

3. 航空レーザ計測

航空レーザ測量とは、航空レーザ測量システムを用いて地形を計測し、格子状の標高データであるグリッド（標高）データ等の数値地形図データファイルを作成する作業である。

3.1 航空レーザ計測

3.1.1 計測の概要

航空レーザ計測システム（シングルパルス発射頻度が最大 10 万発／秒以上の機能を有し、デジタルカメラを同時搭載し、1800 万画素以上で RGB 画像が取得できること）を搭載した航空機により、4 点／ m^2 のレーザ計測データを取得した。

また、航空レーザ計測時に取得された GNSS データ、IMU（Inertial Measurement Unit）データ及び地上 GNSS データ（電子基準点データ）を使用し GNSS/IMU 解析を行い、機体位置・姿勢角データを算出した。

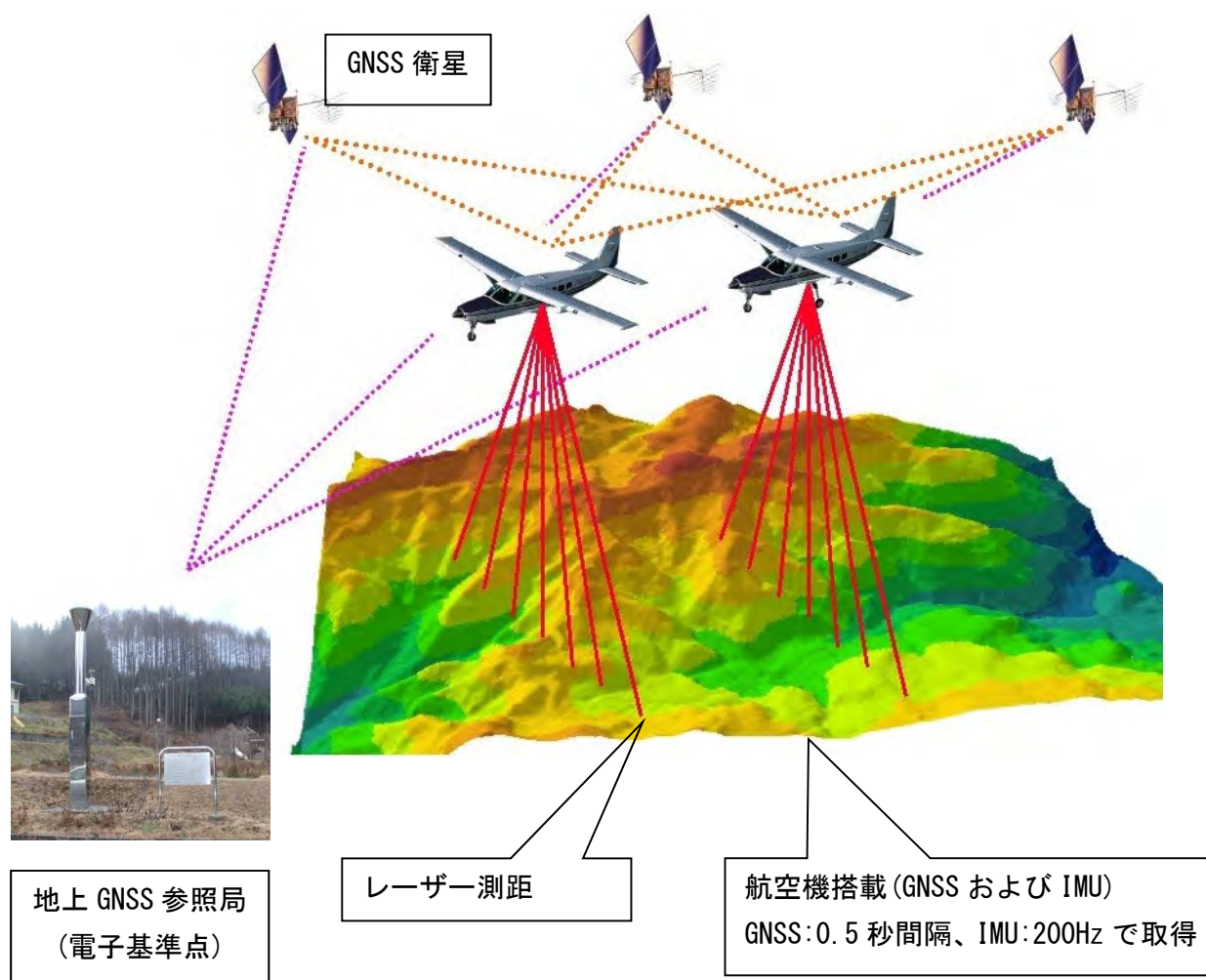


図 3.1.1 航空レーザ計測概念図

3.2 計測計画

航空レーザ計測の計測計画は、対象範囲の地形やGNSS衛星配置等を考慮して、計測諸元、飛行コース、使用する電子基準点、調整用基準点の配点について計画を行った。

3.2.1 計測地区設定

同一計測区域内で複数の航空機を安全かつ効率的に運航して航空レーザ計測作業を進めるため、航空機の飛行高度や固定翼機と回転翼機などの機種を区別することにより、航空管制による飛行制限や飛行回避を緩和し安全運航に努めた。

多数の航空機が一度に計測域に同時進入すると、航空機の安全運航上の判断から航空管制による飛行制限がなされる可能性があるため、予め計測対象範囲に対して複数の空白域（空域）を設定し、同一区域内に進入する航空機の数进行调整することにより機体の輻輳を予防した。

