

# 災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための 宇宙測地技術の高度化に関する研究（第5年次）

実施期間	令和2年度～令和6年度
地理地殻活動研究センター	小林 知勝
宇宙測地研究室	中川 弘之 松尾 功二 服部 晃久

## 1. はじめに

地球の形状、回転及び重力場とその時間変化を与える測地基準座標系は、地球における正確な位置の計測の基盤であり、様々な社会活動が互いに位置がずれることなく実施されるために不可欠な人間活動の基盤である。宇宙測地研究室は、日本においても、現在の科学技術で達成し得る最も正確な測地基準座標系を構築し、それを国家の位置の基盤である“国家座標”として、国内の様々な利用者が容易に利活用できる仕組みを構築することを目的として、研究に取り組んでいる。正確な国家座標は、災害時において災害情報を把握し、復旧・復興のための活動を迅速に行うためにも欠かせない基盤である。地球全体の長期の測地観測に基づいて測地基準座標を構築するためには、観測データの取得、蓄積、高度な解析と多くの労力と時間を要するため、従来、地震等の災害直後に、正確な国家座標を更新し、利用者へ届けることは困難であった。しかしながら、近年、GNSS衛星、SAR衛星、重力観測衛星、アルティメトリ衛星等、地球の形状を捉える宇宙測地技術の進歩は目覚ましく、これらを用いることによって、災害時に従来よりもはるかに迅速な国家座標の更新、提供が可能となる状況が整いつつある。本研究は、宇宙測地技術を用いて主に日本国内における正確な地球の形状と変化を把握し、それらを国家座標として災害時にも迅速に更新して利用者へ届ける仕組みの構築を目指し実施する。最終年度の令和6年度は、前年度に引き続き、各技術の高度化及び4次元の位置情報管理のためのツールの開発・改造を実施した。

## 2. 研究内容

今年度は、主に、1)迅速な変動把握のための「マルチ GNSS-PPP による定常解析技術の開発」、2)地殻変動場の正確なモデルを作成するための「地表変動の詳細な時空間分布を計測及びモデル化する技術の開発」、3)正確な標高の基準面（ジオイド）の維持を行うための「ジオイドのモニタリング技術の開発」を実施した。各々の研究開発の結果を以下に示す。

### 2.1 マルチ GNSS-PPP による定常解析技術の開発

本課題では、日本列島における地殻変動の時空間モデル（以下「地表変動モデル」という。）の作成に資する、複数の衛星系（マルチ GNSS）による精密単独測位（PPP）を用いた電子基準点の座標値測定手法を検討している。地表変動モデルで使用する電子基準点の日々の座標値（以下「F5 解」という。）は電子基準点「つくば 1」の 1 点固定で求めるため、例えば関東地方の大災害により解析に支障を来す可能性がある。一方、PPP は固定点が不要なため、より災害に強いことが期待される。今年度は、令和4年に検定観測を行ったアンテナ・架台ペア計6ペア（アンテナ2機種：TRM59800.80, TPSCR.G5；架台3種類：93型, 94型, 02型）に対して、昨年度までに提案した電子基準点に対する GLONASS の位相特性モデルの構築手法（小林ほか, 2024）に基づいて、4日間の位相特性推定値を平均する方法によって実際に位相特性モデルを構築した。次に検証として、こうして構築した位相特性モデルを

このモデル構築に使用した GLONASS の検定観測データに適用して基線解析を行い、算出された試験アンテナの座標値が位相特性推定の際に固定した試験アンテナの座標（本章においては「真値」という。）とどの程度一致するかを、真値に対する RMS を用いて評価した。

