

無人機による西之島地形計測の高精度化 Precise UAV Aerial Photogrammetry in Nishinoshima Island

地理地殻活動研究センター 飛田幹男・神谷 泉・中埜貴元・岩橋純子
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mikio TOBITA, Izumi KAMIYA, Takayuki NAKANO, and Junko IWAHASHI
基本図情報部 大角光司
National Mapping Department Koji OSUMI
地理空間情報部 高桑紀之
Geospatial Information Department Noriyuki TAKAKUWA

要 旨

平成 26 年 3 月 22 日に続き 7 月 4 日に、無人機 (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) を用い、東京都小笠原村西之島の空中写真を自動撮影した。複数の空中写真間の画像マッチングにより、カメラの撮影位置を推定し、三次元形状を復元する写真測量ソフトウェアを用いた解析を行い、オルソモザイク画像、数値標高データを作成した。得られた画像・データを分析することで、面積、体積、平均標高やその変化を求めた。また、地形判読図、赤色立体地図、立体図、立体模型の作成にも活用された。3 月の撮影で得られた知見・経験・課題に基づき、撮影コース、撮影方法、解析方法の改善を行うとともに、機体位置補正手法及びシャッタータイミング補正手法を開発し、地形計測精度を向上し、解析時間を短縮した。

1. はじめに

東京都小笠原村西之島では、2013 年 11 月 20 日新島の出現が確認されて以来、溶岩の流出を伴う噴火が継続している。上陸には危険が伴うため、現時点 (2014 年 9 月時点) で西之島には観測機器が皆無であり、上空など島外からの観測に頼るしかない状況が続いている。

国土地理院は、西之島の火山活動の評価に寄与するための基礎データを取得することを目的として、2014 年 3 月 22 日に無人機 (以下「UAV」という。) による空中写真撮影を行った。撮影及び解析の詳細に加え、UAV の特徴や技術的課題は、飛田ほか (2014) に報告されている。

2014 年 3 月に実施した UAV による西之島撮影と解析から得た知見・経験・課題を踏まえて、UAV による 2 回目の西之島の撮影を 7 月に行った。撮影コース・高度・設定の変更、及びカメラ位置補正手法の開発を通して、前回より高精度の地形計測を実現した概要を報告する。

2. 西之島の空中写真撮影

2014 年 7 月 4 日に、東京都小笠原村父島から約

130km 離れた西之島に UAV を自律飛行させ、西之島周辺の空中写真を自動撮影した。撮影に使用した機材、撮影コースを含む撮影の状況と、航空法に関連した対応について述べる。

2.1 撮影の状況

2.1.1 撮影機材

撮影に使用した UAV は、2014 年 3 月の撮影時と同機体で、全長 2,200mm、全幅 2,800mm、質量 15kg、最大離陸重量 35kg、2 サイクル 86cc ガソリンエンジン、巡航速度 120km/h、飛行時間 4.5 時間、飛行距離約 500km の諸元をもつ無人自動自律型飛行機である (写真-1)。この機体は、本業務の受注業者である㈱エアフォートサービスの所有で、運行も同社が実施した。



写真-1 固定翼型 UAV の機体

撮影に使用したカメラは、2013 年 3 月の撮影時と同様、Canon EOS 5D Mark II (35mm フルサイズ一眼レフ)、レンズは Canon EF28mm F1.8 USM (焦点距離 28mm 単焦点) であった。GPS の観測と同期し、1 秒ごとにシャッターを切った。前回と異なりアクリル板は装着しなかった。

今回は、カメラ検定の利用を重視し、露出絞りを固定し、シャッタースピードを自動にして撮影を行った。当初計画では、絞り値は F4 を想定して事前にカメラ検定を行っていたが、当日父島の現地にお

ける天候と太陽高度を含む実際の明るさを勘案した判断により、急遽 F8 での撮影を行った。本土に到着直後に F8 でのカメラ検定を実施した。日本測量協会が実施したカメラ検定の結果を Pix4Dmapper で利用するため、前回開発した方法により、キャリブレーションパラメータの変換を行った。

2.1.2 飛行経路・飛行状況

無人自動自律飛行であるため、噴煙、天候、風などに関する情報収集は重要で、父島気象観測所からの情報の他、目視による確認を実施した（例：写真-2）。父島から西之島への飛行経路を図-1, 2, 3 に示す。7月4日 10:05 に離陸（写真-3）、11:25 に西之島上空で撮影開始、11:51 に撮影終了し帰途へ、予想した時刻どおりに無事帰還した機体（写真-4）は、12:50 に父島のヘリポートに着陸した（写真-5, 6）。総飛行時間は2時間45分であった。

