

精密重力ジオイド・モデル構築に向けた航空重力測量（最終報告）

－ 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 the Development of a New Precise Gravimetric
Geoid Model in Japan (Final Report)**

－ Aiming for the Society Where the Reliable Orthometric Height Is Available to Everyone －

測地部 小川拓真¹・平岡喜文・菅原安宏・小柳拓真・山本康生・中島正寛・栗原忍・
吉樂絵里香¹・飯尾研人・富山顕¹

Geodetic Department OGAWA Takuma, HIRAOKA Yoshifumi, SUGAWARA Yasuhiro,
KOYANAGI Takuma, YAMAMOTO Kosei, NAKASHIMA Masahiro, KURIHARA Shinobu,
KICHIRAKU Erika, IIO Kento, TOMIYAMA Akira

企画部 加藤知瑛・兒玉篤郎²

Planning Department KATO Chiaki, KODAMA Tokuro

測地観測センター 畔柳将人・大森秀一¹

Geodetic Observation Center KUROYANAGI Masato, OMORI Shuichi

地理地殻活動研究センター 松尾功二

Geography and Crustal Dynamics Research Center MATSUO Koji

東北地方測量部 豊福隆史¹

Tohoku Regional Survey Department TOYOFUKU Takashi

北陸地方測量部 市村和輝・半田優実

Hokuriku Regional Survey Department ICHIMURA Kazuki, HANDA Masami

中部地方測量部 塩谷俊治²

Chubu Regional Survey Department ENYA Toshiharu

内閣府 深谷俊太郎

Cabinet Office

FUKAYA Shuntaro

文部科学省 酒井和紀

Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

SAKAI Kazuki

要 旨

航空重力測量は、航空機に搭載した相対重力計を用いて、陸海あらゆる領域の重力データを上空から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 年度に航空重力計や測量に必要な装置等を調達し、令和元年 7 月から令和 5 年 5 月までの約 4 年間で、国内初の全国の航空重力測量を完了した。

本稿は、約 4 年間の事業の最終報告として、事業の足跡、得られた技術的知見及び取得した成果を後世に伝えるものである。

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）。ここでは、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、山岳域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（以下「IMU」という。）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（以下「LINZ」という。）や米国国家海洋大気庁国家測地測量局（NOAA/NGS、以下

現所属：¹企画部、²測地観測センター

「NGS」という.) 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（以下「精密重力ジオイド」という.）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等、多大な支援を受けた。平成 30 年 12 月には、航空重力計や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 26 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 km～100 km、飛行高度 1,500 m、3,000 m 又は 5,000 m、対地速度 300 km/h（開始当初は 250 km/h）である。NGS の助言や取得データの重力ジオイド・モデルへの効果を基に観測計画を見直しながら観測を進め、令和 5 年 5 月に 4 年間にわたる国内初の全国の航空重力測量を完了した。令和 7 年 4 月には、約 1 mGal 精度の日本全国における航空重力データ等を利用して構築した約 3 cm 精度の精密重力ジオイドを公開した。

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、二つの成分の分離が困難となってしまう。二つの成分を適切に分離するためには、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、重力データに併せて、航空機の位置情報も同等のサンプリング間隔で取得する必要がある。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 5.3.2 項で述べる。

1.2.1 航空機

航空重力測量の実施に当たり必要となる航空機の準備、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～12 月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 5 年 5 月の事業完了まで同機が使用された。両機体ともオートパイロットとヨーダンパーの機能を備え、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。

1.2.2 航空重力計

航空重力計には、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) を使用した。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、次項で述べる IMU 等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、構造及び性能が安全性及び環境保全のための技術上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並びに 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 3.1 節を参照）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 Applanix 社製 POS AV 610 を使用した。主な仕様を表-2 に示す。

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 250 W センサー部 75 kg 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 速度精度 ロール及びピッチ ヨー 出力レート	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 単独測位：0.030 m/s 後処理後：0.005 m/s 単独測位：0.005° 後処理後：0.0025° 単独測位：0.03° 後処理後：0.005° 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 59 W

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 1,500 m, 3,000 m 又は 5,000 m を選択した。

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	1,500 m, 3,000 m 又は 5,000 m (5,000 ft, 10,000 ft 又は 16,400 ft)
対地速度	300 km/h (当初は 250 km/h)

2.2 測線の計画

本事業では、ブロックという区域ごとに測線を計画した。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をクロスオーバーといい、交点におけるそれぞれの測線の重力値の較差（以下「クロスオーバー較差」という。）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したが、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っていない。また、ブロック間の重力値の較差を評価するため、隣接するブロックを 30 km 程度重複させて計画した。（図-1）

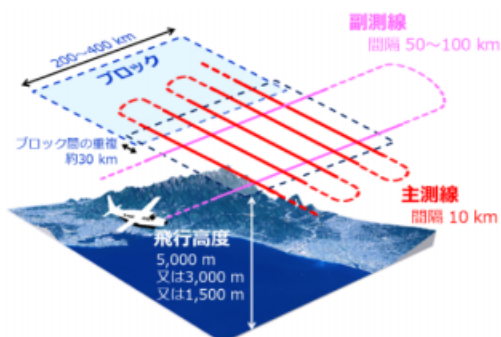


図-1 測線計画のイメージ

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、平均測

線長約 200 km であった。北海道地区は7ブロック、東北地区は5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及び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、一日当たりの飛行時間は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、一日当たりの航続距離を延ばし、おおむね 200 km より短い測線の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、総測線長は 105,406 km、1 測線当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、効率の良い測線計画となった。さらに令和3年には、九州周辺の島嶼部（五島列島、種子島、屋久島等）もカバーするよう幾つかの測線を延長した。

栗原ほか（2022）では、当時観測がおおむね終了していた関東周辺において、航空重力データを用いた場合と用いない場合で、重力ジオイド・モデルを試作し、航空重力データの効果を検証した。検証の結果、関東周辺の沿岸域でジオイド高約 20 cm の較差が確認された。令和3年末に、同様の検証をした際には、東北から中部地方にかけての山岳域では数 cm、鹿島灘や瀬戸内海、土佐湾といった沿岸域で 10 cm 以上の較差が確認された（最終的な航空重力データの効果は6章を参照）。これは、既存の重力データ（地上重力、船上重力等）では捉えることができなかったこれらの山岳域や沿岸域における重力分布を、航空重力測量で捉えることができたものと考えられる。

Childers et al. (1999) によると、航空機の飛行高度を半分にすることで観測できる重力分布の空間分解能が2倍となる。そのため、本事業においても、既に計画している飛行高度よりも低い高度で測定することで、より短波長の重力分布を捉えることを目標とした。島嶼部においては、海流の影響によって衛星アルティメトリ海上重力場モデルの精度が低いため、航空重力測量による重力データの改善が見込まれた。そこで、令和4年度1月に沿岸域で5ブロック、島嶼部で5ブロックを新たに計画に追加した（図-2）。沿岸域については、従来の計画で該当するブロックよりも低い飛行高度を設定した（鹿島灘の

場合、従来のブロックの飛行高度が 5,000 m のため、追加したブロックの飛行高度は 3,000 m)。

航空重力データの空間分解能は 5 km～10 km 程度であるため、それよりも小さい離島では重力データの改善が見込みにくい。また、小笠原諸島、大東諸島等は拠点となる飛行場から遠くに位置している。これらの離島は、島の大きさや拠点飛行場からの距離、追加観測となった場合の労力と費用を踏まえ、航空重力測量の対象範囲外とした。

最終的には、測線数 598 本、総測線長が 139,373 km の測線を計画した（表-4）。

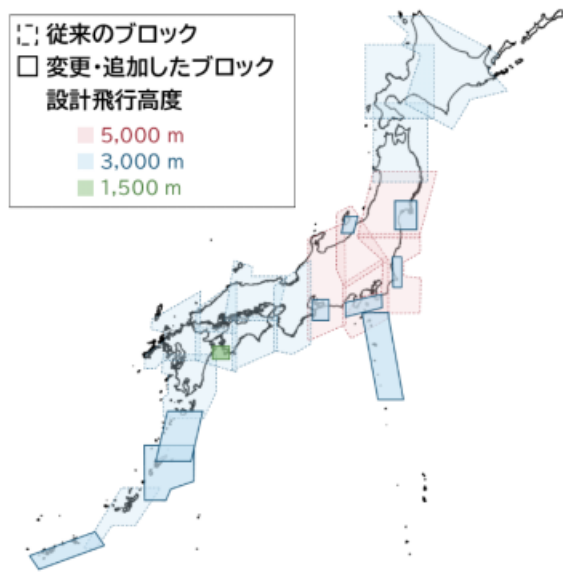


図-2 計画したブロック

表-4 計画した測線とブロック

1 本当たり 測線長	平均 233.1 km 最長 530.0 km 最短 60.0 km
総測線数	598 本
総測線長	139,373 km
ブロック数	26

2.3 測線の進入区間の長さ

測線には両端に 2 点ずつ計 4 点の座標が定められており、外側の 2 点を端点と端点'とし、内側の 2 点を始点又は終点とする（図-3）。

航空重力測量では、1 日のフライトでおおむね 3 本～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。始点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。また、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（5.3.6 項を参照）の 120 秒間に及び、フィルタリング計算で振動や揺れの影響を含む重力値はトリミングの対象となる（トリミングについては 5.3.7 項を参照）。ブロック内の必要な観測データをトリミングしないためには、始点からブロックへの進入までで 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。

航空重力測量の計画時には、進入区間の長さを 12.5 km（当初予定していた飛行速度 250 km/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、令和 3 年 3 月時点で 7 割程度の観測が終了している九つのブロックにおけるトリミングについて調査した。ただし、図-3 の始点 3 のように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調査対象から除外した。

調査結果を表-5 に示す。1 行目はブロック名、2 行目は調査対象となるトリミングの数、3 行目は必要な観測データ（ブロック内部）までトリミングした数、4 行目はその割合である。全体では、約 1 割のトリミングがブロック内部まで及んでいた。最も多く測線においてブロック内部までトリミングされていたブロックは 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と考えられる。また、令和 2 年度以降、飛行速度を 250 km/h から 300 km/h に変更したにも関わらず、進入区間を 12.5 km のまま観測したことも要因の一つと考えられる。評価対象の大部分の測線（KT01 と CB02 の一部を除く）は飛行速度を 300 km/h で観測したものであるが、実際の作業では始点を通過する前に、機体の安定後早めに航空重力計を観測モードにしていたため、進入区間の長さによる影響は小さかったと推測される。

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-4 である。トリミングした位置までの距離の多くは 17.5 km に収まっているものの、20 km を超えるものも一部見られる。これらは進入区間において気流等の影響で航空重力計に揺れが生じたケースと考えられるため、17.5 km 程度の進入区間を設ければ、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た重力値のみをトリミングし、必要な観測データをトリミングすることはないと考えた。そのため、令和 4 年度以降に観測する測線については、始点又は終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 17.5 km となるよう、測線の計画を修正した。

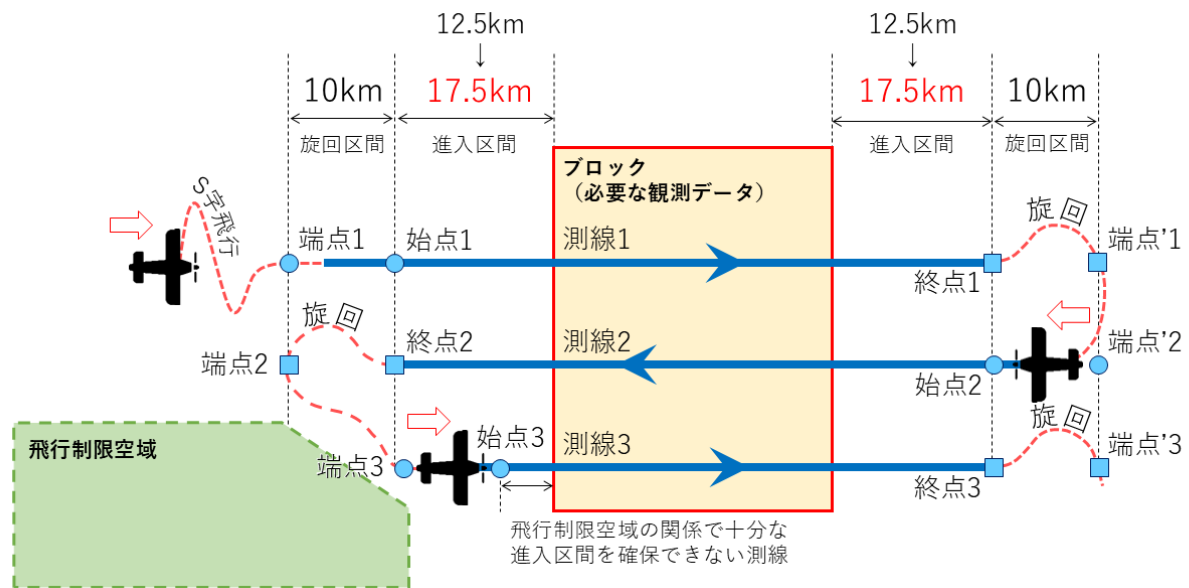


図-3 測線への進入方法

表-5 ブロック内部まで及ぶトリミングの調査

ブロック名	KT01	KT02	KT03	CB01	CB02	CG01	CG02	CG03	KY01	全体
対象となるトリミングの数	44	30	41	73	62	40	40	35	36	401
ブロック内部までトリミングした数	5	2	3	19	6	4	0	0	3	42
ブロック内部までトリミングした割合	11.4%	6.7%	7.3%	26.0%	9.7%	10.0%	0%	0%	8.3%	10.5%

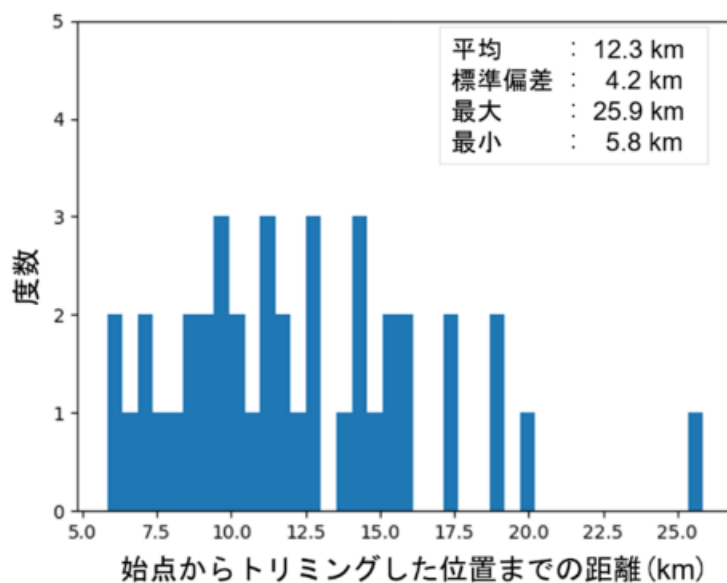


図-4 CB01における始点からトリミングした位置までの距離とその測線数

2.4 データの管理

2.4.1 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及び参照がしやすいよう、ブロック及び測線の命名規則を定めた。NGS のデータ処理ソフトウェアを使用するため、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-6）。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、航空重力計の動作を確認するための測線である検定線（4.4 節を参照）は、TL01101 からの通し番号とした。

表-6 ブロック名一覧

地区名	ブロック名
北海道地区	HD01, HD02
東北地区	TH01, TH02
関東地区	KT01, KT02, KT03, KT04, KT05, KT06
中部・近畿地区	CB01, CB02, CB04
中国・四国地区	CG01, CG02, CG03, CG06
九州地区	KY01, KY02, KY03, KY04, KY05
沖縄地区	OK01, OK02
検定線	TL01

2.4.2 サーベイ

実際の観測は必ずしもブロックごとに進めたわけではなく、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を決めた。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、5.3 節のデータ処理の際に絶対重力値にひも付けられるため、拠点となる飛行場ごとに観測データを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 3.2 節を参照）を 1 点～3 点設置

し、例えば、調布飛行場では「調布 1」、「調布 2」のように点名を付けた。また、ある飛行場の一つの飛行場重力点で静止測定を行った観測データを観測年ごとにサーベイというまとまりで管理した。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-7 に飛行場コードの一覧を示す。

表-7 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ひも付けし、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手速を算出する。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。）を測定した。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した。

レバーアーム及び航空重力計の高さを測定するタイミングは、最初に航空機に観測機器を取り付けたとき、航空機の変更等により観測機器の位置関係が変わったときとした。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する右翼端方向を 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た（図-5）。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を令和元年 7 月と令和 2 年 1 月の 2 回実施した。

レバーアームを測定した場所は、調布飛行場の格納庫内である。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二つの器械点から, 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, 角観測と距離測定を行った. 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については, 航空機直下に三脚を設置して測定した. 航空重力計と IMU 間の水平距離については, 鋼製巻尺で測定した.

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を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を余弦定理で求めた. IMU は航空重力計の右真横に設置しているた

め, y 軸上にあるとした. 航空重力計と IMU 間の水平距離については, 鋼製巻尺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 座標及び 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-8 のとおりである.

