

精密重力ジオイド・モデル構築に向けた航空重力測量（中間報告）**－信頼性の高い標高を誰もが利用できる社会を目指して－****The Airborne Gravity Survey for Development of a New Precise Gravimetric Geoid Model in Japan (Interim Report)****－ Aiming for the Society Where the Reliable Orthometric Height Is Available to Everyone －****測地部 栗原忍¹・大森秀一¹・兒玉篤郎²・畔柳将人・半田優実³・吉樂絵里香・
飯尾研人¹・中島正寛・飯塚康裕⁴****Geodetic Department KURIHARA Shinobu, OMORI Shuichi, KODAMA Tokuro,
KUROYANAGI Masato, HANDA Masami, KICHIRAKU Erika,
HIO Kento, NAKASHIMA Masahiro, IITSUKA Yasuhiro****地理地殻活動研究センター 松尾功二****Geography and Crustal Dynamics Research Center MATSUO Koji****北陸地方測量部 富山顕****Hokuriku Regional Survey Department TOMIYAMA Akira****要 旨**

航空重力測量は、航空機に搭載した相対重力計(以下「航空重力計」という。)を用いて、陸海あらゆる領域の重力データを面的に均質かつ効率的に取得するものである。国土地理院は、平成30年度に航空重力計その他の観測に必要な装置を調達し、令和元年度から4年間の航空重力測量を行っている。令和元年7月22日に調布飛行場(東京都)にて出発式を挙行し、以降航空機を用いた観測を行っているところである。

本稿では、4年間の事業期間の折り返し時点における中間報告として、事業の概要、進捗、これまでに得られた技術的知見、事業後半への展望等について報告する。なお、本稿に含まれる情報は令和3年3月末現在のものであり、同年4月以降に行われた測線計画の変更等は含まない。

1. 航空重力測量の概要**1.1 事業の背景と概要**

平成29年度の測量行政懇談会測位基盤検討部会(座長:佐田達典日本大学教授)において、従前の水準測量に基づく標高体系の維持管理の状況及びその課題を踏まえ、衛星測位を活用した新たな標高体系の可能性について議論された(国土地理院,2018)。これによると、巨大地震等に伴う地殻変動に対しても安定な重力ジオイド・モデルを基盤とした標高決定の重要性が示され、航空重力測量による高品質な重力データの整備が必要であると指摘された。重力ジオイド・モデルの精度は重力データの密度と品質に依存するが、既存の国内の重力データは、山岳部や沿岸海域におけるデータ空白域の存在や重力点の

位置情報の精度不足等により、重力ジオイド・モデルの精度向上に必要な条件を十分に満たしていないという課題があった。2000年以降、航空機の位置情報を衛星測位技術と慣性航法装置(IMU)によって正確に取得できるようになり、諸外国で航空重力測量が実施されるようになった。ニュージーランド土地情報庁(LINZ)や米国国家海洋大気庁国家測地測量局(NOAA/NGS)では、航空重力測量で取得された重力データに基づく精密重力ジオイド・モデルの構築及びそれを基盤とした新たな標高体系への移行に向けた検討が進められた。こうした背景を踏まえ、国土地理院においても、平成30年度から航空重力測量事業を開始し、国内の均質な重力データの整備及びそれに基づく重力ジオイド・モデルの高精度化により、誰もが衛星測位を用いて信頼性の高い標高を利用できる社会の実現を目指すこととなった。

平成30年度及び令和元年度には、航空重力測量の先進事例を学ぶためにLINZ及びNGSへ職員を派遣し、観測や解析手法に関する調査を実施した。特に、NGSでは、実際に航空機に搭乗し航空重力測量に同行する機会を与えられたほか、観測データから重力データを算出するためにNGSが独自に開発したデータ処理プログラムの無償提供、同プログラムを用いたデータ処理の手法やデータ評価方法の教授など、多大な支援を受けた。平成30年12月には、航空重力計その他の観測に必要な機器の調達、重力を観測するための経路である測線計画といった準備を進めた。

令和元年7月から航空機を用いた実際の観測を開始した。全国を15のブロックに分け、10か所の飛行場を拠点に、飛行制限空域等を考慮して日本全国

現所属：¹ 企画部、² 地理地殻活動研究センター、³ 測地観測センター、⁴ 退職(令和4年3月31日)

を沖合約 40 km までの範囲で観測する計画である。各飛行場では、航空重力測量の起点となる飛行場重力点を地上の相対重力測定によって設置した。航空重力測量の主な観測条件は、主測線間隔約 10 km、副測線間隔 50~100 km、飛行高度 3,000 m 又は 5,000 m、対地速度 300 km/h である。令和 4 年度までに 1 mGal の精度で全国の重力データを整備し、そのデータ等を利用して精度 3 cm の精密重力ジオイド・モデルを構築する予定である。

1.2 主な観測機器

航空機は気流の乱れによる揺れが避けられない。そのため、航空重力測量で観測される重力データには、地球重力場の情報に加え、航空機の揺れによって生じる擾乱加速度の影響が含まれる。航空重力測量では、地球重力場の情報は主に長~中波長帯の加速度成分として捉えられ、擾乱加速度の影響は主に短波長帯の加速度成分として捉えられる。データのサンプリング間隔が長くなると、エイリアシング問題から、2つの成分の分離が困難となってしまう。2つの成分を適切に分離させるためには、短いサンプリング間隔で重力データを取得する必要がある。また、重力データに合わせて、航空機の位置情報も同等のサンプリング間隔で取得される必要がある。そこで、本事業では観測機器として、1秒間に 20 回データを取得（記録レート 20 Hz）できる航空重力計と GNSS/IMU 装置を調達した。これは、航空機の対

地速度が 300 km/h の場合、約 4.2 m 間隔でデータを記録できることを意味する。このサンプリング間隔であれば、取得された重力データの中から、地球重力場の情報と擾乱加速度の影響を適切に分離することが可能である。また、同じくエイリアシング問題も回避されるため、地球の自転によって生じるエトベス効果の補正も正確に行えるようになる。エトベス補正の詳細については 5 章で述べる。

1.2.1 航空機

航空重力測量の実施にあたり必要となる航空機の準備や運航、整備等を外部委託するため、「航空重力測量実施のための航空機運航関連業務」として、平成 31 年 4 月に共立航空撮影株式会社と 4 年間の契約をした。本業務では、受注者の所有する航空機「Cessna 208B Grand Caravan (JA889K)」を航空重力測量用に改造して使用することとなった。令和元年 7 月から 12 月までの間の観測は同機によって行われたが、受注者側の機体管理の都合で使用航空機が「Textron Aviation 208B Caravan (JA889N)」に変更され、令和 2 年 2 月から新機体での観測となった。以降、令和 4 年度の事業終了まで同機が使用される予定である。両機体ともオートパイロット機能を備え、速度 300 km/h 以上、高度 25,000 ft (約 7,600 m) までの飛行が可能である。

表-1 航空重力計 TAGS-7 の主な仕様 (Micro-g LaCoste (2020)から抜粋)

項目	要素	性能
システム性能	正確度	< 0.7 mGal
センサー	ダイナミックレンジ ドリフト センサー内温度 動的再現性	± 500,000 mGal 3 mGal/month 以下 60~65°C 0.25 mGal@50,000 mGal 水平 0.50 mGal@100,000 mGal 水平 0.50 mGal@100,000 mGal 鉛直
プラットフォーム	ピッチ ロール	± 35° ± 35°
制御システム	記録レート シリアル出力	20 Hz RS-232
その他	運用温度 保管温度 電源 重量 寸法	5~50°C -10~50°C 通常時 70 W@27°C 最大時 250W センサー部 75 kg 他制御部等 25 kg 58.4 × 53.3 × 55.9 cm (制御部は含まない)

表-2 GNSS/IMU 装置 POS AV 610 の主な仕様（POS AV 610 Datasheet から抜粋）

項目	要素	性能
システム性能	測位精度	単独測位：水平 1.5 m, 垂直 3.0 m 後処理後：水平 0.02 m, 垂直 0.05 m
	速度精度	単独測位：0.030 m/s 後処理後：0.005 m/s
	ロール及びピッチ	単独測位：0.005° 後処理後：0.0025°
	ヨー	単独測位：0.03° 後処理後：0.005°
	出力レート	最大 200 Hz
IMU	機種名 レンジ 運用温度	IMU-57 ±10 G, ±490 dps -40～55°C（起動時は-20°C以上）
GNSS	受信機名 アンテナ名	GPS-19 Trimble AT1675-180
制御システム	運用温度 電圧 消費電力	-20～55°C 18～34 V 最大 59W

1.2.2 航空重力計

航空重力計は、NGS の航空重力測量でも使用されている Micro-g LaCoste 社製 TAGS-7（Turn-key Airborne Gravity System 7）を使用する。主な仕様を表-1 に示す。航空重力計は、共立航空撮影株式会社によって、次節で述べる IMU などとともに航空機内に設置された。その後、航空局による耐空証明検査によって、航空機の強度・構造・性能の安全性等の基準に適合することが認められた。

1.2.3 GNSS/IMU 装置

GNSS/IMU 装置は、GNSS アンテナ及び受信機と IMU を組み合わせた装置である。GNSS で得られる航空機の位置情報は GNSS アンテナが取り付けられた機体頂部のものであり、機内に設置された航空重力計の位置とは 1.5 m 程度のずれがある。IMU は、航空重力計の真横に設置され、機体の傾きや加速度の変化を計測するために用いられる。GNSS で得た位置情報と IMU で取得した加速度等の情報に各センサーの相対位置（レバーアーム：詳細は第 3 章を参照）を加えて解析することで、GNSS による位置情報を航空重力計本体（センサー部中心）の位置に補正することができる。

本事業では、GNSS/IMU 装置に Applinix 社製 POS AV 610 を使用する。主な仕様を表-2 に示す。

2. 測線の計画とデータの管理

2.1 観測の仕様

航空重力測量の観測は、NGS が行う米国標高基準

座標系再構築のための重力測量事業（Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum, 以下「GRAV-D」という。）で採用されている方法を参考にするとともに、使用する航空機と航空重力計の性能、使用できる飛行場の分布等を踏まえ、表-3 の仕様で行うこととした。飛行高度は、地域ごとの航空管制、地面の標高や地形、上空の気象条件を考慮して 3,000 m 又は 5,000 m を選択する（図-1）。

表-3 観測の仕様

項目	仕様
測線間隔	主測線：10 km, 副測線：50～100 km
飛行高度	3,000 m 又は 5,000 m (10,000 ft 又は 16,400 ft)
対地速度	300 km/h（当初は 250 km/h）

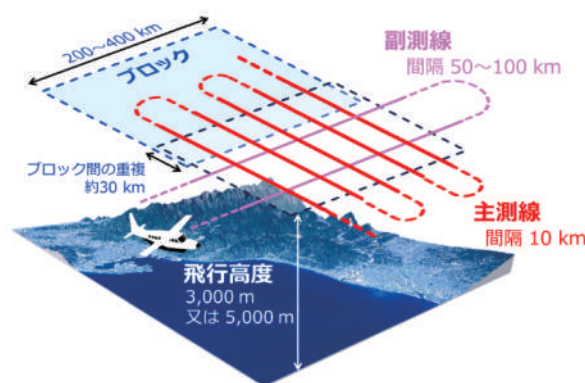


図-1 測線のイメージ

2.2 測線の計画

測線の計画は、ブロックと呼ばれる区域ごとに行われる。ここで、ブロックとは、10 km 間隔の平行な主測線でカバーされ、全ての主測線が2本以上の副測線と交差する区域のことで、同一ブロック内の飛行高度は一定とする。主測線と副測線の交点は、クロスオーバーと呼ばれ、交点におけるそれぞれの測線の重力値の較差（クロスオーバー較差）を分析することで、観測値の再現性を評価することができる。ブロックはほぼ長方形又は平行四辺形で計画されるが、陸地の形状や周辺の飛行制限空域により、必ずしもきれいな四角形にはならない。また、ブロック間の重力値の較差を評価するため、隣接するブロックは30 km 程度重複をさせて計画する。

令和元年7月の観測開始当初の測線計画では、24ブロック、577測線、総測線長116,052 km、1測線あたりの平均測線長は約200 kmであった。北海道地区は7つのブロック、東北地区は5つのブロックでカバーされており、その分隣接ブロック間の重複や航空機の進入・旋回の距離が増えるため、総飛行距離が長くなる。この測線計画について、NGSの担当者にコメントを求めたところ、主測線が短すぎるとの指摘を受けた。航空重力測量では、主に中波長帯の重力成分を観測するが、これを衛星重力データのような長波長帯の重力成分に合わせ込む際に、一定以上の測線長が必要なためである。しかしながら、航空機の燃料、酸素、職員の健康管理上の制限を考慮すると、一日あたりの飛行時間は4時間程度が限界であったため、飛行速度を250 km/h から300 km/h に上げ、一日あたりの航続距離を延ばし、おおむね200 km より短い測線をできる限り延長するよう測線計画を変更した。ブロックが細かく分かれていた北海道地区及び東北地区は複数のブロックを統合し、北海道は1ブロック、東北は2ブロックとした。その後、沖縄本島も観測することになり、これを含めて15ブロック、431測線、総測線長105,406 km、1測線あたりの平均測線長は約245 kmとなった。NGSの助言により、総測線長が約1万 km も短縮でき、効率のよい測線計画となった。

表-4 計画された測線とブロック（2021-03-24 現在）

1本あたり 測線長	平均 253.9 km 最長 531.3 km 最短 70.6 km
総測線数	448本
総測線長	113,750 km
ブロック数	15

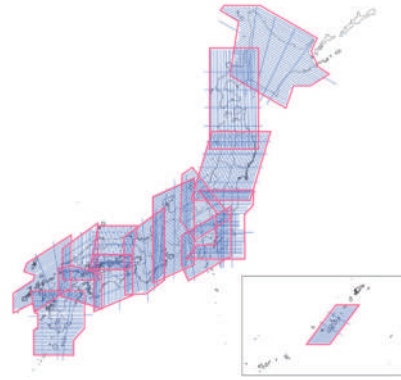


図-2 計画された測線とブロック（2021-03-24 時点）

令和3年に入って、九州周辺のいくつかの島嶼部（五島列島、種子島、屋久島等）もカバーするよういくつかの測線を延長した結果、令和3年3月現在の測線計画は、表-4及び図-2のとおりである。

2.3 データの管理

2.3.1 ブロックと測線の命名規則

航空重力データは膨大な量になるため、進捗管理やデータの検索、参照がしやすいよう、ブロック、測線の命名規則を定めた。NGSのデータ処理ソフトウェアがそのまま使えるよう、基本的な命名規則はGRAV-Dに倣うこととした。ブロック名は英字2桁の地区コードと数字2桁の通し番号で表す（表-5）。また、測線番号は、ブロック名4桁の後ろに数字3桁を付けて表し、主測線は100番台、副測線は500番台、移動中の観測や試験的な観測は900番台で表す。観測データの品質が悪く当該測線を再測する場合は、下二桁の番号はそのままに、百の位を主測線は200番台、300番台、…、副測線は600番台、700番台、…のように増やしていく。例えば、KT01ブロックの主測線135の測線名は、KT01135となり、この測線に再測があれば、1回目の再測はKT01235、2回目の再測はKT01335となる。同様に、CB02ブロックの副測線502の測線名は、CB02502、1回目の再測はCB02602、2回目の再測はCB02702となる。命名規則の上では、再測は3回まで許されることになる。

このほか、航空重力測量のための地上検定線（つくば-行田間、約50 km）上を含む検定線（4.4節）は、TL01101からの通し番号とする。

表-5 ブロック名一覧

地区名	ブロック
北海道地区	HD01
東北地区	TH01, TH02
関東地区	KT01, KT02, KT03
中部・近畿地区	CB01, CB02
中国・四国地区	CG01, CG02, CG03
九州地区	KY01, KY02, KY03
沖縄地区	OK01
検定線	TL01

2.3.2 サーベイ

実際の観測は必ずしもブロックごとに進められていくわけではなく、拠点となる飛行場からの距離、気象条件等を考慮してフライト当日に観測する測線が決められる。上空の重力値は、離陸前及び着陸後に拠点となる飛行場において行う重力の静止測定値を用いて、後段のデータ処理の際に絶対重力値に紐付けられるため、観測データは拠点となる飛行場ごとに整理する必要がある。各飛行場には重力の静止測定を行う飛行場重力点（詳細は第3章を参照）を2点ずつ設けており、例えば、調布飛行場では「調布1」、「調布2」のように点名が付けられている。ある飛行場の1つの飛行場重力点で静止測定を行った観測データを年度ごとにサーベイというまとまりで管理する。例えば、八尾空港の飛行場重力点「八尾2」で離陸前の静止測定を行った2019年の観測は、YO19-2のサーベイとなる。観測年は年度ではなく西暦である。表-6に飛行場コードの一覧を示す。

表-6 飛行場コード一覧

飛行場名	飛行場コード
女満別空港	MB
丘珠空港	OD
青森空港	AM
仙台国際空港	SD
調布飛行場	CF
名古屋飛行場	NG
八尾空港	YO
北九州空港	KK
鹿児島空港	KG
那覇空港	NH

