

石垣島における超伝導重力計観測（その3） Gravity observation using a superconducting gravimeter at Ishigakijima, Japan (part 3)

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
IMANISHI, Yuichi^{1*}; NAWA, Kazunari²; TAMURA, Yoshiaki³; IKEDA, Hiroshi⁴; MIYAJI, Takeshi³; TANAKA, Yoshiyuki¹

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

国立天文台 VERA 石垣島観測局（沖縄県石垣市）における超伝導重力計観測は、開始から約2年が経過した。この観測の主な目的は、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である。この間、2012年5月、同12月、2013年7月と、3回のスロースリップイベントを経験した。このうち2012年の2回のイベントについては、イベント発生時の重力変化に加えて、その前後に長期的な重力の増加と減少のトレンドが見られることはすでに報告した。2013年7月のイベントは、ちょうど台風のシーズンに重なっており、停電も発生したために十分な品質で記録することができなかった。このほか、2013年4月に八重山諸島付近で発生した群発地震も重力に影響している。次のスロースリップイベントは2014年2月前後に発生すると予想されるので、発表の際はその記録も含めて最新のデータの解釈について報告する。

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

地熱地域における臨時観測で得た gPhone 重力計のドリフトについて Various drift rates of gPhone gravimeters obtained from short-term observations at geothermal fields

名和 一成^{1*}; 宮川 歩夢¹; 杉原 光彦¹
NAWA, Kazunari^{1*}; MIYAKAWA, Ayumu¹; SUGIHARA, Mituhiko¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

八丈島の温泉モニタリングを目的として、連続観測用スプリング相対重力計である gPhone 重力計 (Micro-g LaCoste 社製) が複数台導入された。2011 年 2 月から 2012 年 12 月にかけて、1~4 ヶ月間の連続観測を、異なる重力計・観測状況において断続的に実施した。取得したデータを使って重力計の安定性の指標となるドリフトを計算して比較した。その結果、得られたドリフト変化は、重力計や場所ごとに固有の特徴をもっていた。全体としてみると、gPhone 重力計の初期ドリフトが安定するまで、多くの場合 1 ヶ月程度かかっていた。それ以降、ドリフトレートの直線性はよくなるが、絶対値は小さいもので数マイクロガル/日であった。gPhone のドリフトレートの大きさは、シントレックス CG-3M 重力計の数百マイクロガル/日よりかなり小さいが、ほぼゼロに近い超伝導重力計 (iGrav SG の公称値: 0.5 マイクロガル/月) には及ばない。発表の際には八丈島から九州の地熱発電所に移設した gPhone-133 の結果も合わせて示したい。

キーワード: 相対重力計, 重力時間変化, 八丈島, 地上観測

Keywords: relative gravimeter, temporal gravity change, Hachijojima, on-land observation

重力計鉛直アレイ観測 -平成25年度- Gravimetric vertical array observation -the 2013 fiscal year-

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

¹(公財)地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所
¹TRIES, ADEP

重力計鉛直アレイ (or 瑞浪超深地層研究所:以下, MIU) は世界的にも稀であり、降水の影響を抑制し地下深部からのシグナルを stack する手法として、重力観測のポテンシャル向上に寄与する (Tanaka et al., EPS, 2013)。今回 (2013年11月~2014年1月)、田中ほか (連合大会予稿, 2013) と同様のアレイ観測、即ち、2台の gPhone 重力計 (地上に SN.130、地表下 300m に SN.90) を用いて、前回よりも高品質のデータを取得出来た。

前回は MIU 建設工事に伴う発破が多い時期に重なったためにアレイ観測として満足できるデータは得られなかったが、今回は時・日オーダーの重力変化についてはサブマイクロガルの議論可能なデータが得られた。ただし、それ以上の帯域については、2013年10月導入の SN.130 のセンサー内部温度の単調減少が収束しておらず、センサードリフトに影響している可能性はある。

