

ジオイドと重力場の時間変動抽出と機構解明に関する研究（第9年次）

実施期間 平成28年度～令和7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

地球の形状の近似としての準拋楕円体及びそれに基づいて定義される座標値（緯度・経度・楕円体高・標高）を複雑な形状を持つ現実の地球へ適切に関連付けるためには、地球の物理的性質である重力場を用いる必要がある。標高は、重力場の等ポテンシャル面の一つとして定義されたジオイドからの距離であるため、特に高さに関しては重力場の影響は大きく、純粋に幾何学的に決定された楕円体高から日常生活に不可欠な標高の値を正確に得るためには精密なジオイドが必要となる。近年 GNSS 観測による標高決定手法が普及し、高さの基準としてのジオイドの重要性は一層増している。地球のジオイド及び重力場は地球内部の質量分布を反映して空間的に大きく変動するが、定常的な地殻変動や地震による質量の再配分によって時間的にも変動する。そのようなジオイド及び重力の時間変化をモデルとして表現することは、ジオイド及び重力場をある **Reference epoch** における場とそれからの変化分に分離することを可能とし、より現実に近い測地基準座標系の基準面を実現するための基礎を与える。また変動場を監視することで地震や定常的な地殻変動といった様々な変動がジオイド変化に与える影響を把握し、ジオイドを高さの基準として構築した測地基準座標系の維持・管理へ反映することができる。

本研究は、ジオイドや重力に関する地球物理学の知見に基づいて、衛星重力測定、衛星アルチメータ、地上重力測定及び地殻変動などの多様な測地観測データを同化することでジオイド及び重力の定常モデルと時間変化モデルを作成し、測地基準座標系の更新の要否を判断するための基礎資料とするとともに時間変化の要因に対する解釈を与えることを目的とする。

2. 研究内容

本年度は、黒潮大蛇行によって生じる日本列島の荷重変位に関する研究を行った。荷重変位は表層の質量変化で生じるジオイド変化に荷重ラブ数・志田数をかけることで算出されるもので、その分析は測地基準座標系の維持管理や GNSS 連続観測網の地殻変動検知能力の向上に資する。

黒潮は日本近海における最大の海流である。その流れは日本列島の南岸に沿って南西から北東に向かうが、しばし紀伊半島沖から東海沖にて南に大きく蛇行することがある。これを黒潮大蛇行と呼ぶ。黒潮大蛇行は1965年以降、過去6度発生しているが、2017年8月に発生したイベントは7年以上にもわたって継続している。これは観測史上最長の継続期間である。今回のイベントに伴う海面変動は紀伊半島沖にて最大1mにも及ぶことが海面高度衛星から確認されている。本研究では黒潮大蛇行によって生じる荷重変位を海面高度衛星データ、海水温データ、塩分濃度データを用いて評価した。

3. 計算手法

荷重変位の計算式は以下のとおりである (Farrell, 1972)。

$$\Delta E = \frac{R}{\sin \theta} \sum_{n=0}^{n_{max}} l'_n \sum_{m=0}^n m(-\Delta C_{nm} \sin m\lambda + \Delta S_{nm} \cos m\lambda) \tilde{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

$$\Delta N = -R \sum_{n=0}^{n_{max}} l'_n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \tilde{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (2)$$

$$\Delta U = R \sum_{n=0}^{n_{max}} h'_n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \tilde{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (3)$$

ΔE , ΔN , ΔU はそれぞれ東西, 南北, 上下方向の荷重変位である. R は地球の平均半径, θ と λ は地心緯度と経度, h'_n と l'_n は荷重ラプ数と荷重志田数, n と m は球面調和関数係数の次数と位数, n_{max} は最大次数, ΔC_{nm} と ΔS_{nm} はジオイド変化を表す球面調和関数係数, \tilde{P}_{nm} は完全正規化されたルジャンドル陪関数である. なお, 本研究では最大次数は 180 次 (約 100 km の空間解像度) とした.

