

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5年次）

実施期間

平成28年度～令和5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・重力場はある Reference epoch における場とそれからの変化分に分離され、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スタティック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。

本課題ではこれまでに、(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、(4)日本列島のスタティックなジオイド形状の高精度決定、に関する研究を実施してきた。(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。(4)については、厳密な重力化成手法の導入によって特に山岳域において従来よりも高精度なジオイド・モデルの開発を行った。

2. 研究内容

本年度は、航空重力データを用いた日本列島の海陸シームレスな精密重力ジオイド・モデルの開発のための予備的研究として、航空重力データの絶対的精度評価に関わる研究を実施した。

国土地理院は、日本列島の高精度な重力ジオイド・モデルの構築を目的に、2019年から2022年にかけて全国規模の航空重力測量を実施している。目標とするジオイド・モデルの精度は約3cmであり、そのためには1~2mGalの精度を持つ航空重力データを取得する必要がある。航空重力データの精度

評価は一般的に、交差検定と、全球重力場モデルとの比較によって行われる。交差検定は、複数の航空重力測線の交差点における重力値を相互比較することによって、航空重力データの品質を評価する手法である。これにより、航空重力データの内部整合性（再現性）を評価することができる。しかしながら、観測される重力値が絶対量としてどれほどの確からしさを有するかを評価することは出来ない。一方、全球重力場モデルとの比較は、観測重力値の絶対評価が可能であるが、全球重力場モデルは空間分解能が粗く、場所によっては精度も低いため、航空重力データを高精度に評価することは出来ない。そこで本研究では、地表重力データと全球重力場モデル（EGM2008）を併用した3次元最小二乗コロケーション（以下「3D-LSC」という。）法によって、航空重力データの絶対的精度評価を行った。

最小二乗コロケーション（以下「LSC」という。）法とは、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（Hesikane & Moritz, 1967）。LSC法は一般的に2次元空間において適用されるが、本研究では、高品質な地表重力データから導出した地表面での重力異常グリッド、全球重力場モデル（主に人工衛星データによる）から導出される高高度（高度10km）での重力異常グリッド、そして重力場推定に特化した共分散関数モデル（Forsberg, 1987）を用いることで、3次元空間における重力場推定を可能にした。用いる重力異常の種類は、完全ブーグ重力異常（Heck, 2003）であり、これにより地形質量による引力の寄与をアプリアリに除去されている。

本研究では、2019年12月から2020年6月までに関東地方（KT01ブロック）で取得された航空重力データに対し、3D-LSC法による絶対的精度評価を行った。航空重力測量は、TAGS-7重力計を使用し実施された。この地域における主測線間隔は約10km、副測線間隔は約50kmであり、観測高度は、約5000mである。取得した航空重力データは、米国国家測地測量局が開発したNewton v1.1ソフトウェアを用いて、エトベス補正、オフレベル補正、ローパスフィルター処理等を施し、絶対重力値に変換した（Kurihara et al., 2020）。なお、測線間に見られる重力バイアスは、クロスオーバー調整によって補正を行った。その後、大気補正、フリーエア補正、ブーグ補正、地形補正を施し、完全ブーグ重力異常に変換した。