3. 飛行観測の準備

3.1 レバーアームの測定

IMUとGNSSアンテナによる情報を用いて、航空重力測量で取得した重力の観測値を位置情報と紐付けし、また、重力の観測値に含まれるエトベス効果の補正に必要な航空機の速度を算出する。機体頂部

に設置されているGNSSアンテナと航空重力計の右側に設置されているIMUによって観測された航空機の位置、加速度及び傾きから航空重力計の位置を計算するため、航空重力計、IMU及びGNSSアンテナ相互の位置関係（以下「レバーアーム」という。）を測定する。また、飛行場重力点の重力値を航空重力計の高さに化成するため、地面から航空重力計までの高さを測定する。

レバーアーム及び航空重力計の高さの測定は、最初に航空機に観測機器を取付けたとき及び航空機の変更などにより観測機器の位置関係が変わったときに実施する。航空重力計を原点O、航空機の機首方向をx軸、x軸と水平方向に直交し右翼端方向をy軸、鉛直下向き方向をz軸とする局所座標系を設定し、各観測機器の座標を求める（図-3）。令和元年12月に航空機がCessna 208B Grand CaravanからTextron Aviation 208 Caravanに変更されたため、レバーアームの測定はこれまでに令和元年7月と令和2年1月の2回実施している。

レバーアームの測定は、調布飛行場の格納庫内で実施した。2級トータルステーション(TAJIMA GPT-3103)を用いて、航空機左翼側後方及び前方の2つの器械点から、航空重力計、IMU、GNSSアンテナの直上に設置した各ミラーを視準して、角観測と距離観測を行った。観測の制限値は2級基準点測量相当とした。IMU及びGNSSアンテナの直上にはミラーを固定することが困難であるため、ピンポールプリズムを支持具又は手で支えて測定した。また、地面から航空重力計までの高さは、航空機直下に三脚を設置して測定した。航空重力計とIMU間の水平距離はコンベックスで測定した。

器械点から航空重力計、IMU及びGNSSアンテナまでの水平距離は、斜距離と高度角から求め、航空重力計とGNSSアンテナ間の水平距離は余弦定理を用いて計算した。IMUは航空重力計の真右に設置しているため、y軸上にあるとあってよい（後にIMU上面からのオフセット量を考慮）。航空重力計とIMU間の水平距離はコンベックスで測定した値をそのまま採用した。xy平面上におけるIMU-航空重力計-GNSSアンテナのなす角を正弦定理で求め、GNSSアンテナのx座標、y座標を計算した。また、地面及び各観測機器のz座標についても斜距離と高度角から計算した。各点の器械高、目標高、GNSSアンテナ表面及びIMU上面からそれぞれの参照点までのオフセット量、航空重力計天板中心からジンバル軸までのオフセット（サスペンションコードで吊った状態）等を全て考慮すると、各観測機器のレバーアームは表-7のとおりである。

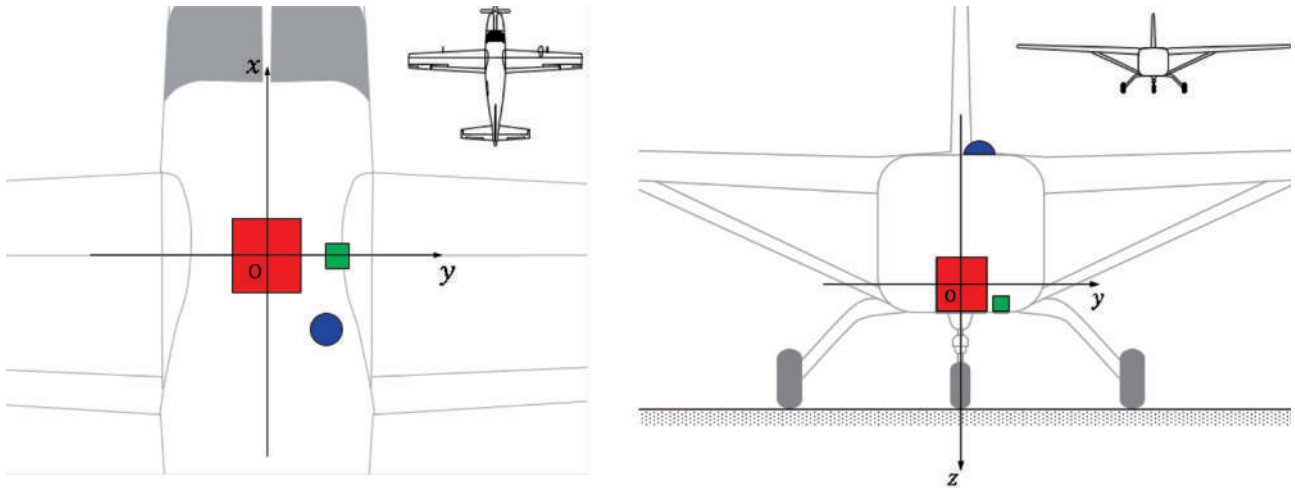


図-3 航空重力計，IMU 及び GNSS アンテナ相互の位置関係の模式図
(赤：航空重力計，緑：IMU，青：GNSS アンテナ)

表-7 航空重力計，IMU 及び GNSS アンテナ相互の位置関係

(上：Cessna 208B Grand Caravan，令和元年7月，下：Textron Aviation 208 Caravan，令和2年1月)

測点名	座標		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
航空重力計	0.000	0.000	0.000
IMU	-0.014	0.357	0.227
GNSS アンテナ	-0.719	0.122	-1.132
地上	—	—	1.642

測点名	座標		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
航空重力計	0.000	0.000	0.000
IMU	-0.014	0.352	0.225
GNSS アンテナ	-0.873	0.305	-1.095
地上	—	—	1.582

3.2 飛行場重力点の設置

航空重力計は相対重力計であるため，各飛行場内に絶対重力値が与えられた基準となる重力点が必要となる．これを飛行場重力点と呼ぶ．さらに，地上約 1.6 m に位置する航空機内に設置された航空重力計に重力値を与えるため，飛行場重力点における重力鉛直勾配も併せて測定する必要がある．

飛行場重力点の重力値の観測は，一等重力測量に準じて実施し，重力計はラコスト重力計とシントレックス重力計の組合せで3台使用する．重力鉛直勾配の観測は，基準重力測量では通常ラコスト重力計

を用いるが，飛行場重力点においては効率性を重視しシントレックス重力計2台で行うこととした．観測は，基準重力測量の重力鉛直勾配の測定に準じた方法で実施している．位置情報は潮汐補正に使われるが，それほど精度を必要としないため，作業効率も考慮してネットワーク型 RTK 法の単点観測法により実施することとした．表-8 にこれまでに測量した飛行場重力点の重力値を，また，別紙に各飛行場重力点位置情報等を含む飛行場重力点一覧表を示す．ただし，女満別空港と那覇空港の飛行場重力点の重力値は，令和3年度に観測した値である．

表-8 飛行場重力点の重力値

飛行場名	点名	重力値(mGal)
女満別空港	女満別 1	980558.380
	女満別 2	980558.328
	女満別 3	980558.278
丘珠空港	丘珠 1	980470.881
	丘珠 2	980470.904
青森空港	青森 1	980253.435
	青森 2	980253.418
仙台国際空港	仙台 1	980104.410
	仙台 2	980104.507
調布飛行場	調布 1	979756.133
	調布 2	979756.155
名古屋飛行場	名古屋 1	979744.427
	名古屋 2	979744.421
八尾空港	八尾 1	979704.429
	八尾 2	979704.435
北九州空港	北九州 1	979669.074
	北九州 2	979668.995
鹿児島空港	鹿児島 1	979418.294
	鹿児島 2	979418.273
那覇空港	那覇 1	979106.601

4. 飛行観測

4.1 観測に必要な条件

観測実施の可否は気象条件に大きく左右される。使用する航空機は計器飛行ができないため、航空重力測量は有視界気象条件の下で行わなければならない。測線上に雲があるときはその測線の観測はできない。また、航空重力計には、航空機の振動による観測値への影響を低減するさまざまな工夫がなされているが、その影響を完全に消去することはできず、航空機の揺れが予想されるような気象条件のときは、飛行しないことが望ましい。航空機の揺れの原因となるものは気流の乱れと風である。飛行高度ごとに風速上限の目安（飛行高度 3,000 m で 30 ノット以下、5,000 m で 45 ノット以下）を定め、フライト前には機長と気象条件の確認を含めた綿密な打合せを行っている。特に 12 月から 3 月は全国的に上空の偏西

風が強いいため、観測できないことが多い。また、積雪量の多い地域は、観測される重力値に雪の荷重の影響が出てしまうことが考えられるため、冬季は観測に適さない。

4.2 作業における安全管理・健康管理

飛行場内及び航空機内で行う作業における危険・事故等の防止と安全な作業の遂行のため、令和元年度に「航空重力測量安全マニュアル」を整備した。また、航空機は非与圧機であり、航空重力測量は異常気圧下での作業となることから、職員の健康を確保するため、1 回の搭乗あたりの飛行時間の目安を 4 時間程度とし、連続しての搭乗日数の上限は 3 日間を標準とする方針を定めた。

4.3 観測時の作業

前述のとおり気象条件により観測の機会は限られるため、台風や長雨等の異常気象時を除き、拠点となる飛行場に職員 1 名を一定期間配置する体制で観測を行う。飛行制限空域は土日祝日のみ飛行が許されるため、土日を含む 7～10 日程度の交替サイクルを基本として作業計画を立案している。観測日における作業スケジュールの一例を表-9 に示す。離陸前の静止測定から着陸後の静止測定までの一連の作業を「フライト」といい、原則 1 日 1 フライトとする。機体の揺れによるノイズの発生を軽減させるため、フライトは大気の状態が安定した早朝から行うのが望ましい。特に夏季は、昼頃に上昇気流が発生するため、通常の始業時間（8:30）より前に離陸する場合がある。上空での観測中は、機器の操作と監視を行い、機体の揺れを 5 分ごとに飛行記録簿へ記載していく（写真-1）。航空重力測量は、航空機を使用した業務であるため、観測 1 回あたりのコストが非常に大きい。人為的なミスを避け、確実な観測を維持するために作業手順書、器械操作のチェックシート等を整備した。また、作業中に発生した不測のトラブルやその解決策は事例集としてまとめ、次の観測者へ引継ぐことで観測の失敗を防ぐための対策を行っている。飛行記録簿は NGS が使用していたものをベースに作成し、観測者の意見をもとに利用しやすく改良した。



航空重力測量 飛行記録簿 飛行日: 2020年10月18日

Survey: Y020-2 Block: CG01 飛行: F18 観測地点: 八尾

飛行時イベント	高度(1)	航点	中点	終点	時刻 (UTC)	対地速度 (km/h)	風向	風速 (km/h)	飛行高度 (m)	観測回数	特記事項
					15:47					2	
					16:26					4	100K 瀬田川-五島
					17:38					3	
					18:45					3	
					✓ 3:20:10	150	260	20		0	
					21:20						TURNING ONLINE
					27:53						
CG0115	✓				3:28:24	168	260	23		0	
N (010)					27:10					2	
10000					29:39					3	50K
										0	

写真-1 観測中の様子 (左) 飛行記録簿の記載例 (右)

表-9 観測日の作業スケジュールの一例

時刻	工程	作業内容
7:00	観測準備	航空機の点検, 機器の点検, 機長との打合せ
8:00	フライト	飛行場重力点上での静止測定
8:30		離陸前準備
9:00		離陸
:		観測
13:00		着陸
13:30		飛行場重力点上での静止測定
14:00	データ保存, 本院への転送	
15:00	翌日に向けた打合せ	天候と観測コースの確認

4.4 検定線における飛行観測とその評価

検定線とは、航空重力計が正常に動作し、目標とする精度を有しているかを確認するための測線である。検定線における複数回の往復観測によって、取得データの精度と再現性を確認する。測線は平成30年度に地上重力測定を実施した茨城県つくば市から埼玉県行田市（約50 km）の上空を含み、東側を鹿島灘沖約45 kmまで延長した地点までの東西方向とした。また、令和2年度に西側の端点を群馬県下仁田町付近まで延長した。

令和元年12月に飛行高度5,000 mで2往復、機体変更後の令和2年2月と令和3年3月に飛行高度

3,000 mでそれぞれ2往復ずつの観測を行った。1回の観測で得た4本の重力値は同一傾向の重力値を示し、令和2年2月、令和3年3月の観測の再現性はそれぞれ標準偏差0.52 mGal, 0.65 mGalであった。TAGS-7の公称精度は0.7 mGalであり、十分な再現性を確認することができた。図-4に令和2年2月に観測した検定線上空の重力値を示す。東経140.6度より東側が海上（鹿島灘）であるが、陸地から離れ東に行くにつれて地球重力モデル EGM2008 (Pavlis et al., 2012)と測定値との乖離が大きくなる傾向が確認できる。これは、EGM2008が捉えていない重力分布を航空重力測量が捉えている可能性がある。

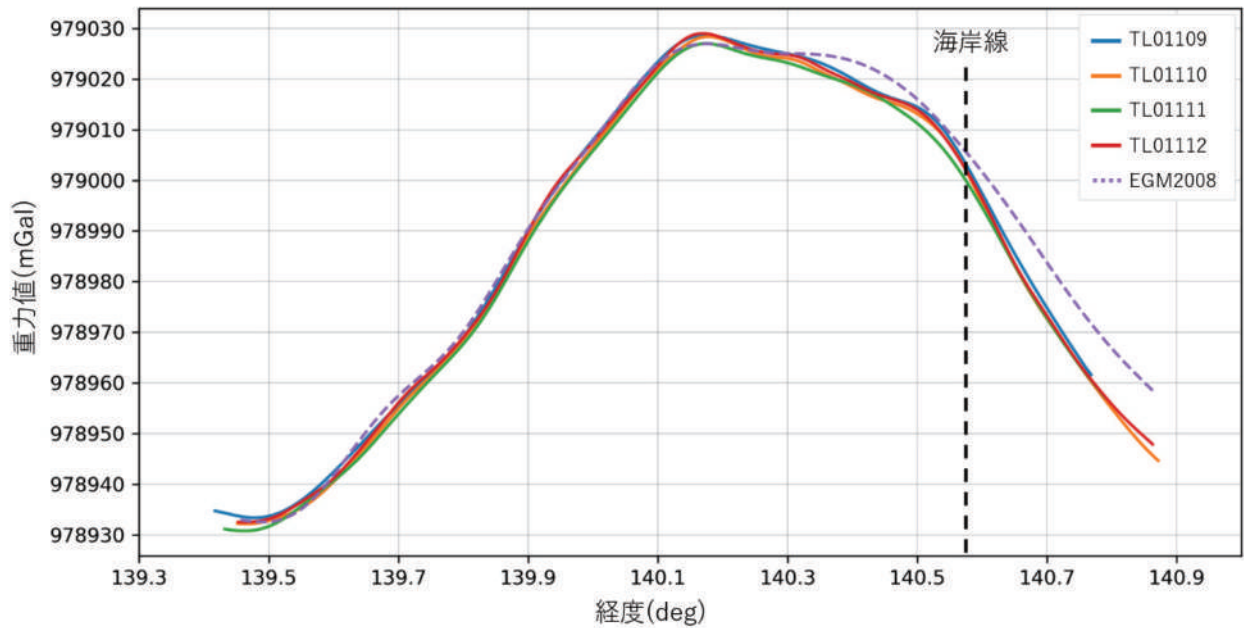


図-4 検定線上空の重力値（令和2年2月観測）

4.5 航空重力計に関する定数

観測に際し、航空重力計に関する定数を予め把握し適切に処理する必要がある。主な定数として、スケールファクターとVCC（Vertical Cross Coupling）ファクターがある。

4.5.1 スケールファクター

TAGS-7はスプリングを用いた相対重力計であり、その伸びから相対的な重力差を測定するものである。重力計の読定値を重力の観測値に変換する際、読定値に乘じる係数をスケールファクターという（5.3.1項を参照）。重力変化に対するスプリングの応答特性には若干の個体差が存在するため、スケールファクターは個々の重力計ごとに固有の値となる。

スケールファクターは、重力計の読定値が大きく変化するような観測を行うことで求めることができる。TAGS-7の場合は、重力値が大きく変化する検定測線上での観測結果や、同一測線上を往復観測した際にエトベス効果によって生じる読定値の変化量を利用して、スケールファクターを決定する。

4.5.2 VCC ファクター

航空機に搭載されている航空重力計は、機体の揺れに起因する鉛直方向、水平方向の加速度の影響を常に受けており、これらの影響をどれだけ正確に取り除けるかが観測精度を大きく左右する。加速度による誤差のうち、重力計の水平ビーム（図-5にラコスト重力計の例を示す）が航空重力計のロング方向（航空機の機首方向）の加速度を受けることで発生する誤差をクロスカップリング誤差という。観測時

は機体に搭載されたオートパイロット機能によって等速度で飛行するよう制御されるが、水平方向の加速度はその制御時に生じるものである。機体の揺れのパターンは航空機とオートパイロットの性能によって変わるため、クロスカップリング誤差をより正確に補正するためのVCCファクターは、機体ごとに求めなければならない。