ここでは、以下の4時系列データ: (1) 地下の gPhone データ、(2) 地上の gPhone データ、(3) 両者の和データ、(4) 両者の差データの解析結果について述べる。これら全て、BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を利用して潮汐成分・気圧応答を評価し、線形ドリフトを仮定して、重力残差まで得ている。降水があると、(1) は重力減少、(2) は重力増加、(3) は相殺、(4) は重ね合わせ、と単純には考えられる。なぜなら、MIU サイトでは降水は地表下約 80m 以浅の明世累層までしか浸透しない事が判明しているからである (例えば、Tanaka et al., G3, 2006)。そして、実際、このような降雨応答は観測された。しかし、雨の降り方にも因るが、(1) の方が (2) よりも降雨応答の振幅が大きい傾向が見られる。即ち、この重力計配置では降雨応答を無限平板 (ソースまでの距離に依存しない) と見なす事は難しいかもしれない。また、大気補正については、(1) と (2) はほぼ同じ、(3) は重ね合わせ、(4) は相殺と考えられ、実際、(4) の気圧応答成分は (1) および (2) の 1/10 の振幅で $\pm 0.5 \mu\text{Gal}$ 以下と観測された。

今後、MIU 掘削工事に伴う発破の影響が少ないデータの蓄積や、各 gPhone 固有のクセ (センサードリフト、センサー温度や傾斜の応答) を隣接設置して調査し、絶対重力計を加えた鉛直アレイ観測を構築したい。

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堀内泰治氏には MIU 坑内での観測および降雨データに便宜を頂いている。TRIES 職員には計器の保守に協力頂いている。

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

小笠原硫黄島の大規模隆起：札幌一那覇重力計検定結果に基づく重力変化 Huge uplift event of Iwoto: Estimation of gravity change based on the result of gravimeter calibration in Sapporo-Naha

小澤 拓^{1*}; 宮城 洋介¹; 上田 英樹¹; 長井 雅史¹; 藤田 英輔¹
OZAWA, Taku^{1*}; MIYAGI, Yosuke¹; UEDA, Hideki¹; NAGAI, Masashi¹; FUJITA, Eisuke¹

¹ 防災科学技術研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

小笠原硫黄島は、東京の約1200km南に位置する火山島である。その山頂には直径が約10kmのカルデラを有し、その中央部から南西端付近までの領域が海上に現われている。小笠原硫黄島の火山活動は極めて活発な隆起活動を伴うことが特徴の一つであり、防災科学技術研究所は間欠的な大規模隆起イベントの発生およびその地殻変動分布を明らかにしてきた(Ukawa et al., 2006)。1996年からは地殻変動測量に加えて重力測定も開始し、鶴川ほか(2006)は隆起時におけるマグマの関与を示した。小笠原硫黄島では、2003年初頭から2006年中頃まで、定常的な沈降が進行していたが、2006年中頃に急激な隆起の加速が観測された。2007年以降、隆起は徐々に鈍化する傾向にあったが、2011年2月頃に隆起の再加速が観測され、防災科学技術研究所および国土地理院のGNSS連続観測によれば、再加速開始から2012年4月頃までに、2m近い隆起が観測されている。2012年4月後半には、北東沖において変色水が観測され、それ以降の隆起活動は鈍化傾向にある。この大規模隆起イベントの地殻変動および重力変化を測定するため、我々は、これまで防災科学技術研究所が測量を行ってきた観測点において、GNSSキャンペーン観測および重力測定を行った。GNSSキャンペーン観測の結果については、第120回測地学会講演会および日本火山学会2013年度秋季大会において報告した。重力測定についても速報結果を報告し、使用した重力計(Scintrex社製CG-3M#284, #371)のスケールファクターの時間変化に関する不確定性が大きいことを述べた。そこで、スケールファクターを決定するため、札幌一那覇間の重力測定を実施した。本講演においては、その測定結果から明らかとなったスケールファクターの時間変化と、その結果に基づいて推定された小笠原硫黄島の重力変化について報告する。

