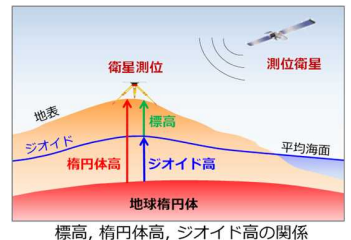


航空重力測量

国土交通省 国土地理院 測地部
物理測地課課長 越智 久巳一

高精度な測位社会の実現に向けて

衛星測位で標高がリアルタイムに利用できれば、
位置情報の多様な利用の拡大につながる
水準測量で標高を得る従来の仕組み に加えて



GNSS衛星測位 (楕円体高)
精密重カジオイド (標高の基準)

で標高が得られる仕組み

より便利に

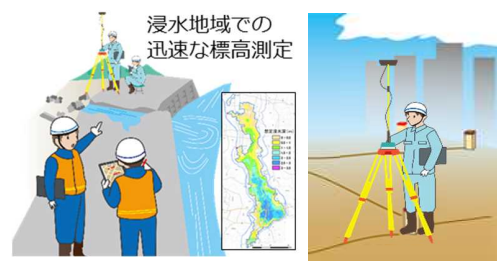
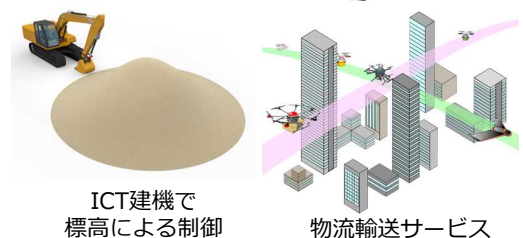
- ・衛星測位で誰でも標高を利用
- ・3次元位置を活用したサービス
- ・公共工事等での生産性向上

より強く

- ・迅速な復旧/復興作業の実現
- ・適切な津波避難情報等への活用

より安心に

- ・電子基準点を核に全国均質な標高
- ・地殻変動等の現況変化を適切に反映



迅速な復旧・復興への対応

効率的な測量

航空重力測量を取り入れたジオイド・モデル

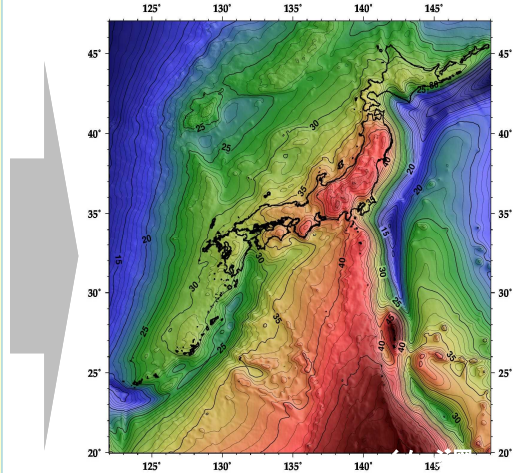
精密重力ジオイド・モデル



地上重力データ (JGSN2016)



航空重力データ

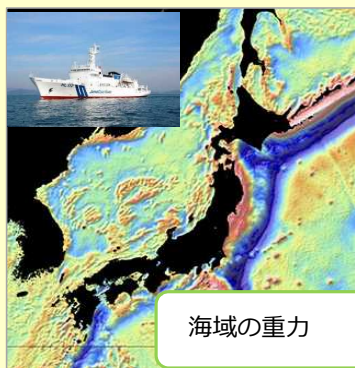


目標精度 3cm以下

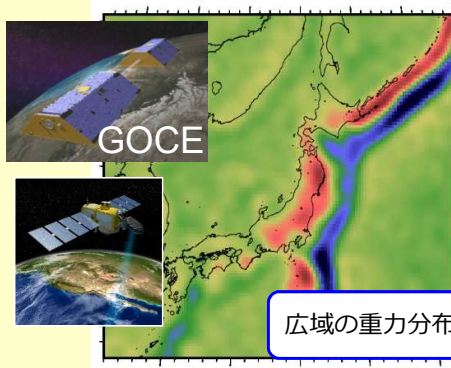
技術支援

地理地殻活動研究センターの (松尾主任研究官)

海上保安庁海洋情報部との連携
陸域と海域との整合



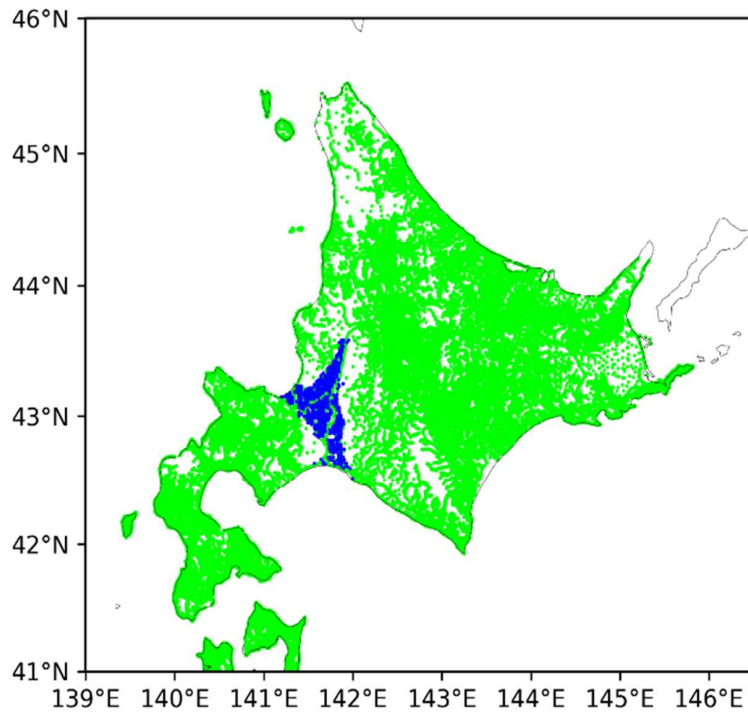
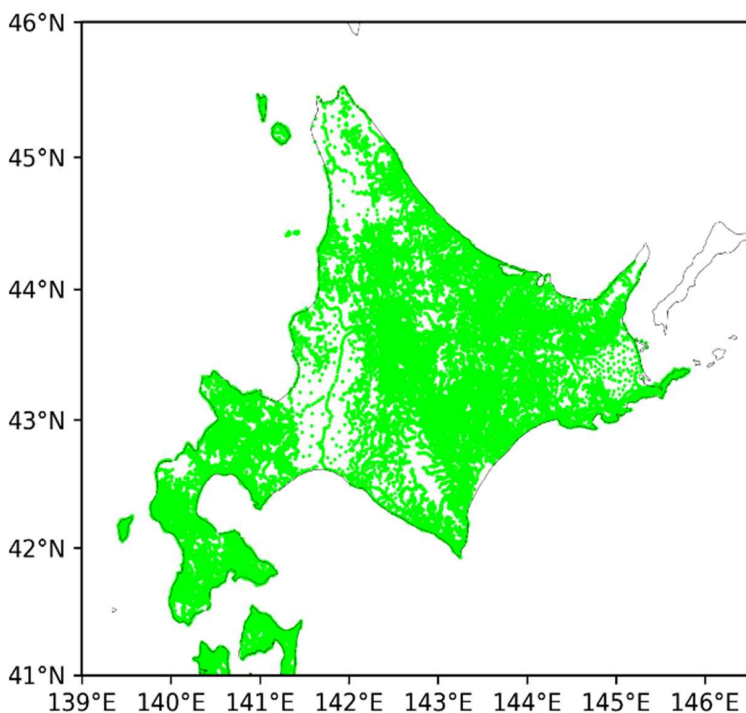
海上重力データ



広域の重力分布

衛星重力データ

北海道地方の地上重力測定



北海道地方の地上重力データ空白域と地上重力測定した範囲

地上重力測定は平野部において実施
490点(約2km間隔)

(凡例)

- : 既存の地上重力データ
- : 新たに測定した地上重力データ

※ 択捉島及び色丹島は地上重力データの空白域

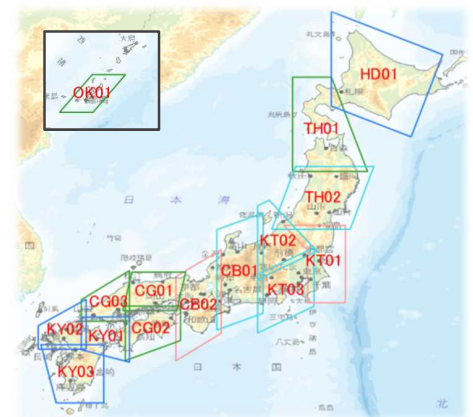
航空重力測量プロジェクト スケジュール

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
当初	航空重力計調達	関東中部	東北近畿	北海道西部 中国・四国	北海道東部 九州・沖縄	精密重力ジオイド計算
現在	航空重力計調達	関東中部	東北近畿	北海道西部 中国・四国	北海道東部 九州・沖縄	精密重力ジオイド計算

**ジオイドの精度は、
重力データの量と品質に依存**

【長所】 航空重力測量

- ・ 地上測定よりも効率的
- ・ 山岳部/沿岸海域も測定可能
- ・ 衛星測位による正確な位置情報
- ・ 海外の先行事例による知見



全国ブロック

4

航空重力測量 海外の事例

	アメリカ ¹⁾	ニュージーランド ²⁾	日本
実施年度	2012 ~	2013 ~ 2014	2019 ~
飛行高度	6,000 m を標準	1,000 m ~ 4,000 m	3,000 m or 5,000m
飛行速度	約 400 km/h (600km/h)	240 km/h	300 km/h
主測線	10 km	10 km	10 km
副測線	60km ~ 80 km	50 km	50 km ~ 100km

