

平成 30 年 8 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400453

研究課題名(和文) 衛星重力・高度計、地上データを用いたエンダービーランドでの南極氷床変動の追跡

研究課題名(英文) Ice sheet mass changes in Enderby Land, Antarctica using Satellite gravimetry, altimetry and in-situ data

研究代表者

福田 洋一 (Fukuda, Yoichi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：30133854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：南極エンダービーランドの白瀬氷河流域において、GRACEによる衛星重力データ、Envisatの衛星高度計データ、南極観測隊による雪尺データ、RACMOの表面質量変動モデルデータを用い、最近の氷床変動における質量バランスについて詳細な比較検討を行った。その結果、この地域では近年の降雪量の増加に伴い、特に大陸沿岸に近い地域で氷床質量が増加していることを確認した。次に、積雪量の多かった2008年～2012年について、GRACEと他のデータを比較することで、大陸縁辺からの流出量に変化がみられるかについて検討を行ったが、流出量の顕著な変化は見られなかった。

研究成果の概要(英文)：Using GRACE gravity data, Envisat altimeter data, RACMO surface mass balance model and snow-stakes data by the Japanese Antarctic Research Expedition, we estimated the ice sheet mass balance at the Shirase Glacier basin in Enderby Land, Antarctica. The result shows that the recent ice-sheet mass increase is mainly due to the snow accumulation, particularly near the coastal areas. Next, we compared the GRACE and the snow-stakes data via RACMO model adjusted by the GRACE data for the period of 2008-2012, when excess mass accumulation was observed. The snow-stakes observation measures the successive height changes of the surface snow. The observed height changes only include the snow accumulation and sublimation without the component of the runoff effects. Therefore the difference between the snow-stakes and the GRACE data can reveal the mass changes caused by runoff, and the change of the runoff velocity. The comparison result shows no distinct change occurred during the period.

研究分野：測地学

キーワード：衛星重力 衛星高度計 氷床変動 表面質量バランス 雪尺 白瀬氷河 エンダービーランド 東南極

1. 研究開始当初の背景

2002年に打ち上げられた GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) は、地球上で生じる質量移動を伴う様々な現象を衛星による地球重力場観測で捉えることを可能とし、陸水変動、海洋変動、グローバルな水循環、また、巨大地震に伴う重力変化など、多くの研究分野にブレイク・スルーをもたらした(例えば、Fukuda, 2011)。特に、極域の氷床変動の研究については、これまでほとんど不可能であった氷床質量の量的変化の議論が可能となり、南極氷床変動についても多くの成果が挙げられた(例えば、Shepherd et al., 2012)。これらを総合すると、西南極の氷床が大きく減少しているのに対し、東南極では若干の増加、南極全体としては若干の減少ということが、現在も変わらぬ一つの共通認識である。しかしながら、GRACE データを用いた南極氷床変動の研究では、LGM (Last Glacial Maximum) 後の氷床融解に伴う GIA (Glacial Isostatic Adjustment) の影響が大きく、その見積もりが大きな誤差要因となる(例えば、山本・福田, 2010)。このことは逆に、南極氷床変動の研究は、地球環境や海面上昇の問題に直結して重要であると同時に、固体地球内部の粘弾性的応答に関する情報を与えてくれる GIA の研究にとっても大変重要であることを示している。

衛星重力とは別に氷床変動を調べる手段として衛星高度計による氷床高度測定があり、氷床変動研究での衛星高度計の利用の歴史は GRACE より古く、1990年代の ERS-1/2 にまで遡る。特に、2000年以降は Envisat やレーザ高度計を搭載した ICESat、最近では SAR モードを持つ CryoSat のデータが利用できることから、衛星高度計は氷床変動研究においてたいへん有望な手段となっていた。また、高度計による氷床高度の変化を、氷(雪)の密度を仮定することにより質量変化に換算し、これと衛星重力データを同時に用いることで、原理的には、南極氷床の質量変動と GIA による質量変動を分離することが可能で、そのような研究も行われている(例えば、Yamamoto et al., 2011)。さらにこの場合、質量換算のための密度を知る必要があることから、現場観測や他の情報の利用が不可欠であり、現場の雪尺データなども加味した研究も実施され、東南極のエンダービーランドでの質量増加が降雪によることなども示している(Yamamoto et al., 2008)。