黒潮大蛇行に伴う荷重変位を推定するためには, 海洋質量厚変化から ΔC_{nm} と ΔS_{nm} を算出する必要がある. 海洋質量厚変化は, 海面高変化からステリック高変化を差し引くことで導出できる. 本研究では, 海面高変化を海面高度衛星による観測結果 (Pujol et al., 2022) から, ステリック高変化を海水温及び塩分濃度データから推定した. 海水温及び塩分濃度データは Met Office Hadley Centre が提供するデータセット (EN4.2.2) を使用し (Good et al., 2013), これらを用いたステリック高変化の推定は Gill (1982) と Chen et al., (2013) の手法に倣った. ΔC_{nm} と ΔS_{nm} は, 以下の式を用いて計算した.

$$\{\Delta C_{nm}, \Delta S_{nm}\} = \frac{3}{4\pi R \rho_{ave} (2n+1)} \int_0^{2\pi} d\lambda \int_0^{\pi} \rho_w \Delta h(\varphi, \lambda) \tilde{P}_{nm}(\cos \theta) \begin{Bmatrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{Bmatrix} \sin \theta d\theta \quad (4)$$

ρ_{ave} は地球の平均密度, ρ_w は海水密度, Δh は海洋質量厚変化, φ は地理緯度である.

4. 研究結果

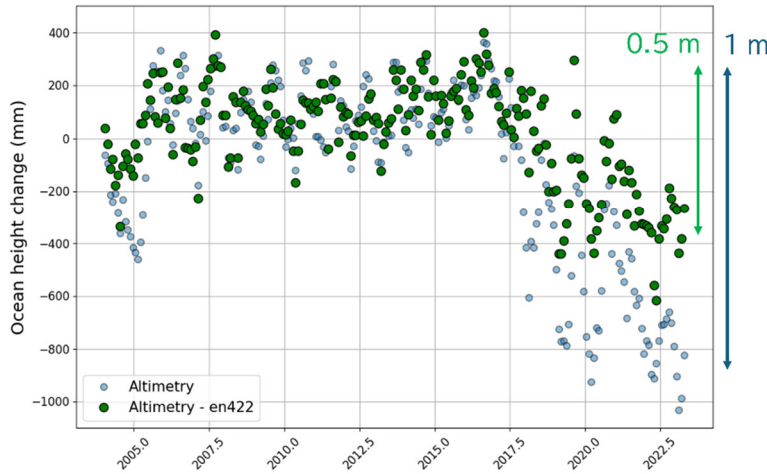
図-1(a)に紀伊半島沖における海面高変化と海洋質量厚変化の時系列図を示す. 2017 年中旬から海面高の沈下傾向が見られ, 2020 年頃になると 1 m にも及ぶ海面高の沈下が生じている. このうち, 海洋質量厚変化の成分は 0.5 m ほどであり, 観測された海面高変化のうちステリック成分と質量成分はおおよそ半々であると言える. 図-1(b)から 2017 年中旬以降の黒潮大蛇行によって生じた海洋質量厚変化は, 紀伊半島沖にて最大となることが分かった.

図-2(a)に紀伊半島南部の海洋荷重変位の時系列図を示す. 丸点は1か月ごとの値を示し, 太線は1年間の移動平均を示す. この地域は紀伊半島沖に隣接する陸域であり, 図-2(b)に示されるように顕著な海洋荷重変位が生じている. 黒潮大蛇行発生期間 (2017年中旬以降) に着目すると, 黒潮大蛇行に伴う海洋質量厚変化により, 南北方向に約1 mm, 上下方向に約3 mmの海洋荷重変位が生じたという結果が得られた.

図-3(a)に紀伊半島南部におけるGNSS測位解の時系列図を示す. 丸点は1日ごとの測位解を示し, 太線は1年間の移動平均を示す. GNSS測位解の時系列は, 紀伊半島南部に位置する19点のGEONETデータをスタッキングすることで導出した. プレートテクトニクス等に伴う経年的地殻変動や, 陸水荷重等による季節的地殻変動, 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時及び地震後地殻変動の影響は最小二乗法による関数フィッティングで除去した. 2015~2017年 (図-3(a)の薄緑で示した期間) や2020~2023年 (図-3(a)の薄赤で示した期間) に顕著な東西・上下変位が見られるが, これらは紀伊水道及び紀伊半島で発生したスロースリップイベント (SSE) によるものと考えられる. 図2-(a)によると, 黒

