

地上画素寸法 30cm 級の衛星画像を用いた地図作成に関する共同研究 Collaborative Research on Mapping from 30cm-level Resolution Satellite Imagery

基本図情報部 高橋祥・早坂寿人¹・中村孝之・南秀和
National Mapping Department Sho TAKAHASHI, Hisato HAYASAKA,
Takayuki NAKAMURA and Hidekazu MINAMI

要旨

2014年8月、高解像度光学衛星 WorldView-3 が打ち上げられ、2015年2月より地上画素寸法最高 31cm の衛星画像が一般に販売開始された。国土地理院ではこれまで高解像度衛星画像を用いた地図作成に関する研究を重ねており、本衛星についても同様の検証・検討を実施するため、2015年9月～2017年3月まで(株)NTTデータと共同研究を実施した。

その結果、標定精度は地図情報レベル 2500 の制限値をほぼ満たす結果が得られた。また、明瞭に取得できる道路や建物の図化精度や、植生が少なく地表面を直接観測できる場合の等高線の高さは、ともに十分な精度を確保できることを確認した。その一方で、影・オフナディア角・B/H比(基線高度比)の条件によっては図化が困難な場合があり、それが図化精度にも影響することを確認した。判読性の高い画像にするための補正方法や、図化しやすいステレオペアの条件の決定が今後の課題である。

1. はじめに

2014年8月、アメリカの DigitalGlobe 社が高解像度光学衛星 WorldView-3 を打ち上げ、2015年2月より地上画素寸法最高 31cm の衛星画像が一般に販売開始された。この地上画素寸法は、航空機による空中写真に迫るものであり、高精度な地図作成への活用が期待されることから、複数の先行報告がある。例えば、小泉ほか(2015)では平坦地では地図情報レベル 2500 を満たす標定精度が得られたことや、近藤ほか(2015)では3点以上の地上基準点を使って地図情報レベル 2500 の標定精度が得られたことが報告されている。

国土地理院では、これまでも継続的に高分解能衛星画像の精度検証を重ねてきた。最近の研究では、地上画素寸法 70cm 級 (Pleiades), 50cm 以下級 (WorldView-2, GeoEye-1) の衛星画像を対象に検証を実施しており、標定精度は有理多項式係数 (RPC ファイル) と画像基準点 1 点を用いることで、地図情報レベル 2500 の標定精度をほぼ満たすこと、また図化精度は判読性の良い地物においては、高い位置精度を得られる可能性があるものの、判読性が不十分で正確な形状取得が難しいケースがあること等の結果を得ている。

今回、国土地理院において将来的に基本図の作成・更新に利用することを念頭におきつつ WorldView-3 画像の精度を検証するとともに、高分解能衛星画像に関する技術動向を把握することを目的として、2015年9月～2017年3月まで(株)NTTデータと共同研究を実施したので、その結果を報告する。

2. 対象地区と衛星画像

本研究の研究対象地区は、つくば(茨城県)・三浦(神奈川県)・箱根(神奈川県)の計3地区であり、いずれもステレオペア画像を使用した(図-1)。製品種別はベーシック製品(以下「1B」という。)及びオルソレディ製品(以下「OR2A」という。)である。1B はセンサ補正と放射量補正を施した画像であり、OR2A はそれに加えて指定する地図投影法と座標系により投影されているが、地形の起伏は補正されていない画像である。対象地区及び使用した衛星画像の諸元を表-1 に示す。



図-1 対象地区

つくば地区・三浦地区は、ステレオペア内に2~3km 間隔で画像基準点を取得し、標定精度検証及び図化精度検証を実施した。また箱根地区では、地形が急峻かつ森林に覆われていない箇所における等高線図化の精度検証を実施した。アフィン変換を用いた標定が行えるように約 5km 間隔で画像基準点を取得した。

標定点(以下「GCP」という。)や検証点に用いる画像基準点は、主に判読性の高い道路上の白線(画像上での観測誤差を少なくするため、可能な限り白線の交点)を選定した。座標値は、現地にてネット

表-1 対象地区と使用した衛星画像の諸元

地区	広ぼう	画像基準点数	撮影日	画像名	地上画素寸法	オフナディア角	アジマス角	視差角	B/H 比
つくば	15km × 15km	31	2015年 4月12日	T1	0.37m	25.77°	26°	41.99°	0.75
				T2	0.34m	18.05°	173°		
三浦	13km × 10km	23	2015年 12月9日	M1	0.31m	5.95°	293°	28.30°	0.51
				M2	0.38m	27.68°	204°		
箱根	15km × 15km	24	2015年 1月26日	H1	0.38m	27.60°	74°	26.70°	0.47
				H2	0.38m	28.50°	133°		

ワーク型 RTK (VRS 方式) の単点観測により取得し、これを真値とみなした(以下「現地測量値」という.)。各地区の画像基準点数は表-1 のとおりである。

3. 標定精度の検証

3.1 ステレオ画像の標定精度

本検証ではステレオモデルの位置精度の確保に必要な GCP 数を検討するために、GCP 数を 0・1・3・5 点と変えて精度を検証した。GCP 1 点の場合はシフト補正、GCP 3 点及び 5 点の場合はアフィン補正を加えた有理多項式係数(修正 RPC モデル)を精度検証に利用した。タイポイントは画像内に 9 点を均等配点している。ステレオモデル構築後、ステレオ視で GCP 以外の画像基準点(検証点)座標を観測した。個人差を鑑み観測は 2 名で行い、その平均値で評価した。本検証では ERDAS IMAGINE 2015 の Imagine Photogrammetry を標定に、Stereo Analyst をステレオ計測にそれぞれ用いた。

検証点における現地測量値と計測値(いずれも平面直角座標系の座標値)の差(以下「誤差」という.)を図-2(1B)、図-3(OR2A)に示す。GCP 5 点を利用すると、RMSE が 1B で 0.358m(水平)、0.197m(鉛直)、OR2A で 0.344m(水平)、0.189m(鉛直)という結果を得た。

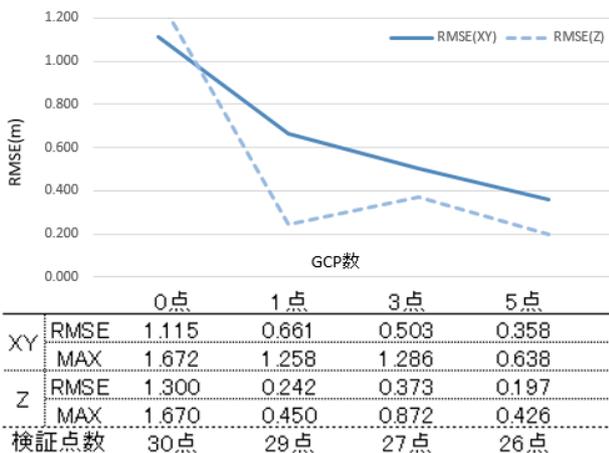


図-2 検証点誤差(つくば地区: 1B)

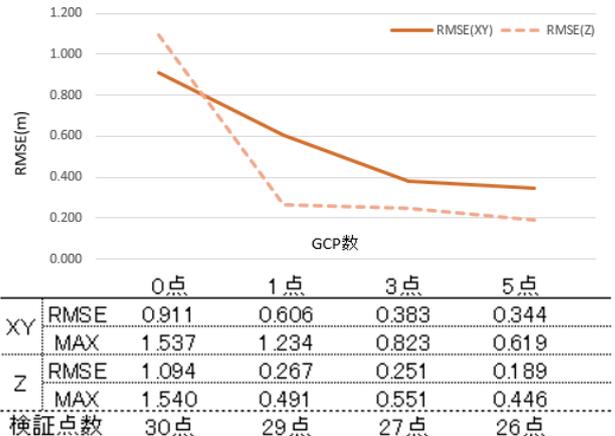


図-3 検証点誤差(つくば地区: OR2A)

