

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 10 年次）

実施期間 平成 28 年度～令和 8 年度
地理地殻活動研究センター 松尾 功二
宇宙測地研究室

1. はじめに

地球形状の幾何学的近似である地球準拋楕円体に基づいて定義される座標値（緯度・経度・楕円体高・標高）を、複雑な形状を有する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考慮する必要がある。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る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が大きく、純粋に幾何学的に決定される楕円体高から日常生活や社会基盤に不可欠な標高を正確に得るためには、高精度なジオイドが不可欠である。

近年、GNSS 観測による標高決定手法が広く普及し、高さの基準としてのジオイドの重要性は一層高まっている。一方で、ジオイド及び重力場は、地球表層及び内部における質量分布の変化を反映して、時間的に変動することが知られている。これらの時間変化は、定常的な地殻変動や地震に伴う質量再配分に加え、氷床・海洋・陸水質量変動など、さまざまな地球物理現象によって生じる。このため、GNSS 観測により高精度に決定される高さ情報を適切に解釈・利用するためには、ジオイドの時間変化を定量的に評価することが不可欠となる。

このようなジオイド及び重力場の時間変化を明示的にモデル化することにより、ジオイド及び重力場を、ある基準時（reference epoch）における定常成分と、それ以降の時間変化成分とに分離して取り扱うことが可能となる。この枠組みは、ジオイドを静的な基準面として扱う従来の考え方を拡張し、時間依存性を考慮した、より現実に応じた測地基準座標系の基準面を定義するための基礎を与えるものである。さらに、時間変化成分を継続的に評価・監視することにより、地震や定常的な地殻変動、さらには氷床・海洋・陸水質量変動などの各種地球物理現象が、ジオイド変化にどの程度寄与しているかを定量的に把握することが可能となる。

本研究では、ジオイド及び重力に関する地球物理学的知見に基づき、衛星重力観測、衛星高度観測、地上重力観測、並びに地殻変動観測などの多様な測地観測データを統合することにより、ジオイド及び重力の定常モデルと時間変化モデルを構築する。これらを通じて、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を提供するとともに、観測されるジオイド及び重力の時間変化に対する物理的要因の解釈を与えることを目的とする。

2. 研究内容

国土地理院は、日本の高さ基準系の基盤として、重力ジオイド・モデル JGEOID2024 を整備・公開している（松尾, 2025）。JGEOID2024 は約 3 cm の精度を有する一方で、日本列島及びその周辺では、地震活動、海洋変動、氷床及び陸水質量変動などに起因して、ジオイドが時間的に変化しうることが指摘されている。

本研究では、日本及びその周辺におけるジオイドの時間変化（動的成分）を、衛星高度計データ及び地球物理モデルを用いて推定することを目的とする。特に、ジオイド変化を総合量としてのみ評価するのではなく、複数の地球物理現象成分に分離し、地点別の時系列変化として推定・評価する。こ

れにより、特定地点におけるジオイド変化が、どの物理過程に起因し、どの時間スケールで支配されているのかを定量的に明らかにすることを目指す。

3. データ及び計算手法

本研究では、ジオイド変化に寄与する主要な地球物理現象として、後氷期回復 (GIA: Glacial Isostatic Adjustment)、極域氷床質量変動、海洋質量変動、陸水質量変動、及び地震活動を考慮した。なお、基準ポテンシャル W_0 の時間変化は本研究では考慮していない。解析期間は 2004 年から 2018 年までとした。

後氷期回復については、ICE-6G_D モデル (Peltier et al., 2018) を用いた。極域氷床質量変動は、衛星高度計データ及び Firn モデル (Schröder et al., 2019; Simonsen et al., 2021) に基づいて推定した。海洋質量変動については、衛星高度計データと Argo フロート観測 (Pujol et al., 2022; Good et al., 2013) を併用して評価した。陸水質量変動は、GLDAS v2.1 モデル (Rodell et al., 2004) を用いて推定した。

地震活動については、2011 年東北地方太平洋沖地震のみを対象とした。地震時及び余効に伴うジオイド変化は、粘弾性重力モデル (Wang et al., 2006) を用いて計算した。計算では、2 枚の矩形断層モデルを仮定し、マクスウェル粘弾性体からなる地球構造モデルに基づいて、地震時の変化及び余効変動を推定した。仮定した地球構造は、標高から深さ 0~3 km を海水層、3~60 km を弾性層、60~220 km を粘性係数 $1 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の粘性層、220~670 km を $1 \times 10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の粘性層、670~2,819 km を $1 \times 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の粘性層とした。

各地球物理現象によるジオイド変化は、球面調和関数の次数 180 まで展開して推定しており、対応する空間分解能は約 100 km である。これらの成分を個別に推定した上で、総合的なジオイド変化及び地点別のジオイド変化の時系列を算出した。

