鏡の発明によって、月表面の地形の凹凸が目視できるようになった。20世紀になると実際に月に探査機を飛ばし、着陸機による観測や軌道からの観測によって月の内部構造さえも把握しようとしている。

本研究では、共通軌道（極軌道）を描く2つの探査機を月の上空に飛ばし、その2つの探査機の距離を測ることで重力分布や地下構造を推定する GRAIL（Gravity Recovery and Interior Laboratory）ミッションから得られる重力場データと、レーザ高度計を搭載した月探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter（LRO）から得られた地形データをそれぞれ球関数展開し、それによって求めた係数を比較し、両者の相関の波長依存性に注目した。その結果、低次数では相関が低く観測され、高次数では高く観測された。これは月表面の長波長の地形（大まかな地形）については、月内部の流動性によってアイソスタシーが成り立っているが、短波長の地形（局地的な地形）はリソスフェアによって支えられておりアイソスタシーが成り立っていないことを示している。同時に、重力の観測限界に近い短波長の地形に関しては見かけ上相関が低くなることもわかった。

月の他に地球や火星などの地球型惑星における重力と地形の相関を比較し、それらの天体における重力異常、アイソスタシー補償の程度やリソスフェアの剛性について議論することも重要である。火星の場合、半径は地球と月の中間程度なので、月に比べて内部の流動性が高く、アイソスタシー補償はより高度に達成されていることが予測される。

相関の他に、地形がもたらす重力異常を評価する物理量として、両者の振幅比である「アドミッタンス」がある。これは月表面のうち、弾性体として振る舞い、地形の凹凸によってモホ面の凹凸に影響を与えることができる厚さ（本稿ではこれを「リソスフェア厚さ」と呼ぶ）を議論する上で重要な物理量である。

一般に天体の大小は、内部熱源の量に対する表面積の比の大小を意味するため、大きな天体ほど熱流量が大きくリソスフェアも薄い。リソスフェアが薄いと短い波長の地形でもアイソスタシーが成り立つようになる。従って、地球よりも小さな月のリソスフェアの厚さは、地球の数倍厚いことが予測される。しかし、Watts (2001) の理論に基づいてアドミッタンスの波長依存性から得られたリソスフェアの厚さは約 14 km となり、地球と同程度であることが分かった。これは月の地形が形成された年代が、安定陸塊が形成された先カンブリア時代の中でも 40 億年前近いはるか昔であることを示唆しているのかもしれない。当時の月はまだ冷え切っておらず、高い熱流量と現在の地球と変わらない薄いリソスフェアが支配していたのだと思われる。

惑星物理学にとって大切なことは、様々な惑星（衛星も含む）と比較し、その類似点や相違点を明らかにしてその原因を議論することである。ここで論じた月や地球の重力と地形のアドミッタンスを、他の地球型惑星のそれと比較することで、それぞれの天体の熱進化の過程を議論することができる。また、月のように太陽系の初期に冷えてしまった天体では、遠い過去のアイソスタシーの状態が化石として保存されている。今後は、天体の大きさだけでなく、地形の主な形成年代も考慮した議論が必要であろう。

キーワード: 月, 地形, 重力異常, リソスフェア, 相関, アドミッタンス

Keywords: the moon, topography, gravity anomaly, lithosphere, correlation, admittance

小型絶対重力計 TAG-1 の系統誤差評価 Systematic error evaluation of the compact absolute gravimeter TAG-1

新谷 昌人^{1*}; 酒井 浩考¹; 田村 良明²; 坪川 恒也³; スビトロフ セルゲイ⁴
ARAYA, Akito^{1*}; SAKAI, Hirotsuka¹; TAMURA, Yoshiaki²; Tsubokawa, Tsuneya³; SVITLOV, Sergiy⁴

¹ 東大地震研, ² 天文台水沢, ³ 真英計測, ⁴ ハノーバー大測地研

¹ERI, Univ. Tokyo, ²NAOJ, Mizusawa, ³Shin-ei Keisoku, ⁴Inst. Geodesy, Univ. Hanover

近年、絶対重力計は静的あるいは経年的な重力場の計測のみならず、地下水変動や火山活動など動的な地下密度変動を計測する方法としても用いられるようになってきた。火山活動に伴うマグマなどの流体監視を火山近傍で行う目的で、小型絶対重力計 TAG-1 を開発した。相対重力計と比較して、絶対重力計は重力基準点を参照することなしに、単独で連続観測できる特長がある。

2013年7月に霧島観測所（宮崎県）にて、TAG-1を用いた短期間の絶対重力観測を実施した [1]。統計的な誤差は 0.8uGal と小さかったが、2012年3月に実施された絶対重力値と比べて 20~25uGal の低下が認められた。GPS による観測からこの間の地殻変動は小さいと推測され、重力の低下は装置の誤差に起因している可能性がある。その原因として、落体を落下させる際の反作用による振動と光検出器の応答特性を検討した。前者は落体を支持後解放した瞬間に反作用により床が振動し、干渉計の参照鏡を揺らしてしまうものである。後者に関しては、光検出器のわずかな位相遅れが 2 位相干渉計 [2] の信号から重力値を計算する際の系統誤差を生じさせる。