なお、これら加速度による影響の除去方法は、5章で詳しく述べる。

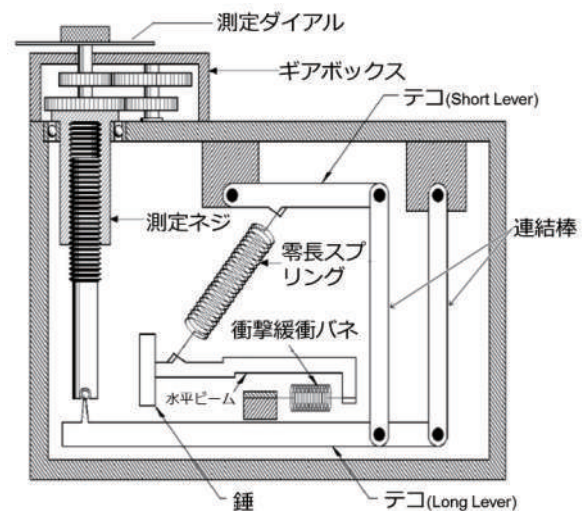


図-5 ラコスト重力計の内部模式図（LaCoste & Romberg Instruction Manual より引用、一部付記）

5. 計算

5.1 作業の流れ

1 回のフライトから解析、評価、再測の判断に至るまでの作業プロセスは以下のとおりである。図-6に①から④までの具体的な計算フローを示す。

- ① 観測（航空重力計，GNSS/IMU 装置）
- ② 位置の計算（一次解析，最終解析）
- ③ EGM2008 の重力値計算
- ④ Newton によるデータ処理
- ⑤ 推定重力値の計算
- ⑥ 再測の判断

ここで一次解析とは重力の観測値の良否を判断するための解析，最終解析とは測量成果となる重力値を計算するための解析である。この2つは②位置の計算で使用するGNSS衛星の軌道情報とGNSS基準局の数が異なるだけであって、③以降の作業内容は同じである。

以下では、上記②から⑥までの具体的な手順を述べる。

5.2 位置の計算

位置の計算とは、航空機に搭載したGNSS/IMU装

置が取得した観測データの解析である。解析された位置情報は、3章で述べたレバーアームの測定結果を用いて、航空重力計の位置に化成されたものとなる。またこの位置情報は、5.3節で述べる重力の観測値との時刻同期やエトバス補正、オフレベル補正の算出にも使用される。GNSS/IMUデータの取得にはApplanix社製のPOS AV 610を、解析には同じくApplanix社製のPOSPac MMS v8.4 sp2を使用している。解析手法はGNSS/IMU装置の各データの密結合処理（Tightly-coupled）により行う。

5.2.1 一次解析

一次解析では、GNSS衛星の軌道情報は放送暦を用いる。GNSS基準局は拠点となる飛行場から20km以内に位置する電子基準点1点（離陸飛行場と着陸飛行場が異なる場合はそれぞれの飛行場付近の電子基準点各1点）とし、その座標値は毎年1月1日の電子基準点日々の座標値（F5解）とする。また、解析に用いる電子基準点データのデータ取得間隔は1秒とする。

令和2年12月時点でGNSS基準局として使用している飛行場ごとの電子基準点は表-10のとおりである。

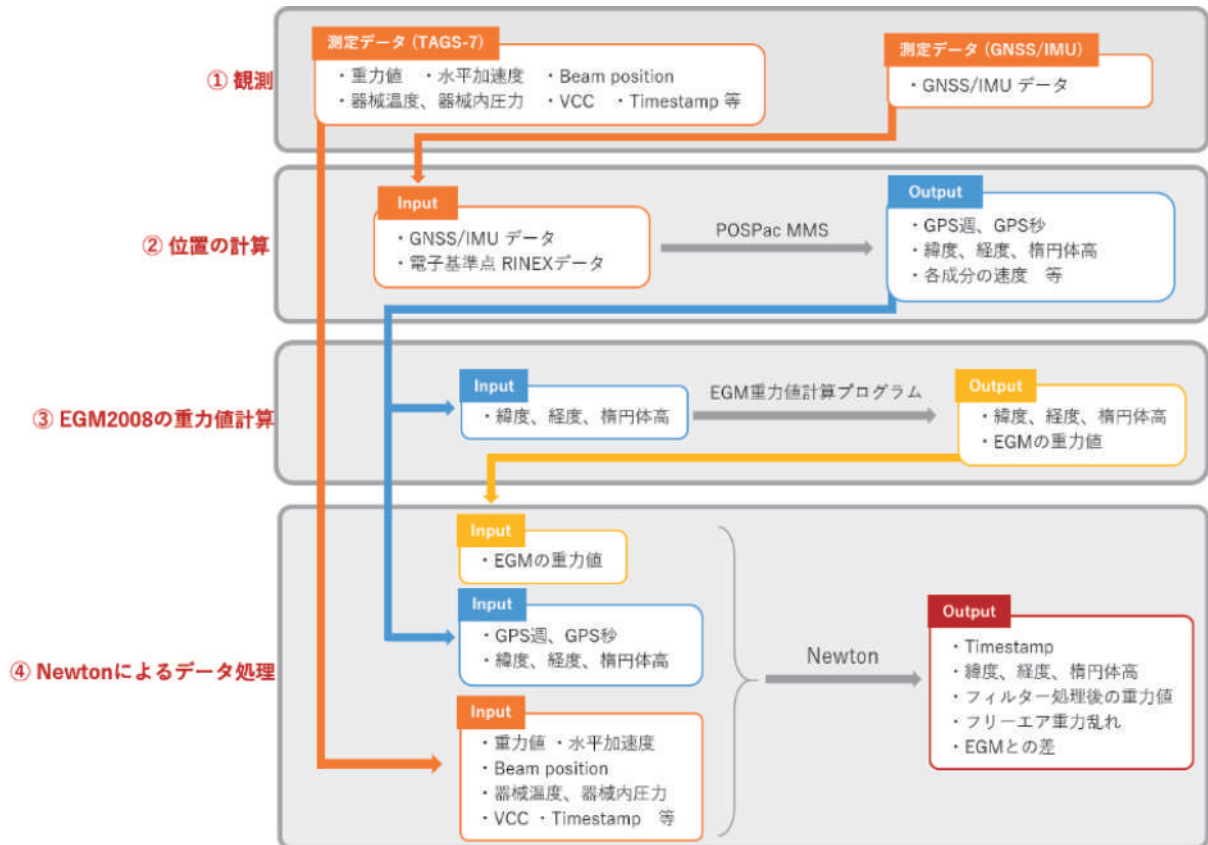


図-6 計算の流れ (①~④まで)

表-10 GNSS 基準局として使用する電子基準点

飛行場名	電子基準点名（点番号）
調布	小金井（93019）
名古屋	愛知大口（950298）
八尾	堺（950337）
仙台	亘理（950179）
北九州	行橋（960686）

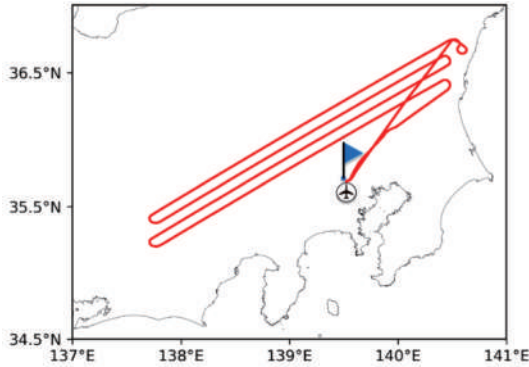


図-7 一次解析の配点図例

図-7 に配点図の例を示す。航空機のマークがある場所が離着陸飛行場、青旗が GNSS 基準局として使用する電子基準点、赤色の線が解析された飛行経路である。

5.2.2 最終解析

GNSS 衛星の軌道情報は国際 GNSS 事業 (IGS) 精密暦を用いる。GNSS 基準局は航空機の飛行経路を取り囲む 10 点以上の電子基準点とし、電子基準点間の距離は 100 km 以内、飛行経路と最寄りの電子

基準点との距離が 70 km 以内となるようにする。なお、海上での飛行など電子基準点が存在しない地域についてはその限りでない。電子基準点の座標値は、当該データを観測した日の電子基準点日々の座標値 (F5 解) を使用する。また、解析に用いる電子基準点データのデータ取得間隔は 30 秒とする。

図-8 に配点図の例を示す。航空機のマークがある場所が離着陸飛行場、青丸で記されているのが電子基準点、青旗が立っている電子基準点が固定局、赤色の線が解析された飛行経路である。この飛行経路を取り囲むような電子基準点を結んだ黄色線の内側では、対流圏や電離層による誤差や軌道、時計誤差が内挿計算により補正され、外側では外挿計算により補正される。

最終解析ではフライトごとの位置の計算結果を精度管理表 (図-9) としてまとめる。主な点検項目は DOP 及び往復差、位置の標準偏差、それぞれの平均値と最大値である。

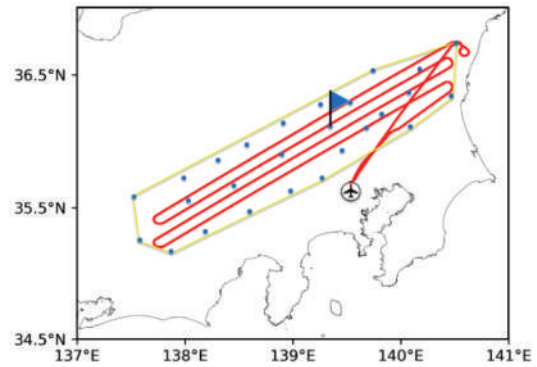


図-8 最終解析の配点図例

GNSS/IMU観測データ精度管理表

Survey	CF20-1	Flight	04	機体番号	Textron Aviation 208 JA883N	GNSS/IMU機器	APPLANIX POSAV610	GNSSアンテナ	AER AT1675-180				
使用ソフト	POSPac MMS 8.4 sp2	解析方法	Tightly-coupled	IMUデータ取得周波数	20Hz	GNSS軌道層	精密層	使用したGNSS基準局	別紙参照				
測線番号	測定高度(m)	開始時刻(上段) 終了時刻(下段) (UTC)	最小(下段) 平均(上段) 衛星数	DOPの平均値(上段)と 最大値(下段)			往復差の平均値(上段)と 最大値(下段) (m)			フィックス率 (%)	位置 標準偏差の平均値(上段)及び 最大値(下段) (m)		
				PDOP	HDOP	VDOP	N	E	U		N	E	U
KT02901	2963	2020-05-29 23:49:27	14.69	1.64	0.95	1.34	0.00	0.00	0.00	100.00	0.02	0.02	0.02
		2020-05-30 00:01:46	14	1.74	1.00	1.42	0.00	0.00	0.02		0.02	0.02	0.03
KT02503	4996	2020-05-30 00:32:38	13.95	1.57	0.90	1.28	-0.02	0.00	-0.01	100.00	0.02	0.02	0.02
		2020-05-30 00:57:04	13	1.82	1.05	1.48	0.05	0.03	0.20		0.02	0.02	0.03
KT02603	4996	2020-05-30 01:10:10	13.99	1.45	0.84	1.18	0.00	-0.01	-0.01	100.00	0.02	0.02	0.03
		2020-05-30 01:12:29	12	1.66	0.96	1.36	0.02	0.02	0.02		0.02	0.02	0.03
KT02121	5002	2020-05-30 01:23:37	12.05	1.73	1.00	1.41	0.00	-0.01	-0.02	100.00	0.02	0.02	0.02
		2020-05-30 01:37:58	11	2.08	1.20	1.70	0.02	0.03	0.04		0.02	0.02	0.03
KT02120	5000	2020-05-30 01:44:35	12.14	1.64	0.95	1.34	0.00	0.00	-0.01	100.00	0.02	0.02	0.02
		2020-05-30 02:01:56	10	1.99	1.15	1.63	0.00	0.00	0.02		0.02	0.02	0.03
KT02902	5000	2020-05-30 02:08:14	11.97	1.85	1.07	1.51	0.00	0.00	0.00	100.00	0.02	0.02	0.02
		2020-05-30 02:20:17	10	2.29	1.32	1.87	0.01	0.00	0.01		0.02	0.02	0.03
解析者	坂尾	解析年月日	2020-06-01			点検者				点検日			

図-9 位置の計算の精度管理表

5.3 Newton を用いたデータ処理

航空重力測量により得られた重力の観測値には、真の重力値のほかに、航空機の揺れによる影響や地球の自転が見かけの重力値を増減させるエトベス効果、重力計の傾きによる重力測定感度軸のずれなどが合成されている。それらさまざまな影響を含む観測値から、真の重力値を取り出す工程がデータ処理である。データ処理にはMATLAB上で動作するNGSが開発したプログラム Newton (GRAV-D Team, 2017) を使用している。Newton への入力データは以下のとおりである。

- ・航空機に搭載した GNSS/IMU 装置により得られる航空重力計の位置情報
- ・上記位置情報を用いて EGM2008 から計算した飛行高度における重力値
- ・航空重力計で取得した重力の観測値、水平加速度、その他観測データ

飛行高度における EGM2008 重力値は、Matsuo & Kuroishi (2020)の手法を用いて算出した。Newton が行う主な処理工程は以下のとおりである。

- GNSS/IMU 装置により得られた位置情報から航空機の加速度を算出
- 加速度と重力の観測値に含まれるエイリアシングを除去するために9秒のローパスフィルタを適用
- 航空機の鉛直加速度と重力の観測値の相関を元に観測時刻と GPS 時刻を同期
- エトベス補正及びオフレベル補正の適用
- ドリフト補正の適用及び絶対重力値への変換
- 120 秒のガウシアンフィルタの適用
- トリミング

なお、固体地球潮汐の影響は航空重力測量で得られる重力値の精度に対して十分小さいため無視することができる。

(エ) ~ (カ) の工程を式で表すと、Newton によって最終的に得られる重力値 g は、

$$g = (g_{raw} - a_U + eötvös + offlevel - drift + tie) * f_{120}(t)$$

と表される。ここで、 g_{raw} は重力の観測値、 a_U は GNSS/IMU 装置により得られる鉛直加速度、 $eötvös$ はエトベス補正值、 $offlevel$ はオフレベル補正值、 $drift$ はドリフト値、 tie は絶対重力値 (JGSN2016) への変換値、 f_{120} は 120 秒のガウシアンフィルタである。

5.3.1 重力の観測値

g_{raw} は次式により表せる。

$$g_{raw} = SF * raw + AVCC * VCC$$

ここで、 SF はスケールファクター、 raw は重力の観測値の raw データ、 $AVCC$ は VCC ファクター、 VCC は VCC クロスカップリングである。この第 2 項をクロスカップリング補正と呼ぶ。また、

$$VCC = B * f_{long}$$

である。ここで、 B は水平ビーム位置、 f_{long} は航空重力計に内蔵された加速度計が観測するロング方向の水平加速度である。ロング方向とは機首方向をいい、機首方向に直交する水平方向をクロス方向という。

5.3.2 エトベス補正

地球 (半径 R) の自転の方向 (東向き) に航空機が速度 v で飛行したとき、自転の角速度 ω が v/R だけ増えることになるので、重力値が $(\omega + v/R)^2 R - \omega^2 R$ だけ増加したようにみえる。これは、コリオリ力の鉛直成分であり、エトベス効果と呼ばれる。これを取り除く補正式は、

$$eötvös = - \left(2\vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} \right) \cdot \vec{e}_U$$

である。ここで、 \vec{r} は地球重心を原点とした重力計の位置ベクトル、 $\vec{\omega}$ は地球自転の角速度ベクトル、 \vec{e}_U は航空重力計の位置における鉛直方向の単位ベクトルである。

5.3.3 オフレベル補正

オフレベル補正は、重力計の傾きによる影響を補正するものである。重力計の鉛直軸 (測定感度がある軸) は、重力の働く方向 (鉛直下向き) と一致するようにジンバルで制御されているため、揺れがまったくないときに両者は一致する (図-10 左)。しかし、航空機の揺れなどによって急激に重力計が傾くとジンバルの制御が追いつかず、重力計の鉛直軸と重力の働く軸が一致しなくなる。この時、重力計が観測する値は重力ではなく、「重力の余弦成分」と「航空機の水平加速度の正弦成分」の合力となる (図-10 右)。これらの影響を取り除き、観測値から重力値を求める補正をオフレベル補正と呼ぶ。

令和 2 年度現在、Newton におけるオフレベル補正は Peters & Brozena (1995) の手法を用いており、オフレベル補正值 $offlevel$ は、

$$offlevel = oe - \widehat{oe}$$

$$oe = \sqrt{g_0^2 + f_{long}^2 + f_{cross}^2 - a_{long}^2 - a_{cross}^2} - g_0$$

により算出される．ここで、 \widehat{oe} は測線ごとの oe の中央値、 f_{cross} は航空重力計が観測するクロス方向の水平加速度、 a_{long} はGNSS/IMU装置により得られるロング方向の水平加速度、 a_{cross} はGNSS/IMU装置により得られるクロス方向の水平加速度、 g_0 は標準的な重力加速度(=981,000 mGal)である．なお、 g_0 はおおむね有効数字3桁で合っていれば問題ない．

以下、 oe の導出について解説する．簡単のため、重力計がロング方向にのみ傾いたケースを考える．重力の働く向きに対する重力計の鉛直軸の傾きを θ とすると、重力の観測値 f_z と f_{long} は次のように表せる．

$$\begin{aligned} f_z &= g \cos\theta + a_{long} \sin\theta \\ f_{long} &= -g \sin\theta + a_{long} \cos\theta \end{aligned}$$