基本測量に適用する「基本図測量作業規程」では、1/2,500 国土基本図の対地標定精度について、平面位置は図上 0.3mm 以内(地上 0.75m 以内)、標高 0.5m 以内と規定されている。GCP 5 点を利用した場合、26 点すべての検証点でこの規定を満たした。

1B と OR2A を比較すると、OR2A の検証点誤差が小さい。この要因として、1B は平面に投影されていないため OR2A と比べて縦視差が大きく、ステレオ視が困難であったことによる。

なお、GCP5 点の場合のみ GCP と検証点の合計が 1 点多い(31 点)のは、5 点の GCP のうち 1 点をステレオ計測範囲外(検証点としては利用できない)に取得したことによる。

続いて OR2A 画像における各検証点の水平誤差ベクトルを図-4、図-5、図-6、に示す。図中の座標軸は平面直角座標系 IX 系で、誤差ベクトルは現地測量値に対するステレオ計測値のずれの量と方向を表している。GCP1 点による補正後の画像(図-5)を見ると、GCP0 点(図-4)と比べ、全体的に南方向へシフトしているが、画像の東西方向(ラインセンサ方向)の両端に大きな誤差が残っている。この傾向は GCP5 点を使用しても変わらない(図-6)。

また鉛直方向の誤差は図-2、図-3 を見ると、GCP1 点から収束が見られ、GCP 数を増やしてもほとんど変化が見られない。ステレオ計測では現地測量値に

比べ全体的に低い値が得られていたが、GCP5 点で補正後の図-7 でもその傾向が確認できる。

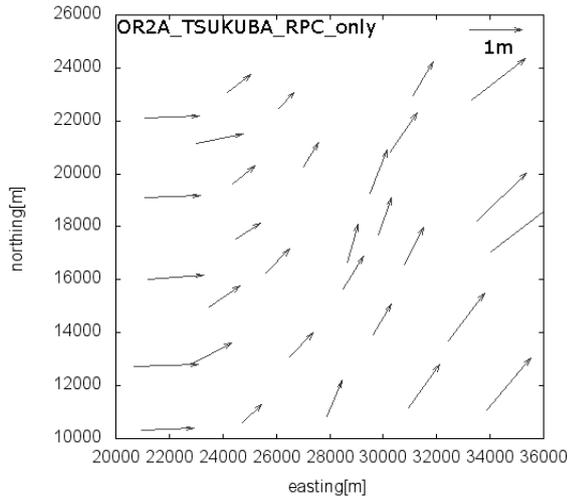


図-4 水平誤差ベクトル図 (つくば地区 : GCP0 点)

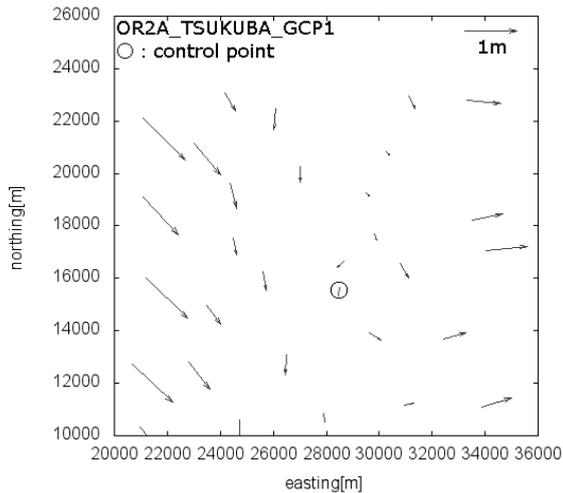


図-5 水平誤差ベクトル図 (つくば地区 : GCP1 点)

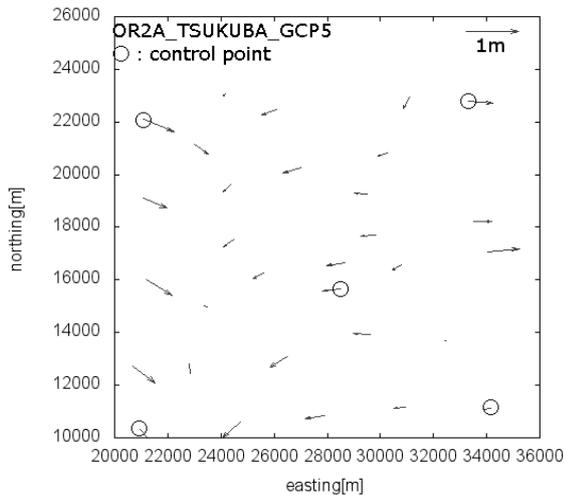


図-6 水平誤差ベクトル図 (つくば地区 : GCP5 点)

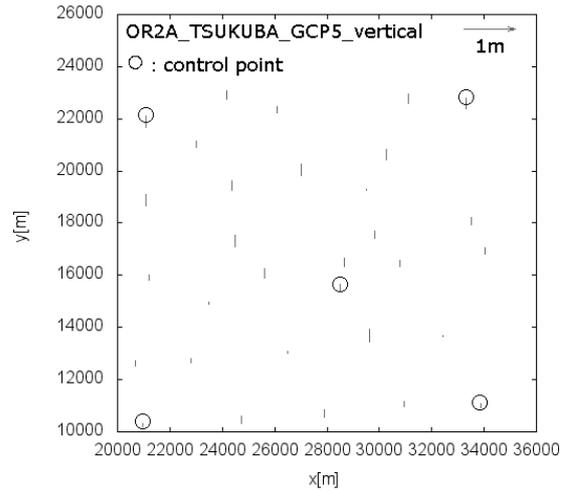


図-7 高さ誤差ベクトル図 (つくば地区 : GCP5 点)

画像の東西両端のみに GCP5 点の補正でも除去しきれない誤差が残る現象をさらに調べるため、GCP1 点,5 点を使用した場合について東西方向を横軸 (平面直角座標系 IX 系) とし東西方向の誤差を縦軸とした散布図 (図-8, 図-9) 及び、東西方向を横軸 (平面直角座標系 IX 系) とし南北方向の誤差を縦軸とした散布図 (図-10, 図-11) を作成した。

東西方向の誤差について GCP1 点の図-8 では、GCP のある画像の中心付近からラインセンサの両端方向 (東及び西方向) に向かうにつれて、東方向への誤差が大きくなることを確認できる。GCP5 点を用いた図-9 でも、全体を負の方向 (西) にシフトして RMSE を抑えてはいるが、一次の補正式では歪みを取り除けていないことがわかる。また、図-8 によると、一枚の画像内で北寄り、南寄りに関わらず同程度の東方向への誤差が確認できることから、ラインセンサやセンサモデルの傾きが要因として考えられる。一方、図-10 を見ると、画像中心から東及び西方向に向かうにつれて南北方向 (衛星進行方向) への誤差が拡大している。この歪みは GCP5 点を使ってアフィン補正をすることで改善される (図-11) ため、線形的な誤差であることが分かる。

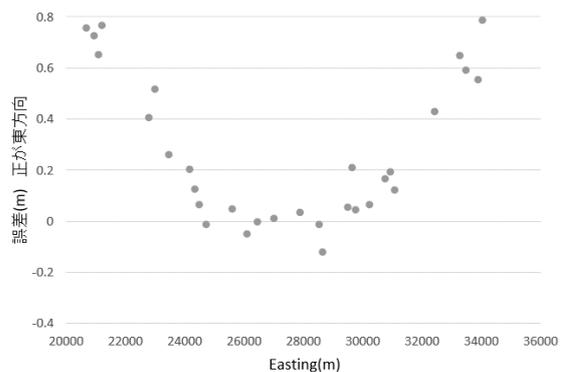


図-8 東西方向の誤差分布 (GCP1 点)