札幌一那覇間重力測定は、防災科研(Bosai-BS)、国土地理院(Tsukuba-GS, Tsukuba-FGS)、羽田空港(Haneda-GS)、千歳空港(Chitose-GS)、北海道大学(Sapporo-GS)、沖縄気象台(Naha-GS, Naha-FGS)との往復測定を行った。測定値の解析においては、重力計のドリフト率を一定と仮定して、各観測点での相対重力値と同時にドリフト率も推定した。そして、推定された相対重力値が日本全国重力基準網(JGSN96)で示されている重力値(国土地理院測地部, 1997)に整合するように、スケールファクターを求めた。なお、Sapporo-GSは移設されたため、国土地理院が測定した重力値を用いた。その結果、#284のスケールファクターは2006年と比べて $+2 \times 10^{-5}$ 程度の変化であったのに対して、#371については -1×10^{-4} 程度の変化が見られた。スケールファクターの時間変化は一定ではなく、線形近似によって推定された値と有意に異なることが明らかとなった。つまり、大きい重力差を測定する場合において、100マイクロガル以下の値を議論する場合には、スケールファクターの時間変化の考慮が極めて重要であると言える。

推定されたスケールファクターを用いて、小笠原硫黄島の基準点(IWO101)の重力値を求めたところ、#284と#371の測定値は27マイクロガルで一致し、2006年における測定値との差は -0.734mGal と求まった。この期間における隆起量は3.05mであり、これらの値から計算される重力変化率は -0.241mGal/m となる。この値は、2001年から2002年に発生した大規模隆起に関して、鶴川ほか(2006)が求めた変化率と全く同じである。この結果は、2006年からの大規模隆起イベントにおいても、同様の密度を持つマグマが貫入したことを示唆している。

謝辞。小笠原硫黄島の測量においては、海上自衛隊硫黄島航空基地気象班の方々には協力していただいた。また、株式会社オオバの方々には、GPS観測と解析および重力測定の一部を実施していただいた。さらに、国土地理院の物理測地課重力係には、重力基準点の使用許可をいただくとともに、各重力点の重力値を教えていただいた。さらに、北海道大学の古屋正人教授、北海道大学総合博物館の松枝大治名譽教授、沖縄気象台の方々には、重力基準点の使用を許可していただくとともに、観測に協力していただいた。関係各位に感謝の意を申し上げます。

キーワード: 小笠原硫黄島, 重力, スケールファクター, マグマ

Keywords: Iwoto, gravity, scale factor, magma

南極・セールロンダーネ山地周辺地域における絶対重力測定 Absolute gravity measurements near the Sor-Rondane Mountains, Antarctica

福田 洋一^{1*}; 青山 雄一²; 菅沼 悠介²; 岡田 雅樹²; 土井 浩一郎²
FUKUDA, Yoichi^{1*}; AOYAMA, Yuichi²; SUGANUMA, Yusuke²; OKADA, Masaki²; DOI, Koichiro²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 国立極地研究所

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

第55次南極地域観測隊(JARE-55)では、スポット観測の一環として、氷床変動やGlacial Isostatic Adjustment(GIA)などに伴う重力変化の研究を目的とし、セールロンダーネ山地地域に位置するベルギーのPrincess Elisabeth Station(PES)で絶対重力測定を実施した。また、同地域のあすか基地近郊のシール岩にはJARE-26で設置された重力基準点(No.26-01)があるが、これまで絶対重力測定が実施されたことがなく、今回、初めて野外用の絶対重力計を用いた測定を実施した。以下では、これらの測定ならびに結果の概要について報告する。

