

## ニュージーランドでの絶対重力測定

## Absolute gravity measurements in New Zealand

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

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

1.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室、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 地球資源システム工学部門、4.Institute for Radio Astronomy and Space Research, Auckland University of Technology、5.Land Information New Zealand

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, 3.Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, 4.Institute for Radio Astronomy and Space Research, Auckland University of Technology, 5.Land Information New Zealand

度量衡の基準である長さや時間の測定に基づく絶対重力測定は、長期安定なモニタリングが必要な問題にとって最適な手法であるが、絶対重力計を保有している国は、世界的にはまだ限られている。ニュージーランド(NZ)も絶対重力計を保有しておらず、これまでに実施された測定はすべて国外の研究機関によるものである。この内、1995年のNZで初の絶対重力測定を含め、これまでに実施された測定の多くは、米国やフランスが南極での絶対重力測定のため、マクマード基地に向かう中継点としてクライストチャーチに立ち寄った際に実施したものである。それ以外の特筆すべき測定は、2000年に米コロラド大学とオタゴ大学が共同で、NZ南アルプスで行ったものである。NZの南アルプスは、太平洋プレートとオーストラリアプレートの境界にあたるアルパイン断層の南東側に位置し、トランスフォーム断層沿いの大規模な隆起によって形成されていることから、GPSと共に実施されたこの観測は、その形成メカニズム解明を目的としたものである。

その後、NZでの絶対重力測定は、クライストチャーチで何度か実施されたのみで、北島での測定は全く行われていなかった。しかし、2015年2月に、Geological and Nuclear Science (GNS)とLand Information New Zealand(LINZ)がGeoscience Australia(GA)の協力を得て、南島の絶対重力点3点に加え、北島で新たに重力点5点を設置し、GAのFG5-237を用いた測定を実施した(Stagpoole et al., 2015)。また、南アルプスについても、2014年12月~2015年1月に、コロラド大とオタゴ大が共同で、FG5-111による15年ぶりの測定を実施している(Bilham et al., submitted)。

本研究は、当初、長らく行われていなかった絶対重力測定による南アルプスでのテクトニクス研究や、ワークワースのVLBI観測局での測定によるGlobal Geodetic Observing System (GGOS)への貢献も含め、NZでの絶対重力基準点網の拡充などを主な目的として、2013年度のNZとの2国間共同研究として計画したものである。しかし、2013年度、2014年度と2国間共同研究としては採択されず、昨年、4カ年(2015年~2018年度)の科研費海外学術調査としてようやく採択された。上述のとおり、最近になってNZで新たな絶対重力測定が実施されているが、まだ、十分なデータが得られているとは言えず、南アルプスの測定点を含め、絶対重力測定の重要性は変わっていない。また、NZ側からも繰り返し絶対重力測定の実施を要望されており、今後、NZ側の研究者と協力しながら、当初計画どおり研究を進める予定である。以下では、この内、2016年1月~3月に実施したNZでの絶対重力測定の概要について述べる。

本研究で使用した絶対重力計は、京都大学所属のFG5-210で、2015年12月中旬に日本から発送、2015年12月末までにNZでの通関手続きを経て、2016年1月11日にオークランド工科大学(AUT)のワークワースVLBI観測局内の重力点に配送された。NZ国内での測定は、輸送中のトラブル等への対応も考慮して、1月と3月の2回に分けて計画した。1月の測定では、11日に重力計が到着後、落下槽の真空引きや調整作業を行い、16日まで測定を行った。この間、幾つかトラブルもあったが、33 set (3300 drop)の良好な測定値を得ることができた。今回得られた重力値(暫定値)は、昨年のGAによる測定値に比べ、+2.80 $\mu$ galであった。この後、重力計は落下槽の真空を保持した状態で保管しており、3月の測定では、ワークワースでの再測定の後、北島での測定を行いながら、ウェリントン経由で南島に移動し、クライストチャーチや南アルプス周辺地域での測定を予定している。

本講演では、これらの測定結果や今後の計画の概要について報告する。

謝辞：本研究はJSPS科研費(15H05205)の助成を受けて実施したものである。コロラド大のRoger Bilham教授、オタゴ大のChristopher Pearson博士、GNSのVaughan Stagpoole博士には、測定に関する資料の提供や貴重な助言を頂いた。記して謝意を表す。

キーワード：絶対重力測定、南アルプス、重力変化、絶対重力基準システム

Keywords: absolute gravity measurements, Southern Alps, gravity changes, absolute gravity reference system

## 桜島有村における相対重力連続観測：傾斜および重力データの擾乱補正

## Continuous relative gravity observation at Sakurajima Volcano: Disturbance corrections of tilt and gravity time series

\*風間 卓仁<sup>1</sup>、栗原 剛志<sup>1</sup>、山本 圭吾<sup>2</sup>、井口 正人<sup>2</sup>、大久保 修平<sup>3</sup>\*Takahito Kazama<sup>1</sup>, Tsuyoshi Kurihara<sup>1</sup>, Keigo Yamamoto<sup>2</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>, Shuhei Okubo<sup>3</sup>

1.京都大学理学研究科、2.京都大学防災研究所、3.東京大学地震研究所

1.Kyoto University, 2.DPRI, Kyoto University, 3.ERI, University of Tokyo

重力観測は火山内部の質量移動をモニターするのに有効な手法の1つである。これまで火山地域では、可搬型相対重力計を用いたキャンペーン観測(e.g., Furuya et al., 2003)や、絶対重力計を用いた連続観測(e.g., Kazama et al., 2015)が行われ、これらの観測によって火山活動に伴う重力変化が検出されてきた。しかしながら、観測レートや観測精度の問題から、これらの方法で検出された重力変化は主に周期1日以上の上長周期成分であり、周期1日未満の重力変化が検出された例は少ない(e.g., Okubo et al., 2013)。他の測地学的観測によると、火山内部では秒スケールから年スケールに渡る広帯域な変動が起きていることが知られている(e.g., Iguchi et al., 2008; Hotta et al., 2016)ので、短周期の重力変化を捉えることで火山内部の質量移動に関して新たな知見が得られるものと期待される。

そこで我々は、活発な火山活動を続ける桜島火山において、Scintrex CG-3M型相対重力計を用いた1分間隔の重力連続観測を開始した。重力計は有村観測坑道の局舎内に2010年に設置され、2016年1月現在も観測を継続している。この重力計は重力値とともに器械の傾斜量を同時に観測していて、傾斜に伴う重力の見かけ変化を自動で補正している。また、重力変化とともに器械傾斜量(2成分)を毎分出力するので、大規模な火山活動時には重力変化と傾斜変化の両方を把握することができる。本研究では、火山活動に伴う重力および傾斜変動を把握するため、これらの観測データに含まれる火山活動以外の擾乱を以下のように補正した。(なお、本発表では観測データの擾乱補正にのみ言及し、火山活動に伴う重力・傾斜変化については「活動的火山」セッションにて講演する予定である。)