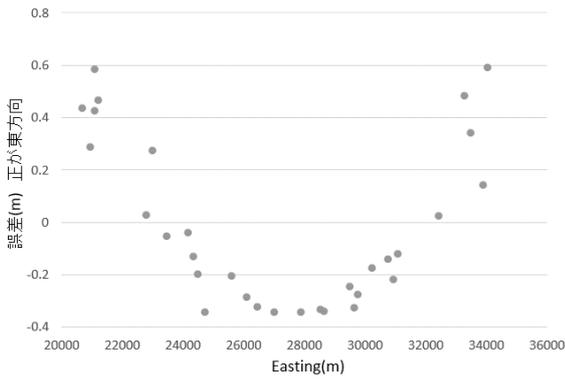


図-9 東西方向の誤差分布 (GCP5 点)

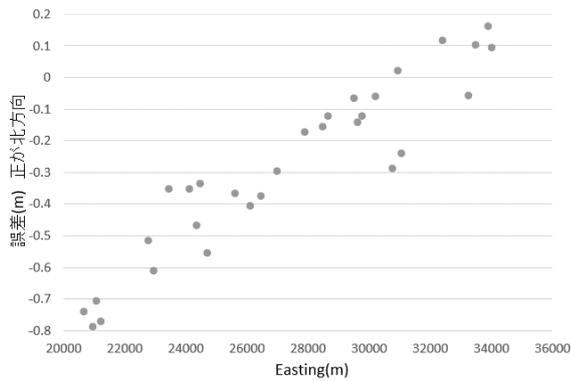


図-10 南北方向の誤差分布 (GCP1 点)

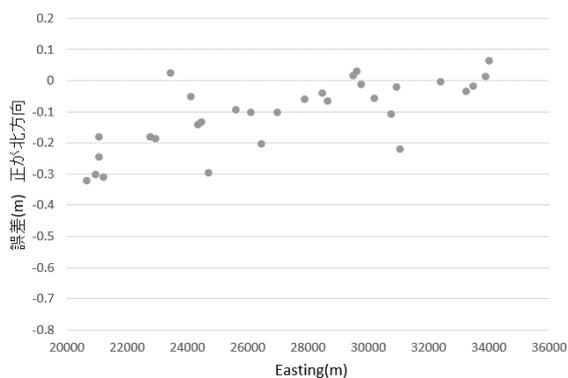


図-11 南北方向の誤差分布 (GCP5 点)

3.2 ステレオ画像の標定精度 (再評価)

画像の系統的な歪みについて、DigitalGlobe 社へフィードバックを行った結果、新たに補正された画像が提供された。以下、この補正後の画像を新補正画像、補正前の画像を旧補正画像という。

新補正画像 (OR2A) について再評価した結果、二次の歪みについて改善が見られ、前述の標定精度検証と同じつくば地区の評価サイトにおいてRMSEがGCP1 点(シフト)で水平 0.275m, 高さ 0.244m, GCP5 点(アフィン)で水平 0.150m, 高さ 0.109m とサブピクセルレベルに誤差が収まった。それぞれの誤差

ベクトル図を図-12～図-15 に示す。本検証では ERDAS Photogrammetry 上で検証点誤差を算出したため、ステレオ視による計測と全く同条件とは言えないが、過去に実施した他の高解像度衛星の検証結果から期待される標定精度が確認された。

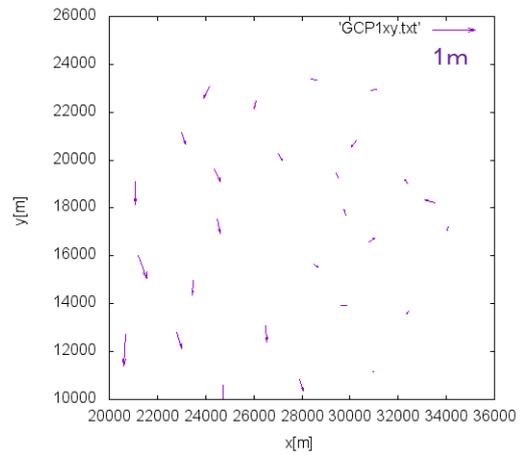


図-12 水平誤差ベクトル図 (新補正画像 : GCP1 点)

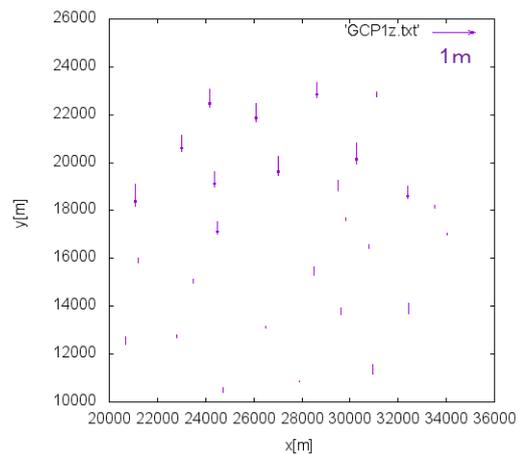


図-13 高さ誤差ベクトル図 (新補正画像 : GCP1 点)

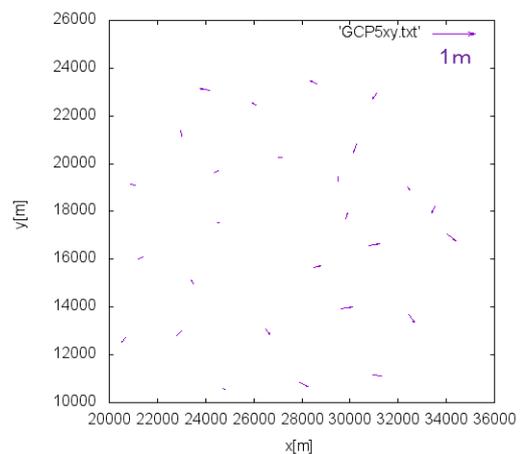


図-14 水平誤差ベクトル図 (新補正画像 : GCP5 点)

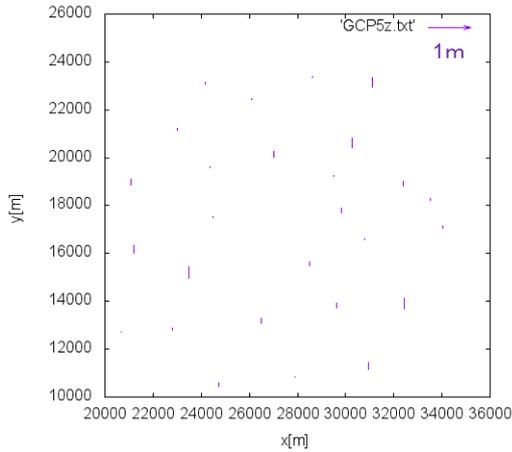


図-15 高さ誤差ベクトル図 (新補正画像 : GCP5 点)

なお、新旧補正画像の検証点における東西方向の誤差を比較したグラフを図-16 に示す。画像両端で見られた大きな誤差が解消され、RMSE, 最大値ともに小さくなった (図-17)。

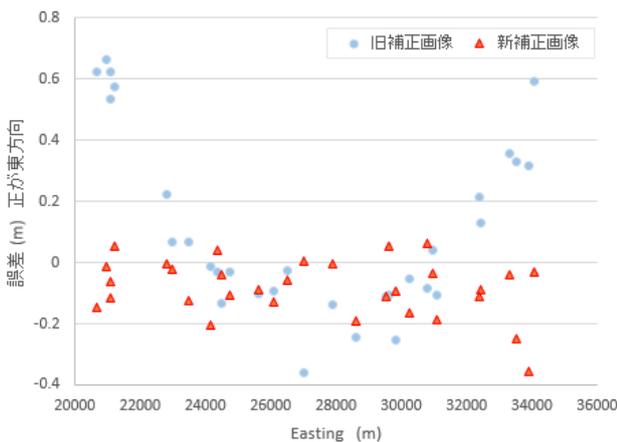


図-16 新旧補正画像の東西方向誤差 (GCP1 点)