この2式をそれぞれ2乗して和をとると

$$f_z^2 + f_{long}^2 = g^2 + a_{long}^2$$

となる．よって、オフレベル補正值は

$$offlevel \equiv g - f_z = \sqrt{f_z^2 + f_{long}^2 - a_{long}^2} - f_z$$

さらに、 $f_z \approx g_0 (= Const.)$ とすると

$$offlevel = \sqrt{g_0^2 + f_{long}^2 - a_{long}^2} - g_0$$

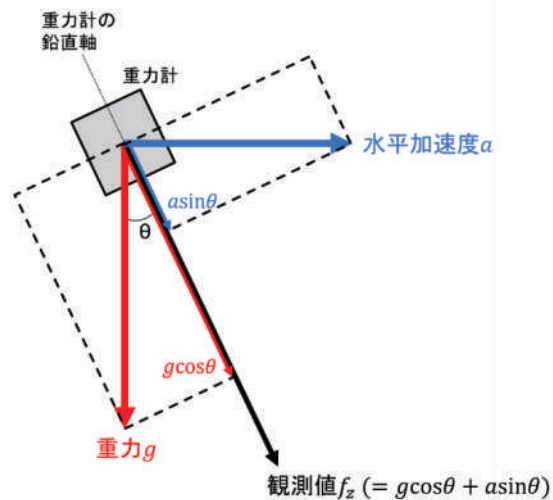
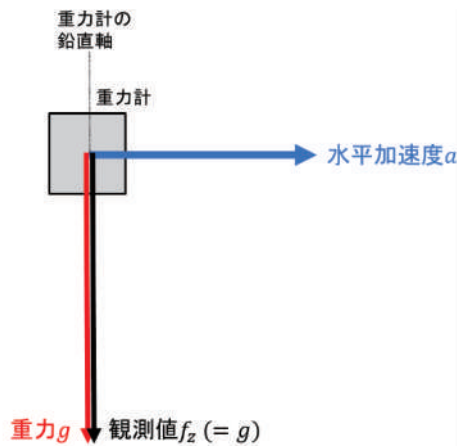


図-10 飛行観測中に重力計に作用する加速度

(左：重力計が水平なとき、右：重力計が傾いたとき、 f_z ：観測値、 g ：重力、 a ：ロング方向の水平加速度)

となる．

5.3.4 ドリフト

航空重力計のドリフト値は、離陸前及び着陸後の静止測定値を元に線形補間で推定する．そのため、 $drift$ は

$$drift = \frac{g_{raw}(t_2) - g_{raw}(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1)$$

により得られる．ここで、 t_1 は離陸前の静止測定時刻、 t_2 は着陸後の静止測定時刻である．

5.3.5 絶対重力値 (JGSN2016) への変換値

観測値は相対重力値であるため、絶対重力値に変換する必要がある．変換値は、離陸前の静止測定の重力値と飛行場重力点の絶対重力値を元に算出する．変換値 tie は、

$$tie = G + dh \cdot grad - g_{raw}(t_1)$$

により得られる．ここで、 G は飛行場重力点の絶対重力値、 dh は飛行場重力点と重力計の比高、 $grad$ は飛行場重力点の重力鉛直勾配である．

5.3.6 ガウシアンフィルタ

航空重力計の細かい振動によるノイズ除去とデータの平滑化には、ガウシアンフィルタが用いられる．フィルタ長を短くすると、重力変化の短波長成分がよく見えるが、短周期のノイズも残ってしまう．反対にフィルタ長を長くすると、短周期ノイズは除去できるが、同時に重力値のシグナルも過剰に平滑化

され、全体としてのっぺりとした重力変化しか見えなくなってしまう。NGSのGRAV-Dではフィルタ長を120秒としており、国土地理院でも60~180秒の間でいくつかのフィルタ長を試してみたが、GRAV-Dと同じ120秒のフィルタがノイズ除去と重力変化の再現の両面で最適であったため、以降120秒固定とした。

5.3.7 トリミング

航空重力計は、測線進入前のIMUの初期化のためのS字飛行の後や次の測線へ進入するための旋回直後は、機体の揺れや傾き等の影響がしばらく残るため、正しい重力値を観測できていない。この間のデータは、トリミング処理を行って削除する必要がある。トリミングするかどうかは、EGM2008の重力値との差及びオフレベル補正值の大きさに判断する。通常のトリミング処理は、測線の両端に施す。

5.4 品質評価方法及び再測の判断

Newtonによるデータ処理の後、得られた重力値(以下「航空重力値」という。)の品質評価を行い、再測が必要か否かを総合的に判断する。以下、結果の品質評価方法と再測とする判断の指標を事例から述べる。

5.4.1 EGM2008との比較

観測終了後、航空重力値の大まかな評価として、EGM2008との比較を行う。EGM2008は日本の海域での精度が低いため(3~8 mGal)、重力値の大まかな傾向が整合しているかを確認する。図-11にEGM2008重力値と航空重力値を示す。EGM2008と大きく乖離していた場合、その部分をトリミングする。クロスオーバーが取れなくなるほど大きくトリミングする必要がある場合は再測を行う。

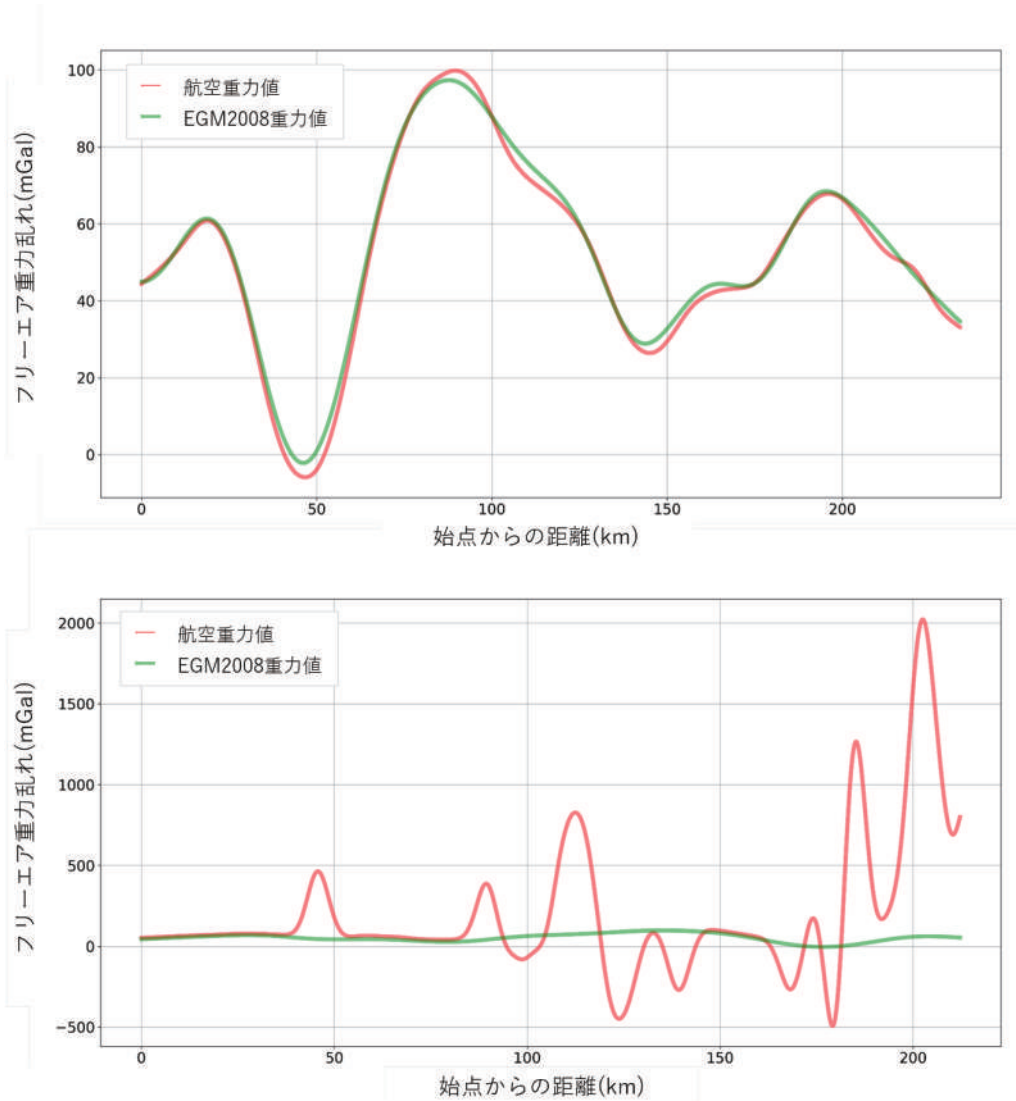


図-11 航空重力値とEGM2008重力値の比較
(上) 良好な例 (KT03218) (下) 再測候補となる例 (KT03118)

5.4.2 推定重力値との差, オフレベル補正値

航空重力値の詳細な評価では, Matsuo & Forsberg (2021)の手法に基づいて算出した推定重力値とオフレベル補正値を使用する. 推定重力値は, 既存の重力データセット(地上重力データ, 船上重力データ, 衛星アルティメトリ海上重力場モデル, EGM2008)と数値標高モデルを用いて最小二乗コロケーション法により算出された航空重力値と同高度における重力値である. その精度は, 既存の重力データの品質が高い陸域で約 1 mGal と見積もられる(Matsuo & Kuroishi, 2020). 航空重力値と推定重力値の差が小さければ, 確からしい重力分布を航空重力データが捉えられていると考えられる. しかし, 既存の重力データの品質が低い沿岸域や既存の重力データに空白がある山岳域では, 推定重力値の精度が低くなるため, 航空重力データが確からしい重力分布を捉えら

れていても, 航空重力値と推定重力値の差が大きくなる可能性がある. このように推定重力値の精度が低い場合は, オフレベル補正量の大きさを確認することで, 航空重力値の妥当性を評価することができる. Peters & Brozena (1995)の手法によるオフレベル補正は, 揺れが強く補正値が大きくなると正確に補正値を算出することが難しいということが分かっている(Olesen, 2002). したがって, オフレベル補正値が小さければ正確な補正値を算出していると考えられ, 航空重力データの信頼性が高いと判断できる.

図-12 に示す 3 つのグラフは上からバイアス補正後の航空重力値と推定重力値の重力差, オフレベル補正値の絶対値の 120 秒移動平均値, QC index を表す. 航空重力値のバイアスは, 航空重力値の中央値と推定重力値の中央値との差から推定している. QC index は, 航空重力値の品質を示す指標であり,

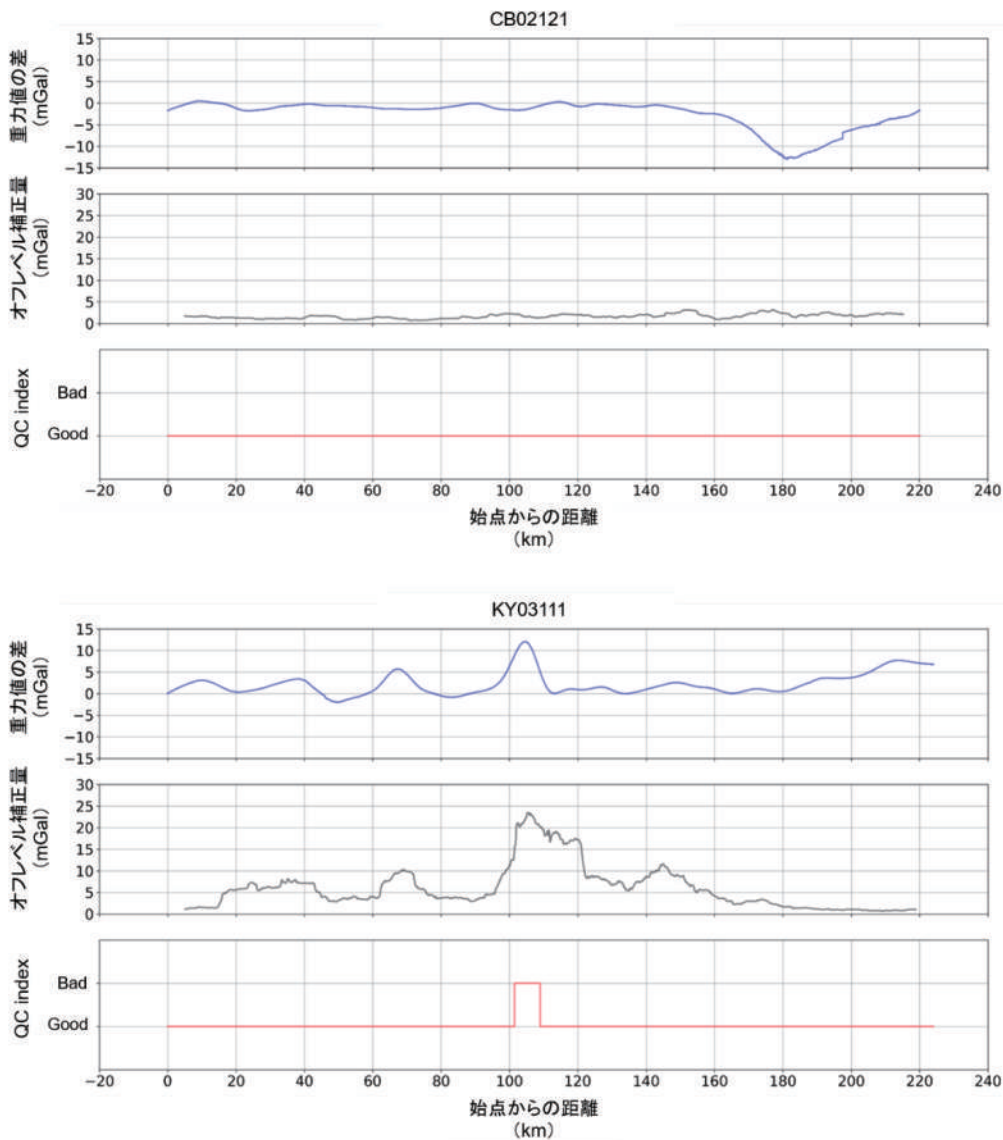


図-12 推定重力値との差, オフレベル補正量の絶対値の移動平均, QC index
(上: 良好な例 (CB02121), 下: 再測候補となる例 (KY03111))

「航空重力値と推定重力値の重力差が 5 mGal 以上」かつ「オフレベル補正値が 15 mGal 以上」であれば Bad, それ以外は Good としている。すなわち, 航空重力値と推定重力値の差が大きくても, オフレベル補正値が小さければ, 推定重力値の精度が低く, 航空重力値が正しい重力分布を捉えていると判断する。また, オフレベル補正値が大きくても, 航空重力値と推定重力値の差が小さければ, 正しいオフレベル補正値を推定したと判断する。一方で, オフレベル補正値が大きく, 航空重力値と推定重力値の差が大きければ, オフレベル補正が誤った補正値を推定したものと判断する。Bad の区間が, 航空重力測量で捉えたい重力分布の半波長となる 5 km 以上であった場合, その測線の品質は低いと判断し, 再測を検討する。

5.4.3 隣接測線との比較

隣接測線との比較は, オフレベル補正値が小さいにも関わらず, 推定重力値との差が大きい場合において, 航空重力値の妥当性を確認するために行うものである。航空重力測量で得られる重力値は, 飛行経路の下方の地形の影響を受けるため, 地上の地形が類似した隣接測線の重力値は同様の傾向を示す。

図-13 から図-15 に隣接測線である CB02121 及び CB02122 を示す。

図-14 をみると, CB02121 は測線全体を通じてオ

フレベル補正は小さいにも関わらず, 始点から 180 km 付近で推定重力値との乖離が大きく, その差は約 13 mGal であった。このような場合, 観測された重力値が真の重力変化のシグナルなのか又は何らかの異常値なのかを判別する必要がある。

図-15 は CB02121 の隣接測線 CB02122 のデータ処理結果である (ただし, 飛行方向は逆向き)。始点から 40 km 付近で, CB02121 と同様な推定重力値との乖離が見られ, 乖離している地点 (紀伊水道上空) はほぼ同じことから, 推定重力値が正しい重力値を再現できていない可能性がある。推定重力値が正しい重力値を再現できていない原因としては, 紀伊水道のような沿岸域では, 衛星アルティメトリ海上重力場モデルの精度が低いことが考えられる。

また, Newton には隣接測線の比較を行うツールがある。このツールでは横軸が経度又は緯度の差が大きい方になり, 2 測線の共通部分が抽出され, 相関係数を算出, 図示される。図-16 は, CB02121 と CB02122 のフリーエア重力乱れを比較したものである。相関係数は約 97% であり, CB02121 と CB02122 でかなり類似したシグナルが出ていることが分かる。

仮に, 隣接測線で類似したシグナルが出ていない場合は, 隣接測線で地形が大きく変わっていないかを確認し, 地形の変化がそれほど大きくないのであれば再測を検討する必要がある。