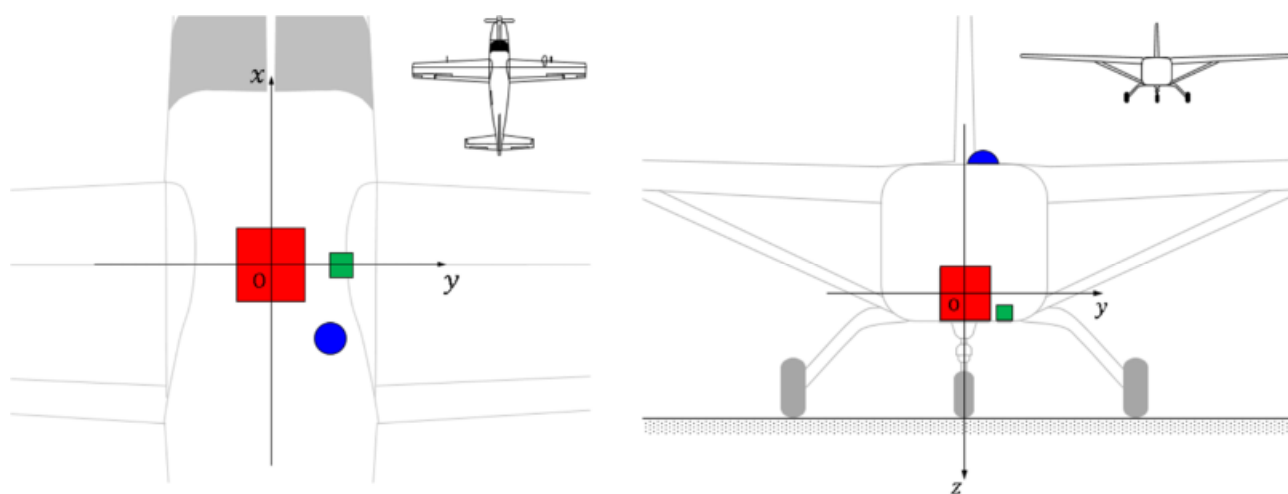


図-5 航空重力計, IMU 及び GNSS アンテナ相互の位置関係の模式図
(赤: 航空重力計, 緑: IMU, 青: GNSS アンテナ)

表-8 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。

飛行場重力点に重力値を与える観測方法は、一等重力測量に準じることとし、重力計についてはラコスト重力計とシントレックス重力計を組み合わせ、3 台使用した。重力鉛直勾配の観測方法は、基準重力測量に準じることとした。なお、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。

飛行場重力点の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求めた。表-9 に測量した飛行場重力点の重力値を示す。

表-9 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	980,558.380
	女満別 2	980,558.328
	女満別 3	980,558.278
丘珠空港	丘珠 1	980,470.881
	丘珠 2	980,470.904
青森空港	青森 1	980,253.435
	青森 2	980,253.418
仙台国際空港	仙台 1	980,104.408
	仙台 2	980,104.505
調布飛行場	調布 1	979,756.135
	調布 2	979,756.157
名古屋飛行場	名古屋 1	979,744.435
	名古屋 2	979,744.428
八尾空港	八尾 1	979,704.421
	八尾 2	979,704.427
北九州空港	北九州 1	979,669.070
	北九州 2	979,668.991
鹿児島空港	鹿児島 1	979,418.297
	鹿児島 2	979,418.276
那覇空港	那覇 1	979,106.601

4. 飛行観測

4.1 観測に必要な条件

飛行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様々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風である。飛行高度ごとに風速上限の目安（飛行高度 1,500 m で 20 ノット以下、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た。特に 12 月～3 月は全国的に上空の偏西風が強いため、観測できないことが多かった。また、積雪量の多い地域では、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、積雪が多い時期は観測に不適であった。

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 回の搭乗当たりの飛行時間の標準を 4 時間程度とし、連続搭乗日数は標準を 3 日間、上限を 4 日間とした。4 日間連続で搭乗した場合には翌日を休日（搭乗しない日）とし、直後の連続搭乗日数は 3 日間以内となるように方針を定めた。

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が限られるため、台風や長雨等の悪天候時を除き、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った。一般に飛行制限空域では土日祝日のみ飛行が許されるため、土日を含む 7 日～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た。観測日における作業スケジュールの一例を表-10 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た（写真-1、別添-1）。飛行記録簿については NGS が使用していたものをベースに作成し、観測者の意見を基に利用しやすく改良した。飛行記録簿には観測中の揺れの情報以外にも、ブロック名やサーベイ名、フライト番号のほか、静止重力測定の情報等を記載し、解析を行う際の資料とした。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回当たりのコストが非常に大きい。人為的なミス避け、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を事例集としてまとめ、次の観測者へ引き継ぐことで観測の失敗を防ぐための対策を行った。

表-10 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	エンジン始動，IMU の離陸前校正
9:00		離陸	
:		観測	機器の操作，観測記録簿への記入
13:00		着陸	IMU の着陸後校正，給油
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

[illegible]

写真-1 観測中の様子（左） 飛行記録簿の記載例（右）

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。測線は西側が埼玉県行田市、東側が鹿島灘沖約 45 km までの東西方向約 165 km 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、東西方向約 210 km とした。

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、令和3年3月、令和4年2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測線分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、令和4年2月の観測の再現性はそれぞれ標準偏差 0.5 mGal, 0.6 mGal, 0.5 mGal であった(別添-2)。
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-6 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。令和2年度に検定線の西側の端点を延長したのは、EGM2008 の精度が良い陸地の区間を長く取る必要があるとの判断からである。

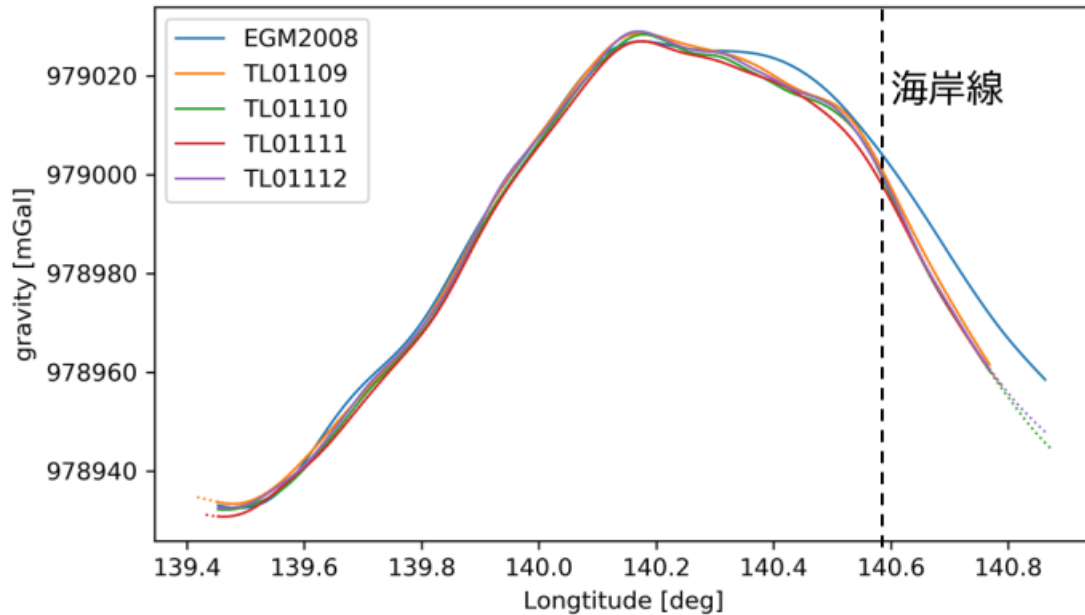


図-6 検定線上空の重力値（令和2年2月観測）

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あらかじ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-7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に制御されるが、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については、5.3.1項で詳しく述べる。

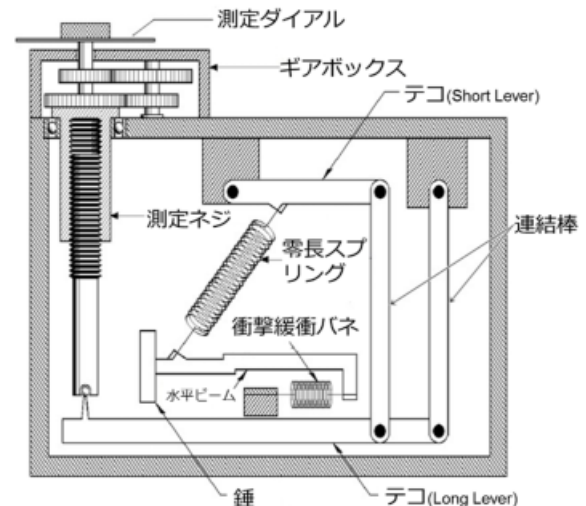


図-7 ラコスト重力計の内部模式図（LaCoste & Romberg Instruction Manual より引用、一部付記）

5. 計算及び精度評価

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-8に①～④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（一次解析用、最終解析用）
- 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、最終解析とは上空の重力値を計算するための解析である。この二つは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

異なるだけであり、③以降の作業内容は同じである。以下では、上記②～⑥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、3.1 節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ベス補正、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 を使用した。解析では GNSS/IMU 装置の各データの密結合処理 (Tightly-coupled) を行った。

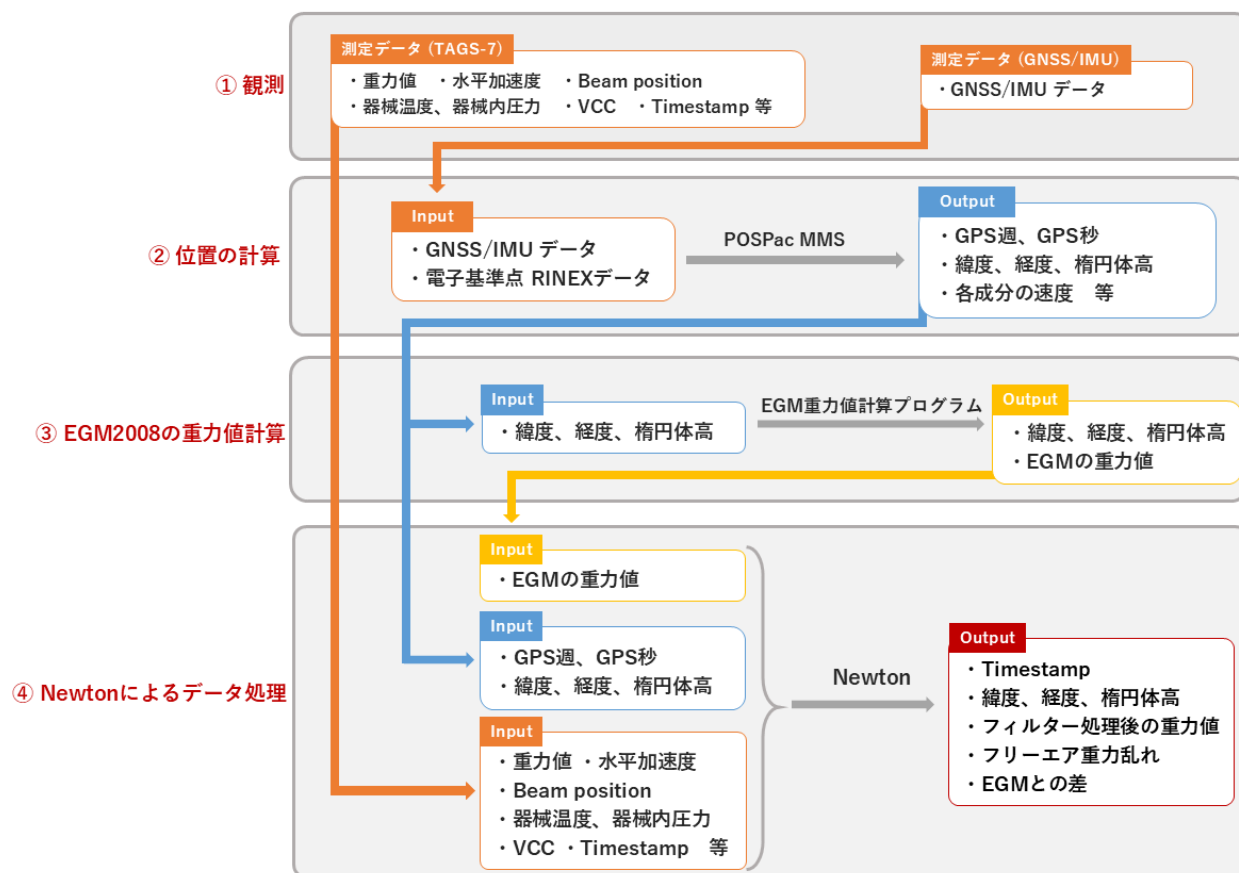


図-8 計算の流れ (①～④)

5.2.1 一次解析に用いた位置情報

一次解析において、GNSS 衛星の軌道情報には放送暦を用いた。GNSS 基準局は拠点となる飛行場周辺の電子基準点 1 点（離陸飛行場と着陸飛行場が異なる場合は複数の電子基準点）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

した。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 秒とした。

GNSS 基準局として使用した飛行場ごとの主な電子基準点は表-11 のとおりである。幾つかの空港では、飛行経路の範囲に応じて基準局とする電子基準点を使い分けた。

図-9 に使用した電子基準点の配点図の例を示す。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。

表-11 一次解析において GNSS 基準局として使用した
主な電子基準点

飛行場名	電子基準点名（点番号）
女満別	網走（960505）
丘珠	札幌 2（020882）
仙台	亶理（950179） 仙台 2（191234）
調布	小金井（93019） 練馬 A（081171）
名古屋	愛知大口（950298）
八尾	堺（950337）
北九州	行橋（960686）
鹿児島	隼人（021089） 名瀬（950494）
那覇	那覇（021096） 石垣 2（960750）

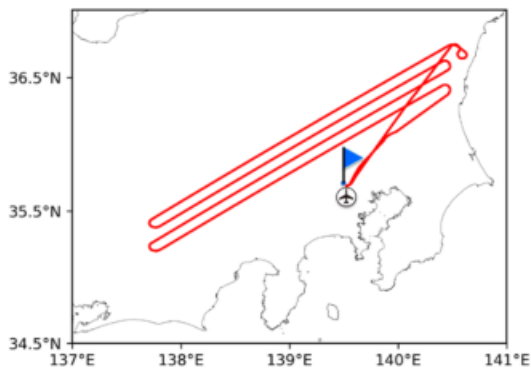


図-9 一次解析の配点図例

5.2.2 最終解析に用いた位置情報

最終解析において、GNSS 衛星の軌道情報には国際 GNSS 事業 (IGS) 精密暦を用いた。GNSS 基準局は航空機の飛行経路を取り囲む複数の電子基準点とし、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は 70 km 以内とした。なお、電子基準点が存在しない海上等の地域についてはこの限りではない。電子基準点の座標値には、成果表の値に国土地理院が提供する地殻変動補正パラメータを使用してセミ・ダイナミック補正を行った値を使用した。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 秒とした。

図-10 に使用した電子基準点の配点図の例を示す。航空機のマークがある場所が離着陸飛行場、青丸が電子基準点、青旗が電子基準点の固定局、赤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-11）としてまとめた。主な点検項目は DOP, 往復差, 位置の標準偏差, それぞれの平均値及び最大値である。各点検項目は表-12 のとおりである。

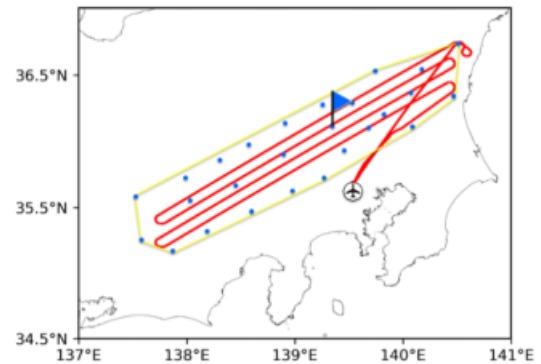


図-10 最終解析の配点図例

GNSS/IMU観測データ精度管理表

Survey	CF23-1		Flight	f08		観測者	〇〇		観測年月日	2023-05-05	
機体番号	JA889N		GNSS/IMU機器	POS AV 610		GNSSアンテナ	AT1675-180		IMUデータ取得間隔	20Hz	
使用ソフト	POSPac MMS 8.4 sp2		解析方法	Tightly-coupled		GNSS軌道層	精密層		使用した電子基準点	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） (JST)	平均（上段） 最小（下段） 衛星数	往復差の平均値（上段） 最大値（下段） (m)			フィックス率 (%)	位置の標準偏差の平均値（上段） 最大値（下段） (m)			
				N	E	U		N	E	U	
KT01602	4991	2023-05-05 09:25:46	14	-0.007	0.008	0.001	100	0.019	0.017	0.024	
		2023-05-05 10:38:09	11	0.039	0.024	0.031		0.020	0.019	0.027	
TH04501	3133	2023-05-05 10:54:59	13	-0.002	0.004	0.001	100	0.017	0.018	0.024	
		2023-05-05 11:07:25	12	0.014	0.013	0.010		0.018	0.019	0.026	
TH04106	3138	2023-05-05 11:23:34	12	-0.010	0.012	-0.001	100	0.019	0.016	0.024	
		2023-05-05 11:34:59	11	0.026	0.022	0.025		0.020	0.018	0.026	
TH04105	3136	2023-05-05 11:44:24	13	0.002	0.008	0.000	100	0.020	0.016	0.024	
		2023-05-05 11:53:47	12	0.023	0.025	0.019		0.020	0.018	0.026	
TH04104	3134	2023-05-05 12:03:10	14	-0.005	0.003	0.001	100	0.020	0.017	0.025	
		2023-05-05 12:15:39	14	0.017	0.016	0.016		0.020	0.018	0.026	
解析者	△△										

図-11 位置の計算の精度管理表

表-12 位置の計算の点検項目

点検項目	許容範囲	備考
最小衛星数	5 衛星以上（GPS 衛星のみ） 6 衛星以上※（GPS 及び GLONASS 衛星） ※GPS 及び GLONASS 衛星をそれぞれ 2 衛星以上含むこと	
位置の往復解の差	0.50 m 以内	NEU の各軸において
解の品質	フィックス解	
位置の標準偏差の平均値	0.10 m 以内	NEU の各軸において
位置の標準偏差の最大値	0.15 m 以内	NEU の各軸において

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、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等が含まれている。それらの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、NGS が開発した、MATLAB 上で動作するプログラム Newton (GRAV-D Team, 2017)を使用した。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

Newton が行う主な処理工程は以下のとおりである。

- (ア) 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
- (イ) 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
- (ウ) 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) エトベス補正及びオフレベル補正の適用

- (オ) ドリフト補正の適用及び絶対重力値への変換
- (カ) 120 秒のガウシアンフィルタの適用
- (キ) 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、データ処理ではこの影響を無視した。

(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、

$$g = (g_{raw} - a_U + e\ddot{ot}v\ddot{o}s + offlevel - drift + tie) * f_{120}(t)$$

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、 $e\ddot{ot}v\ddot{o}s$ 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

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 だけ増えるため、重力値が $(\omega + v/R)^2 R - \omega^2 R$ だけ増加したように見える．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、

$$e\ddot{ot}v\ddot{o}s = - \left(2\vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} \right) \cdot \vec{e}_U$$

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、揺れが全くないときに両者は一致する（図-12 左）．しかし、航空機の揺れ等によって急激に重力計が傾くとジンバルの制御が追い付かず、重力計の鉛直軸と重力の働く軸が一致しなくなる．このとき、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-12 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．