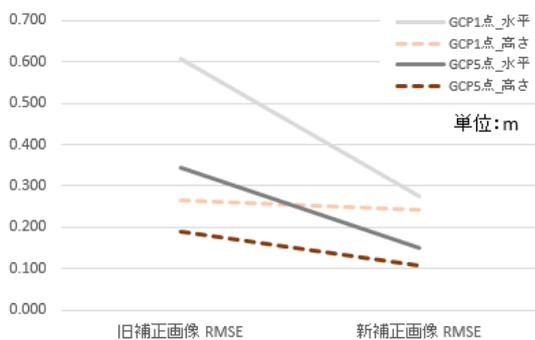


図-17 新旧補正画像の検証点誤差の比較

	GCP1点_水平	GCP1点_高さ	GCP5点_水平	GCP5点_高さ
旧補正画像 RMSE	0.606	0.267	0.344	0.189
新補正画像 RMSE	0.275	0.244	0.150	0.109
旧補正画像 MAX	1.258	0.450	0.638	0.426
新補正画像 MAX	0.441	0.215	0.055	0.063

3.3 オルソ画像の位置精度

続いてつくば地区と三浦地区のオルソ画像について、位置精度検証を実施した。元画像は OR2A を使用した。結果を表-2 に示す。

つくば地区 (オフナディア角 18.05°) では、基盤地図情報の 5m メッシュ DEM と 10m メッシュ DEM からそれぞれ作成したオルソの精度を比較した。GCP はどちらも 5 点を使用した。10m メッシュ DEM は等高線由来のデータであり、レーザ由来の 5m メッシュ DEM と比較して、較差が大きい。10m メッシュ DEM を使って作成したオルソ画像は、位置精度 1.06m であり、5m メッシュ DEM を使うと 0.59m に向上した。

また、三浦地区においてオフナディア角の小さい画像 (5.95°) を元に、GCP1 点と GCP5 点の場合の精度の違いを評価した。オフナディア角による誤差要因は、画像の中心付近において、つくばと比して 1/3 程度 (角度の tan に比例) であり (図-18), DEM も 5m メッシュを利用しているため、全般的につくばより精度が高い。GCP1 点の場合は 0.45m, GCP5 点の場合は 0.37m となり GCP を増やすことによりわずかに精度向上が見られた (表-2)。

表-2 オルソ画像の検証点誤差

地区名	GCP (点)	DEM (m)	XY RMSE (m)	検証点 (点)
つくば	5	5	0.59	26
	5	10	1.06	26
三浦	1	5	0.45	27
	5	5	0.37	27

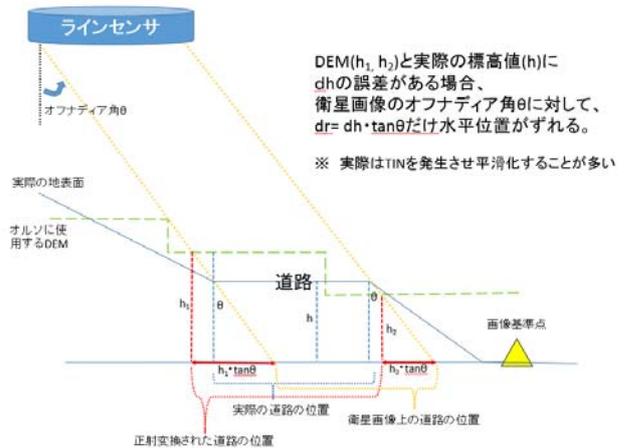


図-18 DEM の精度がオルソの位置精度に与える影響

つくばの結果より、オルソの精度は使用する DEM の精度に大きく依存することが分かる。また、オルソ作成に当たっては倒れ込みの影響を減らす面でも、位置精度を確保するためにも、直下に近い画像が望

ましい。オルソ図化の精度を確保するためには、精度の高い DEM を使うとともに、オフナディア角の制限を設けることが必要となる。

4. 図化精度の検証

4.1 水平位置精度の検証

図化データの水平位置精度の検証は、アークやポリゴン同士の比較となるため、ポイント同士を比較する標定精度検証に比べて、評価方法が確立されていない。ここでは、建物、道路縁の図化を行い、Pleiades 検証時の評価方法（藤原ほか, 2013）をもとにして、RMSE（真値とみなしたデータに対する正確さ）、標準偏差（ばらつき・精密さ）、平均値（偏り・シフト）、正解率（取得精度・異常率・欠損率）を使った評価を試みた。

Pleiades 検証時の方法は、図化データのうち、建物の角などを一部抽出して評価するものであったが、本研究では、図化データのアークないし、ポリゴンを構成する全点を対象とし、各点から最短距離にある同一地物の基盤地図情報座標との乖離を評価した（図-19）。ただし、全く相関のないベクトルデータと関連付けられることもあるため、各点のチェックを行い、誤りと思われるものについては取り除くか、正しいと認識される箇所へ対応付けを修正した。

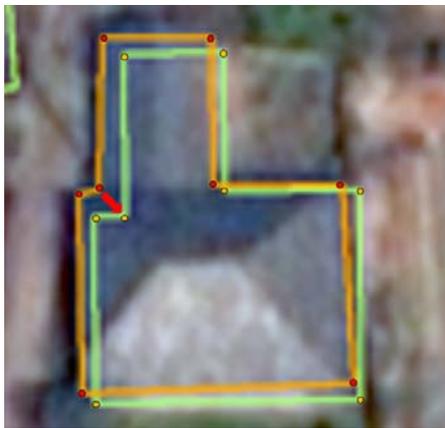


図-19 水平位置精度の検証例

4.1.1 つくば市栗原地区

つくば市栗原地区（図-20）において、パングロマチックステレオペア（以下「パングロステレオ」という。）とパンシャープンの単画像オルソ（以下「単画像オルソ」という。）を用いてそれぞれ図化を行った。図化の対象を道路縁と建物外周線に絞り、水平位置精度の検証を行った。ステレオペアは、対象地区を南北から挟み込むように取得されている。

結果を表-3 に示す。図化作業において単画像オルソは色情報があるため、パングロステレオよりも図化がしやすく、数値上でもそれが示された。

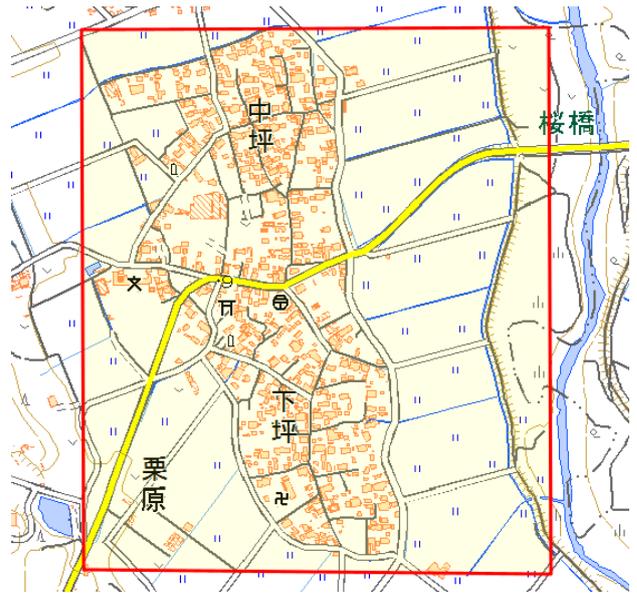


図-20 つくば市栗原地区

表-3 図化精度検証結果（つくば市栗原地区）

画像の種類	地物	RMSE (m)	標準偏差 (m)	比較した点数
単画像オルソ	道路縁	0.87	0.59	671
	建物外周線	1.70	1.11	444
パングロステレオ	道路縁	1.06	0.64	475
	建物外周線	2.37	1.26	292