また、近接区域間の航空機運航を円滑にするため、当日の運航情報の連絡を行い、隣接区域の航空機の飛行高度を変化させることで航空機運航の安全を確保した。

計測地区については以下のブロックを設定し、共同企業体3社で計測作業の分担を行った。

表 3.2.1 計測地区設定

地区名	担当会社	備考
八代地区	中日本航空株式会社	
人吉地区	株式会社パスコ	
天草地区	国際航業株式会社	

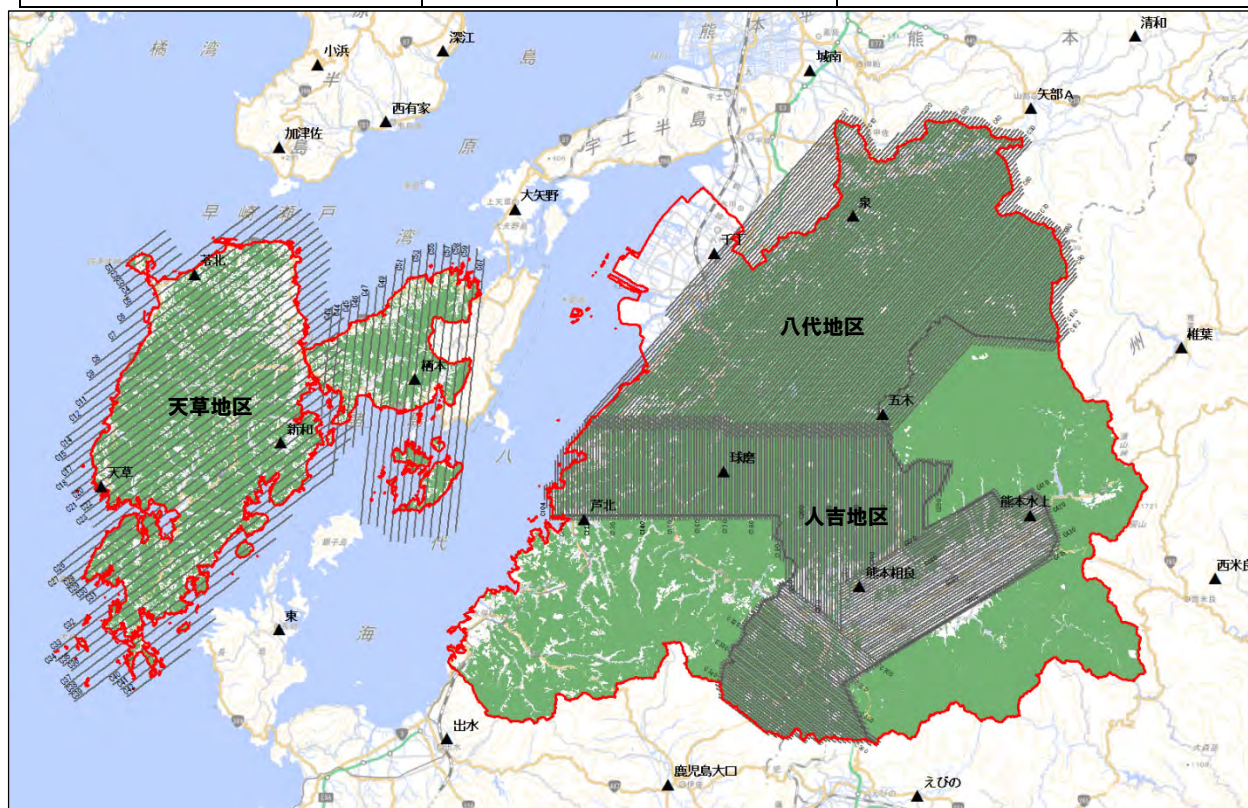


図 3.2.1 計測地区設定

3.2.2 航空レーザ測量システム

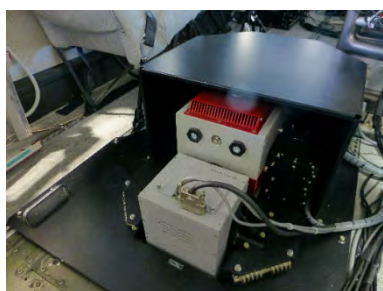
航空レーザ測量システムは、GNSS／IMU装置、レーザ測距装置及び解析ソフトウェアから構成される。航空レーザ測量システムは、6ヶ月毎のボアサイトキャリブレーションで点検済みの機器を使用した。

また、同時搭載されたデジタルカメラを用いて、フィルタリング及び点検のために、航空レーザ用数値写真を撮影した。

航空レーザ用数値写真は、次の点に留意して撮影を行った。

①航空レーザ計測と同時期に撮影した。

②撮影は計測対象地域を網羅する範囲とし、建物等の地表遮蔽物が確認できる25～50cm/ピクセル程度の解像度とした。



使用機材 LMS-Q780（八代地区）



使用機材 LightMapper（人吉地区）



使用機材 TerrainMapper（天草地区）

図 3.2.2 使用機器（航空レーザ測量システム）

3.2.3 計測諸元

計測諸元とは、計測密度、対地高度、飛行高度、パルスレート、スキャンレート、スキャン角、ラップ率をいい、三次元計測データとして必要となる 4 点/m²のレーザ計測データを得るための航空レーザ計測システムの設定を行った。

表 3.2.2 計測諸元（八代地区）

項目	パラメータ設定値
機器・機体	LMS-Q780・固定翼
計測密度	5.3 点/m ² （※ラップ率考慮）