2. 研究の目的

このように、衛星データや現場観測データを用いた比較的広いスケールでの氷床質量変動については、さまざまな研究が実施されているが、さらに踏み込んで、1) 降雪による質量増加と氷床の海洋への流出による質量変動バランス、2) 気候変動と関連した季節～年々変動、3) 氷床変動の重力・GNSS 等

の地上観測への影響(Doi et al., 2009)などについては、未解決の課題も多く残されており、氷床変動のより精密な議論のためには、変動のメカニズムまで含めた流域スケールでの詳細な研究が重要と考えられた。

このような背景から、本研究では、昭和基地や周辺の様々な地上データが利用できるエンダービーランドにおいて、衛星重力、衛星高度計データに、表面質量収支モデルや地上測定データも加味することで、従来から実施されている氷床質量変動や GIA の研究に加え、特に大陸から海洋への氷床質量移動を詳細に追跡することを目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

上述のとおり、昭和基地が位置する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では、近年の降雪量の増加により、氷床質量が増加の傾向にあることが知られていた。しかしながら、氷床質量変動の詳細な空間分野やメカニズムについては不明な点が多いことから、本研究では、質量変動の検出精度は高いが空間分解能の低い GRACE のデータと、空間分解能の高い衛星高度計データを組み合わせ、さらに RACMO (Regional Atmospheric Climate Model) のような領域大気数値モデルに基づく表面質量収支モデルならびに雪尺による地上観測データも利用しながら、氷床質量収支の詳細な空間分布を調べることで、氷河の流動や大陸縁辺域での質量収支を明らかにすることを目指した。

具体的には、空間分解能の優れた衛星高度計データを用い、今回の研究対象地域に限定した衛星軌道に沿っての詳細な高度変化を求め、その特徴を調べるとともに、衛星重力データについては、複数の GIA モデルを用いることで誤差の評価を行いながら、高度計データ、RACMO モデル、雪尺データとの比較を行うこととした。なお、昭和基地や周辺地域では、連携研究者らにより、地上での重力測定や GNSS による氷床流動の観測も実施されているが、今回は、これらのデータとの定量的な比較・検討までは至っておらず、今後の課題である。

4. 研究成果

(1) 氷床変動と表面地形

主に Envisat の衛星高度計データを用い、白瀬氷河を含む、昭和基地周辺での氷床変動の詳細な分布やその特徴について調べた。その結果、大きな氷床高度変化を示す場所は、海岸線に近い領域にほぼ限定されており、図 1 に示すように、表面地形の勾配の大きい地域と良く一致していることが明らかになった。また、これらの地域では、年周期的な高度変化も大きく、図 2 に示す地表風のプロット(大気モデルによる 2002 年 6 月の例)ともよい相関がみられる。このことは、氷床上の

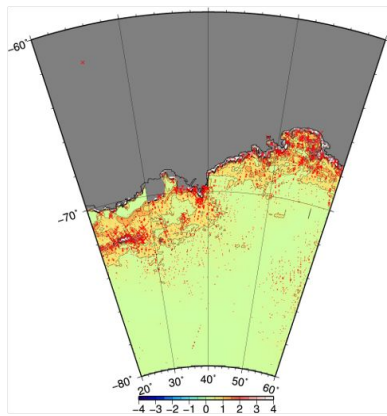


図1. 地形勾配と氷床高度変化

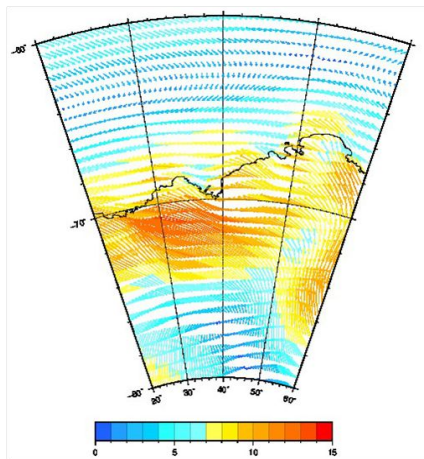


図2. 2002年6月の地表風

積雪が地表風により運ばれ、地表傾斜の大きいところに吹き溜まることにより大きな高度変化を生じさせていることを示唆するものである。

(2) 白瀬氷河流域での質量収支

これまでの研究により、図3に示す白瀬氷河周辺での質量増加の主要因は、降雪による質量増加であることは間違いないと考えられている。特に、2008年から2012年にかけては、顕著な降雪の増加が観測されており、これはGRACEのみならず、衛星高度計データやRACMOの表面質量収支モデル、昭和基地や周辺地域での地上観測でも確認されている。