潮大蛇行による荷重変位は2017.5~2019.0年の期間(図-3(a)の薄青で示した期間)で最も顕著であることから、この期間に着目してGNSS測位解と海洋荷重変位を比較した。その時系列の比較結果を図-3(b)に示す。SSEの影響を受けてはいるが、東西、南北、上下方向ともに両者はおおよそ調和的な傾向であることが確認された。

(a) 紀伊半島沖の海面高変化と海洋質量厚変化



(b) 2016年と2022年の海洋質量厚変化

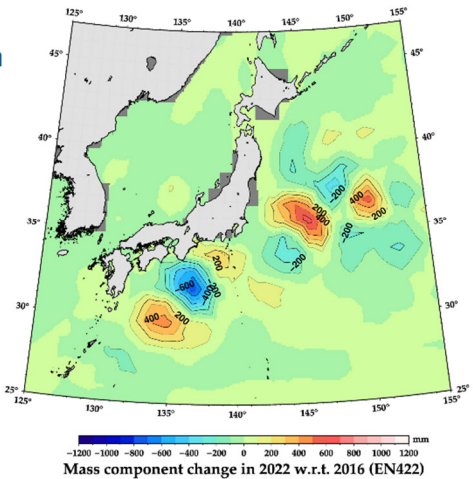
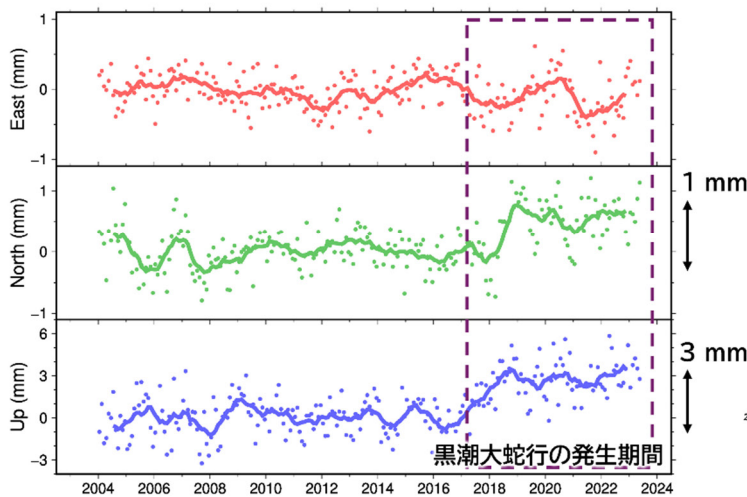