対地高度	1800m
飛行速度	250 km/h
パルスレート	400 kHz
スキャンレート	97.78 Hz
スキャン角	60°
ラップ率	85%

表 3.2.3 計測諸元（人吉地区）

項目	パラメータ設定値
機器・機体	LiteMapper・回転翼
計測密度	6 点/m ² （※ラップ率考慮）
対地高度	500 m
飛行速度	111 km/h
パルスレート	150 kHz
スキャンレート	100 Hz
スキャン角	60°
ラップ率	50%以上

表 3.2.4 計測諸元（天草地区）

項目	パラメータ設定値	パラメータ設定値
機器・機体	TerrainMapper・固定翼	TerrainMapper・固定翼
計測密度	4 点/m ² （※ラップ率考慮）	4 点/m ² （※ラップ率考慮）
対地高度	2377.4m	2377.4m
飛行速度	240 km/h	240 km/h
パルスレート	460 kHz	470 kHz
スキャンレート	70.4 Hz	71.0 Hz
スキャン角	40°	40°
ラップ率	50%	50%
備考	C1～C42 に対応	C43～C61 に対応

3.2.4 使用した電子基準点

GNSS 基準局として以下の電子基準点を使用した。

表 3.2.5 GNSS 基準局（八代地区）

電子基準点名	座標値(m)		
	X	Y	Z(Height)
泉	-46918.246	-19256.117	254.58

表 3.2.6 GNSS 基準局（人吉地区）

電子基準点名	座標値(m)		
	X	Y	Z(Height)
芦北	-77607.452	-46444.907	10.156
千丁	-50242.790	-33285.501	7.422
鹿児島大口	-104437.894	-37976.577	183.24
熊本相良	-84403.646	-18600.719	161.078
熊本水上	-78463.999	-1281.487	190.533

