

精密重力ジオイドに基づく高さ基準系の構築に関する研究（第3年次）

実施期間 平成 28 年度～平成 30 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

明治時代に我が国の近代測量が始まってから現在に至るまで、標高は水準測量によって計測されてきた。水準測量は、ミリメートル精度の比高を比較的容易に計測できる技術であるが、起点となる場所から離れるに従って多大な労力と時間、そして費用を要するという欠点を持つ。また、計測する距離が長くなるに従って計測誤差の累積（累積誤差）によって精度が低下するという性質を持つ。

国土地理院は、これまで、約 18,000km に及ぶ全国の路線を約 10 年かけて水準測量することで、全国の標高改測を繰り返し実施してきた。しかしながら、予算や人員が縮小する中、今後もこれまでと同様な標高体系の維持管理を続けていくことが困難になりつつある。加えて、全国改測のような長距離路線の測定では、累積誤差の影響が特に大きく、広域で見た場合、標高に歪みが生じやすいという手法上の課題も依然として存在し続けている。そのため、現在、水準測量に代わる新たな標高体系の整備及び維持管理手法が求められている。

このような背景から、国土地理院では、水準測量に代わる新たな標高体系の維持管理手法として、全球測位衛星システム（GNSS）と重力ジオイド・モデルを用いた手法（以下「GNSS ジオイド」という。）への移行を検討している。GNSS ジオイドに基づく新たな標高体系の利点として、(1) 全国を衛星測位で監視するためのインフラが既に整備済みである、(2) 地殻変動を迅速に把握することができる、(3) 精度が距離に依存しない、(4) 連続観測データが常時インターネット上で利用可能であるため利便性が高い、(5) 従来水準測量による標高体系と比較すると維持管理の費用と労力が低い、という点が挙げられる。しかしながら、現状での課題として、GNSS ジオイドによる標高決定の精度が、水準測量に比べるとやや不十分であることが挙げられる。水準測量による標高体系の誤差は、基準である東京湾から遠く離れた北海道で約 4.5cm であるが、全国平均で見ると約 2.5cm である。一方、GNSS ジオイドによる標高の精度は、GNSS 測量による楕円体高の精度と重力ジオイド・モデルによるジオイド高の精度に依存する。GNSS 測量は、現在では 1cm に達成しているのに対し、重力ジオイド・モデルの精度は、約 8.4 cm であり、両者を合わせると現状の GNSS ジオイドの標高誤差は約 10cm と言える。すなわち、GNSS ジオイドをもとに水準測量と同等の標高体系を構築するためには、重力ジオイド・モデルの高精度化が必要不可欠となる。

そこで本研究では、GNSS ジオイドによる新たな標高体系の実現に向けて、精密な重力ジオイド・モデルの開発を行う。現行の重力ジオイド・モデルは「JGEOID2008」（Kuroishi, 2009）であるが、現行モデルには、(1) 衛星重力データが古い、(2) 地上重力データの基準系が古い、(3) 重力データの処理手法に改良の余地がある、といった課題がある。本研究では、これらの課題に取り組むことで、重力ジオイド・モデルの更なる高精度化に臨む。

2. 研究内容

国土地理院は、2024 年までに標高体系の維持管理の基盤を水準測量から GNSS ジオイドへと移行するために、2019 年から 2022 年にかけて離島を除く全国を対象に航空重力測量を実施することを計画

している。本年度は、地上重力データと航空重力データを適切に結合するための計算手法について研究開発を行った。地上重力データと航空重力データを結合する手法として、最小二乗コロケーション法（以下「LSC法」という。）や球面調和接続、放射基底関数、ポアソン積分などがあるが、Li et al. (2018)の比較研究では、LSC法が最も適切に結合可能であったと報告している。そこで本研究では、LSC法による地上重力データと航空重力データの結合を試みた。

LSC法とは、2次元及び3次元位置に展開された複数の観測データ間の相互距離に対する相関関係（分散・共分散）から、任意の位置における予測値を最小二乗法的に推定する手法である（Moritz, 1972）。その基本的な方程式は、以下のように与えられる。

$$\hat{S} = C_{sl}(C_{ll} + \varepsilon_n)^{-1}l$$

\hat{S} はLSCの推定値、 C_{sl} は推定点と実データ間の共分散値、 C_{ll} は実データ間の共分散値、 ε_n は実データの測定誤差、 l は実データである。

