

西之島噴火に伴う測量用航空機「くにかぜ」による
空中写真撮影並びに数値標高モデル及び正射画像作成
Aerial Photography of Nishinoshima Island by the survey aircraft “Kunikaze”
and DEM and Orthophoto generation in response to its volcanic eruption

基本図情報部

甲斐 納・小澤安二・佐藤 忠¹・畠山真介・瀧 繁幸・藤原博行²

National Mapping Department

Osamu KAI, Yasuji OZAWA, Tadashi SATO, Shinsuke HATAKEYAMA,
Shigeyuki TAKI and Hiroyuki FUJIWARA

要 旨

国土地理院は、測量用航空機「くにかぜⅢ」により、平成25年12月4日、12月17日、平成26年2月16日の3回にわたり小笠原諸島西之島の空中写真撮影を実施し、撮影した空中写真等を用いて外部標定要素の算出、数値図化、数値標高モデル（以下「DEM」という。）作成、正射画像作成を行った。

本稿では、西之島の空中写真撮影、正射画像作成を通じて、標定点の設置が困難な離島において同様の業務を行う場合の留意すべき事項や関連するデータを得たので報告する。

1. はじめに

平成25年11月20日に小笠原諸島西之島の南南東約500mの海域において噴火が確認された新島は、拡大を続けその後西之島と一体化した。国土地理院は、噴火2週間後に新島の測量用航空機による空中写真を撮影したことを皮切りに、その後2回の撮影を実施した。

西之島は、現在（平成26年7月16日時点）も噴火活動中で立ち入りが制限されているため、現地において標定点の設置や潮位観測が実施できない。また、近隣には他の島が存在せずTS（トータルステーション）等による目視観測も不可能である。さらに、ジオイドモデルが作成されていないため、高さの基準を定めることができない。

撮影には国土地理院が保有する測量用航空機「くにかぜⅢ」（セスナ社製208B型、写真-1）を使用した。くにかぜⅢはGNSSとIMUを搭載しており、遠隔地であっても自身の位置と姿勢を導き出すことができる。また、使用するデジタル航空カメラの解像度が高いことから、撮影地点の位置・高さの基準が得られれば詳細な地形を図化することが可能である。

今回、以下に述べる手法により空中写真撮影を行い、外部標定要素・ジオイド高を求め正射画像を作成するとともに、数値図化によりDEMを作成することができた。また、3時期のDEMを作成したことにより西之島の体積変化等についても明らかにすることができた。



写真-1 測量用航空機「くにかぜⅢ」

2. 空中写真撮影

2.1 撮影の計画

国土地理院では、離島を含む全国を対象に国土管理及び地理空間情報整備に資する空中写真撮影を定期的に行っている。平成25年度は小笠原諸島を含む約20,000km²を計画し、小笠原諸島は12月に撮影を実施することとしていた。撮影対象地区の位置を図-1に示す。

小笠原諸島は本州からおよそ900kmに位置し、一般に使用できる空港施設が存在しないため通常の飛行計画では撮影業務が困難である。このため、防衛省の協力の下、海上自衛隊硫黄島航空基地を飛行拠点として、限られた作業期間の中で効率的な撮影業務が展開できるよう撮影計画を立案した。

その際、西之島では火山活動の活発化に伴い新島が出現し、その後も島嶼形状が大きく変化したため、あわせて同島の経年変化情報の収集を目的として翌年2月にも繰り返し撮影を実施することとした。また、同島に関しては垂直写真の撮影に加えて、手持ちカメラによる斜め写真の撮影も実施することとした。



図-1 平成 25 年度小笠原諸島撮影対象地区の位置



図-2 垂直写真 (H25.12.4撮影)
地上画素寸法20cmを縮小

2.1.1 防衛省との調整

国土地理院の測量用航空機による小笠原諸島での空中写真撮影は、2万5千分1地形図の全国整備終盤期で離島地域の撮影を進めていた昭和50年代(小笠原諸島は昭和51年、53年に撮影)以来、実に35年ぶりとなった。

撮影を実施するにあたり平成24年度より防衛省へ協力の要請を行い、協力体制が得られたため、海上自衛隊硫黄島航空基地を飛行拠点とするとともに、硫黄島までの機材輸送、島内滞在中の宿泊及び給食等の支援を受けた。これらにより、小笠原諸島地区での空中写真撮影が可能となった。

