

航空重力測量のデータ解析と精度評価

実施期間	令和元年度		
測地部物理測地課	飯尾 研人	大森 秀一	吉樂絵里香
	兒玉 篤郎	富山 顕	半田 優実
	栗原 忍	越智久巳一	
測地部	河和 宏		

1. はじめに

近年、ドローン物流、自動運転、ICT 施工といった様々な分野で 3 次元空間でのリアルタイムかつ高精度な位置情報サービスが求められている。衛星測位から高精度な標高を得るためには、均一でより精度の高いジオイド・モデルが必要である。そこで、山間部や沿岸海域を含む全国の重力データを短期間で均質かつ高密度に取得し、ジオイド・モデルを均一・高精度化するため、2019 年度から航空重力測量を開始している。2022 年度までに離島を除く全国の航空重力データを整備し、2023 年度に航空、地上、衛星及び海上重力データを組み合わせて精度 3 cm を目標とした新たな精密重力ジオイドを構築する予定である。

令和元年度は関東地区の航空重力の測定及び精度評価を行い、航空重力測量データの解析及び精度評価は先行事例のある米国国家測地測量局 (NGS) の Operations Handbook に準じた方法で行っており、本稿ではその詳細について報告する。

2. データ取得

2.1 航空重力計

航空重力測量に用いる重力計は Micro-g LaCoste 社製 TAGS-7 (Turn-key Airborne Gravity System 7) である。TAGS-7 は、重力計本体、本体を航空機に固定するフレーム部及び制御 PC 等からなる制御・記録部により構成されており、フレーム部は重力計本体の水平を維持し測定値のノイズとなる航空機の揺れの影響を緩和する構造を持つ。重力計本体は、飛行中の水平・上下方向の加速度の変化が小さく安定的なデータが取得できる機体重心に近い位置に設置した。加えて、航空機の位置と姿勢を計測するために GNSS/IMU を搭載している。これにより測定中の重力計本体の位置情報をより正確に算出することができる。

2.2 飛行場重力点の設置

航空重力計で測定できる重力はその変化量であるため、重力値とするための絶対値の取付け及びドリフト補正をするためには、飛行前後に重力が既知の地点で機体を静止させて重力の測定を行う必要がある。このため、航空重力測量に使用する各飛行場の駐機場等に本点として 2 点、さらに本点亡失時の速やかな復旧を目的とした補助点 1 点の飛行場重力点を日本重力基準網 2016 (JGSN2016) の基準重力点から相対重力測定により設置している。したがって、航空重力測量で求められる重力値は JGSN2016 に整合した飛行場重力点の重力値を基準とした相対値である。

2.3 航空機による測定

航空機が飛行し上空で重力を測定する経路を「測線」と呼ぶ。全国を網羅し効率的な測定を行うため、海外での先行事例を参考に航空機の性能を考慮し測線の設計を行っている。上空での測定時、観測者 1 名は機器の操作や重力データ取得状況のモニタリングを常時行う。航空機の揺れは直接重力デ

ータのノイズになり得るため、5分ごと及び観測者が揺れを体感したときに、その程度と時刻を記録する。さらに測定環境を把握するために測定開始点、中間点及び終了点において風速、風向及び対地速度を記録する。

3. データ解析

3.1 GNSS/IMU

GNSS/IMU の解析には Applanix 社製 POSpac MMS ソフトウェアを使用している。解析手法は後処理キネマティック解析で Single Base と Smart Base という 2 通りを用いている。Single Base は既知点として電子基準点 1 点のデータ (1Hz) を用いて観測当日に基線解析を行うことができる。一方、Smart Base は精密歴が提供される観測 2 週間後に複数の電子基準点データを用いて基線解析を行う。Single Base の位置情報は観測の良否の判断の際に使用し、Smart Base は最終的な位置情報に使用する。電子基準点の既知点座標値は F3 解を用いている。

表-1 Single Base と Smart Base 処理の比較

	一次解析	二次解析
解析手法	Single Base	Smart Base
目的	観測の良否判断	最終成果の位置情報
解析日	観測終了以降	観測 2 週間後以降
暦	放送歴	精密歴
電子基準点数	1 点	4~50 点

3.2 重力データ

重力データの解析には NGS から提供された Newton という解析ツールを用いている。Newton は、GNSS/IMU により得られた位置情報、その位置情報を用いて測定高度に化成した EGM2008 の重力値、TAGS-7 により測定された重力値を用い、位置情報と重力値の時刻の同期、エトベス補正、ガウシアンフィルター処理などを行い、重力値を出力する。

Newton による測線ごとの解析結果は、(ア) EGM2008 との差が 5mGal 以内であること、

(イ) フィルター処理後のオフレベル補正量が 15mGal 以内であることの 2 つの指標によって評価される。オフレベル補正とは、機体からみた重力計に加わる水平方向の加速度の影響を補正するものである。(ア) と (イ) の両方を満たす状態を Good, どちらか一方を満たす状態を Suspect, どちらも満たさない状態を Bad として評価している。ただし、既存の重力データの空白域である山岳部や沿岸部は、EGM2008 の精度が低い可能性もあり、測定地点の地形を考慮して評価する必要がある。また、他の評価方法としては、隣接する測線と比較して重力変化の傾向の確認、クロスオーバー (測線が交差する地点) における重力値の較差によるものがある。図-2 に Newton による解析結果の出力例を示す。左上から左下の図はそれぞれ、EGM2008 と測定値の重力値の差、オフレベル補正值 (青: フィルター

