

## 2004年スマトラ-アンダマン地震に伴う重力変化と静的な重力異常の形成

### Seismic gravity changes of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and static gravity anomaly

\*田中 優作<sup>1</sup>、日置 幸介<sup>1</sup>

\*Yusaku Tanaka<sup>1</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

1. 北海道大学大学院理学院

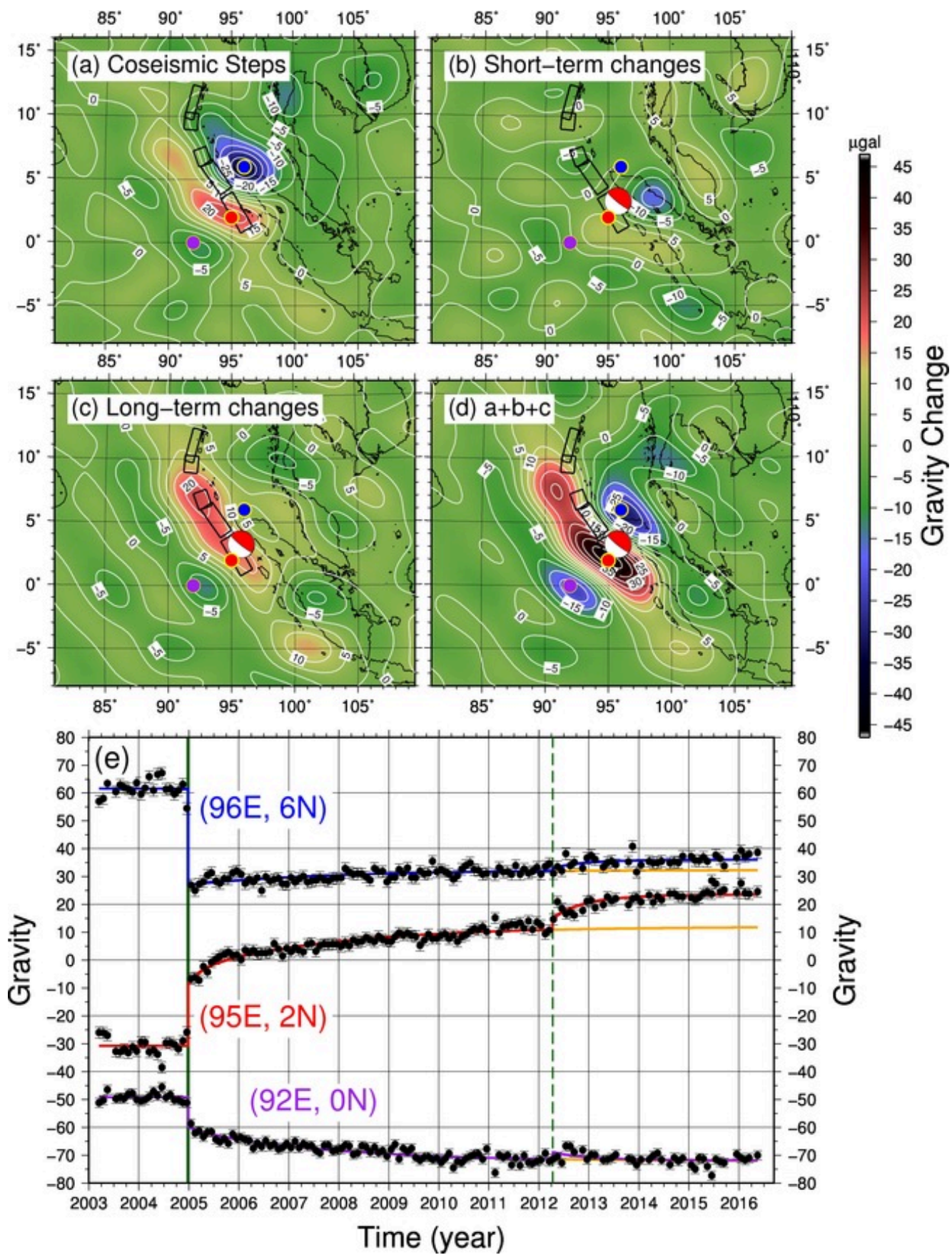
1. Graduate School of Science, Hokkaido University

2002年の重力衛星GRACE打ち上げ以降、Mw9以上の地震としては2004年スマトラ-アンダマン地震(Mw9.1-9.3)が最大にして最古である。この地震が引き起こした地震時と地震後の重力変化について2003年1月から現在までのGRACE衛星のデータで時系列解析を行なった所、既に地震後重力変化が完了しつつある事が見出された。そこで地震時の重力変化と地震後の重力変化を足し合わせた所、地球重力場は地震前の状態には戻らず、地震前とは違った新しい地球重力場の姿が形成されていた。これは一つの地震が地球の静的な重力場を、地震前と比べて「最終的に」（つまり地震時変化と地震後変化の総和として）どう変化させたのかを二次元的に観測した第一の成果である。

また、地震に伴う重力変化の結果として地球重力場が地震前の状態に戻らない事は、地震に伴う重力変化が静的な重力異常を形成する過程の一部であることを示唆している。地震間・地震時・地震後というサイクルの中で重力変化が繰り返されながら静的な重力場が形成されている事を考えれば、静的な重力異常の知見と、今回の地震時・地震後重力変化の観測例を合わせる事で、地震間の重力変化についての考察が可能となるかもしれない。

キーワード：地震時重力変化、地震後重力変化、地震間重力変化、人工衛星GRACE、2004年スマトラ地震、地震サイクル

Keywords: coseismic gravity changes, postseismic gravity changes, interseismic gravity changes, GRACE, The 2004 Sumatra-Andaman earthquake, earthquake cycle