本講演では両方の誤差を評価し、それらの補正後の TAG-1 の精度等の性能について議論する。

参考文献

[1] A. Araya, H. Sakai, Y. Tamura, T. Tsubokawa, and S. Svitlov, "Development of a compact absolute gravimeter with a built-in accelerometer and a silent drop mechanism", in Proc. of the International Association of Geodesy (IAG) Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TGSM-2013), 17-20 September 2013, Saint Petersburg, Russia, 98-104 (2014).

[2] S. Svitlov and A. Araya, "Homodyne interferometry with quadrature fringe detection for absolute gravimeter," Appl. Opt. 53, 3548-3555 (2014).

キーワード: 絶対重力計, 系統誤差, 火山, 霧島, 反作用, 光検出器

Keywords: absolute gravimeter, systematic error, volcano, Kirishima, recoil, photo detector

反作用低減システムを有する小型絶対重力計用投げ上げ装置の性能評価 Performance evaluation of a test mass launch system including a reaction reduction mechanism for a rise-and-fall AG

酒井 浩考^{1*}; 新谷 昌人¹; 坪川 恒也²
SAKAI, Hirotaka^{1*}; ARAYA, Akito¹; TSUBOKAWA, Tsuneya²

¹ 東京大学地震研究所, ² 真英計測

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Shin-ei Keisoku

本研究で開発した装置は、落体を投げ上げる時に生じる反作用を低減する機構を導入した小型絶対重力計用投げ上げ装置である。絶対重力計は、重力加速度を 8-9 桁の精度で測定する装置である。この装置は一般的に、重力基準網の構築の際、基準重力点での重力測定に用いられる。その他の使用法としては、火山におけるマグマの移動調査に用いられ、そのデータである重力変化から噴火予知や地下の密度構造の推定を行おうと様々な研究が進められている。しかし、絶対重力計は高精度実現のために、装置が大型化してしまい、火山観測で用いる際は設置場所が限定されるという問題点がある。具体的には、絶対重力観測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。しかし、この手法では観測に手間がかかるほか、相対重力計のドリフトによる見かけ上の重力変化が起こり、測定精度が悪くなることが考えられる。さらに、火山活動時では、観測地点での測定に危険が伴い、火山噴火直前の重要なデータを測定できない可能性も考えられる。しかし、小型絶対重力計が完成し、火山体に絶対重力計を面的に配置できるようになり、データをネット経由でやり取りできるようになれば、火山活動時でも安全に、精度のよい重要なデータを取得できるようになるはずである。これらのことを実現するためにも、小型絶対重力計の開発が必要であると考えている。

絶対重力計の小型化を実現するために、本装置では落体を投げ上げる投げ上げ方式を採用した。この投げ上げ方式の優位性としては、落体を自由落下させる自由落下方式を採用した既存の絶対重力計と比べて、落体を持ち上げる昇降台が不要なため小型化できる点、そして落体を持ち上げる必要がないため測定回数を多くとれる点、光の有限性による重力値への影響や残留気体による影響を相殺でき系統誤差を小さくできる点である。また、本装置は、ピエゾ素子の変位を増幅する変位拡大装置を用いることで、落体をたった 3mm 投げ上げることで絶対重力値を測定できる点も大きな特徴である。さらに、この装置では落体を投げ上げた時の反作用を低減する機構が備わっている。というのも、落体を投げ上げただけでは、投げ上げ時の反作用により干涉計が振動し、データに大きな系統誤差が生じたためである。この系統誤差を改善するために、反作用低減システムを導入した。具体的な手法としては、落体を投げ上げるためのピエゾ変位拡大機構を取り付けた板の反対側に、同じピエゾ変位拡大機構を取り付け、これら 2つのピエゾ変位拡大装置に同じ信号を与え上下対称な動きをするようにする。そして、落体を投げ上げると同時に反対方向にばねの付いたおもりを打ち出し、同時に元の位置に戻ってくるようにすることで、反作用を打ち消すことを試みた。さらに、ピエゾ変位拡大装置の動きによって振動ができるだけ発生しないようにするため、ピエゾ変位拡大装置の加速度ができるだけ連続になるよう設計した信号をピエゾに与えている。これらの機構により、反作用を打ち消す前の振動加速度を 80%以上低減することができた。本講演では、2月に行った江刺地球潮汐観測所での性能評価等について、開発状況を報告したい。