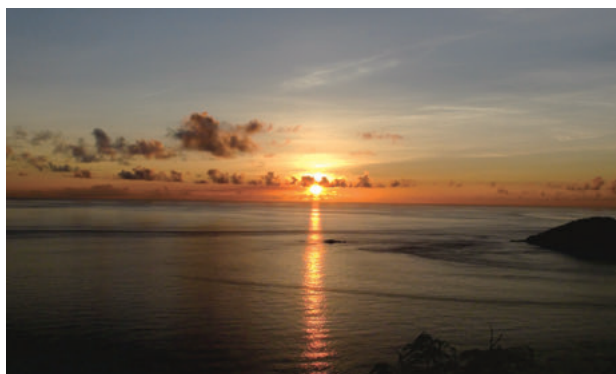


写真-2 UAV 計測前日（7月3日）の西之島方向の状況。父島三日月山展望台から撮影。天候は良く、風は弱く、波は低い。噴煙は見えない。

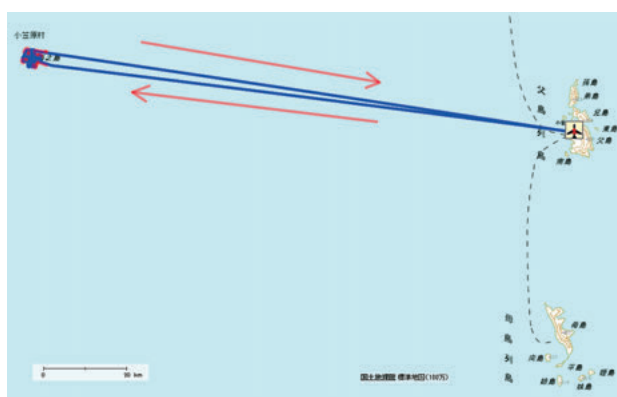


図-1 父島から130km離れた西之島への飛行経路図。

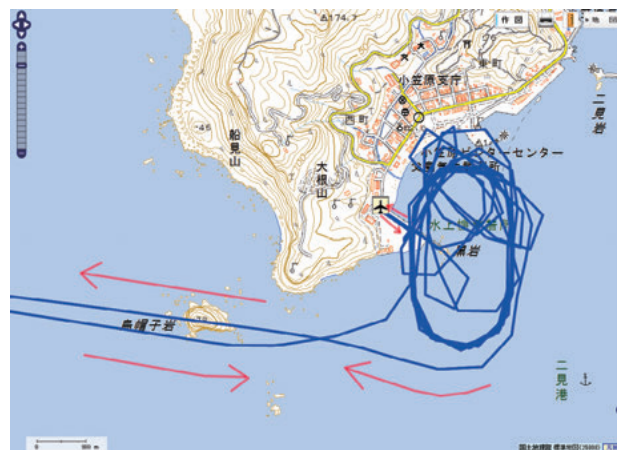


図-2 小笠原村父島での離着陸時の飛行経路図。

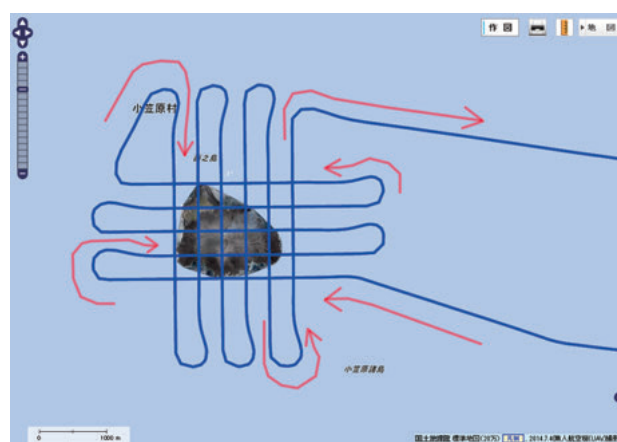


図-3 西之島上空の空中写真撮影時の飛行経路図。



写真-3 父島のヘリポートから離陸する UAV（10:05）。

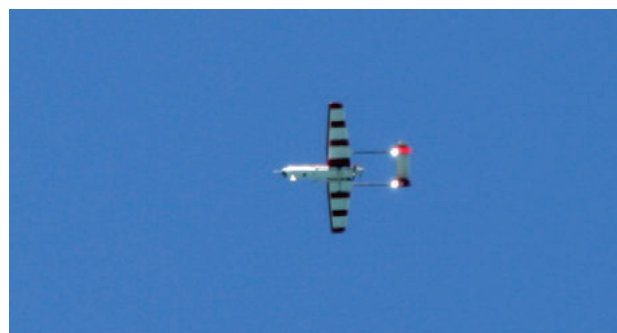


写真-4 西之島から130kmの帰路を経て、無事父島上空に姿を現した UAV



写真-5 手動操縦でヘリポートに着陸する UAV (12:50)



写真-6 UAV が着陸したヘリポート遠景。左手前から右奥に向けて着陸した。

離着陸は、前回の3月と同様防衛省の承認を得て、東京都小笠原村父島のヘリポート（図-2の航空機マーク）を使用させていただいた。

図-3に示した西之島上空の飛行経路において空中写真の撮影を行った。前回得られた知見である「噴煙下の計測においては、なるべく多くの時刻に（噴煙の状況は時々刻々変わる）、なるべく多くの方向から、噴煙下となると予想される部分を撮影することが望ましい。」（飛田ほか，2014）に基づき、撮影コース数を大幅に増やし、東西6コース、南北5コースとした。また、噴煙下の撮影枚数を確保し、分解能を向上させるため、前回より低い高度約700mから撮影を行った。なお、ALOS-2（だいち2号）が6月20日にPALSAR-2センサで撮影したレーダー画像（JAXA，2014）がコース設定に非常に役立った。

2.2 ノータム

西之島上空で250m以上の高度をUAVが飛行する場合、他の航空機との衝突の可能性がある。これを回避するしくみとして、ノータム（NOTAM: Notice To Airmen）がある。受注業者が提出した模型飛行機の飛行通報書に基づき、国土交通省航空局航空情報センターからノータムが発行された（図-4）。



図-4 飛行前日（7月3日）に AIS JAPAN の Web に掲載された NOTAM.

