

複数 SLR 衛星による地球の低次重力場変動観測から探る 過去 20 年間のグリーンランドと南極氷床の質量変動

松尾功二¹、Benjamin Fong Chao²、大坪俊通³、福田洋一¹、日置幸介⁴

¹ 京都大学理学研究科

² 台湾中央研究院地球科学研究所

³ 一橋大学大学院社会学研究科

⁴ 北海道大学理学研究科

Mass variations of Greenland and Antarctic ice sheets in the last two decades explored from the Earth's low-degree gravity field observation by multiple SLR satellites

Koji Matsuo¹, Benjamin Fong Chao², Toshimichi Otsubo³, Yoichi Fukuda¹, Kosuke Heki⁴

¹ Graduate School of Sciences, Kyoto University

² Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, ROC

³ Graduate School of Social Science, Hitotsubashi University

⁴ Graduate School of Sciences, Hokkaido University

The majority of the land ice on Earth lies in Greenland and Antarctica as continental ice sheets. Recent climate changes have brought about the large-scale ice loss in these regions. The space mission of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), launched in 2002, enables direct measurements of such mass variations over extensive areas through temporal variation in the Earth's gravity field. According to the GRACE observation during 2003-2010, the polar ice sheets experienced mass loss at the rates ~ 390 Gt/yr, amounting to $\sim 70\%$ of the total ice loss globally in the same period [Jacob *et al.*, 2012]. These massive and extensive mass losses are expected to be detected by the low-degree gravity field observation from the Satellite Laser Ranging (SLR) technique. Although limited in spatial resolution, the SLR data have been available for a longer time span than the GRACE data. In this study, we construct the time history of Greenland and Antarctic mass variation for the 21-year period of 1991-2011 using the SLR-derived, low-degree Stokes coefficients of the Earth's gravity field with degree and order up to 4. We shall show that our SLR results for the later half of the studied period since 2002 are well validated by the GRACE observations, while the numerical model for Greenland and Antarctic mass budget (RACMO2) [van den Broeke *et al.*, 2009; Shepherd *et al.*, 2012] further corroborates our results of Greenland and Antarctic ice mass variations extending back to the early 1990s. Here we use an analysis software package named 'c5++', developed by the Hitotsubashi University and National Institute of Information and Communications Technology of Japan [Otsubo and Gotoh, 2002; Hobiger *et al.*, 2011], to derive the changes in the Earth's gravity field from the SLR tracking data. Incorporating data from five SLR satellites: LAGEOS 1 & 2, Starlette, Ajisai, and Stella, we obtain monthly time series (henceforth the SLR HIT-U solution) of the gravitational Stokes coefficients of harmonic degree and order up to 4, for 21 years between January 1991 and December 2011. Then, we converted them to equivalent water mass changes following the relationship shown by Wahr *et al.* (1998). The contribution of Glacial Isostatic Adjustment (GIA) is corrected using the model of Paulson *et al.* (2007). Between 2003 and 2011, the linear trend map of the mass variation from SLR shows significant negative patterns in Greenland, agreeing well with that from GRACE. However, seen from SLR data, the mass trend map between 1991 and 2002 shows different behaviors: near-balance in Greenland prior to 2002 and shifting to decreasing afterwards. The ice mass in West Antarctica also shows similar trends as Greenland: i.e. near-balance prior to 2002 and shifting to decreasing afterwards. On the other hands, that in East Antarctica shows opposite trends: i.e. near-balance prior to 2002 and shifting to increasing afterwards. These mass variabilities agree well with numerical results of mass balance estimate by input output method [Shepherd *et al.*, 2012]. So, the present study demonstrates that the retrospective SLR data allow us to "observe" the mass variability of Greenland and Antarctica prior to the launch of GRACE mission in 2002. In this sense the SLR data series constitute a continuous benchmark that encompasses the history of all the useful estimates for ice mass variations of Greenland and Antarctica by various techniques over time.

地球上に存在する陸氷の大部分は大陸氷床としてグリーンランドと南極に貯蔵されている。地球温暖化に代表される近年の気候変動は、これら極域氷床の大規模な消失を招いている。2002年に始まった衛星重力ミッション Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)は、広域で起こる質量の時間変化を地球の重力場変動として直接的に計測する。2003-2010年における GRACE の重力観測によると、極域氷床は約-390Gt/yr の速度で氷を損失させている。これは、同時期に観測された全球的な氷質量損失率の約 70%に相当する [Jacob *et al.*, 2012]。このような大規模で広域にわたる質量の損失は、Satellite Laser Ranging (SLR) による低次重力場変動観測からも検出されることが期待される。SLR 重力データは GRACE 重力データと比べ空間解像度はかなり悪いが、GRACE よりも長い期間の重力データが利用可能である。本研究は、SLR から導いた地球の低次重力場変動解を用いて、1991-2011年の21年間に及ぶグリーンランドと南極氷床の質量変動の推移を探索。データの信頼性を確認するために、2003年以降