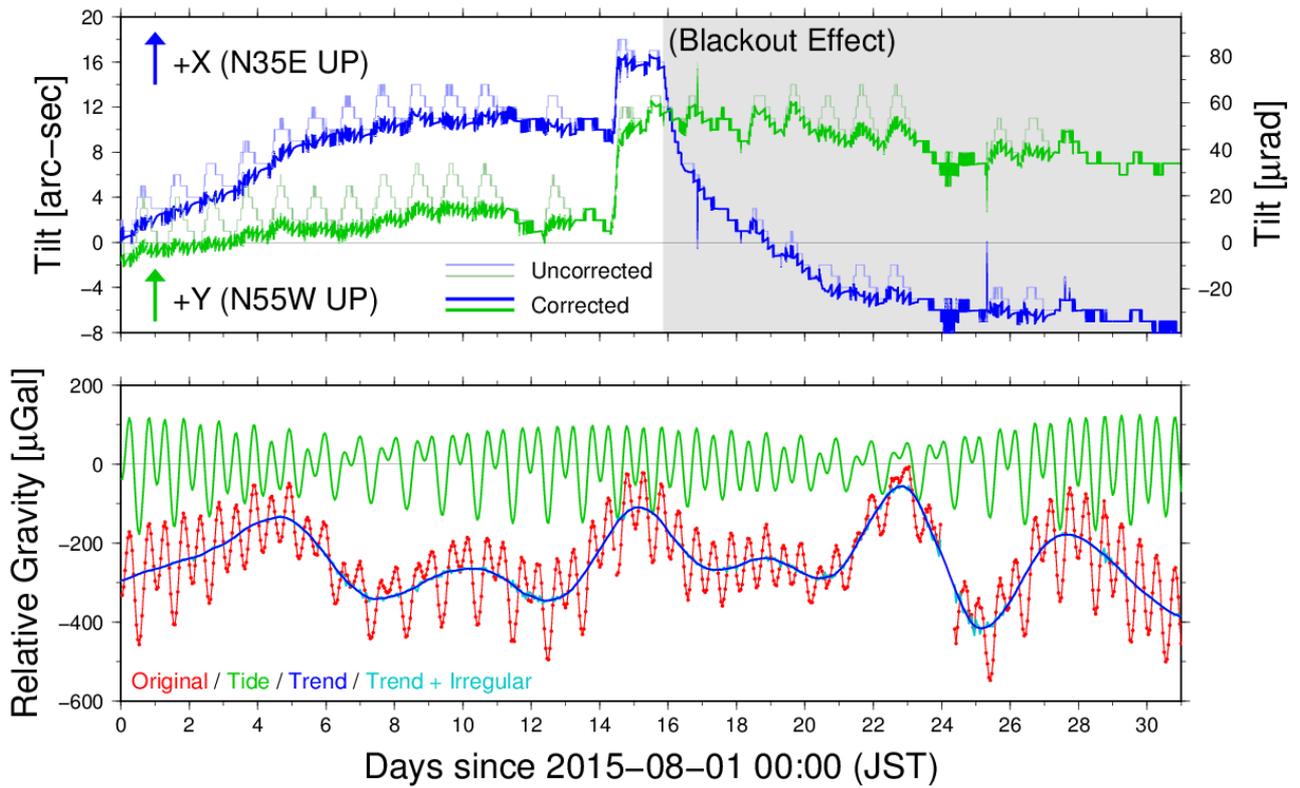
【重力データに含まれる器械ドリフト・潮汐成分の補正】CG-3M型相対重力計では、300 micro-Gal/dayを超える大きな器械ドリフト(見かけの重力変化)が観測される。本研究では、長周期の器械ドリフトを補正するために、重力観測データの2日平均値から3次のスプライン曲線を求め、このスプライン曲線から得られる長期変動を重力観測データから差し引いた。また、周期1日以下の重力変化には最大約300 micro-Galの潮汐変動も含まれているので、本研究ではBAYTAP-G (Tamura et al., 1991)を用いて潮汐の効果を補正した。添付図下側の赤線はスプライン補正後の重力変化、青線はさらに潮汐を補正した後の重力変化である。青線には周期数日未満の周期的成分と、火山活動等に伴う非周期的重力変化が含まれている。

【傾斜データに含まれる日照効果の補正】晴天日には局舎が傾斜し、それに伴って重力計も日周期的に傾斜する。そこで本研究では、日照時間の長かった2015年8月1日~11日の傾斜データから日照に伴う日周変動を抽出した。その後、日照時間に応じて傾斜の日周変動を差し引くことで、傾斜データに含まれる日照の寄与を補正した。添付図上側の薄線は日照補正前、濃線は日照補正後の傾斜変動である。日照補正後のデータには日周期的な変動が取り除かれているだけでなく、2015年8月15日の火山活動に伴う大きな傾斜変化が確認できる。なお、2015年8月16日午後8時ごろに停電が発生して空調が止まったため、これ以降の傾斜変動には室温変化の影響が含まれていると考えられる。

キーワード：相対重力、重力変化、傾斜変化、桜島火山、器械ドリフト、潮汐

Keywords: relative gravity, gravity change, tilt change, Sakurajima Volcano, instrumental drift, tide

## Scintrex CG-3M Gravimeter at Arimura



## 御嶽山における重力観測（キャンペーン絶対及び連続相対）

Gravity observations around the Ontake Volcano (Campaigned absolute and Continuous relative)

\*田中 俊行<sup>1</sup>、本多 亮<sup>1</sup>

\*Toshiyuki Tanaka<sup>1</sup>, Ryo Honda<sup>1</sup>

1.公益財団法人地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

東濃地震科学研究所は2004年より御嶽山山頂から南東約10km周辺で絶対重力測定を継続してきた。当初は群発地震域起源の重力変化検出が目的だったため、山頂直下の質量変化検出に適した観測ではなかった。しかし、2014年の噴火を受けて、観測拠点を山頂に近づけるとともに、ハイブリッド観測や相対重力計連続観測を開始した。現時点では火山活動由来の明瞭なシグナルを検出できていないが、数日間の累積降水量と絶対重力キャンペーン観測値との関係、高地における大気補正、など火山活動の重力モニタリングにおいて重要な知見を蓄積しつつある。これらを踏まえ、講演では、バネ式相対重力連続観測と絶対重力キャンペーン観測という、機動力重視の観測手法の高度化についての試みを紹介する。