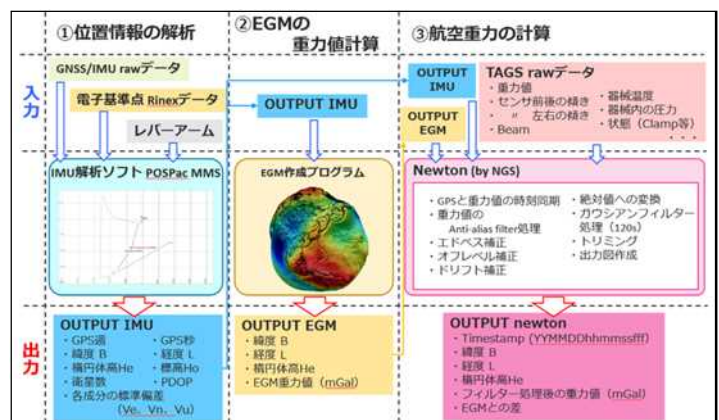


図-1 航空重力データの解析フロー

処理前, 赤紫: フィルター処理後), Quality Factor (緑: Good, 黄: Suspect, 赤: Bad) である. 右図は, 黄緑線が EGM2008 の重力値, オフレベル補正量 (フィルター処理前) で色分けされた線が測定した重力値である.

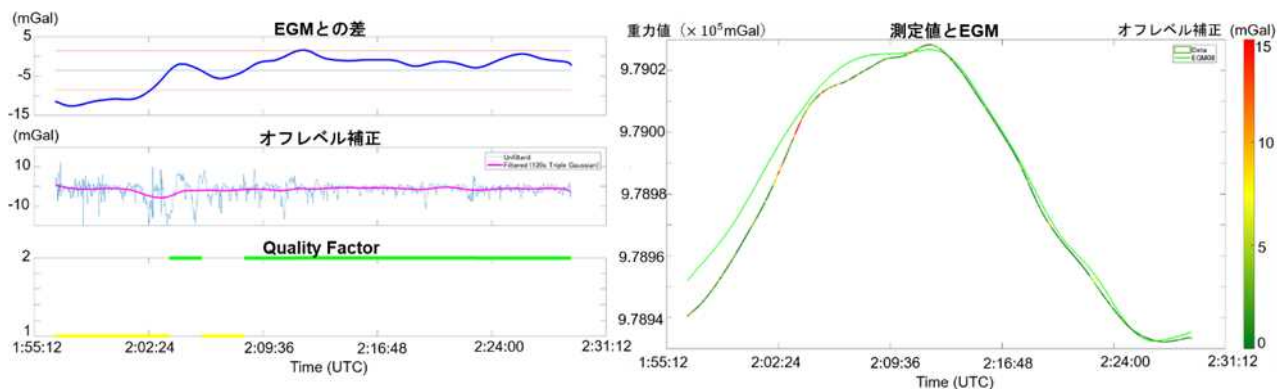


図-2 Newton による解析結果例

4. 精度評価

4.1 検定線と沿岸海域

国土地理院では, 航空重力計が我々の目的とする精度を有しているか確認するため, 埼玉県から茨城県沖にかけて同一緯度上で約 170km の測線を検定線として設け, 1 年に 1 度, 検定線を東西両方向から複数回測定することで, 取得されたデータの精度及び再現性を確認することとしている. 図-3 に検定線の位置及び 2020 年 2 月の測定結果を示す. グラフの横軸は経度, 縦軸は重力値を示しており, 黄緑線が EGM2008 の値, その他 4 本が測定した上空の重力値である. 4 本の重力値の変化は同一傾向であり, その標準偏差は 0.52mGal であった. TAGS-7 の公称精度は 0.75mGal であるので, 十分な再現性が確認できていることが分かる. また, 陸域では EGM2008 と 4 本の重力値との変化がよく一致している一方, 既存の重力データが空白域となっている沿岸部で乖離する傾向が見られ, 航空重力データがより正確に重力場を捉えている可能性がある.

この乖離が海岸から何 km 離れた地点まで続くかを調査するため, 検定線に並行する南方約 35km の測線において海岸から 100km 先の海上まで測定を行った. その結果, 海岸線から約 40km 離れた海上で既存の海上重力データとの整合性が高くなることが分かった.

