

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4年次）

実施期間 平成28年度～令和元年度
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ひと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。

地球のジオイドおよ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で、ジオイド・重力の場はある基準時点における場とそれからの変化分に分離され、より厳密に測地基準座標系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要因によるジオイドへの寄与を把握し、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、ジオイドや重力の時間変化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、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時間変化モデルを作成し、測地基準座標系の更新の判断の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。

これまでの研究では、(1)観測時期の異なる地上重力データの最新の重力データへの整合、(2)衛星レーザ測距（SLR: Satellite Laser Ranging）の観測結果の時系列解析による全球規模での重力変動、(3)GRACE重力解（RL06）の品質評価を行っている。(1)については、新たに計測された地上重力データにGNSSデータから推定された地殻変動由来の重力変動モデルを同化することで最新重力値への変換パラメータを作成するための手法を開発した。(2)については、衛星の周回運動の擾乱源を補正する物理モデルを更新することでSLR重力解の高精度化を行った。(3)については、GRACEのRL06解がRL05解と比べて特に高次成分で誤差が低減されていることを確認した。

2. 研究内容

本年度は、日本列島のジオイド変化を捉えるための基準となるスタティックなジオイド形状（精密重力ジオイド・モデル）の高精度決定に係る研究に取り組んだ。現在測量に使用されている日本のジオイド・モデルGSIGEO2011（Miyahara et al. 2014）の基盤となる日本の重力ジオイド・モデルは、Kuroishi (2009)が開発したJGEOID2008モデルである。このモデルは、測量成果であるGNSS水準測量による実測ジオイド高（971点）と、標準偏差8.0cmで整合する。これに対してMatsuo and Kuroishi (2020)は、重力データの更新と高分解能な数値標高モデル（DEM）の導入、そして計算手法の改良に取り組み、新たな重力ジオイド・モデルJGEOID2019を開発した。このモデルは、実測ジオイド高と標準偏差5.7cmで整合しており、JGEOID2008と比べて整合性が2.3cm向上した。

JGEOID2008 と JGEOID2019 はいずれも、重力化成処理として Moritz-Pellinen 法 (MP 法) を採用している。重力化成とは、測地学的境界値条件 (ジオイド外部の質量はゼロであり、かつジオイド面上の重力異常が得られている) を満たすための処理であり、この処理を施すことで観測された重力データをストークス積分によってジオイド高へと変換することができる。MP 法は、ヘルマート凝縮化成の一種で、地形化成を平面地球近似で行い、下方接続を地形質量がもたらす重力鉛直勾配のみを考慮して行う。地形化成とは、ジオイド外部の地形質量をジオイド面上に圧着することでジオイド外部の質量をゼロにする処理であり、下方接続とは、地表面上の重力異常をジオイド面上 (厳密にはコジオイド面上) の重力異常に換算する処理を指す。この手法は、計算負荷が軽いうえ、DEM のみを用いて計算処理を行うことができるが、下方接続を行う際の重力鉛直勾配の推定において、地形質量の効果のみを考慮し、アイソスタシー等による地球内部の質量不均一の効果を考えていない。そのため、MP 法は、重力構造が複雑で地表面からジオイド面まで距離が長い山岳域では計算精度が低くなる。事実、急峻な地形を持つ中部地方では大きなジオイド誤差が確認されている。

そこで本研究では、より厳密な重力化成手法である University of New Brunswick 法 (UNB 法) (Vanicek et al., 2013) を適用することにより、特に山岳域のジオイド精度の向上に臨んだ。本研究で適用した UNB 法では、地形化成を球面地球近似で行い、下方接続を解析接続で行う。地形化成を球面地球近似で行うことにより地球の球面効果が考慮されることから、ジオイド起伏の長波長成分の向上が期待される。また、下方接続を解析接続で行うことにより地形質量だけでなく内部質量不均一による重力鉛直勾配も考慮されることから、複雑な重力構造を持つ地域におけるジオイド精度の向上が期待される。MP 法では、地形化成と下方接続が DEM のみを用いて同時に行われるのに対し、UNB 法では、地形化成は DEM を用いて行われ、下方接続は地形化成を施した実重力データを用いて行われる。そのため、UNB 法の計算精度は、DEM の品質だけでなく、実重力データの品質と空間分布にも依存するが、実重力データを活用することから、より現実的な地球の重力構造を考慮した重力化成を施すことができる。本研究では、モデル精度を検証するための実測ジオイド高データが利用可能な日本列島の本土周辺について計算を行った。