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 桁で実際の重力加速度と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．

$$f_z = g \cos \theta + a_{long} \sin \theta$$

$$f_{long} = -g \sin \theta + a_{long} \cos \theta$$

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

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

となる．さらに， $f_z \approx g_0 (= \text{Const.})$ とすると

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

となる．

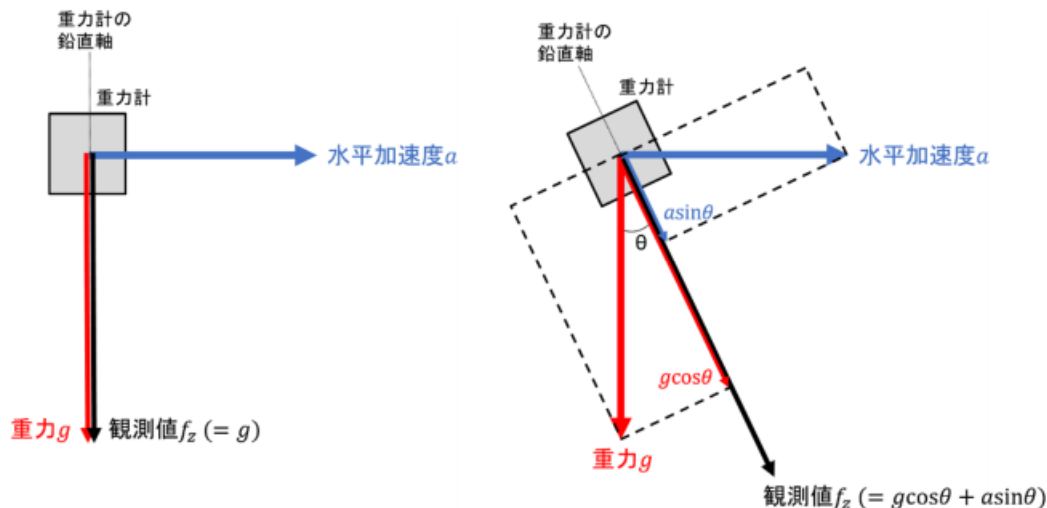


図-12 飛行観測中に重力計に作用する加速度

(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)

5.3.4 ドリフト

航空重力計のドリフト値については，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

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

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

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，

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

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を用いた．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，全体としてのつ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秒～180秒の間で幾つかのフィルタ長を試した結果，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，フィルタ長を120秒とした．

5.3.7 トリミング

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した．なお，通常のトリミング処理では，測線の両端に施した．

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した．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 との比較を行った。EGM2008 は日本の海域での精度が低い（3 mGal～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-13 に

航空重力値と EGM2008 重力値を示す。航空重力値が EGM2008 と大きく乖離していた場合、その部分をトリミングし、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った。

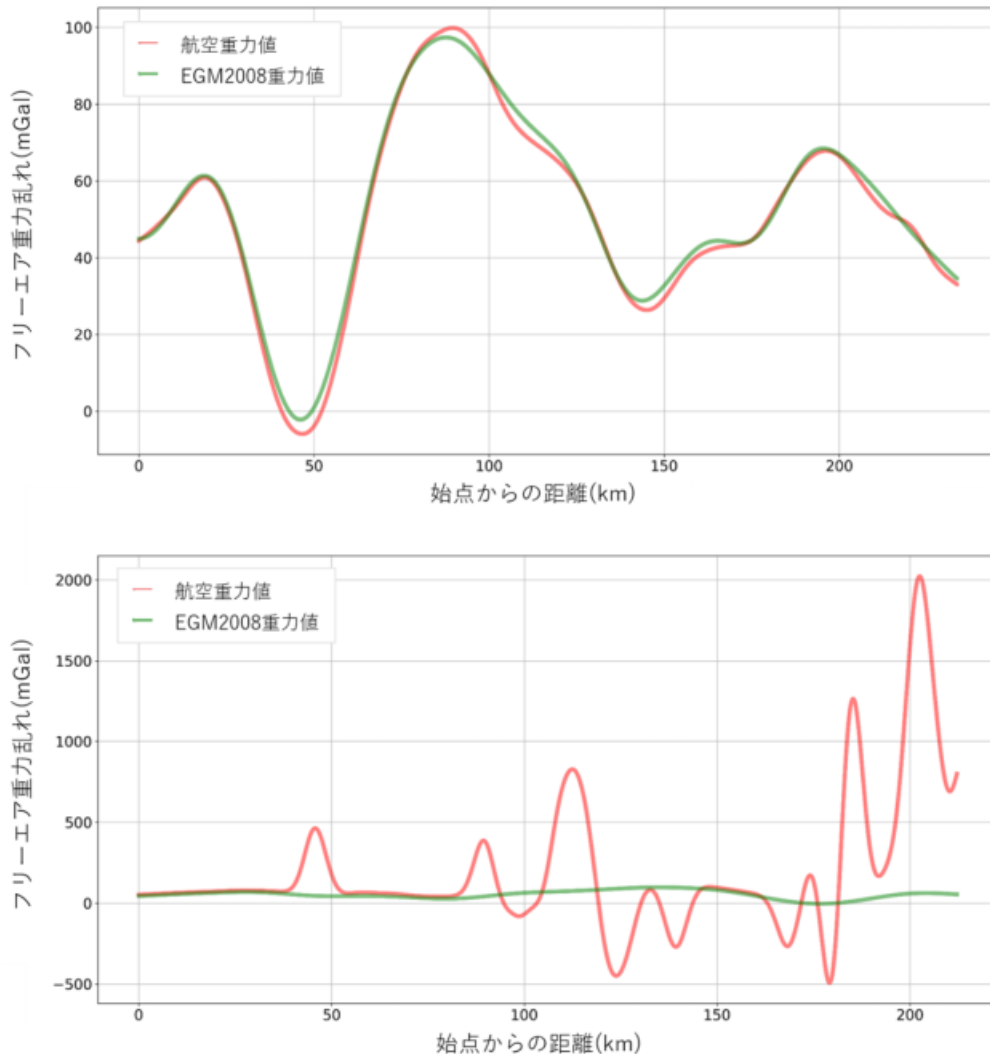


図-13 航空重力値と EGM2008 重力値の比較（上：良好な例（KT03218）、下：再測候補となる例（KT03118））

5.4.2 推定重力値との差、オフレベル補正值

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值を使用した。推定重力値は、航空重力値と同高度における重力値であり、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ものである。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、航空重力データが確からしい重力分布を捉え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こともある。Peters & Brozena (1995)の手法によるオフレベル補正は、揺れが強く補正值が大きくなると正確に補正值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、オフレベル補正值が小さければ正確な補正值を算出していると考えられるため、推定重力値の精度が低い沿岸域や山岳域では、オフレベル補正量の大きさを航空重力データの妥当性を評価する指標として扱うことができる。

図-14 に示す三つのグラフは上からオフレベル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。QC index は，航空重力値の品質を示す指標であり，「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10 mGal以上」であればBad，それ以外はGoodとした。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し

た。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ていると判断した。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ていると判断した。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，再測を検討した。

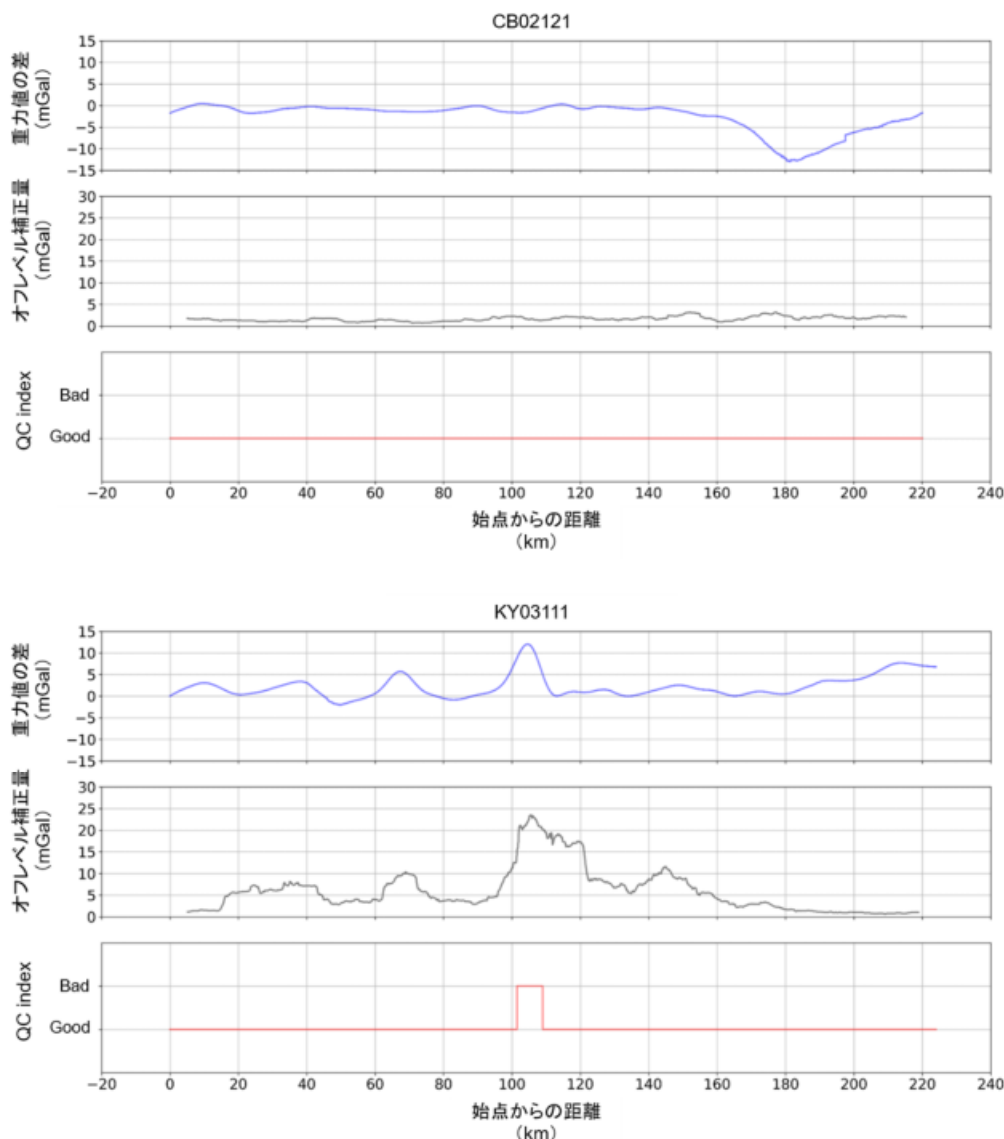


図-14 推定重力値との差，オフレベル補正量の絶対値の移動平均，QC index
(上：良好な例 (CB02121)，下：再測候補となる例 (KY03111))

5.4.3 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 5.3.7 項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

った測線は原則再測とした。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した。図-15 に異常値を観測し、中間トリミングが必要な例を示す。

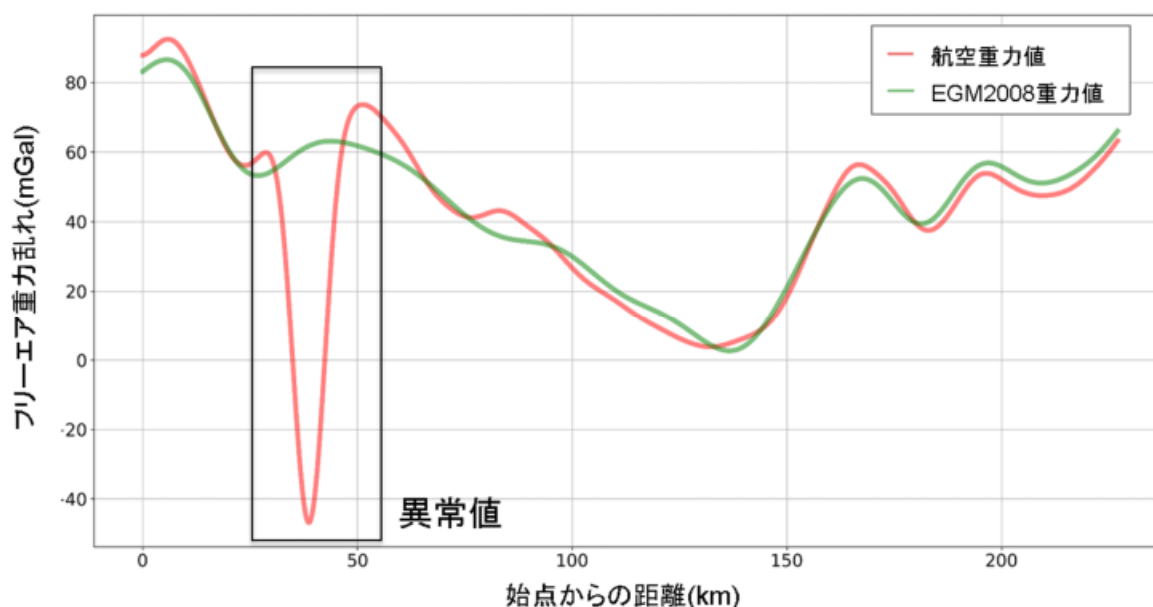


図-15 中間トリミングが必要な例（CB02107）

5.4.4 ブロック解析

一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、ブロック内の全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した。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。観測によって飛行高度が若干異なるため、クロスオーバー較差を計算する際は、航空機高度の重力値を完全ブーゲー重力異常に変換してから行った。ブロック解析において、平均が ± 2 mGal、最大及び最小値がそれぞれ ± 10 mGal、標準偏差が 3 mGal を超えるようなブロックについては、原因となる測線の再測を検討した。

5.4.5 クロスオーバー調整

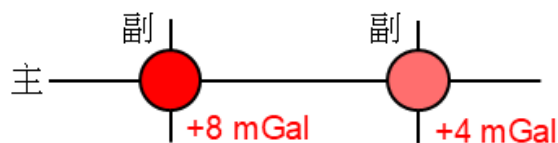
一般に航空重力値には、測定や解析に起因するバイアスが測線ごとに含まれるとされる。国土地理院では、バイアスを補正するために、クロスオーバー調整を行った。これは、ブロック解析における、クロスオーバー較差を用いるバイアス補正方法である（図-16）。クロスオーバー調整は以下の手順でブロックごとに行った。

- （イ）クロスオーバー較差を計算（ブロック解析）
- （ウ）ブロック内でのクロスオーバー較差の平均が 0 mGal になるように、副測線ごとにバイアスを補正
- （エ）再度、クロスオーバー較差を計算
- （オ）ブロック内でのクロスオーバー較差の平均が 0 mGal になるように、主測線ごとにバイアスを補正

精密重力ジオイドの構築にはクロスオーバー調整を行ったものを使用した。

- （ア）航空重力値を完全ブーゲー重力異常に変換

主測線のバイアスを補正する例



平均が0 mGalになるよう補正
(≒主測線に-6 mGal加える)

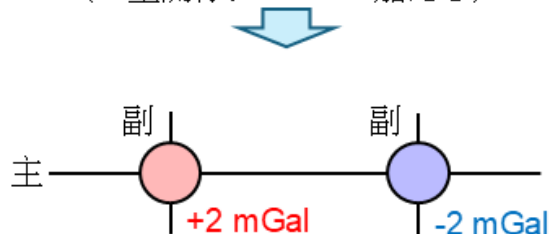


図-16 クロスオーバー調整の方法

5.5 航空重力データの評価

5.4 節で述べた航空重力値と推定重力値との較差, 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。

推定重力値との重力差を図-17 に, オフレベル補正值を図-18 に示す. オフレベル補正值が 10 mGal を

超えるような地点は, 北見山地や渡島半島, 奥羽山脈, ハケ岳, 丹波高地, 四国山地, 筑紫山地等の山岳域が多い. 山岳域では平地に比べ空気の流れが複雑になるため, 航空機の揺れも増し, オフレベル補正值が大きくなったと考えられる。

航空重力値と推定重力値との重力差は平均で -0.4 mGal, 標準偏差は 2.3 mGal であった. 山岳域や沿岸域で, 重力差が大きいことが分かる. 負の最大値は屋久島西側の沖合で -19.6 mGal, 正の最大値は北海道日高山脈で 11.8 mGal であった. 沿岸域ではオフレベル補正值がおおむね 5 mGal 以下であることから, 既存の重力データでは捉えることのできなかった重力分布を, 航空重力データが捉えていると考えられる。

北見山地, 丹波高地等で測線全体にわたって較差が見られる測線がある. 測線全体にみられるバイアスは, 上空での測定中に重力計に強い揺れが加わった際に, 重力値に跳びが生じるテアと呼ばれる現象, 飛行場での静止測定が十分ではなかった等によって生じた可能性がある。

