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 4 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により，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

これまでの研究により，LAGEOS-1，LAGEOS-2，Ajisai，Starlette，Stella の 5 つの衛星を使用することで地球重力場を次数 5 まで導出可能であることを確認した．本研究では，新たに 2 つの SLR 衛星を追加することで，地球重力場の決定精度の向上を試みた．新たに追加したのは Larets 衛星と LARES 衛星である．これらの衛星は，軌道高度が比較的低く，軌道傾斜角も異なることから，次数 2 以上の重力場成分の決定精度の向上に期待できる．本研究で使用した SLR 衛星の仕様を表-1 にまとめる．

表-1　本研究で使用した SLR 衛星の仕様.

衛星名	打ち上げ年日	軌道高度	軌道傾斜角	質量
LAGEOS-1	1976 年 5 月 4 日	5860 km	109.84 度	406.965 kg
LAGEOS-2	1992 年 10 月 22 日	5620 km	52.64 度	405.38 kg
Ajisai	1986 年 8 月 12 日	1490 km	50 度	685 kg
Starlette	1975 年 2 月 6 日	812-1114 km	48.83 度	47.5 kg
Stella	1993 年 9 月 26 日	804-812 km	98.6 度	48 kg
Larets	2003 年 9 月 27 日	691 km	98.204 度	23.28 kg
LARES	2012 年 2 月 13 日	1450 km	69.5 度	386.8 kg

解析には，共同研究者である一橋大学の大坪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エア”c5++”（大坪ほか, 2010）を用いた．データの全期間は 2000 年 1 月～2021 年 6 月，解析はデータ期間を 1 か月として 1 か月ずつずらして行う．まず，昨年度までに用いた 5 つの SLR 衛星のデータを用いて，地球重力場を次数 5 まで推定する．続いて，2 つの SLR 衛星のデータを追加して，同様に推定する．その際，Larets 衛星のデータは 2006 年 1 月以降，LARES 衛星のデータは 2012 年 3 月以降を用いた．得られた推定結果は，重力観測衛星 GRACE（データ期間：2002 年 4 月～2017 年 5 月）と GRACE-FO（データ期間：2018 年 6 月～現在）の観測結果と比較することで評価した．

3. 研究結果

図-1 と図-2 に，特に改善効果が見られた帯球成分の奇数項（C30 項と C50 項）の結果をそれぞれ示す．いずれにおいても，5 衛星を用いた場合に比べると，7 衛星を用いた場合には，2012 年 3 月以降で明らかに GRACE 及び GRACE-FO の観測結果との整合性が向上している．この結果は LARES 衛星の追加が地球重力場の決定精度の向上に大きく寄与したことを示している．結果は図示しないが，扇球成分 C33 項と S33 項においても同様の明瞭な改善効果が確認された．