共分散値を推定するためのモデル関数として一般的に使用されているものがGaussモデル（Moritz, 1972）である。これは、データ間（または推定点とデータ間）の共分散が相互距離に対して指数関数的に減衰すると仮定したもので、以下のような式で表現される。

$$C_{ll} = A_0 \exp(-(D_{ll}/\kappa L)^2)$$

A_0 は自己相関の振幅、 D_{ll} は2点間の相互距離、 κ は $\sqrt{1/\log 2}$ 、 L は相関距離である。

Gaussモデルは純粋にデータ間の統計的な相関関係に基づく共分散モデルであるが、LSC法は、共分散モデルにデータが持つ物理的な特性を組み込むことができるという強みも持つ。そこで、Forsberg (1987)は、地球の重力場の3次元推定に特化した共分散モデルを開発している。そこに組み込まれた物理特性は、1) 重力は高さに対して逆2乗で減衰する（万有引力の法則）、2) 重力の強度スペクトルは球面調和次数に対して逆2乗で減衰する（Kaulaの法則）というものであり、共分散モデルは以下のような式で表現される。

$$C_{ll} = -f \sum_{i=0}^3 \alpha_i \log(d_i + r_i),$$

$$\alpha_0 = 1, \alpha_1 = -3, \alpha_2 = 3, \alpha_3 = -1, r_i = (D_{ll}^2 + Z_i^2)^{1/2}, Z_i = d_i + H_{ll},$$

$$d_i = d + iT, f = A_0 / \log(d_1^3 d_3 / d_0 d_2^3)$$

H_{ll} は2点間の高さの和、 d は重力の波長帯域の高周波成分の減衰を表すパラメータ、 T は重力の波長帯域の低周波成分の減衰を表すパラメータである。このモデルは、Tscherning and Rapp (1974)の球面地球を仮定し波数領域で表現される共分散モデルを、平面地球を仮定し3次元座標で表現したものであり、計算効率が高いことからローカルな重力場モデリングに適したモデルである。ただし、平面地球を仮定していることから、ジオイド計算で使用する際には、除去復元法などを通じて衛星重力データと併用することが望ましい。

上記に示したGaussモデルとForsbergモデルを用いて、地上重力データと航空重力データの結合処理を試みる。使用した重力データはコロラド州にて計測されたもので、米国測地測量局（NGS）から提供を受けた。NGSは、2022年までに米国にてGNSSジオイドに基づく標高体系を構築するために、GRAV-Dと呼ばれる国家プロジェクトのもと、2012年から全米を対象に航空重力測量を実施し、精度2cmの重力ジオイド・モデルの開発を進めている。またNGSは、国際測地学協会の共同ワーキング・グループと連携し、重力ジオイド・モデルの最適な計算手法を検証するための国際比較実験を行っている。これらの枠組みのもと、NGSは、米国コロラド州における地上重力データ、航空重力データ、

数値標高モデル及び GNSS 水準データをワーキング・グループに提供している。米国コロラド州は、急峻な地形を持つ高山地域（平均標高 2000m）ゆえ、世界でも精密な重力ジオイド計算が困難な地域であり、計算精度の上限を検証するうえで最適な研究対象地域と言える。本研究の実施者は、この国際比較実験に参画することで、当地域の重力データ等の提供を受けた。航空重力データは、TAGS-7 重力計によって計測されたもので、サンプリング間隔は 1Hz であり、側線間隔は主側線が約 10km、副側線が約 70km で、約 80m おきにデータが取得されている。

図-1 に、Gauss モデル及び Forsberg モデルを用いた LSC 法によって結合・内挿処理されたフリーエア重力異常分布図を示す。図-1(a)に示されているように、Gauss モデルでは航空重力データの側線に沿って不自然な重力分布が見られており、結合処理が不適切であることが明らかである。一方、図-1(b)で確認されるように、Forsberg モデルでは重力分布が滑らかであり、結合処理が適切に行われている様子が見て取れる。