謝辞：本研究は宮城洋介氏（防災科研）、名大地震火山研究センターの皆様（古本宗充、鷲谷威、奥田隆、堀川信一郎の各氏）に観測協力を頂いた。三岳教育事務所、御岳ゴルフ&リゾートホテル、株式会社御嶽リゾートの皆様には、観測点の便宜を図って頂いた。

キーワード：重力測定、降水量、大気補正、火山

Keywords: gravity measurement, Precipitation, atmospheric correction, volcano

## 超伝導重力計で観測された苫小牧周辺海域の長周期海面振動

Sea level oscillations observed with an iGrav SG at Tomakomai, Hokkaido, Japan

\*名和 一成<sup>1</sup>、杉原 光彦<sup>1</sup>、西 祐司<sup>1</sup>、池田 博<sup>2</sup>\*Kazunari Nawa<sup>1</sup>, Mituhiko Sugihara<sup>1</sup>, Yuji Nishi<sup>1</sup>, Hiroshi Ikeda<sup>2</sup>

1.産業技術総合研究所、2.筑波大学

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.University of Tsukuba

A superconducting gravimeter installed near the coast may detect gravity effects induced by sea level variation. For example, Nawa et al. (2003) show the relationship between sea level variation and gravity variation from a superconducting gravimeter installed at Syowa Station, Antarctica. These effects are interpreted to be due to loading and attraction by seawater in Lutzow-Holm Bay around the station (Nawa et al., 2007). We tried to extract gravity changes induced by sea level variation from the gravity data acquired by an iGrav superconducting gravimeter newly installed at Tomakomai, Japan (Sugihara et al., 2015). As a result, at the period of passing low pressure in the vicinity of Hokkaido (e.g. several days in April and December 2015), we could detect signals corresponding to the sea level oscillations of the period 74 minutes.

## Acknowledgement

This SG observation is supported by Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan CCS, and the Tomakomai local government. We thank Hokkaido regional development bureau for providing sea level data of the Tomakomai port.

## References

- Nawa, K., N. Suda, S. Aoki, K. Shibuya, T. Sato, and Y. Fukao (2003) Sea level variation in seismic normal mode band observed with on-ice GPS and on-land SG at Syowa Station, Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (7), 1402, doi:10.1029/2003GL016919.
- Nawa, K., Suda, N., Satake, K., Fujii, Y., Sato, T., Doi, K., Kanao, M., Shibuya, K. (2007) Loading and Gravitational Effects of the 2004 Indian Ocean Tsunami at Syowa Station, Antarctica, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97(1A), S271-S278.
- Sugihara, M., H. Ikeda, K. Nawa, T. Ishido, and Y. Nishi (2015) Field test of a portable superconducting gravimeter observation system at the Tomakomai CCS site, Japan, 124<sup>th</sup> Meeting of the Geodetic Society of Japan, 38.

キーワード：SG、ノイズ、セイシュ、大気圧

Keywords: superconducting gravimeter, noise, seiche, atmospheric pressure

## 石垣島における超伝導重力計観測に及ぼす地下水の影響

## Effect of underground water on superconducting gravimeter observation at Ishigakijima

\*今西 祐一<sup>1</sup>、名和 一成<sup>2</sup>、田村 良明<sup>3</sup>、池田 博<sup>4</sup>、宮地 竹史<sup>3</sup>

\*Yuichi Imanishi<sup>1</sup>, Kazunari Nawa<sup>2</sup>, Yoshiaki Tamura<sup>3</sup>, Hiroshi Ikeda<sup>4</sup>, Takeshi Miyaji<sup>3</sup>

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  
1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.AIST, 3.NAOJ, 4.University of Tsukuba

石垣島における超伝導重力計観測は、地下で発生するスロースリップに関係した信号をとらえることを目的として、2012年に開始された。しかし、地下水と海洋の及ぼす影響、およびそれら相互の関係をモデリングすることが困難で、陸水擾乱と地下深部起源の信号との分離がうまくできていなかった。たまたま2015年は降水量が少なく、ダム水位データなどから見て地下水量が減少したと考えられる時期があった。そこに台風が来たとき、海洋の潮位変化と地下水位の関係を直接的に示すような重力変化が明瞭に観測された。一方、土壌水分計のデータからは、地表付近の土壌水はそれとは独立した挙動を示すこともわかった。これらの観察事実をもとに海洋、地下水、大気、重力の関係を表すモデルを展開し、重力に及ぼす地下水の影響について発表する予定である。

ダム観測データを提供していただいた沖縄県名蔵ダム管理所に感謝します。本研究はJSPS科研費26289350の助成を受けたものです。

キーワード：超伝導重力計、石垣島、地下水

Keywords: superconducting gravimeter, Ishigakijima, underground water

## 重力観測データの独立成分分析解析とその応用

## Independent Component Analysis application to the gravity observation data

\*板倉 統<sup>1</sup>、福田 洋一<sup>1</sup>、風間 卓仁<sup>1</sup>、WAHYUDI Eko januari<sup>2</sup>

\*Matomu Itakura<sup>1</sup>, Yoichi Fukuda<sup>1</sup>, Takahito Kazama<sup>1</sup>, Eko januari WAHYUDI<sup>2</sup>

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

ICA(Independent Component Analysis: 独立成分分析)は、非ガウス分布で互いに無相関の線形混合シグナルを分離する多変量解析手法である。重力観測データは、質量変化と観測点との距離の違いによってシグナルが混合しているデータであるため、ICAが適用可能であると考えられる。

測地学分野ではICAの衛星重力観測データへの適用例 (Guo et al., 2014, Forootan et al., 2011など)や幾つかの応用研究があるが、今後は地上重力観測データへの適用も期待される。我々は、3台のgPhone重力計データへの適用を試み、PCA(Principle Component Analysis: 主成分分析)よりも良好に観測シグナル(気圧、傾斜)が分離できることを報告した(2015 JPGU)。しかしながら、ICAは統計的手法であり、分析結果が有意な地球物理学的現象を示しているとは限らない。そのため、ICAが適用できる条件を予め整理する必要がある。

そこで本研究では、地上で観測されうる1年間の時系列重力シグナルを擬似的に作成し、任意の比率と観測点数で混合したデータにICAを適用し、その結果と元データとの比較を繰り返すことで、ICAがどのような場合に有効であるかの評価を行った。ここで使用したICAは、広く用いられているfastICA(A. Hyvarinen et. al, 2000)と呼ばれるアルゴリズムである。なお、本研究ではトレンド成分も分離できるように混合データに対して前処理を行った。