結果を図-1 に示す。黒色が新たに構築した GLONASS 用の位相特性モデルを適用した結果、灰色が電子基準点の定常解析で使用している GPS 用の位相特性モデル（GSI14 モデル）を適用した結果である。GLONASS モデルを適用した場合は、南北成分についてはいずれも RMS が 5 mm 未満で真値と一致している。東西成分は、TPSCR.G5 02 型のアンテナ・架台ペアを除き、新たに構築したモデルを適用した場合は GSI14 モデルを適用した場合に比べて RMS はほぼ等しいか小さい。上下成分については TRM59800.80 02 型のアンテナ・架台ペア以外は GSI14 モデルを適用した場合よりも RMS が小さく、TRM59800.80 02 型についても RMS の差は 2 mm 程度である。以上より、全体としては新たに構築した位相特性モデルの方が GSI14 モデルを適用した場合よりも真値との整合性は高いことが判明した。今後、検証データを更に増やす等の課題は残るものの、本課題で提案した位相特性モデル構築手順により、GSI14 モデルよりも GLONASS に適した位相特性モデルが構築できることが期待される。

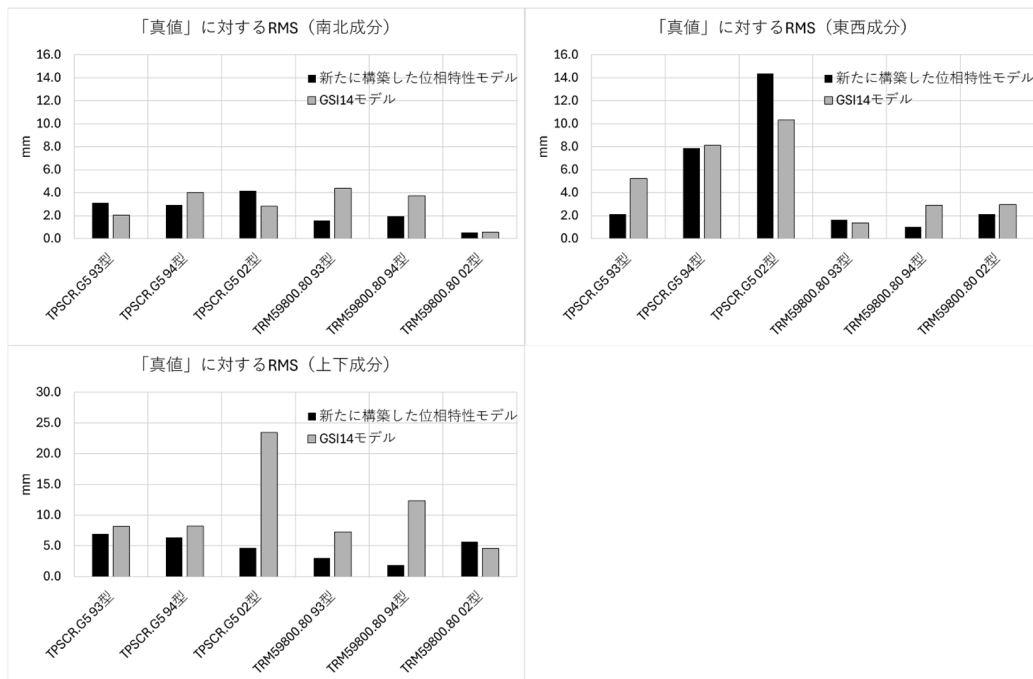


図-1 GLONASS の検定観測データを用いて新たに構築した位相特性モデルの検証。この位相特性モデルを適用した基線解析によって求めた試験アンテナの座標の、アンテナ位相特性推定の際に固定した座標値（「真値」）に対する RMS。

## 2.2 地表変動の詳細な時空間分布を計測及びモデル化する技術の開発

本課題では、日本のように日々地殻変動にさらされる国土において、任意の地点における任意の計測時点の国家座標を管理するために、定常時及び地震等の災害時に対する地表変動をモデル化する技術の開発を実施している。令和 6 年度は、①定常時地表変動モデルの構築のための空間内挿手法の開発、②昨年度開発した定常時地表変動モデル作成の支援ツールの改造、③4 次元の位置情報を一元的に管理・利用するための任意エポック座標表示サイトの開発を実施した。