4. 研究結果

図-1 に、2004 年から 2018 年にかけてモデルにより推定された総合的な線形ジオイド変化 (空間分解能 100 km) の全球分布及び日本周辺の拡大図を示す。日本周辺においては、GIA によるジオイド変化は $0 \sim +0.15 \text{ mm/yr}$ の範囲に分布し、長期的かつ準線形な時間変化を示す。極域氷床質量変動、海洋質量変動、陸水質量変動についても、年率ではおおむね 0.1 mm/yr 程度以下の変化であり、広域的かつ緩やかな時間変化として現れている。一方、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴うジオイド変化は、これらの成分とは明確に異なる時間特性を示す。同震時には最大で約 $+20 \text{ mm}$ の急激なジオイド変化が推定され、その後 13 年間にわたる余効変動として最大約 $+10 \text{ mm}$ の変化が認められた。この地震起源の成分は、日本周辺におけるジオイド変化の中で最も支配的な要因である。

図-2 に、図-1 右図に示す 4 地点 (a) - (d) における、2004~2018 年の期間にモデルにより推定されたジオイド変化の時系列を示す。本研究では、総合的なジオイド変化に加え、GIA、極域氷床質量変動、海洋質量変動、陸水質量変動、及び 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時・余効変動を個別の成分として分離し、それぞれの時間変化を時系列として明示的に評価した。その結果、地点ごとに、ジオイド変化を支配する成分及びその時間スケールが異なることが明らかとなった。長期的には、GIA や極域氷床・海洋・陸水質量変動が準線形なトレンドとして寄与する一方、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う成分は、短期間に顕著な変化を生じさせ、その後も余効変動として継続的に影響を与えている。東北地方周辺以外の地域では、GIA 及び極域氷床質量変動に伴う長期的な準線形変動と、海洋・陸水質量変動に起因する季節変動が比較的顕著であるのに対し、東北地方周辺では、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う変動が支配的であると言える。

推定されたジオイド変化の妥当性を検証するため、GRACE 衛星によるジオイド変化観測結果との比較を行った。図-3 に、図-1 右図に示す 4 地点 (a) - (d) におけるモデル推定結果と GRACE 観測結果の比較を示す。GRACE の空間分解能に合わせてモデル推定結果を 500 km 分解能に平滑化した上で比較したところ、2004～2018 年における線形ジオイド変化及び時系列変化について、両者は全体として良好な一致を示した。