3. UAV が撮影した空中写真

西之島上空では、1,107枚の空中写真を撮影した。前回の463枚より大幅に増えた理由は、撮影コースの増加のほか、陸地分の面積が増加したことによる。写真-7, 8にその例を示す。天候は快晴で、波高は低く、太陽の高度角が90°に近いという条件が重なり、海面のハレーションが非常に強いため、陸地部分が暗く写っている。これらの写真は、国土地理院技術資料（国土地理院，2014c）として登録されている。これらの写真を約5秒間隔に間引いた約200枚の写真データが、地理院地図の「防災関連」タブの「垂直写真」のデータとしてダウンロード可能となっている。

UAVには、直下を撮影するカメラの他に、前方を撮影できるカメラが搭載されていた。写真-9, 10は後者のカメラで撮影した斜め写真である。地形計測用の写真測量としては、最適とは言えないが、ハレーションの影響がなく、見て美しく、噴煙高なども分かる写真であり、解析の参考としても役だった。



写真-7 UAV が撮影した空中写真の例。



写真-8 UAVが撮影した空中写真の例.



写真-9 UAVが撮影した斜め写真.



写真-10 UAVが撮影した斜め写真.

4. UAV 撮影空中写真の解析結果

これらの空中写真とスイス国 Pix4D 社製自動オルソモザイク及び 3D 処理ソフトウェア「Pix4Dmapper」(Vallet et al., 2011)を用い、DEM 及びオルソモザイク画像を作成した。その工程は、

- 1) 空中三角測量、
 - 2) 点群データの高密度化、
 - 3) DEM とオルソモザイク画像の生成、
- の 3 ステップからなる。

Pix4Dmapper による空中三角測量には、Multi ray matching により自動生成された多量のパスポイント

が使用されている(図-5)。地上基準点(GCP)は、国土地理院の測量用航空機「くにかぜⅢ」が撮影した空中写真から別途作成した DEM 及びオルソモザイク画像を使用し、旧島のうち、変化がないと考えられる場所で取得した。こうして得られた GCP は、島の北西部に偏っている。このため、GCP 及びマニュアルで取得したパスポイントのクリーニング終了後、島の南東部にある波の静かな入り江の高さを、同時刻の父島の潮位(気象庁, 2014)とする GCP を追加した。

1 秒間隔で撮影した写真を全て使用すると、海面上で、波浪などの海象が類似した部分があり、その部分で多数のマッチング点が生成されるため、撮影時刻が近い写真を使わないことが有用である(飛田ほか, 2014)。そこで、機械的に 4 枚ごとに写真を抜き出した後、2 枚ごとの写真の中で「噴煙下の状況をとらえている写真」を加えた。また、一部の写真においては、大まかに取得した海面の範囲に対して、画像をぼかす処理を行い、マッチング点の生成を抑制した。

噴煙部分では、点群データの高密度化の工程で、噴煙上でマッチング点が生成される場合がある。この対策として、前回より多数の空中写真を利用できることを前提として、マッチング点に、5 枚の写真に写っていることを要求した(前回は 4 枚)。その結果、前回必要としたマニュアルによる mismatching 点の除去(飛田ほか, 2014)を省略することができた。

ところで、Pix4Dmapper は、自動生成されたパスポイントの密度をもとに、DEM 及びオルソモザイク画像の作成範囲を自動的に計算しているが、その影響で島の端が一部欠けるという問題が発生した。この欠損の程度は、処理条件により異なったため、2 つの処理条件により作成した DEM 及びオルソモザイク画像をさらにモザイクした。

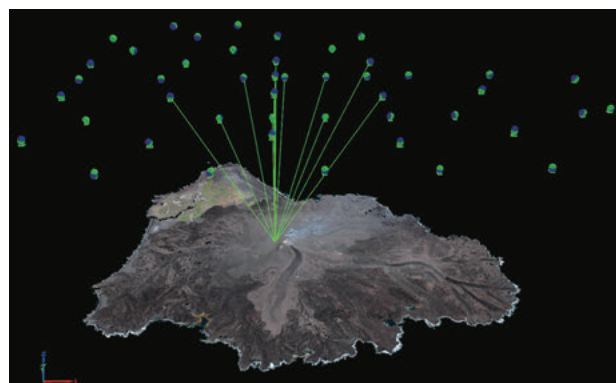


図-5 Pix4Dmapper による Multi ray matching.

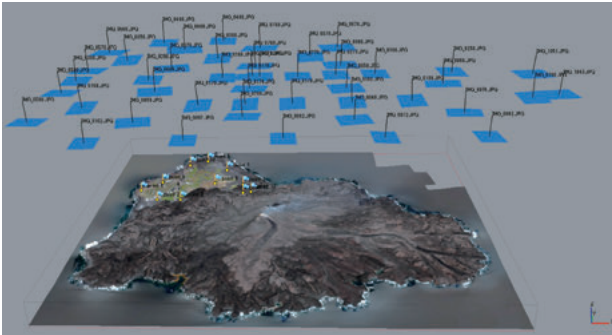


図-6 PhotoScan Pro による Multi view 3D reconstruction.