### 2.2.1 地表変動の空間分布のモデル化のための空間内挿手法の開発

定常時の地殻変動モデルの構築を目的として、昨年度までに開発した電子基準点の時間モデルを基

に、日本全国の任意地点における地殻変動を推定する空間内挿手法の開発に取り組んだ。従来の普通 Kriging は、厳密な内挿手法である反面、入力値に異常値が含まれる場合でもそれに引きずられる傾向があり、外れ値に対する堅牢性に課題があった。そこで令和 6 年度は、観測点ごとに PPP (Precise Point Positioning) 解析から得られる推定誤差を重みとして導入し、最小二乗コロケーション (LSC: Least Squares Collocation) 及び重み付き Kriging の手法の検討を行った。特に、推定誤差のべき乗 ( $\alpha$  乗) をパラメータとする重み付き Kriging を適用し、 $\alpha$  の値を変化させて空間内挿を実施した。観測値と内挿結果の差 (O-C) の二乗和を評価指標とし、そのカーブの変曲点を最適な  $\alpha$  値として採用することで、推定誤差の大きい異常な観測点の影響を抑え、一方で小さい推定誤差を持つ観測点を信頼する内挿を実現した。事例として、電子基準点及び小型 GNSS 観測装置による千葉県地殻変動データに本手法を適用した結果、植生による影響が疑われる電子基準点「千葉花見川」による局所的な変動が内挿結果に与える影響を抑制しつつ、地盤沈下が顕著な地域の変動を適切に表現できることを確認した (図-2)。さらに、電子基準点のデータのみを用いて、2003 年から 2024 年までの期間について、一部離島を除く日本全域の地表変動の空間分布モデルを作成した。これにより、定常的な地殻変動傾向を高精度で把握することが可能となった。