表 3.2.7 GNSS 基準局（天草地区）

電子基準点名	座標値(m)		
	X	Y	Z(Height)
天草	-74260.482	-95345.950	34.105
栖本	-63418.024	-63609.040	588.514
苓北	-52354.944	-85941.047	27.729
東	-88738.255	-77344.491	89.742

3.2.5 運航管理

航空機の運航に当たっては、事前に各機体の運航に関する連絡調整を密に行うとともに、前日・当日連絡により飛行予定地区、飛行コース番号、飛行高度等を各機体の運航担当者間で情報交換を行った。また、計測作業着手前に各社の運航関係者が集まり安全会議を実施した。

さらに、飛行中の安全確認を向上させるため、当日の飛行前には電子メールで離陸時間、予定コース、飛行高度などの情報を共有するとともに、上空では管制の指示に従い、さらには航空機相互の動向を確認するために共通周波数による位置情報の連絡を行った。

なお、1日の計測作業終了時には、電子メールで当日の進捗状況と翌日の飛行予定の情報を共有することで、日々の安全管理を実施した。

3.2.6 公共測量

測量法第36条の規定にもとづき、国土地理院九州地方測量部へ公共測量の実施計画書を提出し、助言を得た。また、測量法第30条の規定にもとづき、電子基準点の成果の使用承認を得た。

「この測量成果は、国土地理院長の承認を得て同院所管の測量標及び測量成果を使用して得たものである（承認番号）令 2 九公第 195 号」

3.2.7 製品仕様書

「地理情報標準プロファイル Japan Profile for Geographic Information Standards (JPGIS)」に準拠し、測量成果の種類、内容、構造、品質等を示す製品仕様書を作成した。製品仕様書による品質評価の位置正確度等については、林野庁測定規程及び公共測量作業規程の準則に従うものとした。

3.3 航空レーザ計測

3.3.1 計測データの取得

計測データの取得は、電子基準点の G N S S 観測データ、航空機上の G N S S 観測データ、I MU 観測データ及びレーザ測距データについて行った。

同一コースの航空レーザ計測は、直線かつ等高度で行うことを原則とした。ただし、回転翼航空機を利用する場合は適宜コンターフライトを行う等、地形条件に合わせて飛行した。同一コースにおける対地速度は一定の速度を保つように努めた。

G N S S 観測については、以下の項目について行った。

- ① 電子基準点及び航空機上の G N S S 観測のデータ取得間隔は 1 秒以下とした。
- ② 取得時の G N S S 衛星の数は、G P S ・準天頂衛星を用いて観測する場合は 5 衛星以上とし、G P S ・準天頂衛星及び G L O N A S S 衛星を用いて観測する場合は 6 衛星以上とした。
- ③ G N S S 観測結果等は、G N S S 衛星の配置等を記載した手簿、記簿等の資料、基線解析結果等を記載した精度管理表に整理した。

3.3.2 航空レーザ計測の点検

航空レーザ計測の点検は、航空レーザ計測終了時に、速やかに行い、必要となる精度管理表等を作成し、再計算が必要か否かの判定を行った。点検は、以下の項目について行った。

- ① 固定局、航空機搭載の G N S S 測量機の作動及びデータ収録状況の良否
- ② サイクルスリップ状況の有無
- ③ 航空レーザ計測範囲の良否
- ④ 航空レーザ用数値写真の撮影範囲及び画質の良否
- ⑤ 計測高度及び計測コースの良否

キネマティック解析結果の点検は、以下の項目について行った。

- ① 最少衛星数
- ② D O P (P D O P、H D O P、V D O P) 値
- ③ 位置の往復解の差
- ④ 解の品質
- ⑤ 位置の標準偏差の平均値と最大値