3. 研究結果

図-1 に、MP 法に基づく重力ジオイド高 (左)、UNB 法に基づく重力ジオイド高 (中央)、MP 法と UNB 法の差 (右) の空間分布図を示す。ここでは、UNB 法で計算した日本の重力ジオイド・モデルを JGEOID2020 と呼ぶことにする。図-1 (右) によると、両者の差は -19.89cm から 65.68cm に及び、平均較差は 0.29cm 、標準偏差は 1.46cm であった。その空間パターンは、中部地方周辺で正の差、北海道の十勝岳周辺で正の差、幌尻岳周辺で負の差を示している。大きな差が見られる地域は、主に山岳域であり、重力化成の変更による効果が大きい地域と一致する。

次に MP 法と UNB 法の計算性能を評価するため、それぞれの手法で計算されたジオイド高と GNSS 水準測量による実測ジオイド高との比較を行った。図-2 に、計算されたジオイド高と実測ジオイド高との較差の空間分布図を示す。MP 法と比べて UNB 法は、中部地方にて明らかにジオイド較差が小さくなっている。すなわち、UNB 法によって山岳域における重力ジオイド・モデルの計算性能が向上していることが示唆される。実測ジオイド高との較差は、日本全域で見ると、MP 法で標準偏差 5.7cm 、UNB 法で標準偏差 5.7cm であり、2つの手法の間で差は僅かであった。これは、北海道におけるジオイド較差が非常に大きい (約 13cm のバイアス)、この影響が日本全域として見たときのジオイド較差の標準偏差を大きく引き上げているためである。北海道におけるジオイド較差の原因としては、GNSS 水準データの誤差や重力データの欠如などが考えられるが、今後さらなる検証を行う予定であ

る。このような背景から、本研究では、2つの手法の間で特に差が大きかった中部地方に着目して、実測ジオイド高（173点）との比較検証を行った。その結果、中部地方における実測ジオイド高との標準偏差は、MP法では3.8cmであったのに対し、UNB法では2.8cmであった。すなわち、UNB法の適用により、中部地方では約1cmのジオイド計算性能の向上が達成された。現在日本で利用可能な実測ジオイドデータの最大標高は約1,300mであるため、山岳域におけるジオイドの計算性能を十分には評価できてはいないが、最大標高4,000mを持つ米国コロラド州でもUNB法の適用によって3cm精度のジオイド計算が実現していることから（Matsuo and Forsberg, 2020）、実測ジオイドデータが存在しない山岳域でも、高精度なジオイド計算ができていものと推察される。なお、中部地方以外の地域は、MP法とUNB法は概ね同じようなジオイド較差であった。