# 重力衛星で見る日本海の海水質量変動：GNSS局位置季節変化との比較

## Water mass variation in the Japan Sea from satellite gravimetry: Comparison with seasonal movements of GNSS stations

\*道藤 俊<sup>1</sup>、日置 幸介<sup>1</sup>

\*Suguru Doto<sup>1</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

1. 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

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

重力衛星GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)はNASAにより2002年に打ち上げられてから15年が経った。これまで多くの研究対象域は陸域に集中したが、信号が小さい海域での重力変動も徐々に捉えられるようになってきた。例えば紅海では、GRACEの観測結果を、衛星搭載海面高度計や海水温度、塩分濃度の現地観測のデータと比較することによって、紅海南端の海峡を通じた海水の出入りによって海水量の季節変化が生じていることが、Wahr et al. (2014)により報告されている。我々も、2002年から2016年までのデータを用いて、世界中の重力変動に解析したところ、北極海やハドソン湾、アラフラ海、日本海において有意な季節変動が生じていることを確認することができた。本研究では、昨年秋の測地学会に続いて日本海に着目した。

重力変動解析に使用したデータはテキサス大学CSRのRelease5のLevel2データである。Stokes係数データの次数と位数を時系列解析してまとめたファイル(GSM file)を用い、重力変化を水位の変化に換算したものを各月の図として作成した。この際、縦縞フィルターとガウシアンフィルター(平均半径300km)を用いた。昨年秋の学会ではGSM fileを直接解析していたが、実際には観測された重力変化から大気海洋に起因する重力変化をモデル化したGAD fileと呼ばれるStokes係数データがすでに差し引かれている。そこで今回は、GADを足し戻す(add back)ことにより、本来の観測データに近いものを解析した。

昨年報告では、日本海の重力は11月頃最大、6月頃に最小となった。その重力差は水に換算して約10cmであったが、GSM+GADを用いた解析では10月に最大、2月に最小、その重力差は水換算で4cmとかなり小さくなった(図1)。本来GADモデルは海洋の重力変化を、モデルを用いて予め差し引いておくことを目的としているため、GSM+GADで振幅はGSM単独のときより大きくなるのが普通である。しかし日本海では逆にっており、GRACEの解析チームが用いている海洋の非潮汐性の質量季節変化のモデルが実際の変動と正反対になっていることを意味する。

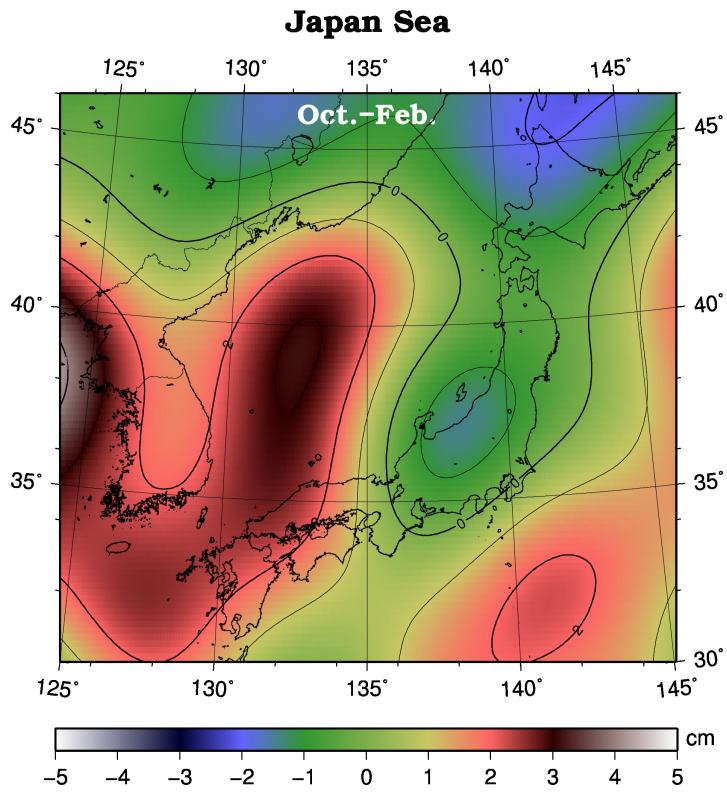
また、国土地理院から公開されている月平均潮位データを用いて、日本海にある飛鳥(山形県)と奥尻島(北海道)の潮位の平均的な季節変化を求め、GRACEと共にプロットした。驗潮はGRACEに比べて5倍程度の振幅と、異なるピーク時期(8-9月に最大潮位)を見せる。これは驗潮が表す潮位変化の多くは海水量の変化を反映しているのではなく、主に温度躍層より上層の暖水の熱膨張を反映していることを示唆する。

また東北日本陸域では冬期の積雪による重力変化が見られるが、重力が最大となる月は2月から3月にかけてであり、日本海で重力がピークを見せる晩秋とやや時期がずれていることがわかった。本研究ではさらにGNSSの座標値の季節変化を解析した。それらの変化のかなりの部分は季節変化する荷重(東北日本陸上の積雪と日本海の海水)による変形に起因すると考えられ、GRACEによる重力季節変化との整合性を確かめることができる。