衛星数：5 個以上

PDOP：3 以下

最適軌跡解析結果の点検は、計測コース上において以下の項目について行った。

- ① GNSS 解と IMU 解の整合性
- ② 位置の標準偏差の平均値と最大値
- ③ 姿勢の標準偏差の平均値と最大値

計測データの点検は、以下の項目について行った。

- ① コースごとの計測漏れ
- ② 飛行コース上の飛行軌跡

点検資料として、以下の確認及び作成を行った。

- ① キネマティック解析処理時に出力される計測時間帯の衛星数及び PDOP 図
- ② コースごとの計測範囲を重ね書きした計測漏れの点検図
- ③ 飛行コース上に飛行軌跡を展開した航跡図
- ④ 航空レーザ計測記録（様式第 68 号）
- ⑤ 航空レーザ計測作業日誌
- ⑥ GNSS 衛星の配置等を記載した手簿、記簿
- ⑦ GNSS / IMU 計算精度管理表（様式第 11 号）

3.4 調整用基準点の設置

調整用基準点の設置は、三次元計測データの点検及び調整を行うための基準点を設置する作業である。

3.4.1 調整用基準点の設置

調整用基準点の設置は、以下の項目について行った。

- ① 設置場所は、平坦で所定の格子間隔（1m）の 2 倍から 3 倍までの辺長があるグラウンド、空き地、道路、公園、屋上等で、樹木や歩道の段差等の障害物がなく、計測が可能な場所とした。
- ② 点数は、作業地域の面積（km²）を 25 で割った値に 1 を足した値を標準とした。
- ③ 配点は、作業地域の四隅に設置することを原則とし、所定の平坦地や水準点の位置を考慮し、作業地域全体で均一になるように配点した。