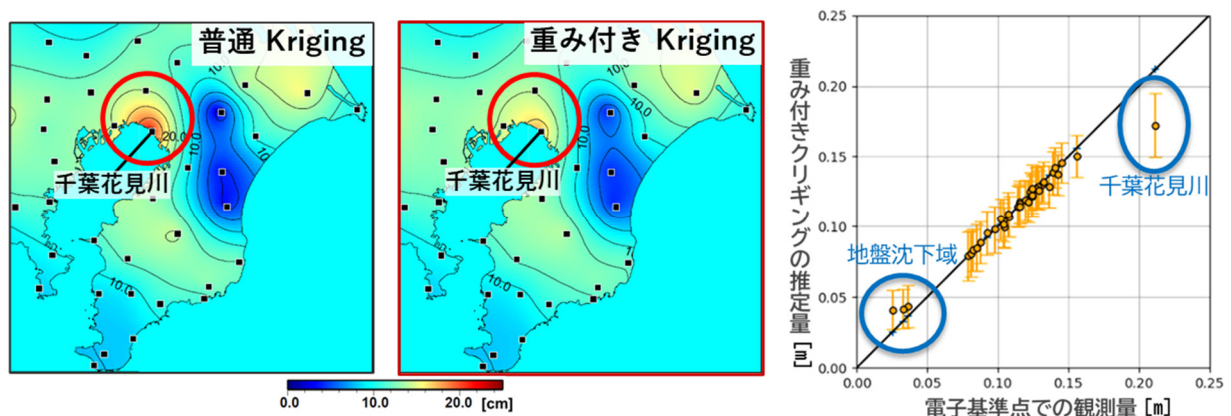


図-2 電子基準点及び小型 GNSS 観測点の鉛直成分の観測結果から普通 Kriging と重み付き Kriging を用いて推定された地表変動モデルの比較

### 2.2.2 定常時地表変動モデルの作成に向けた支援ツールの改造

令和 6 年度は、昨年度開発した「定常時地表変動モデルの作成に向けた支援ツール」に以下の改造を施した。(1)「地殻変動エリアファイルの作成」機能の追加、(2)「空間モデル」表示機能の追加、(3)「時空間モデル時系列結果」表示機能の追加、(4)「時空間モデルと定常解析時系列の差 (カラープロット)」表示機能の追加。(1)は座標補正パラメータファイルと成果停止リストファイルを基に地理院地図上で地殻変動が生じたエリアをポリゴンによって選択し、その場所情報コードをファイル出力する機能である。(2)は Kriging 法又は最小二乗コロケーション法によって計算された地表変動の空間分布 (空間モデル) ファイルを任意の期間で地理院地図上に図化するための機能である。(3)は時空間モデルによる地表変動の時系列 (時空間モデル結果)、定常解析による地表変動の時系列 (定常解析結果) 及び時間モデルによる地表変動の時系列 (時間モデル結果) を図化するための機能である。(4)は時空間モデル結果と定常解析結果との間の差の平均較差及び標準偏差を計算し地理院地図上に図化するための機能である。図-3 に新たに実装した機能の一例として「空間モデル」表示機能の画面を示す。

## 空間モデル結果

閉じる

○ 基準日からの空間変化 ◎ 2期間の空間変化

空間モデル: C:/ToolForFit/グラフ作成用データ/s\_model 選択

内挿手法: kriging

成分: 南北

期間: 2004/03/01 ~ 2022/04/01

カラーバ-範囲(mm): -5 ~ 5

カラーパターン: coolwarm パターン

コンター間隔(mm): 0.1

描画 出力

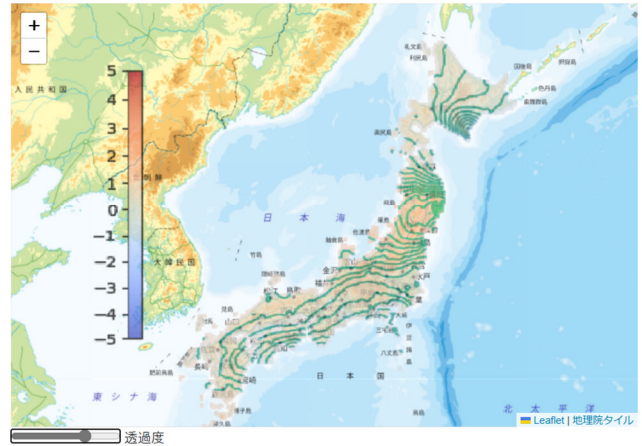


図-3 「空間モデル」表示機能の画面

### 2.2.3 任意エポック座標表示サイトの開発

これまでに開発した地表変動の空間分布のモデル等の研究成果を基に、ユーザーが入力した任意のエポックの測位座標あるいは測地成果を、別のエポックにおけるその地点の測位座標あるいは測地成果に変換する Web サイト「任意エポック座標表示サイト」を開発した。この変換処理に当たっては、変換の種類（測位座標間の変換か、測位座標と測地成果間の変換か）、与えられた地点での変換元と変換先のエポック間における大地震に伴う成果改定の有無及び東北地方太平洋沖地震に伴う測地系の改定の影響の有無によって補正の方法が異なる。一例として図-4 に東北地方太平洋沖地震をまたぐエポック間の座標変換の模式図を示す。本サイトでは、これらの場合分けして一つ一つ定式化し、統合的な処理を可能にした。