地上で観測されうる時系列重力シグナルは、ランダムノイズ、ランダムウォーク、地下水位変動、周期変動、長期変動に分類できると仮定し、それぞれ以下に述べる方法でシミュレーションデータを作成した。ランダムノイズは観測点や重力計に固有のノイズを想定し、各観測点にそれぞれ別々に作成したデータを使用した。ランダムウォークとしては、例えば気圧変動などを想定している。地下水位変動は、降雨によって瞬間的に増加したのち指数関数的に減少する変動を想定し、ランダムな降雨に指数関数の重みをかけ積算したものをを用いた。周期変動は潮汐補正によっても除ききれなかった潮汐変動を想定し、日・月・年の周期と半周期の三角関数を使用した。長期変動は、広域の地下水量や地熱貯留量などの変化を想定し、10年周期の三角関数の $2\pi/100$ ずつ位相を変えたものを使用した。

これらのデータは、予め分散を1に正規化した上で、任意の比率(0~30)を掛けて混合を行った。また、観測点数も任意の数(2~10)とすることで、観測点数と成分数の違いによるICAの分離精度の評価も同時に行った。ICAの分離精度は、元シグナルとICAによる成分との相関係数によって、混合比率と成分の種類、観測点数について評価を行った。

これらの結果、周期変動シグナル同士あるいは長期変動と周期変動シグナルからなる混合データは、混合比率によらずトレンド成分も含めて元のシグナルへの分離ができた。一方で、地下水位変動と長期変動・周期変動シグナルの混合データの場合、地下水位変動の振幅がその他のシグナルの振幅よりも概ね一桁以上大きい場合に、良好な分離結果を得られなかった。しかしながら、これらの定量的な評価にはまだ課題があり、特にノイズを含んだ場合などでの、分離の良否を定量的に評価する方法の導入が必要である。今後、評価方法を改善した上で、ICAの適用条件について更に精査し、より具体的な応用についての検討を行う予定である。

キーワード：重力、独立成分分析

Keywords: Gravity, Independent Component Analysis

## GRACE衛星で見た巨大地震に伴う重力勾配の変化

## Gravitational gradient changes of mega-thrust earthquakes observed by GRACE

\*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

The earthquakes change the gravity, which means the gravitational gradient is also changed. Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) have been providing insight into the gravity changes by earthquakes and the data can also be used to reveal the gravitational gradient changes. For example, Wang et al. [2012] reported gravitational gradient changes following the 2004 Sumatra-Andaman earthquake on the GRACE CSR RL04 data. In this presentation, I will introduce the co- and postseismic gravitational gradient changes by four huge earthquakes, i.e., the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, the 2010 Maule earthquake, the 2011 Tohoku-Oki earthquake, and the 2012 Indian Sea earthquake observed by GRACE, comparing to the gravity changes and the gravitational gradient changes of the Tohoku-Oki earthquake observed by GOCE.

## 衛星重力計測に基づくアジア高山域の氷河質量収支の再推定

## Revisiting estimates of glacier mass balance in Asian High Mountains from satellite gravimetry

\*松尾 功二<sup>1</sup>、日置 幸介<sup>2</sup>\*Koji Matsuo<sup>1</sup>, Kosuke Heki<sup>2</sup>

1.国土地理院、2.北海道大学

1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.Hokkaido University

重力観測衛星GRACEの登場により、アジア高山域が有する広大な山岳氷河群の質量収支を、遠隔から連続的に計測できるようになった。Matsuo & Heki (*EPSL*, 2010)は、GRACEデータからアジア高山域の氷河質量収支を初めて推定し、2003-2009年の年平均として約-470億トンの質量減少率を導いた。一方、Jacob et al. (*Nature*, 2012)は、同じくGRACEに基づく解析から、2003-2010年の年平均として約-110億トンの質量減少率を導いた。両者の推定結果は大きく異なるが、松尾・日置 (雪氷, 2014)によると、その原因は、氷河域に近接するインド北部の灌漑に伴う地下水変動の影響と、解析期間の違いによる氷河質量の年々変動の影響、に帰することができる。すなわち、アジア高山域の氷河質量収支の正確な把握には、地下水変動シグナルの分離と、可能な限り長期間のGRACEデータの活用が、解決すべき課題であると言える。

そこで本研究では、新たなデータと解析手法を導入し、アジア高山域の氷河質量収支の再推定を行った。地下水変動シグナルの分離を図るために、二つの方法を試してみた。一つは、陸水モデルWaterGAP (Doll et al., *WRR* 2014)を用いた地下水変動の補正である。もう一つは、スレピアン関数を用いた空間局在化処理(Wieczorek & Simons, *GJI* 2005)の適用である。Matsuo & Heki (2010)と比較するべく、2003-2009年の期間に対し上記の解析を行ったところ、地下水補正モデルを適用した場合は年平均約-307億トン、空間局在化処理を適用した場合は年平均約-343億トン、両方を適用した場合は年平均約-340億トン、という結果が得られた。続いてデータ期間を伸ばし、2002-2015年の期間に対し同様の解析を行った。ただし、WaterGAPモデルは2009年12月までしか利用できないため、空間局在化処理のみを適用した。その結果、氷河質量減少率として年平均約-238億トンを得た。

以上の結果から、先行研究では、地下水変動の寄与と氷河年々変動の影響が、かなり含まれていたことが示唆される。また、2002-2015年の当地域の氷河質量減少率は、1961-2003年のフィールド調査の結果(約-307億トン: Dyrgerov & Meier, 2005)と比べて僅かに小さいことから、当地域の氷河では世界の氷河で見られるような加速的な縮退傾向は見られないことが明らかになった。

キーワード：宇宙測地学、氷河、気候変動、GRACE、重力

Keywords: Space geodesy, Glacier, Climate change, GRACE, Gravity

## 過去の稠密重力データの日本重力基準網2013への整合手法の検討

Investigation of method that makes Japanese old and dense gravity data consistent with Japan gravity standardization net 2013

\*宮崎 隆幸<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「日本重力基準網2013 (JGSN2013)」を構築した。JGSN2013の精度は、網平均計算の残差と一個抜き交差検定による評価から約10 $\mu$ Galとも見積もられており、従来の日本重力基準網1975 (JGSN1975) と比べて1桁程度高い精度の重力基準が実現された。国土地理院は、重力基準の構築に用いた測定に加えて、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、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、JGSN75に準拠しており、計測機器の校正など、重力の基準として活用されている。