道路縁は、パングロステレオ・単画像オルソともに判読できる部分については精度よく描画ができていたが、図-21 のように判読できていない部分が散見された。



- 図化データ (パングロステレオ使用)
- 基盤地図情報

図-21 図化データ（道路縁）

建物外周線は、パンクロステレオ図化ではステレオ視が難しく、正確な形状取得が困難な結果となった。要因は、B/H比が大きく過高感が強すぎることで、画像内の飽和している画素（白飛び）がステレオ視の妨げとなっていることである。また、色情報がないため建物が密集している場合に個々の建物を切り分けることが難しい（図-22）。一方、単画像オルソ図化は、色情報により判読性が向上するものの、建物の倒れ込みにより、形状を誤取得する可能性がある（図-23）。

地図情報レベルの高い図化を行うには、適切なB/H比とオフナディア角を選択するとともに、画像の明暗調整が必要であり、さらにできる限りパンシャープ画像を準備すべきである。

4.1.2 三浦地区

三浦地区では、直下視に近い画像を含んだステレオペアで図化を行い視線方向の違いを比較した。つくば地区と比べ、視差角がかなり狭まっており（B/H比は0.51）、ステレオ視はしやすい。しかし、本検証で用いた画像は、冬至に近い時期の撮影であったため、特に建物密集地では影の影響が大きい。その結果として、倒れ込みの影響が少なく明瞭に判読できる場合に限れば正確な取得ができた。しかし複雑な形状をした建物の取得は難しく、駐輪場などの無壁舎や倉庫、細かい路地などは判読できない場合があった。結果を表-4に、図化データの例を図-24、図-25に示す。

表-4 図化精度検証結果（三浦地区）

画像の種類	地物	RMSE (m)	標準偏差 (m)	比較した点数
単画像 オルソ	道路縁	1.06	0.73	744
	建物外周線	1.22	0.71	864
パンクロ ステレオ	道路縁	1.53	1.18	435
	建物外周線	1.57	1.24	652



図-22 パンクロ画像及び図化データ

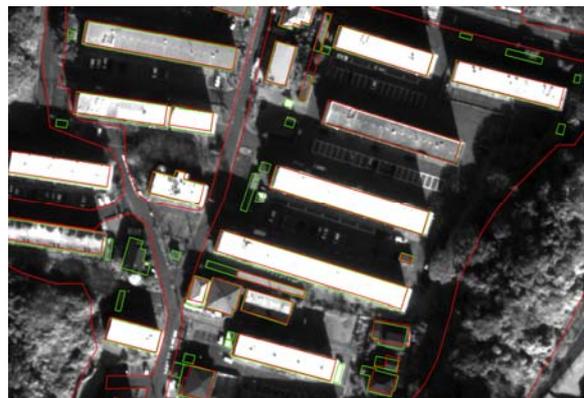
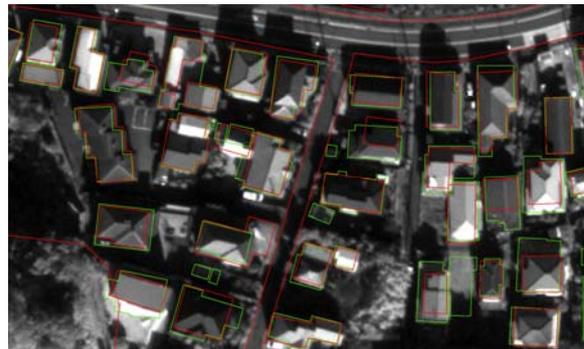


図-24 パンクロ画像及び図化データ

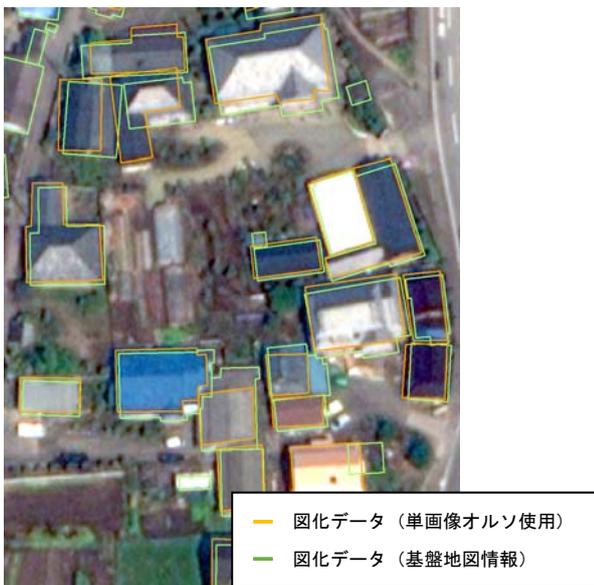


図-23 パンシャープ画像及び図化データ



図-25 パンシャープン画像及び図化データ

4.2 判読性（取得精度）の評価

衛星画像はセンサと地上の距離が長いため、仮に空中写真と同じ地上画素寸法を実現したとしても、大気中の水蒸気や浮遊物の影響により判読性が劣ることが多い。ここでは、Pleiades 検証時の分類方法(1. 正確に取得, 2. 形状の誤取得, 3. 個々の建物の誤分離, 4. 取得漏れ, の4分類)を用いて、代表的な地物である建物について取得精度を評価した。

4.2.1 三浦地区

建物の取得精度についての検証結果を表-5に示す。

表-5 図化取得精度検証結果（三浦地区）

画像の種類	正確に形状を取得	形状の取得ミス	個々の建物の誤分離	取得漏れ
単画像オルソ	66%	15%	7%	13%
パンクロステレオ	50%	31%	6%	13%
パンシャープンステレオ	56%	25%	8%	11%

サンプルが少なくそれほど明確な違いがないが、パンクロステレオによる図化が単画像オルソ図化に

劣後していることが読み取れる。取得精度をさらに議論するには、図化範囲を広げてサンプル数を増やすとともに、都市の高度利用地域や古くからの市街地といった複雑な地域を対象に加える必要がある。

4.2.2 影の補正について

三浦地区の検証に用いたステレオ画像は撮影時期が12月であり、影による影響が顕著であることから、影の補正について考察を行った。

WorldView-3 画像は11bit2048階調で情報を取得しており、影部分の階調差を引き伸ばすことで画像全体の判読性を向上させることが可能である。また、極端に輝度の高い部分があるとステレオ視の妨げとなり、精度低下の一因となるため、輝度の高いピクセルは押さえ込みながら、暗い部分のみを明るくする必要があります。こうした処理を試行した画像を図-26に示す。



図-26 影補正の例（上：補正前、下：補正後）

画像（上）では、山林や建物の影内部では判読が困難となっている。画像（下）では、階調を適切に引き伸ばすことにより、影で視認できなかった樹木の様子が確認でき、駐車場の白線の視認性も改善し

ている。また、一部の建物の屋上は、反射により面的に白く写り、詳細なテクスチャが判読できなくなっていたが、輝度値の高いピクセルを押えることで改善され、これによりステレオ視もしやすくなった。

本研究では限定されたエリアの色調調整を手動で行い、ある程度判読性を高めた画像を得ることができた。しかし実作業では、広範囲かつ多様な輝度差を持つ画像を扱うことになるため、画像調整の知見をより深める必要がある。リュウほか(2011)、鈴木ほか(2012)にあるように、ダイナミックレンジを活かした影部分の自動的な補正は、ステレオ図化における判読性や作業効率の向上の観点から研究・改善の余地がある。将来的には処理方法を定型化して機械的な処理が行えることが望ましい。

4.3 高さ精度の評価

近年打ち上げられている光学衛星は、撮影機会を増やす観点からポインティング機能が重視されており、様々なオフナディア角の画像が取得される。よってステレオペアのB/H比も多種多様となり、建物等高さを持つ地物の取得に影響を与える。このことを鑑み、本研究では3地区で図化した等高線を比較しながら研究を取りまとめた。