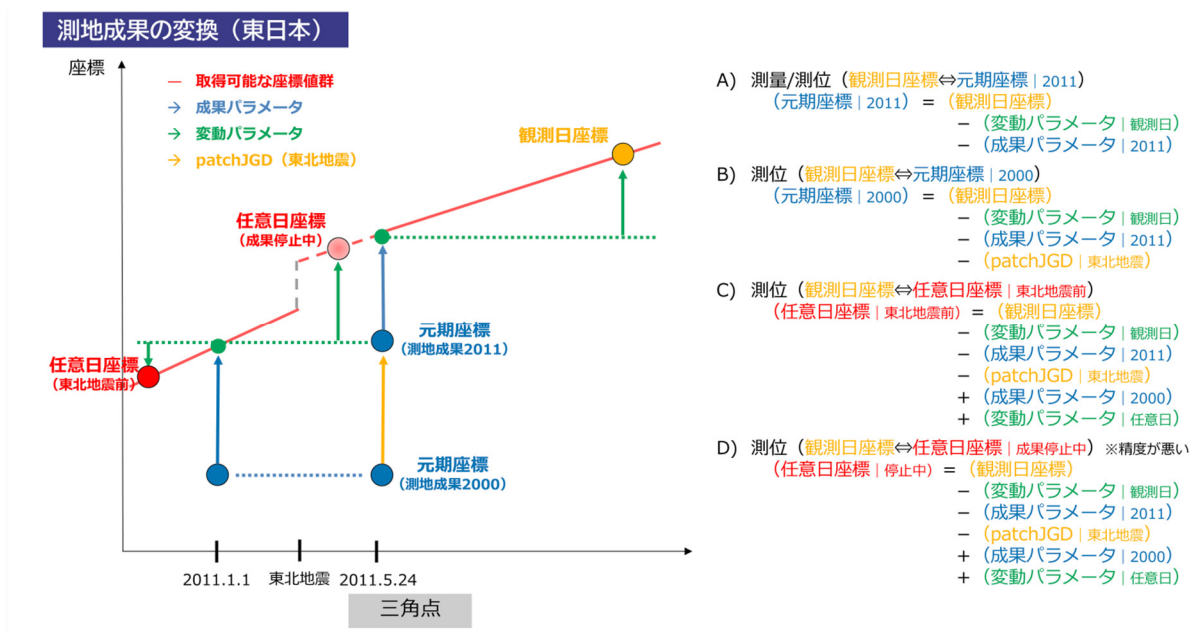


図-4 座標変換手法の模式図の一例。東北地方太平洋沖地震による成果改定が行われた地点における、東北地方太平洋沖地震をまたぐエポック間の、測位座標間（観測日座標⇔任意日座標）及び測位座標⇔測量成果間（観測日座標⇔元期座標）の変換のケース。

開発した任意エポック座標表示サイトの画面を図-5に示す。このサイトでは、測位座標から測位座標、測位座標から測地成果、測地成果から測位座標の3種類の変換が可能である。変換元と変換先のエポックを指定し、変換する地点の座標を緯度、経度、標高又は楕円体高、あるいは地心直交座標で与えると、入力条件に従いサイト側で必要な処理が自動的に選択され、変換が行われる。ユーザーは複雑な変換処理を考慮することなく変換後の座標値と補正量を取得することができる。また、複数の座標をテキストファイルで与えてまとめて変換することもできる。さらに、変換前と変換後の位置はウェブページ下部の地理院地図上に表示される。