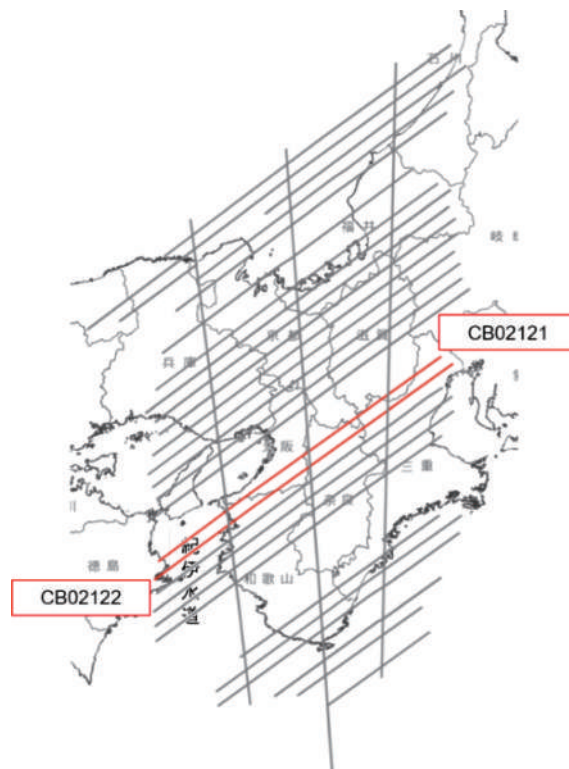


図-13 CB02 の観測済み測線

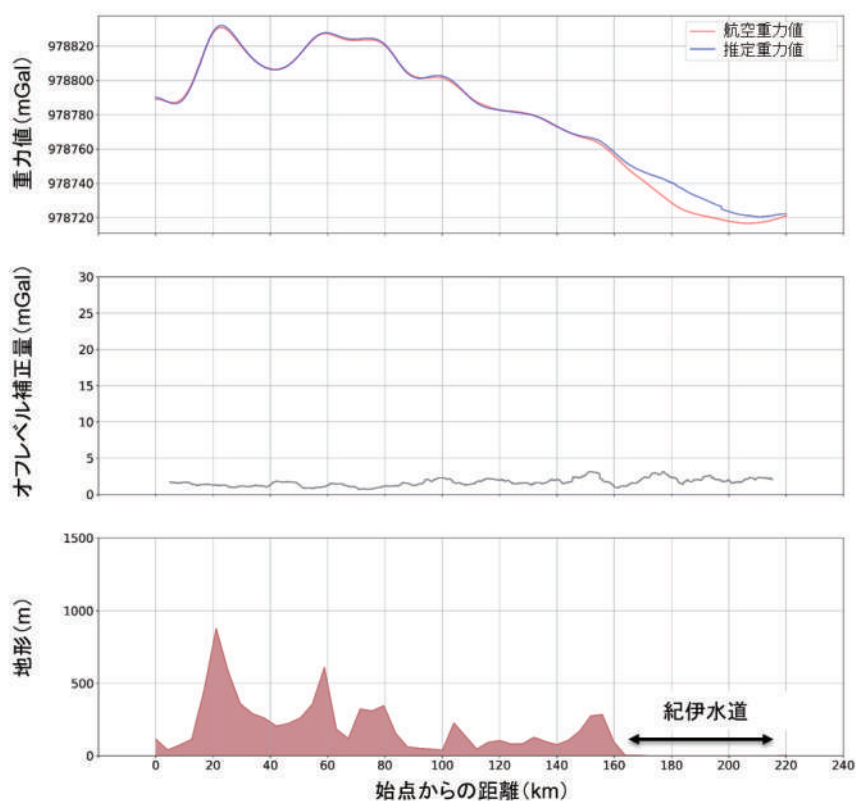


図-14 航空重力値と推定重力値，オフレベル補正量の絶対値の移動平均，地形（国土地理院標高 API をもとに描画）
（測線：CB02121 飛行方向：西向き）

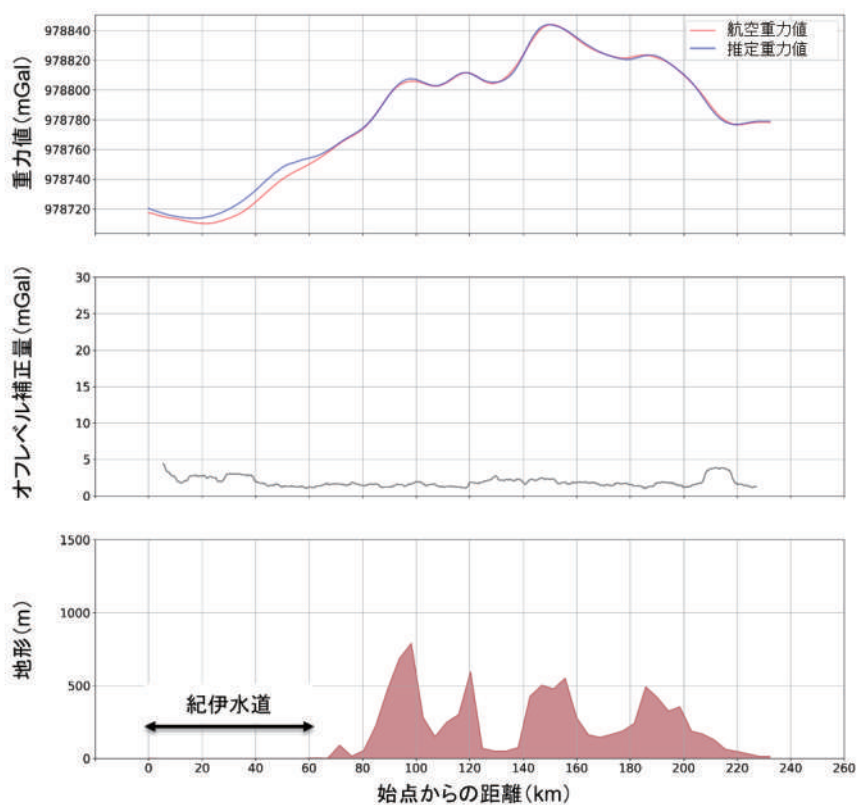


図-15 航空重力値と推定重力値，オフレベル補正量の絶対値の移動平均，地形（国土地理院標高 API をもとに描画）
（測線：CB02122 飛行方向：東向き）

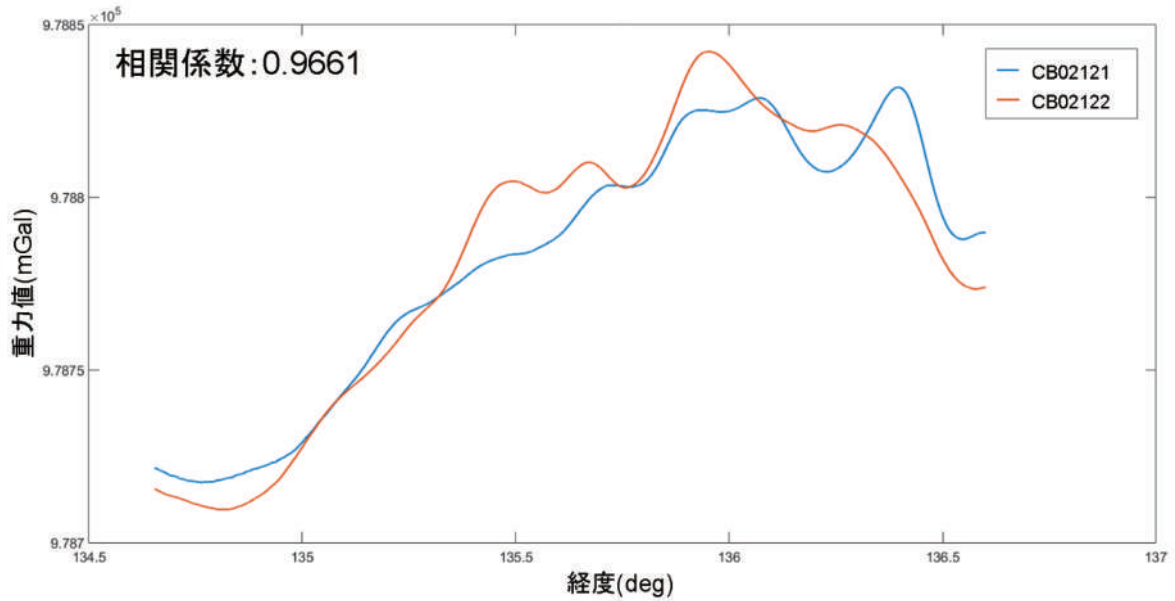


図-16 Newton による隣接測線との比較

5.4.4 中間トリミング

観測中に機体が激しく揺れると、航空重力計に大きな揺れが加わり異常な観測値となる。また、揺れた後、重力計が安定するまでに数分の時間を要する。Newton ではこの異常値をトリミングにより除去することができ、これを 5.3 節で触れた両端のトリミングに対して中間トリミングと呼ぶ。機体が揺れた後、重力計が安定して正しい重力の観測値を取得できるまで 3 分を要した場合、120 秒のガウシアンフィルタの影響で最低でも 7 分間の観測データをトリミングしなければならない。飛行速度 300 km/h で 7

分間のデータを除去すると、35 km 分のデータ欠損を生じることになる。また、中間トリミングによって重力値の連続性が失われてしまい、衛星重力データのような長波長帯の重力成分に合わせ込むことができなくなる。したがって、中間トリミングを行った測線は再測とする。ただし、中間トリミングが施された観測データも参考情報として利用する。図-17 に異常値を観測し、中間トリミングが必要な例を示す。

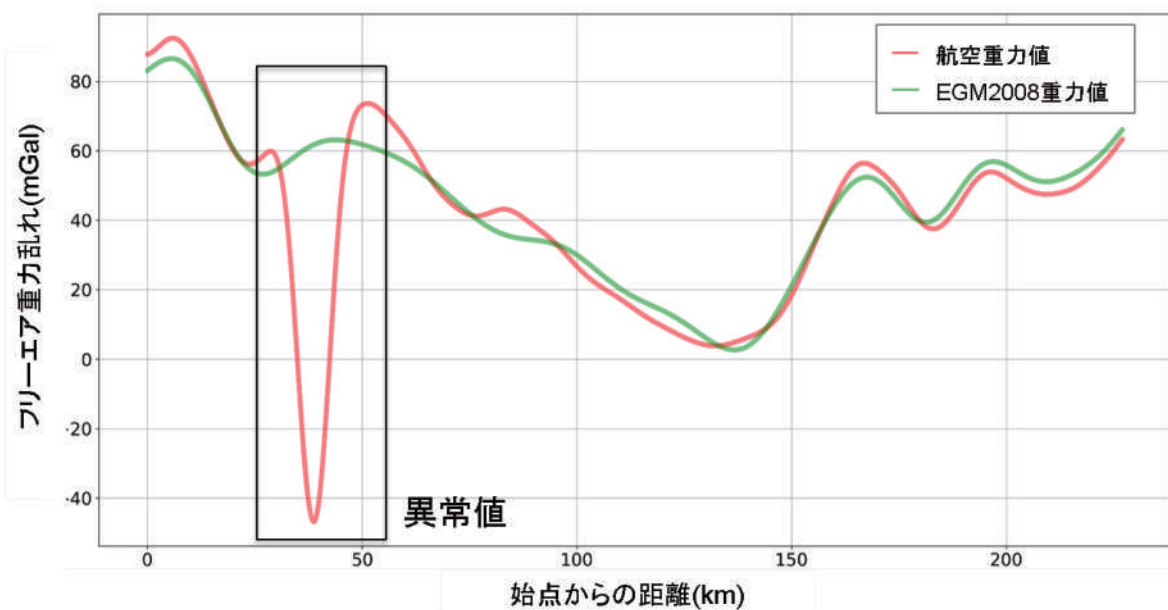


図-17 中間トリミングが必要な例 (CB02107)

5.4.5 ブロック解析

1つのブロック内における全測線のNewtonによるデータ処理の後、ブロック内のすべてのクロスオーバー較差を算出し、ブロック内での観測の再現性を評価する。これをブロック解析という。クロスオーバー較差はゼロに近いほど、再現性の高い観測であることを意味する。航空機はオートパイロットにより気圧高度を一定にして飛行しているため、気圧が異なると飛行高度が異なる。クロスオーバー較差を計算する際は、正規重力の鉛直勾配を用いて主測線と副測線の重力値をブロック内の平均高度に化成してからクロスオーバー較差の計算を行う。これらの計算は、全てNewtonで行った。

令和2年12月時点で進捗率70%以上である9つのブロックについて、ブロック解析を行った。表-11にクロスオーバー較差の統計量、図-18から図-26にブロックごとのクロスオーバー較差を示す。

KT01, KT03, CB01, CG01のブロックは、平均値と標準偏差が小さいことから、全体としてクロスオーバーにおける再現性が高いブロックであるといえる。しかしながら、KT01は猪苗代湖付近、KT03は富士山東部、CB01は飛騨山脈北東部、CG01は中国山地中央部で、クロスオーバー較差が大きい箇所がある（4 mGal以上）。これらの箇所は、観測時に山岳波（強風が山を越えたときに、その風下側に

発生する気流の上下振動）による揺れが生じていたことが確認されている。したがって、風の弱い日に再測を行うことで、クロスオーバーにおける再現性の更なる向上が期待できる。KT02, CG03, KY01のブロックは、標準偏差が小さいが、平均値が大きい。CB02, CG02のブロックは標準偏差が2 mGal以上と比較的大きいことから、クロスオーバーにおける再現性の低いブロックである。特に、CB02は丹波高地、CG02は四国山地でクロスオーバー較差が大きい箇所が多い。これらの箇所は、再測を検討している。

このほか、GRAV-Dのブロック解析ではブロック内の隣接測線となる全ての組について5.3.3項で述べた隣接測線の相関係数を算出している。隣接測線の相関係数の目安は、GRAV-Dでは地形が類似している場合でおおむね90%以上、地形の変化が著しい場合でおおむね70%以上としている。日本では、航空重力データの評価に十分な精度の推定重力値を算出できるため、5.4.2項で述べた推定重力値との比較を行えば必ずしも全ての隣接測線の相関係数を確認する必要はないが、既存の重力データの不足により高精度な推定重力値が計算できない地域での観測結果を評価する際はこの方法も有効である。

表-11 クロスオーバー較差の統計量

（ゼロに近いほど白、プラスに大きいほど赤、マイナスに大きいほど青で着色）

ブロック	設計高度 (m)	クロスオーバー 計算高度 (m)	クロスオーバー 点数	平均値 (mGal)	最大値 (mGal)	最小値 (mGal)	標準偏差 (mGal)	RMS (mGal)
KT01	5000	5037	89	-0.03	4.37	-3.03	1.34	1.34
KT02	5000	4936	33	-0.74	1.88	-4.59	1.62	1.78
KT03	5000	5044	74	-0.14	4.85	-4.93	1.87	1.87
CB01	5000	5039	120	0.37	6.79	-3.02	1.62	1.66
CB02	3000	3085	77	-0.21	5.54	-4.14	2.04	2.05
CG01	3000	3084	60	0.06	6.22	-3.71	1.64	1.64
CG02	3000	3088	60	0.08	6.64	-5.41	2.58	2.58
CG03	3000	3085	54	-0.97	2.06	-4.45	1.21	1.55
KY01	3000	3085	30	-0.94	2.93	-6.75	1.77	2.00