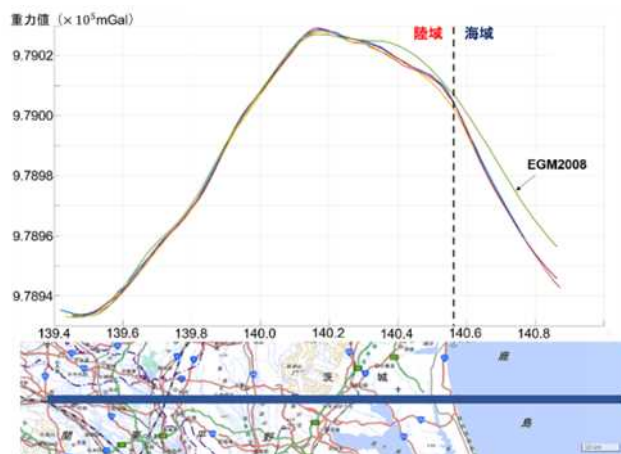


図-3 同一高度に化成した測定結果 (上図), 検定線の位置 (下図)

4.2 クロスオーバー

クロスオーバーにおける重力値の較差は、測線ごとのバイアス補正や再測の判断材料になるなど精度評価の重要な要素となる。図-4に2019年12月に測定した関東地区の各クロスオーバーにおける重力値の較差及びヒストグラムを示す。重力値は同一高度に化成してある。クロスオーバーにおける較差は2mGal以内に収まるのが望ましく、平均値が-0.7mGal、標準偏差は1.3mGalであったので良い結果が得られていると考えられる。

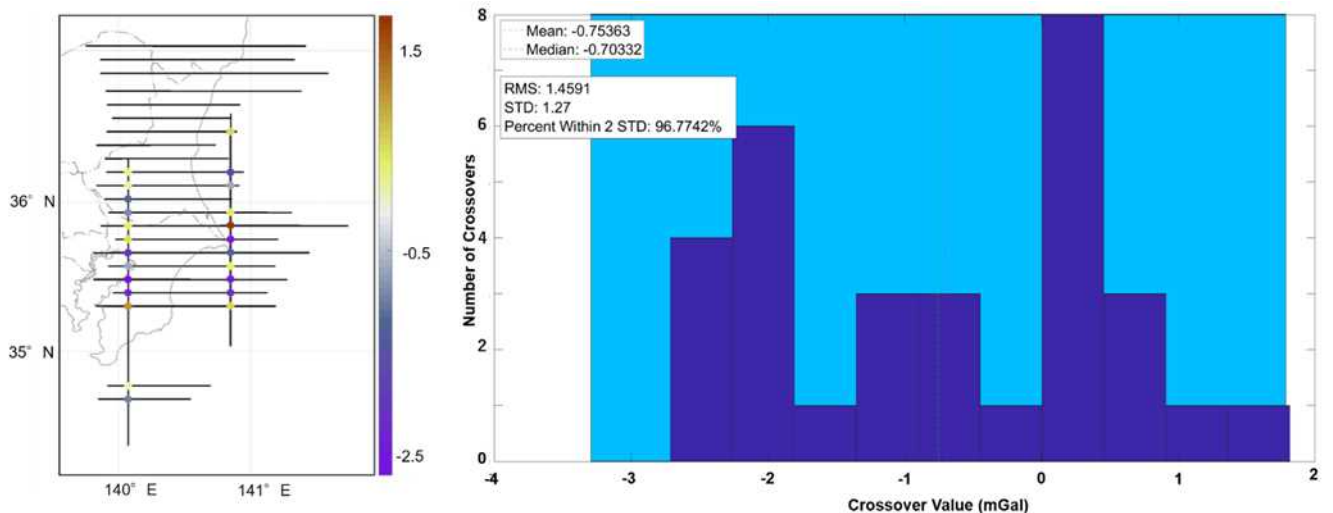


図-4 各クロスオーバー地点における重力値の較差（左図）とヒストグラム（右図）

5. まとめ

航空重力測量により得られる重力データは、ジオイド・モデルの精度向上に十分な精度があり、既存の地上及び海上重力データの空白域である沿岸部において、その優位性が示される結果となった。航空重力測量により海岸から40kmまでの沿岸海域を含めた全国の航空重力データを網羅的に取得することで、新たな精密重力ジオイド構築への貢献が期待できる。

高精度な重力ジオイドを構築するには、良質な航空重力データが必要不可欠である。そのためには、なるべく機体の揺れがない環境で測定しなければならない。上空の気流が悪いと機体が揺れ、良質なデータを得ることができない。気流は、風向、風速、地形や日射など様々な要素が影響し、予想が難しく、現地に行かないと分からないことも多々あるが、NGSの技術者からの助言を踏まえて、今後は風速45ktを測定可否の一つの目安として測定していく。航空重力測量はまだ試行錯誤の段階であるが、高精度な重力ジオイドの構築、ひいては新たな標高体系の実現へとつながる事業であるため、より良い環境下で重力データを取得できるように努めていく。

参考文献

大森秀一, 吉樂絵里香, 兒玉篤郎, 富山顕, 河和宏, 平岡喜文, 矢萩智裕 (2019): 精密重力ジオイド・モデル整備手法の調査・検討, 平成30年度調査研究年報, 29-31.

National Geodetic Survey (2012): GRAV-D Field Operations Handbook, https://geodesy.noaa.gov/GRAV-D/pubs/GRAVD_Field_Operations_Handbook.pdf (accessed 21 May 2020).