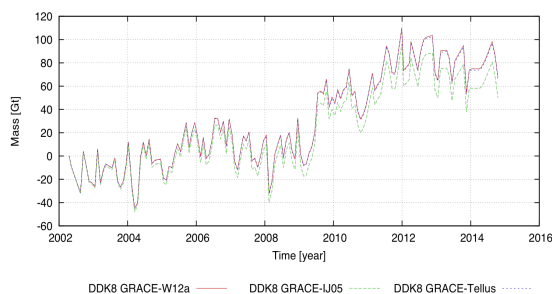


図3. GRACEによる白瀬氷河流域の質量変動

ところで、このような急激な降雪量変化に伴い、氷河流動速度や沿岸からの流出量に変化が生じるのかは、氷床質量収支のメカニズムを考える上で重要な問題である。GRACEによる質量変動は、氷床の流出量も含めた全質量変動量を与えるのに対し、衛星高度計や雪尺による測定は表面質量変動を与えることから、このような急激な変動期間に於いて、両者の収支が一致するかどうかを調べることは、大陸から海洋にかけての氷床の流出量変動を知る上で大変有用な情報を与えてくれるものと期待できる。一方、GRACEのデータと他のデータでは空間分解能に大きな差があることから、その比較のために、RACMOモデルを仲介として空間分解能の向上をはかり、GRACEのデータで校正したRACMOモデルと雪尺データを比較することで、流出量の変化に伴う質量変動がみられるかの検討を行った。この結果、大きな質量増加が観測された2002年から2012年の期間においても、現状の観測精度の範囲では、流出量についての有意な変化は見られなかった。

現在、白瀬氷河ではGNSSパイを用い、氷河の流動速度の実測観測も実施されており、この他の地上観測データも利用できるようになっている。さらに2017年に終了したGRACEの後続ミッションとして、2018年5月にはGRACE-FOも打ち上げられており、2018年中にはICESAT-2の打ち上げも予定されていることから、今後、本研究を発展させ、これらのデータを用いたより詳細な比較・検討も可能になるものと期待される。

<引用文献>

- Doi, K., K. Shibuya, H. Ikeda, Y. Fukuda: Continuous gravity observation with the superconducting gravimeter CT#043 at Syowa Station, Antarctica, Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica, An Overview in the IPY Perspective A. Capra, R. Dietrich(Eds.), 237-247.
- Fukuda Y. (2011): Monitoring Groundwater Variations Using Precise Gravimetry on Land and from Space, In Tniguchi Ed. Groundwater and Subsurface Environments - Human Impacts in Asian Coastal Cities-, Springer, 85-112.
- Shephard et al., 2012, A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, Science, 30, 1183-1189.
- Yamamoto, K., Y. Fukuda, K. Doi (2011): Interpretation of GIA and ice-sheet mass trends over Antarctica using GRACE and ICESat data as a constraint to GIA models, Tectonophysics, 511, 69-78, doi:10.1016/j.tecto.2010.11.010.
- 山本圭香・福田洋一(2010): 最近のGRACEデータと南極氷床, GIAの研究への利用について, 月刊地球, 32, 海洋出版, 224-228.
- Yamamoto, K., Y. Fukuda, K. Doi, H.

Motoyama (2008): Interpretation of the GRACE-derived mass trend in Enderby Land, Antarctica, *Polar Science*, 2, 267-276, doi: 10.1016/j.polar.2008.10.001.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

福田 洋一, 衛星観測による南極氷床質量収支, *低温科学* 76, 査読無, 2018, 187 - 204, doi:10.14943/lowtempsci.76.187.