図1の説明：2月と比較した、10月の日本付近の重力の値。日本海では正の偏差を示している。

キーワード：GRACE、海水質量変動、日本海、地殻変動、GNSS

Keywords: GRACE, Water mass variation, Japan Sea, Crustal deformation, GNSS



## 沈み込み帯の標高一重力異常の分布と力学的考察

### Distributions of elevation-gravity anomaly of subduction zones its mechanical implication

\*岩瀬 裕斗<sup>1</sup>、生田 領野<sup>1</sup>

\*Yuto Iwase<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>

1. 静岡大学

1. Shizuoka Univ.

沈み込み帯と最大地震規模の関係については、Uyeda & Kanamori (1979)に始まる比較沈み込み帯学でよく考察されている。若く浮力の大きな海洋プレートが低角で沈み込み、プレート間の固着が強いチリ型と、古く重い海洋プレートが高角で沈み込み、プレート間の固着が弱いマリアナ型を端成分にした分類が一般的である(Uyeda,1982)。その後沈み込み諸元と地震活動から、Ruff & Kanamori (1980), Stein & Okal (2004)などでは沈み込み速度と年齢を議論、Schellart & Rawlinson (2013)では浅い沈み込み角や圧縮場であることが超巨大地震を発生させる要件であるとした。

2004年のスマトラ沖地震は、McCaffrey (2008)の言葉を借りれば、「世界中の海溝の一部は超巨大地震を起こせないという考えに疑問を投げかけた」。2011年の東北地方太平洋沖地震も同様である。しかし、これらはいずれもチリ型に比べれば沈み込み角度が急で年齢も古いスラブという点では例外的であるが、かといって海溝軸に直交する方向の背弧拡大が起こっているような伸張場でもなく、これをもってどこでも超巨大地震が起こるとする根拠とはならない。

我々は、超巨大地震の発生と沈み込み帯のより直接的な関係を見出す目的で、重力異常と地形データを調査し、前弧域の標高と重力異常分布の分類を行った。重力異常はWorld Gravity Map(WGM)より2min×2min gridのフリーエア異常データ、海底地形図はGeneral Bathymetric Chart of the Ocean(GEBCO)より30sec×30sec gridデータを用い、加えてNational Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)による火山分布を用いた。

重力異常は一般にアウターライズに高まりを持ち、海溝で一旦落ち込んだ後、前弧域で上昇する。

海溝の深さに注目すると、最深部が6000mよりも浅い沈み込み帯は全てでM8以上の巨大地震・超巨大地震が生じている。またこれらの海溝での重力異常の落ち込みは非常に弱く、変形状での分類は困難であった。深い海溝を作らないのはリソスフェアが若く浮力が大きいためであるが、若く柔らかいためにアイススタシーが成立しやすく、重力異常の起伏が出にくいものと考えられる。他方で、海溝が6000mよりも深い沈み込み帯には、M8以上の地震の発生が無い場所が含まれる。同時に東北沖やカムチャッカ半島沖のようにM9クラスの超巨大地震が発生する場所も含まれ、海溝の深さだけでは巨大地震・超巨大地震の発生場を分類することはできない。深い海溝のみを重力異常の分布形状で分類した結果、1. 重力異常が前弧に向かって単調増加で、上がり方が急なもの(最大値になるまでに1deg以下)、2. 単調増加で、ゆっくりなもの(最大値になるまでに1degより大きい)、3. 海溝から小さなピークを経て前弧海盆地でいったん下がってからもう一度上がるもの、4. 重力異常値の最小値が海溝から島弧寄りにシフトしているものに分けられた。このうち、ゆっくり単調増加するもの(日本、カムチャッカ、トンガ、北部・中部チリ)はこれまでにM8以上の地震を起こしたことがある沈み込み帯が属するグループとなった。また単調増加でない2つのグループについて検討すると、3. 海溝沿いの小さなピークや4. 島弧寄りのシフトが見られる場所は、堆積物が多いことがわかった。つまり本質的には、重力異常は前弧のピークに向けて急に上がるかゆるやかに上がるかの2種類に分類できるものと考えられる。