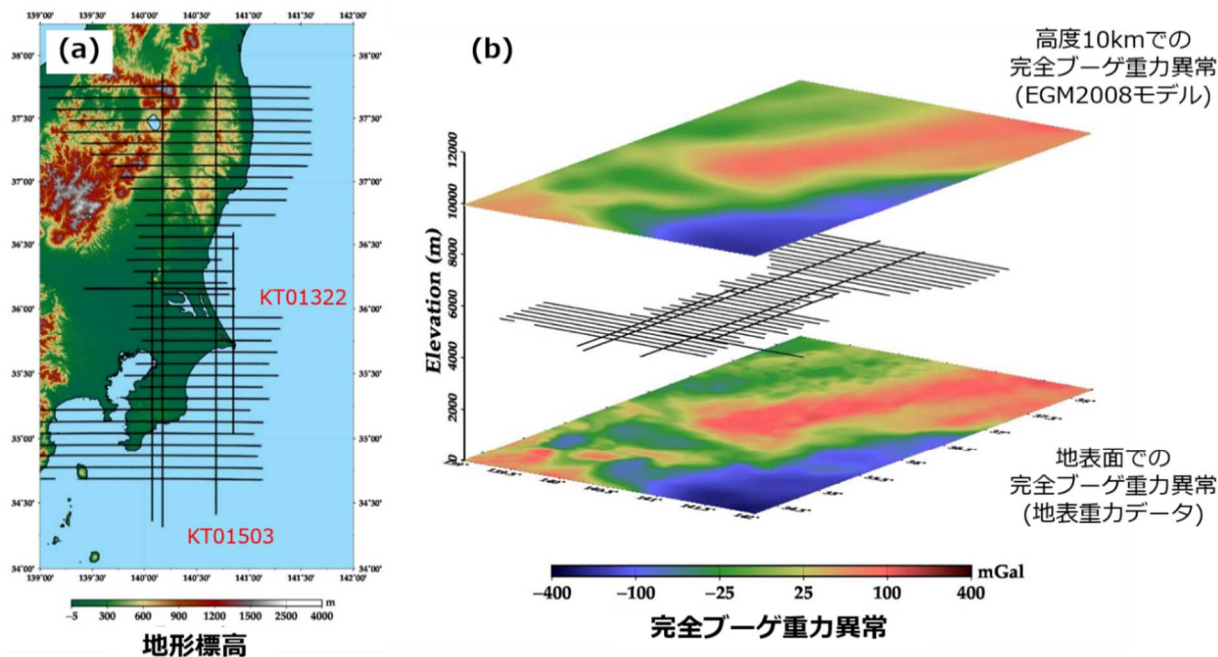


図-1 (a) 関東地方における航空重力データの空間分布図, (b) 3D-LSC 重力推定で使用する重力異常グリッドの3次元空間分布図.

3. 研究結果

図-2 に, 航空重力データによる完全ブーゲ重力異常と 3D-LSC 法によって推定された航空重力測線上の完全ブーゲ重力異常 (以下「LSC 推定重力値」という.) の比較図を示す. 図の上段が両データの比較図で, 中段が航空重力データと LSC 推定重力値の差分, 下段が LSC 推定重力値の誤差である. 図-2 では, KT01322 測線と KT01503 測線の比較例を示している. 両測線の位置は, 図-1(a)に示す通りである. KT01322 測線の比較図を見ると, 両データは絶対重力量及び空間変化パターン共に良く調和しているが, 経度 140.7 度から経度 141.0 度付近において, 8mGal に及ぶ大きな乖離が見られる. この領域は, 陸域から 20~30km の沖合に当たる. 海域の地表重力データは, 主に衛星高度計に基づく海洋重力場モデルを使用しており, 衛星海面高度計のデータは沿岸域において極度に精度が低下することから, これに基づく地表重力データの誤差によって乖離が生じたものと解釈できる. 現に, LSC 推定重力誤差は, 沿岸域において大きくなっている. すなわち, 沿岸域においては, 地表重力データよりも航空重力データの方が正しく重力場の情報を捉えていることが示唆される. 同様の事実が, KT01503 測線においても確認でき, 地表重力データの品質が低い沿岸域において, 航空重力データと LSC 推定重力値との間に大きな乖離が見られた.