キーワード: 絶対重力計, 投げ上げ装置, 反作用低減システム, 重力, 噴火予知, 地下密度構造の推定

Keywords: absolute gravimeter, launch system, reaction reduction mechanism, gravity, prediction of volcanic eruption, estimating a subsurface density structure

干渉計型重力勾配計の小型可搬化開発 Development of a portable laser-interferometric gravity-gradiometer

潮見 幸江^{1*}
SHIOMI, Sachie^{1*}

¹ 潮見幸江
¹ Sachie Shiomi

We are developing a portable laser-interferometric gravity-gradiometer for environmental measurements. In the gravity gradiometer, differential accelerations between two test masses, which are in free fall at different heights in a vacuum tank, are measured by a laser interferometer. A prototype of the gravity gradiometer was built up, and its performance was tested at the Sakurajima Volcanological Laboratory of the Kyoto University. We will report the current status of the development.

キーワード: 重力勾配, 環境計測
Keywords: gravity gradients, environment measurements

日本重力基準網 2013 (JGSN2013) に準拠した日本国内の重力データの作成 Making of Japanese domestic gravity data which consistent to Japan gravity standardization net 2013

宮崎 隆幸^{1*}; 吉田 賢司¹; 宮原 伐折羅¹
MIYAZAKI, Takayuki^{1*}; YOSHIDA, Kenji¹; MIYAHARA, Basara¹

¹ 国土交通省国土地理院

¹ GSI of Japan

国土地理院は、最新の重力測量のデータを用いて新しい日本重力基準網 2013 (JGSN2013) を構築した。JGSN2013 は、絶対重力計 FG5 の導入により観測の精度が向上することによって旧来の重力基準である JGSN75 と比較して大幅な精度向上を達成するとともに、大幅に基準重力点を拡充し、さらに重力点の観測点座標の位置精度の向上や解析時の潮汐補正の統一などを行うことで達成した、日本全国を網羅した高精度な重力網である。

さらに国土地理院は 1967 年～1993 年にかけて全国で 14,000 点に及ぶ二等重力測量を実施し、全国を網羅する重力データを得ている。その重力値を JGSN2013 に整合させることができれば、日本全国を稠密にカバーする最新の重力データを得ることができる。

しかし、膨大な二等重力観測データを精査し、基準・一等データと同じ処理過程によって網平均処理することは多大な労力と時間を要する。さらに、二等重力観測は観測方法、使用機材が基準・一等重力測量と異なることから、観測誤差を含め、さまざまな誤差要因を含んでおり、基準・一等と同様の処理を行ったとしても同等の精度の重力値を得られない可能性が高い。そこで本研究では JGSN2013 における基準・一等重力成果値と JGSN75 における成果値との差分から変換パラメータを作成することで効率的に二等重力データを JGSN2013 へ整合させる手法を検討することとした。

二つの重力データセットの差分データからバイリニア補間や LSC 内挿等の方法により作成した重力成果差分モデルのうち、オリジナルのデータに存在しない人工的な差分を生じることなく、データセット間の関係を最も適切に表現する、最も実際の観測に整合するパラメータを作成する補間手法を開発することを目標とする。

本発表では二等重力観測データの JGSN2013 への変換手法の開発の状況を報告する。

キーワード: 日本重力基準網 2013, 二等重力測量

Keywords: JGSN2013, second order gravity survey

東南極の日本の南極基地周辺での重力異常と氷床変動 Gravity anomalies and ice mass movements around the Japanese Antarctic stations in East Antarctica

福田 洋一^{1*}; 青山 雄一²; 土井 浩一郎²; 山本 圭香³; 松尾 功二⁴; 野木 義史²
FUKUDA, Yoichi^{1*}; AOYAMA, Yuichi²; DOI, Koichiro²; YAMAMOTO, Keiko³; MATSUO, Koji⁴;
NOGI, Yoshifumi²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 国立極地研究所, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 国土地理院
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²National Institute of Polar Research, ³Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Geospatial Information Authority of Japan

日本の南極観測基地がある東南極のドローニング・モード・ランドからエンダービーランドにかけての地域は、ゴンドワナ大陸の形成と分裂の鍵を握る地域であり、様々な地球科学的研究が行われている。また、昭和基地の南西に位置する白瀬氷河は、南極で最も大規模な氷河の一つであり、この地域の氷床流動に深く関わることから雪氷学的な研究も積極的に進められている。さらに、最近の GRACE による衛星重力観測や、IceSat、Envisat などの衛星高度計観測の結果によると、この地域では、降雪により、氷床質量が増加していることが示されており、南極での氷床変動や、また、それと関連した GIA (Glacial Isostatic Adjustment) の研究でも重要な地域となっている。