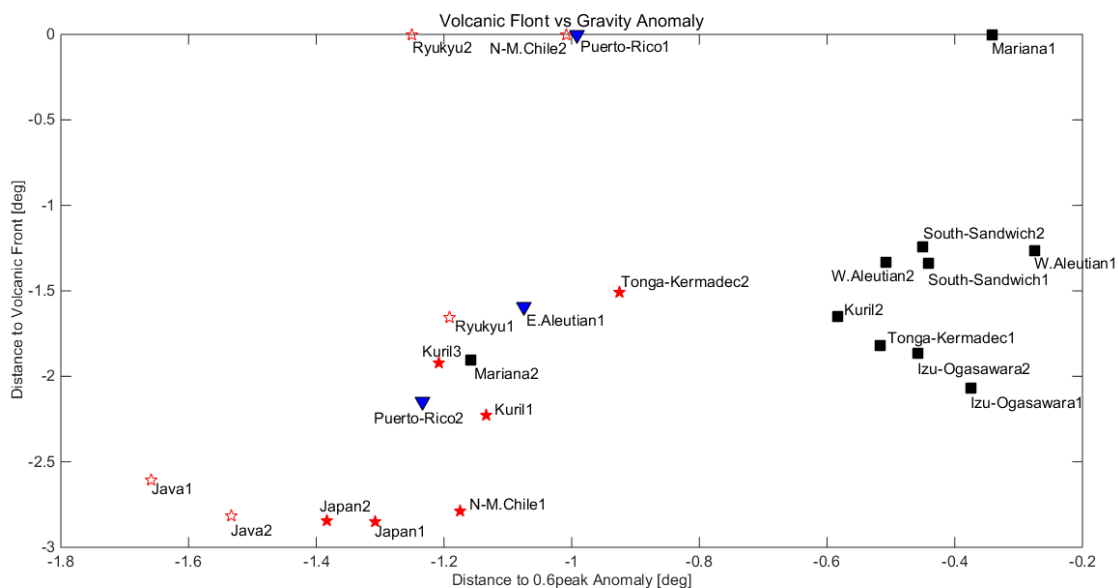


そこで、縦軸に海溝から火山フロントまでの距離、横軸に海溝から重力異常がピークの6割に達するまでの距離をとってプロットすると、両者に正の相関が見られた。火山フロントはスラブ上面の100km等深度線と見れば、沈み込み角の緩いものほど重力異常のピークが海溝から遠いことになる。Bassett and Wasst (2015)は、地形・重力異常値から、各沈み込み帯での海溝距離でのアンサンブル平均をとった値を差し引いたものであるTPTA (Trench-parallel Topography Anomaly)とTPGA(Trench-parallel Gravity Anomaly)に、地震発生域の下端に相当する位置にピークがある場合があることを報告し、trench-parallel fore-arc ridges (TPFRs)と名づけた。本研究で得られた重力異常ピークの位置は、例えばクリル海溝、トンガケルマデック海溝といった海溝で彼らが示したTPFRの位置とよく一致しており、平均からの偏差としなくとも、重力異常の絶対値にTPFRが現れていることを示唆している。我々の分類では6000mを超える沈み込み帯の全てで前弧に重力異常のピークが見えており、Basset and Wasst (2015)では海溝距離でのアンサンブル平均値を差し引いているが、比較的均一な海溝や、あるいは海溝平行方向の変化の大きすぎる海溝ではかえって差し引かないほうが、TPFRをよく表している可能性も示唆される。

本発表では海溝の浅い沈み込み帯も含めて、ピークと過去の地震の震源域、Basset and Wasst (2015)のTPFRとの対応について、詳細に検討した結果を発表する。

キーワード：沈み込み帯、巨大地震・超巨大地震、フリーエア重力異常、標高、TPFRs

Keywords: subduction zones, huge earthquakes, Free-air gravity anomaly, Elevation, TPFRs



## Major earthquakes resulting in gravity changes detected by GRACE

\*Benjamin Fong Chao<sup>1</sup>, Jen-Ru Liao<sup>1,2</sup>

1. Inst. of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 2. Dept. of Earth Sciences, National Central Univ., Taiwan

The twin-satellite mission - Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) launched in 2002 measure the time-variable gravity (TVG) field. We analyze the GRACE data to study the TVG due to earthquake faulting and the associated mass dislocations in the Earth. Most GRACE TVG signals are directly related to changes in surface processes, primarily the water cycle. So we first strive to remove the terrestrial water signal using the Global Land Data Assimilation System model outputs and the seasonal (annual and semi-annual) signals by the least-squares estimation. Then we apply the method of Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis to extract the earthquake-induced TVG signals in the epicentral region in terms of change pattern and time evolution. Our EOF results corroborate past findings of the GRACE TVG signals caused by the greatest recent earthquakes not only for co-seismic but also post-seismic behavior. We do so notably for the 2004 Sumatra-Andaman (Mw 9.1), 2010 Chile (Mw 8.9), and 2011 Tohoku (Mw 9.0) events, as well as somewhat smaller earthquakes including the 2005 Nias (Mw 8.5) event otherwise largely masked by the 2004 Sumatra-Andaman signals, the 2007 Sumatra (Mw 8.5) event, the 2012 Sumatra (double event of Mw 8.2 and 8.6 in one day) event which is largely strike-slip, and even possibly the 2013 deep-focused Okhotsk (Mw 8.3) event. We also conduct least-squares fitting with a co-seismic step function representing the earthquake for every grid point in the considered region, to augment to and confirm the EOF results. Furthermore, assuming a point-source double-couple dislocation and a spherically symmetrical Earth, the earthquake-induced displacement field is expanded by spherical harmonics where components of order greater than 2 vanish. We transform the epicenter to the North Pole in the canonical coordinates and could duplicate the whole TVG signal by spherical harmonics up to degree 60 but only order 2, which accentuates the EOF and least-squares fitting results that are approximated by co-seismic double-couple phenomena.

Keywords: earthquake, gravity change, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), Empirical Orthogonal Function (EOF)

# 石岡測地観測局における絶対重力計の国内比較観測の実施及び日本重力基準網2016 (JGSN2016) の構築

## Implementation of Domestic Comparison of Absolute Gravimeters

## Ishioka Geodetic Observing station and construction of Japan Gravity Standardization Net 2016 (JGSN 2016)

\*加藤 知瑛<sup>1</sup>、吉田 賢司<sup>1</sup>、平岡 喜文<sup>1</sup>、矢萩 智裕<sup>1</sup>

\*Chiaki Kato<sup>1</sup>, Kenji Yoshida<sup>1</sup>, Yoshifumi Hiraoka<sup>1</sup>, Toshihiro Yahagi<sup>1</sup>

1. 国土交通省国土地理院

1. GSI of Japan

国土地理院は、国際標準に整合した絶対重力値を取得するため、我々及び国内関係機関が有するFG5絶対重力計と、国際度量衡局 (BIPM) の後援による国際比較観測に参加している産業技術総合研究所が所有する同機器との間でキャリブレーションを目的とした比較観測を実施している。この国内比較観測は2002年から2015年まで毎年1回国民宿舎「つくばね荘」(茨城県石岡市)にて実施されてきたが、より良い環境で高精度な比較観測を実現するため、2016年からは新たに開設された国土地理院石岡測地観測局(同市。以下、「石岡局」という。)の重力測定室で実施することとした。