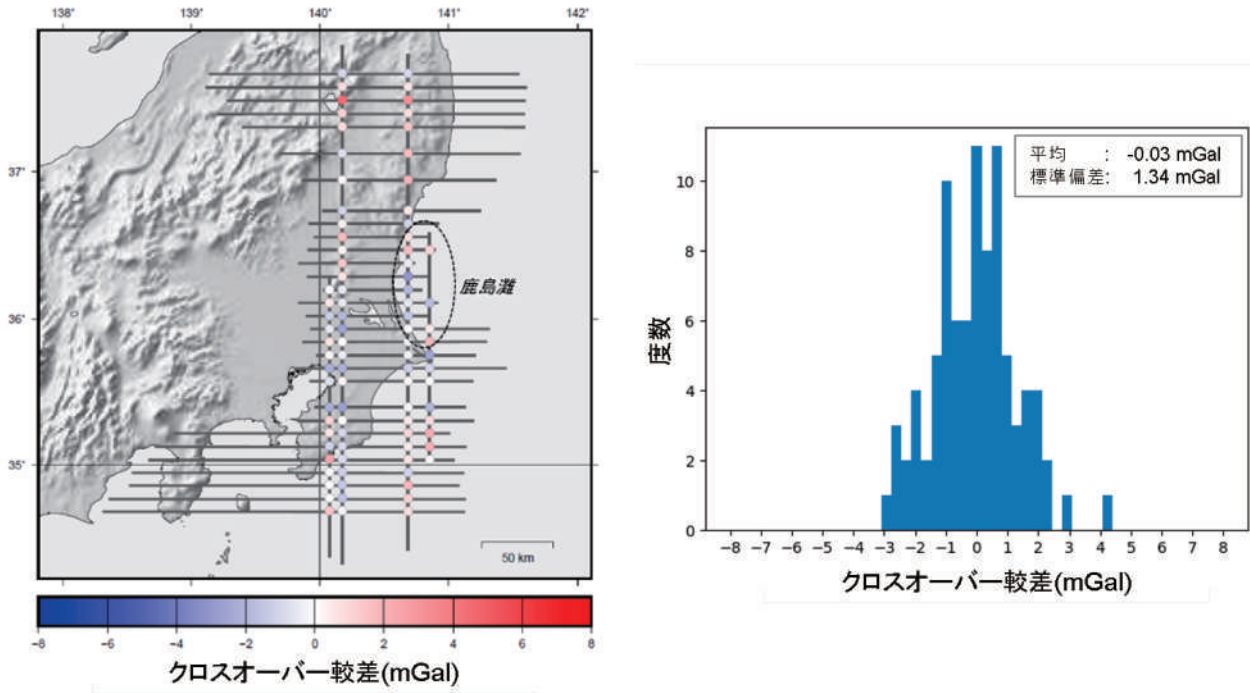


図-18 KT01 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

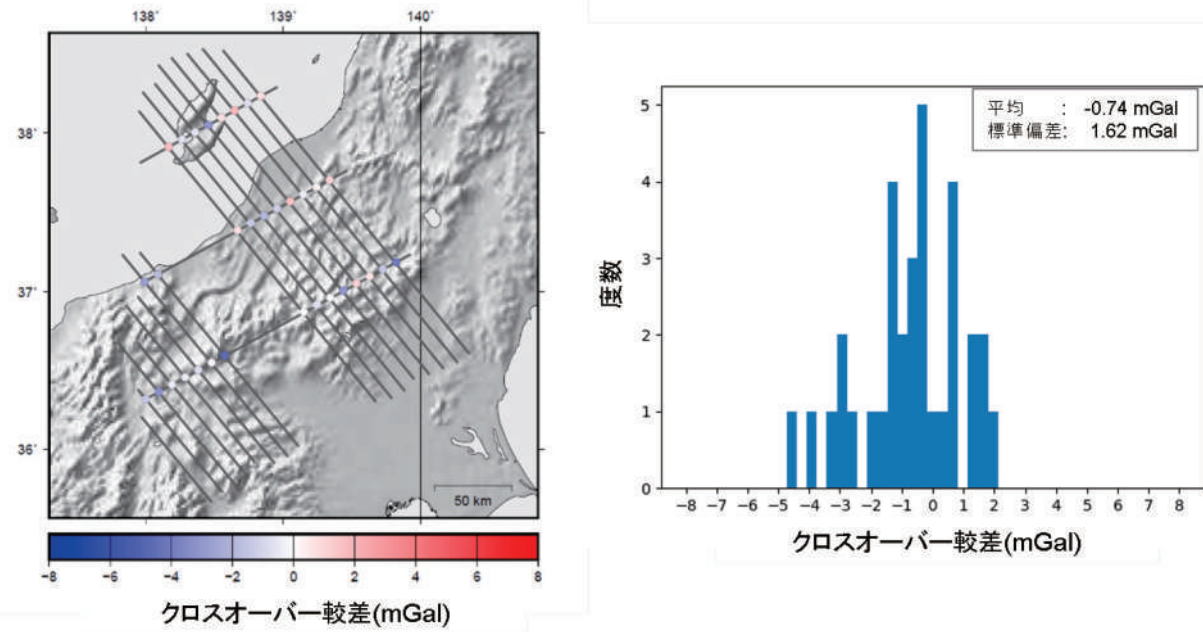


図-19 KT02 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

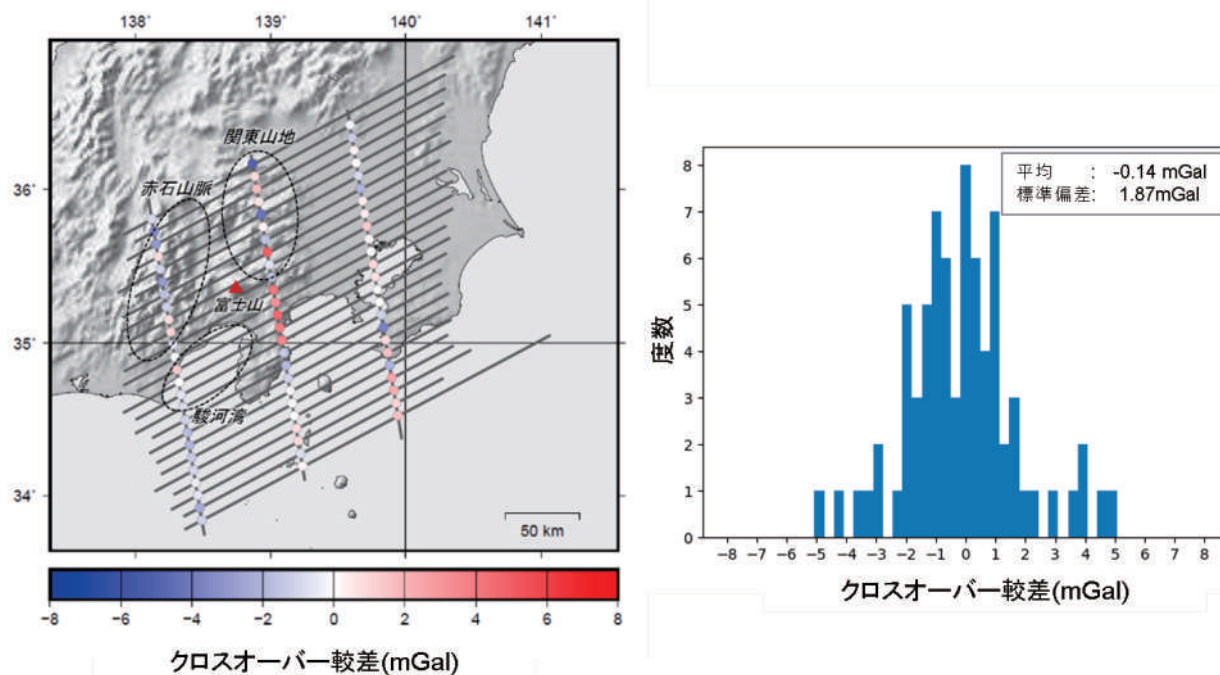


図-20 KT03 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

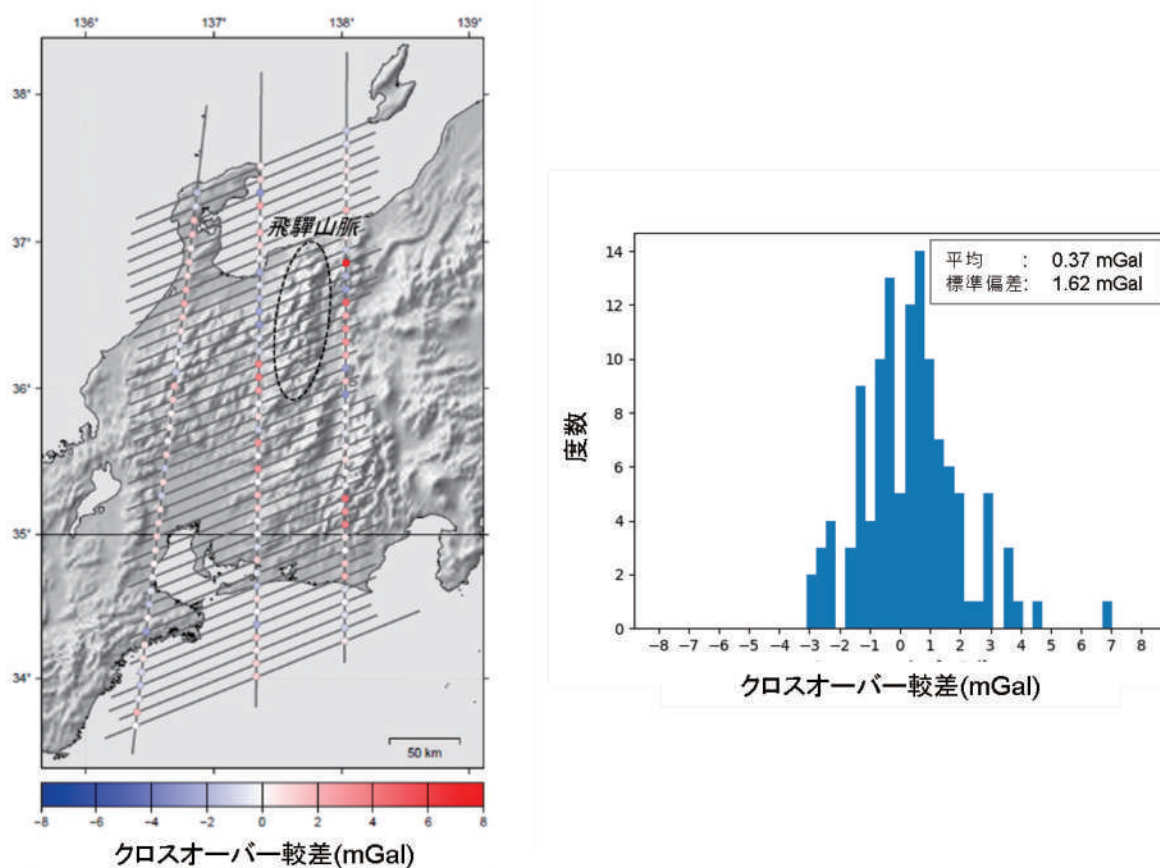


図-21 CB01 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

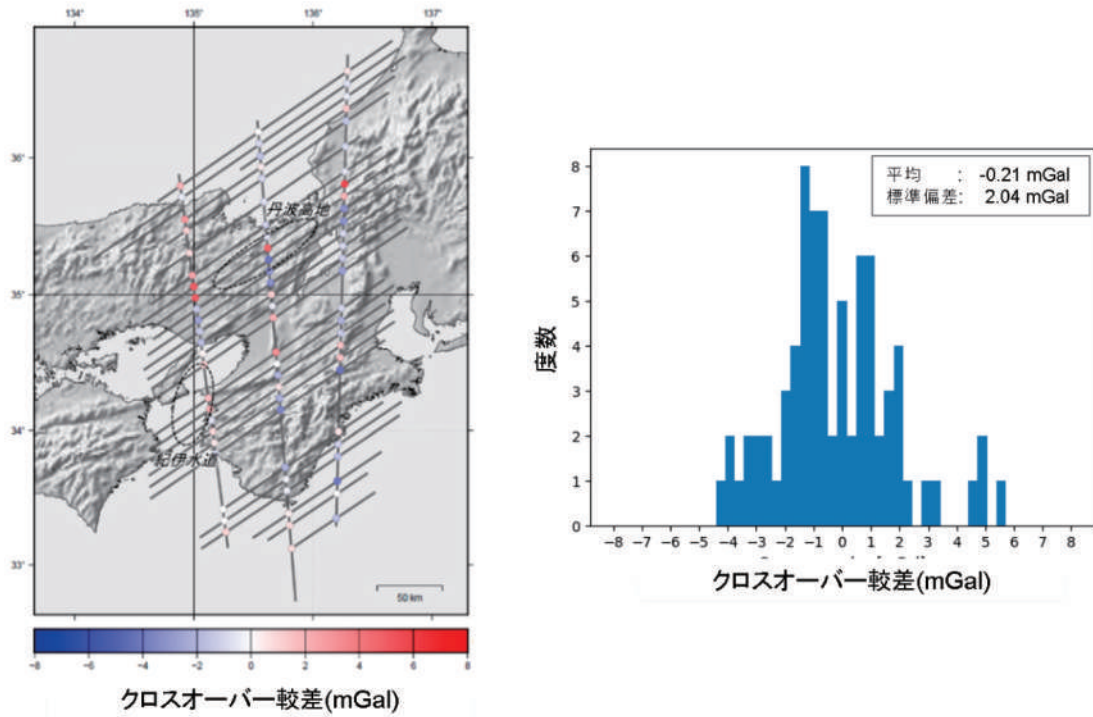


図-22 CB02 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

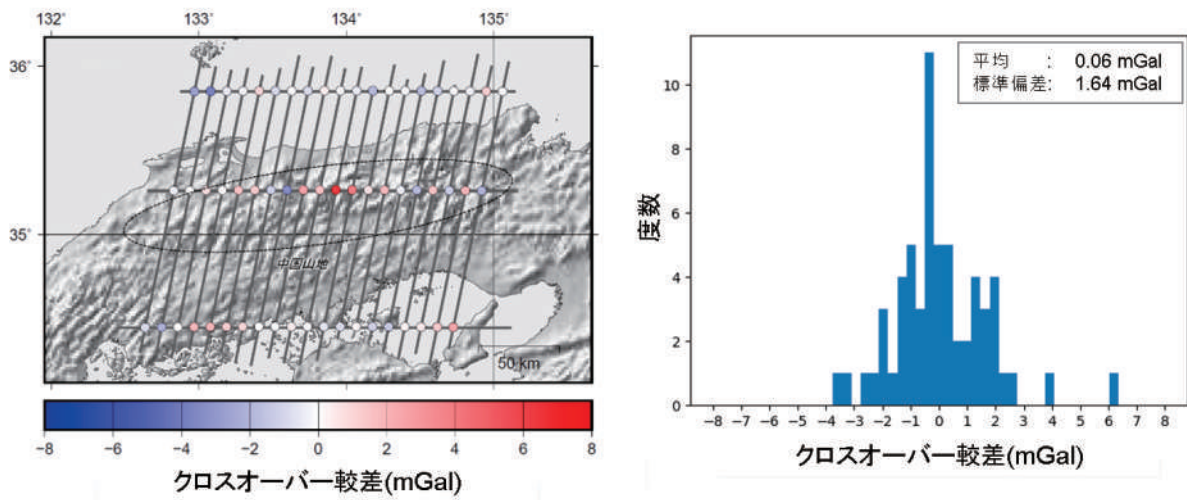


図-23 CG01 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

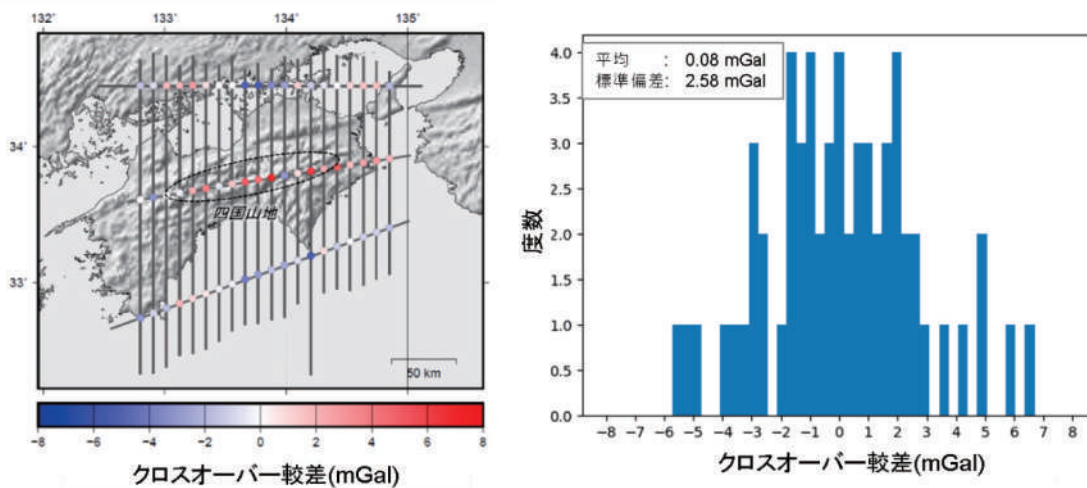


図-24 CG02 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

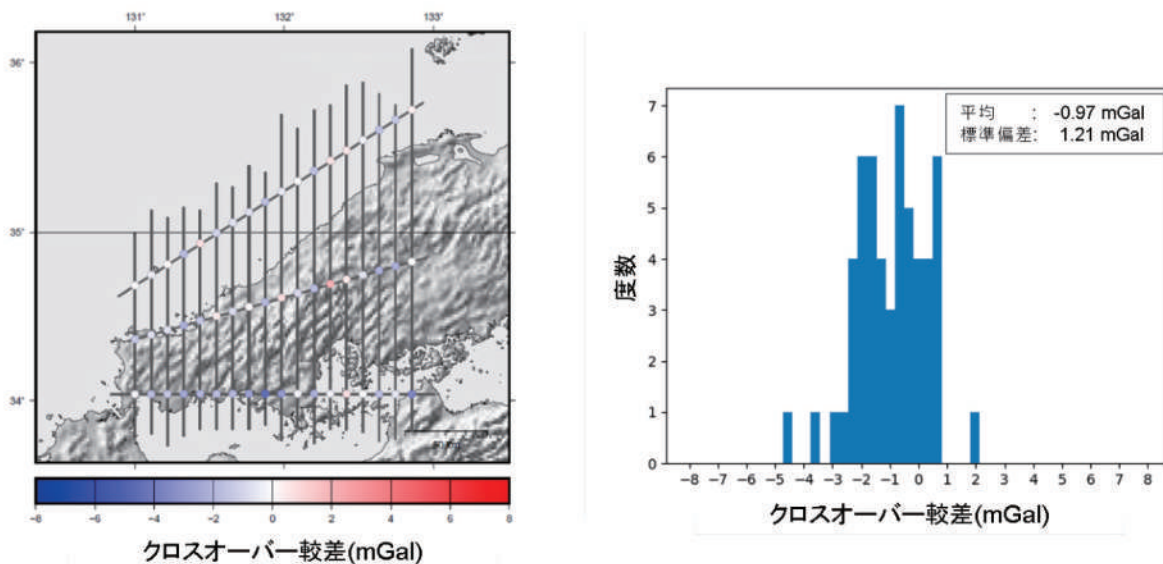


図-25 CG03 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

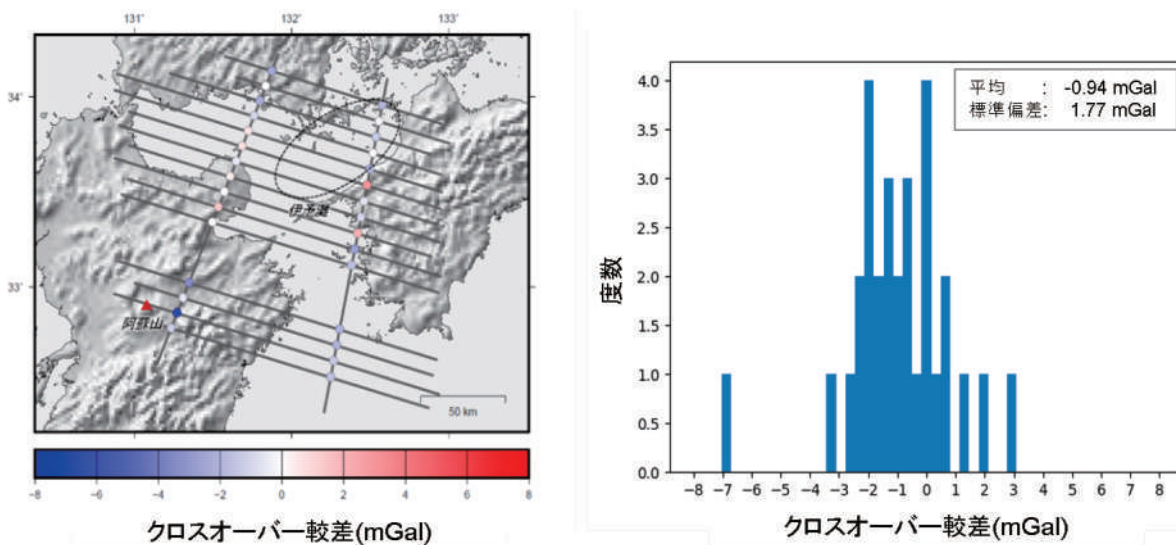


図-26 KY01 ブロックのクロスオーバー較差と度数分布

5.5 航空重力データの評価

5.3 節で述べた推定重力値との重力差, オフレベル補正值, クロスオーバー較差の結果から, 得られた航空重力データを総合的に評価する. 航空重力値と推定重力値を比較して, 重力差が大きい地域は鹿島灘, 紀伊水道, 土佐湾, 島根半島沿岸, 伊予灘の沿岸域と丹波高地, 伊吹山地, 四国山地の山岳域であり, これらの地域では 5 mGal 以上の重力差があった (図-27).

鹿島灘, 紀伊水道, 土佐湾, 島根半島沿岸, 伊予灘は, オフレベル補正值が小さい (おおむね 5 mGal 以下) ことから, 揺れの少ない良質な観測ができていたと考えられる (図-28). また, 5.4.5 項のクロスオーバー較差を見ると, 鹿島灘と伊予灘は較差が比較的小さい (おおむね 2 mGal 以下). 以上より, 鹿島灘と伊予灘において, 既存の重力データが捉えていない重力分布を, 航空重力データが捉えていると考えられる.

丹波高地北部から伊吹山地も同様に, オフレベル補正值が小さい (おおむね 5 mGal 以下) が, 測線全体にわたって重力差の符号が負であり, バイアスが生じていると考えられる. バイアスが生じた原因としては, 重力計に強い揺れが加わった際, データに定量な重力値として加わる現象 (テアという.) が発生した可能性, 飛行場での静止測定が十分にできていなかった等の可能性が考えられる. これらの測線

は, クロスオーバー較差を使用したバイアス補正や再測を検討している.

丹波高地南部と四国山地は, オフレベル補正值が大きく (10 mGal 以上), また, 前節で示したクロスオーバー較差が大きい地域である. したがって, これらの地域の航空重力データは信頼性が低いと考えられるため, 再測を検討している.

また, 関東山地はオフレベル補正值が大きいが, 推定重力値との差は小さいため (5 mGal 以下), オフレベル補正值が正しく算出されていると考えられる.

5.6 オフレベル補正手法の改良

Newton に実装されているオフレベル補正は Peters & Brozena (1995) による方法だが, この方法は揺れが大きいと正確に補正值を算出することが難しいということ, 5.4 節で述べた. NGS は, Newton のオフレベル補正方法に Olesen (2002) による方法を使い, アラスカのクロスオーバー較差の中央値が 2.5 mGal から 1.3 mGal に改善したことを確認した. Olesen (2002) によるオフレベル補正方法は, 今後 Newton に実装される予定である. このほか, NGS では, Newton にいくつかの改良を加える予定である. このように改良された手法が日本の航空重力測量に適用できるよう引き続き NGS からの情報収集を行う.

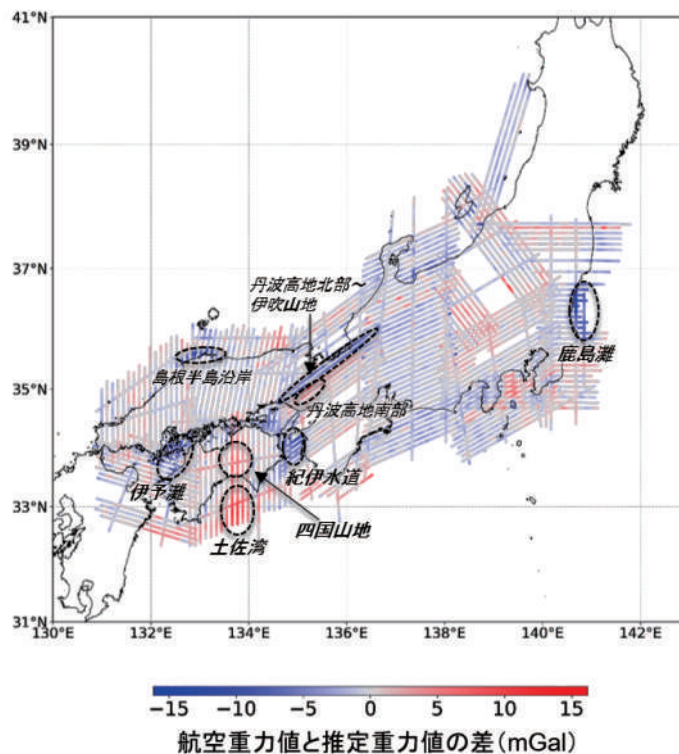


図-27 航空重力値と推定重力値の差

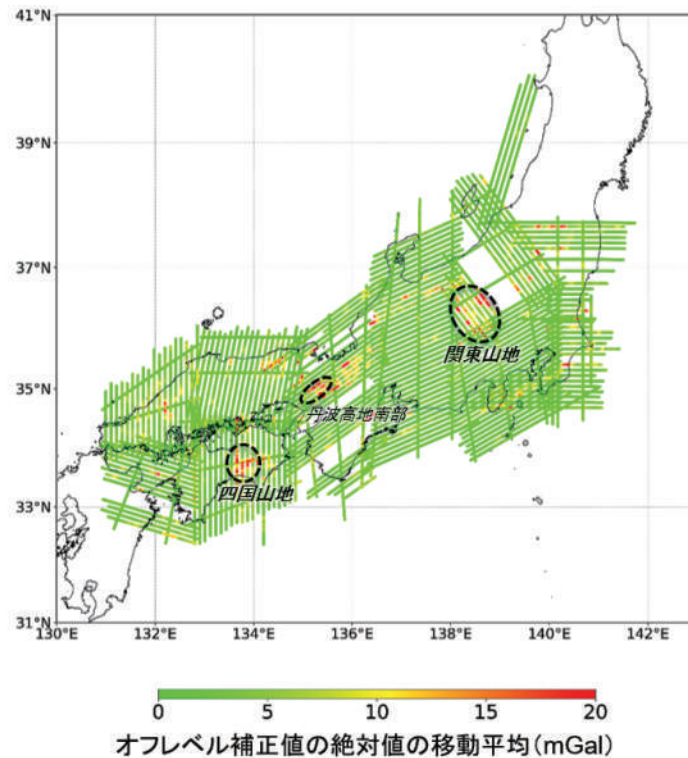


図-28 オフレベル補正値の絶対値の移動平均

5.7 測線の進入区間の長さについて

航空重力測量では、1日のフライトでおおむね3～5本の測線を観測する。飛行場を離陸した航空機は、IMUの初期化のためのS字飛行の後、最初の測線に進入する。測線の両端には2点ずつ座標が定められており（図-29）、外側から2点目の座標位置（以下「始点」又は「終点」という。）へ到達するまでに航空機を安定させ航空重力計を観測モード（Online）に設定する。航空重力計は、観測モードになった後もしばらくは直前のS字飛行や旋回時に受けた振動や傾きによる影響を受けるため、この間の重力値は5.3節で述べたトリミングの対象となる。航空重力計が受けた振動や傾きによる影響がガウシアンフィルタの120秒間に及ばないようにするためには、測線の進入から始点までで3分程度の区間（以下「進入区間」という。）を設ける必要がある。