これらの研究への寄与を一つ目的として、これまで JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) によって得られた地表重力データと最新の GOCE 衛星による重力場モデルを用いた統一的な重力場推定を行っており、それらの結果は JpGU 大会等で報告してきた。また、2014 年大会では、あすか基地近傍のシール岩の重力基準点で実施した絶対重力測定の結果について報告を行った。ところで、この地域では、JARE-28 により、北側のプライド湾からあすか基地を経て南のセールロンダーネ地域にかけての測線での重力測定が行われており、今回、この測線に沿って、上述の結果をもとに新たに求めて重力異常や GOCE の重力モデル、また、基盤地形などとの比較を行い、その特徴について再検討を行った。その結果、海岸線と山地の間に延びる負の重力異常は、その地域に堆積した厚い氷床の影響によるものであると推察できた。このような構造は、ドローニング・モード・ランドからエンダービーランドにかけての広い地域で見られ、これらの地域は、氷床質量の増加域とよく一致している。これらの関係については推測の域を出ないが、大陸の山地地形が降雪量の増加に関連するとともに、海岸との間の基盤地形が氷床流動に関わっていることが考えられる。

キーワード: 重力異常, 氷床質量変動, GIA, 絶対重力測定, GOCE

Keywords: gravity anomalies, ice mass movements, Glacial Isostatic Adjustment, absolute gravity measurements, GOCE

A10絶対重力計を用いたインドネシア グンディガス田における二酸化炭素地下貯留 モニタリング Absolute gravity measurement using A10 absolute gravimeter around Gundih gas field for CCS monitoring

西島 潤^{1*}; 福田 洋一²; sofyan yayan¹; 板倉 統²; WAHYUDI Eko³; 松岡 俊文⁴
NISHIJIMA, Jun^{1*}; FUKUDA, Yoichi²; SOFYAN, Yayan¹; ITAKURA, Matomu²; WAHYUDI, Eko³;
MATSUOKA, Toshifumi⁴

¹九州大学大学院工学研究院, ²京都大学大学院理学研究科, ³バンドン工科大学, ⁴京都大学大学院工学研究科

¹Faculty of Engineering, Kyushu University, ²Graduate School of Science, Kyoto University, ³Institute of Technology Bandung,

⁴Graduate School of Engineering, Kyoto University

インドネシアでは2020年までにCO₂を2005年比で26%削減することを計画している。インドネシアでのCO₂排出源の一つであるガス田ではCO₂の直接的な削減法として、ガス生産の際に出たCO₂を回収して地中に封じ込めるCCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 技術の研究がJICA-JST地球規模課題対応国際科学技術協力(SATREPS)の一環として、グンディガス田において行われている。このプロジェクトではCCSの適用に不可欠なガス田の深部地層の地質評価技術の開発および地下に貯留したCO₂の分布や挙動を知るためのモニタリング技術の研究開発を行うことを目的としている。

CCSの地下貯留後周辺地層への浸出の有無をモニタリングする手法の一つとして重力変化をモニターする方法が挙げられる。

グンディ地区でのA10による絶対重力測定は、2013年に6観測点で開始した。2014年9月には2回目の重力測定を実施し、CO₂注入井候補であるJepon地区に新たに3観測点を増設した。なお、2013年に設置した観測点のうちRBT01およびKDL01については、生産井の整備に伴い測定点が失われており、2014年は測定を実施することはできなかった。また、生産井の近傍に位置しているKTB01およびRBT02については、RBT02は生産に向けた準備中、KTB01では既に生産が開始されている。

測定に使用したMicro-g LaCoste社製A10絶対重力計は、2012年10月にルビジウムクロックを、2013年3月にはレーザーを新品に交換した。また、これまでデータ収録・制御用のノートPCの熱暴走によると考えられる不調が見られたため、発熱を抑えるためノートPC内のハードディスクをSSDに換装した。この結果グンディ地区のような高温な地域においても問題無く良好な測定を行うことが可能となった。

2013年と2014年の測定結果を比較したところ、これらの測定点での重力変化については、KTB01で有意な重力の減少、それ以外の点では、測定誤差を考慮すると有意な変化は認められなかった。KTB01での重力変化の原因については、生産井の稼働開始による可能性の他、2014年に比べ2013年の同時期の降雨が明らかに多かったことから、地下水位変化の影響も考えられる。KTB01点では、これらのことも考慮し、2013年にテスト的に土壌水分計を設置した。この観測については、通年のデータを得ることはできなかったが、約2ヵ月程度の良いデータは取得できている。本講演ではこのデータを用いた降雨や地下水の影響についての検討を報告する。

2014年に設置したJeponおよびITB-1, ITB-2の3点は、CO₂注入井候補地周辺の重力のベースライン値を得る目的で、今年度新たに設置した重力点である。また、同時期にバンドン工科大学のグループは、これらの点は重力基準点として、CG-5重力計を用いた約400点のグリッドサーベイを実施している。本データは今後の重力変化の基準となるほか、地下密度構造の精密な決定も行った。