等高線の精度を評価する定量的な手法は、これまでの先行研究でも見られなかったため、ここでは航空レーザデータ(グラウンドデータ)を正解値とした等高線の精度評価方法を考案した。具体的には、図化した等高線からバッファを発生させ、そのバッファ内に落ちる航空レーザの点群データを集計することにより、等高線の精度を評価する(図-27)。バッファを広く取ればサンプル数が増えるが、一方で真値から遠い点も拾うことになる。今回は急傾斜地形であっても誤差が抑えられる50cmのバッファを発生させた。この場合、傾斜45度の斜面では真値が±50cmとなるため、この誤差を内包する。

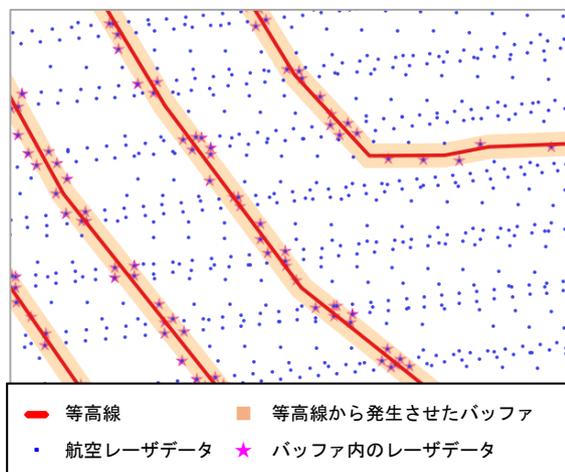


図-27 高さ精度の評価方法

4.3.1 つくば地区

山間部での高さ精度の評価を実施するため筑波山頂付近での等高線図化を実施した。まず、図-28 右赤枠内(山頂エリア)において等高線図化を実施した。正解値として、公共測量成果(H21C0001)の航空レーザデータ(グラウンドデータ)を用いた。



図-28 つくば地区等高線検証範囲

山頂エリアでは過高感が強すぎて全体的にステレオ視が困難であった。これは傾斜が急な場所ほど顕著である。今回使用したステレオペアはB/H比0.75であり、傾斜が20度を越すような傾斜地の図化に対してはB/H比が大きすぎると言える。そのため等高線の精度は、25000レベルの精度(RMSE:5m)も満たせない結果であった(表-6)。また、図-29に、各等高線バッファ内にある航空レーザデータを、精度ごとに色分けして表示した図を示す。凡例の数値は、「等高線の標高値-航空レーザデータの標高値」である。よって、暖色系の点は、真値より高く等高線を取得したことを表し、寒色系の点は低く等高線を取得したことを表す。つまり、標定に誤差がないとすれば、暖色系の地点は、地面から浮かせて等高線を描画したことを表し、寒色系の地点は地面より沈めて等高線を描画したことを意味する。

表-6 山頂エリア等高線精度(WorldView-3)

等高線標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏差 (m)	RMSE (m)	点数
870m	862.7	872.9	857.6	5.5	9.1	26
860m	860.3	862.8	858.5	1.2	1.2	27
850m	851.4	868.2	838.3	7.9	8.0	92
840m	840.9	871.8	824.9	9.9	9.9	149
830m	832.3	860.4	812.5	10.2	10.5	195
820m	816.2	845.2	800.6	8.2	8.8	337
810m	804.8	823.7	784.3	7.3	8.2	335
800m	792.1	803.2	776.5	6.6	9.3	443

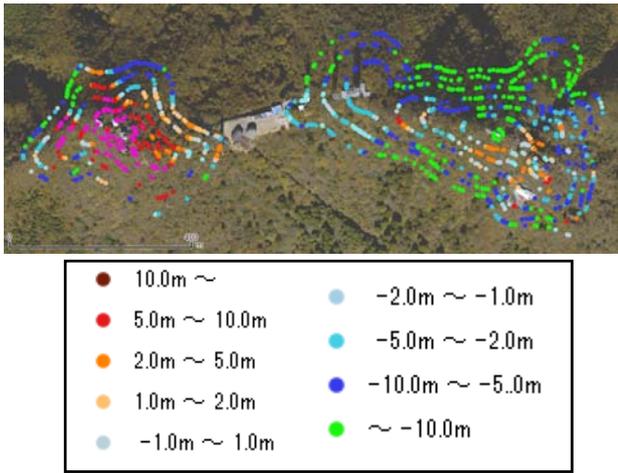


図-29 山頂エリア等高線精度分布 (WorldView-3)

なお、基盤地図情報 25000 レベル (以下「基盤地図 25000」という.) の等高線について、同じ検証を実施したところ結果を、表-7 及び図-30 のとおりである。木々に覆われた箇所を地表面を描く等高線は、作業者の知識、技量、経験に拠るところが大きい。このようは場所では、図化精度を評価することが難しい。

表-7 山頂エリア等高線精度 (基盤地図 25000)

等高線標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏差 (m)	RMSE (m)	点数
870m	864.0	870.9	847.1	4.9	7.7	42
860m	856.5	862.6	848.2	3.7	5.0	48
850m	847.1	859.5	832.9	6.4	7.0	107
840m	837.4	847.9	821.7	6.0	6.5	145
830m	828.5	838.8	811.7	5.7	5.9	197
820m	818.9	830.7	805.9	5.0	5.1	235
810m	809.3	820.2	796.5	4.3	4.3	333
800m	799.6	814.5	784.7	4.2	4.2	391



図-30 山頂エリア等高線精度分布 (基盤地図 25000: 凡例は図-29 参照)

山頂エリアの結果から、図化精度を検証する場所選定の重要性を再認識したため、地表が高い木々に遮られておらずかつ緩傾斜の山麓エリア (図-28 参照) を設定し、同様の図化と精度検証を実施した。結果を、表-8 及び図-31 に示す。山頂エリアの図化

に使用したのと同じのステレオペア (B/H 比 0.75) であるが、緩傾斜のためステレオ視がしやすかった。ここでは地図情報レベル 2500 の精度 (RMSE : 1m) をほぼ満たす等高線が得られた。

表-8 山麓エリア等高線精度 (WorldView-3)

等高線標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏差 (m)	RMSE (m)	点数
42m	42.0	43.8	40.7	0.5	0.5	467
40m	39.3	40.7	37.4	0.7	1.0	512
38m	37.8	38.9	36.4	0.3	0.4	528
36m	35.6	36.8	33.0	0.7	0.8	369
34m	33.8	34.8	32.4	0.4	0.5	354
32m	31.9	33.1	30.7	0.5	0.5	419
30m	29.6	30.8	27.4	0.6	0.7	323



図-31 山麓エリア等高線精度分布 (WorldView-3: 凡例は図-29.参照)

比較として基盤地図 25000 の等高線の検証 (表-9 及び図-32) や、デジタル航空カメラ (UCX) による空中写真から図化した等高線の検証 (表-10 及び図-33) を行ったが、WorldView-3 の画像による等高線の標準偏差、RMSE は、これらと比較しても同等以上の精度を確保していることが確認された。

表-9 山麓エリア等高線精度 (基盤地図 25000)

等高線標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏差 (m)	RMSE (m)	点数
40m	38.3	40.2	36.8	0.5	1.8	314
30m	28.5	31.2	28.1	0.6	1.6	191



図-32 山麓エリア等高線精度分布（基盤地図 25000：凡例は図-29 参照）

表-10 山麓エリア等高線精度（UCX）

等高線 標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏 差 (m)	RMSE (m)	点数
42m	42.9	44.8	41.7	0.4	1.0	162
40m	41.3	42.8	39.6	0.8	1.5	253
38m	38.8	40.7	37.2	0.6	1.0	549
36m	37.1	38.2	36.1	0.4	1.1	466
34m	35.4	36.6	33.1	0.5	1.5	470
32m	33.1	34.4	31.4	0.4	1.1	457
30m	31.1	32.4	29.3	0.5	1.2	385