図-19 及び別添-3 にブロック解析の結果を示す. クロスオーバー較差の全体の平均は 0.2 mGal, 標準偏差は 1.6 mGal であった。

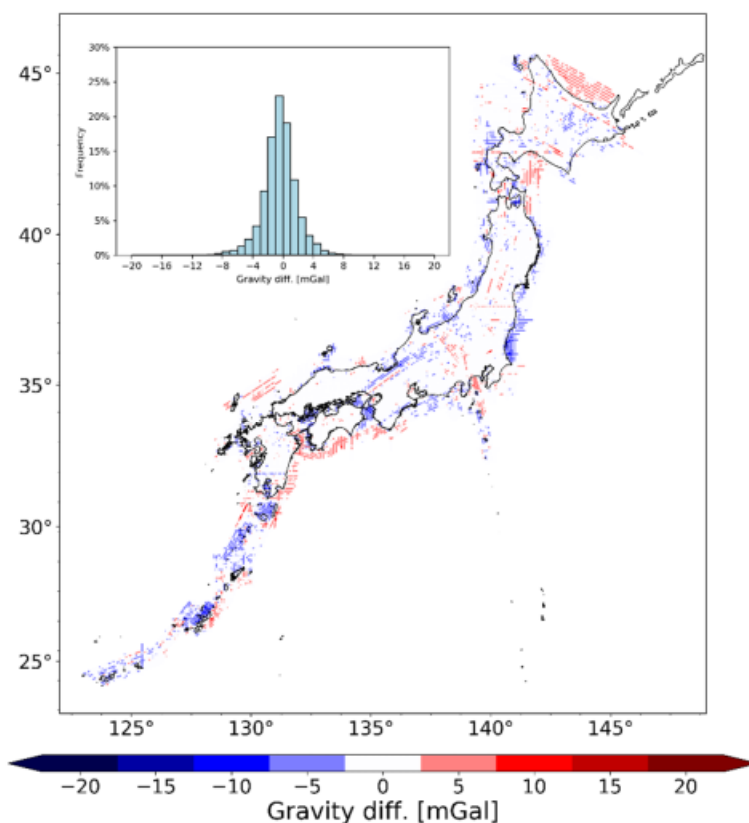


図-17 推定重力値との重力差（観測値—推定値）

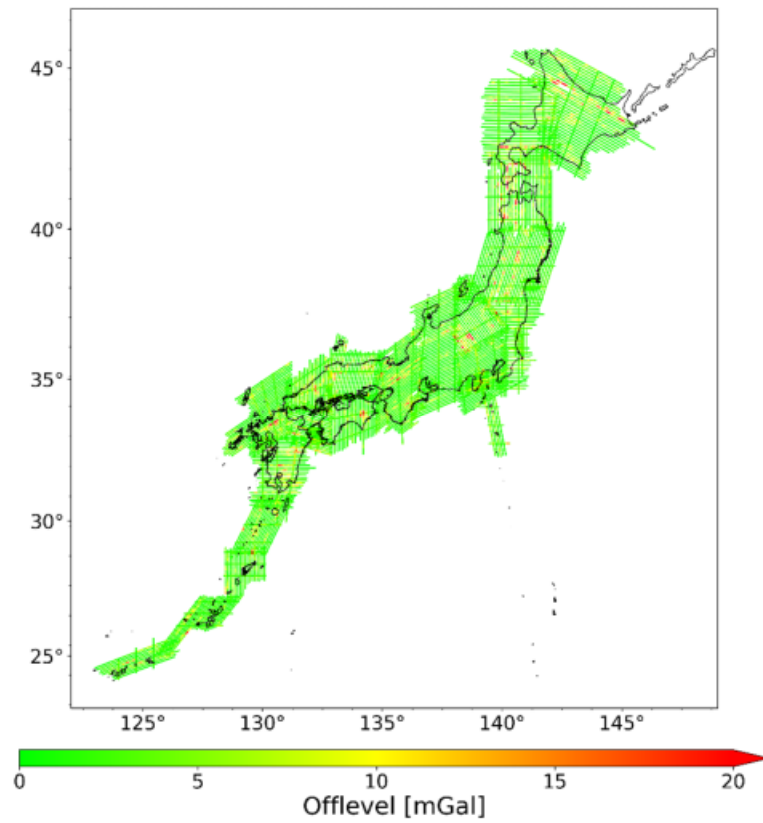


図-18 オフレベル補正値

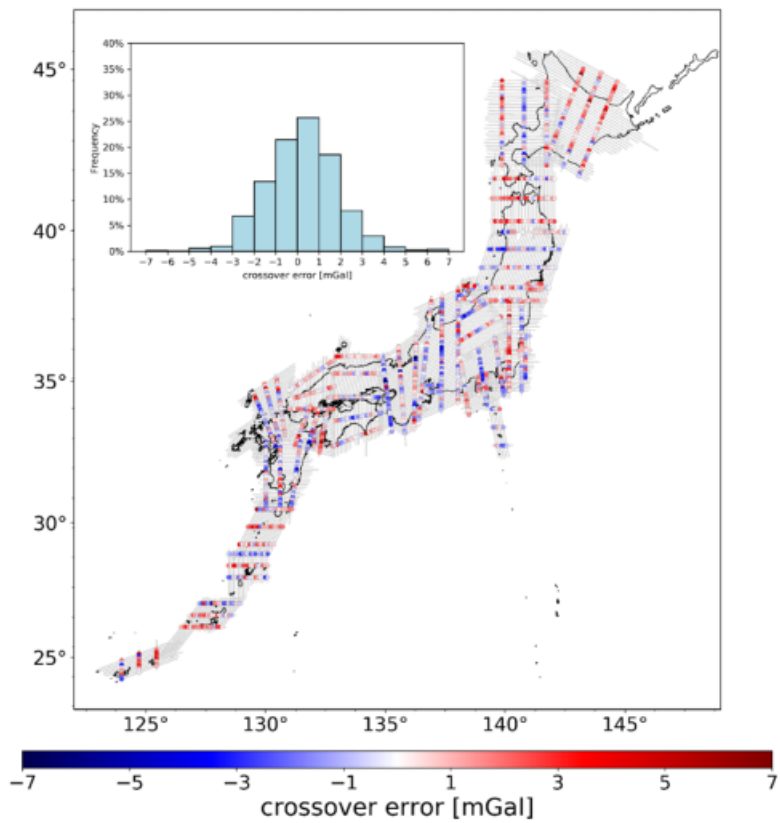


図-19 ブロック解析の結果

5.6 クロスオーバー調整後の評価

5.5 節で述べたとおり、北見山地、丹波高地等の一部の測線において、測線全体にバイアスが生じているものが確認された。このバイアスを解消することを目的に、クロスオーバー調整を行った。クロスオーバー調整後のブロック解析の結果を図-20に示す。クロスオーバー較差全体の平均は 0.0 mGal、標準偏差は 0.9 mGal となった。また、較差の正の最大値は 3.9 mGal、負の最大値は -3.8 mGal となり（調整前はそれぞれ 6.8 mGal と -6.7 mGal）、クロスオーバー調整によって各測線が持つバイアスを軽減することができた。

クロスオーバー調整で各測線のバイアスは軽減したが、クロスオーバー調整を行うことで実際の重力値と乖離する可能性もある。そこで、調整後の重力

値と推定重力値との比較を行った（図-21）。較差の平均は 0.0 mGal、標準偏差は 2.3 mGal であった。図-17 で見られた、測線全体にバイアスが生じているような測線は見られなくなったことから、クロスオーバー調整を行うことで、測定や解析によるバイアスが軽減したことが分かった。さらには既存の重力データとより整合する結果となった。既存の重力データが一定数あり、推定重力値のある程度の精度が見込まれる陸域において比較をした結果を図-22に示す。陸域のみでは平均が 0.0 mGal、標準偏差は 1.5 mGal であった。これらの図からも航空重力測量によって、特に沿岸域において、既存の重力データでは捉えることのできなかった重力分布を捉えていることが分かる。

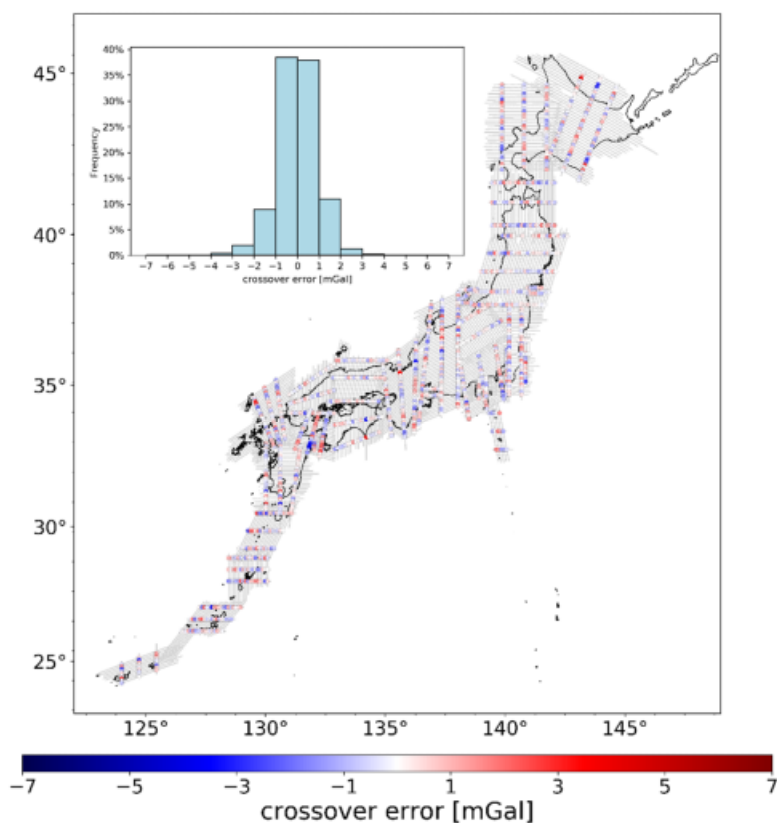


図-20 クロスオーバー調整後のブロック解析の結果

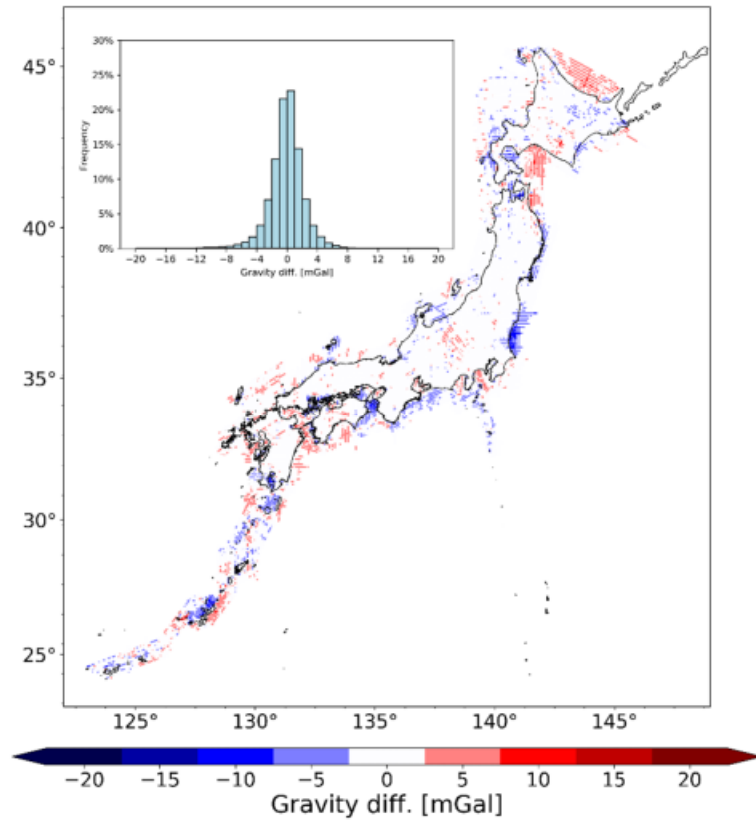


図-21 クロスオーバー調整後の推定重力値との較差

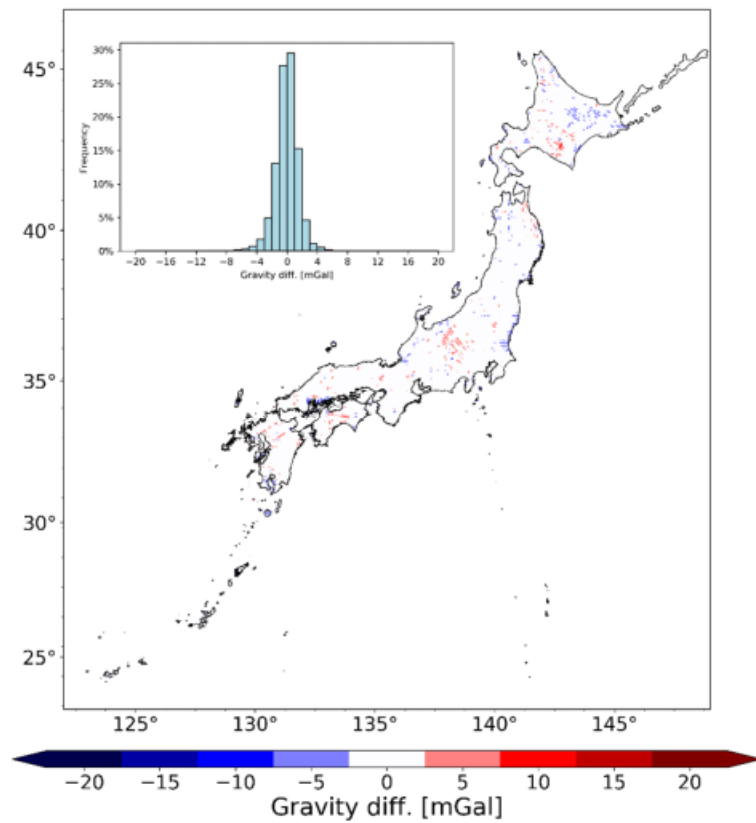


図-22 クロスオーバー調整後の推定重力値との較差（陸域のみを抽出）

6. 精密重力ジオイドへの航空重力測量の効果

6.1. 精密重力ジオイドの試作

得られた航空重力データの効果を検証するために地上重力、衛星重力データ等の既存の重力データのみを使用した重力ジオイド・モデルと、既存の重力データと今回取得した航空重力データを使用した試作版の精密重力ジオイドの2種類を構築し、二つのジオイドを比較した。

図-23 に二つのジオイド高の較差を示す。ジオイド高の較差のうち、正の最大値は23.0 cm(紀伊水道)で、負の最大値は-25.5 cm(北海道知床半島)であった。全体の傾向としては特に沿岸域や山岳域で較差が大きく、既存の重力データの配点密度が小さい地域で、航空重力データの効果が大きいことが分かる。

6.2. ジオイド勾配の比較

国土地理院では、令和2年度～令和4年度にかけて幾つかの地域で、GNSS 測量と水準測量を行った。それぞれの測量を同一点上で行い、GNSS 測量では楕円体高を、水準測量では標高を取得した。一般的には、楕円体高と標高の差分からジオイド高(以下「実測ジオイド高」という。)を算出し、精密重力ジオイドから算出されるジオイド高(以下「重力ジオイド高」という。)を比較することで、ジオイド・モデルの評価を行う。しかし、実測ジオイド高には水準測量に起因する誤差(累積誤差)が含まれている。そこで、今回はジオイド勾配(e.g. Smith et al. 2013)を比較することで累積誤差を軽減し、モデルの精度の検証を行うこととした。

ジオイド勾配の比較とは、任意の2地点における実測ジオイド高(図-24 中 N^{GL})の差と重力ジオイド高(図-24 中 N^M)の差を比較する方法である。ジオイド勾配は n 地点で測定を行った場合、任意の2点での比較を行うため、各地点で単純に実測ジオイド高と重力ジオイド高を比較するよりも検証データが nC_2 個と多くなることに加え、同一地域の2点を比較することで水準点の持つ累積誤差を軽減できる。任意の2地点間のジオイド勾配差($\Delta dN_{i,j}$)は、以下の式で求められる。

$$\Delta dN_{i,j} = (N_i^M - N_j^M) - (N_i^{GL} - N_j^{GL})$$

実測ジオイド高に用いる楕円体高と重力ジオイド高は永年潮汐が tide-free であるのに対し、水準測量

による標高は mean-tide であるため、標高を tide-free に変換し、実測ジオイド高を算出した。同一の地区の中で全ての組合せでジオイド勾配差を計算し、点間距離が10 km ごとに以下の式を用いて、RMS 誤差(RMSE)を算出した。なお、点間距離が140 km の組合せが少ないため、140 km～170 km はまとめて算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j} \{(N_i^M - N_j^M) - (N_i^{GL} - N_j^{GL})\}^2}$$

任意の2地点間のジオイド勾配差の誤差を考える場合、誤差伝搬の法則により以下のとおりになる。

$$\varepsilon(\Delta dN_{i,j})^2 = \varepsilon(N_i^M)^2 + \varepsilon(N_j^M)^2 + \varepsilon(N_i^{GL})^2 + \varepsilon(N_j^{GL})^2$$

ここで、実測ジオイド高を真値とし、モデルの誤差は地点によらず一様とすると、モデルの誤差は以下の式で表せる。

$$\varepsilon(N_i^{GL})^2, \varepsilon(N_j^{GL})^2 = 0$$

$$\varepsilon(N_i^M)^2 = \varepsilon(N_j^M)^2 = \varepsilon(N^M)^2$$

$$\varepsilon(\Delta dN_{i,j})^2 = 2 \times \varepsilon(N^M)^2$$

$$\varepsilon(N^M) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \varepsilon(\Delta dN_{i,j})$$

三つの重力ジオイド(EGM2008, JGEOID2008, JGEOID2024(航空重力データを含むモデル))において、ジオイド勾配の比較を行った結果を図-25に示す。一般に、地上重力データや船上重力データの空間波長は10 km, 衛星重力データは100 km 程度とされ、航空重力データはこれらの重力データの中間の20 km～100 km 程度とされている。図-25 では点間距離50 km 以上から、 $RMSE/\sqrt{2}$ 値が小さくなっており、航空重力測量によりジオイド・モデルの精度が向上したことが分かる。JGEOID2024 の精度は2.8 cm となり、国土地理院が目標精度としていた3 cm を達成する結果になった。