（契約数量）

$$1771.9 \text{ km}^2 \div 25 + 1 = 72 \text{ 点}$$

なお、今回の作業では対象地区内に均一となるように 72 点を配点した。

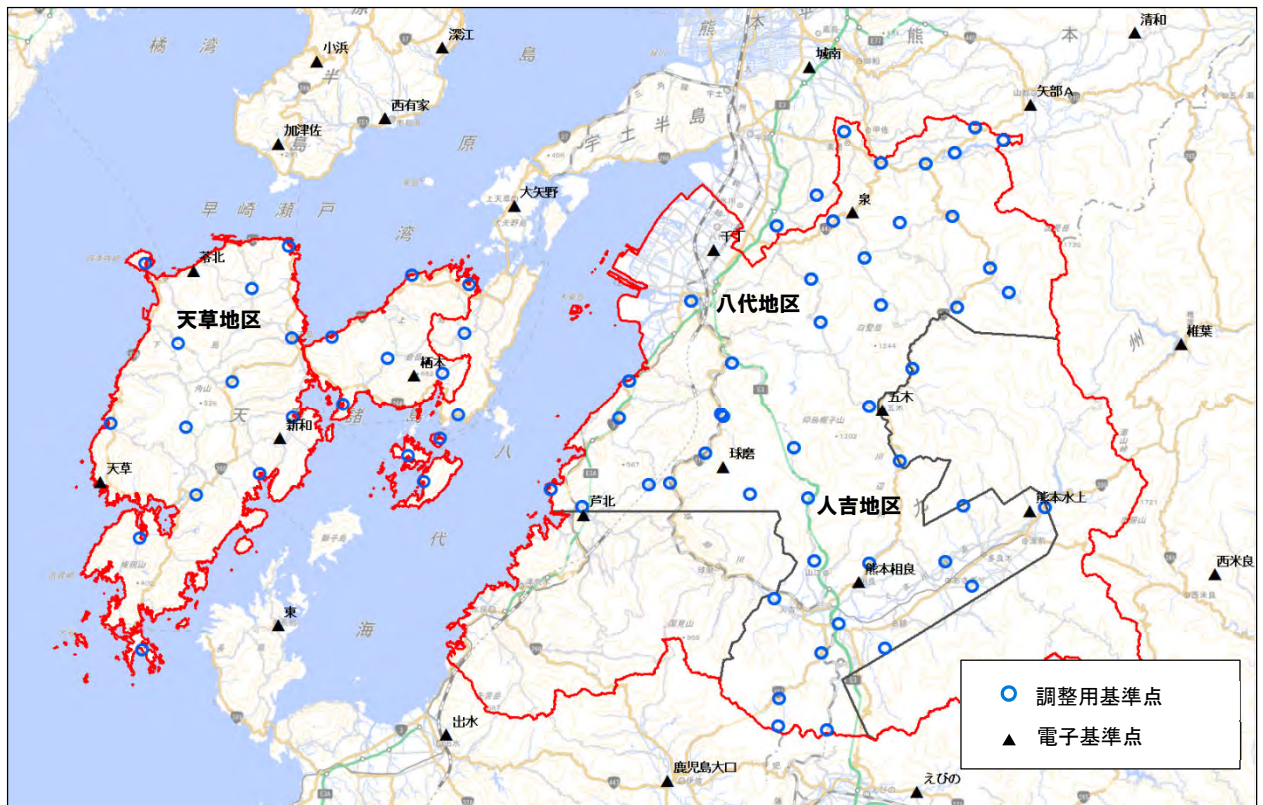


図 3.4.1 調整用基準点の配点状況

3.4.2 調整用基準点の測定

調整用基準点の測定は、以下の項目について行った。

- ① 水平位置の測定は、4級基準点測量により実施した。ただし、近傍に必要な既知点がない場合には、単点観測法に準じて行った。
- ② 標高の測定は、4級水準測量により実施した。ただし、近傍に必要な水準点がない場合には、測定する調整用基準点にも近い2点以上の水準点を既知点としてGNSS観測のスタティック法に準じて行った。
- ③ 調整用基準点の配点図及び調整用基準点明細表を作成した。なお、調整用基準点明細表には現況等を撮影した現地写真を添付した。



図 3.4.2 水準測量の実施状況



図 3.4.3 調整用基準点の測定

地区名	測量実施日
八代地区	2020 年 10 月 26 日 ～ 2020 年 10 月 28 日
人吉地区	2020 年 11 月 5 日 ～ 2020 年 11 月 12 日
天草地区	2020 年 10 月 21 日 ～ 2020 年 10 月 23 日

表 3.4.1 調整用基準点座標（八代地区）

点名	座標値(m)		
	X	Y	Z(Height)
G01	-38322.528	-6846.886	341.851
G02	-38710.324	-20127.799	64.948
G03	-39567.079	-3994.004	293.423
G04	-40866.786	-8913.265	175.092
G05	-41954.064	-11887.117	177.601
G06	-41869.468	-16407.911	95.193
G07	-45136.209	-22853.671	84.965
G08	-47293.791	-9137.159	1105.608
G09	-47925.227	-14479.297	924.024
G10	-47798.265	-21188.814	129.834
G11	-48217.750	-26901.030	46.855
G12	-51480.527	-18053.778	266.904
G13	-52532.403	-5329.958	613.941
G14	-53628.106	-23460.453	165.576
G15	-55902.925	-35562.102	10.138
G16	-54975.258	-3458.874	765.435
G17	-56540.703	-8686.266	570.914
G18	-56252.825	-16383.509	990.167

G19	-58011.451	-22505.729	753.803
G20	-62130.832	-31475.407	23.932
G21	-62686.197	-13166.468	319.645
G22	-63949.330	-41882.100	4.128
G23	-66549.340	-17580.950	293.510
G24	-67386.683	-32603.727	35.749

表 3.4.2 調整用基準点座標（人吉地区）

点名	座標値(m)		
	X	Y	Z(Height)
No.1	-67769.357	-42888.330	64.687
NO.2	-75014.420	-49790.786	37.820
NO.3	-76753.230	-46630.230	3.583
NO.4	-74516.573	-39841.463	79.357
NO.5	-74379.152	-37691.236	52.508
NO.6	-71316.643	-34141.188	51.735
NO.7	-67616.155	-32340.650	36.894
NO.8	-70778.347	-25189.499	487.584
NO.9	-75466.721	-29618.288	502.208
NO.10	-75893.033	-23787.730	239.377
NO.11	-82259.213	-23114.128	253.182
NO.12	-86036.193	-27195.941	99.784
NO.13	-88563.039	-20625.304	136.206
NO.14	-91518.912	-22418.989	150.591
NO.15	-96095.122	-26715.021	317.976
NO.16	-98863.611	-26774.253	448.211
NO.17	-99260.404	-21886.798	531.628
NO.18	-72152.842	-14489.538	295.930
NO.19	-76833.964	180.120	213.355
NO.20	-76700.803	-8002.215	242.074
NO.21	-82471.781	-17543.703	138.491
NO.22	-82330.459	-9843.523	157.880
NO.23	-84729.571	-7170.897	166.598
NO.24	-91066.001	-15946.106	185.926