今回用いた絶対重力計はFG5#210およびA10#017の2台で、その他、 dg/dz や重力点間の相対測定のためにラコスト重力計#805を使用した。南極への輸送は、機材、人員とも航空機(DROMLAN: Dronning Maud Land Air Network)を利用し、南アフリカのケープタウンからノボラザレフスカヤ基地経由でPESに移動した。PESでの滞在期間は、2013年11月29日から12月16日までの18日間である。PESでは、これまでもベルギーの研究者が、居住区から数100m離れた露岩上のNorth Shelter(NS)と呼ばれる観測室内の重力点で、FG-5絶対重力計を用いた測定を実施している。今回の研究の一つの目的は、NSの同じ重力点で繰り返し測定を実施することで、長期的な重力変化の監視を行うことである。しかし、NSは大変狭く、落下槽の真空引き等は困難で、これらの調整作業やテスト測定はPES居住区内の一室で行った。また、同室内に仮の重力点を設置し、FG5とA10の測定値の直接比較を行った。その結果、高さの補正についてラコスト重力計による dg/dz の実測値を用いた補正後、 $2\mu\text{gal}$ 以内で一致する結果を得た。このことは、A10の測定値が良く校正されていることを示している。その後、テスト測定を継続中にFG-5の落下槽に不具合が生じ、そのまま回復せず、FG5での有効な測定は、仮の重力点での1400ドロップに留まった。このため、NSの測定はA10を用いて実施し、実測した dg/dz 値 $4.4529\mu\text{gal/cm}$ を用いた基準点上での重力値として $982302155.21\mu\text{gal}$ を得た。これまでのNSでの測定値については、ベルギー側での詳細な補正パラメーター等を問い合わせ中で、現時点で正確な比較ができないが、 μgal 以内では一致している模様である。従って、PESでの重力の時間変化はあったとしても小さいものと考えられる。

シール岩での測定は12月5~6日に実施した。シール岩の重力基準点(No.26-01)は、常に風の強い頂上付近にあり、A10を用いてもその場での測定は大変困難である。そこで、今回はシール岩の取り付き付近に仮の重力点を設置しA10による絶対重力測定を行い、その後、No.26-01との間はラコスト重力計での結合を行った。このようにして得られたNo.26-01の重力値は 982406.109mgal で、結合誤差を含めた精度は $15\mu\text{gal}$ 程度と推定される。

これまでのNo.26-01での重力値は、JARE-26による 982405.33mgal (国土地理院, 2002)とJARE-27による 982402.817mgal (福田, 1986:昭和基地の絶対重力点改訂値を補正)があるが、今回の結果は、JARE-26の値に対して 0.779mgal 、JARE-27の値に対して 3.292mgal 、それぞれ大きい値となった。JARE-27の値との差が大きい理由として、JARE-27では2台のラコスト重力計を用いた測定を行っているが、その際、シール~昭和基地間の測定で2台の測定値に不一致があり、福田(1986)では、前後のドリフトの状況等から判断して一方の重力計だけに 3.765mgal のトビの補正を行っていることによると考えられる。今回の結果からは、トビの補正を行った重力計が間違っていたものと推定されるが、仮にトビがもう一方の重力計に生じていたとすると、今回の測定値との差は 0.5mgal 程度となり、ラコスト重力計による重力結合の精度として妥当なものと思われる。No.26-01の重力値は、これまでに実施されたセールロンダーネ地域の重力測定の基準値として使用されており、今後、これらの値の改訂が必要である。

文献:

福田洋一(1986):南極資料, 30, 164-174.
国土地理院(2002):国土地理院技術資料 B1-No.32.

キーワード: 絶対重力測定, セールロンダーネ, 南極, 氷床変動, 重力変化, 重力基準点

Keywords: absolute gravity measurement, Sor-Rondane, Antarctica, ice sheet movement, gravity changes, gravity reference point

絶対重力計用投げ上げ装置の反作用補償機構の性能評価 Performance of the recoil-compensation mechanism used for a throw-up type absolute gravimeter

酒井 浩考^{1*}; 新谷 昌人¹; 坪川 恒也²; Emanuele Biolcati³
SAKAI, Hiroataka^{1*}; ARAYA, Akito¹; TSUBOKAWA, Tsuneya²; EMANUELE, Biolcati³

¹ 東京大学地震研究所, ² 真英計測, ³ L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ² Shin-ei keisoku, ³ L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