複数の写真からカメラの撮影位置を推定し、三次元形状を復元する Multi-view Stereo (以下「MVS」という。) 技術を使う場合、西之島のように写真中に噴煙・波等の動くものが含まれていると、完全に自動処理は難しく、良好な結果が得られないことが多い。そこで、より確実に解析結果を得るため、及び結果の相互比較による検証を行うため、ロシア国 Agisoft 社製 Multi View 3D reconstruction 処理ソフトウェア「PhotoScan Professional Edition」も同時並行的に使用して処理を行った (図-6)。

4.1 オルソモザイク画像

Pix4Dmapper を用いた先述の処理により得られたオルソモザイク画像を図-7 に示す。このオルソモザイク画像は、国土地理院技術資料 (国土地理院, 2014d) として、国土地理院の Web サイト (国土地理院, 2014b) からダウンロード可能である。

図-8 は、同様のオルソモザイク画像を PhotoScan Pro で作成したものである。2つのソフトウェアによる最高標高値は、どちらも 74m であった。

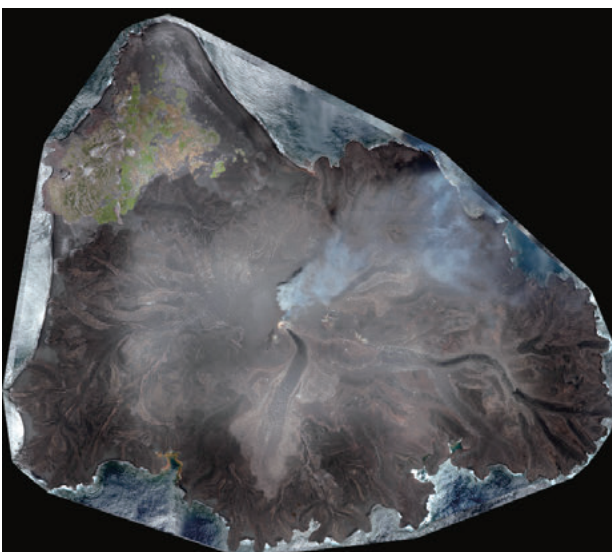


図-7 西之島のオルソモザイク画像 (平成26年7月4日). Pix4DMapperによる。

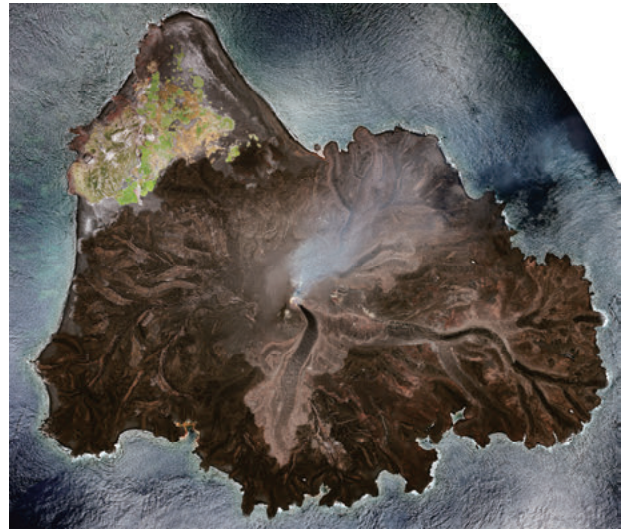


図-8 西之島のオルソモザイク画像 (平成26年7月4日). PhotoScan Proによる。

4.2 数値標高データ

図-9 は Pix4Dmapper で処理中の Elevation 画面である。マウス位置の標高値を確認できる。

通常、国土地理院が提供する数値標高モデル (DEM) のメッシュ間隔は、10m や 5m が基本であるが、UAV により低高度から高分解能の空中写真が撮影できたこと、及び火山の地形に関する研究に役立つよう、今回は 1m メッシュの DEM を作成、提供した。標高値はメートル単位で小数点第三位までの値として格納されている。また、海上の標高値には“-9999”が格納されている。このデータは、国土地理院技術資料 (国土地理院, 2014d) として、国土地理院の Web サイト (国土地理院, 2014b) からダウンロード可能である。この DEM データから作成した段彩陰影図を図-10 に示す。