[学会発表](計13件)

Yamamoto, K., Y. Fukuda, H. Motoyama, Ice-sheet mass balance in the Shirase Glacier Basin revealed by stake observations, SMB model, and GRACE satellite gravity data, 2017 AGU Fall Meeting, Morial Convention Center, New Orleans, Dec. 16, 2017 (Poster).

Fukuda, Y., Y. Aoyama, K. Doi, H. Hayakawa, J. Okuno, J. Nishijima, T. Kazama, K. Yamamoto, T. Higashi, K. Shibuya, Geodetic studies of GIA and ice sheet changes by JARE, IAG- IASPEI 2017, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, Aug. 2nd, 2017.

Yamamoto, K., H. Motoyama, Y. Aoyama, Y. Fukuda, Comparison of GRACE-derived surface mass balance on Shirase Ice Glacier with JARE snow-stakes observation, The 7th Symposium on Polar Science, NIPR, Nov. 29, 2016.

Aoyama, Y., K. Doi, Y. Fukuda, H. Hayakawa, J. Okuno, J. Nishijima, T. Kazama, K. Yamamoto, T. Higashi, K. Shibuya, Study on the ice sheet changes and GIA by absolute gravity measurements and GNSS observations in Soya Coast and Sor Rondane Mts., Antarctica, The 7th Symposium on Polar Science, NIPR, Nov. 29, 2016.

山本圭香, 本山秀明, 青山雄一, 福田洋一, 2002-2014年のGRACE衛星データを用いた南極しらせ氷河の質量収支の研究(3), 日本測地学会第126回講演会, 奥州市文化会館2016年10月14日(ポスター)

Fukuda, Y., K. Yamamoto, Y. Aoyama, K. Doi, J. Okuno, K. Matsuo, Surface Mass Balance around the Japanese Antarctic Station, Syowa, in East Antarctica, 2015 AGU Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, Dec. 16, 2015 (Poster)

Fukuda, Y., Y. Aoyama, K. Doi, K. Yamamoto, K. Matsuo, Y. Nogi, Gravity anomalies and ice mass movements around the Japanese Antarctic stations in East

Antarctica, 26th IUGG General Assembly 2015, Prague, Congress Centre, Czech, July 1st, 2015

Yamamoto, K., Y. Fukuda, Study of surface mass balance of Shirase Glacier as revealed by 2002 to 2014 GRACE satellite gravity data, The 6th Symposium on Polar Science, NIPR, Nov. 16, 2015 (Poster)

山本圭香, 福田洋一, 2002-2014年のGRACE衛星重力データを用いた南極しらせ氷河の質量収支の研究(2), 日本測地学会第124回講演会, 九州大学・西新プラザ, 2015年10月16日

福田洋一, 山本圭香, 青山雄一, 土井浩一郎, 奥野淳一, 松尾功二, 衛星高度計データによる昭和基地周辺での氷床変動, 日本測地学会第124回講演会, 九州大学・西新プラザ, 2015年10月16日

福田 洋一, 青山 雄一, 土井 浩一郎, 山本 圭香, 松尾 功二, 野木 義史: 東南極の日本の南極基地周辺での重力異常と氷床変動, 地球惑星科学連合2015年大会(SGD23-07), 千葉県千葉市, 幕張メッセ国際会議場, 2015年5月28日.

山本 圭香, 福田 洋一, 2002-2014年のGRACE衛星重力データを用いた南極しらせ氷河の質量収支の研究, 地球惑星科学連合2015年大会(MIS21-17), 千葉県千葉市, 幕張メッセ国際会議場, 2015年5月28日.

青山雄一, 土井浩一郎, 菅沼悠介, 岡田雅樹, 福田洋一, 白水薫, GNSSを用いたセール・ロンダーネ山地における氷床流動と表面形状の測定, 日本測地学会第122回講演会, つくばサイエンス・インフォメーションセンター, 2014年11月5日

6. 研究組織

(1)研究代表者

福田 洋一 (FUKUDA, Yoichi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 30133854

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

青山 雄一 (AOYAMA, Yuichi)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号: 70270452

土井 浩一郎 (DOI, Koichiro)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号: 80290873

(4)研究協力者

山本 圭香 (YAMAMOTO, Keiko)
松尾 功二 (MATSUO, Koji)