以上の観測・測定研究に加え、今年度は、CO₂注入開始に伴う重力変化のモデリングについても着手した。モデリングについてはJeponを対象に行われているCO₂注入シミュレーション結果(密度変化)に基づき、重力フォワード計算を行った。計算方法はCO₂注入シミュレーションと同様に地下をブロックの集合体で表現し、各ブロック内での密度変化による重力変化を角柱の厳密解であるOkabe(1979)の方法で計算し、これらの総和を地表での観測点における重力変化としている。また、注入量の条件としては予定されているものに加えていくつかのパターンについても試算を行う予定である。

キーワード: 二酸化炭素地下貯留, 精密重力モニタリング, 絶対重力測定

Keywords: CCS, Micro-Gravity Monitoring, Absolute Gravity Measurements

重力計鉛直アレイ観測 -平成26年度- Gravimetrical vertical array observation -the 2014 fiscal year-

田中 俊行^{1*}; 本多 亮¹
TANAKA, Toshiyuki^{1*}; HONDA, Ryo¹

¹ 東濃地震科学研究所
¹Tono Res. Inst. of Earthq. Sci.

ここで述べる重力計鉛直アレイとは、瑞浪超深地層研究所（MIU）の坑道を利用して、不圧地下水面を挟んで gPhone 重力計を配置し、降雨擾乱の低減を図る観測である。26年度は、gPhone#130 を MIU 深度 100m 予備ステージに gPhone#90 を地上（瑞浪地科学研究所測定室）に設置し、発破の影響のないデータを蓄積した。MIU 坑内は排水装置等の振動により背景ノイズが高いため、#130 のセンサードリフトは非線形な変動が顕著である。一方、#90 のそれはほぼ線形であり、絶対重力計によるドリフトレートの評価が容易である。また、MIU 坑内で測定される気圧は、地下深くなるほど地上気圧との差異が大きくなる。したがって、サブマイクロガルの変動を議論するには、センサードリフトと大気擾乱の補正手法の工夫が課題である。発表では、ノンパラメトリックモデリングによる非線形ドリフト低減と気象庁メソ客観解析を用いた大気擾乱の評価についての試みを紹介する。

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。（独）日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターの青柳芳明氏には MIU 坑内での観測および降雨データに便宜を頂いている。

キーワード: 重力連続観測, 重力計, 陸水, 降雨, 大気補正, 計測手法

Keywords: continuous gravity measurement, gravimeter, inland water, rainfall, atmospheric correction, measuring method

重力データの独立成分分析: gPhone 観測データへの適用例 Independent component analysis of gravity data observed by gPhone gravimeters

板倉 統^{1*}; 福田 洋一¹; Wahyudi Eko Januari²; 風間 卓仁¹
ITAKURA, Matomu^{1*}; FUKUDA, Yoichi¹; WAHYUDI, Eko Januari²; KAZAMA, Takahito¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² バンドン工科大学

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² Bandung Institute of Technology

重力の時間変化の観測は、地下での質量変化を検出する有効な方法であり、火山活動に伴うマグマ移動や地熱流体・二酸化炭素等の貯留層での貯留量変化の監視に利用されている。しかしながら、観測した重力値の変化には、マグマ移動や貯留量変化のシグナル以外にも、地球・海洋潮汐や、気圧・陸水の変化等による重力変化の影響も含まれる。そのため、目的のシグナルを抽出するには、これらの重力変化の影響を精度よく取り除く必要がある。

このような多種のシグナルが重なり合った多変量データ解析手法のひとつに主成分分析がある。主成分分析では、元のシグナルの相関行列を直交化することで、分散が大きい順に無相関な変動成分を抽出する。一方、同じく多変量解析のひとつである独立成分分析は、元のシグナルの非ガウス性を基準として無相関な成分に分解する手法である。独立成分分析は、これまでに元のシグナルが非ガウ斯的で無相関と考えられる音響や脳波の研究に多く用いられている。一方、重力の変動成分について考えると、個々のシグナルの無相関性が成立しない可能性があったり、また、実際の重力変化は非ガウ斯的であることも考えられる。従って、重力データの解析についても、主成分分析より独立成分分析の方が適している可能性がある。

そこで、まず簡単なシミュレーションの例として、周期の異なる正弦波を混合することで重力疑似データを生成し、2種類以上の混合データから独立成分分析により元の正弦波を分離できるか調べ、昨年の測地学会講演会で報告した(板倉ほか, 2014)。その結果、正弦波の周期に対して、十分に長い期間を含むデータについては、良好に分離できることが確認できた。しかしながら、周期が長くデータ長が1周期分に満たないデータやトレンドを含むデータについては、良好な結果が得られないことが分かった。このように、元のシグナルにトレンド的な成分が含まれる場合には、前処理としてトレンド成分を除去しておく必要があることが判明した。