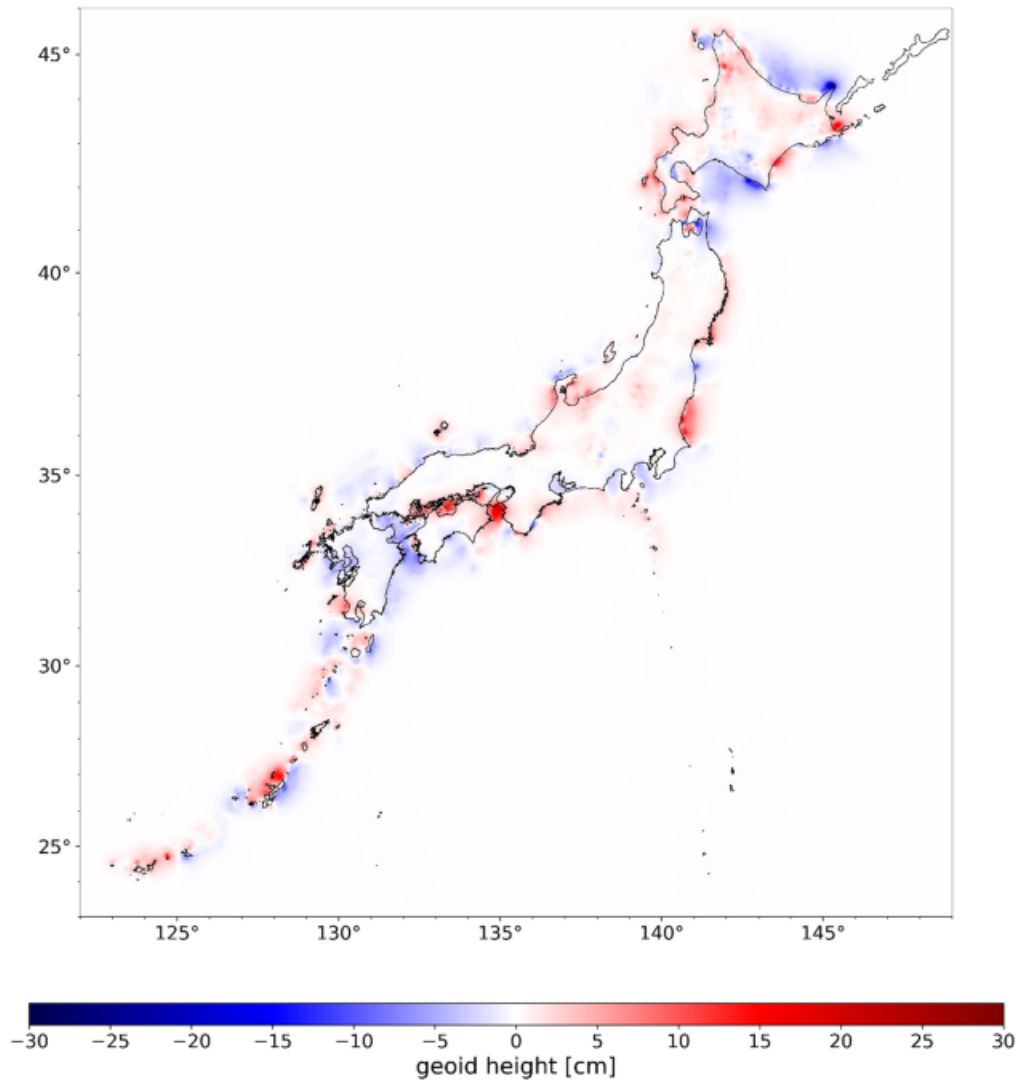


図-23 重力ジオイド高の較差（「航空重力データを含めない場合」 - 「航空重力データを含めた場合」）

$$\text{ジオイド勾配差} = (N_i^M - N_j^M) - (N_i^{GL} - N_j^{GL})$$

ジオイド・モデルの
勾配

実測ジオイドの
勾配

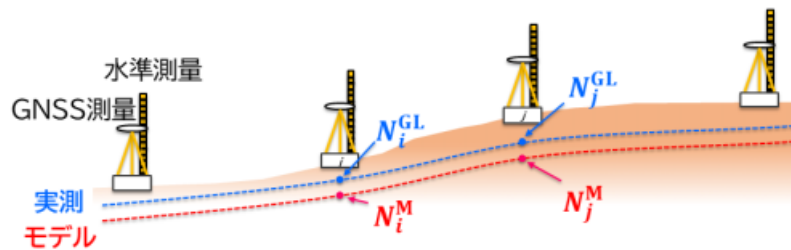


図-24 ジオイド勾配の模式図

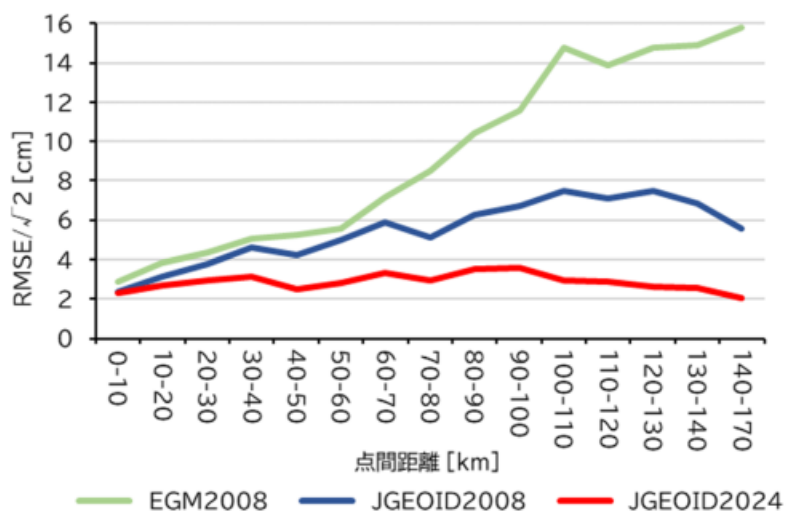


図-25 ジオイド勾配の比較の結果

7.4 年間の航空重力測量

航空重力測量を行った月ごとの日数を図-26、各測線の測定時期を図-27に示す。

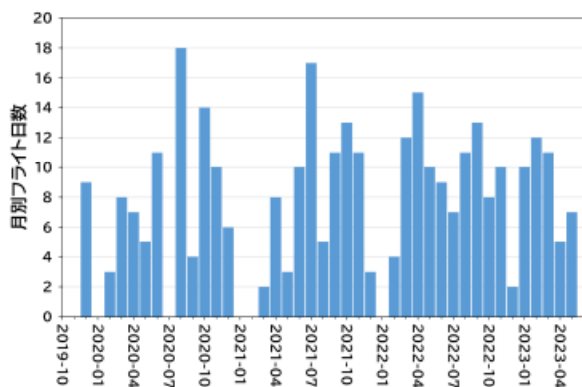


図-26 月別の測定日数

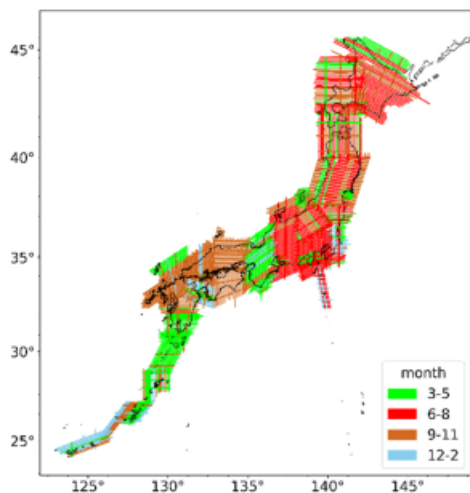


図-27 測線の測定時期

航空機を運用する上で定期的な点検が幾つかある。そのうちのひとつが耐空証明検査である。耐空証明は有効期限が1年であるため、毎年実施する必要がある。検査及び検査に伴う整備には約1か月を要す。検査期間中は測定ができなくなるため、上空の風が強く良好な重力データの取得が困難な冬（12月～2月）の間に耐空証明検査を行うこととした。

2020年は梅雨の時期が長かったため、7月は1度も測定できなかった。2021年以降は、北海道周辺や沖縄周辺の測定が開始され、この時期に梅雨前線等の影響を受けない地方の測定を行うことで、可能な限り作業を進めた。

積雪がない状態の重力値を取得するため、積雪量の多い中部山岳域や東北地方、北海道は6月～8月にほとんどの測定を行った（図-27）。

航空重力測量の観測経過を図-28に示す。2019年は航空重力計の不具合により、測定を開始できたのが12月であったため、関東地方の一部のみの測定となった。以降は、順調に測定を行うことができ、毎年総測線距離に対して30%程度の測定を行った。

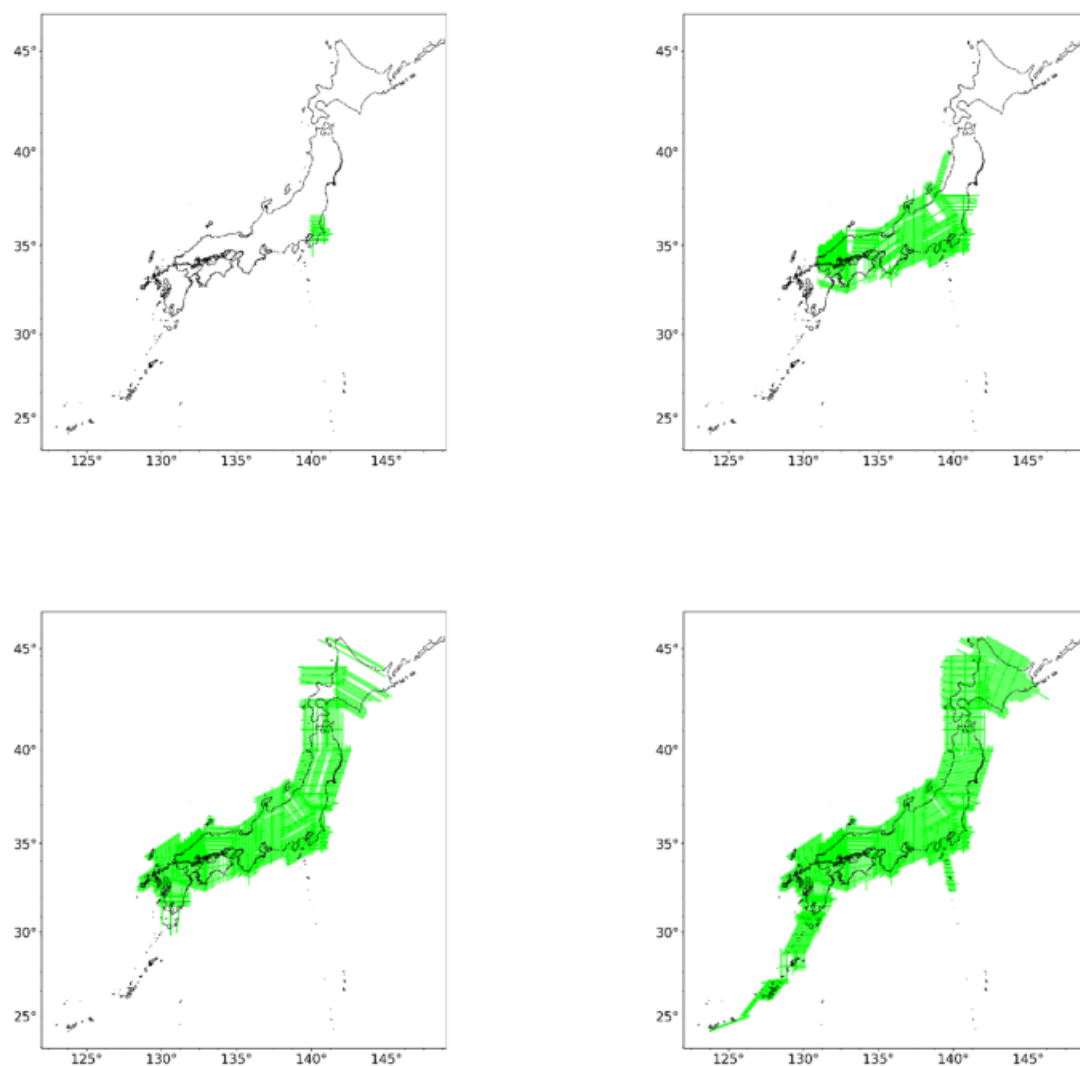


図-28 2019 年～2022 年の測定完了測線

(左上：2019 年 (1.7%)，右上：2020 年 (35.0%)，左下：2021 年 (68.0%)，右下：2022 年 (92.1%)，
括弧内の%は進捗率を示す。)

8. まとめ

約 4 年間にわたる航空重力測量を完了し，全国の均質な重力データを取得することができた．バイアスを除去した後の航空重力データは，ブロック解析により 0.9 mGal の再現性となった．また，推定重力値との比較では陸域で 1.5 mGal の精度が示された．

精密重力ジオイドを試作した結果，ジオイド高の精度については目標精度であった 3 cm を達成した．

令和 6 年 3 月に航空重力データを公開した．航空重力データは，ジオイド・モデルの構築（地球形状の決定）以外にも，重力分布による地下構造の推定（鉱物資源等の物理探査，活断層の推測等）への利用が期待される．令和 7 年 4 月には航空重力データ

等を利用して構築した精密重力ジオイド「ジオイド 2024 日本とその周辺」を公開した．精密重力ジオイドが新たな標高体系の基盤となることで，衛星測位による水準測量の効率化等が期待される．

謝辞

航空重力測量事業の実施に当たり，NOAA/NGS の Jeffery Johnson 氏，Derek van Westrum 氏をはじめとする GRAV-D チームには，事業全般にわたる多くの助言，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等，様々な局面でご支援いただいた．ここに感謝の意を表する．

(公開日：令和 8 年 3 月 16 日)

参考文献

- Childers, V. A., Robin E. Bell, and John M. Brozena (1999): Airborne Gravimetry: An Investigation of Filtering. *Geophysics* 64, no. 1: 61–69. doi: 10.1190/1.1444530
- 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 21 Nov. 2025).
- 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.
- 栗原忍, 大森秀一, 兒玉篤郎, 畔柳将人, 半田優実, 吉樂絵里香, 飯尾研人, 中島正寛, 飯塚康裕, 松尾功二, 富山顕 (2022) : 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—, 国土地理院時報, 135, 1–31. doi: 10.57499/JOURNAL_135_01
- 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. doi: 10.1186/s40623-020-01158-6
- 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 21 Nov. 2025).
- 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. doi: 10.1029/2011JB008916
- 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, 39–45.
- POS AV 610 Datasheet:
https://assets.ctfassets.net/9k5dj5b59lqq/qKHBm6GdqgKybTLf0eJg7/23d10ccf63a6cbe421a009c620c42e44/022520-024B-POS_AV610_USL_0525_LR_1_1.pdf (accessed 21 Nov. 2025).
- Smith, D.A., S.A. Holmes, X. Li, Y.M. Wang, B. Büirki, D.R. Roman, T.M. Damiani (2013): Confirming regional 1 cm differential geoid accuracy from airborne gravimetry: The Geoid Slope Validation Survey of 2011, *Journal of Geodesy*, 87, 885–907. doi:10.1007/s00190-013-0653-0

記載例

Page (1 / 2)

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	flt# :	f18	起点空港 :	八尾
測線番号①往 :	112	測線番号②往 :		測線番号③往 :		測線番号④往 :	
測線番号①復 :	113	測線番号②復 :		測線番号③復 :		測線番号④復 :	
観測者 :	〇〇	機長 :	〇〇	機体名 :	Textron Aviation 208		
ファイル名	航空重力計 : f18_18OCT2020 .txt			機器名 :	TAGS-7		
	GNSS/IMU : #####				###は001~の連番		

静止測定情報

※は、キャプチャ画面から転記

離陸前		着陸後	
年月日 (UTC)	2020/10/17	年月日 (UTC)	2020/10/18
※ 静止測定時刻 (UTC) ※	23:29:53	※ 静止測定時刻 (UTC) ※	06:39:20
※ 静止測定値 (mGals) ※	479.41358	※ 静止測定値 (mGals) ※	479.33481
飛行場重力点名	YAO2 - AGS	飛行場重力点名	YAO2 - AGS
重力計温度	57.85 ℃	重力計温度	57.85 ℃
※ 自走開始時刻 (UTC)	23:57:10	※ 駐機時刻 (UTC)	05:30:05
離陸時刻 (UTC)	00:01:22	着陸時刻 (UTC)	05:28:55

離陸前作業

- ☒ 機長からPCの引出し許可の連絡後、TAGS PCとIMU用PCを開いて監視
- ☒ 航空機の離陸時刻(UTC)を記録

離陸後作業

- ☒ 機長からPCの引出し許可の連絡後、TAGS PCとIMU用PCを開いて監視
- ☒ 機長から機体安定の通知後、UNCLAMP、ONLINE に設定
- 旋回時はTURNINGに設定。Transitのデータ記録する場合はONLINE
- ☒ 測定高度到達時刻を記録

上空での手順

- 機長から始点通過の通知を受けたら、時刻、進行方向、高度を記録。諸元情報を要求し記録
- 【随時】Levelでセンサの水平状態を確認、Rawデータで強い振動を感じた時の状況を飛行時イベントに記録
予備バッテリーの定期確認（臭い、煙等）
- 【5分毎】揺れの状況を時刻とともに記録
- 【ブレイク時】機長に測線終点までの残距離(nm)を確認。残距離+17.6nmを伝え、再進入・再測定
ただし、残距離が2~3nmの場合は再測定なし。機長の指示があれば適宜 TURNING にする
- 機長から中間点通過の通知を受けたら時刻を記録。諸元情報を要求し記録
- 機長から終点通過（測線終了）の通知を受けたら時刻を記録。諸元情報を要求し記録。TURNING に設定
- 次の測線に入るときは観測手順を繰り返す。旋回時はTURNINGに設定。Transitのデータ記録する場合はONLINE

降下時作業

- 旋回時は TURNING に設定。Transitのデータ記録する場合は ONLINE
- ☒ 測定高度離脱時刻を記録。降下するときは ONLINE、CLAMP に設定し、機長に報告
- ☒ TAGS PCをラックに格納

着陸後作業

- ☒ 航空機の着陸時刻(UTC)を記録
- ☒ 航空機が駐機場（調布はwhisky）に駐機した時刻(UTC)を記録
- ☒ 駐機場（調布はwhisky）に駐機後、ONLINEに設定

飛行時イベント

※風向は方位角で記載（例 東=90、南西=225）

測線番号 進行方向(8方位) 高度(ft)	始点	中点	終点	時刻 (UTC)	対地 速度 (kt)	風向	風速 (kt)	ブレイク 残距離 (nm)	揺れ 0~5	振幅 (mGal)	特記事項
				0:16:18							UNCLAMP
				:21:09							3000m到達
				:49:27							TURNING、S字
				:57:32							ONLINE
CG01112	✓			:59:34	160	300	4		2	20k	
S				1:04:36					2	20~30k	
10,009				: 9:38					3	30~50k	1分程度の揺れ、雲近い
				:14:35					0		
		✓		:19:17	157	260	10		0		
				:24:18							
				:29:20					0		
				:34:22					1	20k	
			✓	1:41:21	152	240	11		0		

[illegible]