2.1.2 コース設計

小笠原諸島の垂直写真撮影は、離島地域の撮影基準である数値写真レベル10000(地上画素寸法20cm)でコース設計を行った。実施予定の12月時点で新島が出現していた西之島についてはより詳細な情報を得るため数値写真レベル5000(地上画素寸法10cm)でのコース設計も行った。また、その後の西之島の経年変化情報を収集するため、2月には数値写真レベル6000(地上画素寸法12cm)によりコース設計を行った。

全撮影とも撮影コースは南北方向、コース数は数値写真レベルに応じて1～2コースとした。また、後続作業の正射画像作成が効率的に実施できるように隣接写真との重複度を80パーセント(通常60パーセント)で設計した。



図-3 垂直写真 (H25.12.17撮影)
地上画素寸法10cmを縮小



図-4 垂直写真 (H26.2.16撮影)
地上画素寸法12cmを縮小

2.2 西之島の空中写真撮影

西之島の火山活動の変化状況を正確に把握することを目的に、3回（平成25年12月4日：レベル5000及び10000、12月17日：レベル5000、平成26年2月16日：レベル6000）空中写真撮影を実施した。このほか2月25日には作業終了に伴う復路飛行の際に西之島を経由し4回目の撮影を試みたが、噴煙の影響により島の一部しか撮影できなかった。

今回の垂直写真の撮影では、デジタル航空カメラはVexcel社製UltraCamX、GNSS/IMUはApplanix社製のPOS AV/510を使用した。UltraCamXは複合型センサによりパナクロマティック、可視帯域、近赤外帯域を同時に撮影することが可能である。

撮影編成は、操縦士、副操縦士、整備士（くにかぜⅢの運航管理を行う委託事業者）を各1名とし、撮影士は国土地理院から2名配置した。

くにかぜⅢの前進飛行は、本拠飛行場である調布飛行場（東京都調布市）から伊豆諸島・八丈島空港（燃料補給）を経由し、硫黄島航空基地に至る順路とした。また、西之島の撮影は拠点とする硫黄島航空基地から日帰り（片道約1時間）で実施した。

空中写真撮影に際しては、垂直写真（図-2～図-4）のほかに、噴煙規模及び火山活動の影響による地形変化等の情報を俯瞰的に捉えるため、手持ちカメラ（Canon社製EOS-5D-MarkⅡ及びEOS-60D）による斜め写真（図-5～図-6）の撮影も実施した。



図-5 斜め写真（H25.12.17撮影）



図-6 斜め写真（H26.2.25撮影）

撮影した空中写真の情報からは、12月時点の新旧二島に分かれていた状況が、年明け2ヶ月後には両島が接続し巨大化した様子や噴煙規模の変化が読み取れるなど、あらためて火山活動における繰り返し撮影の有効性が確認できた。

2.3 外部標定要素の算出

国土地理院が実施する空中写真撮影では、撮影時の正確なカメラ位置及び姿勢を算出するため、デジタル航空カメラと併せてGNSS/IMU装置を用いている。GNSS/IMUの観測データの解析においては、干渉測位によるGNSSのキネマティック解析を行うこと、具体的には移動局である航空機に対し固定局としてGNSS基準局を設置し同時観測を行うことが必要である。

GNSSの観測データには電離層及び対流圏等による誤差が含まれることから、これらの誤差を補正するためにGNSS基準局を撮影地の近傍に設置する必要がある。実際には、噴火により上陸不可能な西之島はもとより、西之島近傍にもGNSS基準局を設置できないことから、やむなく最も近い父島及び母島の電子基準点をGNSS基準局として解析を行うこととした（図-7）。

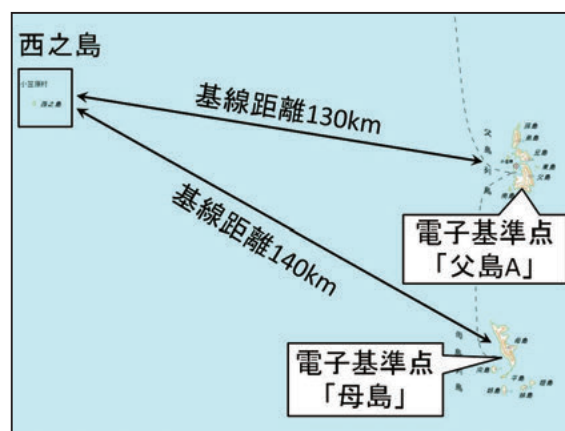


図-7 西之島とGNSS基準局との距離

電子基準点をGNSS基準局とし、撮影位置の解析を行ったが、解析に用いたGNSS基準局間の基線距離がデジタル空中写真撮影作業要領の制限値（70km以内）を超過したことから、電離層及び対流圏の誤差を排除できないため、最適な解を得ることが出来なかった。このため、外部標定要素に誤差があり、西之島の位置が1m程度の誤差を含む可能性がある。