当初、進入区間の長さを12.5km（当初予定していた飛行速度250km/h×3分）で計画していた。この長さが十分かどうかを評価するため、これまでに7割程度の観測が終了している9つのブロックにおいて、トリミングによる測線への影響について評価を行った。ただし、主測線が飛行制限空域に隣接している場合は、やむを得ず進入区間が短くなっているため評価対象から除外した。

評価結果は表-12に示す。1行目はブロック名、2行目は評価対象の端点数、3行目は端点のうち、ト

リミングが必要な観測データの区間まで施された数、4行目はその割合である。全体では約1割の端点で必要な観測データの区間まで施されており、トリミングの影響を受けていた。最も多くトリミングの影響を受けていたブロックはCB01である。旋回後、機体が安定し正常に観測できるまで3分程度かかるが、進入区間で機体が揺れてしまうと更に時間がかかる。CB01ではそのケースが多かったためと考えられる。また、令和2年度から飛行速度を250km/hから300km/hに変更したにも関わらず、測線の進入区間を12.5kmのまま観測したことも要因である。実際のところ、始点を通過する前に機体が安定した場合は、早めに航空重力計を観測モードにしていたため、進入区間の長さの影響は小さかったと考えられる。

最もトリミングの影響を受けていたCB01について、始点からトリミングした位置までの距離をヒストグラムに表したのが図-30である。トリミングによる影響が20kmを超えるものが多少見られるが、これらは進入区間で航空重力計に揺れが生じたケースだと考えると、17.5km程度の進入区間を設ければ必要な観測データをトリミングすることはないものと考えられる。次年度以降に観測する測線については、端点が飛行制限空域に接している場合を除き、可能な限り進入区間を17.5kmとなるよう、測線の計画を修正する。

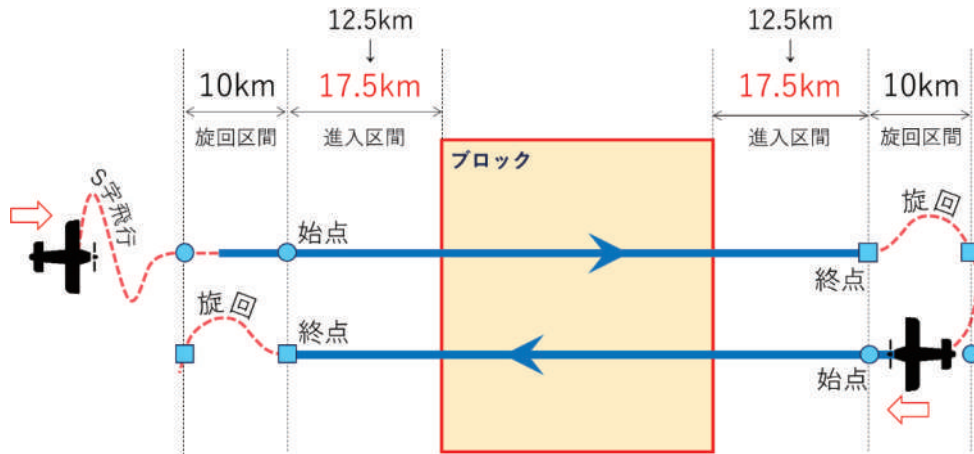


図-29 測線への進入方法

表-12 測線進入区間長の評価

ブロック名	KT01	KT02	KT03	CB01	CB02	CG01	CG02	CG03	KY01	全体
端点の数	44	30	41	73	62	40	40	35	36	401
観測データ区間 までトリミング した端点の数	5	2	3	19	6	4	0	0	3	42
観測データ区間 までトリミング した端点の割合	11.4%	6.7%	4.9%	26.0%	9.7%	10.0%	0%	0%	8.3%	10.2%

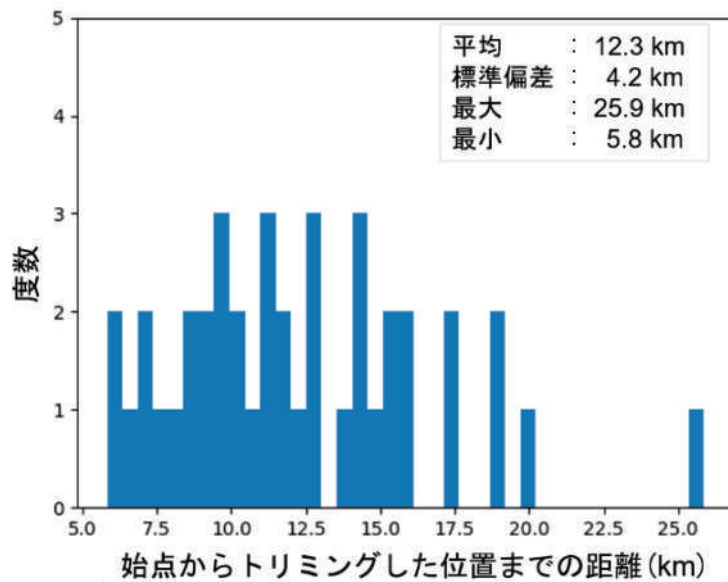


図-30 CB01におけるトリミングによる影響を受けた距離とその数

6. 事業後半の展望

6.1 令和3年度以降の航空重力測量

令和3年3月現在で、総測線距離を母数とする進捗率は、再測の可能性がある測線を含めると50%を超える状況にある。一部に未実施や再測予定の測線があるものの、関東、中部・近畿、中国・四国ブロックはおおむね観測を完了した。今後の航空重力データのより一層の充実を図るため、令和3年1月から2章及び6.2節で述べる島嶼部の一部追加等の測線の変更を進めている。今後も観測の進捗状況を確認しながら、観測計画の改善を進めていく。

令和3年度は積雪の影響があり観測日数が限られる北海道、東北ブロックを中心に観測を進めていく予定である。これらのブロックは1本の測線距離が比較的長い地域であり、管制からの指示や雲による観測中のブレイク（測線から離脱）が発生する確率が高くなることが懸念される。また、飛行制限空域の進捗率をいかにあげるかも今後の重要な課題である。群馬県、新潟県、長野県にまたがる飛行制限空域（通称：Hエリア）は単独のブロックKT02を設け令和2年5月から観測に着手しているが、未実施の測線を残す状況となっている。次年度以降に観測予定の北海道、東北、九州の沿岸海域には多くの飛行制限空域が存在しており、観測を進めていく上で悩みの種となるのは間違いない。

これらの課題を克服するためには、現場に常時1名以上の職員を滞在させ、限られた観測の好機を逃さないことが重要である。また、事業後半は拠点となる飛行場が遠方となり、職員の体力面での負担も増えていく。現地へ派遣する職員へのサポートも事業を成功させるポイントとなる。

6.2 離島の観測について

我が国は、数多くの島嶼により構成されている。

現在公開している日本のジオイド2011(ver2.1)は、GNSS測量による楕円体高から水準測量による標高を差し引くことで得られる実測ジオイド高に、重力ジオイド・モデルを整合させたハイブリッド・モデルであるが、離島のジオイド・モデルは、日本全国のジオイド・モデルとは構築方法が異なり、それぞれの離島ごとに個別に構築されている。この構築手法には、いくつかの方法があり、実測ジオイド高データの密度や分布状況から最適なものが選ばれている（小板橋ほか, 2018）。

航空重力測量では、予算の制限の関係から、当初離島の観測は行わないこととしていたが、航空重力測量で得られる重力データを使用して構築する重力ジオイド・モデルは、全球モデルとして構築するため、多くの均質な重力データが必要となる。特に、北海道、本州、四国、九州の4島（以下「本州等の

4島」という。）に近い離島については、その周辺の沿岸域の衛星海面高度計や船上重力データの精度が低く、航空重力測量で観測し、沿岸域の重力分布をより正確に捉えることで、重力ジオイド・モデルの精度向上が期待できる。これまで、沖縄本島のほか、佐渡島、伊豆大島を対象地域に加えて観測を進めてきた。これに加え本州等の4島に近いその他の離島とその周辺の海域は、新たなブロックを追加することなく、既存のブロックの測線の延長又は追加を行うことで観測可能であることから、礼文島、利尻島、対馬、五島列島、種子島、屋久島を新たに観測対象地域に追加し、令和3年度以降で順次観測していく予定である。また、航空重力測量の空間分解能は5～10 km程度であり、一定以上の大きさの離島については航空重力測量によって重力データの改善が見込めることから、更に本州の4島から遠い奄美大島、奥尻島などの離島や、既に観測済みであるブロックに近い隠岐諸島についても、観測対象とするかどうかを検討していく。一方、小笠原諸島、先島諸島などの更に遠方の離島は拠点となる飛行場からの距離と島の大きさ、追加観測となった場合の労力と費用を踏まえると、今回の航空重力測量で観測することは現実的ではないと考えられる。

