

人工衛星の軌道の揺らぎから紐解く地球の質量分布の時空間的な変動 (第5年次)

実施期間

平成30年度～令和4年度

地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室 松尾 功二

1. はじめに

地球上の水は、太陽熱をエネルギー源として、氷・水・水蒸気と姿を変えながら陸・海・氷床間を移動する。地球システムが安定的に機能すれば、水は規則的に循環するが、実際には、太陽活動や人間活動等に起因する環境変動の影響を受けることから、このサイクルは僅かに乱れる。その結果、陸・海・氷床で貯蔵される水の量（質量）は時間とともに変化する。つまり、陸－海－氷床の質量分布の時間推移は、地球環境変動の変遷を反映する。

地球上の質量分布の時間推移は、重力の時空間変化を計測することで観測できる。重力変化を広域かつ連続的に捉えるには、人工衛星を用いた計測手法が効果的であり、これは人工衛星の軌道と速度の変化を精密に計測することで行われる。本研究では、衛星レーザ測距（SLR; Satellite Laser Ranging）が40年以上にわたり収集を続ける人工衛星の軌道データを用いて、陸・海・氷床との間で取引される水の移動量（質量収支）の時間変化を追跡する。そして、重力観測衛星 GRACE や海面高度計衛星といった他の衛星測地データを併用するとともに、大気再解析データや陸水貯留量データといった気候データとも照らし合わせることで、質量移動の原因となった地球物理現象の解明に挑む。

2. 研究内容

本年度はこれまでの研究で開発された SLR 重力解を用いて全球質量変化を導出し、その原因となった地球物理現象について考察を行った。重力解の導出には、LAGEOS-1, LAGEOS-2, Ajisai, Starlette, Stella, Larets, LARES の7つの SLR 衛星追尾データを用いた。なお、Larets 衛星データは2006年1月以降、LARES 衛星データは2012年3月以降で利用可能である。解析には、共同研究者である一橋大学の平野俊通教授らが開発した宇宙測地データ統合解析ソフトウェア“c5++”（Otsubo et al., 2019）を使用し、地球重力場を表す球面調和関数係数（ストークス係数）を次数5次まで月毎に導出した。そして、Wahr et al. (1998) の手法に倣い、ストークス係数を質量変化である相当水厚変化に変換した。

得られた全球質量変化の原因を考察するため、地球物理モデルを用いてその再現を試みた。地球上または内部を移動する物質のうち大規模な重力変化を伴うものとしては、大気質量、陸水質量、海水質量、陸氷質量、後氷期回復に伴うマントル流動などが挙げられる。大気質量の変化は ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）モデルの大気再解析データをもとに推定した。陸水質量は GLDAS（Global Land Data Assimilation System）モデルの陸水貯留量データをもとに推定した。なお、本モデルには表層水（河川や湖沼など）や200cm以深の地下水の寄与は含まれていない。海水質量の変化は衛星高度計が観測する海面高データと Argo フロートが観測する海水温・塩分濃度データをもとに推定した。陸氷質量の変化については、グリーンランド氷床と南極氷床を考慮し、衛星高度計の地表高度データと氷床モデルの Firn 密度データをもとに推定した。後氷期回復による質量変化は、Peltier et al. (2015) のモデルを用いた。

さらに、SLR 重力解及び物理モデルの結果の妥当性を確認するため、GRACE 重力解との比較も行

った．なお，SLR，物理モデル，GRACE それぞれの時間幅を合わせるため，解析した期間は 2002 年 4 月から 2017 年 12 月までとした．

3. 研究結果

図-1 に，(a)SLR，(b)物理モデル，(c)GRACE から導出された経年的な全球質量変化（次数 5 次まで）を示す．それぞれの空間パターンはおおよそ一致するが，SLR の結果は他の結果と比べ北極域や南極域のシグナルが大きい．SLR 重力解の各ストークス係数の時系列を確認したところ，帯状偶数項（C20 項と C40 項）の変化の振幅が他の解と比べて大きい傾向にあるようであった．これらの項の精度にはまだ改善の余地があると言える．

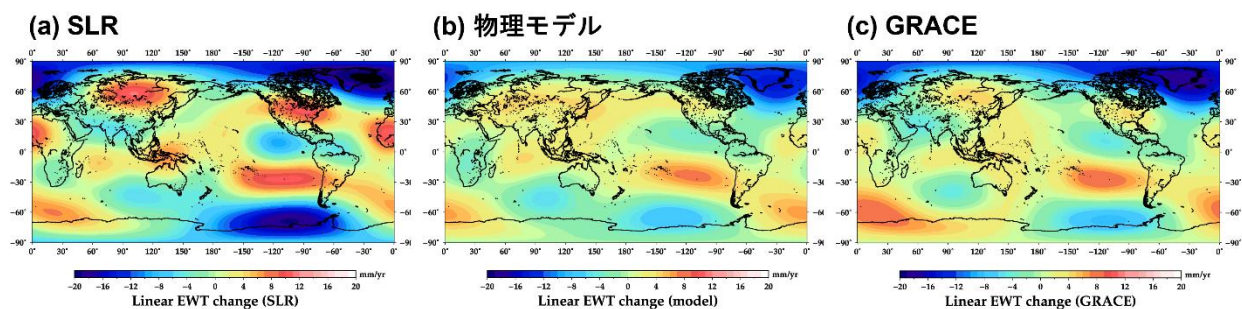


図-1 (a)SLR，(b)物理モデル，(c)GRACE から導出された全球質量変化（次数 5 次まで）の経年変化．質量変化は相当水厚（Equivalent Water Thickness: EWT）変化で表現されている．