3. 正射画像（簡易オルソ画像）作成

正射画像の作成には、西之島及び新島の空中写真、GNSS/IMUより算出した外部標定要素及び新規に作成した50mDEMを用いた。作成の方法は基本図情報部の「災害デジタルオルソ作成作業マニュアル」に準拠し、平成25年12月4日、12月17日、平成26年2月16日の計3日分について高解像度（地上画素寸法10cm）と低解像度（地上画素寸法40cm）の2種類の正射画像を作成した（表-1）。

表-1 作成した正射画像（簡易オルソ画像）の諸元

撮影日	数値写真レベル	写真枚数	正射画像 (地上画素寸法)
H25.12.4	5000	20	10cm
			40cm ^{※1}
H25.12.17	5000	10	10cm
			40cm ^{※1}
H26.2.16	6000	11	10cm ^{※2}
			40cm ^{※1}

※1地上画素寸法40cmの正射画像は10cmの正射画像を縮小して作成。

※2使用した空中写真は地上画素寸法12cm。

3.1 ジオイド高による外部標定要素の補正と50mDEMの作成

西之島の空中写真撮影では、GNSS/IMUの解析により得られた外部標定要素（X, Y, Z, ω , ϕ , κ ）のうち撮影高度（Z）は標高ではなく楕円体高で与えられていた。撮影高度が楕円体高のままでは正確に正射変換できないことから、ジオイド高を推定して撮影高度を標高に補正する必要があった。

また、国土地理院の災害時における正射画像作成では50mDEMを用いて空中写真を正射変換している。しかし、西之島の新島部分については50mDEMが整備されていないため、新規に50mDEMを作成する必要があった。

3.1.1 ジオイド高の推定

西之島は現時点ではジオイドモデルが整備されておらず、正確なジオイド高は不明である。

一般的に、離島における高さの基準は、験潮により潮位を観測して決定している。しかし、火山活動が活発な状況にある西之島において現地観測を実施することは不可能なため、撮影時のGNSS/IMUの楕円体高を利用して基準となる高さを推定した。

具体的には、GNSS/IMUより算出した楕円体高による外部標定要素をもとに、一時的にデジタルステレオ図化機（以下、「図化機」という。）により空中写真を標定し、海水面の高さを計測した。標高では海水面の高さは0mであるため、その高さの差分が

ジオイド高にあたると推定した。

ただし、実際には海水面の実体視は波の影響により困難なことから、西之島と新島の満潮時の海岸線と推定される位置の高さを高さの基準（標高0m）とすることとし、モデル毎に複数個所の海岸線の高さを計測し、全モデルの平均値をジオイド高とした。計測の結果、12月4日の撮影についてはジオイド高が44.3mとなり、このジオイド高を全ての外部標定要素の楕円体高から差し引き標高とした（表-2）。同じく12月17日についても同様な数値が得られたことから、以後この値をジオイド高として使用した。

表-2 西之島と新島海岸線の高さ計測の結果
(H25.12.4撮影分)

コース	モデル	海岸線の高さ (ジオイド高)	コース	モデル	海岸線の高さ (ジオイド高)
C1	001_002	45.6	C2	011_012	－
	002_003	44.8		012_013	46.3
	003_004	44.5		013_014	45.5
	004_005	42.9		014_015	44.5
	005_006	43.5		015_016	45.1
	006_007	44.7		016_017	44.8
	007_008	43.9		017_018	44.1
	008_009	43.2		018_019	43.5
	009_010	43.1		019_020	42.8
平均値					44.3