1976年に公表されたJGSN75に基づく重力値であることから、現在のJGSN2013に基づく測定とは、測定誤差の範囲では必ずしも一致しない。この乖離は、測定が測定方法や基準系の違いによって重力成果値を算出する際に系統的な差を生じることや、地殻変動や地下水くみ上げ等によって観測点の地盤が上下変位することなどに起因して生じる。国土地理院が公開するJGSN75とJGSN2013の間の乖離は最大で数100 $\mu$ Galに達する。

GNSSを用いた標高決定が高度化され、普及したことに伴って、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って、JGSN2013に準拠した稠密なデータを数年間で得ることは、人的・経済的なリソースを考慮すると非常に困難である。

JGSN75重力値をJGSN2013重力値に整合させるための手法の開発を実施している。本研究では二つの基準系間の重力値の乖離は①JGSN75の構築当初から含まれていた重力成果値の不確かさ ②JGSN75重力観測時から現在に至るまでに重力観測点を受けた地殻変動の影響 のふたつの要因で説明可能であると考えた。このうち②については過去の水準測量・GNSS連続観測（電子基準点データ）を用いて重力観測点の上下変位に伴う重力値の変化を推定し、地震断層モデルを用いて地震時の一時的な重力変化とマンツルの粘弾性緩和に伴う地震後の長期的な重力変化を計算することで推定できる。ふたつの重力基準系間の重力値の乖離のデータからこの地殻変動の影響を差し引くことで①のJGSN75が含んでいる誤差が明らかになり、その分布の特徴に即した手法によって空間補間を実施することでふたつの基準系の変換を実現する。

キーワード：日本重力基準網2013

Keywords: Japan gravity standardization net 2013

A mathematical simulation of the dynamics of local Earth gravity direction referring to the Earth surface normal

\*Wei-Jun Chen<sup>1</sup>

1. Carl Zeiss AG

Based on the development of measurement and information technology, geodetic measurements are continually reported with high quality. ITRF2008 [1] claims a believed origin accuracy at the level of 1 cm over the time-span of 26 year of SLR observations, and further 1.2 ppb (8 mm) accuracy is achieved by integrating other three techniques together: GNSS/GPS, VLBI and DORIS. With latest technical improvements, even better accuracy could be expected in the new solution of ITRF2014 [2]. It is often expected, that geodetic measurements with high accuracy should be helpful in understanding the geo-physical principle of Earthquake. Therefore many comparative analyses have been carried out aiming at constructing a correlation between recorded giant earthquakes and the temporal variations of some geodetic measurements. The conclusions from these analyses are generally frustrating, that the observed discrepancies of measurements, e.g., Earth gravity changes, ``reflect the difference in the geodynamical settings of the studied earthquakes'' [3]. Such a frustration often leads to the widespread argument that predicting Earthquake is impossible. The gap between the plausible achievements in geodetic measurement and the frustrating conclusions by using them for interpreting earthquakes, could be explained by the *Nyquist-Shannon* sampling theorem: to detect a single event without prior knowledge, its temporal-spatial domain should be sampled with an adequate frequency. In geo-science the situation is far from being satisfied. Normally an earthquake is a local event which accidentally happens at a particular time moment covering a close neighborhood of its epicenter. Densely sampling the dynamical behaviors on Earth is often a suffering task because of two factors: 1) the scale, and 2) the system reference. A typical velocity of plate tectonic movements which varies from 1-10 cm/year is indistinguishable from random noise in most of daily observations; The system reference of geodetic observation is often set either as man-made satellites, or as natural space objects like lunar or extragalactic reference, which are neither convenient nor flexible for local and dense geo-observations. This paper suggests a new geo-observation in which the reference system is set as the local geometry of the Earth's surface. There are two distinct vectors existing on Earth's surface: the surface normal, which is defined as a geometric descriptor, and the direction of the Earth's gravity force, which is defined as the gradient of the Earth's gravitational potential pointing to the Earth mass center. It is expected to get information of the mass distribution below the Earth's crust layer. A mathematical simulation is carried out with typical Earth parameters; A conceptual measurement model is described to measure the subtle angular difference between the above two vectors, where the angular difference is converted to a spatial distance according a dedicatedly designed system. Laser interferometer together with an ultra-high precision camera system provides a sub-nanometer measurement accuracy, which in principle could be measured over time span of hours, even minutes. Without systematic ambiguities like un-modelled forces in space, signal delay in ionosphere, the suggested concept physically is promising for a complementary geo-measurement besides the current mainstream techniques.

References:

- [1] Z. Altamimi, et al.: ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(08):457-473, 2011;
- [2] ITRF solution 2014, [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2014/);
- [3] V. O. Mikhailov et al.: Comparative study of temporal variations in the earth's gravity field

using GRACE gravity models in the regions of three recent giant earthquakes. *Physics of the Solid Earth*, 50(02):177-191, 2014.

Keywords: Earth gravity direction, Earth surface normal, Geodetic measurement

光格子時計を用いた重力ポテンシャル計測の測地学・地震学・火山学への応用の可能性  
Gravity potential measurement using optical lattice clocks and its applications to  
geodesy, seismology and volcanology in the future

\*田中 愛幸<sup>1</sup>

\*Yoshiyuki Tanaka<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

一般相対論に基づいて、周波数のずれから重力ポテンシャル差を直接計測することのできる光格子時計が開発され、その相対精度が、数時間で $10^{-18}$ （高さに直すと1 cmに相当）のオーダーに達しようとしている。光格子時計を用いた相対論的測地学により計測された地表の重力ポテンシャル差を他の測地データと組み合わせることで、高さの基準となる静的なジオイドモデルの精度が向上することが期待されている。しかしながら、安定な大陸地域と比べて地殻変動の活発な日本のようなプレート沈み込み境界では、テクトニックな現象による重力ポテンシャルの時間変化も考慮すべきである。本発表では、1 cmの精度でポテンシャルの時間変動を監視することの地球物理学的な意義について考察する。測定されるポテンシャルの変化は、実用的には、地下の質量分布の変動よりも高さの変動にずっと敏感である。このことは、光格子時計が高度計として使えることを意味し、GNSS等の宇宙測地技術で決定された高さの検証を可能にする。GNSS等と異なり、ポテンシャル測定は大気遅延誤差に悩まされることがない。高さの決定精度が向上することは、基準座標系の精度管理・地殻変動監視・移動体の位置計測（将来的に小型化した時計を搭載した場合）の精度が向上するといった直接的な効果の他にも、高さの測定を通じた地球物理現象の把握・解明にも役立つ。例えば、GNSS気象学において、より短時間により高い精度で高さが決定できれば、水蒸気量の推定精度を上げることができるともかもしれない。重力測定結果も高さの変動を感知できるが、地表付近の地下水の擾乱による影響も受けやすい。ポテンシャルの場合、重力と比べて距離が近いものからの寄与が弱まるので、その影響はほとんど無視できる。したがって、重力計と光格子時計を組み合わせた連続観測を行い、高さによる見かけの重力変化をポテンシャル計測で補正してやれば、これまでGNSSの高さの時間分解能では困難だった、数時間以内のマグマ等の地殻流体の変動を明らかにできる可能性がある。