石岡局の重力測定室は、建物と絶縁された基台を有し、複数のコンクリートパイルで支持層と堅固に結合されている。また、市街地から5kmほど離れているため経済活動による人工的なノイズも比較的小さい。比較観測は同時に6台可能で、建物が完成する以前にGNSS測量及び水準測量を実施し、測点の位置情報を高精度に決定している。さらに、石岡局のVLBI観測施設から水素メーザの信号を分配し、比較する絶対重力計に統一した周波数信号を用いることで時計の誤差を最小限にする方法も試みた。その結果、参加した全ての絶対重力計で器差の範囲内で十分に整合する結果が得られた。

これまで国内では、国土地理院が1976年に公開した「日本重力基準網1975 (JGSN75)」が重力の基準として使用されてきた。構築から40年以上が経過し、地殻変動の影響や重力値の測定精度の向上等により、JGSN75が与える重力基準と実際の重力値の乖離が大きくなったことから、国土地理院では、2017年3月に新しい日本重力基準網2016 (JGSN2016) を公開した。JGSN2016では、2002年から2016年までに実施した最新の絶対および相対重力測定の使用しているが、国内比較観測で国際標準との整合が確認された絶対重力計を用いて絶対重力値を測定することで、世界標準と整合した高精度で信頼性の高い重力網が実現されている。

本講演では、これまでの国内比較観測の結果とともに、JGSN2016構築に果たした役割について報告する。

キーワード：絶対重力計国内比較観測、FG5絶対重力計、日本重力基準網2016

Keywords: Domestic comparison of Absolute Gravimeters, FG5 Absolute gravimeter, Japan Gravity Standardization Net 2016



# 過去の稠密重力データの日本重力基準網2016への整合手法の高度化 Improvement of method that makes Japanese old and dense gravity data consistent with Japan gravity standardization net 2016

\*Miyazaki Takayuki<sup>1</sup>

\*Takayuki Miyazaki<sup>1</sup>

1. 国土交通省国土地理院

1. GSI of Japan

国土地理院は、全国に等しく正確な重力基準を提供するため、最新の重力測定データを用いて、絶対重力測定点約30点及び相対重力測定点約200点で構成される「日本重力基準網2016 (JGSN2016)」を構築した。JGSN2016の精度は、絶対測定で約 $10 \mu\text{Gal}$ 、相対測定で約 $20 \mu\text{Gal}$ と見積もられている。それに加えて、国土地理院は稠密な全国の重力分布を把握し、水準測量に正確な正標高補正を行うために1967~1993年に水準点や主要な三角点において相対重力測定を実施してきた。この測定で得られた日本全国を網羅する約14,000点におよぶ稠密な重力データは計量機器の校正など、現在も重力の基準として広く活用されている。しかし14,000点で重力データはJGSN75に基づく重力値であることから、現在のJGSN2016に基づく測定とは必ずしも測定誤差の範囲で一致しない。国土地理院が公開するJGSN75とJGSN2016の間の乖離は最大で数 $100 \mu\text{Gal}$ に達する。

GNSSを用いた標高決定が高度化し、普及されたことに伴って、高さの基準面としてのジオイド・モデルを構築する基盤データとしてさらに重要性が増している。ジオイド・モデルの精度・信頼性を向上するためには、信頼度の高い最新の稠密な地上重力データが不可欠であるが、全国を網羅する重力測定を新たに行い、完全にJGSN2016に準拠した稠密なデータを短期間で得ることは、人的・経済的なりソースを考慮すると非常に困難である。

JGSN75重力値をJGSN2016重力値に整合させるための手法の開発を進めている。昨年度はJGSN75重力値とJGSN2016重力値の差を地殻変動に起因する測定点の上下変動、地震による質量の再配分と系の構築時に既に存在していたシステムオフセットに分けて推定することで約 $40 \mu\text{Gal}$ の精度の変換を可能とする整合手法について報告した。これまでは測定点の上下変動量を重力変化へ換算する際の重力鉛直勾配値として第一次近似としてすべての測定点において一定値（ブーゲー勾配）を使用したため、地形による重力鉛直勾配の空間変化が省略されていた。

10mDEMデータを使用する重力地形補正プログラムを開発し、それを用いて各測定点のブーゲー勾配を計算することでより精度の高い推定を実施した。また地震断層の形状を考慮した測定点上下変動量の算出やデータ同化の手法を用いたシステムオフセットの推定結果についても報告する。

キーワード：日本重力基準網2016

Keywords: Japan Gravity Standardization Net. 2016 (JGSN2016)

## Absolute gravity measurements in New Zealand (2nd report)

\*福田 洋一<sup>1</sup>、瀧口 博士<sup>2</sup>、西島 潤<sup>3</sup>、風間 卓仁<sup>1</sup>、Stagpoole Vaughan<sup>4</sup>、Gulyaev Sergei<sup>5</sup>、Natusch Tim<sup>5</sup>、Amos Matt<sup>6</sup>

\*Yoichi Fukuda<sup>1</sup>, Hiroshi Takiguchi<sup>2</sup>, Jun Nishijima<sup>3</sup>, Takahito Kazama<sup>1</sup>, Vaughan Stagpoole<sup>4</sup>, Sergei Gulyaev<sup>5</sup>, Tim Natusch<sup>5</sup>, Matt Amos<sup>6</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 情報通信研究機構電磁波計測研究所、3. 九州大学大学院工学研究院、4. GNS Science、5. Institute for Radio Astronomy and Space Research, Auckland University of Technology、6. Land Information New Zealand

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. National Institute of Information and Communications Technology, 3. Graduate School of Engineering, Kyushu University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Institute for Radio Astronomy and Space Research, Auckland University of Technology, 6. Land Information New Zealand

To enhance and extend the absolute gravity (AG) measurements in New Zealand, we had conducted AG measurements using a FG5 (#210 of Kyoto University) in January and March 2016 as reported in 2016 JpGU meeting. The measurements were made at three points in North Island and five points in South Island. To compliment the AG measurements, we also conducted relative measurements using a LaCoste & Romberg G-meter (#680) at five points from Bilham et al. (2016) in Southern Alps. Among them, two points are located near the summits and only accessible by a helicopter. Thus we could conduct a single loop measurement only, due to restricted time and weather condition in 2016.