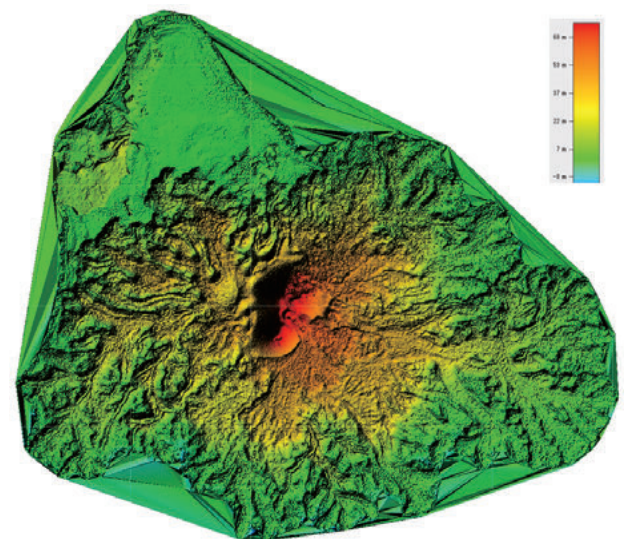


図-9 Pix4DmapperのElevation表示 (平成26年7月4日)。

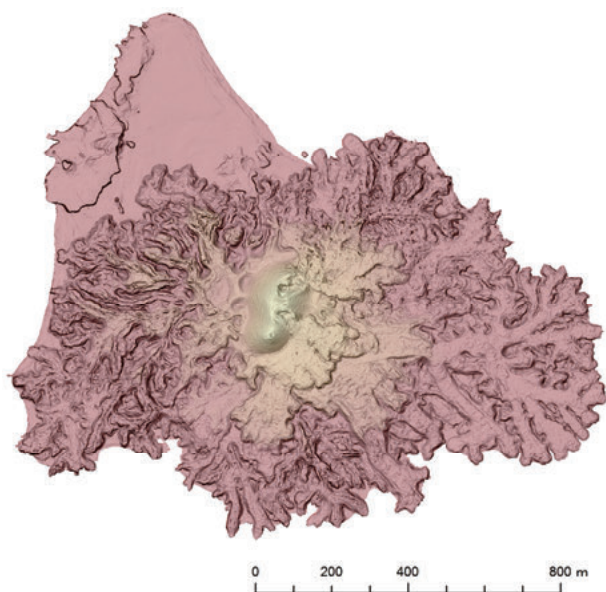


図-10 西之島の段彩陰影図（平成 26 年 7 月 4 日）。

4.3 面積と体積及びそれらの変化

2013 年 11 月 20 日に新島が確認された後、12 月 4 日、12 月 17 日、2014 年 2 月 16 日に国土地理院の測量用航空機「くにかぜⅢ」が、空中写真の撮影を行っている。一方、2014 年 3 月 22 日と 7 月 4 日に UAV による空中写真が行われている。

これら 5 時期の撮影に基づく、最高標高、今回新たに噴出した溶岩等により増加した海面上の面積（以下「新陸地の面積」という。）、新たに噴出した溶岩等の海面上の体積（以下「新陸地の体積」という。）等をまとめたのが表-1 である。ここで、新陸地の体積は、まず、旧島も含めた海面上の体積を計測し、これから旧島部分の体積を差し引いて求めた。

2014 年 7 月 4 日時点の新陸地の面積（噴火による島の面積の増加）は、 1.08km^2 (0.047km^2 の東京ドーム 23 個分) である。噴火前の西之島の面積 0.218km^2 を加えて、総面積は 1.296km^2 (東京ドーム 28 個分) となり、噴火前の約 6 倍になった。

2014 年 7 月 4 日時点の新陸地の体積（噴火による海面上の島の体積の増加）は、 $2,222\text{万 m}^3$ (124万 m^3 の東京ドームの約 18 倍) である。前回の体積 $1,130\text{万 m}^3$ からの増加量を 104 日で割って得られた体積増加率は $10.5\text{万 m}^3/\text{日}$ となった。これは、2014 年の平均的な体積増加率とほぼ同じ値であり、依然溶岩の噴出が衰えていないことを示している。このことは、国土地理院 (2014a) により公表され、噴火活動の評価にも活用された。

これらの結果のうち、体積は国土地理院独自の数値である。この体積は、写真測量による計測値であり、推定値とは異なり、精度が高い。

表-1 西之島新陸地の最高標高、面積、体積、平均標高の変化と体積増加率。体積増加率は前の時期からの体積変化を経過日数で除した数値。2013 年 11 月 20 日の面積は、神谷 (2014) による。最高標高、体積は 0 以上であるが、不明のため 0 と仮定している。

撮影日	最高標高	面積	体積	体積増加率	平均標高
年/月/日	m	平方km	万立米	万立米/日	m
2013/11/20	0	0.009	0	-	0.0
2013/12/04	27	0.048	30	2.1	6.3
2013/12/17	39	0.097	80	3.8	8.2
2014/02/16	66	0.51	790	11.6	15.5
2014/03/22	71	0.67	1,130	10.0	16.9
2014/07/04	74	1.08	2,222	10.5	20.6

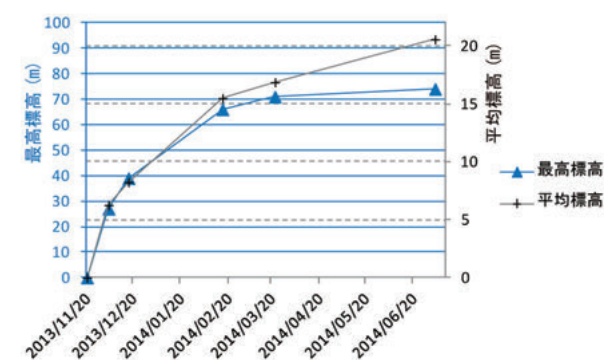


図-11 西之島（新陸地）の最高標高と平均標高の変化。

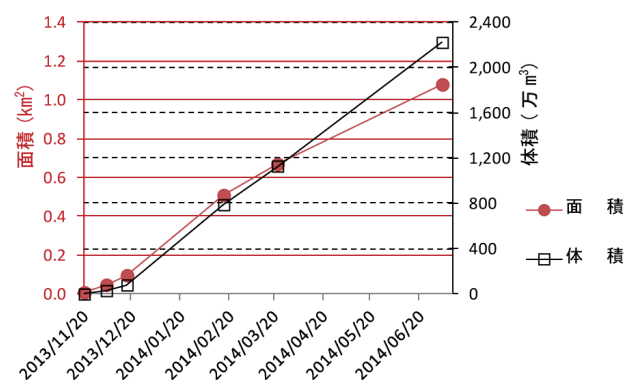


図-12 西之島（新陸地）の面積と体積の変化。ここでの面積と体積は、今回の噴火によって増加した面積と体積である。

体積を面積で割ることで算出した平均標高を表-1 の右端の列に示す。平均標高の時間変化の傾向を見るため、表-1 を基に図-11 の時系列グラフを作成した。前回の 2014 年の 3 月までは、平均標高の時間変化は、最高標高と似た増加傾向を示していたが、今回最高標高の増加はわずかである。

図-12 は、表-1 を基に面積の増加傾向と体積の増加傾向を同時に示した時系列グラフである。ここでの面積・体積とは、表-1 と同様、新陸地の面積・体積である。体積が増加する速さ、体積増加率は、マグマの噴出量と密接に関連しており、火山活動の評