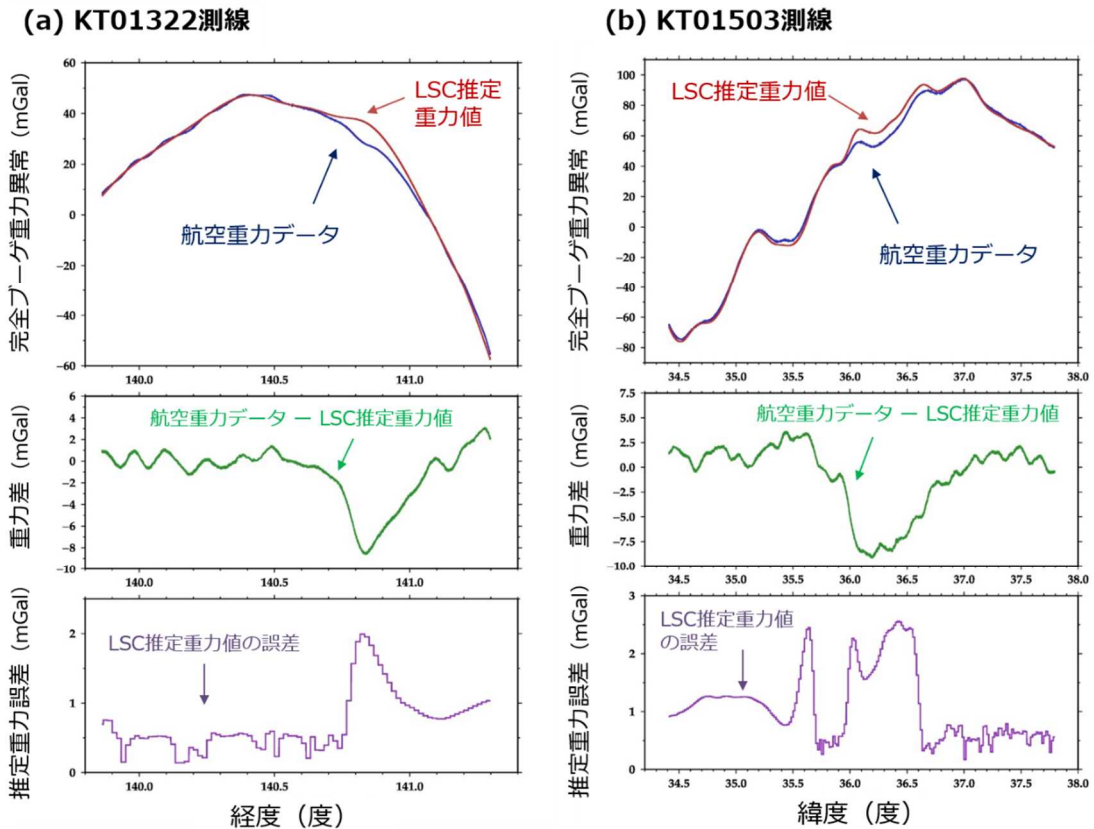


図-2 航空重力データと LSC 推定重力値の比較図. (a) KT01322 測線 (b) KT01503 測線

KT01 ブロックにおける航空重力データの全てに対し LSC 推定重力値との比較を行い、その較差の統計情報をまとめた結果を表-1 に示す. なお、先に述べたとおり、地表重力データは海域の特に沿岸部で品質が悪いことから、陸域上空のみに対して比較を行った. また、参考として、全球重力場モデル (EGM2008) のみから推定した重力値 (以下「EGM 推定重力値」という.) との比較結果も示す. 航空重力データと EGM 推定重力値との間の較差は、最大で 8.83mGal, 最小で-9.81mGal, 平均で 0.03mGal となり、較差の二乗平均平方根 (RMS) は 2.47mGal となった. 一方、航空重力データと LSC 推定重力値との間の較差は、最大で 5.15mGal, 最小で-7.39mGal, 平均で 0.00mGal となり、較差の RMS は 1.46mGal となった. すなわち、全球重力場モデルのみを用いる場合と比べ、3D-LSC 法を用いる場合、航空重力データと推定重力値との間の整合性は、RMS で 1mGal ほど向上することが確認された.

表-1 航空重力データと、EGM 推定重力値との間の較差、及び LSC 推定重力値との間の較差.

	EGM 推定重力値との間の較差	LSC 推定重力値との間の較差
最大値	8.83 mGal	5.15 mGal
最小値	-9.81 mGal	-7.39 mGal
平均較差	0.03 mGal	0.00 mGal
RMS	2.47 mGal	1.46 mGal

4. 結論

本研究では、精度 3cm を持つ精密重力ジオイド・モデルを開発することを目的に、3D-LSC 法を用

いることで航空重力データの絶対的精度評価を行い、収集された航空重力データが目的達成に足る精度 (1~2mGal) であるか調査を行った。その結果、地表重力データの品質が高い陸域の上空において、航空重力データと地表重力データ及び全球重力場モデルに基づく推定重力値は 1.46mGal で整合することが分かった。陸域での地表重力データの精度は 1.09mGal (Matsuo and Kuroishi, 2020) であることから、誤差伝搬の原理から、KT01 ブロックにおける航空重力データの精度は 0.97mGal と言える。すなわち、KT01 ブロックにおいて収集された航空重力データは、精度 3cm のジオイド計算を行う上で、十分な品質を持つと言える。現に、KT01 ブロックにおける重力ジオイド・モデルの試験計算では、GNSS 水準法による実測ジオイド高と計算された重力ジオイド・モデルは、標準偏差 2.46cm で整合しており、精度 2cm のジオイド計算が達成されている (Matsuo, 2020)。今後、他の地域においても航空重力データの精度評価を行い、その精度に即した重力ジオイド計算を進めていく。

参考文献

- Forsberg, R. (1987): A new covariance model for inertial gravimetry and gradiometry. *Journal of Geophysical Research* 92, 1305–1310.
- Heck, B. (2003): On Helmert's methods of condensation. *Journal of Geodesy* 77, 155-170.
- Heiskanen, W.A. and Moritz, H. (1967): *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Kurihara, S., Nakashima, M., Kodama, T., Iio, K., Ohmori, S., Handa, M., Kichiraku, E., Matsuo, R., Kawawa, H., and Ochi, K. (2020): The Airborne Gravity Survey for Development of a New Precise Gravimetric Geoid Model in Japan, paper presented at AGU fall meeting 2020.
- Matsuo, K. (2020): Geoid determination using airborne gravity data in the Kanto area of Japan, paper presented at AGU fall meeting 2020.
- 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.