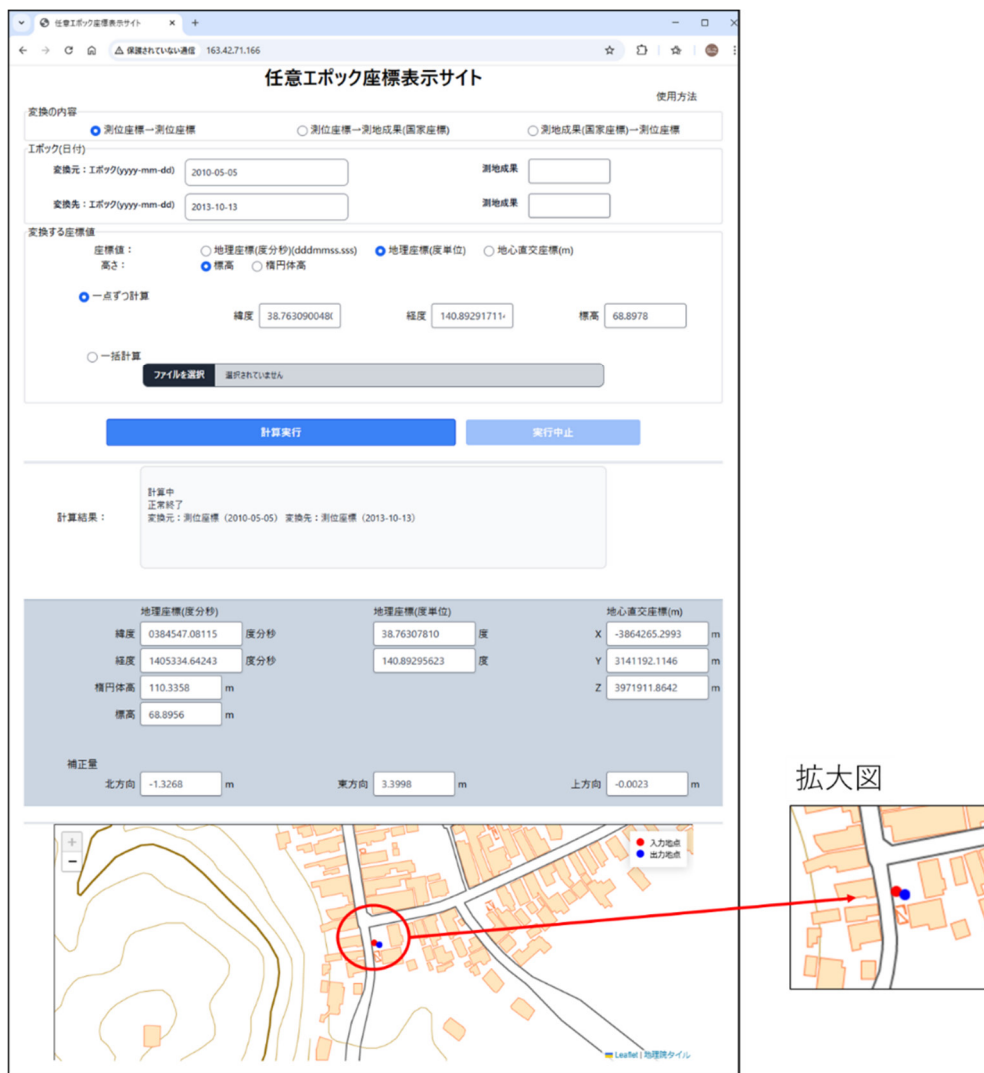


図-5 任意エポック座標表示サイトの画面。地理院地図の赤丸は変換前、青丸は変換後の位置。

### 2.3 ジオイドのモニタリング技術の開発

本課題は、標高の基準面となるジオイドの形状を精密に決定し、その時間変化を重力観測衛星や様々な測地観測によってモニタリングすることで、ジオイドの時間的安定性を評価する技術を開発することを目的とする。令和6年度は、衛星測地データと地球物理モデルを用いた日本とその周辺のジオイド変化モデルの構築に関わる研究に取り組んだ。ジオイド変化は主に、平均海面高変化とジオイド形状変化の二つの成分に分けられる。平均海面高変化は、地球温暖化に伴う海面上昇等によって生じるものであり、 $W_0$  値（ジオイドの重力ポテンシャル値）の変化を反映する。ジオイド形状変化は、地球

の質量分布の時空間変化によって生じるものであり、ジオイド変化の次数 2 以上の成分を反映する。

平均海面とは、測地学的な定義では全球の平均海面を指すが、日本の測量法における定義では東京湾の平均海面を指す。そのため、日本の場合、平均海面高変化は油壺験潮場の潮位データから計算できる。2004 年 1 月から 2023 年 12 月の潮位データを解析したところ、東京湾平均海面は  $7.2 \pm 0.5$  mm/yr の上昇傾向にあった。正規重力値を  $\gamma_Q$ 、油壺験潮場における重力値を  $g$ 、海面高変化を  $\Delta h$  とすると、平均海面高変化に伴うジオイド変化は、 $-\Delta W_0/\gamma_Q = g\Delta h/\gamma_Q \cong \Delta h$  という式から、 $7.2 \pm 0.5$  mm/yr となる。