図-33 山麓エリア等高線精度分布（UCX：凡例は図-28 参照）

4.3.2 箱根地区

傾斜がありかつ植生に覆われていないエリアの等高線精度を評価するために、箱根地区の鞍掛山周辺のエリアの等高線を図化した。使用した衛星画像は、対象地区を北東及び南東から撮影したパングロステレオペアである。当地区は大半が森林と草地に覆われており、地形は起伏に富んでいる（図-34、図-35）。



図-34 箱根地区図化範囲



図-35 箱根地区図化範囲

この地区の標高 850m 以上について 10m 間隔で等高線を取得し、さらに北西部にあるゴルフ場内は芝生が広がり地表面を確実に観測できるため 2m 間隔で等高線を取得した。図化作業時間は 12 時間ほどである。なお正解値とする航空レーザデータは公共測量成果 (H21E0012) のグラウンドデータを用いた。つくば地区山頂エリアと比較すると、B/H 比が 0.47 とつくば地区に比べて小さいため、ステレオ視はし

やすかった。

今回図化した全体の等高線（10m 間隔）の RMSE は、0.8～3.9m であった（表-11）。地図情報レベル 25000 であれば十分な精度である。

また、ゴルフ場を対象とした等高線（2m 間隔）の精度を、表-12 に示す。

表-11 箱根地区等高線精度（全体：WorldView-3）

等高線 標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏 差(m)	RMSE (m)	点数
1000m	999.5	1001.2	997.5	0.6	0.8	275
990m	989.5	992.0	983.0	1.5	1.6	467
980m	978.7	981.6	971.9	2.4	2.7	576
970m	969.7	973.9	962.0	2.5	2.5	814
960m	959.0	965.7	951.2	2.0	2.3	1429
950m	948.6	960.0	940.8	2.6	3.0	2358
940m	938.1	943.9	928.7	2.5	3.1	2619
930m	928.1	933.4	914.0	2.6	3.2	2563
920m	918.2	924.9	905.6	2.8	3.4	2965
910m	907.9	915.4	889.1	3.3	3.9	2776
900m	899.1	906.3	875.1	3.8	3.9	5887
890m	889.7	895.4	875.5	2.7	2.7	9177
880m	879.9	888.4	867.4	2.6	2.6	10573
870m	869.3	875.6	857.7	3.1	3.2	5631
860m	860.3	863.2	853.0	1.4	1.4	996

表-12 箱根地区等高線精度（ゴルフ場：WorldView-3）

等高線 標高値	平均 (m)	最高 (m)	最低 (m)	標準偏 差(m)	RMSE (m)	点数
908m	908.5	909.2	907.8	0.3	0.6	394
906m	906.8	907.4	906.2	0.2	0.9	719
904m	904.9	905.7	904.0	0.3	1.0	1005
902m	902.8	903.8	902.0	0.3	0.8	772
900m	900.8	901.5	900.0	0.2	0.8	978
898m	898.9	900.1	897.5	0.5	1.0	1119
896m	896.9	897.8	895.6	0.4	1.0	1734
894m	895.0	896.3	893.7	0.5	1.1	1509
892m	892.9	893.9	892.0	0.3	0.9	1615
890m	891.0	892.0	890.2	0.3	1.0	1887
888m	888.9	889.7	888.2	0.2	0.9	1529
886m	887.0	887.7	886.3	0.2	1.0	1119
884m	885.1	885.9	884.5	0.3	1.2	492
882m	883.5	884.2	882.7	0.3	1.5	412
880m	881.5	882.4	881.2	0.2	1.6	401

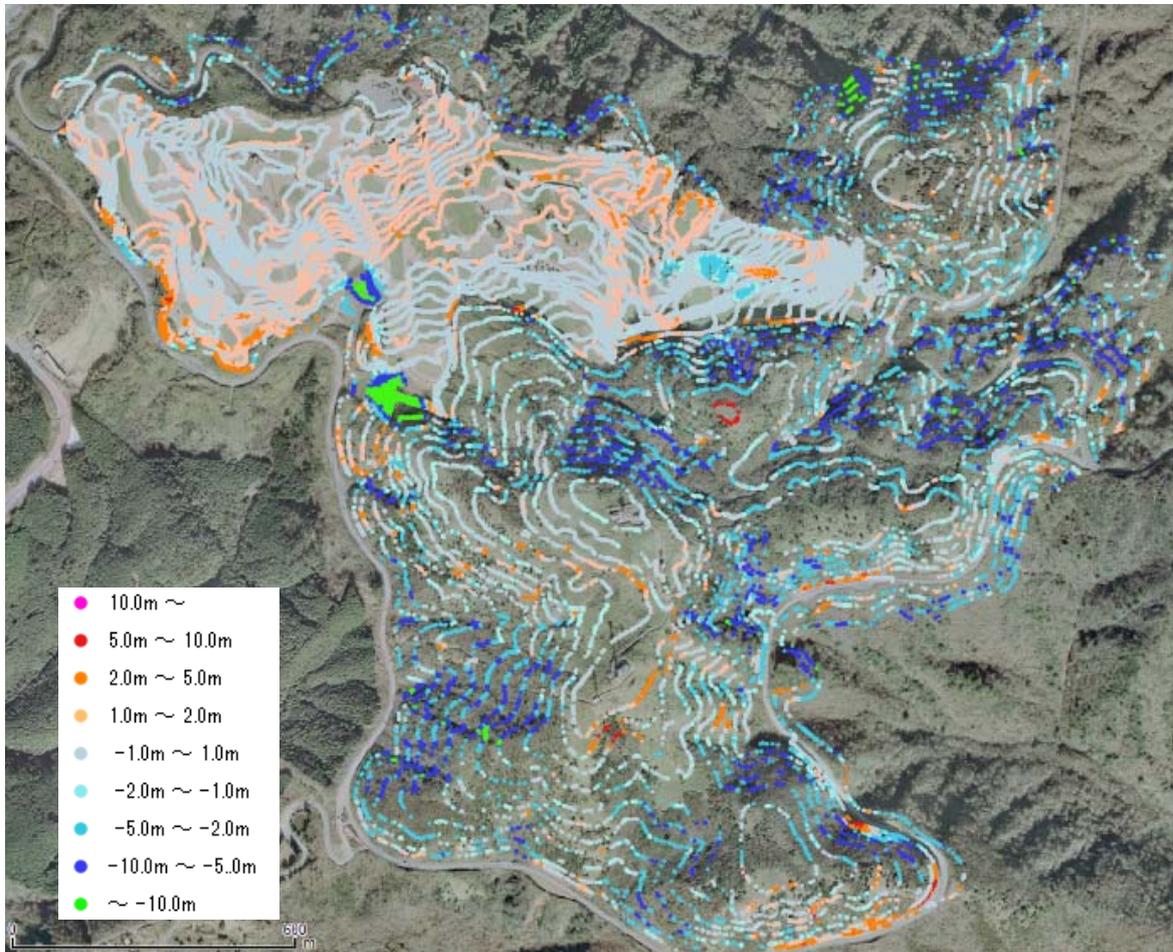


図-36 箱根地区等高線精度分布 (WorldView-3)

ゴルフ場内は地表面をほぼ確実に観測できるため RMSE が 1m前後に収まっており、地図情報レベル 2500 の精度をほぼ満たしている。さらに標準偏差（バラつき）は 0.5m以下となっており、図化のしやすさも高いことがわかる。標準偏差に比べて RMSE が大きいのは作業者が全体的に高めに等高線を取得していることが影響しているが、ゴルフ場のフェアウェイはかなり明るく（輝度が高く）写っており、こうした場合はメスマークを地上から浮かせて図化しがちになる。図-36 に、今回取得したすべての等高線（10m 間隔及び 2m 間隔）のバッファに含まれるレーザ標高値との差分を示す。この図から、樹木下の等高線は明らかに精度が低下していることが確認できる。全体的に今回の作業者は樹木下の等高線を低めに取得している傾向があるが、それを考慮しても、影になる北向きの斜面ではさらにメスマークを沈めすぎていると見受けられ、影の部分のステレオ視が難しいことの表れと考えられる。