価に重要な指標であるが、体積増加率は概ね一定であることが分かる。

5. 解析データの活用事例

5.1 地形判読図

本解析で得られたオルソモザイク画像を国土地理院応用地理部が判読し、地形判読図（図-13）を作成した（図-13）. 判読結果の詳細は、国土地理院（2014a）の別紙 5-2 に記述されているが、主要部分を要約すると：

- 1) 北側の火砕丘（図-13：①）の火口は盛んに活動しており、噴煙や火山砕屑物を放出して大きく成長している。
- 2) 南側の火砕丘（図-13：②）の火口は活動がほぼ停止しているとみられる。
- 3) これまで継続的に溶岩流を噴出してきた火砕丘西縁の火口（溶岩噴出口）（図-13：③）からの溶岩流の噴出が止まっているとみられるほか、3月と7月の DEM を比較すると約 7m の陥没が認められた（神谷ほか，2014）。
- 4) 南側と北側二つの火砕丘の間に火口（図-13：④）が形成され、そこから溶岩が噴出するようになった。噴出した溶岩流は東方及び南方に流下し、

島の面積の拡大が続いている。

これらの結果は、平成 26 年 10 月 23 日に開催された第 130 回火山噴火予知連絡会で報告された（国土地理院，2014f）。

5.2 赤色立体地図

今回の撮影を含め過去 4 回の空中写真撮影により作成された数値標高データを元に、アジア航測㈱の千葉達朗氏の協力により作成された赤色立体地図を図-14に示す。地形が非常に明瞭に表現されている。地表面の粗さの違いから、旧島と新島が接合した部分の境界が明瞭である。