Although we have not conducted AG measurements in 2017, relative measurements using two LaCoste & Romberg G-meters (#680 and #805) have been conducted at four points near the summits including the two points occupied in 2016, and conducted two loops of the measurements for those points. In addition to these, we conducted the measurements at most of the AG points occupied in 2016 and some additional points from Stagpoole et al. (2015) for the calibration of the scale factors of the gravimeters, and the gravity connections to the spare points near the AG points. Moreover, for planning the AG measurements in the area of 2016 Kaikoura earthquake (Mw 7.8), we conducted test measurements at a few points where huge uplifts have been observed. In this talk, we present the results in 2017, and the future observation plan particularly in the area of Kaikoura earthquake. This study was partially supported by JSPS KAKENHI Grant No. 15H05205.

キーワード：ニュージーランド、絶対重力測定、重力網、重力変化、ニュージーランド南アルプス、カイコウラ地震

Keywords: New Zealand, absolute gravity measurements, gravity network, gravity changes, NZ Southern Alps, Kaikoura earthquake

## 国立天文台水沢VLBI観測所における超伝導重力計とスプリング重力計の比較観測

### Comparison of Superconducting and Spring Gravimeters at the Mizusawa VLBI Observatory of the National Astronomical Observatory of Japan

\*三浦 哲<sup>1</sup>、金 悦希<sup>1</sup>、池田 博<sup>2</sup>、田村 良明<sup>3</sup>

\*Satoshi Miura<sup>1</sup>, Tae-Hee Kim<sup>1</sup>, Hiroshi Ikeda<sup>2</sup>, Yoshiaki Tamura<sup>3</sup>

1. 東北大学大学院理学研究科、2. 筑波大学研究基盤総合センター、3. 国立天文台水沢VLBI観測所

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Research Facility Center for Science and Technology, University of Tsukuba, 3. Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan

Continuous microgravity monitoring is utilized to gain new insights into changes in the subsurface distribution of magma and/or fluid that commonly occur beneath active volcanoes. Rather new superconducting and spring gravimeters, iGrav#003 and gPhone#136 are collocated with a superconducting gravimeter, TT#70 at the Mizusawa VLBI Observatory of the National Astronomical Observatory of Japan, since the end of September, 2016 in order to evaluate those performances before field deployment planned in 2017.

Calibration of iGrav#003 was carried out by collocation with an absolute gravimeter FG5 of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo (Okubo, 2016, personal comm.) at a Fundamental Gravity Station in Sendai in July, 2016. Based on the scale factors of iGrav#003 obtained by the calibration and of gPhone#136 provided by the manufacturer (Micro-g LaCoste, Inc.), tidal analyses are performed by means of BAYTAP-G (Tamura et al., 1991, GJI). Amplitudes and phases of each major tidal constituent mutually agree well within  $\pm 4\%$  and  $\pm 3$  degrees, respectively.

The instrumental drift rate of iGrav#003 is very low, about 5 micro-Gal/month, whereas that of gPhone#136 is very high, about 500 micro-Gal/month. The high drift rate of gPhone#136, however, is well approximated by a quadratic function at present and can be removed. The detrended time series of gPhone#136 shows good agreement with iGrav#003 time series in the overall feature: gravity fluctuations with amplitudes of about a few micro-Gal and with durations of a few days, which may be due to variations in the moisture content of the topmost unsaturated sedimentary layer and the water table height. It suggests that both instruments may capture volcanic signals associated with pressure changes in magma chambers, dike intrusion/withdrawing, and so on.

iGrav#003 will be installed in the Zao volcanological observatory of Tohoku University located at about 3 km from the summit crater, and gPhone#136 will be deployed in the Jododaira Astronomical Observatory located at about 0.5 km from Oana crater of Azumayama volcano in the spring of 2017. Both of the volcanoes, Zao and Azumayama show minor volcanic activity with frequent shallow earthquakes, changes in the total magnetic force, pressure changes at depth, and so on in 2014 and 2015.

キーワード：重力観測、超伝導重力計、スプリング重力計、比較観測

Keywords: Gravity measurement, Superconducting Gravimeter, Spring Gravimeters, Collocation

## Development of a new portable gravity gradiometer for field measurements

\*潮見 幸江<sup>1</sup>、瀬戸 海登<sup>1</sup>、木村 洋介<sup>1</sup>、薛 凱倫<sup>1</sup>、彦坂 太一<sup>1</sup>、渡邊 駿介<sup>1</sup>、山田 功<sup>1</sup>

\*Sachie Shiomi<sup>1</sup>, Kaito Seto<sup>1</sup>, Yousuke Kimura<sup>1</sup>, Kailun Xue<sup>1</sup>, Taichi Hikosaka<sup>1</sup>, Syunsuke Watanabe<sup>1</sup>, Kou Yamada<sup>1</sup>

1. 群馬大学理工学部

1. School of Science and Technology, Gunma University

Laser interferometric gravity gradiometers have been expected to be a useful tool for geophysical observation and the basic concepts have been discussed and patented since 1970s. However, they have not been practically applied to field measurements yet. This is mainly because of the technical difficulty in carrying out repeated measurements with precision sufficient for laser interferometry. To overcome the technical difficulty, a new interferometric gravity gradiometer has been developed [1]. In this gravity gradiometer, a pair of test masses located at different heights (the separation is about 70 cm) is thrown up at the same time in a vacuum tank. The differential acceleration between the test masses in free fall is measured by a Michelson interferometer. This gravity gradiometer is designed to release the test masses quickly and precisely by applying a mounting method developed for an earth orbiting free-fall experiment (Satellite Test of the Equivalence Principle) [2]. This release mechanism was found to be effective for the realisation of precise repeated measurements [1].