1) Dan Martin(2018) Update on GRAV-D and Progress toward a new vertical Datum

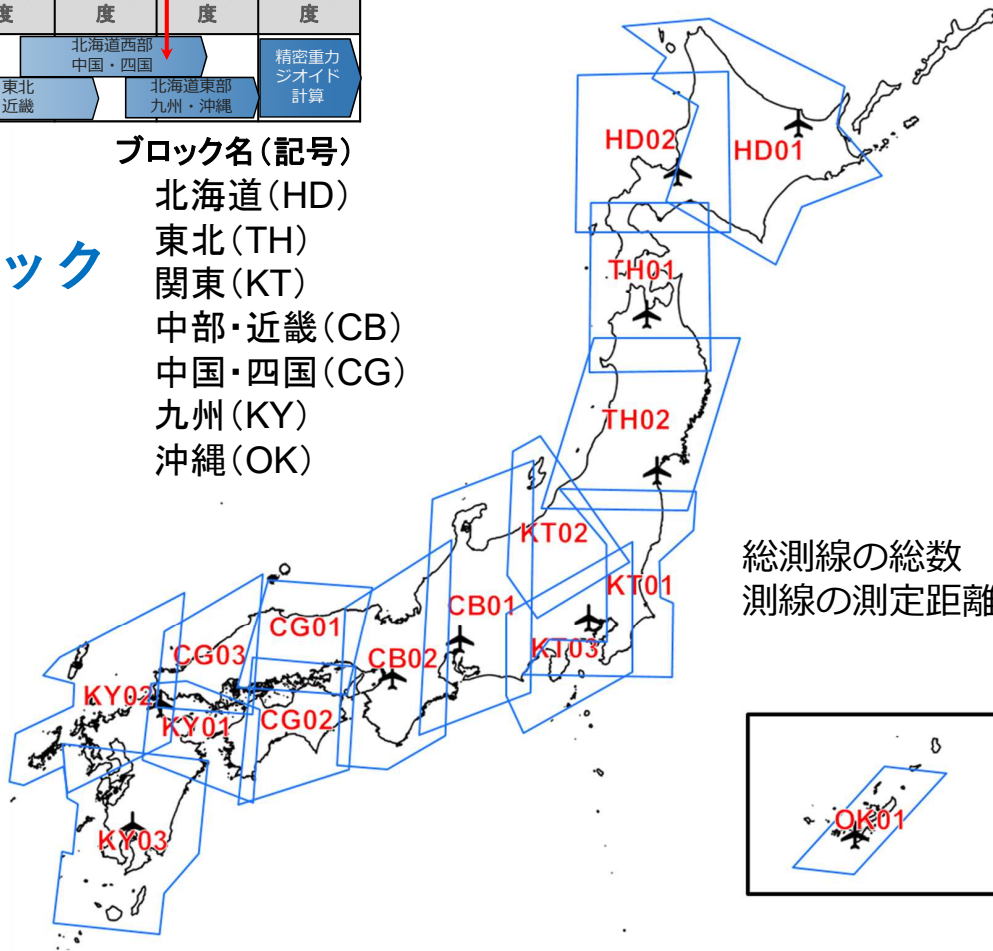
2) Nic Donnelly(2015) Airbone Gravity an Improved Vertical Datum

2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
航空重力計調達	関東中部	東北近畿	北海道西部 中国・四国	北海道東部 九州・沖縄	精密重力ジオイド計算

16ブロック

ブロック名(記号)

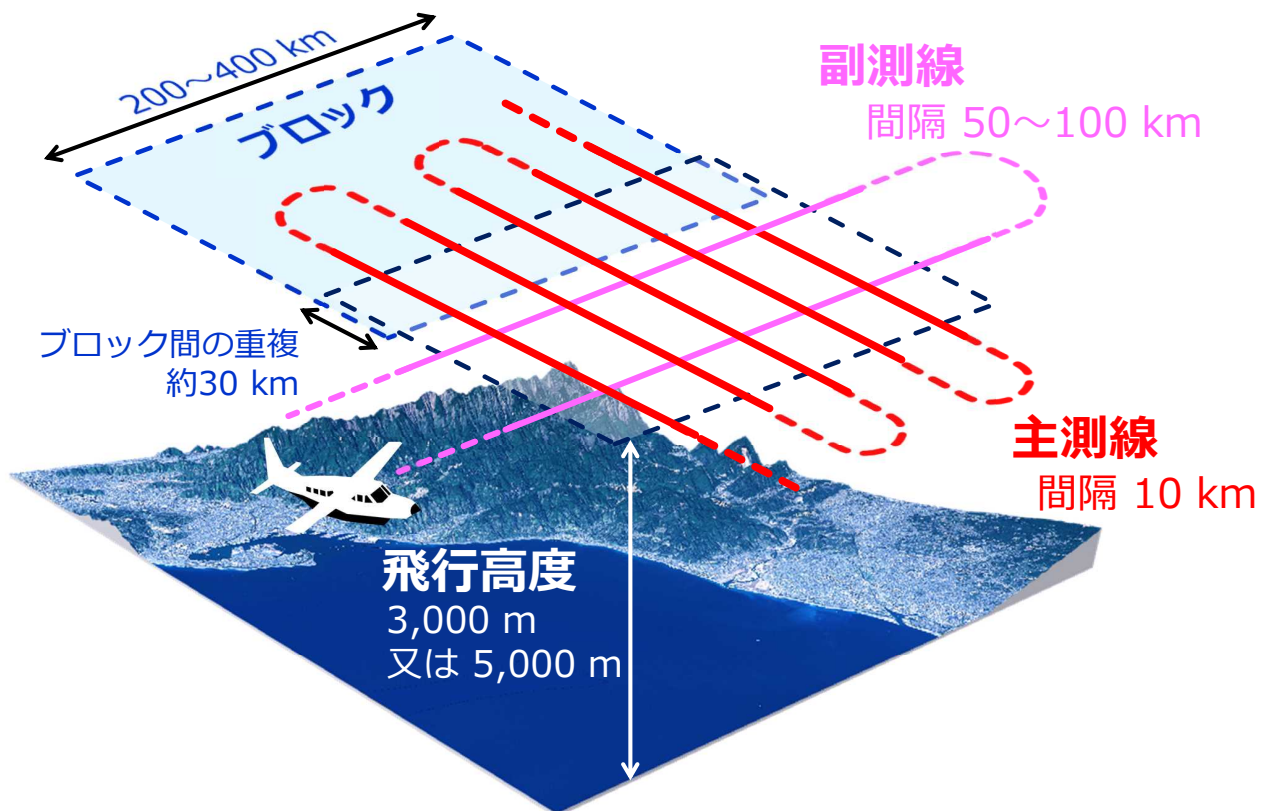
- 北海道(HD)
- 東北(TH)
- 関東(KT)
- 中部・近畿(CB)
- 中国・四国(CG)
- 九州(KY)
- 沖縄(OK)



総測線の総数 : 478本
測線の測定距離 : 108,018km

日本の航空重力測量の計測条件

航空機の速度300km/h程度 (初期時250km/h程度)



1) 航空重力データをジオイドモデルを計算の際で、モデルの長波長領域に航空重力データをフィットしやすくするため、測線長は長く設計。

- ⇒最短測線長：約92km (唯一の100km未満、CB02)
- 最長測線長：約547km (HD01)
- 平均測線長：約264km

2) 海上の既存重力データとの整合性を確認するため、ブロック毎に1本以上の測線で沿岸から海上へ100kmの測線を設計。

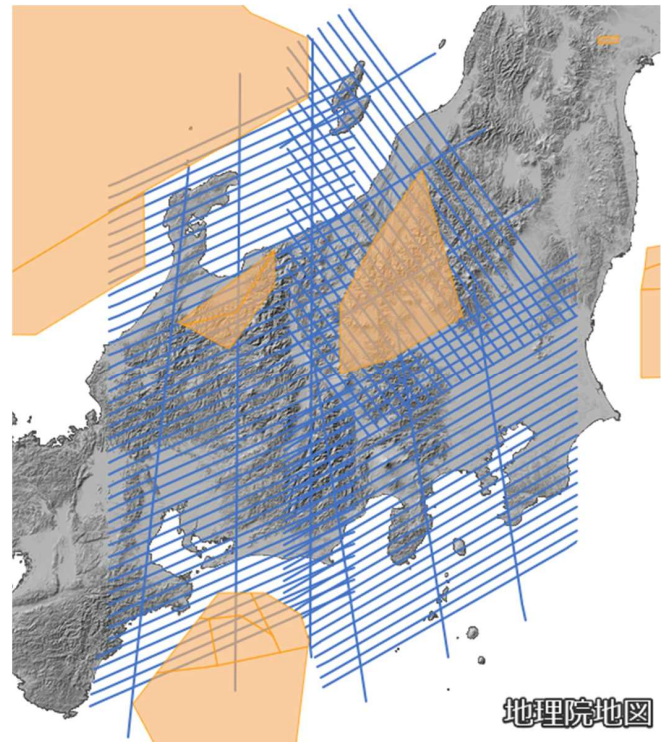
その他は沿岸から40km延長。

3) 主測線はジオイドの傾斜になるべく直交し、隣接ブロックとの重複を30km程度確保。

4) ブロック内の主測線及び副測線飛行高度は揃える。
(3,000m・5,000m)

5) 飛行制限エリアの測定は、基本的に土日の測定となるため、測線数が少なくなるようにし、また1つの測線が複数の飛行制限エリアにかからないよう設計する。

例：KT02,KT03,CB01



地理院地図

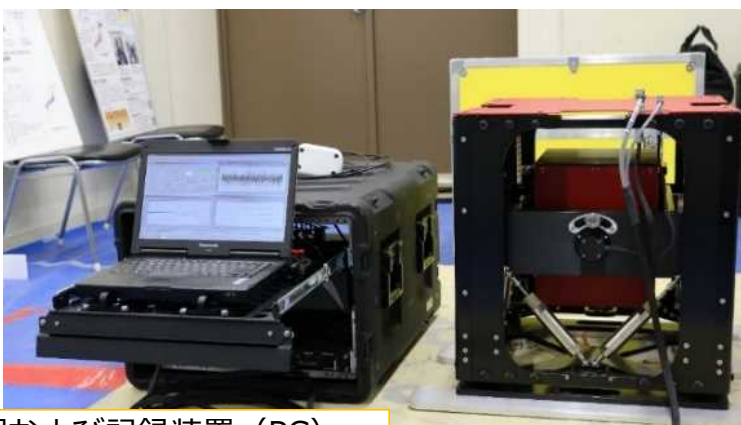
(凡例)

- 測線 (主測線、副測線)
- 飛行制限エリア

主要な機器 (航空重力計)