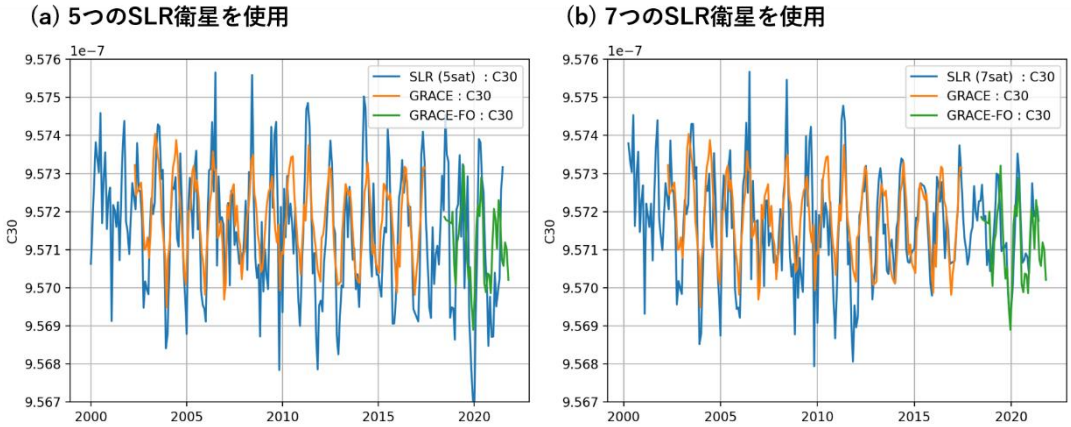

図-1　地球重力場係数 C30 項の時系列図．青線が SLR 観測，橙線が GRACE，緑線が GRACE-FO の観測結果である．(a)は 5 つの SLR 衛星（LAGEOS-1，LAGEOS-2，Ajisai，Starlette，Stella），(b)は 7 つの SLR 衛星（Larets と LARES を追加）の結果である．

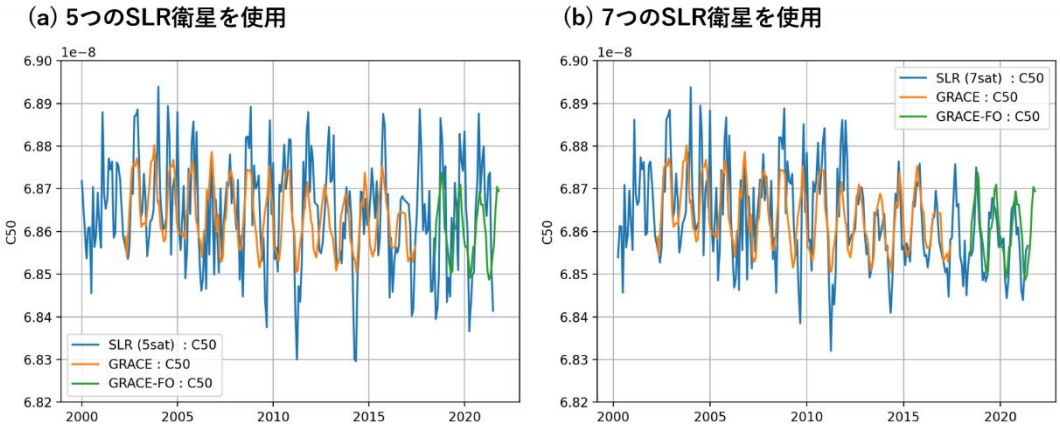

図-2　地球重力場係数 C50 項の時系列図．詳細は図-1 と同様である．

LARES 衛星の導入による改善効果が大きい一方で，Larets 衛星の導入では改善効果は特に確認できなかった．その原因を考察するため，図-3 に C30 項と C50 項の推定結果の formal error の時系列を示す．LARES 衛星を追加した 2012 年 3 月以降では formal error がステップ状に減少しているのに対し，Larets 衛星を追加した 2006 年以降では formal error の明瞭な減少は見られない．すなわち，今回の解析において，formal error の低減効果については，Larets 衛星の寄与がほとんど無かったことが分かる．

この原因として以下の 3 つが考えられる．1 つ目は Larets 衛星の軌道が Stella 衛星と類似していることである．SLR による全地球重力場推定では，様々な軌道の衛星データを使用することが重要であり，類似した衛星データの追加では改善効果は低いと考えられる．2 つ目は Larets 衛星の軌道決定精度が低いことである．表-1 のとおり，Larets 衛星は軌道高度が最も低く，質量が最も小さい．そのため，大気抵抗といった摂動力の影響を強く受けると考えられる．各 SLR 衛星の軌道誤差（標準偏差）を確認したところ，LAGEOS-1 と LAGEOS-2 は 1～2cm，Ajisai は 2.5～3cm，Starlette と Stella は 3～4cm，LARES は 2～2.5cm であるのに対し，Larets は 4～5cm であった．軌道誤差が大きいと解析時の重量が減少するため，重力場決定への寄与が他の衛星に比べて低くなったと考えられる．3 つ目は Larets 衛星の観測頻度が低いことである．全衛星のデータで解析した解において，7 つの SLR 衛星のうち Larets 衛星の観測数が最も少なく，7 衛星が揃った 2012 年 3 月以降における Larets 衛星の月毎観測数は，全体のおおよそ 5%程度に留まっている．