The first prototype of the gravity gradiometer was tentatively operated at the Sakurajima Volcanological Observatory of Kyoto University, located on the active volcanic island of Sakurajima, Kyushu Japan. From this tentative operation, it was found that the instrument was robust against seismic vibration; the resolution was  $\pm 0.3 \mu\text{Gal}/\text{m}$ , which is the same level as that operated at a quiet observation station. This result indicates that this gravity gradiometer could detect local underground activities, which are buried in seismic noise and have not been detected by previous gravimeters. However, the first prototype is heavy (weighs about 200 kg) and it was difficult to install it at the local observatory without crane equipment. We are developing a new laser-interferometric gravity-gradiometer that is designed to be portable and more practical for field measurements. In this presentation, I will report the status and prospects of the development.

### References

[1] S. Shiomi et al. (2012): Development of a Laser-interferometric Gravity-gradiometer, Journal of Geodetic Society of Japan Vol. 58, No.4, pp. 131-139.

[2] S. Shiomi (2002): Test mass metrology for tests of the Equivalence Principle, Ph.D. thesis, The University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, UK.

キーワード：重力勾配計

Keywords: gravity gradiometer

# Monte Carlo Simulation of Gravity Gradient for Observing Volcanic Activity

\*薛 凱倫<sup>1</sup>、潮見 幸江<sup>1</sup>、瀬戸 海登<sup>1</sup>、木村 洋介<sup>1</sup>、山田 功<sup>1</sup>

\*Kailun Xue<sup>1</sup>, Sachie Shiomi<sup>1</sup>, Kaito Seto<sup>1</sup>, Yousuke Kimura<sup>1</sup>, Kou Yamada<sup>1</sup>

1. 群馬大学理工学部

1. Division of Mechanical Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Gunma University

Attempts to detect mass distribution changes, associated with volcanic activity, by measuring gravitational fields have been done since the 1920s in Japan. Measurement was done by using the gravity-variometer, such as the torsion balance on the Sakurajima volcano. In the early 1990s, Absolute Gravimeter (FG 5) of Micro-g LaCoste Company, which is simple to use and lightweight, became popular in field measurements. The absolute gravimeter has a resolution of  $10^{-8}$  m/s<sup>2</sup> level when used at a quite observation station. When observing volcanic activity with an absolute gravimeter, it is possible to estimate the height of the magma head from gravity change. However, the absolute gravimeter is sensitive to environmental disturbances, and the error is thought to mislead the height of magma head by several hundred meters.

The instrument we are developing is a new gravity gradiometer. The gravity gradiometer can measure vertical gravity gradients with a resolution of  $10^{-9}$  1/s<sup>2</sup> level at an observation station with seismic vibration. In this gravity gradiometer, two test bodies are thrown upward at different heights in a vacuum tank at the same time, and the difference between the free fall acceleration of the two test bodies is obtained by a Michelson interferometer. Gravity is proportional to  $1/r^2$  and the gravity gradient in the vertical direction is proportional to  $1/r^3$ , where  $r$  is the distance between the gravitational source and the instrument. Therefore, the gravity gradiometer has a better sensitivity to nearby gravity sources, and is suitable for observation of the environmental disturbances, such as rainfall and groundwater fluctuation. Simultaneous observation of the absolute gravimeter and gravity gradiometer at the same observation station could allow us to estimate the displacement of the magma head more accurately.

Assuming a simple volcano model, we have calculated the gravity change by Monte Carlo simulation for Mt. Asama and Sakurajima volcanos, and examined the usefulness of the simultaneous observation of the absolute gravimeter and gravity gradiometer. In this presentation, I will report the results of the simulation and discuss the optimum observation station for the absolute gravimeter and gravity gradiometer.

キーワード：重力勾配、火山

Keywords: gravity gradient, volcano

## アラスカ南東部のiGrav-003超伝導重力計で観測された陸水重力変化の物理的モデリング

### Physical modeling of hydrological gravity changes observed by the iGrav-003 superconducting gravimeter in Southeast Alaska

横山 智也<sup>1</sup>、\*風間 卓仁<sup>1</sup>、三浦 哲<sup>2</sup>、金 悦希<sup>2</sup>、田村 良明<sup>3</sup>

Tomoya Yokoyama<sup>1</sup>, \*Takahito Kazama<sup>1</sup>, Satoshi Miura<sup>2</sup>, Tae-Hee Kim<sup>2</sup>, Yoshiaki Tamura<sup>3</sup>

1. 京大理、2. 東北大理・地震噴火予知研究観測センター、3. 国立天文台水沢

1. Kyoto University, 2. Tohoku University, 3. NAO Mizusawa

アラスカ南東部では氷河融解に伴い年間最大3センチの地殻隆起が観測されている (Larsen et al., JGR, 2007)。この地殻隆起は「過去の氷河融解に伴う粘弾性変形」と「現代の氷河融解に伴う弾性変形」を含んでおり、地殻変動と同時に地上重力変化を観測することで両者を分離することができる (Wahr et al., GRL, 1995)。しかしながら、地上重力データには土壌水浸透・地下水流動といった陸水変動の影響が含まれており、氷河融解に伴う重力変化を正しく理解するにはこれら陸水変動に伴う重力擾乱を適切に補正する必要がある。この際、重力観測点のごく近傍の水質量分布が重力擾乱に大きく寄与するので、重力観測点周辺の水質量収支を現実的にモデル化することが最も重要である。