キーワード：光格子時計、ジオイド、重力、相対性理論

Keywords: optical lattice clock, geoid, gravity, relativity

Gravity potential determination based on Doppler cancelling technique: simulation experiments using high-frequency-stability microwave links between satellites and ground stations

Ziyu Shen<sup>1</sup>, \*Wen-Bin Shen<sup>1</sup>, Shuangxi Zhang<sup>1</sup>

1.Wuhan University

In this report we present simulation results for determining the gravity potential (geopotential) using high-frequency-stability microwave links between satellites and ground stations. Based on gravity frequency shift principle and Doppler cancelling technique, the geopotential difference between a satellite and a ground station can be determined, and consequently the geopotential difference between different ground stations can also be determined via satellites. Suppose the relative inaccuracy of the clocks on board satellites and at ground stations is about  $10^{-17}$  level, our simulation experiments show the following results: (1) if two ground stations are connected via one satellite, the standard deviation is around  $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (equivalent in height 0.3 m); and (2) if two ground stations are connected with a network of satellites up to 5, the standard deviation can be largely improved, reaching around  $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . With quick development of time-frequency science, portable and commercial optical atomic clocks with inaccuracy of  $10^{-17}$  or better will appear soon. Hence, our proposed approach is prospective in the near future, especially for effective real-time geopotential determination, height measurement and global height datum unification in 1 cm level. This study is supported by National 973 Project China (grant No. 2013CB733301 and 2013CB733305), NSFC (grant Nos. 41210006, 41374022, 41429401), DAAD (grant No. 57173947) and NASG Special Project Public Interest (grant No. 201512001).

Keywords: geopotential determination, optical atomic clocks, microwave links, Doppler cancellation technique, gravity frequency shift, satellite

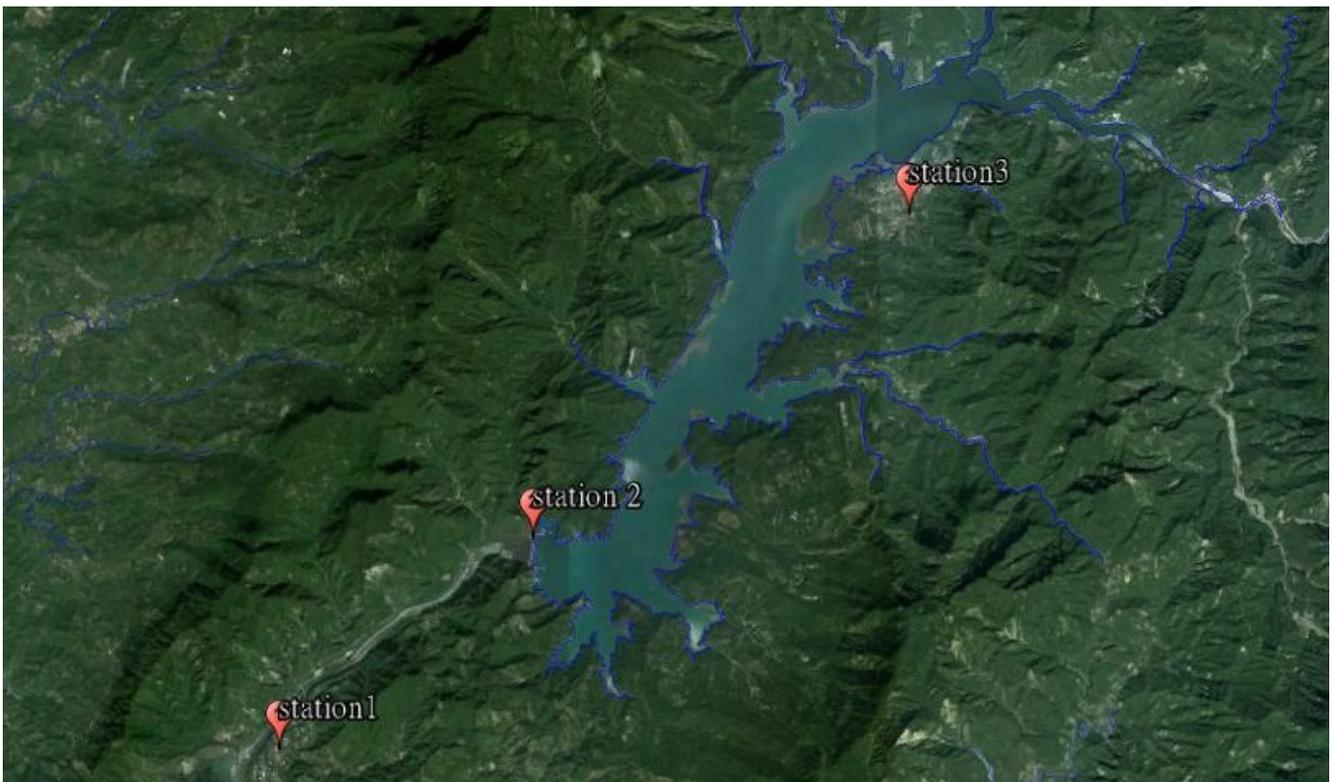
## Estimating reservoir sedimentation by gravimetry technique: A case study in Tseng-Wen reservoir

\*Yi Chang<sup>1</sup>, YuShen Hsiao<sup>1</sup>, Wei Chang<sup>1</sup>, YaoChun Kuo<sup>1</sup>, JungChieh Chang<sup>1</sup>

1.National Chung Hsing University

The study proposes a new method for estimating variation in reservoir sediment by gravimetry technique. The study area is located in Tseng-wen reservoir, which is the largest reservoir in Taiwan. Several field gravity surveys with FG-5 gravimeter have been carried out at three gravity stations surrounding the reservoir (shown in figure) during 2014~2016. The observed gravity values caused by the effects of ocean tide, polar motion, atmospheric pressure, and underground water will be well predicted and removed. The variation of Tseng-wen reservoir sedimentation derived from gravimetry technique will be compared to those derived from bathymetric Lidar. The purpose of the research is to develop a more efficient and economic method to measure the sediment variations in reservoirs, and subsequently bring contributions to soil and water conservation.