Micro-g LaCoste社製 TAGS-7 Turnkey Airborne Gravity System (タグス7)

重力の変化を測定する重力計



制御および記録装置 (PC)
GNSS受信機
UPS

航空重力計の構成

データ取得間隔: 20Hz

センサー部
センサーフレーム
ジンバル
各種ダンパー
電源
センサーボックス
(恒温槽)
重力センサー
加速度センサー
ジャイロ스코ープ

サイズ 59 × 53 × 56 cm
重さ 73 kg
精度 0.75 mGal (ミリガル)

$9.8 \text{ m/s}^2 = 980,000 \text{ mGal}$



航空重力計のセンサー部

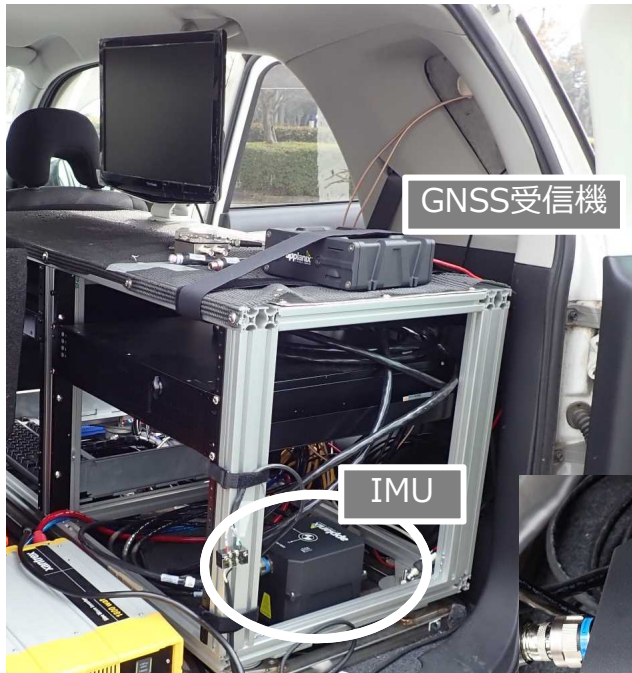
POS AV610

IMU データ取得間隔 200Hz

GNSS データ出力レート 50Hz



(役割) 航空機の位置と姿勢情報取得

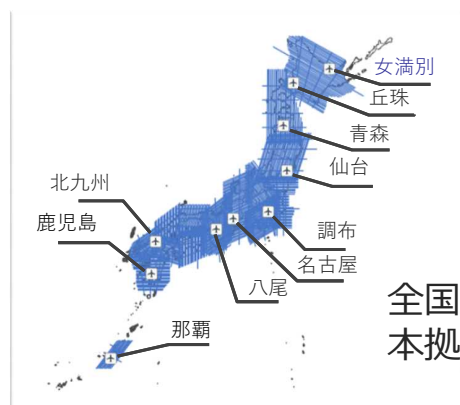


自動車に載せて動作確認

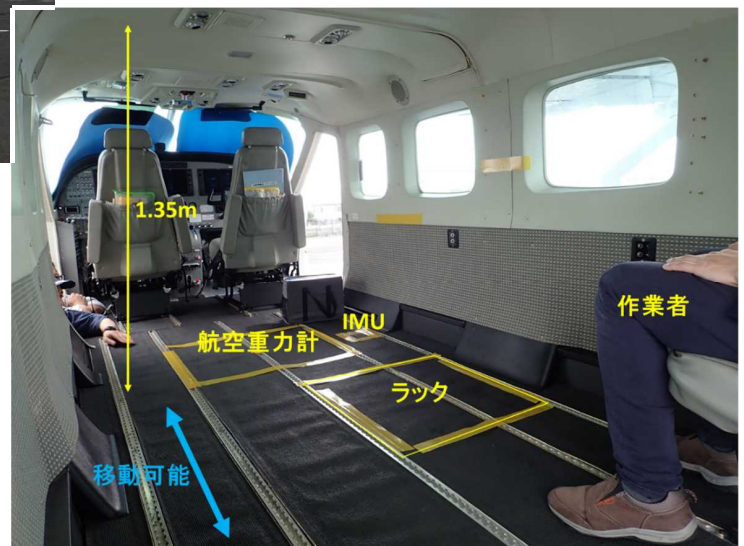
10

主要な機器 (航空機) と重力計等の配置

調布飛行場



全国10カ所を拠点
本拠地は調布飛行場



機内における機器の配置

11



飛行場重力点



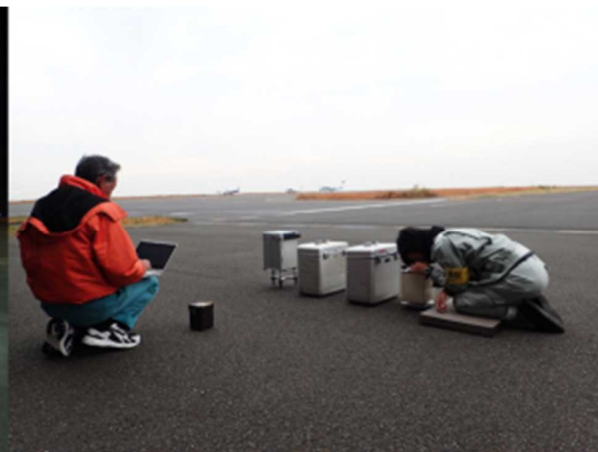
飛行場重力点(調布)

機内の航空重力計の位置を、飛行場重力点に合わせる

飛行場重力点の設置(観測)



重力の鉛直勾配を測定している風景



相対重力計で測定している風景

重力測定の測定風景

各飛行場に、航空重力測量の起点となる重力点を設置しています。ほかの航空機の離着陸による振動や風圧が重力の測定に影響を与えないように、設置作業は飛行場を使用していない夜間などに行います。

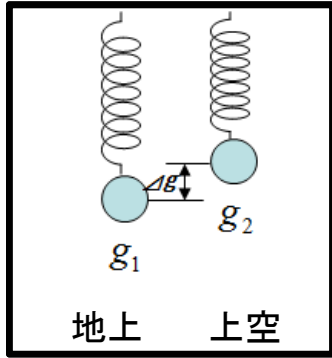
飛行場重力点の重力値は、近隣の重力点から相対重力計を用いてを与えている。

重力の鉛直勾配は飛行場重力点の重力値を、機内の航空重力計の位置に化成するため。

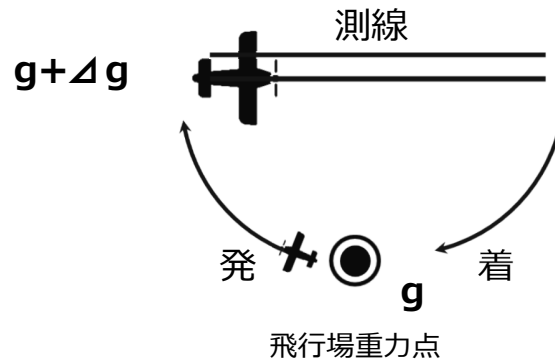


- ・ 国内の測量では初の試み
- ・ 航空機に**相対重力計**を搭載し上空から重力を計測
- ・ 計測方法はアメリカ（NGS）を参考

相対重力計の原理



航空重力測定のイメージ

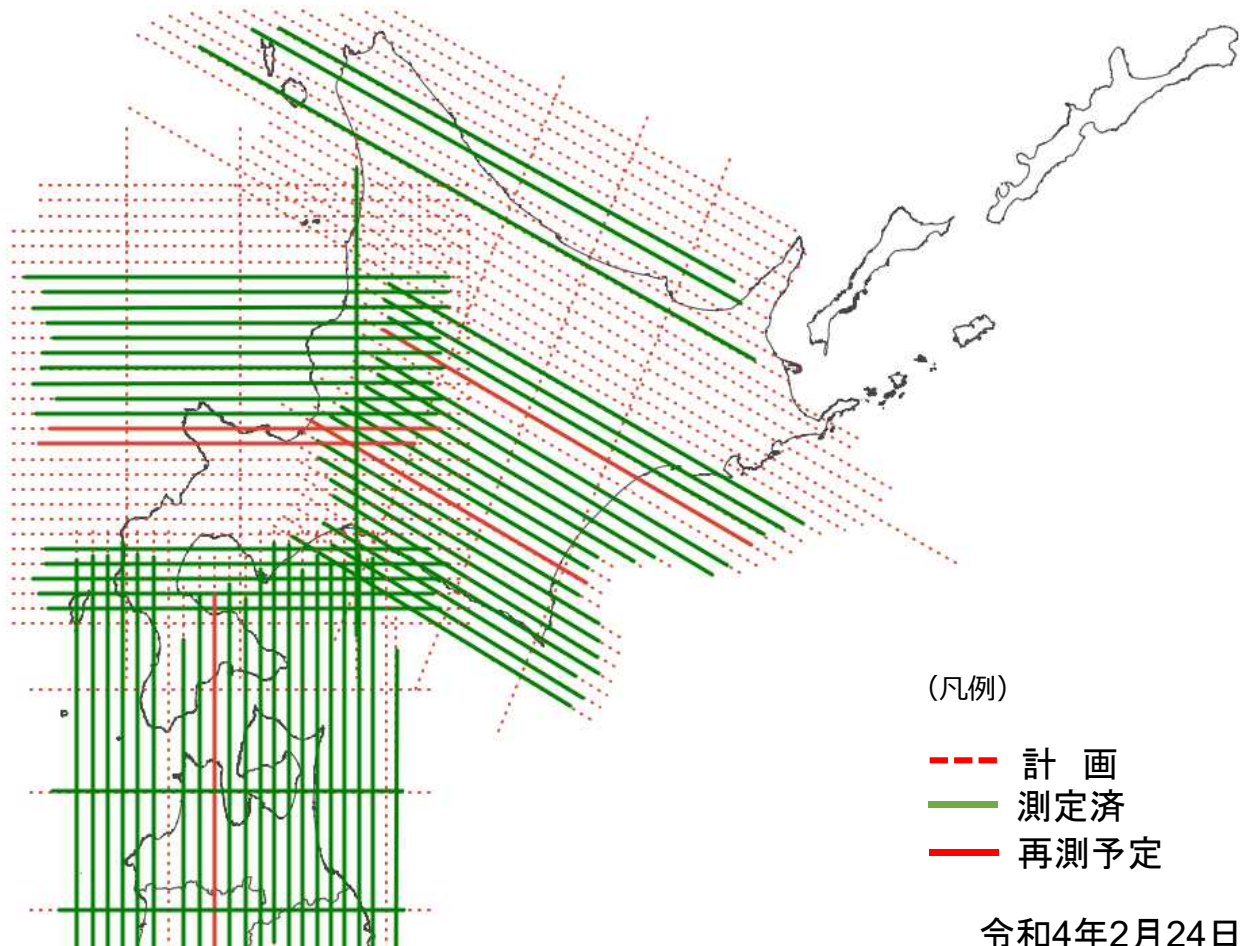


測線の重力値は、
地上の飛行場重力点の重力値 (g) に
地上と上空の重力の差 (Δg)から求める

バネの伸びから重力差を測定

ばねの弾性性質や電気回路特性
による経年変化（ドリフト量）
の補正が必要

北海道 ブロック



(凡例)