そこで本研究は、アラスカ南東部・ジュノーの重力観測点EGAN周辺のローカルな陸水収支、およびそれに伴う重力変化を物理モデルによって再現し、EGANの超伝導重力計iGrav (シリアル番号: 003) で観測された陸水重力擾乱と比較した。具体的には、まず陸水流動解析ソフトウェアG-WATER [3D] (Kazama et al., JGR, 2015) を用いてEGAN周辺における土壌水および地下水の時空間変化を計算し、それを空間積分することで重力変化 $g_1(t)$ を見積もった。次に、EGANに隣接するオーク湖の水位データを用い、湖水位変化に伴う万有引力変化 $g_2(t)$ を見積もった。さらに、観測点EGANの建物の屋根に雪が積もることを考慮し、EGANの建物形状と隣の積雪データから積雪変化に伴う万有引力変化 $g_3(t)$ を計算した。最後に、これらの重力変化を $g_{cal}(t) = g_1(t) + g_2(t) + g_3(t)$ として足し合わせ、実際に観測された超伝導重力変化 $g_{obs}(t)$ と比較した。

計算された $g_1(t)$ ,  $g_2(t)$ ,  $g_3(t)$ の振幅 (peak to peak) はそれぞれ約4, 1, 1マイクロガルで、土壌水・地下水の寄与が最も大きくなった。特に、2012年9月~12月の100日間について $g_{obs}(t)$ と $g_{cal}(t)$ を比較すると、降水に伴う重力の急激な上昇、および土壌水浸透・地下水流動に伴う緩やかな重力減少のパターンが良く一致した。しかしながら、G-WATERにおいて土壌の飽和透水係数に $10^{-8}$  m/sオーダーの低い値を設定すると、この期間の $g_{cal}(t)$ の振幅は $g_{obs}(t)$ の30%程度に小さくなることが分かった。これは、透水係数を小さくすると土壌の毛細管効果が強く作用することで、非降水時の土壌含水率が大きくなる反面、降水時に水の浸透できる空隙が少なくなるためと考えられる。そこで本研究は、透水係数をはじめとした土壌パラメーター群を6セット準備し、各土壌パラメーター群に対して $g_1(t)$ および $g_{cal}(t)$ を計算した。その結果、透水係数 $1.5 \times 10^{-6}$  m/sの土壌を仮定した際に振幅比 $g_{cal}(t)/g_{obs}(t)$ が55%と最も大きくなることが分かった。この透水係数の値は、EGAN周辺の土壌が氷河堆積物のglacier siltで覆われていることと整合的である。

このように、本研究は土壌水・地下水・湖水・積雪の局所分布に伴う重力変化を計算し、実際に観測された重力変化を55%の振幅で再現した。 $g_{cal}(t)$ が $g_{obs}(t)$ に比べて依然として45%離れているのは、土壌パラメーターの空間不均質や広域の陸水変動が効いている可能性がある。これらを解決するには、土壌パラメーターの実測や、広域陸水モデル (GLDAS, WaterGAP等) を用いた重力変化の見積もりが必要と考えられる。

キーワード: 陸水重力変化、超伝導重力計、iGrav、氷河、土壌水、地下水

Keywords: hydrological gravity change, superconducting gravimeter, iGrav, glacier, soil water, groundwater





# Constraining the focal mechanism of the 2015 Gorkha earthquake by using the continuous gravity observations

\*Ying Jiang<sup>1</sup>, Ziwei Liu<sup>1</sup>, Xiaotong Zhang<sup>1</sup>, Hui Li<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration

The amplitudes of the Earth's free oscillations have a close relationship to earthquake focal mechanisms. Focal mechanisms of large earthquakes can be well analyzed and constrained with observations of long period free oscillations. On 25 April 2015, a magnitude Ms 8.1 interplate thrust earthquake ruptured a densely instrumented region of Gorkha. After Earthquake, the focal mechanism solutions of Gorkha earthquake were provided by well-respected international earthquake research institutions based on different data and methods, which were different. We compared free oscillations observed by 18 spring gravimeters of continuous gravity stations with synthetic normal modes corresponding to 3 different focal mechanisms for the Gorkha earthquake, and the focal mechanisms solutions of Gorkha earthquake were analyzed and constrained by spherical normal modes in a 2 to 5 mHz frequency band. Based on the best focal mechanisms solution, the accurate magnitude was searched. The results show that the focal mechanism of Gorkha earthquake can be estimated by spherical modes in the 2 to 5 mHz frequency band. The synthetic modes corresponding to the focal mechanism determined by the Gcmt Moment Tensor Solution showed agreement to the observed modes, the average of misfit factors  $F$  was 0.03, and the average of scaling factors was 1.04, which was closest to 1, suggesting that earthquake magnitudes predicted in this way can reflect the total energy released by the earthquake. Based on the focal mechanisms solution provided by Gcmt, keeping the strike, dip, slip, depth constant, adjusting the scalar moment, the real scalar moment was searched. When the average of scaling factors was 1, the average of misfit factors  $F$  was only 0.03. After calculation, the scalar moment of Gorkha earthquake was  $8.09 \times 10^{20}$  Nm, and the corresponding magnitude was Mw7.91.

Keywords: Gorkha earthquake, Focal mechanism solutions, Earth's free oscillations, Gravimeter observations