無人航空機による西之島空中写真の撮影とその分析
UAV Aerial Photogrammetry in Nishinoshima Island and its Analysis

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

要　旨

無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle : UAV）を用い，平成 26 年 3 月 22 日，東京都小笠原村西之島の空中写真を自動撮影した．多数の空中写真間の画像マッチングによる新しい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が求められ，火山活動評価の基礎データとして活用された．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．今回の撮影と解析は，いくつかの観点から初めての事例であり，当初想定していなかった知見・経験が得られたとともに，今後解決すべき課題も明らかとなった．今後，UAV の利活用が活発化することが予想される中，円滑な発展に寄与することを祈念して，今回の撮影・分析業務についての記録を残す．

1. はじめに

近年，人の立入りが困難な地域の調査や，狭い地域の空間情報の取得，災害調査，橋梁・ダム等の施設現況確認，環境・農業関連調査，文化財調査などの幅広い分野において，無人航空機（以下「UAV」という）の活用が急速に進んでいる（例えば，長井・柴崎，2009；内田・森，2009；渡部・佐々，2009；谷口ほか, 2010; 長谷川ほか, 2014; 井上ほか, 2014）．立入りが困難な箇所での UAV 利用事例としては，2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故後の原子力施設の空中写真撮影が有名である．また，UAV を用いた公共測量も実施され始めている．

これと並行して，動画や静止画からカメラの撮影位置を推定し（Structure from Motion: SfM），三次元形状を復元する（Multi-view Stereo: MVS）技術の発展も目覚ましく，先述の UAV と併用することで，比較的簡便に空中写真からオルソモザイク画像とデジタル表層モデル（DSM）などの地形情報を得ることができるようになってきている（内山ほか，2014a；内山ほか，2014b など）．

一方，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，噴火と溶岩の流出が継続している．上陸には危険が伴うため，現時点（2014 年 6 月時点）では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である．

火山活動の評価と推移予測を行う上で，溶岩の流出率は重要な指標である．従来，斜め写真から求めた面積に平均標高を仮定して体積を求めるアプローチも見られたが，誤差が大きかった．それに対し，写真測量を行えば，数値標高データ（DEM）を通して海面上の体積を求めることができ,「新たに噴出した溶岩等の海面上の体積」が計算できる．

そこで, UAV の特徴や技術的課題等を把握するとともに，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，平成 26 年 3 月 22 日に UAV による空中写真撮影を行った．併せて，その後，SfM や MVS 技術による新しい写真測量ソフトウェアを用いて DEM 及びオルソモザイク画像を作成し，その課題等を整理したので，以下報告する．

なお，1974 年の火山活動の際，近接した船から発信した無線操縦機が無線指示でシャッターを切ることにより西之島の垂直写真を撮影した（小坂，1975）のは驚くべきことであるが，今回は，遠隔地から自動自律飛行と自動撮影により西之島を撮影した点で初の試みと言える．

2. UAV の特徴

UAV は，農薬散布，各種調査・運搬，軍事等の目的で利用されているが，ここでは，地理空間情報や防災情報の取得の観点から, UAV による調査の特徴と UAV の主なタイプ別の特徴を整理する．

2.1 UAV による調査の特徴

UAV を用いた調査の特徴は, 以下のとおりである．

1) 現地調査，有人機と比較して，調査者の安全を確保しやすい．
2) 有人機と比較して, 低高度での撮影が容易であり，また乗員の安全を確保する必要がないため，曇天時に雲の下から撮影する，噴火中の火山に近づい

て撮影する等の機動的な運用が可能である．

3) 有人機と比較して，離発着に求められる諸条件（管制塔の有無，周囲の障害物の有無等）が少ないため，離着陸に利用できる場所が多い．
4) 有人機と比較して，調査面積にかかわりなく発生する機体維持費等の固定経費が少ないため，狭い範囲の調査では，経費が少ない．
5) 有人機と比較して，撮影可能な範囲が狭い．
6) 有人機と比較して，目視による危険回避が困難であることから，事故率が高いと想定される．

以上を考慮すると，UAV の運用に関して，以下の点が重要である．

1) 危険で人間が立ち入れない場所の調査が可能．
2) 人や重要施設等が存在する場所の調査には不適，又は相応の安全対策が必要．
3) 狭い範囲の機動的な空中写真の撮影に有利．
4) 特に，災害時の被災状況の把握等，危険個所の状況把握に適している．ただし，東海地震等の大規模災害においては，災害の規模に比べ，ピンポイント的な運用しかできない．