- 計画
- 測定済
- 再測予定

Webサイト「Windy」を使用

飛行高度3,000m 風の速さ：30kt 以下（目安）

北海道地方 14kt(緑色)
東北地方 30kt(茶色)

2022/2/14 14:30
高度3,000mの風と雲

16

上空での機内の様子



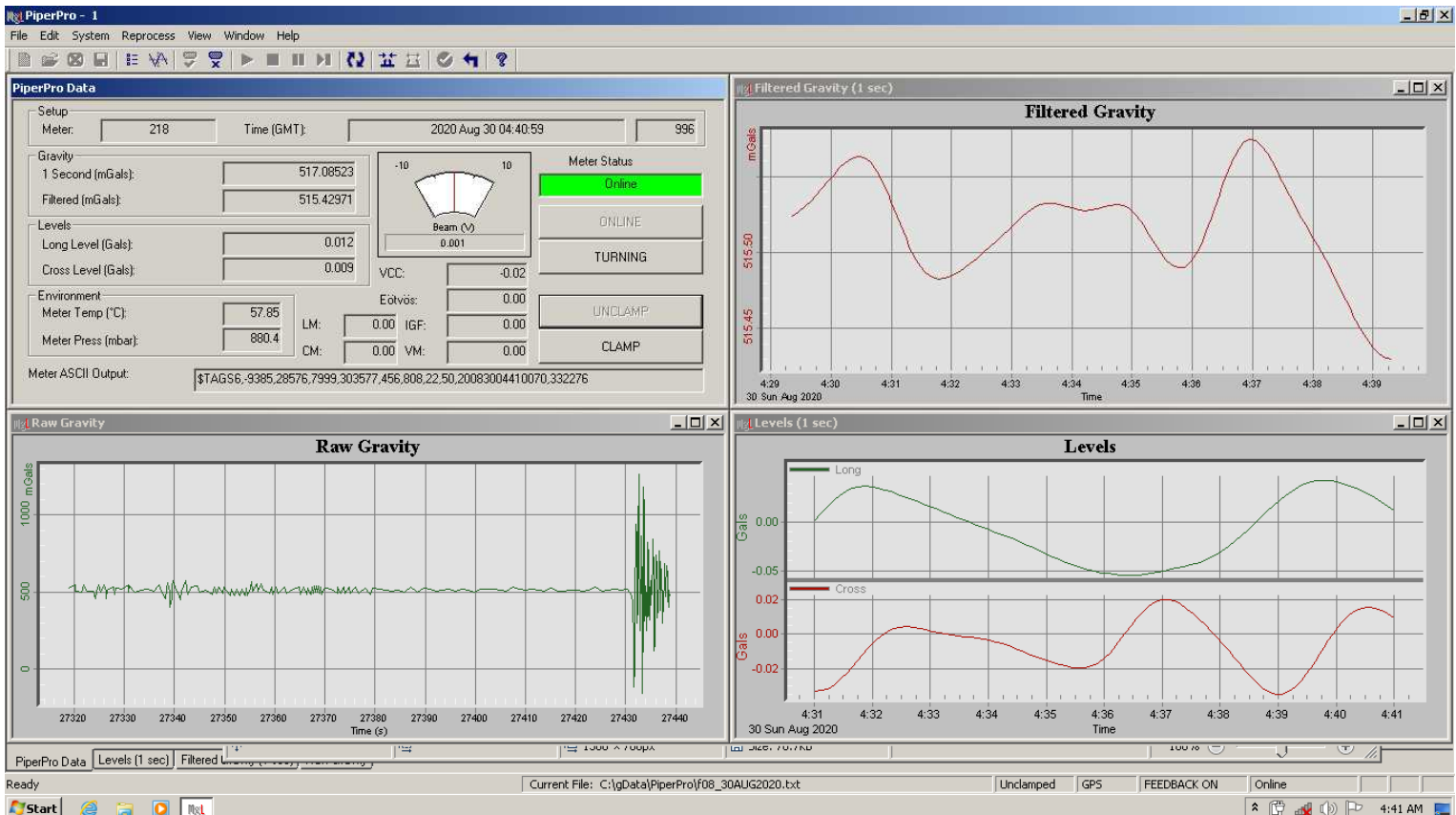
機内の風景



測定時の作業風景

- 1)パイロットと測定者が航空機に搭乗します。
- 2)測定者は測定する測線をパイロットに指示し、測定機器の操作を行います。
- 3)測定中は機器の状態を定期的に確認し、体感した航空機の揺れを時刻とともに記録します。
- 4)搭乗者は上空3,000mを超えると酸素マスクをつけて作業しています。

17



PiperPro (TAGS7専用の重力測定ソフト)
飛行場重力点でキャリブレーション時の表示

飛行記録簿

基本情報

Page (1 / 3) 航空重力測量 飛行記録簿 飛行日: 2020年 8月 30日

Survey: NG20-1 Block: C801 (I#): 08 起点空港: 名古屋

観測番号①往: 502 観測番号②往: 501 観測番号③往: 観測番号④往: 観測番号⑤往:

観測者: OO パイロット: OO 機体名: Textron Aviation 580

ファイル名: 航空重力計: F08_30AUG2020 .lxt 機器名: TAGS-7

観測番号①復: 観測番号②復: 観測番号③復: 観測番号④復: 観測番号⑤復:

静止観測情報 「※Capは、両面キャッチャーから転記」

飛行前		飛行後	
年月日 (UTC) ※cap	2020. 8. 29	年月日 (UTC) ※cap	2020. 8. 30
校正時刻 (UTC) ※cap	21 : 49 : 01	校正時刻 (UTC) ※cap	4 : 50 : 59
校正重力値 (mGal) ※cap	515.42972	校正重力値 (mGal) ※cap	515.42971
飛行場重力点名	N491	飛行場重力点名	N491
重力計温度 ※cap	57.85	重力計温度 ※cap	57.85
白走開始時刻 (UTC)	22 : 17	駐機時刻 (UTC)	3 : 25
離陸時刻 (UTC)	22 : 21	着陸時刻 (UTC)	3 : 22

確認の項目

離陸前
 機体が駐機場 (調布のみウイスキー) から移動した時刻 (UTC) を白走開始時刻に記録 ※観測時
 機体が離陸した時刻 (UTC) を記録 ※観測時

離陸後
 離陸後、機長からPCの引き出し許可の連絡後、PCを引き出す。IMU用PCも開いてモニタリング。
 機長から機体安定の通知後、「UNCLAMP」に設定。
 移動中は、直線飛行時は「ONLINE」、旋回は「TURNING」に適宜設定。
 測定高度到達時刻を記録。

観測手順
 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。
 【即時】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ログシートにメモ
 予備バッテリーの定期確認 (臭い、煙等)。
 【5分毎】揺れの状況と時刻ともに記録。
 【ブレイク時】機長に観測終了までの残距離 (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 (観測終了) 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。
 次の観測に入るまでは観測手順を繰り返す。移動中は、直線飛行時は「ONLINE」、旋回は「TURNING」に適宜設定。

観測終了時
 移動中は、直線飛行時は「ONLINE」、旋回は「TURNING」に適宜設定。
 測定高度離脱時刻を記録。降下後は「CLAMP」に設定し、機長に報告。
 PCを電源から引き出し、IMU用PCも閉じ、椅子の下へ。

着陸後
 機体が駐機場 (調布のみウイスキー) に駐機した時刻 (UTC) を記録 ※観測時
 機体が駐機場 (調布のみウイスキー) に駐機した時刻 (UTC) を記録 ※観測時

飛行時のイベント ※方位は北を360°として時計回りの角度で (ex. 東=90)

観測番号	進行方向方位 (度)	開始高度 (ft)	開始時刻 (UTC)	中点時刻 (UTC)	終点時刻 (UTC)	対地速度 (kt)	風速 (kt)	ブレイク残距離 (nm) (+17.6nm)	揺れ 0.5	特記事項
			22:27:08							unclamp
5200			22:44:??			177				5000m 到達
CB01502			23:7:40						0	online
N	✓		23:9:10	171	102	6			0	
15490			24:??						0	
			24:??						0	
			26:34						1	30秒程度、機長専用機
			28:30						1	40秒程度
			29:??						0	

Page (1 / 3) 航空重力測量 飛行記録簿 飛行日: 2020年 8月 30日

Survey: NG20-1 Block: C801 (I#): 08 起点空港: 名古屋

観測番号①往: 502 観測番号②往: 501 観測番号③往: 観測番号④往: 観測番号⑤往:

観測者: OO パイロット: OO 機体名: Textron Aviation 580

ファイル名: 航空重力計: F08_30AUG2020 .lxt 機器名: TAGS-7

観測番号①復: 観測番号②復: 観測番号③復: 観測番号④復: 観測番号⑤復:

静止観測情報 「※Capは、両面キャッチャーから転記」

飛行前		飛行後	
年月日 (UTC) ※cap	2020. 8. 29	年月日 (UTC) ※cap	2020. 8. 30
校正時刻 (UTC) ※cap	21 : 49 : 01	校正時刻 (UTC) ※cap	4 : 50 : 59
校正重力値 (mGal) ※cap	515.42972	校正重力値 (mGal) ※cap	515.42971
飛行場重力点名	N491	飛行場重力点名	N491
重力計温度 ※cap	57.85	重力計温度 ※cap	57.85
白走開始時刻 (UTC)	22 : 17	駐機時刻 (UTC)	3 : 25
離陸時刻 (UTC)	22 : 21	着陸時刻 (UTC)	3 : 22