図-1 (a)紀伊半島沖の海面高変化(薄い青丸)と海洋質量厚変化(濃い緑丸)の時系列, (b)2016年と2022年の海洋質量厚変化の空間分布。

(a) 紀伊半島南部の海洋荷重変位



(b) 2016年と2022年間の海洋荷重変位

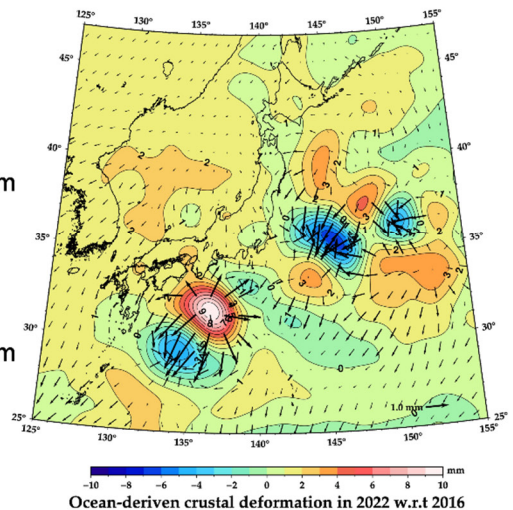
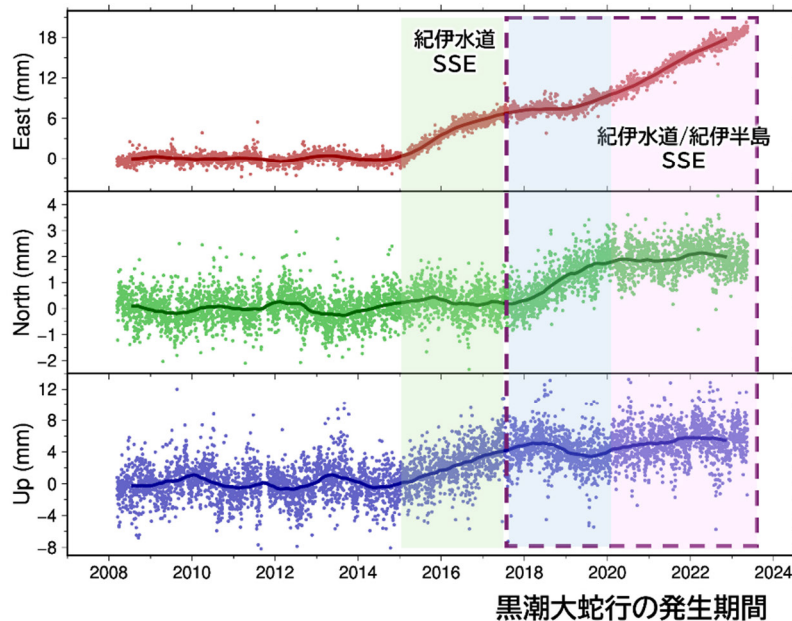


図-2 (a)紀伊半島南部の海洋荷重変位の時系列, (b)2016年と2022年の海洋荷重変位の空間分布。なお、経年変化と季節変化は関数フィッティングにより除去している。

(a) 紀伊半島南部のGNSS測位解



(b) 2017.5~2019.0年の拡大図

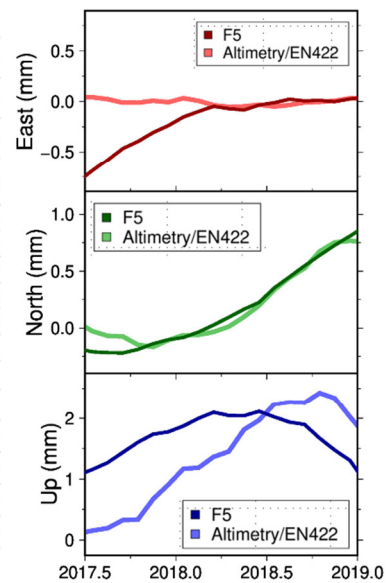


図-3 (a)紀伊半島南部のGNSS測位解の時系列, (b)2017.5年~2019.0年のGNSS測位解と海洋荷重変位の時系列. なお, 経年変化, 季節変化, 2011年東北地方太平洋沖地震の影響は関数フィッティングにより除去している.

5. 結論

本研究は, 日本列島における測地基準座標系の維持管理やGNSS連続観測網の地殻変動検知能力の向上を目的に, 表層質量変化に伴うジオイド変化から黒潮大蛇行による荷重変位を推定し, GNSS測位解との比較を行った. その結果, 日本列島の陸域において, 2017年中旬以降に発生した黒潮大蛇行によって南北方向に1mm, 上下方向に3mm程度の荷重変位が生じることが分かった. これらの結果はGNSS測位解ともおおよそ調和的であったことから, 海洋荷重変位は日本の測地基準座標系及びGNSS連続観測網に影響を及ぼすことが明らかになった.

今後は, 本成果を基に全国の荷重変位補正モデルを構築する予定である.

参考文献

- Chen, J.L., C.R. Wilson, and B.D. Tapley (2013): Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise, *Nature Geoscience*, 6(7), 549–552. doi: 10.1038/NGEO1829
- Farrell, W.E. (1972): Deformation of the Earth by surface loads, *Reviews of Geophysics*, 10(3), 761–797. doi: 10.1029/RG010i003p00761
- Gill, A. (1982): *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York, 662.
- Good, S. A., M. J. Martin, and N. A. Rayner (2013): EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 118, 6704–6716.
- Pujol, M.-I., Taburet, G., and SL-TAC team (2022): Sea Level TAC – DUACS products, Copernicus Marine [data set]. doi: 10.48670/moi-00148