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設置場所が限定されるという問題がある。そのため火山の地下構造観測に用いる場合は、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ことが多い。しかし、この手法は観測に手間がかかり、時間精度が悪くなるほか、火山活動時では、観測地点での測定に危険が伴う。本研究は、これらの状況を改善するための絶対重力計小型化に関する研究であり、精度向上のために測定誤差の要因となる落体投げ上げの反作用を打ち消す補償機構が組み込まれた装置を開発している点が従来の研究と大きく異なる点である。

重力測定的手法としては落体を投げ上げ、その距離と時間を精密に計測することで重力加速度を測定する、投げ上げ方式を採用した。既存の絶対重力計では、落体を自由落下させ重力加速度を求める自由落下方式を採用するのが一般的であるが、この自由落下方式は落体を持ち上げる必要があるため、短時間で繰り返し測定ができないといった問題点や、落体を持ち上げる機構により、装置が大型化しているという問題点があった。そこで落体を持ち上げる必要がなく、短時間で繰り返し測定可能な、投げ上げ方式を採用することにより、絶対重力計の大型化している主要な部分の一つを小型化することができる。

これまでに開発した投げ上げ装置は、 piezo素子 (電圧を加えると数 μm 伸縮する部品) の伸縮を拡大する装置を用いることにより落体を約 3mm 投げ上げることができる。また落体を投げ上げた際、固着の影響により落体が回転し、重力測定の見誤差要因になっていたが、投げ上げる瞬間に落体と落体を投げ上げる装置の接触部分を瞬間的に切り離す機構を導入することで解決した。この投げ上げ装置の性能試験を2012年末に江刺地球潮汐観測施設で既存の絶対重力計の自由落下装置と入れ替えることにより行った。その結果、潮汐の重力変化が検出され、重力変化の分解能 δg は $40\mu\text{gal}$ であることがわかった。しかし重力の絶対値は、過去の重力測定から推測される値とずれがあり、重力測定値の確度 Δg は 3mgal であった。この Δg が大きい原因は、投げ上げた際の反作用による振動が、地面を通して干渉計に伝わり誤差となっているためである。

そこで、重力測定値の確度 Δg を向上させるため、投げ上げた際の反作用を打ち消す装置の開発を行った。具体的には、投げ上げ用の piezoを取り付けている板の反対側に、同じ piezoを取り付け、これら2つの piezoに同じ信号を加え piezoを上下対称な動きになるようにする。そして落体を投げ上げると同時に反対方向にもばねの付いたおもりを打ち出すことで反作用を打ち消すことを試みた。すると落体の上昇時は反作用を打ち消す前のピーク値の2.7%に、落体の下降時は21.8%に振動加速度をそれぞれ低減することができた。今後はさらに微調整を行い、2012年と同様の方法で重力測定を行う予定である。本講演では、その結果と開発状況について報告したい。

キーワード: 絶対重力計, 投げ上げ装置, 小型化, 反作用, 打消し装置, 重力測定

Keywords: absolute gravimeter, throw-up equipment, miniaturization, recoil effect, compensation mechanism, gravity measurement

レーザー干渉計型重力勾配計の開発と桜島火山における試運転 Development of a laser-interferometric gravity-gradiometer and its trial operation on the volcanic island of Sakurajima

潮見 幸江^{1*}; 鍵山 恒臣¹

SHIOMI, Sachie^{1*}; KAGIYAMA, Tsuneomi¹

¹ 京都大学火山研究センター

¹ Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University

We have been developing a laser-interferometric gravity-gradiometer for volcanological studies. The gravity gradiometer measures differential accelerations between two test masses that are in free fall at different heights. Because its detection principle is based on the differential measurements, measured values are insensitive to the motions of observation points. That is to say, the gravity gradiometer is expected to have a good resolution even when it were used on an accelerating vehicle, such as an airship, or in an active volcanic area. Therefore, the gravity gradiometer could be useful for, for example, resource explorations and studies on volcanic activities.