確認の項目
離陸前、離陸後、観測手順、観測終了時、着陸後

飛行時のイベント ※方位は北を360°として時計回りの角度で (ex. 東=90)

観測番号	進行方向方位 (度)	開始高度 (ft)	開始時刻 (UTC)	中点時刻 (UTC)	終点時刻 (UTC)	対地速度 (kt)	風速 (kt)	ブレイク残距離 (nm) (+17.6nm)	揺れ 0.5	特記事項
			22:27:08							unclamp
5200			22:44:??			177				5000m 到達
CB01502			23:7:40						0	online
N	✓		23:9:10	171	102	6			0	
15490			24:??						0	
			24:??						0	
			26:34						1	30秒程度、機長専用機
			28:30						1	40秒程度
			29:??						0	

何もなくても、基本的に5分ごとに揺れなどを記録する

Webサイト「flightradar24」を使用

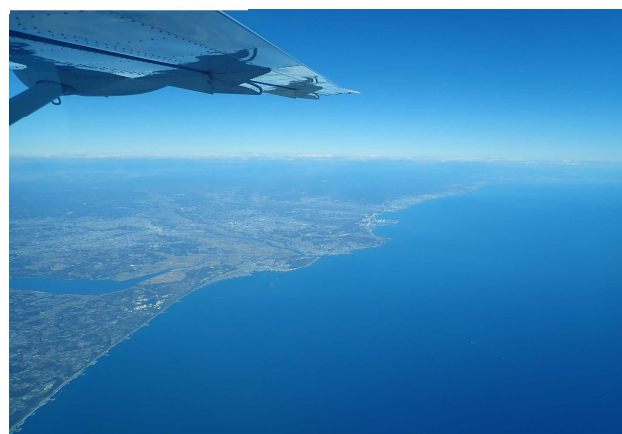
20

航空重力計の検定（検定線）



2月～3月頃

- 1) 航空重力計（TAGS7）の動作確認
- 2) 1年に1回、検定線上で測定
- 3) 検定線の長さは約120km程度

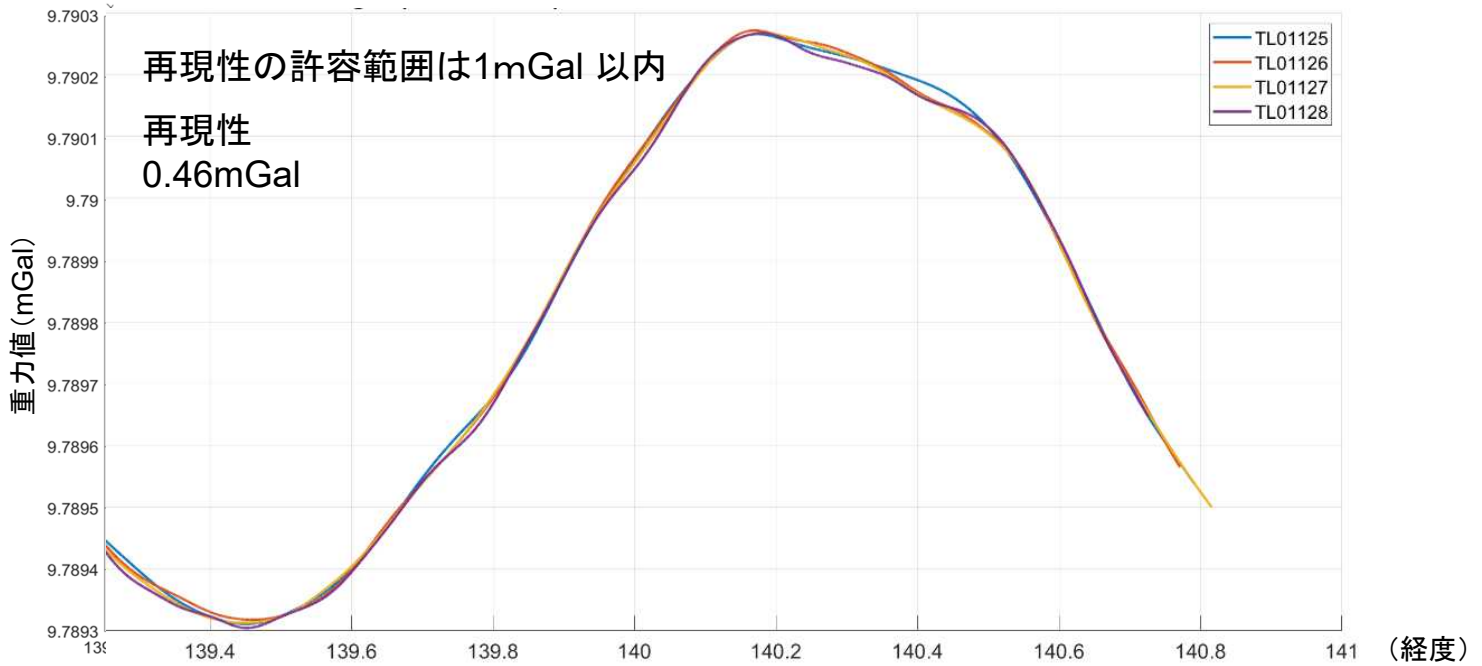


2022年 2月 9日 (高度3000m)

測定したデータ解析ソフトウェア:NGSから提供されたソフトウェア

1目盛:10mGal

同一の高度の重力値に化成



22

測定した測線の評価 (例 HD01124)

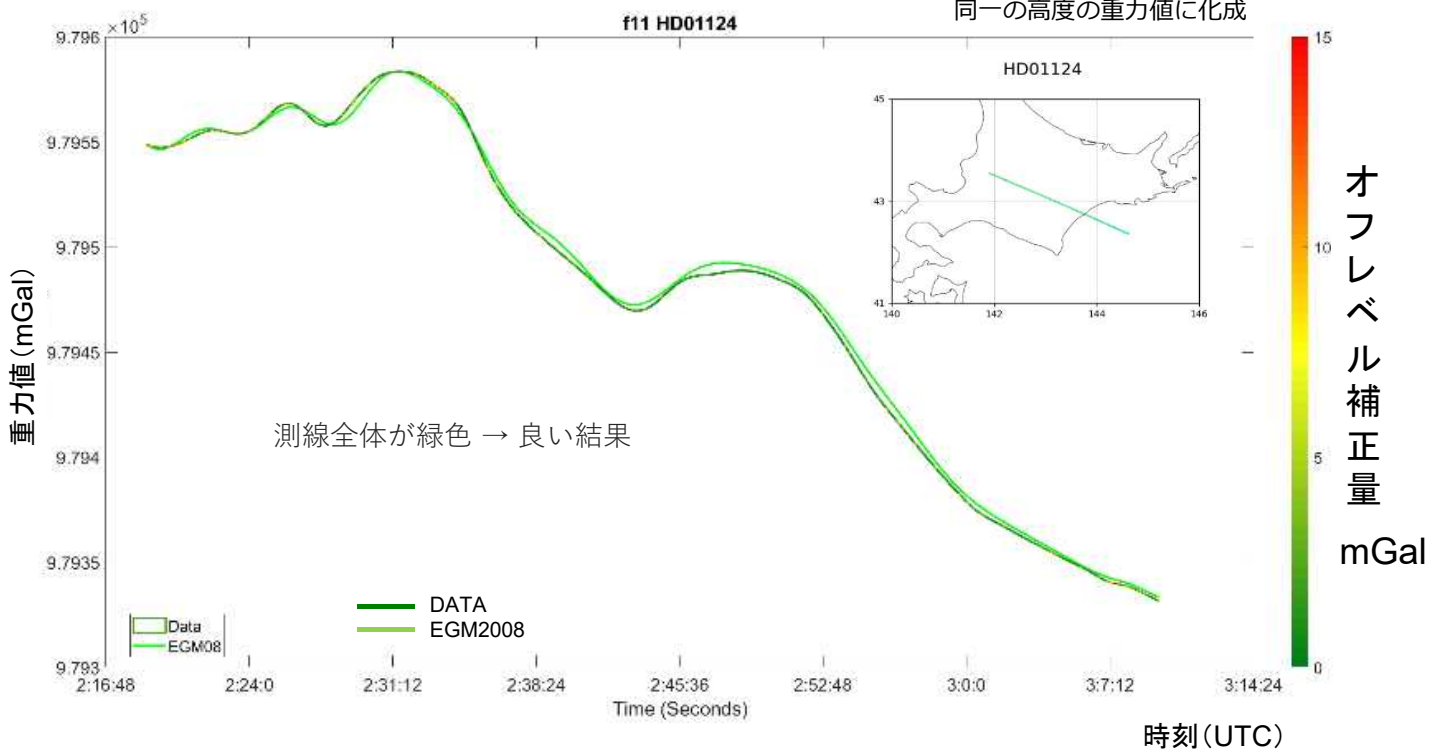
測定2021/07/21
飛行高度3,171m, 飛行速度305.5km/s
測定距離258.4km