Keywords: gravimetry, reservoir sediment, FG-5 gravimeter



## 庄内平野東縁断層下の密度構造

## Density Structure beneath the Eastern Boundary Fault Zone of the Shonai Plain

和田 茂樹<sup>1</sup>、\*本多 亮<sup>2</sup>、田中 俊行<sup>2</sup>、岡田 真介<sup>3</sup>、澤田 明宏<sup>4</sup>、平松 良浩<sup>4</sup>

Shigeki Wada<sup>1</sup>, \*Ryo Honda<sup>2</sup>, Toshiyuki Tanaka<sup>2</sup>, Shinsuke Okada<sup>3</sup>, Akihiro Sawada<sup>4</sup>, Yoshihiro Hiramatsu<sup>4</sup>

1.金沢大学大学院自然科学研究科、2.公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所、3.東北大学災害科学国際研究所、4.金沢大学理工研究域自然システム学類

1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction, 3.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 4.Faculty of Natural System, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

庄内平野東縁断層帯 (EBFZSP) は山形県北西部に位置する庄内平野と出羽丘陵との境界部に沿って分布し、全長約38 kmにわたってほぼ南北走向に連続する活断層帯であり、断層帯の東側が西側に対して相対的に隆起している。EBFZSPはその断層分布形態や活動性等の違いから北部と南部に区分されており、そのうち南部を構成する松山断層では加藤・ほか (2006a, b) の反射法地震探査によって地下浅部構造が明らかにされている。本研究では、EBFZSP周辺の地下構造と構造発達史を明らかにすることを目的とした重力探査およびその解析を実施したので報告する。

2014年8月4-12日・2015年3月5-6日の期間で、EBFZSP周辺の重力探査を実施した。使用した重力計はScintrex社製CG-3M相対重力計である。重力測定はEBFZSP南部の松山断層を横断する反射法地震探査測線 (加藤・ほか, 2006a, b) を含む2測線およびEBFZSP周辺にて行い、測定点数は延べ177点となった。それに加えて入手可能な限りの既存測定データも参照した。

重力データには通常の処理・補正手順に加え、10m-DEMを用いた地形補正、スラブ補正を施しブーゲー異常図を作成した (仮定密度 $2,400 \text{ kg/m}^3$ )。また地質構造の不連続性を抽出するため、ブーゲー異常の水平・鉛直1次微分によるフィルタリング処理を行った。加えて、重力探査測線に2次元タルワニ法を適用することで2次元密度構造解析を実施したほか、Tilt-Depth法による解析も試みた。

本地域のブーゲー異常変化は大局的には地質構造と良く対応し、庄内平野では全体的に低異常、周囲の山地では相対的に50-60 mGal程高い高異常を示す。本断層帯の東部に発達する出羽丘陵中には4-5 mGal/km以上の高水平勾配帯およびゼロ等値線が存在しており、2次元密度構造解析結果から、これらは出羽丘陵中に発達する青沢断層群を捉えたものであることが確認された。高水平勾配帯およびゼロ等値線と、本断層帯の断層分布形態およびその位置を比較してみると、本断層帯南部では東側近傍に (最大約3.5 km離れて) 位置しているが、一方、断層分布が複数条に分岐する本断層帯北部では東側遠方 (最大約9 km) に位置しているという関係性がうかがえる。

本断層帯は青沢断層群から平野側に派生した低角東傾斜の衝上断層構造を有し断層前進現象が生じていることから (今泉・東郷, 2007)、本断層帯北部においては、青沢断層群から地下で複雑に分岐派生している断層群が雁行状の活断層として地表に分布し、平野側まで断層前進現象がより進行していると考えられている。一方、本断層帯南部では、青沢断層群から直接的に派生した断層がそのまま活断層として平野側へ衝上しているため、断層地表トレースおよびその地下構造は北部に比べ単純である (加藤・ほか, 2006a, b)。従って、本断層帯北部と南部における断層前進現象における差が、これら高水平勾配帯およびゼロ等値線と、断層分布形態とその位置関係の違いを表していると考えられる。

加藤直子・ほか, 2006a, 庄内平野東縁活断層系松山断層における反射法地震探査, *活断層研究*, 26, 87-93.

加藤直子・ほか, 2006b, 石油探査データの再解析による庄内平野東縁断層帯の地下形状, *地震研究所彙報*, 81, 149-156.

今泉俊文・東郷正美, 2007, 1:25,000 都市圏活断層図 庄内平野東縁断層帯とその周辺「庄内北部」「庄内南部」解説書, 国土地理院技術資料D1-No.496.

キーワード：重力異常、密度構造、活断層

Keywords: Gravity Anomaly, Density Structure, Active Fault

金沢大学測定重力データおよび他機関公開データとを合わせた重力異常データセットの作成

The gravity anomaly data-set include the gravity data measured by Kanazawa university and published by many institutes

\*澤田 明宏<sup>1</sup>、本多 亮<sup>2</sup>、平松 良浩<sup>1</sup>

\*Akihiro Sawada<sup>1</sup>, Ryo Honda<sup>2</sup>, Yoshihiro Hiramatsu<sup>1</sup>

1.金沢大学理工研究域自然システム学類、2.東濃地震科学研究所

1.School of Natural System, College of Science and Engineering, Kanazawa University, 2.Tono Research Institute of Earthquake Science

我々は金沢大学によりこれまでに測定を行った重力測定情報からデータベースを作成し、インターネット上で公開している(Honda et al., 2012, J. Geod. Soc.

Japan : [http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/gravity\\_database.html](http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/gravity_database.html)). このデータベースは可視化に重点を置き、GoogleEarth™などでの閲覧が可能になっている。また、日本各地域の地震発生ポテンシャルを解明することなどを目的として、測定した重力データを他機関から公開されている重力測定データと合わせることで、日本の陸域について高精度重力異常データセットの作成を行ってきた(Honda et al., 2015, JpGU meeting). 我々は、これまでの対象範囲に日本沿岸域で測定されている船上重力測定データを追加することにより、海域を含むより広範囲の重力異常データセットへの改良を試みた。船上重力データとして日本海洋データセンターにより公開されているMGD77データセットを使用し、大きなクロスオーバーエラーなどを除去したものをを用いる(澤田・他, 2009, 海洋情報部技報)。これにより、沿岸域まで延長するような活構造の解析などに活用できることが期待される。

この研究は科学研究費補助金(C) No. 26400450 により行われた。

キーワード：重力異常、データベース

Keywords: Gravity Anomaly, Database

## 昭和基地超伝導重力計で観測された東南極の積雪増加とチャンドラー極運動の減衰

Heavy snowfall in East Antarctica and recent weakening of the Chandler wobble observed with the superconducting gravimeter at Syowa Station.