なお、ゴルフ場の南方に大きな較差が生じている箇所があるが、現地調査時に当該エリアに重機が入って工事を行っていたため、人工的な地形改変によるものと思われる。等高線 892~898m の標準偏差及び RMSE が若干悪いのは、この影響を受けている。

5. おわりに

5.1 標定精度に関する考察

WorldView-3 のステレオペア画像を複数の条件で標定して位置精度の評価を行った結果、当該衛星画像が地図情報レベル 2500 を満たす高い精度を有していることを確認した。またその検証過程で画像に系統的な歪みがあることを検出し、ベンダーにフィードバックした。ベンダーにより再キャリブレーションされた画像で再検証したところ、系統的な歪みが解消され、水平位置の RMSE が 0.15m (0.5pixel 以下)・高さの RMSE が 0.11m となり、これまでに検証した衛星と同等以上の標定精度が得られた。

表-13 高分解能衛星の精度検証結果まとめ

衛星名 出典	地区	画像	オフナ ディア角 (°)	GSD (m)	ステレオ ペア	B/H 比	GCP	XY RMSE (m)	Z RMSE (m)
Pleiades 藤原ほか(2013)	つくば	前方	22.6	0.7	前-下 下-後 前-後	0.53	1	0.34	0.48
		直下	6.4	0.7		0.58	1	0.47	0.58
		後方	25.3	0.7		0.89	1	0.33	0.26
WorldView-2 井出ほか(2011)	つくば(南)		13.3	0.48		0.89	1	0.40	0.38
			34.4	0.66		5	0.41	0.25	
	三浦	0.4	0.46	0.56		1	0.43	0.33	
		29.8	0.62	5	0.26	0.46			
GeoEye-1 井出ほか(2011)	つくば		11.5	0.43		0.62	1	0.59	0.80
			20.6	0.47		5	0.39	0.76	
	三浦	10.1	0.42	0.66		1	0.25	0.35	
		25.4	0.51	5	0.26	0.34			
WorldView-3 (本研究)	つくば	T1	25.77	0.37		0.75	1	0.61	0.27
		T2	18.05	0.34		5	0.34	0.19	
	つくば(再)	T1	25.77	0.37		0.75	1	0.28	0.24
		T2	18.05	0.34		5	0.15	0.11	
	三浦	M1	5.95	0.31		0.51	1	0.46	0.24
		M2	27.68	0.38		5	0.23	0.11	

表-13 に先行研究を含めた高分解能衛星画像の標定精度検証結果を示す。全体的に、地上画素寸法が向上するに連れて位置精度も向上しており、特に高さ精度の向上が顕著である。

5.2 図化精度と判読性に関する考察

建物、道路縁の図化を行い、基盤地図情報との比較により、RMSE (真値とみなしたデータに対する正確さ)、標準偏差 (ばらつき・精密さ)、平均値 (偏り・シフト)、正解率 (取得精度・異常率・欠損率) を指標とした図化精度検証を実施した。また、色情報の有無も影響を与えることから、パンシャープン画像を利用した図化も実施した。その結果、明瞭に判読できる地物においては、地図情報レベル 2500 に前後する水平位置精度が得られた。一方で判読性が悪く形状を誤取得したり、そもそも地物を取得できなかったりといった事例が散見された。つまり標定精度は十分に確保されているため、平面位置の図化精度は「明瞭に見えるかどうか」に依存する。

また、等高線の高さ精度も、地表面が観測できる場合において、ほぼ地図情報レベル 2500 を満たす精度が得られた。その反面、影や飽和している画素（白飛び）があるとステレオ視の妨げとなり図化が困難になる。よって、等高線の高さ精度も判読性に左右される。なお、三浦地区のステレオペアは、うち一枚がほぼ直下視の画像であったため、建物形状の取得に有利に働いた。

5.3 B/H 比に関する考察

本検証で標定・図化を担当した複数の職員は何れも過高感の強さを感じた。一般に、衛星によるステレオペア画像は、航空写真に比べて B/H 比が大きい。例えば、デジタル航空カメラ UCX による 60%オーバーラップ画像の B/H 比は 0.27, 70%で 0.20 程度であるのに対して、今回のつくば地区の画像は B/H 比 0.75 とかなり大きいため、高い建物や傾斜率の高い地形において、ステレオ視が困難であった。箱根地区の等高線精度検証では、B/H 比 0.47 のステレオペアで、傾斜 10 度未満のゴルフ場内の等高線を十分な精度で図化できることを確認した。この程度の B/H 比ならばステレオ視もかなりしやすいので、精度を確保しつつ図化作業もしやすいという点から、理想的な B/H 比として 0.5 前後というのが、一つの目安になると思われる。

5.4 今後の課題

標定精度は地図情報レベル 2500 をほぼ満たす精度が得られたものの、図化精度は判読性に大きく依存し、現状では安定して地図情報レベル 2500 を満たすことが難しい。図化精度が判読性に依存するの

は空中写真も同様だが、空中写真では同じ地点を別のモデルで補完できる可能性が高いのに比べて、衛星写真はそのペアで見えなければ図化できない。また衛星画像は大気等の影響で同じ地上画素寸法の空中写真と比較しても判読性に劣ることが多いため、画像補正の重要性がより高いことを認識しなければならない。安定して図化精度を確保するためには、影や色調が適切に補正された画像がベンダーから提供されることが望ましく、また利用者側も画像処理についてより高い知識や経験を蓄積する必要がある。

ALOS や Pleiades といった複数センサでステレオペアを取得する衛星と異なり、WorldView-3 はポインティングによりステレオペアを獲得する衛星である。この方式は理想的なステレオペアの取得という

観点からは不利であるものの、任意の地点を狙える可能性が高まることや、センサが一台で済むことから衛星を小型化できる（または他のセンサを搭載できる）メリットがあり、2020年にJAXAが打ち上げを予定している先進光学衛星もポインティング方式を採用している。今後、ポインティングにより取得したステレオペアを利用する機会が増加することが予想されることから、どの程度のオフナディア角までなら標定・図化精度に支障がないのかや、別のパスからのステレオペア画像（クロストラックステレオペア）の精度などについて、検討を行う必要がある。

（公開日：平成29年9月22日）

参考文献

- 藤原博行, 瀧繁幸, 大塚力, 大野裕幸 (2013) : Pleiades 画像を用いて作成した地図情報の精度評価, 国土地理院調査研究年報 (平成25年度), 66-69.
- 早坂寿人, 瀧繁幸, 山田美隆, 大野裕幸, 筒井健, 市川真弓 (2016) : WorldView-3 のステレオペア画像を用いた標定精度検証, 日本写真測量学会平成28年度年次学術講演会発表論文集, 37-40.
- 井出順子, 渡部金一郎, 石関隆幸, 大野裕幸 (2011) : 地上画素寸法 0.5m以下級衛星画像の標定及び図化の精度検証, 国土地理院調査研究年報 (平成23年度), 59-62.
- 小泉佑太, 檀上拓也, 磯部浩平, 嶋野雄一, 鎌形哲稔, 日置和之, 筒井健, 竹田宏之 (2015) : WorldView-3 ステレオペア画像を用いた数値地形図作成のための精度検証, 日本写真測量学会平成27年度秋季学術講演会発表論文集, 139-142.
- 近藤弘崇, 高岸且, 寶楽裕 (2015) : WorldView-3 ステレオ画像によるレベル2500地形図作成の実用化に向けた精度検証, 日本写真測量学会平成27年度秋季学術講演会発表論文集, 143-144.
- リュウ・ウェン, 山崎文雄 (2011) : 高解像度衛星画像における日影の抽出と補正法の提案, 日本土木学会論文集D3 (土木計画学), 67 (3), 359-366.
- 鈴木英夫, 近津博文 (2012) : 高ダイナミックレンジデジタル航空カメラ画像における影領域補正手法の検討, 写真測量とリモートセンシング, 51 (4), 180-185.