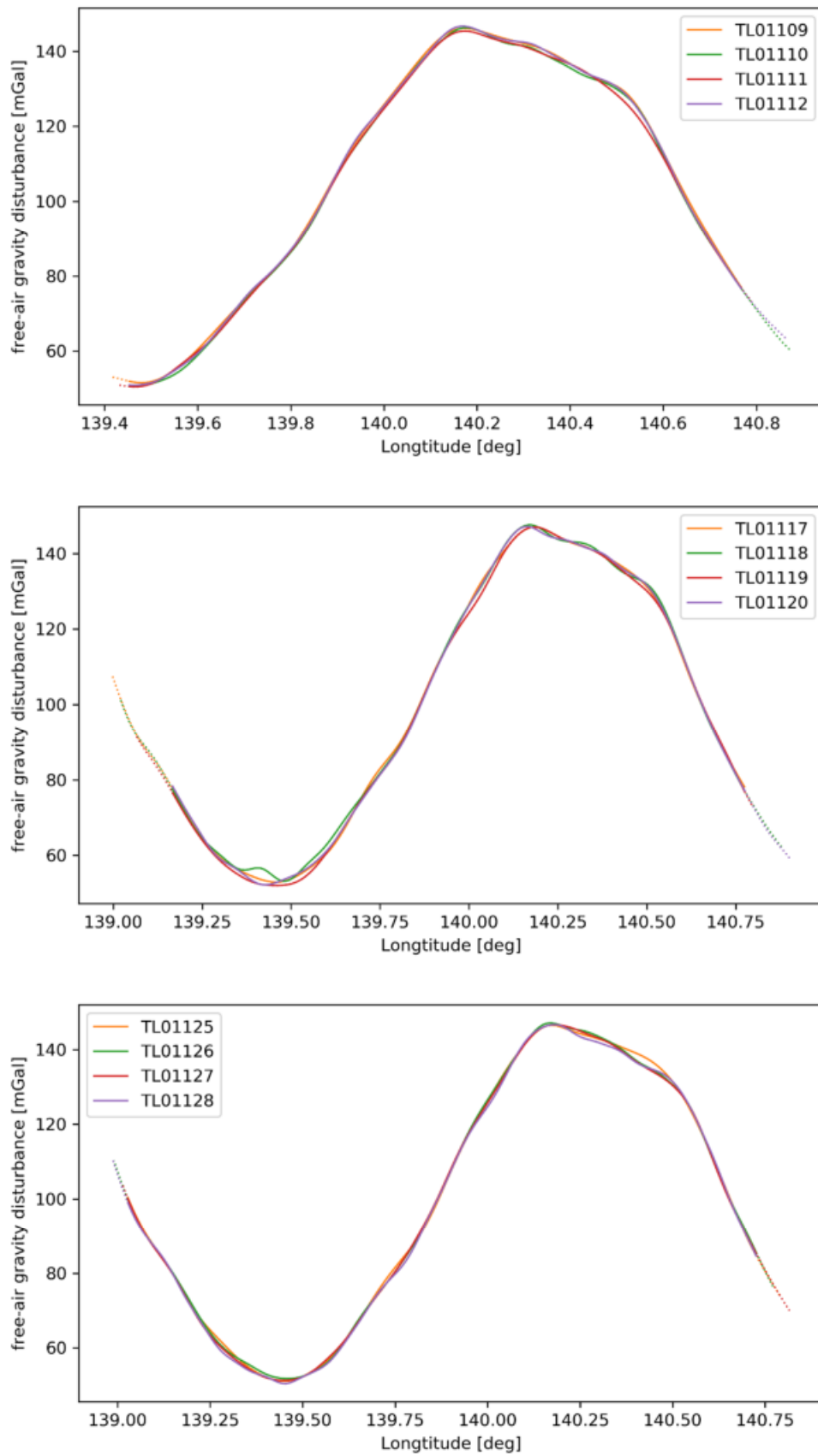


図 検定線における航空重力計の再現性の確認
上から順に令和2年2月，令和3年3月，令和4年2月の結果

表 ブロック解析による統計量

較差の平均が ± 1 mGal, 最大及び最小が ± 5 mGal, 標準偏差が 2 mGal を超過するものを着色

ブロック	クロスオーバー 点数	平均 [mGal]	最大 [mGal]	最小 [mGal]	標準偏差 [mGal]
全体	1482	0.2	6.7	-6.8	1.6
HD01	107	0.9	6.7	-2.5	1.6
HD02	88	0.1	4.9	-3.3	1.6
TH01	68	1.2	6.2	-2.6	1.6
TH02	123	-0.1	3.1	-3.3	1.3
TH03	12	1.4	5.4	-1.8	1.9
TH04	12	1.3	2.6	-0.5	0.9
KT01	100	0.4	5.2	-3.0	1.5
KT02	43	-0.3	3.5	-4.0	1.6
KT03	71	-0.3	3.6	-3.6	1.5
KT04	16	1.0	2.8	-1.2	1.3
KT05	15	-0.5	2.0	-2.1	1.2
KT06	10	0.2	1.4	-1.2	0.8
CB01	131	-0.3	3.5	-4.6	1.4
CB02	103	-0.5	4.2	-6.8	1.8
CB04	16	-0.7	5.0	-2.8	1.8
CG01	59	0.3	3.7	-2.8	1.2
CG02	39	0.0	6.3	-3.4	1.5
CG03	54	0.8	3.3	-2.0	1.0
CG06	26	1.0	6.2	-3.0	1.7
KY01	54	0.8	6.6	-5.3	1.9
KY02	80	-0.1	4.3	-4.5	1.5
KY03	81	-0.4	4.1	-4.4	1.6
KY04	45	1.1	5.9	-2.1	1.6
KY05	49	0.0	4.1	-3.0	1.7
OK01	54	0.6	3.4	-5.0	1.7
OK02	26	1.1	4.6	-3.5	2.1