SLR 重力解で確認される顕著な経年質量変化のシグナルとしては，(1)グリーンランド周辺における質量減少，(2)南極における質量変化，(3)海域における質量変化，(4)北米大陸における質量増加，(5)ユーラシア大陸北東部における質量増加，(6)アフリカ大陸北西部における質量増加，などが挙げられる．これらを解釈するため，図-2 に物理モデルに基づく(a)大気質量，(b)陸水質量，(c)海水質量，(d)グリーンランド氷床，(e)南極氷床，(f)後氷期回復の経年質量変化を示す．(1)については Matsuo et al. (2013) でも報告しているが，気候変動に伴う氷床消失を捉えており，図-2(d)とも良く一致する．(2)と(3)については，気候変動に伴う氷床消失と積雪量増加及び後氷期回復によるもので，空間パターンは図-2(e)と(f)の和と一致する．(3)については，極域の強いシグナルで生じるギブスの振動の影響もあるが，全体傾向としては図 2-(c)で示される海水質量の増加を反映している．(4)については，後氷期回復によるものと考えられるが，図-2(f)で示される物理モデルと比べて振幅が大きいことから，ギブスの振動や SLR 重力解の誤差の影響も考えられる．(5)と(6)については，原因としては陸水質量や大気質量の変化が考えられるが，図-2(a)と(b)で示される物理モデルでは再現されていないため，SLR 重力解の誤差の可能性が高い．

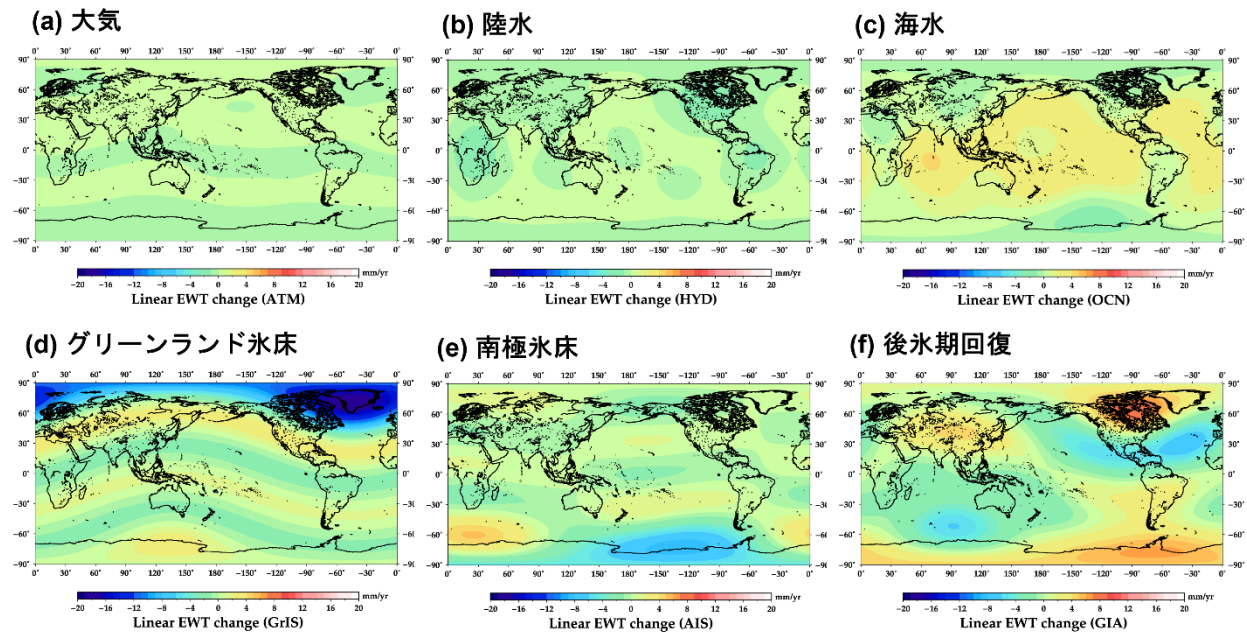


図-2 物理モデルに基づく(a)大気, (b)陸水, (c)海水, (d)グリーンランド氷床, (e)南極氷床, (f)後氷期回復の経年質量変化(次数5次まで). 解析期間は2002年4月から2017年12月までである.

4. 結論

本研究では, SLR 重力解から全球質量変化を推定し, その物理的解釈を試みた. その結果, 2002年4月から2017年12月までの経年質量変化としては, 特に極域氷床の質量減少が顕著で, それに付随した海洋質量の増加も確認できた. これらの結果は物理モデルや GRACE 重力解ともおおよそ調和的であることから, SLR は地球の全球質量収支の時間変化の追跡に十分活用可能であると言える. しかしながら, 現在の SLR 重力解は帯状偶数項の精度にまだ改善の余地があることから, 質量収支の定量評価への活用にはさらなる研究が必要であろう.

参考文献

- Matsuo, K., Chao, B.F., Otsubo, T., and Heki, K. (2013): Accelerated ice mass depletion revealed by low-degree gravity field from satellite laser ranging: Greenland, 1991-2011, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.40, 4662-4667, doi:10.1002/grl50900.
- Otsubo, T., Müller, H., Pavlis, E.C., Torrence, M.H., Thaller, D., Glotov, V.D., Wang, X., Sośnica, K., Meyer, U., and Wilkinson, M.J. (2019): Rapid response quality control service for the laser ranging tracking network, *Journal of Geodesy*, 93(11), 2335–2344. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1197-0>.
- Peltier, W.R., Argus, D.F., and Drummond, R. (2015): Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model: Global Glacial Isostatic Adjustment, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 120(1), 450–487. <https://doi.org/10.1002/2014JB011176>.
- Wahr, J., Molenaar, M., and Bryan, F. (1998): Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, 103, 30205-30229, doi: 10.1029/98JB02844.