The gravity gradiometer, to be used on an airship, had been developed at the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the Tokyo University from 2009 to 2012. A prototype of the gravity gradiometer was built up and tested at the ICRR. Their laboratory test showed that its resolution of measuring vertical gravity gradients was about a few $\mu\text{Gal}/\text{m}$ in two second measurements. However, large unexplained disturbances were observed in longer term measurements. In order to understand the sources of the disturbances, the prototype was moved to the Aso Volcanological Laboratory (AVL) of the Kyoto University in July 2012. Since then, its further development, to be used at an observatory in a volcanic area, has been carried out at the AVL.

We will report the current status of the development for volcanological studies and results of trial measurements performed at the Sakurajima Volcanological Laboratory of the Kyoto University, on the volcanic island of Sakurajima, Kyusyu, Japan.

キーワード: 重力勾配

Keywords: gravity gradients

重力衛星 GRACE を用いた地震後重力変化の研究:余効変動の二成分の分離とそのメカニズムの考察 The two components of postseismic gravity changes and their mechanisms

田中 優作^{1*}; 日置 幸介¹
TANAKA, Yusaku^{1*}; HEKI, Kosuke¹

¹ 北大院理
¹ Graduate School of Science, Hokkaido University

本研究では、重力衛星 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) が捉えた超巨大逆断層型地震 (2004 年スマトラ-アンダマン地震, 2010 年チリ (マウレ) 地震, 2011 年東北沖地震) に伴う重力変化を時系列解析することで、重力が地震後に地球内部で起こっている現象を区別して観測する第一の手段になりうることを示した。地震を観測するセンサーは今のところ三種類ある。地震計と、GPS (Global Positioning System) を始めとする GNSS (Global Navigation Satellite System) 及び SAR (Synthetic Aperture Radar), そして重力観測である。地震計は地震波を捉え、GNSS や SAR は地殻変動を空から観測し、重力は質量移動を追跡する。地震時の現象はどの観測機を用いても捉えることができる。しかし地震後の現象は、地震波が発生しないため地震計では捉えられない。地震後の地表の動きは GNSS や SAR が捉えることができる。しかし、それらも地下で複数のメカニズムが起こっていた場合、その現象を分離して捉えることは難しい。可能なのは、いくつかの仮定を置いた上で、複数の現象に対応したモデル計算を行い、その結果と観測結果の一致を得ることである。しかし、地震後に複数のメカニズムで変動が起こっている場合、もっと望ましいのは、そのメカニズムの各々を別々に観測値として得ることだろう。本研究で発見したのは、地震後に起こる変動が重力としては逆の極性と時間スケールで観測されることである。これは重力が地震後に地球内部で起こっている現象を区別して観測する第一の手段になる可能性を強く示している。

GRACE GFZ 解を用いたグリーンランドの経年氷床質量変動の高分解能マッピング High resolution mapping of ice mass trend in Greenland using GRACE GFZ solution

松尾 功二^{1*}; 福田 洋一¹
MATSUO, Koji^{1*}; FUKUDA, Yoichi¹

¹ 京都大学 理学研究科

¹ Graduate school of Science, Kyoto University

GRACE 衛星は、2002 年の打ち上げ以来、地球重力場の月毎の変動を計測している。データは 2012 年 5 月に RL04 から RL05 へと更新され、米国のテキサス大学宇宙研究センター (CSR) とジェット推進研究所 (JPL) から、60 次までの球面調和係数 (ストークス係数) として公開されている。また独国の地球科学研究センター (GFZ) は、2013 年 12 月に RL05a データとして 90 次までのストークス係数を公開している。本研究は、GFZ RL05a データ (90 次) を用いて、その計測誤差を詳細に調べたうえ、高次項成分を可能な限り活用し、グリーンランドの経年的な氷床質量変動を従来よりも高い空間分解能でマッピングする。