表 3.4.3 調整用基準点座標（天草地区）

点名	座標値(m)		
	X	Y	Z(Height)
P001	-50327.799	-76311.283	4.670
P002	-52039.135	-90824.203	2.817
P003	-53270.940	-63863.724	3.748
P004	-54602.990	-79999.796	17.490
P005	-54205.009	-58075.990	3.019
P006	-59144.038	-58540.139	42.021
P007	-59545.984	-71918.304	3.592
P008	-59596.520	-75953.759	1.879
P009	-60169.851	-87535.623	104.326
P010	-61663.243	-66309.841	48.744
P011	-63150.823	-60784.588	7.371
P012	-64063.349	-82036.526	152.022
P013	-66387.652	-70793.532	2.933
P014	-67487.700	-59180.262	4.596
P015	-67700.781	-75873.317	2.023
P016	-68354.649	-94303.311	3.907
P017	-68715.536	-86694.660	97.680
P018	-69834.783	-61016.806	2.696
P019	-71583.693	-64263.232	2.426
P020	-73385.813	-79274.744	3.133
P021	-74198.217	-62638.637	2.845
P022	-75527.171	-85635.442	7.614
P023	-79893.826	-91351.689	2.572
P024	-91210.803	-91166.280	4.135

3.5 三次元計測データ及びオリジナルデータの作成

3.5.1 三次元計測データの作成

レーザの照射方向や照射点との距離データと機体位置・姿勢角データとを組み合わせ、照射点の三次元座標を算出し三次元計測データを作成した。

三次元計測データを作成する際は、断面表示、鳥瞰表示等により、隣接する建物等に複数回反射して得られるノイズ等によるエラー計測部分を削除した。なお、三次元計測における地上座標値はセンチメートル単位とした。

3.5.2 三次元計測データの点検

調整用基準点と三次元計測データとの比較点検は、次の項目のとおり実施した。

- ① 調整用基準点と比較する三次元計測データは、所定の格子間隔（1m）と同一半径の円又は2倍辺長の正方形内の計測データを平均したものとした。
- ② 各調整用基準点において調整用基準点と三次元計測データとの較差を求め、その平均値とRMS誤差等を算出した。
- ③ 全ての調整用基準点において三次元計測データの平均値との較差を求め、その平均値との標準偏差を算出した。

点検の制限値は次のとおりとし、点検結果は三次元計測データ点検表及び調整用基準点調査表に整理した。

- ① 作成した三次元データと各調整用基準点における点検の結果は、較差の平均値の絶対値が25cm以内又はRMS誤差が30cm以内とする。
- ② すべての調整用基準点での点検の結果は、較差の平均値の絶対値が25cm以内又は標準偏差が25cm以内とする。
- ③ ただし、上記のうち、較差の傾向が、作業地域全体で同じ場合は地域全体の三次元データの標高値を上下の一律シフトの平行移動による補正を行った。