以上を踏まえ、本研究は実際に観測された重力データに対して独立成分分析を適用し、重力データに含まれる異なる信号の分離が可能か試みた。今回用いた重力データは、MGL 社製 gPhone #123, #126, #127 の3台により、2014年1月から2月にかけて、京都大学理学部の重力測定室の同じ基台上で取得されたものである。データ長は約300時間で、まず、BAYTAP-Gを用い、地球潮汐の影響を分離したのち、そのトレンド成分について、指数関数をフィッティングすることで器械的なドリフトの影響を除去した残差を入力データとして使用した。ここでは気圧の影響の補正を行っていないため、入力データには気圧の影響や、その他、基台の傾斜の影響などが共通に含まれることが予想され、これらの信号が独立成分分析で分離できるかテストした。

独立成分分析の結果、気圧の応答成分と考えられる重力変化として両振幅の変動が $5.8 \sim 16.0 \mu\text{Gal}$ の成分が、また、傾斜の影響によると考えられる重力変化として両振幅の変動が $3.5 \sim 14.8 \mu\text{Gal}$ の成分が分離できた。これらのうち気圧応答成分は、気圧計の並行観測データとの相関係数が0.7であり、約周期50時間の変動も共通に捉えられた。しかしながら振幅に関して、およそ3倍の幅で異なっており、正しく推定することができなかった。この原因については、今後、検討する予定である。

今回は同じ室内の同一基台上に設置した重力計のデータを用いたが、今後、より具体的な観測に近い、野外で複数点の重力計を用いた場合についての適用方法等についても検討を進める予定である。

キーワード: 独立成分分析, 重力

Keywords: Independent Component Analysis, gravity

石垣島における水平加速度の超伝導重力計への影響 Effect of horizontal acceleration on the superconducting gravimeter at Ishigakijima

今西 祐一^{1*}; 名和 一成²; 田村 良明³; 池田 博⁴; 宮地 竹史³
IMANISHI, Yuichi^{1*}; NAWA, Kazunari²; TAMURA, Yoshiaki³; IKEDA, Hiroshi⁴; MIYAJI, Takeshi³

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

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年に沖縄県石垣島に超伝導重力計を設置した。観測を始めてみると、このような海洋島の自然環境に特有と考えられるさまざまな問題に直面した。なかでも大きな問題の一つが、脈動による地動ノイズレベルと重力値との間に相関が見られることである。台風接近時などにおける重力変化（増大）の大きさは最大で2マイクロガルにも及び、想定されるスロースリップの信号レベルと同程度かそれ以上である。ここでは、これが真の重力変化ではなく、超伝導重力計における応答の非線形性に起因する見かけの重力変化だという立場にたって、この現象を解釈することを試みる。この観測点は国立天文台 VERA 石垣島観測局の中にあり、VLBI の 20 m アンテナが動くとき周波数約 5 Hz の地動ノイズが発生する。そのときには、重力にはプラスのオフセットが発生する。観測局に併設した地震計の記録を用いて分析したところ、重力変化の大きさは地動ノイズの水平成分のパワーに比例することがわかった。このことは、地動ノイズレベルが高くなると、重力センサーに内在する上下成分と水平成分のクロストークが顕在化することを示している。荒天時の周期約 5 秒の地面振動の影響についても同様のメカニズムで説明が可能かどうか、現在詳しい分析を行っており、その結果について発表する予定である。

キーワード: 超伝導重力計, スロースリップ, 石垣島, 水平加速度

Keywords: superconducting gravimeter, slow slip, Ishigakijima, horizontal acceleration

石垣島における陸水擾乱の重力への影響とそのモニタリングのための新たな試み Hydrological disturbances on gravity at Ishigakijima and experiments for their monitoring

名和 一成^{1*}; 今西 祐一²; 伊藤 忍¹; 田中 愛幸²; 田村 良明³; 宮川 歩夢¹; 風間 卓仁⁴; 宮地 竹史³; 奥田 隆⁵; 山谷 祐介¹; 池田 博⁶; 杉原 光彦¹
NAWA, Kazunari^{1*}; IMANISHI, Yuichi²; ITO, Shinobu¹; TANAKA, Yoshiyuki²; TAMURA, Yoshiaki³; MIYAKAWA, Ayumu¹; KAZAMA, Takahito⁴; MIYAJI, Takeshi³; OKUDA, Takashi⁵; YAMAYA, Yusuke¹; IKEDA, Hiroshi⁶; SUGIHARA, Mituhiko¹

¹ 産業技術総合研究所, ² 東京大学地震研究所, ³ 国立天文台, ⁴ 京都大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 筑波大学

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, ³National Astronomical Observatory, ⁴Kyoto University, ⁵Nagoya University, ⁶Tsukuba University