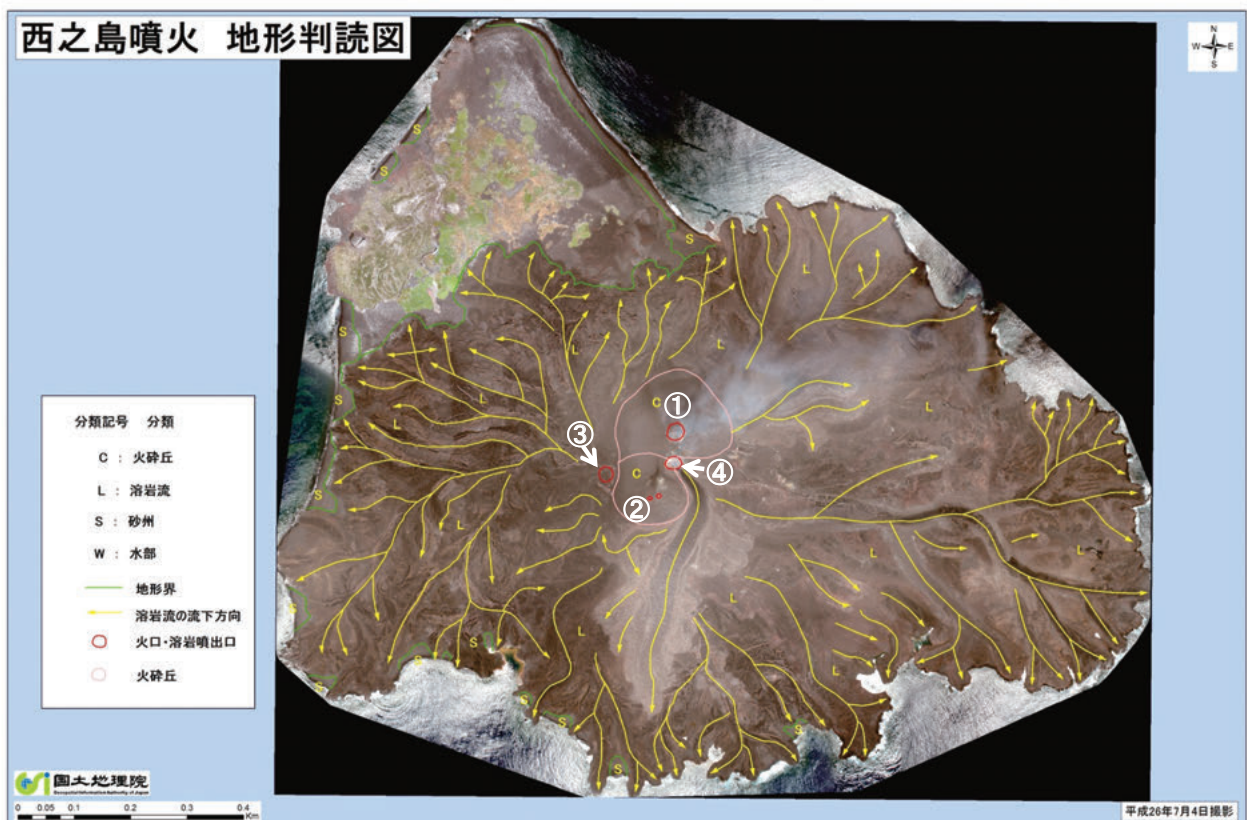


図-13 西之島の地形判読図（平成 26 年 7 月 4 日）。

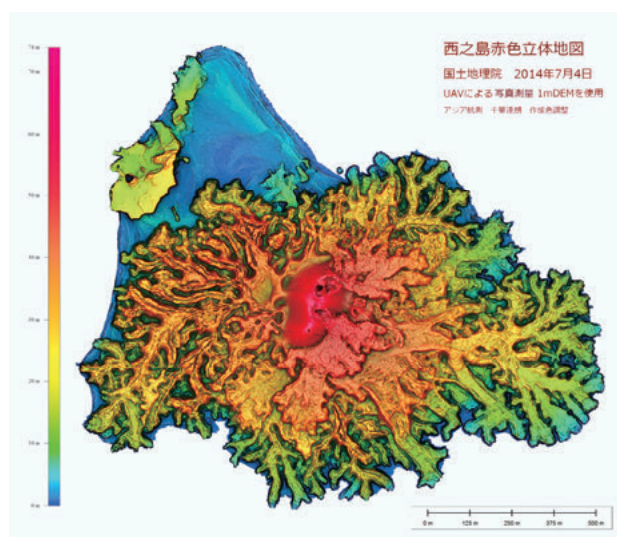


図-14 西之島の赤色立体地図. (<http://www.gsi.go.jp/common/000094119.png>)

5.3 立体図

オルソモザイク画像と DEM データを用いて、Web 上で閲覧できる立体図も国土地理院地理空間情報部によって作成されている（図-15）。マウスにより、回転、拡大・縮小して閲覧することができる。

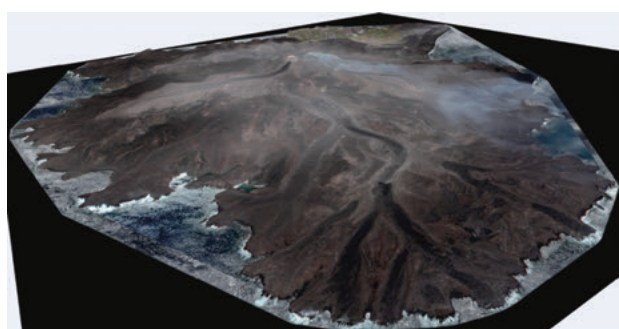


図-15 西之島の立体図. (http://saigai.gsi.go.jp/2/20131120nishinoshima/nishinoshima_3d/20140704/3d/20140704nishinoshima_all.html)

6. 高精度化

MVS の解析においては、カメラ位置と GCP 位置が推定され、同時に点群の三次元位置が求められる。与えるカメラ位置が不正確である場合には、カメラ位置と GCP 位置の推定残差が十分小さくならず、得られた DEM の海岸での数値が 0m にならない等、点群の三次元位置が正確に求まらない場合がある。

今回、与えるカメラ位置情報として、6.1 節で UAV の機体位置情報、6.2 節でシャッタータイミングの 2 つを取り上げ、その精度向上について述べる。

6.1 UAV 機体位置補正の試み

MVS を含む空中写真の解析においては、機体位置

情報が正確であるほど、計測に要する時間が短く、計測結果も正確になる。特に離島等で GCP が得られない場合には、機体位置情報の正確さの重要度は高い。そこで、今回、機体位置情報精度を向上させる試みとして、基準点を利用した簡易的な機体位置情報の補正を試みた。

写真-11 は、国土地理院測地部の南硫黄島観測班による基準点の GNSS スタティック測位の様子である。UAV の離着陸場の近傍にある路面上の既存マーカーを UAV 機体位置補正用の基準点として活用するため、UAV 撮影の数日前に、2 時間 10 分の観測を行った。同時に、近傍の水準点でもジオイド高を求める観測を実施した。父島島内の電子基準点、駿潮場併設の GNSS 連続観測点も含めた合計 5 点の GNSS 観測データによる網平均計算による残差と標準偏差は、水平・上下とも 3mm 以内と高精度に基準点の位置が決定できた。



写真-11 離陸前に測地部南硫黄島観測班が実施した 2 つの基準点上の GNSS スタティック測位。既存の「通信」と記された基準点（右手前）を、UAV の位置補正のために使用した。



写真-12 基準点「通信」上の UAV。UAV 付属の GPS アンテナが基準点の真上に来るようにし、GPS 測位データを計測・記録している。離陸前と着陸後の 2 回測位を実施。

写真-12 に示したように、離陸前（9:52 から 1 分

間)と着陸後(13:07 から 1 分間)の 2 回, UAV を基準点上「通信」に設置し, 測位を行った. UAV GPS 測位値のバラツキは, 離陸前, 離陸後それぞれ, 水平・上下とも標準偏差で 1m 以内である. しかし, 離陸前と着陸後の測位値の差(後-前)は, 緯度 -4.95m, 経度 +2.56m, 楕円体高 -20.92m であった.

表-2 は, GNSS スタティック測位に基づく UAV 機体位置情報の補正量である. なお, 基準点から GPS アンテナ中心までの高さ 0.47m は考慮している.

表-2 GNSS スタティック測位に基づく UAV 機体位置の補正量(単位はメートル)

	緯度	経度	高さ
離陸前	-3.26	+4.63	-24.68
着陸後	+1.69	+2.08	-3.76
平均値	-0.79	+3.35	-14.22

今回は, 南硫黄島測量時期と本業務の時期と場所に共通点があったため, 測地部の協力により高精度のスタティック測位が実施できたが, UAV のための測位としてはより手軽な RTK 測位が行われることが多いと考えられるため, 座標値の正確さと座標のエポックを確認するため, RTK 測位も同一の基準点で行い, 座標値の比較を行った.