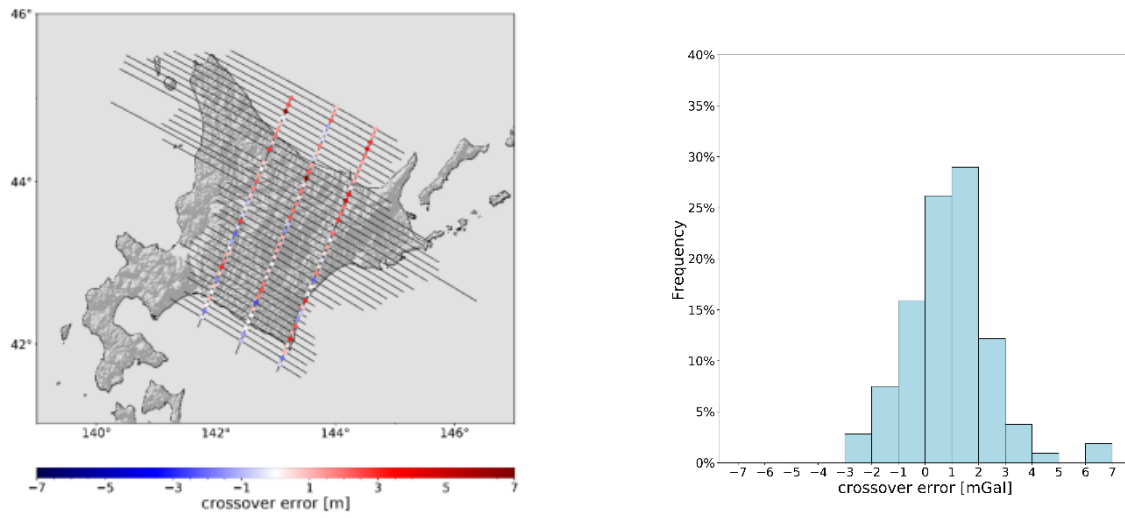


図-a HD01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

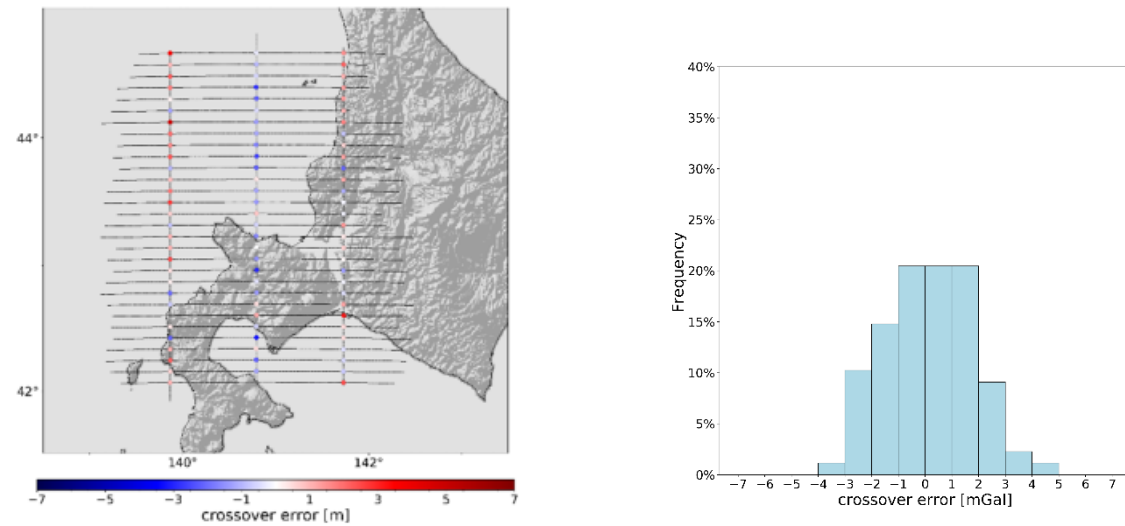


図-b HD02 ブロックのクロスオーバー較差と度数

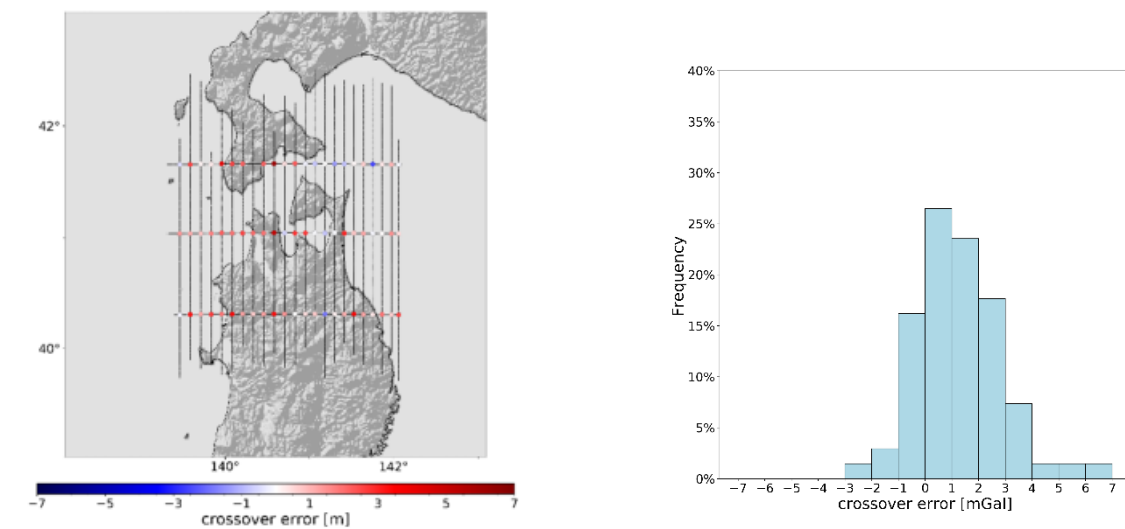


図-c TH01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

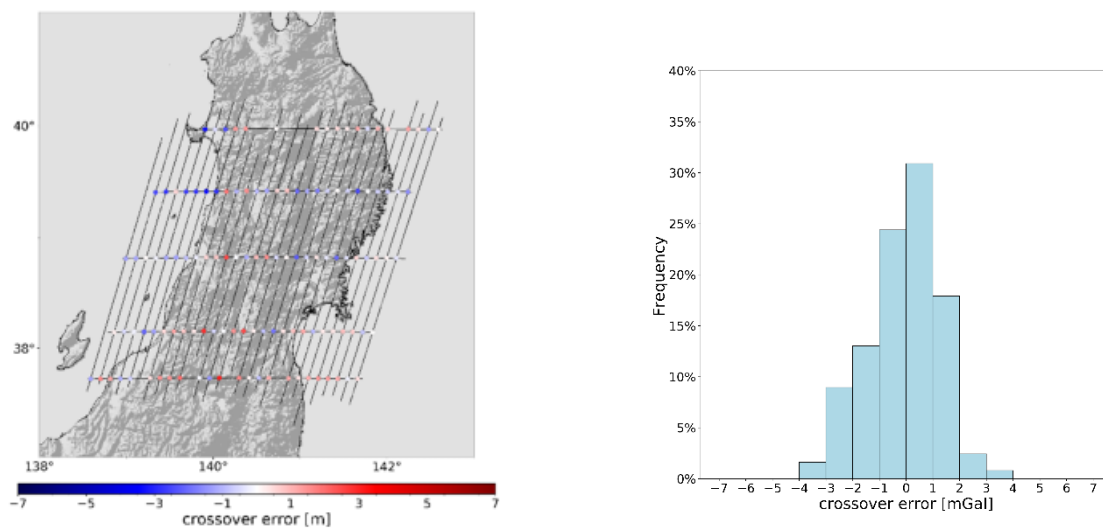


図-d TH02 ブロックのクロスオーバー較差と度数

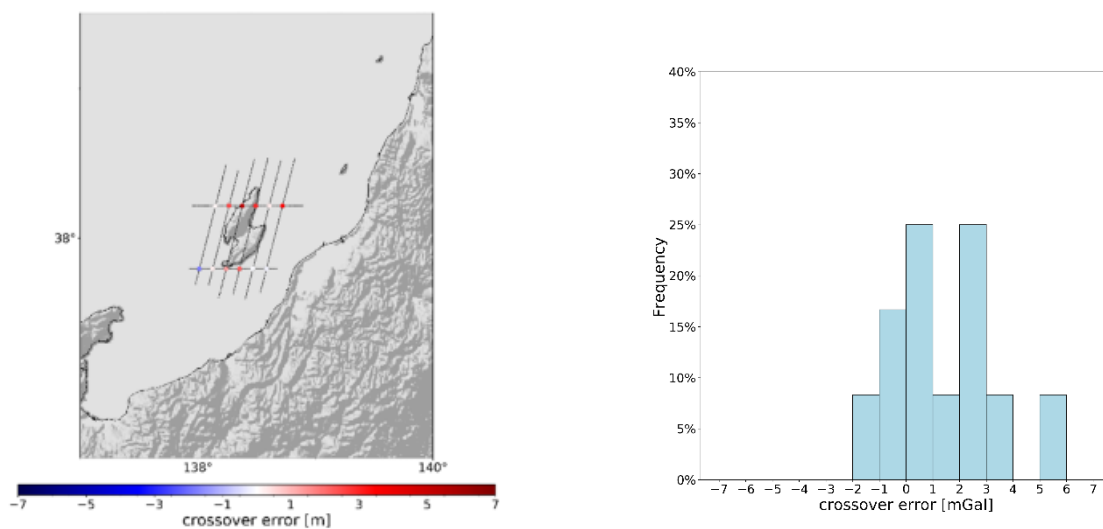


図-e TH03 ブロックのクロスオーバー較差と度数

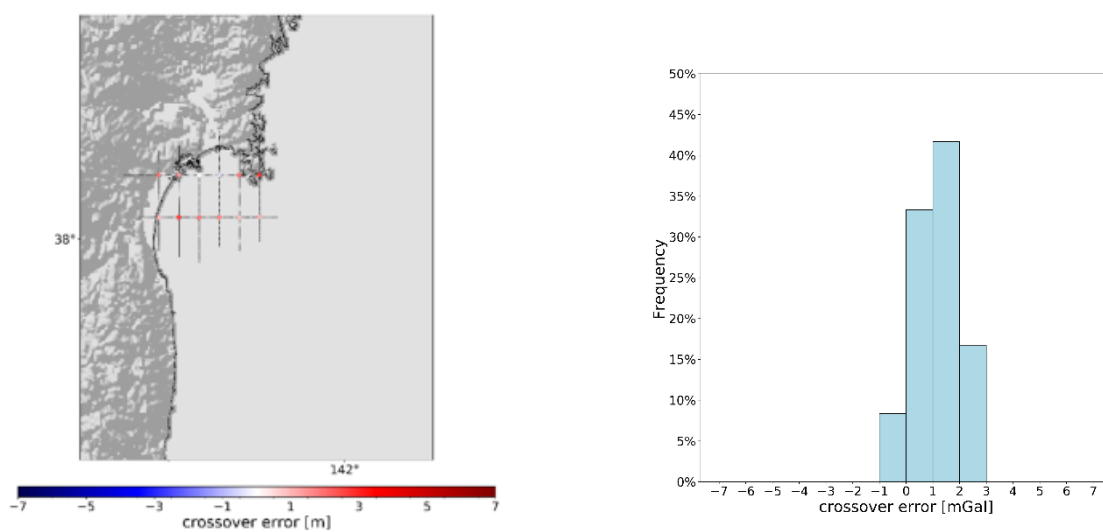


図-f TH04 ブロックのクロスオーバー較差と度数

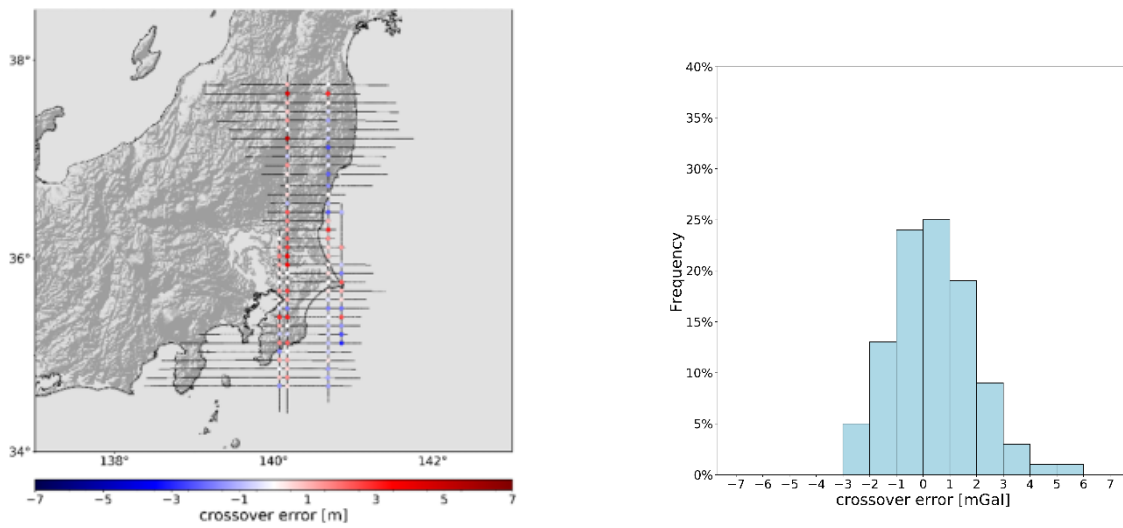


図-g KT01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

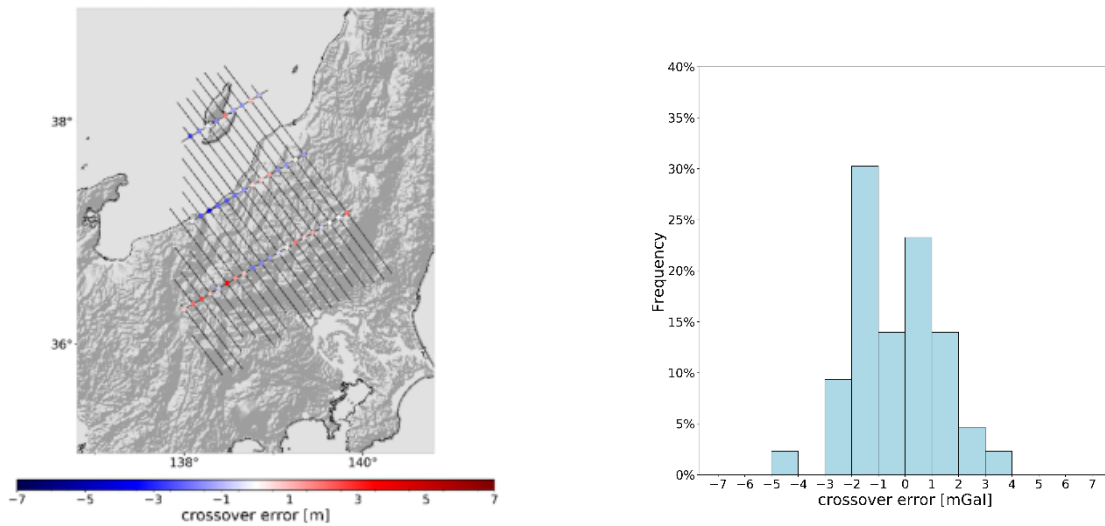


図-h KT02 ブロックのクロスオーバー較差と度数

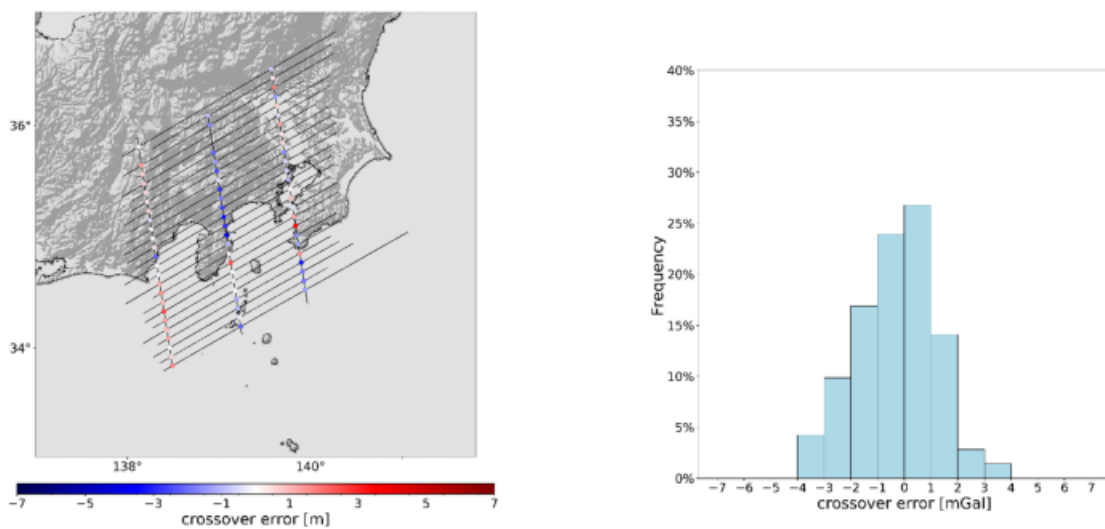


図-i KT03 ブロックのクロスオーバー較差と度数

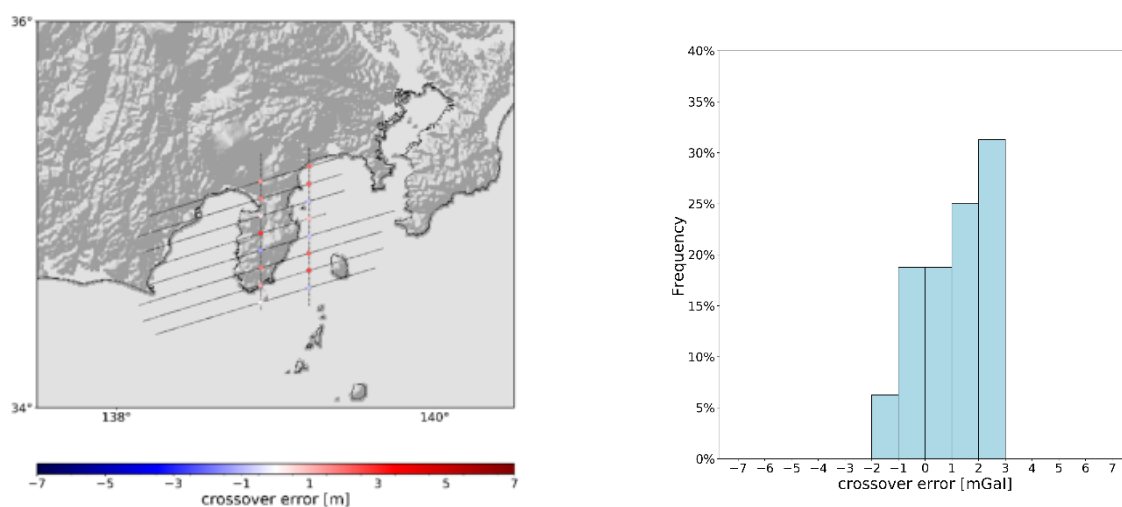


図-j KT04 ブロックのクロスオーバー較差と度数

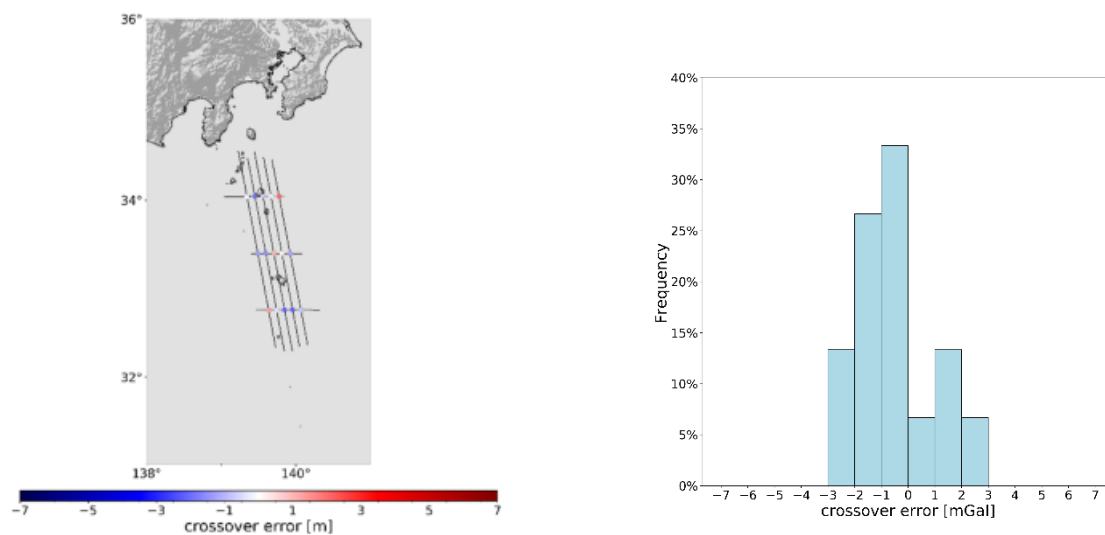


図-k KT05 ブロックのクロスオーバー較差と度数

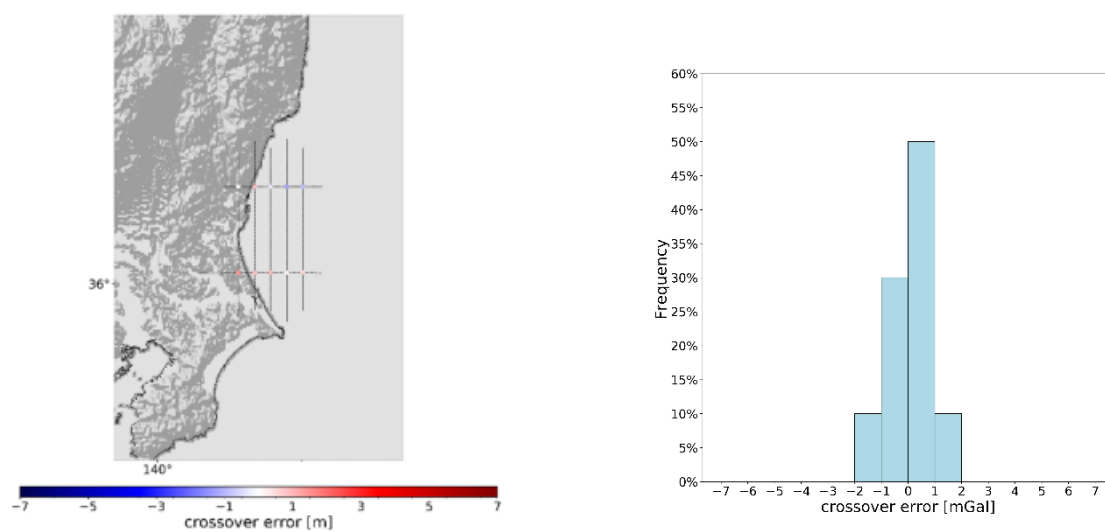


図-l KT06 ブロックのクロスオーバー較差と度数

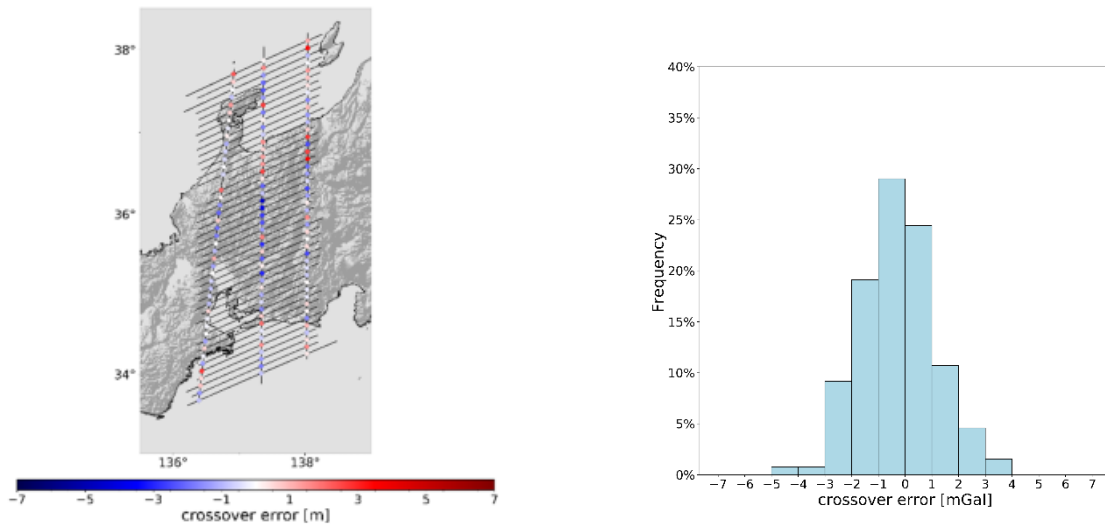