ジオイド形状変化をもたらす主な質量変化としては、後氷期回復、陸水質量の変化、氷床質量の変化、海洋質量の変化、地震活動が挙げられる。本研究では、後氷期回復の影響は ICE-6G モデル (Peltier et al., 2015)、陸水質量変化は GLDAS Noah V2.1 モデル (Rodell et al., 2004)、氷床質量変化は衛星高度データと Firn モデル (Schröder et al., 2019; Simonsen et al., 2021)、海洋質量変化は衛星高度データと海洋モデル (Good et al., 2013; Pujol et al., 2022)、地震活動は地震断層モデルと粘弾性重力変位理論 (Wang et al., 2006) を基に計算を行った。なお、地震活動は 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) と 2016 年熊本地震 (Mw7.3) を考慮した。推定期間と空間解像度は各モデルの都合から、それぞれ 2004-2018 年と 100 km とした。

図-6(a)に上記のデータを基にモデル計算された 2004-2018 年のジオイド形状 (次数 2 以上) の経年変化図を示す。後氷期回復、陸水質量変化、氷床質量変化によるジオイド変化は、空間スケール 1000 km を超える長波長なもので、その大きさはそれぞれ  $+0.1$  mm/yr,  $+0.03$  mm/yr,  $+0.08$  mm/yr であった。海洋質量変化によるジオイド変化は、空間スケール 100 km の変化で、その大きさは  $+0.03$  mm/yr であった。日本においては、地震活動によるジオイド変化が最も顕著であり、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴って、東北地方で  $-10$  mm の地震時変化、 $+0.5$  mm/yr の地震後変化が生じていると推定された。

これらの推定結果の妥当性を検証するため、重力観測衛星 GRACE による観測結果との比較を行った。中緯度域における GRACE の空間分解能は 300~500 km であるため、モデルと GRACE の結果はそれぞれ空間解像度 500 km に統一させて比較を行う。図-6(b)に空間解像度 500 km に換算したモデルによるジオイド形状の経年変化図、(c)に GRACE によるジオイド形状の経年変化図を示す。両者は振幅と空間パターンともに良い一致を表すことから、空間波長 500 km までに関してはモデルによる推定結果が妥当であることが確認された。