父島では, 電子基準点が 1 点のみであるため, VRS でない RTK 測位を, GPS 衛星のみで実施した. GPS 衛星補足数は 6 衛星で, RTK-GPS と GNSS スタティック測位による測量結果の差は, 水平 1.1cm, 上下 4cm であった. なお, RTK-GPS で得られる座標値は, 今期でなく元期の座標値であるが, 東京都区部の元期は 2011.0 であるのに対し, 父島は 1997.0 であることに注意が必要である. フィリピン海プレート上に位置する父島の運動速度は大きく, 1997 年以降の 17.5 年で, 北に 18.5cm, 西に 69.4cm も移動したため, 元期と今期の区別が明瞭かつ容易である.

高さの誤差が比較的大きい理由として, ジオイド高を疑った. 基準点上の UAV GPS アンテナの GNSS スタティック測位による楕円体高は 53.00m, ジオイドモデルから計算したジオイド高は 50.14m, これらから計算される標高は 2.86m である. 一方, UAV 搭載の GPS 測位結果では, 離陸前 27.5m, 着陸後 6.6m (それぞれ 1 分間平均値)であり, ジオイド高が原因とは考えにくい結果となった.

6.2 シャッタータイミング補正

空中三角測量により決定された機体の位置と, 6.1 節の方法で補正された機体の位置を比べると, 系統的なずれが認められ, その方向は, 空中三角測量で決定された機体の位置が, その時点における機体の

進行方向にあるものであった. このため, GPS の受信時刻と比較し, 実際にシャッターが切れたタイミングに遅延があると判断した. 遅延の長さを 300 ミリ秒と仮定すると, シャッターの遅延によると考えられる誤差がほぼ解消されたため, 300 ミリ秒の遅延を仮定し, また飛行コースを 1 秒ごとの計測点の間が線形であると仮定し, 6.1 節の補正後の GPS による機体の位置の観測値を補正した.

以上, 2 つの補正により, カメラ位置の残差は小さくなり, 得られた DEM の海岸での数値が -3m ~ +3m で高精度化が実現した. また, 解析に要する時間が短縮した. さらに試行錯誤を行い, UAV 機体位置の適正補正量を求めたところ, 緯度方向 +1.81m, 経度方向 +2.35m, 高さ -0.52m となり, 表-2 の着陸後の値に近くなった. 平均よりむしろ着陸後の補正量を用いた方が良い理由として, ①着陸後の午後の時間帯の方が GPS 衛星配置が良く補足数が多かったこと, ②飛行中の方が上空視界が良好であること, の 2 つが考えられる.

7. まとめ

平成 26 年 3 月に引き続き 7 月に, 小笠原村西之島の空中写真を UAV により自動撮影した. 前回得られた知見と課題に基づき, 撮影コース, 撮影方法, 解析方法の改善を行い, 多数の空中写真の解析を行い, オルソモザイク画像, 数値標高データを作成した. 得られた画像・データを分析することで, 面積, 体積, 平均標高やその変化を求めることができた. これらは, 火山活動評価や, 地形判読図, 赤色立体地図, 立体図, 立体模型の作成にも活用された. 機体位置補正手法及びシャッタータイミング補正手法を開発し, これらにより, 地形計測の精度を向上させることができた. また, 解析時間を短縮する目途がたった.

謝辞

UAV の離発着場は, 防衛省と東京都小笠原村の協力により確保することができた. 父島内の UAV 用の基準点位置の測位は, 測地部が実施した. 活用事例の多くは, 応用地理部, 地理空間情報部が作成した. 赤色立体地図はアジア航測(株)の千葉達朗氏の協力により作成された. ここに記して感謝する.

(公開日:平成 26 年 11 月 7 日)

参 考 文 献

- JAXA (2014) : 「だいち 2 号」から初の観測画像が送られてきました！, <http://fanfun.jaxa.jp/topics/detail/2662.html> (accessed 26 Sep. 2014)
- 神谷泉, 飛田幹男, 中埜貴元, 岩橋純子, 坂井尚登, 大角光司 (2014) : UAV による西之島の撮影と DEM、オルソモザイクの作成, 日本写真測量学会平成 26 年度秋季学術講演会発表論文集, 印刷中.
- 気象庁 (2014) : 潮位表 父島 (CHICHIJIMA), <http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/sokuho/genbo.php?stn=CC> (accessed 29 Sep. 2014).
- 国土地理院 (2014a) : 西之島の面積 1 平方キロメートル以上増加, <http://www.gsi.go.jp/kenkyukanri/kenkyukanri60007.html> (accessed 21 Sep. 2014).
- 国土地理院 (2014b) : 「地理院地図」に西之島付近の噴火活動関連情報を掲載しています, <http://www.gsi.go.jp/gyoumu/gyoumu41000.html> (accessed 21 Sep. 2014).
- 国土地理院 (2014c) : 小笠原諸島西之島周辺の空中写真 (平成 26 年 7 月 4 日撮影), 国土地理院技術資料 H1-No.14.
- 国土地理院 (2014d) : 小笠原諸島西之島周辺の正射画像 (平成 26 年 7 月 4 日撮影), 国土地理院技術資料 H1-No.15.
- 国土地理院 (2014e) : 小笠原諸島西之島周辺の DEM (平成 26 年 7 月 4 日撮影の空中写真による), 国土地理院技術資料 H1-No.16.
- 国土地理院 (2014f) : 西之島の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 119, 準備中.
- Vallet, J., F. Panissod, C. Strecha, M. Tracol (2011): International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS ICWG I/V UAV-gconference, Zurich, Switzerland.
- 飛田幹男, 神谷泉, 岩橋純子, 中埜貴元, 高桑紀之 (2014) : 無人航空機による西之島空中写真の撮影とその分析, 国土地理院時報, 125, 115-124.