※「011_012」は岩礁のみ、またモデル隅のため計測せず。（単位:m）

3.1.2 正射変換に用いる50mDEMの作成

正射変換に用いる50mDEMは、12月4日及び17日撮影分の西之島部分は既存の50mDEMとし、新島部分は図化機により標高値を計測する方法で作成した。

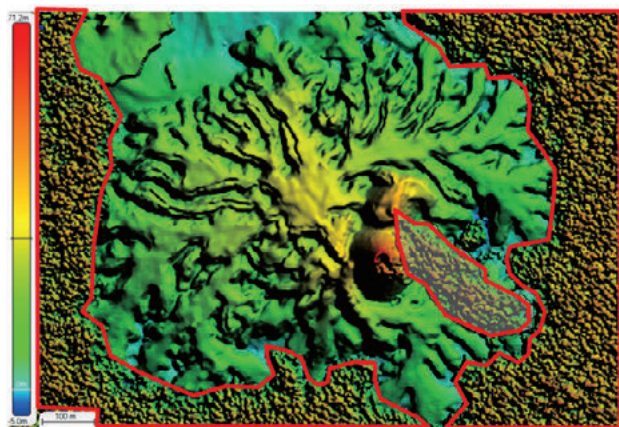
2月16日に撮影された西之島は、新島の陸域が大幅に成長し本島と接続したことから、計測する範囲も広範となった。そのため、2月16日撮影分に関しては西之島と新島ともに自動標高抽出ソフトウェアを使用して新たに50mDEMを作成した。

1) 12月4日及び17日

12月4日及び17日の50mDEMの作成は、まず、前項でジオイド補正した外部標定要素を用いて空中写真を標定しなおして図化モデルを構築した。次に新島を含むモデルを用いて50m間隔のメッシュを切り、その代表点の標高値を計測、既存の50mDEMの新島が位置する海部に計測した新島の標高値を書き加えて50mDEMを作成した。

2) 2月16日

2月16日の50mDEMの作成は、まず、空中写真とジオイド補正した外部標定要素を用いて自動標高抽出により西之島及と島の詳細な数値表層モデル（以下「DSM」という。）を作成した。次に、作成したDSMのうち、波の影響により正しい高さが得られない海域部は標高0mに補正処理し、噴煙の影響がある火口部周辺の標高値は平滑化の処理を施した（図-8）。西之島ではDSMからDEMへの変換に影響を及ぼす高木の樹木は存在しないことから、DSMをDEMとみなし、作成した詳細なDSMをメッシュ変換して50mDEMとした。



□ 海部及び噴煙部は手動により平滑化等の処理

図-8 作成した西之島新島の50mDEM（H26.2.16撮影）

3.2 正射画像（簡易オルソ画像）の生成

3.2.1 正射変換

ジオイド補正した外部標定要素、図化機で計測した標高から作成した50mDEM（12月4日、17日）及び自動標高抽出ソフトウェア（SimActive社Correlator3D）から作成した50mDEM（2月16日）を用いて、空中写真を図化機により正射変換し、正射投影画像を作成した。なお、いずれの正射投影画像も現地で標定点を取得できないことから同時調整計算は行っていない。

3.2.2 モザイク処理

正射投影画像は、可能な限り各画像の中心付近を使用し、歪みの少ない画像となるようモザイクした。陸域の正射画像作成と異なり、今回の作業では新島周辺の海域において海水の変色を確認できたことから、海水の変色を極力崩さないよう注意を払った。

モザイク処理後、指定範囲で切り出し正射画像（簡易オルソ画像）を完成させた（図-9～図-11）。



図-9 正射画像（簡易オルソ画像）（H25.12.4撮影）



図-10 正射画像（簡易オルソ画像）（H25.12.17撮影）



図-11 正射画像（簡易オルソ画像）（H26.2.16撮影）

4. 数値図化

西之島及び新島の 2.5mDEM を作成することを目的として、等高線及び標高点の数値図化を行った。数値図化は正射画像作成と同じく平成 25 年 12 月 4 日、12 月 17 日、平成 26 年 2 月 16 日の計 3 回分について行い、12 月 4 日と 17 日に撮影した空中写真を用いた作業ではオペレータ 1 名で対応したが、2 月 16 日撮影分については面積拡大に伴い図化範囲が拡張し、作業量が大幅に増加したことから、1 班 2 名の 3 班体制で数値図化を実施した。

4.1 ステレオモデルの構築

図化用のステレオモデルは、ジオイド補正した外部標定要素を用いて西之島と新島の空中写真を図化機により標定して構築した。なお、正射画像作成と同様に同時調整は行っていない。

4.2 等高線及び標高点の数値図化

西之島及び新島の数値図化では、等高線、そして等高線を補間する標高点の 2 項目についてのデータ取得を行った。

等高線の数値図化データは、12 月 4 日と 17 日は 2m、2 月 16 日は図化範囲が広範なことから 2.5m（急傾斜地を除く）間隔で取得した。標高点は地形の形状を再現できるよう、特に等高線で表現できない微地形や平坦な箇所、窪地において高密度に取得した（図-12～図-14）。