EGM解析ソフトウェア:国土地理院 松尾主任研究官開発のソフトウェア
測定したデータ解析ソフトウェア:NGSから提供されたソフトウェア

採用

航空重力値とEGMとの比較

同一の高度の重力値に化成



測線全体が緑色 → 良い結果

EGM (重力の全球モデル) との比較 (目安)
オフレベル補正量: 航空重力計の前後左右の揺れを補正する量

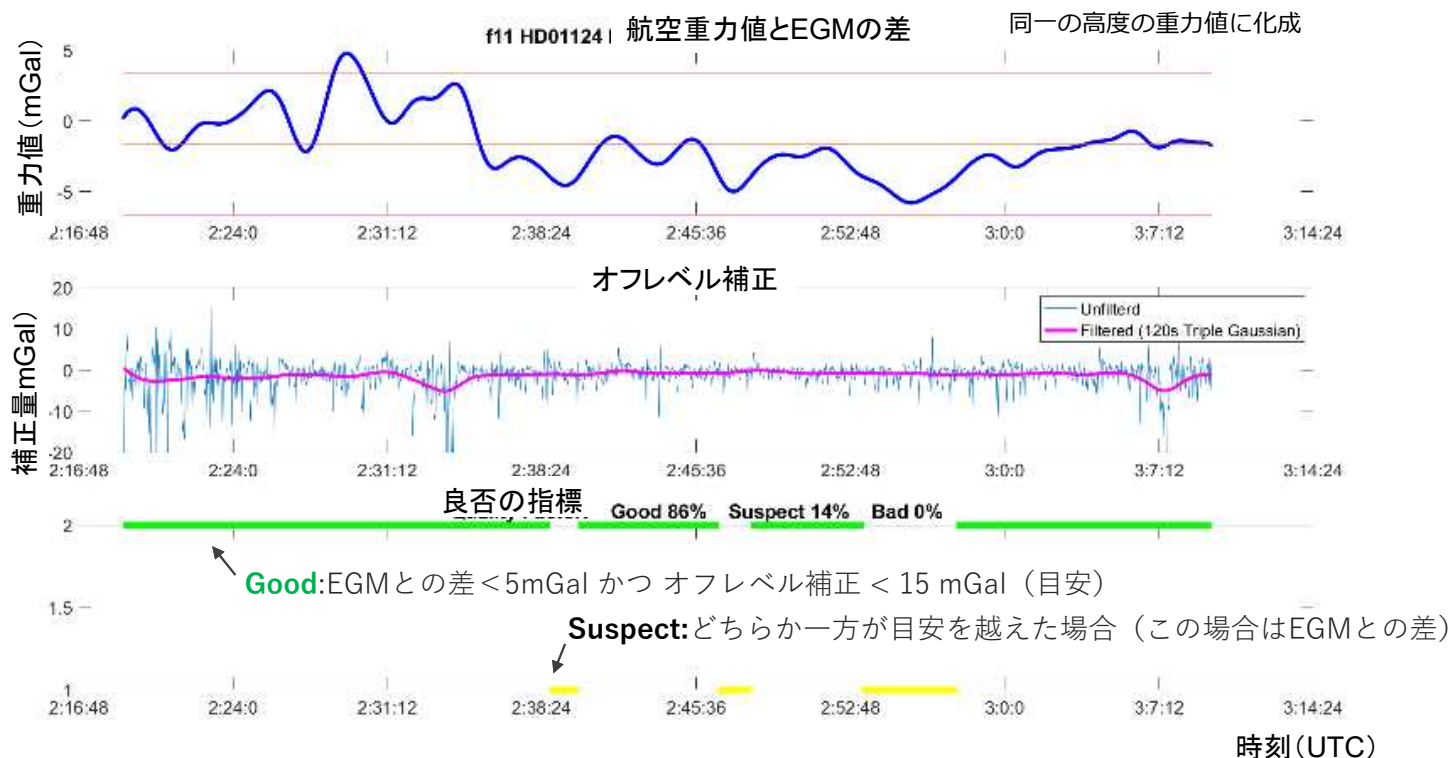
23

測定した測線の評価 (例 HD01124)

測定2021/07/21
 飛行高度3,171m, 飛行速度305.5km/s
 測定距離258.4km

EGM解析ソフトウェア: 国土地理院 松尾主任研究官開発のソフトウェア
 測定したデータ解析ソフトウェア: NGSから提供されたソフトウェア

採用



EGM (重力の全球モデル) との比較 (目安)

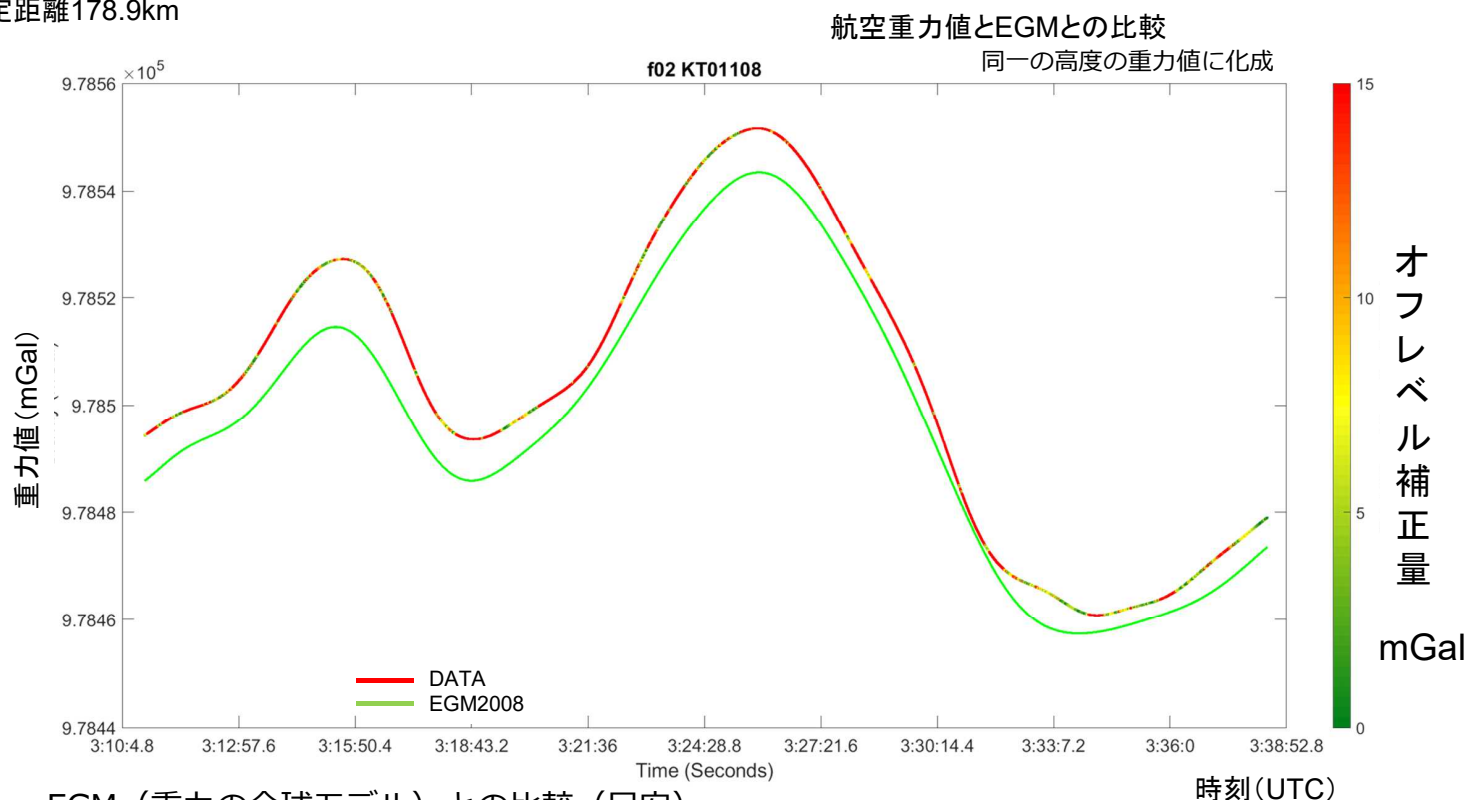
オフレベル補正量: 航空重力計の前後左右の揺れを補正する量

測定した測線の評価 (例 KT01108)

測定2020/05/17
 飛行高度4,983m, 飛行速度386.6km/s
 測定距離178.9km

EGM解析ソフトウェア: 国土地理院 松尾主任研究官開発のソフトウェア
 測定したデータ解析ソフトウェア: NGSから提供されたソフトウェア

再測



EGM (重力の全球モデル) との比較 (目安)

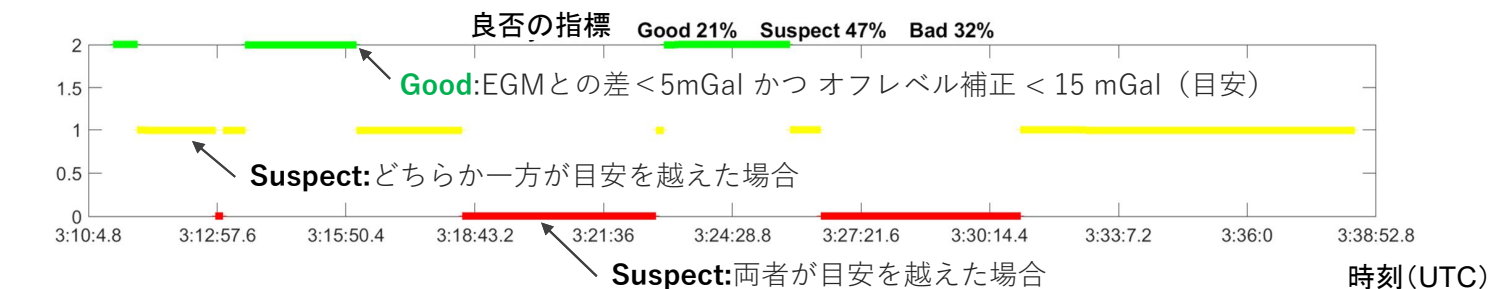
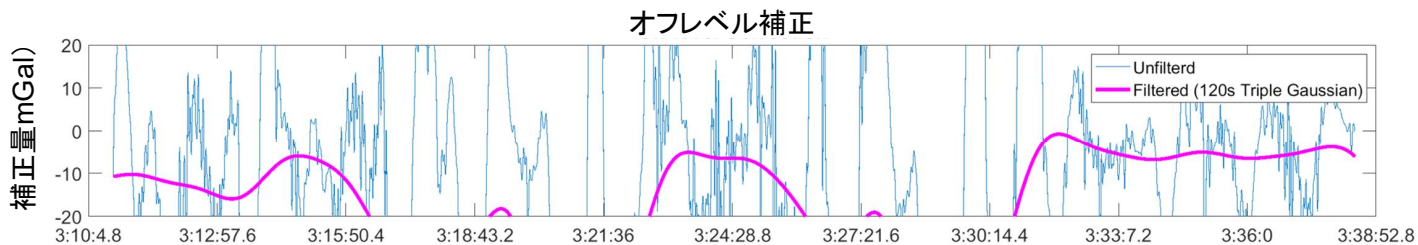
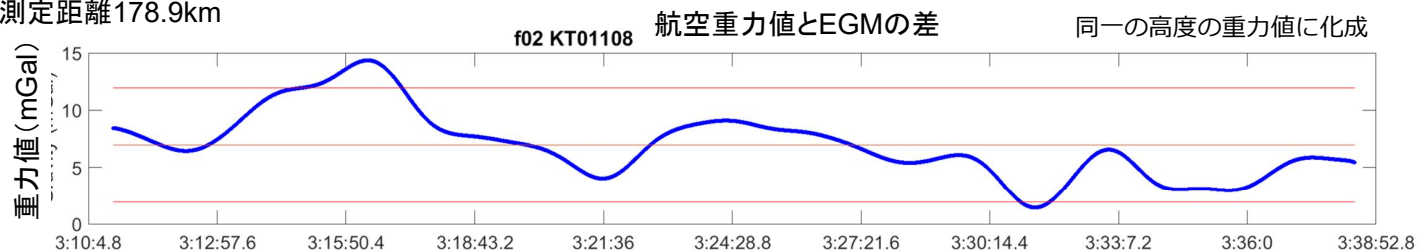
オフレベル補正量: 航空重力計の前後左右の揺れを補正する量