図-m CB01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

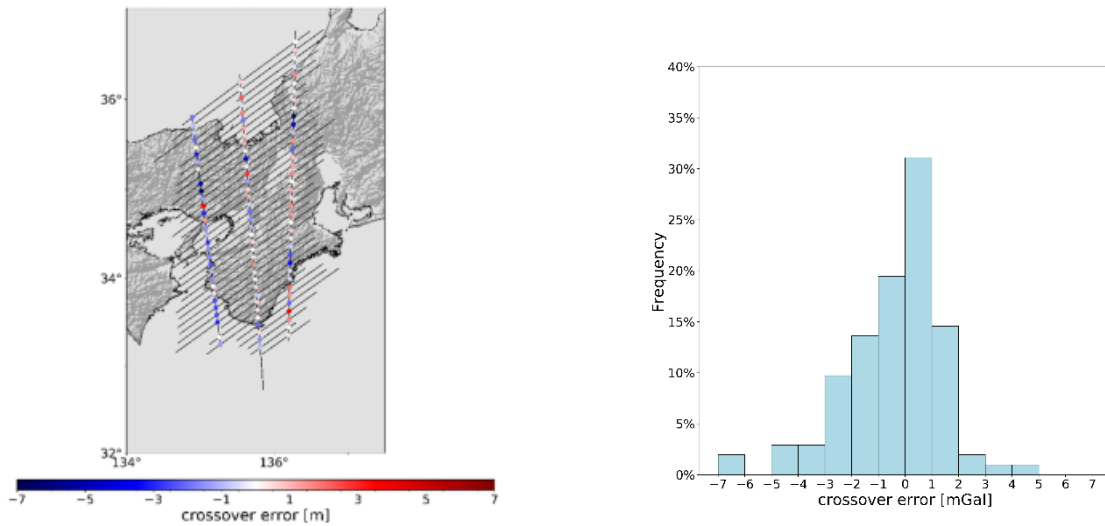


図-n CB02 ブロックのクロスオーバー較差と度数

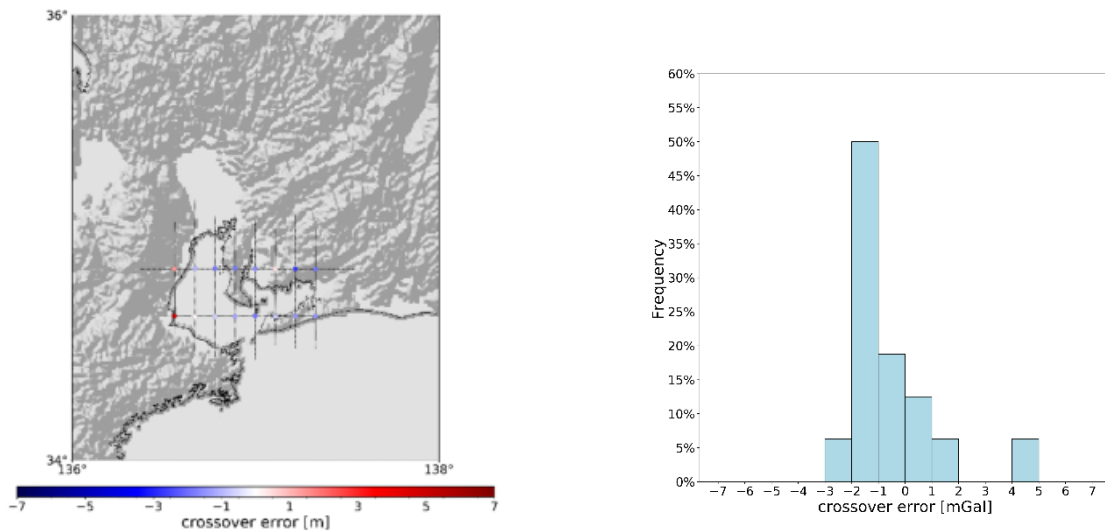


図-o CB04 ブロックのクロスオーバー較差と度数

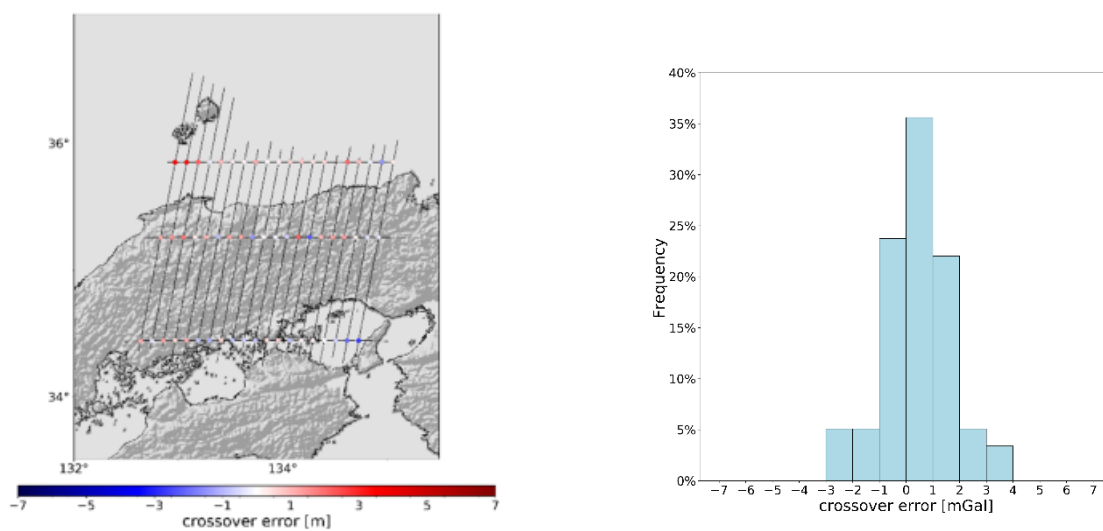


図-p CG01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

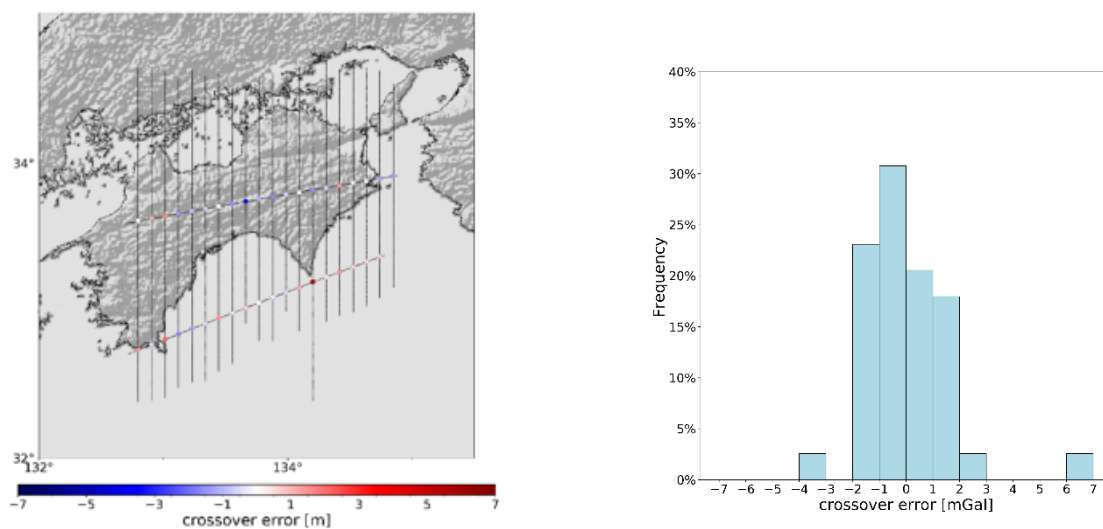


図-q CG02 ブロックのクロスオーバー較差と度数

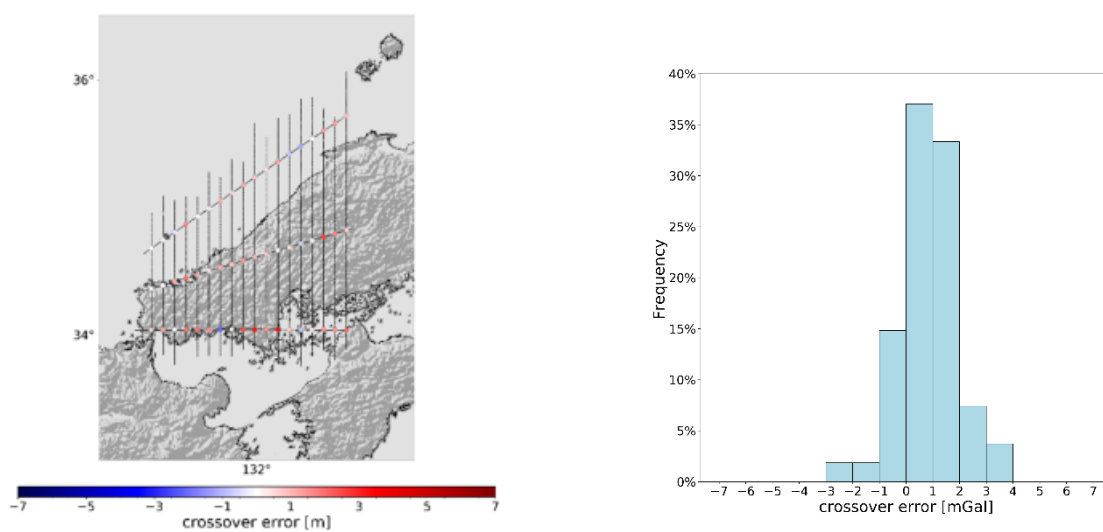


図-r CG03 ブロックのクロスオーバー較差と度数

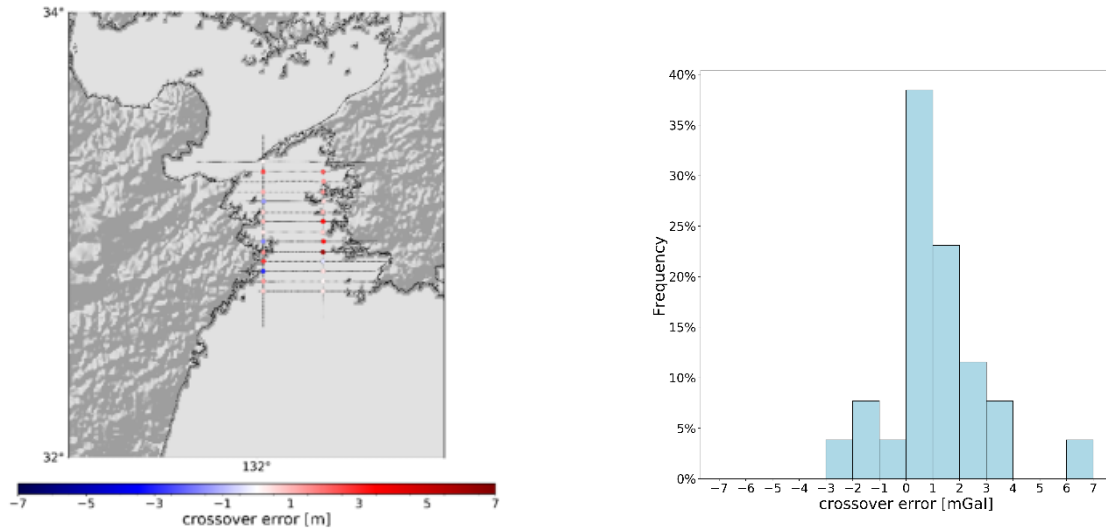


図-s CG06 ブロックのクロスオーバー較差と度数

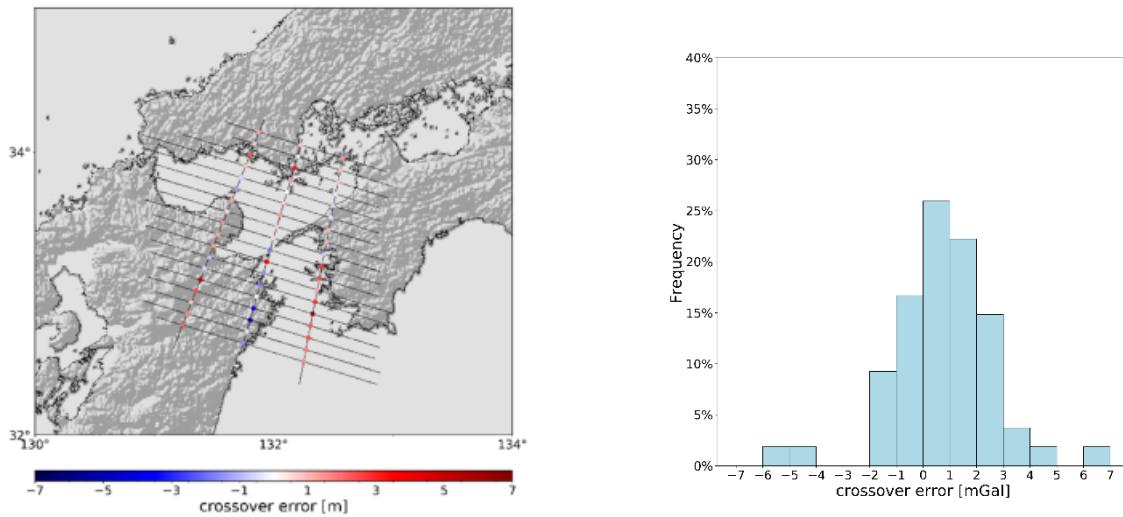


図-t KY01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

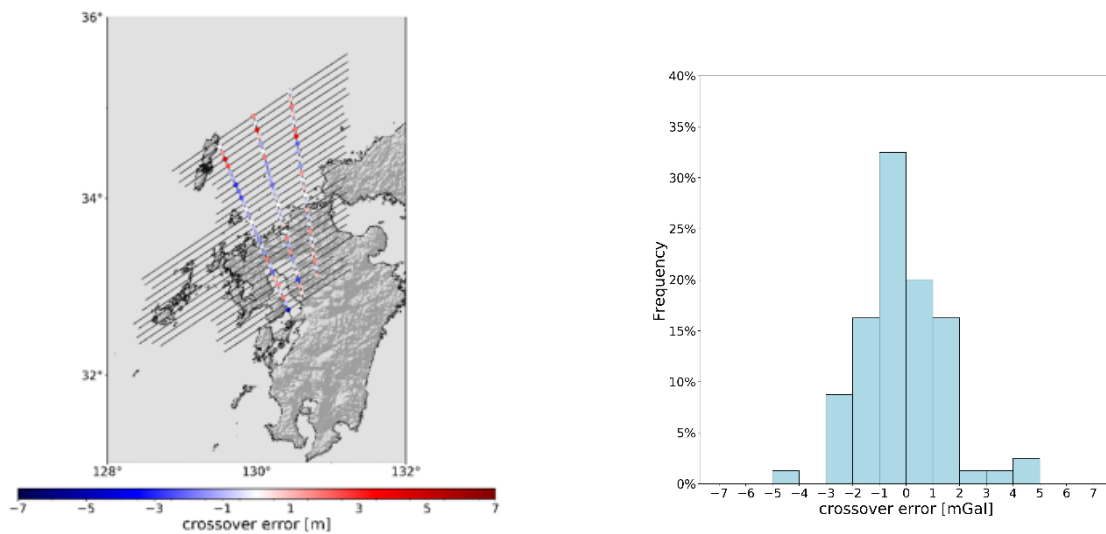


図-u KY02 ブロックのクロスオーバー較差と度数

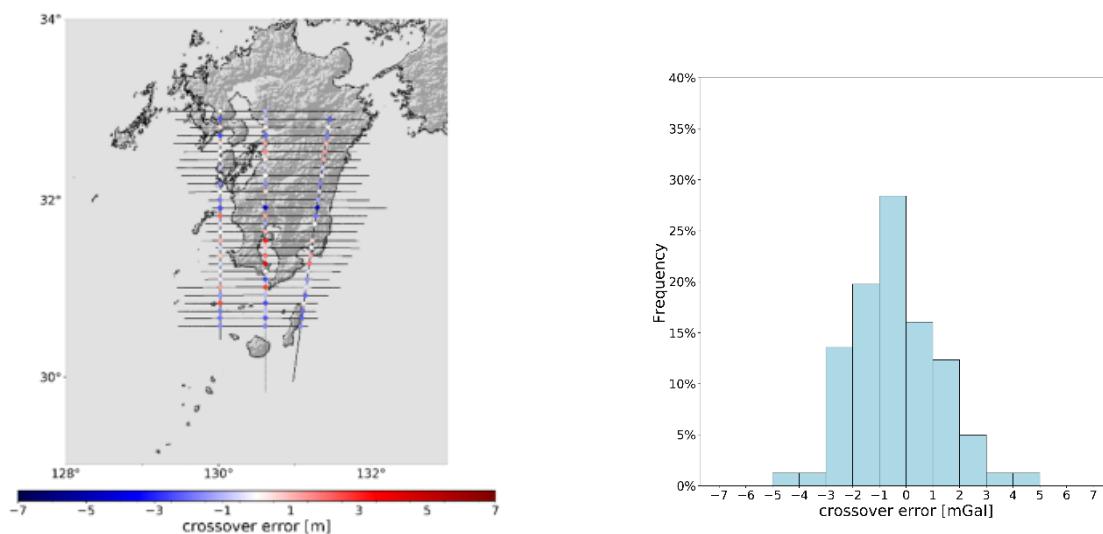


図-v KY03 ブロックのクロスオーバー較差と度数

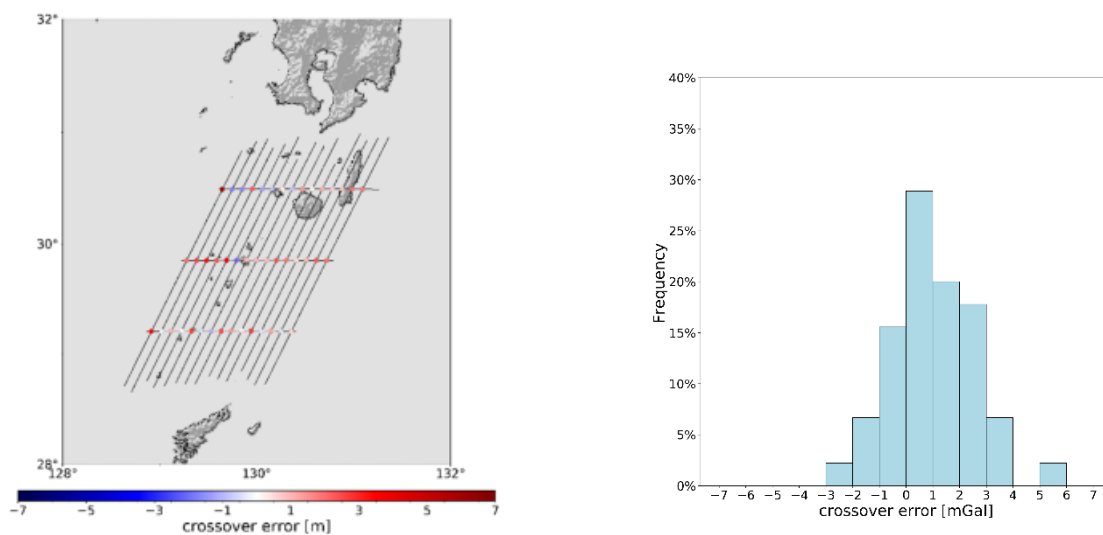


図-w KY04 ブロックのクロスオーバー較差と度数

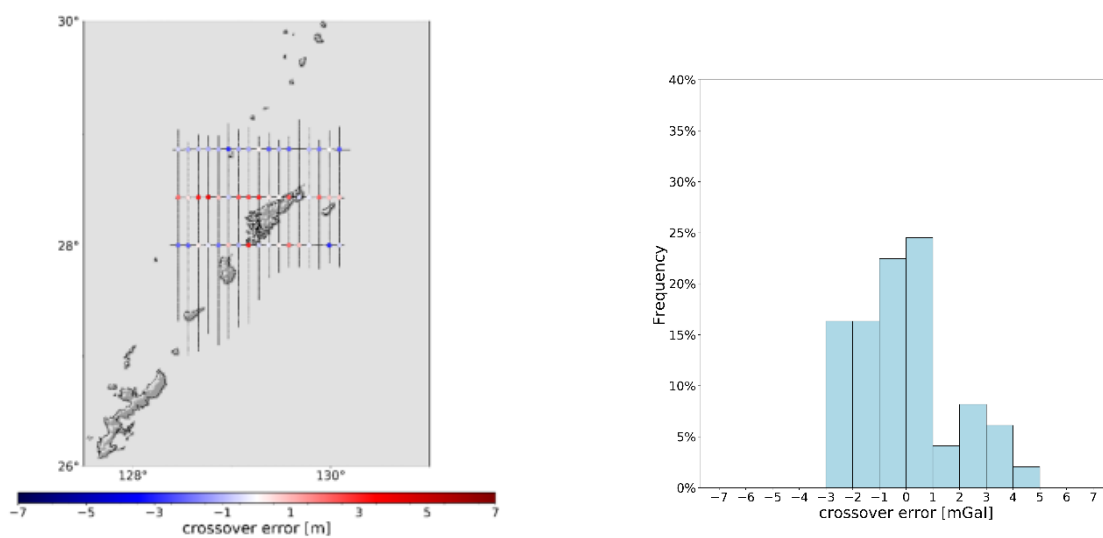


図-x KY05 ブロックのクロスオーバー較差と度数

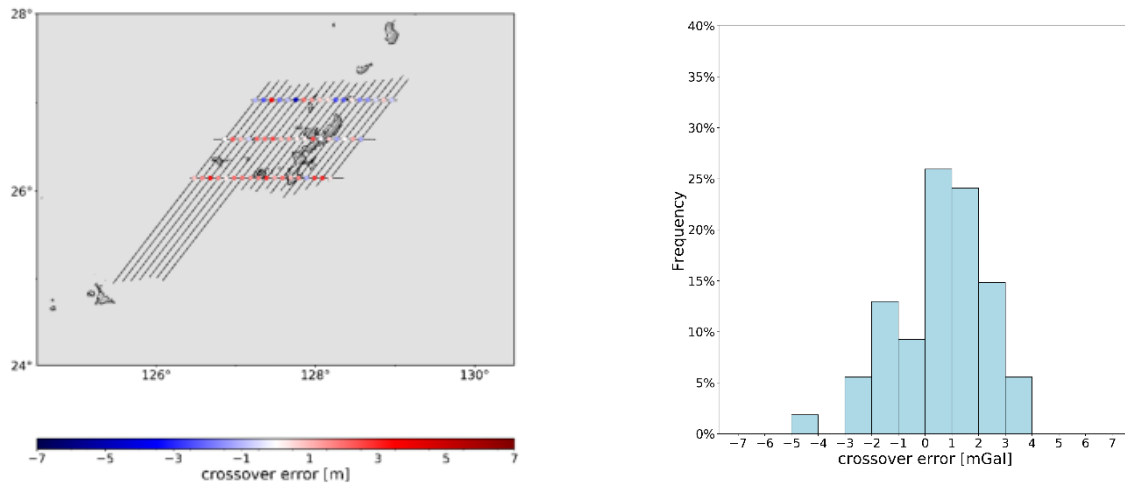


図-y OK01 ブロックのクロスオーバー較差と度数

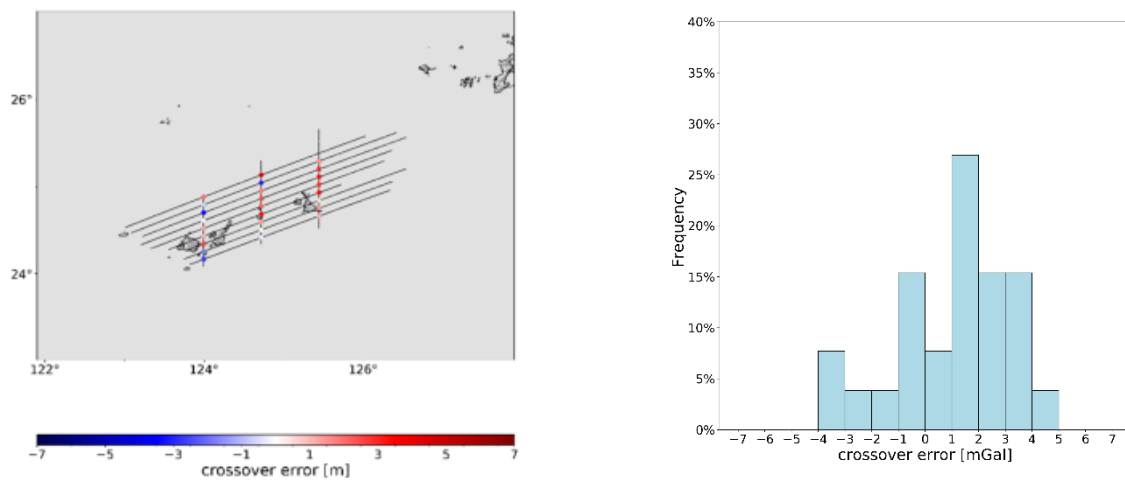


図-z OK02 ブロックのクロスオーバー較差と度数