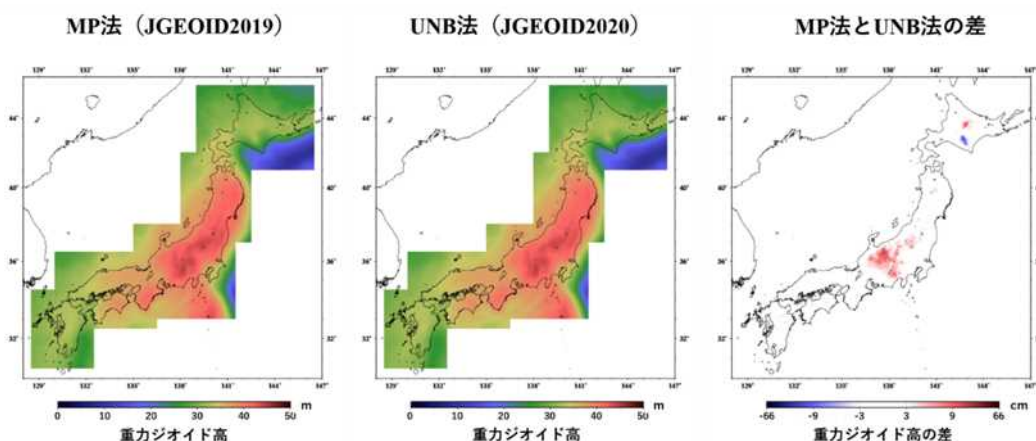


図-1 (左) MP法に基づく重カジオイド高, (中央) UNB法に基づく重カジオイド高, (右) MP法とUNB法との間の重カジオイド高の差の空間分布図。

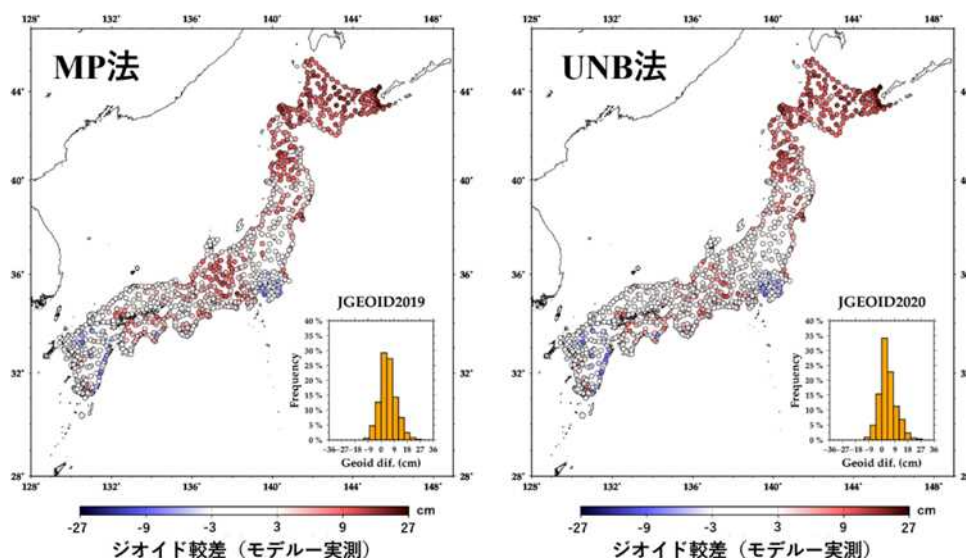


図-2 (左) MP法で計算されたジオイド高と実測ジオイド高との較差。(右) UNB法で計算されたジオイド高と実測ジオイド高との較差。それぞれの図の右下に、ジオイド較差のヒストグラムを示す。

4. 結論

本研究では、重力化成手法の改良に取り組むことで、特に山岳域におけるジオイド精度の向上に臨んだ。従来の重力化成手法である MP 法は、地形化成を平面地球近似で行い、下方接続を地形質量のみを考慮した重力鉛直勾配を用いて行っていた。一方、新たな手法である UNB 法では、地形化成を球面地球近似で行い、下方接続を地形質量と内部質量不均一を考慮した重力鉛直勾配を用いて行う。その結果、UNB 法と従来の MP 法との間には、主に山岳域において計算されるジオイド高に大きな差が見られ、その差は最大で約 65cm となった。2つの手法の計算性能を評価するために、地形が急峻な中部地方において GNSS 水準測量による実測ジオイド高と各々の手法との比較を行ったところ、MP 法では標準偏差 3.8cm で整合したのに対し、UNB 法では標準偏差 2.8cm で整合した。すなわち、UNB 法の適用により、中部地方では約 1cm のジオイド精度の向上が達成された。

重力化成は標高が高くなるほど計算誤差が大きくなることから、日本では中部地方が最もジオイド計算が困難な地域と言える。本研究によって、UNB 法を適用することで中部地方でも 3cm 精度のジオイド計算が可能であることが示された。UNB 法では、下方接続の計算の際に実重力データを用いることから、実重力データの品質がジオイドの精度に大きく影響する。今後、全国で航空重力測量が実施され良質な重力データが均質に整備されることで、さらに高精度な重力ジオイド計算が可能になると期待される。また今回、MP 法と UNB 法のいずれにおいても、地形質量の効果を取り扱う際には、一定の地形密度 ($2,670\text{kg/m}^3$) を仮定している。今後、地形密度の不均一の効果も考慮することで、重力ジオイドの計算精度のさらなる向上が期待される。

参考文献

- Kuroishi, Y. (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, *Earth Planets Space*, 61, 807-813.
- Matsuo, K., Kuroishi, Y. (2020): Refinement of a gravimetric geoid model for Japan using GOCE and an updated regional gravity field model. *Earth Planets Space* 72, 33.
- Matsuo, K., Forsberg, R. (2020): Gravimetric geoid/quasigeoid computation over Colorado based on the Remove-Compute-Restore Stokes-Helmert scheme, *Journal of Geodesy*, *under revision*.
- Miyahara, B., Kodama, T., Kuroishi, Y. (2014) Development of new hybrid geoid model for Japan "GSIGEO2011". *Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan*, 62:11-20.
- Vanicek, P., Kingdon, R., Kuhn, M., Ellmann, A., Featherstone, W.E., Santos, M.C., Martinec, Z., Hirt, C., Avalos-Naranjo, D. (2013): Testing Stokes-Helmert geoid model computation on a synthetic gravity field: experiences and shortcomings. *Studia Geophysica and Geodetica* 57 (2), 369-400.