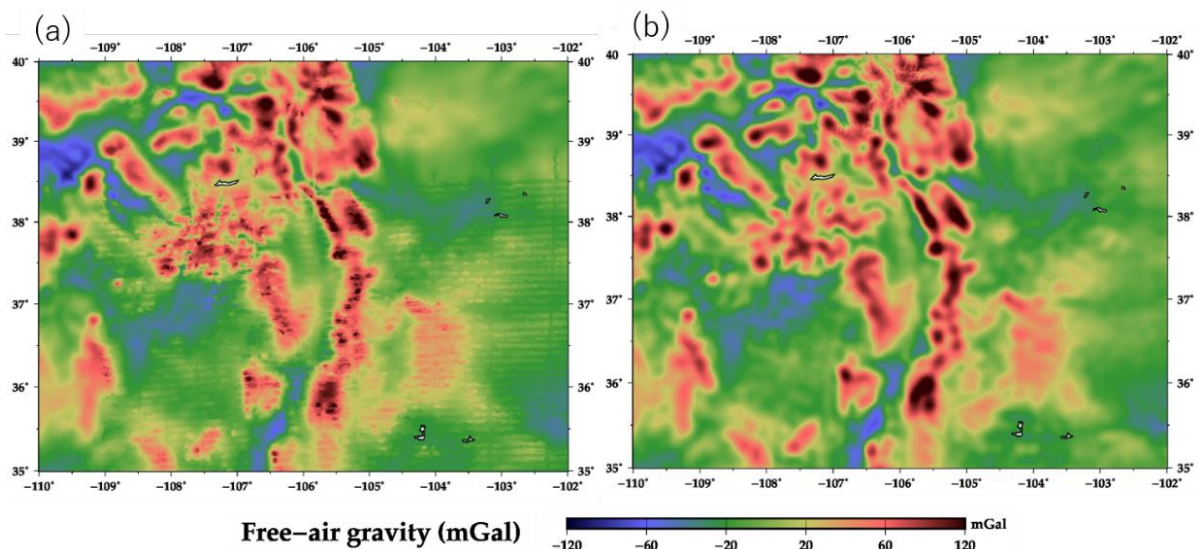


図-1 地上重力データと航空重力データを Gauss モデルによる共分散関数で結合したフリーエア重力異常図(a) と Forsberg モデルによる共分散関数で結合したフリーエア重力異常図 (b) .

これらの重力分布（以下「地上+航空重力分布」という。）の品質を定量的に評価するため、全球重力場モデル EGM2008 (Pavlis et al., 2012) との比較検証を行う。EGM2008 とは、衛星重力データ (GRACE 衛星)、地上重力データ、残差地形モデル (RTM) をもとに構築された全地球の重力場モデルであり、球面調和関数の次数 2190×位数 2159 次で構成され、その空間分解能は約 10km である。なお、RTM とは、数値標高モデルを用いて地形質量に起因した重力成分をモデル化する手法であり、重力データが存在しない領域の重力情報を補間 (fill-in) する役割を果たす (Forsberg, 1984)。本研究では、EGM2008 による重力分布（以下「EGM 重力分布」という。）を参考値とすることで、地上+航空重力分布の品質評価を行う。なお、評価を行った領域は、航空重力データが取得されている経度 251~258 度、緯度 35~38 度である。地上+航空重力分布と EGM 重力分布との差の相関係数、平均較差、標準偏差を計算したところ、相関係数は、Gauss モデルで 0.93、Forsberg モデルで 0.96 であり、平均較差は、Gauss モデルで -7.50mGal、Forsberg モデルで -5.51mGal、標準偏差は、Gauss モデルで 17.91mGal、Forsberg モデルで 12.55mGal となった。いずれも Forsberg モデルの方が良好な結果を示しており、Forsberg モデルの妥当性が定量的にも確認された。

3. 結論

2019年に実施される航空重力事業を見据え、地上重力データと航空重力データの結合処理に関する研究開発を行った。本研究では、LSC法による結合手法を適用し、共分散モデルとして、純粋な統計情報に基づくGaussモデルと、地球物理理論が反映されたForsbergモデルを比較した。その結果、推定された重力分布の空間的特徴やEGM重力分布との比較により、Forsbergモデルの方が良好な結果が得られることを確認した。

残された課題の1つとして、地上重力データと航空重力データの最小二乗重量の最適化がある。本研究では、2つの重量を同一に設定したが、一般的に精度は地上重力データの方が高く(0.1~1mGal)、航空重力データの方が低い(1~3mGal)。また、データ誤差の特徴として、地上重力データは比較的ランダムであるのに対し、航空重力データは側線に沿って系統的特徴を持つ可能性がある。空間感度も異なっており、地上重力データは短波長な重力情報を含むが、航空重力データは高度にもよるが一般的に中短波長(5km程度)までの重力情報に留まる。これらの特徴を考慮する手法は、航空重力データのクロスオーバー点の検証や、k-近傍法によるデータ品質の評価、白色ノイズ及び赤色ノイズの導入、スペクトル結合など、様々存在する。今後、一般研究を通じてこれらの手法を試行し、地上重力データと航空重力データの、より最適な結合手法について研究開発を進める。

参考文献

- Forsberg, R. (1984): A Study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical Inversion Methods in Gravity Field Modelling, Reports of the Department of Geodetic Science and Surveying, No. 355, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Forsberg, R. (1987): A new covariance model for inertial gravimetry and gradiometry, Journal of Geophysical Research, 92, 1305-1310.
- Kuroishi, Y. (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, Earth Planets Space, 61, 807-813.
- Li X., J. Huang and Y. M. Wang (2018): Discussions on the Downward Continuation of Airborne Gravity Data and its Combination with Surface Gravity Data for Local Geoid Modeling, paper presented at GGHS2018.
- Moritz, H. (1972): Advanced least-squares Methods, Department of Geodetic Science, Report no. 175, Ohio State University, 132 pages.
- Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon and J.K. Factor (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), Journal of Geophysical Research, 117, B04406
- Tcherning C.C. and R.H. Rapp (1984): Closed Covariance Expressions for Gravity Anomalies, Geoid Undulations, and Deflections of the Vertical Implied by Anomaly Degree Variance Models, Department of Geodetic Science, Report no. 208, Ohio State University, Ohio.