の SLR データは同期間の GRACE による観測結果と比較する。また、それ以前の 1990 年代に関しては、グリーンランド氷床と南極氷床の質量収支モデル RACMO2 [van den Broeke et al., 2009; Sphepherd et al., 2012] の結果を元に検討を行う。SLR 追尾データから地球重力場の時間変動を導くために、一橋大学と独立行政法人情報通信研究機構が共同で開発した宇宙測地データ統合解析ソフトウェア'c5++'を使用した。5 つの SLR 衛星(LAGEOS 1 & 2、Starlette、あじさい、Stella)の軌道データを統合的に取り込み、1991 年 1 月から 2011 年 12 月までの次数および位数 4 次までの月毎の地球重力場係数を求めた (SLR HIT-U 解と呼ぶ)。そして、これらの重力場係数を Wahr et al. (1998) に倣って、質量の時間変化に換算する。なお、後氷期回復の寄与は Paulson et al. (2007) のモデルを用いて補正した。2003 年から 2011 年では、SLR から導いたグリーンランドおよび南極氷床の質量経年変化は、顕著な減少傾向を示しており、GRACE の結果とも非常に良く一致する。しかしながら、1991 年から 2002 年では、2000 年代とはかなり異なった傾向が見られる。グリーンランドでは、2002 年以前は大きな質量変動は起こっておらずほぼ均衡状態で、その後急速な質量減少傾向に転じている (図 1)。西南極では、グリーンランドと同じような傾向であり、2002 年以前はほぼ均衡、その後急速な減少が見られた。一方、東南極では、2002 年以前はほぼ均衡で、2002 年以降で質量の増加が見られた。このような結果は、Shepherd et al. (2012) による極域氷床の質量収支モデルと調和的である。以上のように、SLR のような古くから行われている重力観測からも、グリーンランドと南極氷床の質量変動を検出できることが確認された。SLR 衛星は一度地球の周回軌道に入ってしまうと、半永久的に運用できる。それゆえ、SLR 重力データは、グリーンランドおよび南極氷床の質量変動の傾向を恒久的に捉える、一種のベンチマークになりうるだろう。

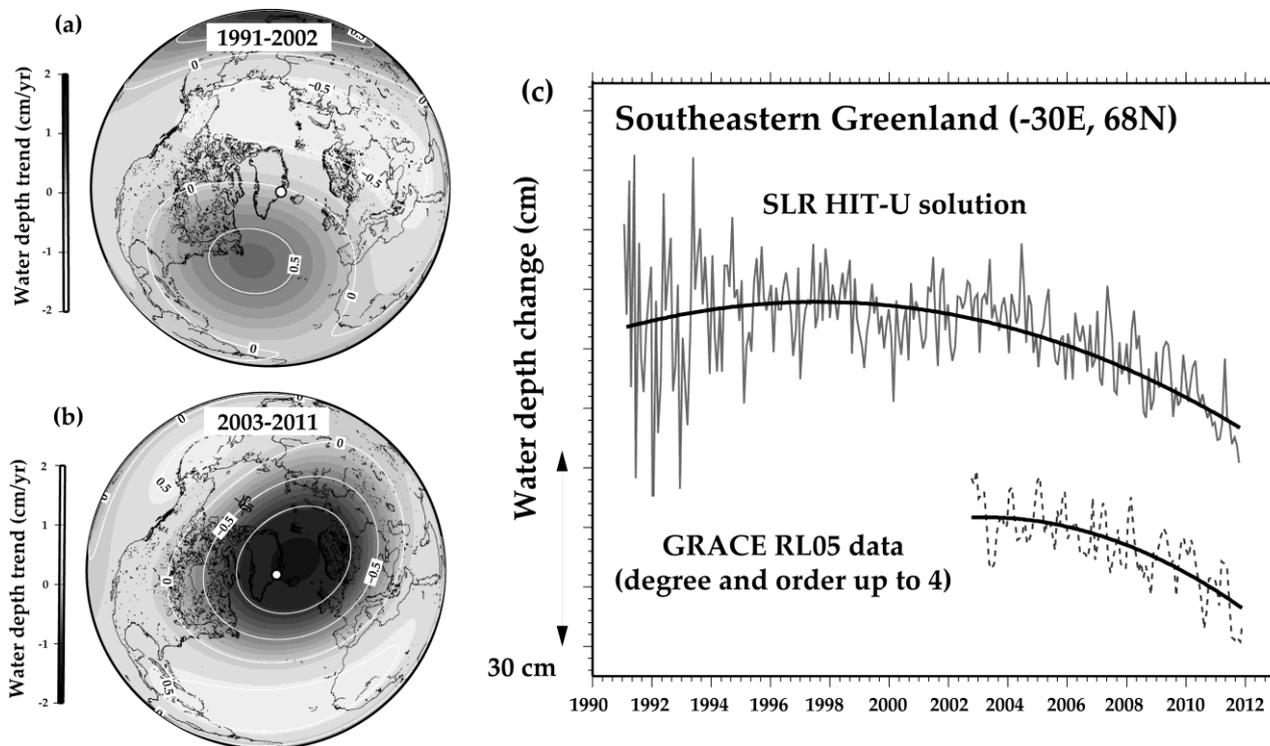


Fig. 1. The SLR-derived (SLR HIT-U solution) (a) linear mass trend map in 1991-2002, and (b) linear mass trend map in 2003-2011. Here the contribution of GIA was corrected using the model value (Paulson et al., 2007). (c) Time-series of mass variation at south-eastern Greenland locality (-30E, 68N) derived from SLR and GRACE (degree and order up to 4). These two time-series agree well with each other.

図1. SLR重力解(SLR HIT-U solution)から導いた、(a) 1991-2002年の質量経年変化、(b) 2003-2011年の質量経年変化。なお、後氷期回復による寄与はモデル(Paulson et al., 2007)を用いることで補正している。(c) SLRとGRACE(4次まで)から導いたグリーンランド南西部(-30E, 68N)における質量変動の時系列。SLRとGRACEの時系列はともに調和的である、