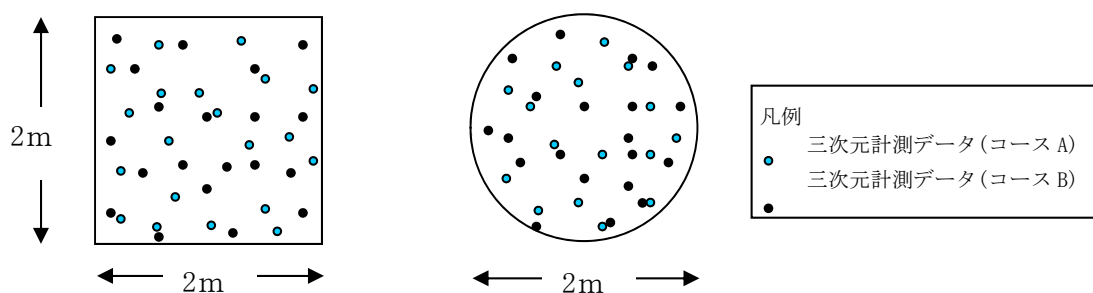


図 3.5.1 格子間隔（1m）での点検箇所のデータ抽出方法

表 3.5.1 三次元データの点検結果（単位；m）

	八代地区	人吉地区	天草地区
調整量(m)	0.00	0.00	0.000
最小値	-0.03	-0.04	-0.059
最大値	0.08	0.06	0.044
平均値	0.02	-0.01	-0.008
標準偏差	0.04	0.02	0.028
RMS 誤差	0.04	0.02	0.029

3.5.3 コース間標高値の点検

コース間標高値の点検は、コース間の重複部分に点検箇所を選定し、コースごとの標高値の比較点検を行った。

点検箇所の選定と点検は、次のとおり実施した。

- ① 点検箇所の数は、（コース長 キロメートル/10＋1）の小数点以下切り上げとした。
- ② 点検箇所の配置は、重複部分のコースの端点に取り、重複部分の上下に均等に配置した。
- ③ 山間部、線状地域等の地形条件の場合は配置及び点数を変更した。
- ④ 点検箇所の標高値は、平坦で明瞭な地点を選定し、格子間隔（1m）と同一半径の円又はおおむね2倍に辺長の正方形内の計測データを平均したものを利用した。
- ⑤ 重複コースごとの各コースの点検箇所の標高値の較差を求め、較差の平均値等を算出した。

上記点検の結果、重複コースごとの標高値の較差の平均値の絶対値が30cm以上の場合は、点検箇所の再選定又は点検結果からキャリブレーション値の再計測と計測データの再補正を行うものとした。コース間標高値の点検の整理は、コース間点検箇所残差表で行い、配点図としてコース間点検箇所配点図を作成した。

表 3.5.2 コース間標高値の点検 （単位；m）

	八代地区	人吉地区	天草地区
最小値	0.00	0.00	0.01
最大値	0.09	0.10	0.15

3.5.4 欠測率の計算と点検

欠測率の計算は、計画する格子間隔（1m）を単位とし、三次元計測データの欠測の割合を算出した。欠測とは、三次元計測データを格子間隔で区切り、1つの格子内に三次元計測データがない場合であり、水部は含まないものとした。

欠測率は、対象面積に対する欠測の割合を示すものであり、次の計算式で算出した。

欠測率＝（欠測格子数／格子数）×100

計算は、国土基本図郭の1/4単位で行い、欠測率は、欠測率調査表に整理した。

欠測率は、15 パーセント以下を標準とした。なお、図郭の端部等でサンプル数が少ないため、欠測率が高めに算出される場合は精度管理表にコメントを付した。

表 3.5.3 欠測率の計算結果

	八代地区	人吉地区	天草地区
最小値	0.00%	0.00%	0.00%
最大値	8.04%	8.00%	14.29%
平均値	0.12%	1.09%	3.10%

3.5.5 航空レーザ用写真地図データの作成

航空レーザ計測と同時に取得した空中写真画像に対して色調調整を施した後、正射投影変換処理を行い、以下の要領にて航空レーザ用写真地図データを作成した。

- ① ファイルの単位は国土基本図郭の 1/4 単位とする。
- ② 解像度は 25cm/ピクセルとする。
- ③ データの形式は、T I F F とする。
- ④ 位置情報ファイルは、ワールドファイル形式とする。

3.5.6 航空レーザ用写真地図データの点検

データの点検は、図形編集装置等を用いて行い、主要地物（道路等）に着目し、航空レーザ用写真地図データの画像接合部の著しいずれの有無の点検を行った。



図 3.5.2 航空レーザ用写真地図データ（02MD4141）

3.5.7 水部ポリゴンデータの作成

水部ポリゴンデータは、航空レーザ用写真地図データを用いて水部の範囲を対象に作成を行った。「水部」とは、海部のほか、河川、池等地表が水で覆われている場所とした。

水部ポリゴンデータの作成は、幅 5m 以上の川の水部、大きさ 5 m² 以上の池などの水涯線を対象とし、プールや下水処理施設などの人工池は採用しない。