図-12 数値図化データ（H25.12.4 撮影）

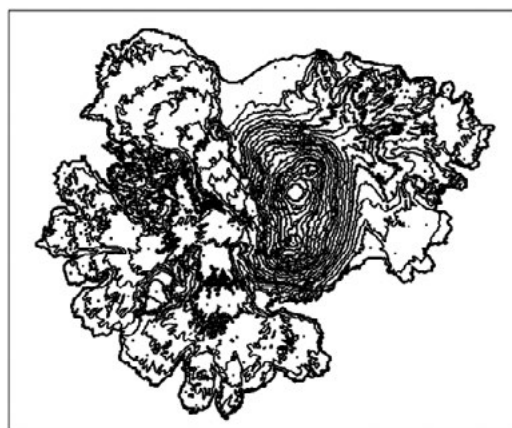


図-13 数値図化データ（H25.12.17 撮影；新島のみ）

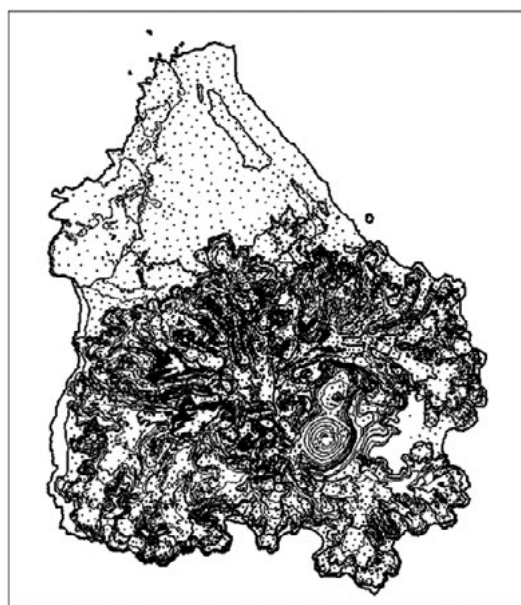


図-14 数値図化データ（H26.2.16 撮影）

4.3 数値図化データの編集

作成した数値図化データを GIS ソフトウェアに取り込み、等高線の接続等について点検を行った。西之島北西部に位置する台地は垂直に切り立った崖に囲まれており、場所によりオーバーハングしている箇所がある（図-15）。このような箇所は等高線が交差してしまうため、後続の 2.5mDEM 作成において TIN（不整三角網）が生成されない。そのため、等高線を転移させ等高線が交差しないよう整合を取った。

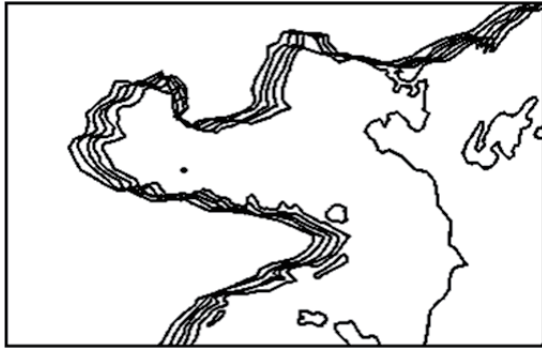


図-15 数値図化データの編集 (H25.12.4 撮影；西之島)
※オーバーハングのため等高線が交差している

5. 数値標高モデル作成

数値標高モデルの作成は GIS ソフトウェアを用いて行った。今回作成した数値標高モデルは、平面直角座標（第 14 系）の投影において縦横比が等しいメッシュとし、詳細な地形を表現するためメッシュ間隔を 2.5m として作成した。