\*青山 雄一<sup>1</sup>、土井 浩一郎<sup>1</sup>、渋谷 和雄<sup>1</sup>、池田 博<sup>2</sup>、早河 秀章<sup>1</sup>

\*Yuichi Aoyama<sup>1</sup>, Koichiro Doi<sup>1</sup>, Kazuo Shibuya<sup>1</sup>, Hiroshi Ikeda<sup>2</sup>, Hideaki Hayakawa<sup>1</sup>

1.国立極地研究所、2.筑波大学研究基盤総合センター低温部門

1.National Institute of Polar Research, 2.Research Facility Center for Science and Technology, Cryogenics Division, University of Tsukuba, Tsukuba

Continuous gravimetric observations have been made with three successive generations of superconducting gravimeter (SG) over 20 years at Syowa Station (39.6E, 69.0S), Dronning Maud Land (DML), East Antarctica. The third-generation SG, OSG#058, was installed in January 2010. Five years of OSG#058 data from January 2010 to January 2015 were of high quality, with no missing data and with no step-like noise. So we could examine the long-period gravity variation precisely. Non-tidal gravity variations derived from the OSG#058 data showed significant correlation with the accumulated snow depth observed at Syowa Station. We inferred the gravitational effect of the accumulated snow mass (ASME) detected by OSG#058. Moreover, the accumulated snow depth at Syowa Station was found to represent heavy snowfall (the snow accumulation) in a broad region in DML, which was estimated from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite gravity data. Such snow accumulation around Syowa Station was detectable by OSG#058. A gravitational response to the Chandler wobble (CW) was deduced from the OSG#058 non-tidal gravity variations after correcting the ASME. The observed response agreed roughly with the predicted response in both amplitude and phase. We also found that recent CW weakened and its period gradually decreased. We will discuss the relation between the heavy snowfall in DML and the weakening of CW, which were observed with OSG#058.

キーワード：超伝導重力計、東南極の積雪増加

Keywords: Superconducting gravimeter, Increase of snow accumulation in East Antarctica

## 大分県くじゅう地域における重力および重力偏差計データから推定される密度構造

Density structures estimated from gravity and airborne gravity gradiometry data in Kuju area, Oita prefecture

\*西島 潤<sup>1</sup>、野内 大介<sup>2</sup>

\*Jun Nishijima<sup>1</sup>, Daisuke Yanai<sup>2</sup>

1.九州大学大学院 工学研究院 地球資源システム工学部門、2.九州大学 工学部 地球環境工学科

1.Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University,

2.Department of Earth Resources, Marine and Civil Engineering, School of Engineering, Kyushu University

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）は「地熱資源ポテンシャル調査のための空中物理探査」を平成24年度より開始し、大分県くじゅう地域、鹿児島県霧島地域において空中重力偏差法探査、時間領域空中電磁探査および空中磁気探査を実施してきた（JOGMEC, 2014）。本研究では、大分県くじゅう地域を対象として行われた空中重力偏差法探査データと地上重力測定データを用いて地下の3次元密度構造を推定し、得られた密度構造と過去に行われた地熱・火山調査結果との比較を行った。

地表重力探査データは、九州大学測定28点と日本重力データベース（AIST, 2013）および西南日本重力データベース（Shichi and Yamamoto, 2001）から850点の測定データを使用して重力異常図を作成した。ブーゲー補正や地形補正で用いる補正密度については、CVUR法（Komazawa, 1995）を用いて推定を行い2310kg/m<sup>3</sup>とした。

空中重力偏差法探査では、CGG Aviation社HelifALCON<sup>TM</sup>重力偏差計をヘリコプターに搭載し、測線間隔

250m、対地高度120mで地形に沿って飛行して調査を行った。HelifALCON<sup>TM</sup>重力偏差計で計測されたデータ

は、飛行中の機体の加速度変化、タイライン補正、マイクロベリング補正、地形補正などの各種補正が行われ重力偏差の水平曲率成分（ $G_{NE}$ ,  $G_{UV}$ ）が得られる。地形補正で用いる地形データは測線沿いについてはヘリコプターに搭載されたレーザースキャナーとGPSデータから20mメッシュの地形データを作成し、測線間や調査範囲から15kmまでの領域についてはShuttle Rader Topography Mission (SRTM) v2の標高データを用いた。重力偏差データは、地形補正無し、補正密度2300kg/m<sup>3</sup>、補正密度2670kg/m<sup>3</sup>の3種類が提供されているが、本研究では地上測定重力データから推定された補正密度に一番近い2300kg/m<sup>3</sup>のデータを用いた。

密度構造モデリングに対応した解析プログラムは、カナダGEOSOFT社VOXI Earth modelingを使用した。本手法は、同社ポテンシャルデータの総合解析ソフトであるOasis Montaj上で入力データを作成し、Geosoft社のクラウドコンピュータで計算を行う計算サービスである。このため、ユーザー側のコンピュータスペックに依存せず、大規模な3次元モデルを高速に計算することが可能である。本解析では、地下をvoxel（直方体セル）に分割し、観測された重力偏差を説明する最適な密度の組合せを探索する。入力データは重力偏差データ6成分（ $G_{xx}$ ,  $G_{yy}$ ,  $G_{zz}$ ,  $G_{xy}$ ,  $G_{xz}$ ,  $G_{yz}$ ）を使用した。

空中重力偏差法データから得られた密度分布では、猪牟田カルデラ内や涌蓋山北西山麓にはカルデラ構造を充填していると考えられる岩砕なだれ堆積物の低密度域（2100~2200 kg/m<sup>3</sup>）が見られた。一方、高密度域

（2400~2550 kg/m<sup>3</sup>）は更新世中期の涌蓋火山や更新世後期の獺師山、合頭山の南東部および九重火山などの直下に見られた。これらの傾向は、地表重力探査から推定される密度構造と概ね良い対応が見られたが、浅部においては密度構造が異なっている部分が多く見られた。これは主に重力と重力偏差の違いや空間分解の違いに起因するものと考えられる。

キーワード：重力探査、空中重力偏差法探査、密度構造、九重火山

Keywords: Gravity survey, Airborne gravity gradiometry survey, Density structure, Kuju volcano