まず、計測誤差について調べる。Wahr et al. (2006) に倣い、GRACE データの誤差分散行列から誤差の時空間変化を求める。RL05a データの誤差の全球平均は、相当水厚変化で表現して約 100cm であった。RL04 データでは約 300cm であったため、約 3 倍の精度向上と言える。その時間変化は、2003 年 1 月から 7 月までは平均 200cm であったが、2003 年 8 月以降は平均 100cm で安定している。2010 年 4 月に GRACE の熱制御機器が故障したようだが (Tapley et al., 2013)、重力計測には特に影響はないようだ。誤差の空間分布は、赤道域で大きく (約 130cm)、極域で小さい (約 40cm)。これは、GRACE が極軌道上を周回しているため、データの取得密度が極域で密に、赤道域で疎になることに起因する (Matsuo & Heki, 2013)。また、赤道域は主に海洋域で占められるため、エイリアシング誤差を多く含むという要因もあるだろう。このように、極域における 2003 年 8 月以降の RL05a データは、特に品質が高いことが分かる。

続いて、グリーンランドの経年氷床質量変動を導く。グリーンランドでは、2002 年頃から氷床が急速に消失しており、現在地球上でも最も大規模な質量変動が起きている (Matsuo et al., 2013)。また、極域に位置しているため、他の地域と比べ GRACE の計測誤差が低い。すなわち、シグナル対ノイズ比が特に高い地域といえる。従来 GRACE データは、高次項ノイズを低減させるために、60 次以降を打ち切り、ガウシアンフィルター (Wahr et al., 1998) や相関フィルター (Svenson & Wahr, 2006) を施したのち、重力および質量変化へと変換されていた。そのため、空間分解能は良くても約 300km ほどであった。一方で、精度が向上した RL05a データは、より高次の項をより弱いフィルターを適用して使用することができる。そこで本研究では、ストークス係数を 90 次まで使用し、相関フィルターのみを適用し解析を行った。相関フィルターを施すことで、グリーンランド上での計測誤差は約 40cm から約 20cm まで減少させることができた。ストークス係数からグリーンランド上のシグナルを効率的に抽出するために、Haris and Simons (2012) による spherical Slepian Basis を適用する。そうすることで、グリーンランドとは関連の低い他の成分の寄与を極力抑え、結果的にノイズを減少させることができる。そのようにして得た 2003 年 9 月から 2009 年 10 月までの質量変化の時系列から最小二乗法により 1 次変化 (経年変化) を求める。グリーンランドの南東部と西部にて、明瞭な質量減少のシグナルが検出された。注目すべきは、グリーンランド西部の質量変動である。従来の 60 次まで用いた解析では中西部の Jakobshavn 氷河と北西部の Qaanaaq における質量減少シグナルは分離できていなかったが、今回の 90 次まで用いた解析では綺麗に分離できている。この結果の妥当性を確認するために同時期に行われた ICESat 衛星による氷厚変動観測の結果と比較する。その結果、ストークス係数の 90 次まで展開した ICESat の経年質量変化の分布図は、今回の GRACE の結果と見事に一致した。このように、GRACE RL05 GFZ 解 (90 次) を用いることで、グリーンランドに対しては、従来と比べ空間分解能を約 1.5 倍 (約 300km から約 200km) 向上させることができた。

CSR 解や JPL 解ではストークス係数が 60 次までしか公開されていないように、元来 60 次以上の成分は利用が難しいと考えられてきた。しかしながら本研究は、計測誤差が低い極域を対象に、効率的にシグナルを抽出することで、GRACE データを 90 次まで活用できることを明らかにした。グリーンランドと同じように極域に位置し強いシグナルを示すアラスカや南極半島に対しても、同様の手法を用いることで、従来よりも高分解能な質量変化の分布を導くことができるだろう。

キーワード: 衛星重力観測, グリーンランド, 氷床質量変動, 宇宙測地学, GRACE, ICESat

Keywords: Satellite gravimetry, Greenland, Ice sheet mass variation, Space geodesy, GRACE, ICESat