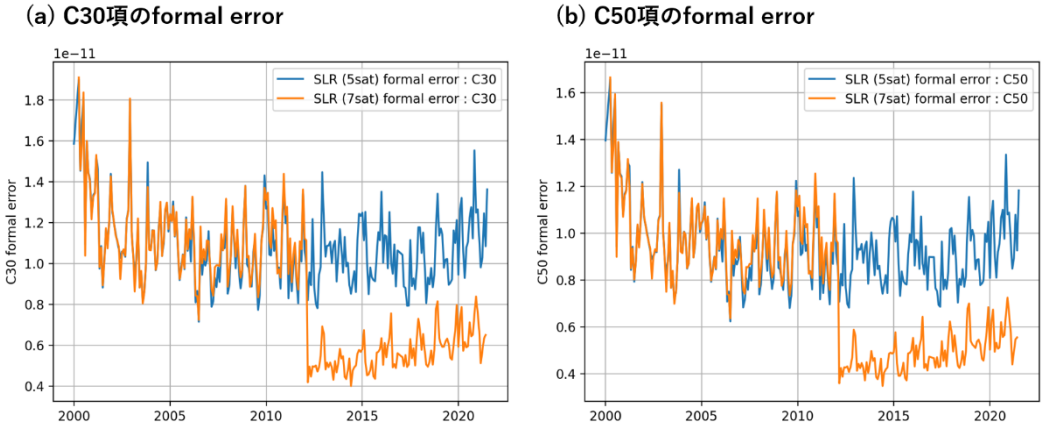

図-3　地球重力場係数の formal error の時系列図．青線が 5 つの SLR 衛星（LAGEOS-1，LAGEOS-2，Ajisai，Starlette，Stella）を使用した場合，橙線が 7 つの SLR 衛星（Larets と LARES の追加）を使用した場合である．(a)は C30 項の formal error を示し，(b)は C50 項の formal error を示す．

4．結論

本研究では，これまでの SLR 解析に Larets 衛星と LARES 衛星を追加することにより，地球重力場の決定精度の向上を試みた．その結果，LARES 衛星の追加の効果は明瞭であり，特に帯球成分の奇数項（C30 項と C50 項）において大きな改善が見られた．一方，Larets 衛星の追加による改善効果はほとんど無かった．その一因として Larets 衛星の軌道誤差が大きいことが考えられる．今後は，経験的加速度項の推定をパラメータ調整することで Larets 衛星の軌道誤差を低減させ，地球重力場推定への寄与向上を試みる．

時間変化する地球重力場は GRACE-FO 衛星からも決定されているが，当該衛星は打ち上げ直後に 1 つの加速度計が故障しており，それに起因して C30 項の決定精度が低下しているとの報告がある（Loomis et al., 2020）．この問題は GRACE-FO 衛星の後継機が打ち上がるまで続くことから，SLR に

よる地球重力場決定の重要性が今後益々高まるものと推測される.

参考文献

大坪俊通，HOBIGER Thomas，後藤忠広，久保岡俊宏，関戸衛，瀧口博士，竹内央（2010）：宇宙測地技術解析ソフトウエア c5++の開発，日本測地学会第 114 回講演会要旨集，114th，3-4.

Loomis, B.D., Rachlin, K.E., Wiese, D.N., Landerer, F.W., and Luthcke, S.B. (2020): Replacing GRACE/GRACE-FO with Satellite Laser Ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet Mass Change. Geophys. Res. Lett., 47(3):e2019GL085, 488.