2012年1月末、国立天文台 VERA 石垣島観測局において、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捉えることを目的として超伝導重力計観測を開始した。これまで、台風による停電などによる短時間の欠測があるものの、ほぼ連続的に記録できている。しかし、スロースリップ起源の信号を同定することは容易ではなく、その理由は、大気・海洋・地下水などが複雑に関連し合って重力に影響していることに加え、大振幅の脈動ノイズが重力計の非線形応答を引き起こしていると考えられるためである（今西ほか、本大会）。なかでも、陸水擾乱の影響はモデリングが難しく、観測の成否をにぎる最重要な課題であると認識している。そこで、陸水擾乱の影響を詳しく知るために、新たにプロファイル水分計を設置して深い部分の土壌水分量変化の測定を始め、土壌水分量変化と相関した走時異常検出のための地震計も複数台導入した。2014年度末には、VERA 局周辺の地下構造を知るための反射法地震探査を予定している。超伝導重力計の運転に関しては、液体ヘリウム充てんのほか、低温機器の保守作業を行った。また、2015年1月に、VERA 石垣島局で初めて絶対重力計 FG5(#217) による測定を実施したので、超伝導重力計との比較結果についても報告する予定である。

日本の離島における新しいジオイド・モデルの構築 Development of new geoid model of remote island of Japan

小島 秀基^{1*}; 宮原 伐折羅¹; 根本 悟¹; 伊藤 純一¹; 兒玉 篤郎¹; 黒石 裕樹¹
KOJIMA, Hideki^{1*}; MIYAHARA, Basara¹; NEMOTO, Satoru¹; ITOU, Jyunichi¹; KODAMA, Tokurou¹;
KUROISHI, Yuki¹

¹ 国土交通省国土地理院

¹ GSI of Japan

国土地理院は、平成26年4月、一部離島を除く全国について、測量成果との整合性が従来のモデルより大きく向上したジオイド・モデル「日本のジオイド2011」を公表した。平成26年度は、残る離島について新たなジオイド・モデルを構築したので報告する。

離島のジオイド・モデルの構築は、最新の日本の重力ジオイド・モデル JGEOID2008 を基盤とし、これを島ごとに GPS 測量と水準測量の成果から求めた実測ジオイド高と整合するよう調整することで行った。調整方法には、1) 実測ジオイド高と JGEOID2008 との差 (ジオイド高較差) の分布を一定値で表現するバイアス法、2) ジオイド高較差の分布を様な傾斜平面で表現する平面補正法、3) ジオイド高較差の分布を GMT のグリーンスプライン補間プログラムで推定した面で表現する GMT 法を用いた。観測点の配点数と密度に応じて、島ごとに最適な方法を選択した。

ほとんどの離島では、標高は島ごとに定められた独自の標高基準に基づいているため、今回のモデル作成では島内の標高の整合性を重視し、基準が異なる島は可能な限り分けてモデルの構築を行った。

実測ジオイド高を求める際に必要な観測点の楕円体高は、GPS 解析の固定点となる電子基準点が2004年に全点で楕円体高の測量成果を改定しているため、2004年以前に計算された測量成果については、すべて楕円体高を再計算した。また、解析の際に国土地理院が独自に検定を行って作成したアンテナ位相特性モデルを電子基準点に用いることで、楕円体高の整合性を向上した。

構築した新たな離島のジオイド・モデルを公表することで、離島を含む全国において GNSS 測量による3級水準点相当の標高決定が可能となり、測量作業のさらなる効率化が期待される。

キーワード: 日本のジオイド2011, ジオイドモデル, 測量成果, 離島域

Keywords: GSIGEO2011, geoid, survey results, remote island

金沢大学重力データベースの改良 Improvement of the Gravity database of Kanazawa University

本多 亮^{1*}; 澤田 明宏²; 平松 良浩²
HONDA, Ryo^{1*}; SAWADA, Akihiro²; HIRAMATSU, Yoshihiro²

¹ 東濃地震科学研究所, ² 金沢大学理工研究域自然システム学類

¹Tono Research Institute of Earthquake Science, ²Nat. Sys. College of Sci. and Eng., Kanazawa Univ.

The gravity database of Kanazawa University is now available on web (Honda et al., 2012, J. Geod. Soc. Japan). The terrain correction for the gravity data is based on Honda and Kono (2005, J. Geod. Soc. Japan) applying 50 m gridded topography data, which is based on various DEM, including sea data published by Japan Oceanographic Data Center, Japan Coast Guard. Recently, 10 m DEM published by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism is available, which covers all over the country. We refined our correction routine to apply the fine DEM. The terrain gravity correction, especially on mountainous region, improved by this application. We report our new correction routine with the refined gravity anomaly map.

This research is promoted by the Grant-in-Aid for Scientific Research (C), No. 26400450.