※ この測定データは風の影響で航空機の揺れが大きかった。

測定2020/05/17
 飛行高度4,983m, 飛行速度386.6km/s
 測定距離178.9km

EGM解析ソフトウェア:国土地理院 松尾主任研究官開発のソフトウェア
 測定したデータ解析ソフトウェア:NGSから提供されたソフトウェア

再測



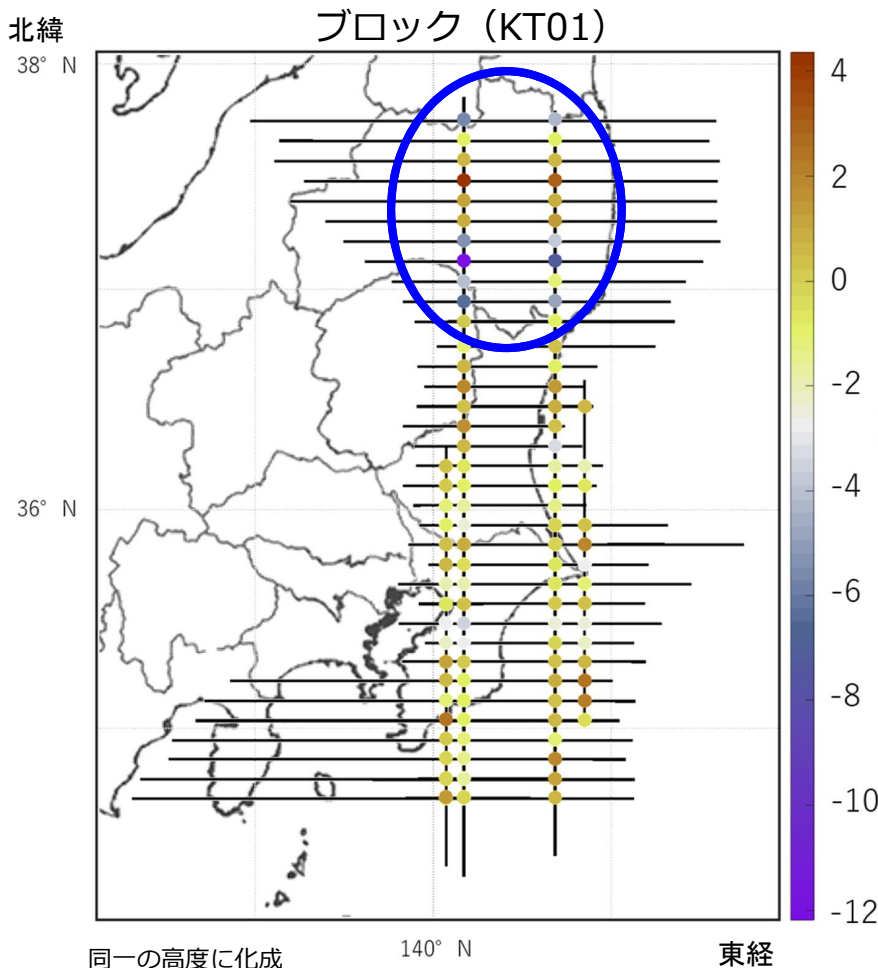
EGM (重力の全球モデル) との比較 (目安)

オフレベル補正量: 航空重力計の前後左右の揺れを補正するオフレベル補正量

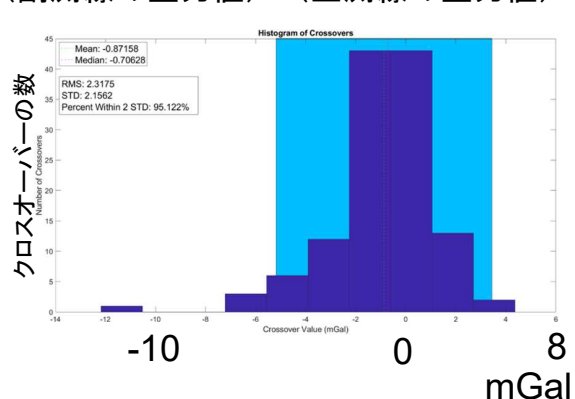
26

※ この測定データは風の影響で航空機の揺れが大きかった。

ブロックごとの評価 クロスオーバーによる評価



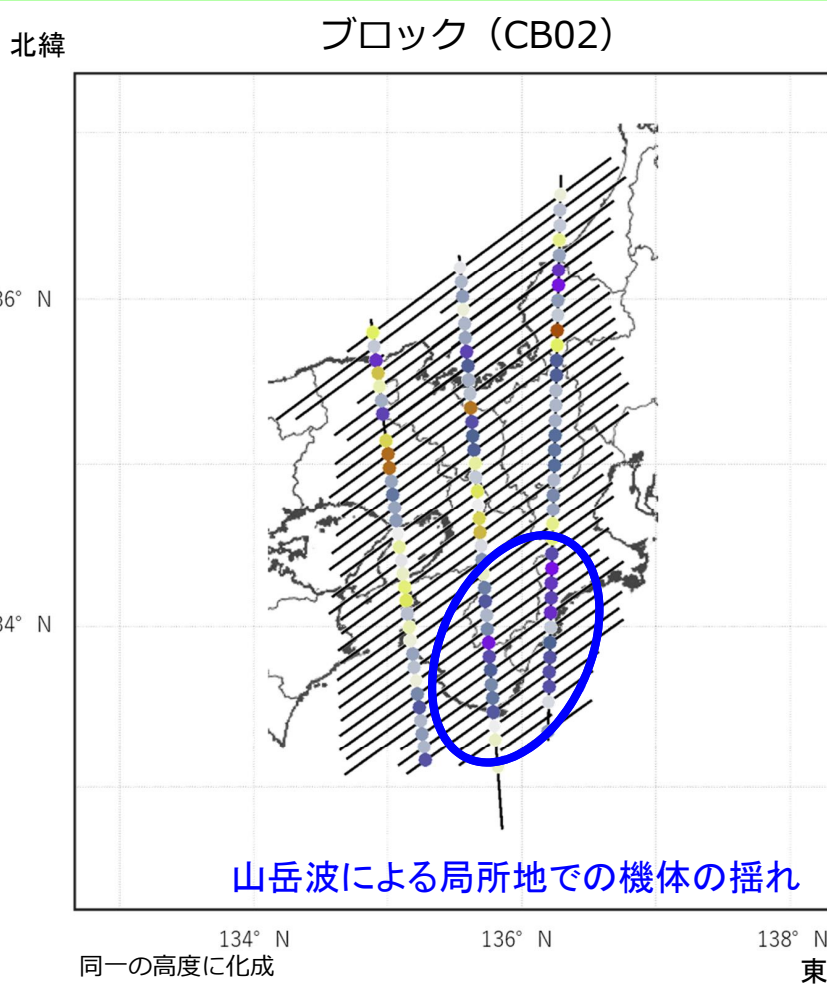
(副測線の重力値) - (主測線の重力値)



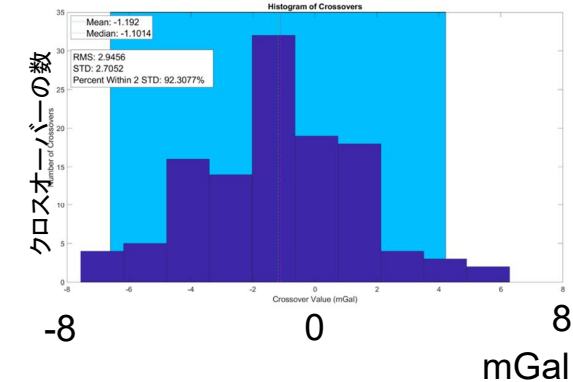
平均値: -0.872
 中央値: -0.706
 RMS : 2.3175
 STD : 2.1562

クロスオーバー
 主測線と副測線が交差する位置
 または
 交点における重力の較差

27



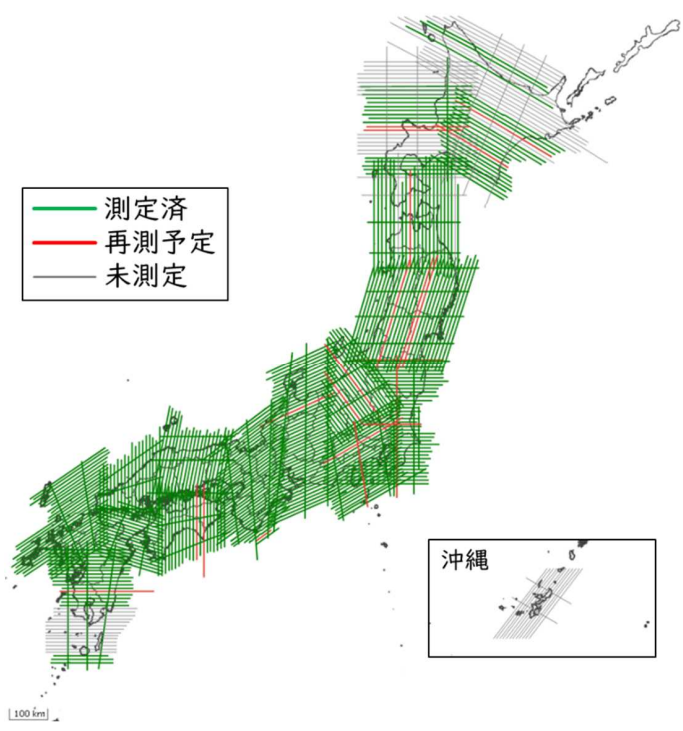
(副測線の重力値) - (主測線の重力値)