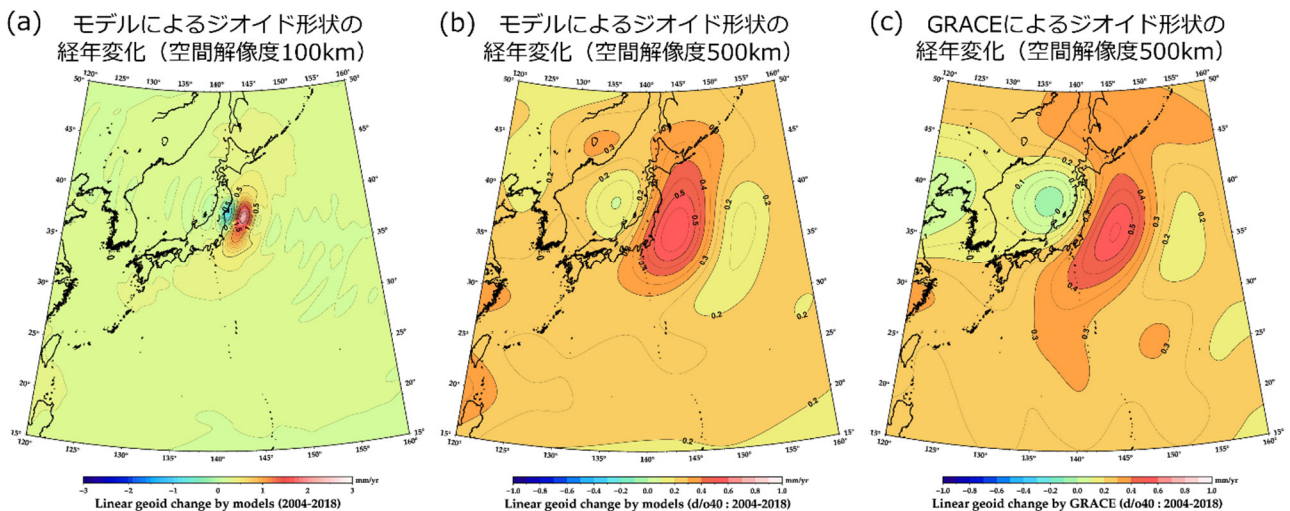


図-6 (a)モデルによるジオイド形状の経年変化(空間解像度 100 km), (b)モデルによるジオイド形状の経年変化 (空間解像度 500 km), (c)GRACE によるジオイド形状の経年変化(空間解像度 500 km)

### 3. まとめ

4 次元の位置情報（国家座標）を管理する基盤を構築するための宇宙測地技術の開発・高度化を令和 2 年度から令和 6 年度までの 5 年間の研究を通して実施し、以下の成果を得た。

#### （1）定常時の位置情報管理に関する研究

電子基準点における GNSS 時系列データのモデル化技術を開発した。共通誤差の除去処理や精密単独測位（PPP）を利用した樹木の影響低減処理等の新規開発技術を組み込んだ位置座標のモデル化により、全国の電子基準点において任意の時点の位置（情報）への変換が可能になった。これら技術を通して構築した時間モデルにより、従来の仕組みでは対応困難だった大規模地震直後の急速な余効変動においても位置情報の管理を高い時間分解能で正確かつ迅速に実施できる環境が整備された。また、任意の地点における位置情報管理の高度化のため、重み付き Kriging による新しい空間内挿手法を開発し、異常値に対して堅牢性の高いモデル化を実現した。これに加えて、位置情報管理の空間分解能を向上させるため、小型 GNSS 観測装置の開発や干渉 SAR 時系列解析による全国の地殻・地盤変動の時間推移の面的把握技術の高度化を実施した。これらにより、局所変動を考慮した位置情報管理に対応可能な空間モデルの構築環境が整った。時間モデル及び空間モデルを基に、直近 20 年間の全国の定常時地表変動モデルのプロトタイプを作成し、さらに、4 次元の座標変換処理の定式化を行った。これらを基に、4 次元の位置情報を統合的に変換処理するソフトウェアを開発した。

#### （2）災害時の位置情報管理に関する研究

SAR による 3 次元変位解析機能を開発・高度化した。4 方向による干渉 SAR や SBI 法等を組み込んだ統合解析により、高精度な位置変化の 3 成分計測を断層近傍においても実現し、位置情報の管理の迅速性や空間分解能を向上することに成功した。これにより、位置情報の更新（改算）に用いられる座標補正パラメータの提供範囲の拡大や提供時間の短縮が見込まれる環境が整備された。

#### （3）高さの位置情報管理に関する研究

重力衛星データや震源断層モデルから日本及びその周辺におけるジオイド（標高の基準面）の時空間変化を計算する機能を開発した。また、粘弾性緩和による余効変動、後氷期回復等に伴う経年的変化や大規模地震時に伴う変化を定量的に把握することが可能となった。これにより、従来、国土地理院では対応できなかったジオイドの時空間変化の監視が可能になったことに加えて、南海トラフ地震を含む日本周辺での大規模地震に伴うジオイド変化の事前シミュレーションや将来におけるジオイド・モデルの改定の必要性の検討等への利活用環境が整備された。

### 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.
- 小林知勝, 中川弘之, 松尾功二, 松本紗歩 (2024): 災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究（第 4 年次）, 令和 5 年度調査研究年報, 102–108.
- Peltier, W. R., Argus, D. F. and Drummond, R. (2015): Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G\_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 450–487. doi:0.1002/2014JB011176
- 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.
- 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.