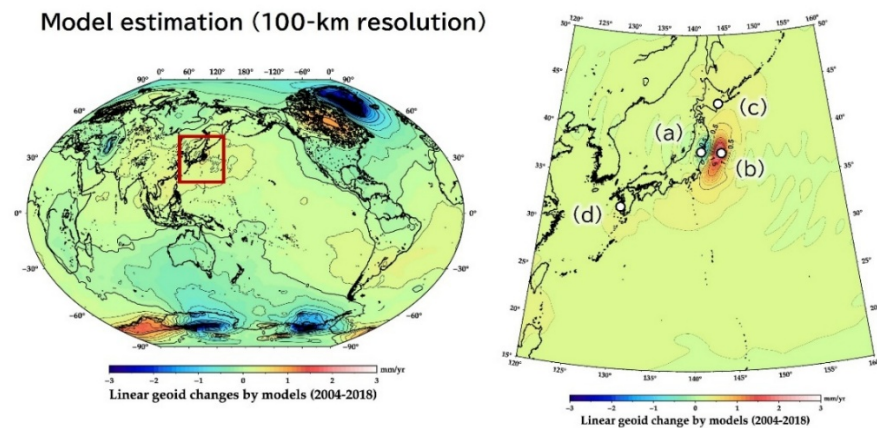


図-1 2004 年から 2018 年にかけてモデルにより推定された総合的な線形ジオイド変化（空間分解能 100 km）。左図は全球、右図は日本列島周辺を示す。

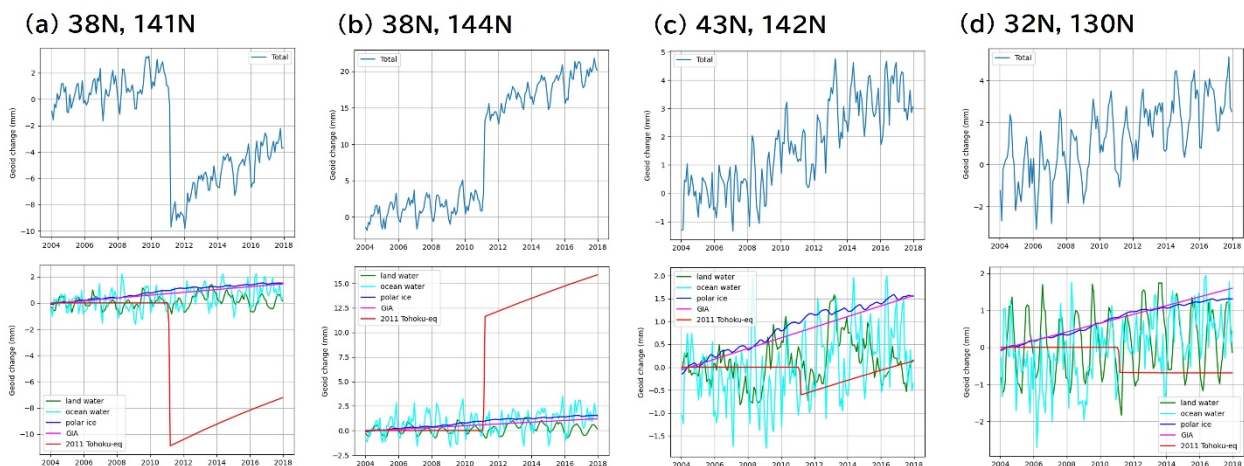


図-2 図-1 右図に示す 4 地点 (a) - (d) における、2004～2018 年の期間にモデルにより推定されたジオイド変化の時系列。上段は総変化、下段は各成分の寄与を示す。

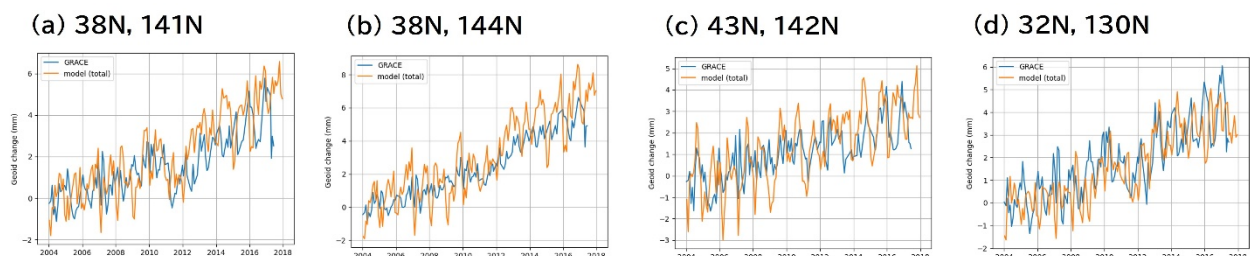


図-3 図-1 右図に示す 4 地点 (a) - (d) における、空間分解能を 500 km に平滑化した、2004～2018 年の期間のジオイド変化の時系列。モデル推定結果及び GRACE 観測推定結果を示す。

5. 結論

本研究では、衛星高度計データ及び複数の地球物理モデルを用いて、日本及びその周辺におけるジオイドの時間変化成分を推定した。本研究の最大の特徴は、ジオイド変化を複数の地球物理現象成分に分離し、地点別の時系列として定量的に評価した点にある。

その結果、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時及び余効変動が、日本周辺のジオイド変化に対して支配的な寄与を持つこと、また GIA や氷床・海洋・陸水質量変動が長期的なトレンドとして重畳していることが明らかとなった。さらに、モデル推定結果と GRACE 観測との比較により、これらの成分別時系列変化が観測的にも支持されることを確認した。

本研究で示した成分別ジオイド時系列評価は、静的なジオイド・モデルでは捉えきれない動的挙動を明示的に扱うものであり、日本における高さ基準系の維持・更新に際して、ジオイドの時間依存性を定量的に考慮するための重要な基礎情報を提供する。

参考文献

- 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. doi:10.1002/2013JC009067
- 松尾功二 (2025) : JGEOID2024, 国土地理院地理地殻活動研究センター公開データ,
https://research-opendata.gsi.go.jp/tech_data/2025-003-S/2025-003-S-lp.html (accessed 10 Apr. 2026).
- Peltier, W.R., Argus, D.F. and Drummond, R. (2018): Comment on "An Assessment of the ICE-6G_C (VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model" by Purcell et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 2019–2018, doi:10.1002/2016JB013844.
- Pujol, M.-I., Taburet, G., and SL-TAC team (2022): Sea Level TAC – DUACS products, Copernicus Marine [data set]. doi:10.48670/moi-00148
- Rodell, M., P.R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J.K. Entin, J.P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll (2004): The Global Land Data Assimilation System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394.
doi:10.1175/BAMS-85-3-381
- Schröder, L., Horwath, M., Dietrich, R., Helm, V., van den Broeke, M. R., and Ligtenberg, S. R. M. (2019): Four decades of Antarctic surface elevation changes from multi-mission satellite altimetry, *The Cryosphere*, 13, 427–449. doi:10.5194/tc-13-427-2019
- Simonsen, S. B., Barletta, V. R., Sørensen, L. S., & Colgan, W. (2021): Greenland Ice Sheet mass balance (1992 - 2020) from calibrated radar altimetry. *Geophysical Research Letters*, 48(3), Article e2020GL091216. doi:10.1029/2020GL091216
- Wang, R., Lorenzo-Martín, F., & Roth, F. (2006): PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. *Computers & Geosciences*, 32(4), 527–541. doi:10.1016/cageo.2005.08.006