2m または 2.5m 間隔の等高線のほか、岩の頂部や凹地の底部など火山特有の地形を表現するために取得した標高点を使用して、TIN（不整三角形網）を生成した。

TIN より 2.5m の標高メッシュに変換し、Geotiff 形式と X,Y 座標とその地点の標高値 Z を記述した CSV 形式として出力した。

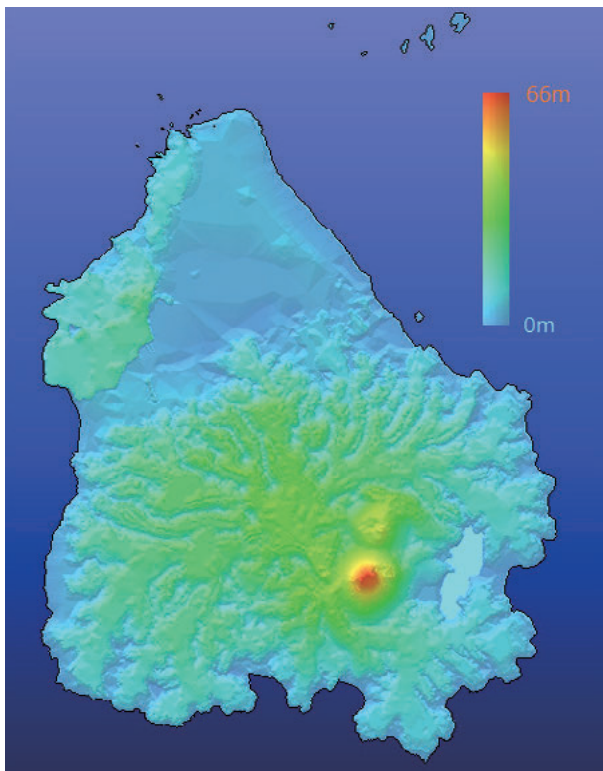


図-16 数値標高モデルから作成した陰影段彩図
(H26.2.16 撮影データ)

作成した数値標高モデルは、標高区分を色分けした陰影段彩図（図-16）や回転により視点を変更できる立体図（図-17）の作成に用いたほか、新しい技術として普及しつつある 3D プリンターでの出力に使える STL データおよび VRML データの作成に利用した。また、技術資料として一般への提供も行った。

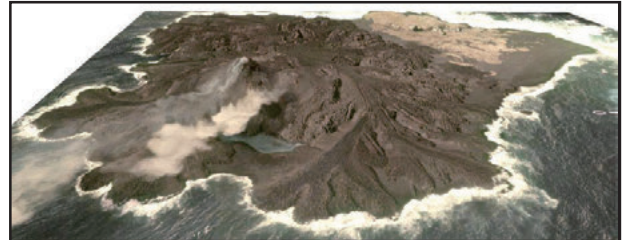


図-17 東側から見た立体図 (H26.2.16 撮影データ)

6. 体積計算

新たに噴出した溶岩等の海面上の体積については、数値標高モデルを使用して算出した。撮影日ごとの新たに噴出した溶岩等の海面上の体積は、表-3 のとおりであった。

表-3 撮影日ごとの海面上の体積

撮影日	海面上の体積	前回撮影後の噴出量
H25.12.4	30 万 m ³	
H25.12.17	80 万 m ³	50 万 m ³
H26.2.16	790 万 m ³	710 万 m ³

7. まとめ

小笠原諸島西之島（新島）は、現在も噴火が続いている上、本州及び周辺離島より遠隔地にあるため、これまで十分な精度での計測が行われてこなかった。今回、3 時期にわたり GNSS/IMU 及び高解像度デジタル航空カメラを用いて測量用空中写真の撮影を実施し、正射画像作成、数値図化、DEM 作成により、高い精度と解像度を有する成果を得ることができた。撮影は、最も近接する飛行場のある八丈島から 700km 程度離れており、航空機の航続距離に制限があるため、自衛隊の協力が得られなければ撮影できなかった。外部標定要素は GNSS 基準局が設置できないため近傍の電子基準点を与点としたが、近傍の電子基準点より 130km 離れているため、作業要領の制限値を超過して解を得ることとなった。数値図化は、オーバーハングしている箇所があり等高線が重複する部分があったが、そのままでは後続の作業に支障を来すため、図化後に転位を行った。DEM 作成はジオイドモデルが整備されていない上、潮位観測も実施できないことから、図化機により海岸線を計測し、高さの基準（標高 0m）を設定した。正射画

像の作成は通常と同様の手法を用いたが、今回撮影した空中写真は多方面での利用を考慮して、海水色の変化も重要な情報と位置づけ、使用する写真に留意したため、通常よりも時間を要した。今回得られた成果を基準にすれば、衛星画像や UAV などによる画像についても精度を向上させた成果を得ることが可能となった。西之島について、今後も引き続き注視するとともに今回得られた成果を有効に利活用

することを図りたい。

謝辞

今回の撮影業務に全面的に協力いただいた防衛省並びに海上自衛隊関係各位に謝意を表します。

(公開日：平成 26 年 10 月 14 日)

参 考 文 献

大野裕幸 (2014)：西之島噴火に伴う空中写真撮影及び地形計測，第 43 回国土地理院報告会。