キーワード: 重力異常, データベース
Keywords: Gravity Anomaly, Database

宮崎県の下のスラブ塊の沈下が沖の浅部を引き千切る現場と重力負異常領域が一致～日向灘地震活動の本質～

Minus anomaly region of gravity in Hyuganada and place that sinking-slab-block tears off shallow part are corresponding

間瀬 博文^{1*}

MASE, Hirofumi^{1*}

¹ 所属なし

¹ none

プレート(P)収束帯では低温のPの斜め上斜め下に高温体が形成され互いに引き寄せ合う。東方から西進する高温体に乗るPとマントルウェッジは西進し、西方から東進する高温体に挟まれ圧縮される。これが収束帯の原動力・主構造と考え理論・実験・適用の各面で説明してきた。(1)(2)(3)他

1. 力学の一般知識 2. 上の仮説 3. 地震波トモグラフィ dVp(トモグラフィと略)の赤色は高温青色は低温と解釈 4. 沈み込みスラブ(SSと略)はトモグラフィでは原則として青色で示されていると解釈

地震活動や重力異常を理解するため私は上の4点を手段としている。今回、トモグラフィは三次元をシームレスで把握できる(4)を利用させて頂いた。重力図(ブーゲー異常)は(5)を利用させて頂いた。

日向灘に中心を持つ負の重力異常領域(重力異常領域と略)の存在(5)を問題視してきたが、成果が発生しつつあるので報告したい。

(図面(注記等は英語)を参照のこと)

平面図はSSの形状、重力異常領域の分布、各断面の切断線位置(a-a'断面は鉤形)を表す。重力異常領域は県北部・県境のものと日向灘のものに大別される。特に後者は目の如き明瞭な中心と南へなびく尾を持ち印象的である。SSの南端がまさにその目の中で形成されている。各断面では高温体高1と高2の引き合いを黒矢印で示した。それに伴い発生する貫入圧力や陸の支持力をピンク矢印で示した。

断面1-1',2-2'では、高1が陸の下を東方奥深く貫入しそこでも高2と引き合う。黒矢印はSSを絞めて凹ませたり細くする原動力である。貫入部分の圧力が高まりSSは押し下げられ(青矢印)貫入部分は上下方向に広がる。この密度の出入り勘定の結果によって県北部・県境の重力異常領域が存在するのだろう。

以上の作用でSSからスラブ塊(SB)が形成・分離すると考える。西側は西方の深部とは亀裂(青破線)で分断し滑っている。東側は浅部(日向灘)で締めと引き千切り(緑矢印)が発生している。宮崎県全域の地下でSBの垂直沈下が伺える。断面1-1'~9-9'はこの変動の、まるで定点における経時アニメのようである。

引き千切りと分離の現場は宮崎県中部沖で重力異常領域のピークと一致している(断面4-4'~7-7',a-a')。引き千切り作用で西下方へ物質が引き抜かれロート状に変形し密度減少により重力異常になると考える。南部ではすでに引き千切りが終了し完全分離している(断面8-8',9-9')。しかし依然と重力異常領域内であり南へ尾が伸びる。南から北進を続け現在に至る引き千切りの現場には重力異常のピークが影の如く伴って来た。現場が通過してもその場所の重力異常はすぐには改善しないから航跡(尾)として残ろう。一点鎖線は重力異常領域の中心線として描いた。なぜ二点鎖線(直線)の付近に存在しないかと考えるが現状は海岸線と共に東へ膨らんだ曲線である。地殻変動で鹿児島・宮崎南部だけが少変形のまま南東移動している(3)(6)ことと直結すると思われる。今後詳細に研究したい。

付近で発生した逆断層型地震(気象庁資料,1997年以降,発震機構と深度が判明)7個の位置を平面図(圧縮軸も)と断面図に記入した。これらは逆断層型を装うがまず下(斜め下)から引かれるからこそ発生する地震と認定したい。縦方向にて正断層型であり陥没型とか沈下型と呼ぶべきであろう。平面図の赤矢印は、引き千切られる直前で西下方から引く力に最大限抵抗しているであろう垂れ下がり部の壁の部分を目指す。つまりこの近辺(断面2-2',3-3')の垂れ下がり部が物質の引き抜き作用の最前線である。平面的には内部の物質負に対し東の外側から内に向け圧力がかかる。この圧力と赤矢印の対面が地震が発生する平面での圧縮方向分布を決定づける。平面図で7個中6個の圧縮軸の方向が圧縮方向分布予想(扇の骨状)に調和的である。

(1) 間瀬/SSJ2010 秋/P3-47 (2) 間瀬/JpGU2012/SCG67-P06 (3) 間瀬/SSJ2014 秋/S03-P01

(4) AIST/地下構造可視化システム/トモグラフィデータ by Abdelwahed and Zhao (2007)dVp

(5) AIST/地下構造可視化システム/重力図(ブーゲー異常)

(6) GSI/地殻変動アニメーション 1996年4月~1999年12月鳥瞰図

SGD23-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月27日 18:15-19:30