6.3 精密重力ジオイド・モデルの試作

精密重力ジオイド・モデル構築に向けて、これまでにおおむね観測が終了しているKT01、KT03ブロックの航空重力データと地表重力データ（地上重力データ、船上重力データ）、衛星海面高度計重力データを用いて（図-31）、精密重力ジオイド・モデルの試作を行った。精密重力ジオイド・モデルの計算には、Matsuo & Forsberg (2021)の手法を用いた。

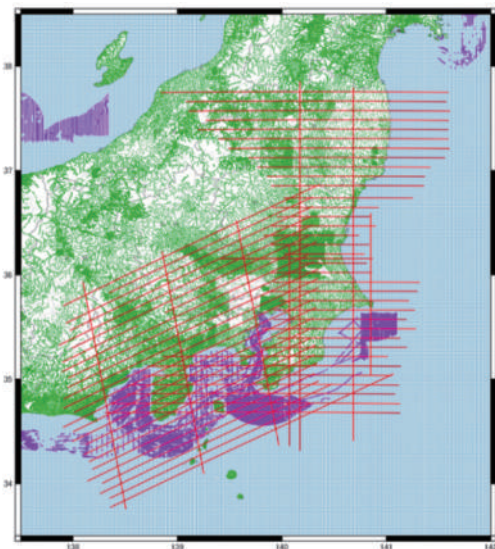


図-31 使用した重力データの分布（赤：航空重力、緑：地上重力、紫：船上重力、青：衛星海面高度計重力）

図-32 は試作した精密重力ジオイド・モデル，図-33 は航空重力データを含めた場合と含めない場合の重力ジオイド高の較差を表す。沿岸域で較差が見られ，特に鹿島灘で-19.6 cm，千葉県鴨川市の沿岸域で+18.4 cm 程度の大きな較差があった。また，航空重力データのない佐渡島沿岸においても較差が見られた。これは，航空重力データの追加により，重力データを内挿する際の共分散パラメータ（分散，相関など）が変わったことが影響していると思われる。

また，KT01，KT03 ブロック内にある「電子基準点(二等水準点)」における実測ジオイド高を算出し，精密重力ジオイド・モデルと比較して評価を行った。実測ジオイド高は，電子基準点に水準標高を取り付けた観測日の前後 1 か月における F3 解の楕円体高を平均した値から，標高成果値を差し引いて算出した。図-34 は精密重力ジオイド・モデルから算出したジオイド高（以下「重力ジオイド高」という。）と実測ジオイド高との較差，表-13 は較差の統計量を表す。航空重力データを使用することによって，茨城県鹿行地域，千葉県いすみ市，神奈川県三浦市，神奈川県湯河原町の電子基準点で実測ジオイド高との較差が減少し，全点の較差の標準偏差は，4.7 cm から 3.7 cm に改善している。一方，静岡県静岡市と神奈川県二宮町の電子基準点では，実測ジオイド高との較差が増大している。特に，静岡県静岡市の電子基準点は，航空重力データの有無に関わらず 10 cm を超える較差が見られる。これらの電子基準点は，水準標高を取り付ける際に，既知とした水準点の観測時期や周辺の地殻変動等について詳しく調べる必要がある。

引き続き，航空重力測量の観測が終了した地域から精密重力ジオイド・モデルの試作とその評価をしていく予定である。

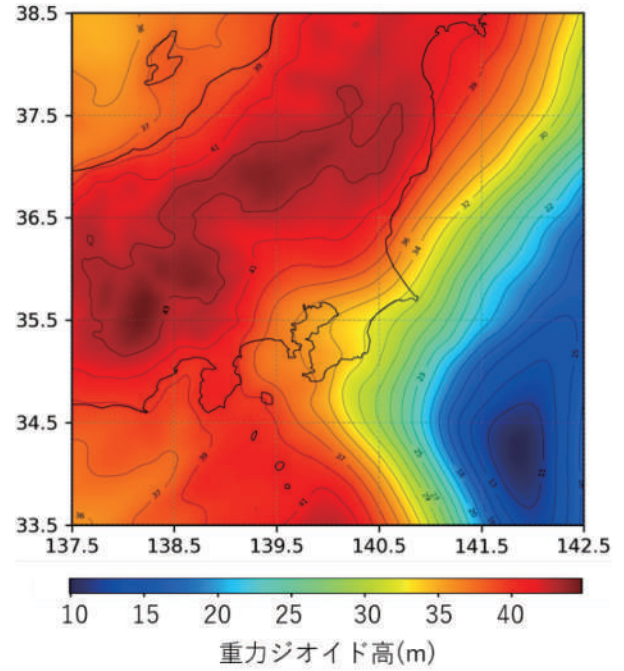


図-32 航空重力データを用いて試作した重力ジオイド高

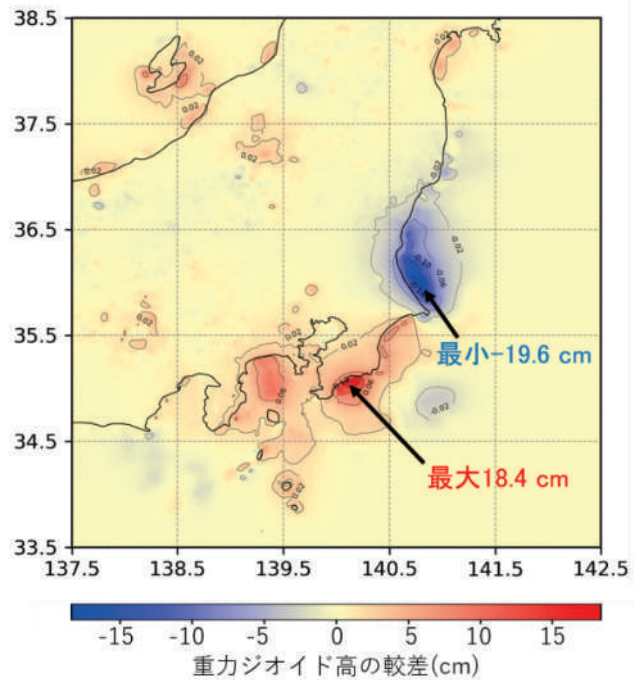


図-33 重力ジオイド高の較差（「航空重力データを含めた場合」 - 「航空重力データを含めない場合」）

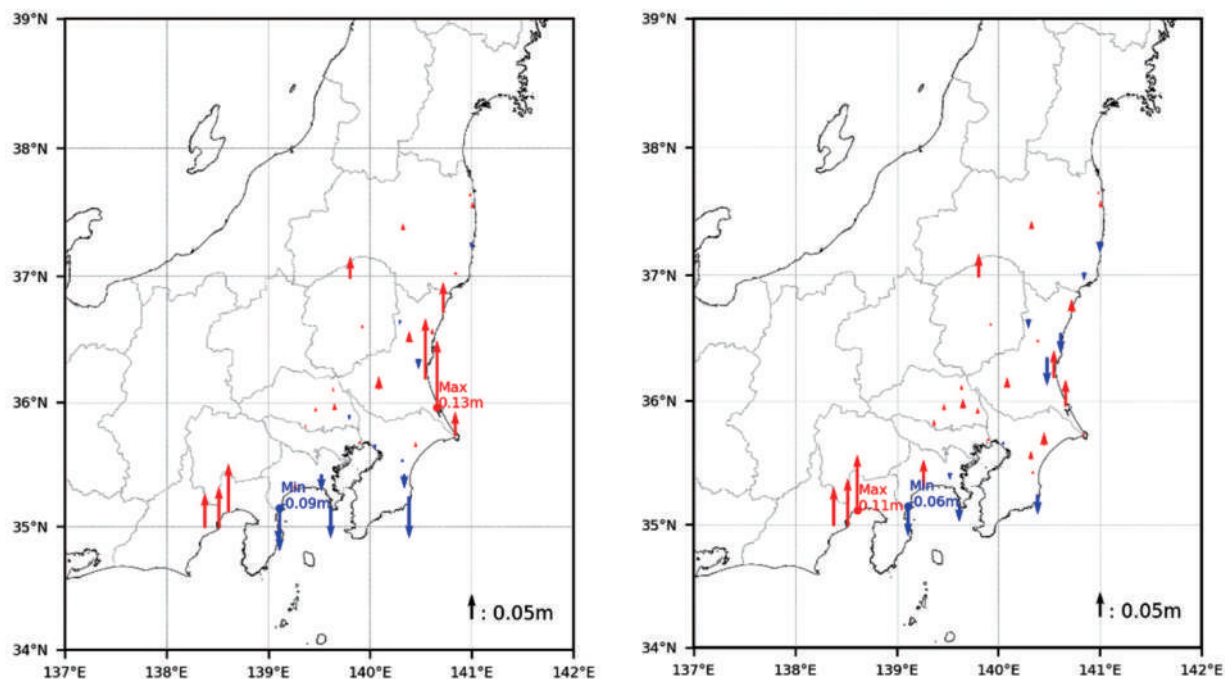


図-34 重カジオイド高と実測ジオイド高との較差
 (左：航空重力データを含めない場合 右：航空重力データを含めた場合)

表-13 重カジオイド高と実測ジオイド高との較差

	航空重力データを含めない場合	航空重力データを含めた場合
平均値	1.20 cm	1.16 cm
標準偏差	4.75 cm	3.74 cm
最大値	13.28 cm	10.97 cm
最小値	-8.56 cm	-5.88 cm

謝辞

航空重力測量事業の実施にあたり、NOAA/NGS の Jeffery Johnson 氏、Derek vanWestrum 氏をはじめとする GRAV-D チームには、事業全般に亘る多くの助言、データ処理プログラムの提供、測線計画と観測結果の評価など、さまざまな局面でご支援いただいた。ここに感謝の意を表す。

(公開日：令和4年7月6日)

参 考 文 献

- 小板橋勝, 小島秀基, 根本悟, 宮原伐折羅, 平岡喜文, 矢萩智裕 (2018): ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.2) の構築, 国土地理院時報, 130, 1-7.
- 国土地理院 (2018): 位置の基準 (測地基準座標系) のあり方について～準天頂衛星システムが実現する高精度測位社会を支える～, 測量行政懇談会測位基盤検討部会報告書.
- GRAV-D Team (2017): GRAV-D General Airborne Gravity Data User Manual, Theresa M. Damiani, Monica Youngman, and Jeffery Johnson, (Eds), Version 2.1., https://www.ngs.noaa.gov/GRAV-D/data/NGS_GRAV-D_General_Airborne_Gravity_Data_User_Manual_v2.1.pdf (accessed 30 Sep. 2021).
- Matsuo, K. and Kuroishi, Y. (2020): Refinement of a gravimetric geoid model for Japan using GOCE and an updated regional gravity field model. *Earth, Planets and Space* 72:33.
- Matsuo, K. and Forsberg, R. (2021): Gravimetric geoid and quasigeoid computation over Colorado based on the Remove-Compute-Restore Stokes-Helmert scheme. *Journal of Geodesy, Special Issue on Reference Systems in Physical Geodesy*.
- Micro-g LaCoste (2020): TAGS-7 TURN-KEY AIRBORNE GRAVITY SYSTEM, <http://microglacoste.com/wp-content/uploads/2020/07/TAGS-7-Brochure-R5.pdf> (accessed 30 Sep. 2021).
- Olesen, A. V. (2002): Ph.D. Thesis: Improved airborne scalar gravimetry for regional gravity field mapping and geoid determination.
- 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). *J. Geophys. Res.*, 117, B04406.
- Peters, M.F., Brozena, J.M. (1995): Methods to improve existing shipboard gravimeters for airborne gravimetry, in: K.-P. Schwartz, J.M. Brozena, G.W. Hein, (Eds), IAG Symposium on Airborne Gravity Field Determination, IUGG XXI General Assembly, Calgary, Boulder, CO, pp. 39-45.
- POS AV 610 Datasheet: https://www.applanix.com/downloads/products/specs/POS_AV_610.pdf (accessed 9 Nov. 2021).

別紙

飛行場重力点一覧表

飛行場名	点名	略名	緯度 (dms)	経度 (dms)	標高 (m)	飛行場重力点 重力値 (mGal)	重力鉛直勾配 (mGal/m)	航空重力計センサー 位置に化成した 重力値 (mGal) ^{※1}	作業期間	固定点
女満別空港	女満別補助点	MMB0-AGS	435300.0832	1440929.9467	33.590	980558.094	-	-	2020年8月28日	網走GS、交46
	女満別1	MMB1-AGS	435303.8533	1440936.2873	33.363	980558.380	-0.310	980557.890	2021年10月14日	女満別補助点
	女満別2	MMB2-AGS	435303.8711	1440935.1683	33.518	980558.328	-0.312	980557.834		
	女満別3	MMB3-AGS	435302.0683	1440935.4045	33.551	980558.278	-0.312	980557.784		
丘珠空港	丘珠補助点	OKD0-AGS	430639.7949	1412251.1908	7.053	980471.648	-	-	2020年9月3日	札幌GS
	丘珠1	OKD1-AGS	430638.4456	1412306.0642	7.384	980470.881	-0.306	980470.397	2020年9月9日	新十津川A (付)
	丘珠2	OKD2-AGS	430638.9281	1412306.7189	7.288	980470.904	-0.305	980470.421		
	青森補助点	AOM0-AGS	404432.9313	1404148.1970	196.144	980253.374	-	-	2019年11月6日	弘前FGS
青森空港	青森1	AOM1-AGS	404432.2000	1404146.5564	195.978	980253.435	-0.323	980252.924	2019年11月8日	5962
	青森2	AOM2-AGS	404432.1615	1404146.0938	195.973	980253.418	-0.320	980252.912		
仙台国際空港	仙台補助点	SND0-AGS	380759.0296	1405518.4327	0.952	980104.182	-	-	2019年9月10日	仙台FGS
	仙台1	SND1-AGS	380801.3448	1405518.3808	1.003	980104.410	-0.297	980103.940	2019年9月12日	仙台 (付)
	仙台2	SND2-AGS	380801.0455	1405519.9906	0.956	980104.507	-0.304	980104.026		
	調布補助点	CHF0-AGS	354024.4587	1393145.5610	41.713	979756.701	-	-	2019年5月20日	筑波FGS
調布飛行場	調布1	CHF1-AGS	354014.1265	1393150.0179	41.559	979756.133	-0.300	979755.658 ※2 979755.640	2019年5月24日	油壺GS
	調布2	CHF2-AGS	354014.6861	1393149.8096	41.492	979756.155	-0.310	979755.665 ※2 979755.646		
名古屋飛行場	名古屋補助点	NGY0-AGS	351459.0885	1365522.4809	13.455	979744.343	-	-	2019年8月5日	名古屋 (付)
	名古屋1	NGY1-AGS	351459.5799	1365524.1135	13.683	979744.427	-0.312	979743.933	2019年8月9日	岐阜A (付)
	名古屋2	NGY2-AGS	351500.1899	1365523.7498	13.643	979744.421	-0.307	979743.935		
	八尾補助点	YA00-AGS	343553.2213	1353542.6877	11.080	979704.429	-	-	2019年10月11日	京都加茂 (付)
八尾空港	八尾1	YA01-AGS	343551.3532	1353542.1235	11.183	979704.429	-0.298	979703.958	2019年10月15日	和歌山 (付)
	八尾2	YA02-AGS	343551.3610	1353542.2892	11.183	979704.435	-0.301	979703.959		
北九州空港	北九州補助点	KTK0-AGS	335006.3586	1310158.1980	5.300	979668.822	-	-	2019年12月9日	福岡FGS
	北九州1	KTK1-AGS	335007.7848	1310158.4476	5.365	979669.074	-0.314	979668.577	2019年12月12日	下関 (付)
	北九州2	KTK2-AGS	335007.3959	1310158.5289	5.345	979668.995	-0.308	979668.508		
鹿児島空港	鹿児島補助点	KGS0-AGS	314736.9490	1304321.3149	264.698	979418.563	-	-	2020年11月16日	鹿児島福山 (付)
	鹿児島1	KGS1-AGS	314738.9771	1304321.2565	265.093	979418.294	-0.312	979417.800	2020年11月18日	始良 (付)
	鹿児島2	KGS2-AGS	314738.5090	1304321.5682	265.065	979418.273	-0.312	979417.779		
那覇空港	那覇補助点	NAH0-AGS	261211.7789	1273904.4797	4.984	979104.884	-	-	2022年1月13日	那覇 (付)
	那覇1	NAH1-AGS	261203.5611	1273833.8118	2.895	979106.601	-0.313	979106.106	与那城 (付)	

※1 飛行場重力点における重力鉛直勾配を使って、航空機 Textron Aviation 208 Caravan に搭載した航空重力計のセンサー位置（高さ：1.582m）に化成した重力値。

※2 航空機変更前の値（航空機：Cessna 208B Grand Caravan、センサー位置高さ：1.642m）