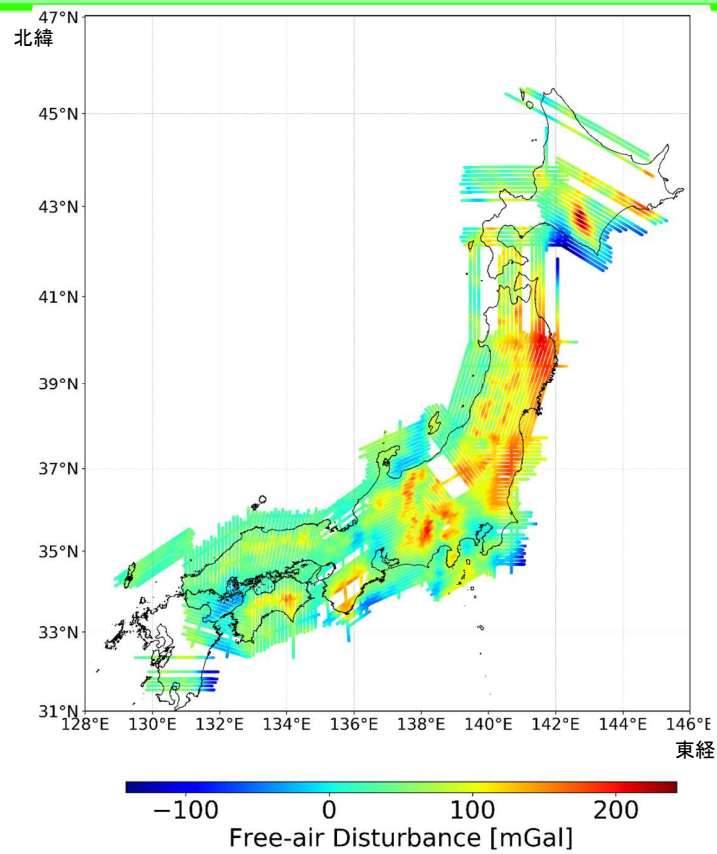
平均値: -1.192
中央値: -1.104
RMS : 2.9456
STD : 2.7052

クロスオーバー
主測線と副測線が交差する位置
または
交点における重力の較差

これまでの測定状況 (最新)



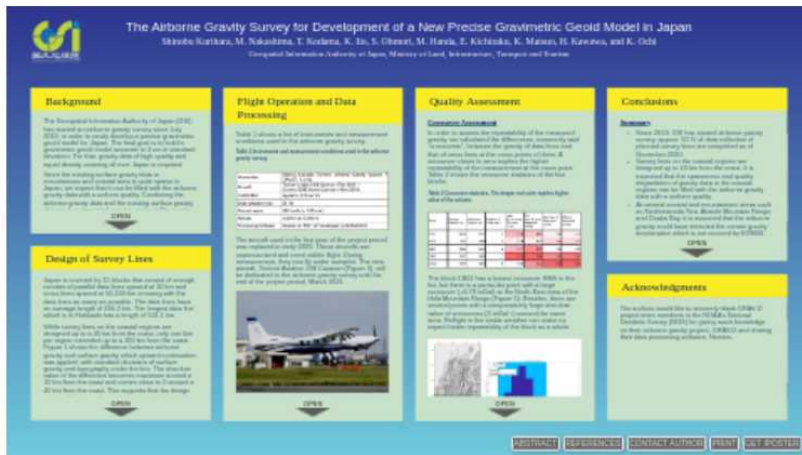
令和4年2月1日時点の測定状況
総測定距離: 105,018km



測定で得られた重力分布

The Airborne Gravity Survey for Development of a New Precise Gravimetric Geoid Model in Japan

日本における精密重力ジオイド構築のための航空重力測量



航空重力測量の
測定計画
測定の方法
測定データの評価

Shinobu Kurihara, M. Nakashima, T. Kodama, K. Iio, S. Ohmori, M. Handa, E. Kichiraku, K. Matsuo, H. Kawawa, and K. Ochi

Geospatial Information Authority of Japan, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

PRESENTED AT:



IAG 2021

Beijing June 28–July 2, 2021

Geodesy for a Sustainable Earth

Scientific Assembly of the International Association of Geodesy

Beijing • June 28–July 2, 2021

The Airborne Gravity Measurement for Development of a New Precise Gravimetric Geoid Model in Japan

M. Nakashima, S. Fukaya, K. Iio, Y. Iitsuka, S. Kurihara, K. Ochi, S. Omori, T. Kodama, M. Kuroyanagi, M. Handa, H. Yamamoto, T. Toyofuku, C. Kato, K. Matsuo
Geospatial Information Authority of Japan

Background

The Geospatial Information Authority of Japan (GSI) started airborne gravity measurement from 2019 to develop a new precise gravimetric geoid model with approximately 3 cm accuracy in 2024. Airborne gravity measurement is a method of efficiently acquiring homogenous gravity data over a wide area even in mountainous or coastal areas. The aircraft with GNSS/IMU enables us to obtain positions of the aircraft with a few centimeter accuracy. We are planning to complete the measurement covering the whole territory by 2023 except for the outlying islands. This report gives data processing, the progress of the measurement, and evaluation of the data quality.

Progress of the measurement

As of May 2021, we completed approximately 58% of data collection (Figure 3). Figure 4 shows free-air gravity disturbance derived from the airborne gravity measurement.

Comparison with EGM2008

Figure 6 shows differences between the airborne and EGM2008 gravity values. The airborne gravity is generally consistent with those of EGM2008 except some mountainous and coastal areas. In particular, differences of over 10 mGal are shown around the areas indicated in red circles in Figure 6. Among these areas, the areas indicated in red circles in Figure 6 shows small absolute values of off-level correction under 2 mGal (Figure 7). Moreover, crossover residuals are small in these areas. Therefore, it is assumed that the quality of the airborne gravity measurement is high enough to detect detailed gravity distribution which cannot be detected by EGM2008. On the other hand, large absolute value of off-level correction (over 10 mGal) are found in Tanba Mountains and Shikoku Mountains (Figure 7). In addition, the crossover residuals are also large in these areas and the north-east area of Hida Mountain Range. This indicates the quality of airborne gravity data is low in these areas because of incorrect off-level correction caused by strong air turbulence.

Comparison with surface gravity

Figure 8 shows differences between the airborne and upward-continued surface gravity which is calculated from 3D-LCS method by Matsuo and Forsberg (2021). Large gravity differences are mainly found around coastal and bay areas. In these areas, the airborne gravity data will have a significant positive impact on development of a new gravimetric geoid model.

Flight operation and data processing

Figure 1 and Figure 2 shows the aircraft and the gravimeter. Table 1 shows measurement conditions. The data is processed with Newton v1.5 developed by the NOAA's National Geodetic Survey (GRAV-D Team, 2017). Newton performs the following corrections: the effect of vertical acceleration from aircraft motion, Eotvos effect, off-level error (the effect of misalignment of the gravimeter), and the gravimeter drift.

Altitude	3,000 m (5,000 m at Tokyo and mountainous region)
Measurement line spacing	10 km (Data line) 50–100 km (Cross line crossing with the data line)
Length of measurement line	253 km (Average) 531 km (Longest)
Aircraft ground speed	300 km/hour
Sampling rate of the gravimeter	20 Hz

Crossover error analysis

In order to evaluate the repeatability of the measured gravity, we calculated crossover residuals at the crossing points of the data and cross lines. The closer to zero the crossover residual is, the higher the data repeatability is. Figure 5 shows the result. Overall, the crossover residuals are small and its RMS is 1.8 mGal. However, large crossover residuals (over 5 mGal) are shown around the areas indicated in red circles in Figure 5. These areas are well-known for airflow turbulence caused by mountains.

Conclusions

- Approx. 58% of airborne gravity data collection were completed as of May 2021.
- In Kishimanada Sea, Akaishi Mountain Range, Suruga Bay, Kiiu Strait and Iyonada Sea, the measurement succeeded to detect detailed gravity distribution which cannot be detected by EGM2008.
- On the other hand, in the north-east area of Hida Mountain Range, Tanba Mountains and Shikoku Mountains, the reliability of the airborne gravity data is lower than the other areas.
- Large gravity differences between the airborne and the surface gravity are found around coastal and bay areas.
- We will measure Hokkaido, Tohoku, Kyushu, and Okinawa in the latter half of the project period. Some lines with low quality will also be re-measured.

Acknowledgments

We would like to sincerely thank the GRAV-D project team members in the NOAA's National Geodetic Survey (NGS) for giving much knowledge on their airborne gravity project and sharing Newton.

References

- GRAV-D Team (2017): GRAV-D General Airborne Gravity Data User Manual Version 2.1, Theresa M. Damann, Monica Youngman, and Jeffrey Johnson, (Eds).
- Matsuo K, 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. (Submitted)

航空重力測量で得た重力データの解析・評価
航空重力測量による重力データを取り入れた重力分布から見えるその効果

1) 航空重力測量による重力測定は、令和3年度で概ね順調

(課題解決に向けて)

- ・沿岸部の海域データをより詳細な重力測定を計画中
- ・島しょ部を補強 伊豆七島、南西諸島の重力測定を計画中

2) 令和4年度 航空重力測量 (4年目)

- ・北海道地方から東北、関東へと南下する
- ・北海道地方は偏西風の影響を見ながら、
4月は九州・沖縄からスタート

3) 精密重カジオイドの構築に向けて

測定と平行して、測定した航空重カデータの評価を進める

4) 精密重カジオイド・モデルを利用するための準備

スムーズな社会実装に向けて、標高の測量成果との整合や影響の評価、整合した標高を得る仕組みの検討、わかりやすい提供方法等についても検討を進める