2.2 UAV の主なタイプ別の特徴

ここでは，揚力を得る方式に関して固定翼型の UAV と回転翼型の UAV の比較を表-1 に，また，動力源に関して電動 UAV とガソリンエンジン搭載の UAV についての比較を表-2 に，それぞれの特徴を整理した．なお，「機体の大きさ」と「価格」以外の項目は，同程度の規模の機体を前提としたものである．

表-1　回転翼型 UAV と固定翼型 UAV の比較

項目	回転翼型	固定翼型
離着陸に必要な敷地	狭い*1	広い
速度	遅い*2	速い
燃費	悪い	良い
航続距離	短い	長い
ペイロード	小さい	大きい
操縦	マニュアル*3，自動	自動
広範囲の面的撮影	不利	有利
多方向からの機動的な撮影	有利*4	有利
風の影響	大	小

*1 例えば，船舶から離着陸することも可能と考えられる．
*2 低速で飛行可能なことが，調査上のメリットとなることもある．
*3 マルチローターターイプの場合．シングルローターターイプの場合は，困難な場合が多い．
マニュアル操縦の場合，無線通信が必須であるが，遠距離の無線通信には，出力を要するために，免許が必要となり，無免許で運用できる範囲は限られている．
*4 撮影方向を無線で変更可能なシステムもある．

表-2　電動 UAV とガソリンエンジン搭載 UAV の比較

項目	電動	ガソリンエンジン
機体の大きさ	小さいものが多い	大きいものが多い
価格	比較的安価	比較的高価
航続時間	短い	長い
航続距離	短い	長い
ペイロード	小さい	大きい
メンテナンス	容易	困難*1
風の影響	大	小
騒音	小	大

*1 撮影作業を専門業者に外注することが現実的である．

3. 西之島の空中写真撮影

平成 26 年 3 月 22 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，電波法に関連した対応について述べる．

3.1 撮影の状況

3.1.1 撮影機材

撮影に使用した UAV は，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，本撮影の受注業者である㈱エアフォートサービスの所有で，UAV の運行も同社が実施した．

写真-1　固定翼型 UAV の機体．東京都小笠原村父島からの離陸を待つ無人自動自律型飛行機．

撮影に使用したカメラは 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＝ズームできない）であった．焦点は無限遠に固定し，シャッター速度を 1/800 秒に固定し，絞りはオートとした．GPS の観測と同期し，1 秒ごとにシャッターを切った．

撮影後，公益社団法人日本測量協会（以下「日本測量協会」という.）において，カメラ検定を行った.

3.1.2 飛行経路・飛行状況

父島から西之島への飛行経路を図-1，2，3 に示した．3 月 22 日 11:05 に離陸，12:35 に西之島上空で撮影開始，12:47 に撮影終了し帰途へ，13:56 に予想した時刻より若干遅れて無事帰還した機体は，衝撃を和らげるため，父島の芝生上に着陸した（写真-2）.

総飛行時間は 2 時間 51 分であった．比較的風が強く，飛行データから推測すると，平均的には北北西からの約 8m/s の風速の風が吹いていたと推測される．UAV の設定対気速度は 120km/h = 33m/s であったが，平均的な対地速度は，往路約 97km/h = 27m/s，復路約 116km/h = 32m/s であった.

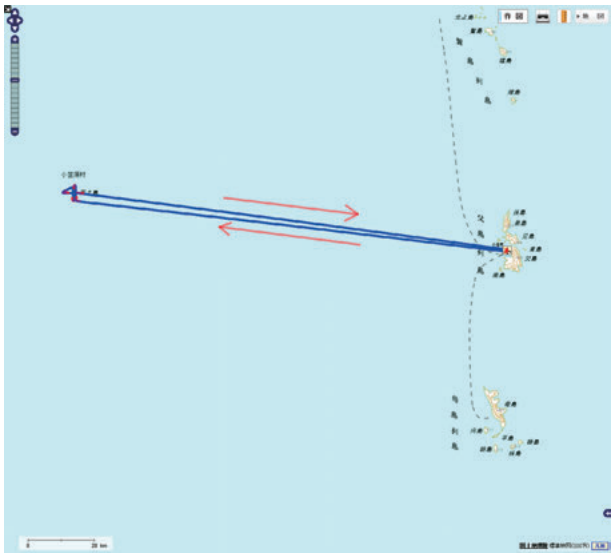

図-1　父島から 130km 離れた西之島への飛行経路図.

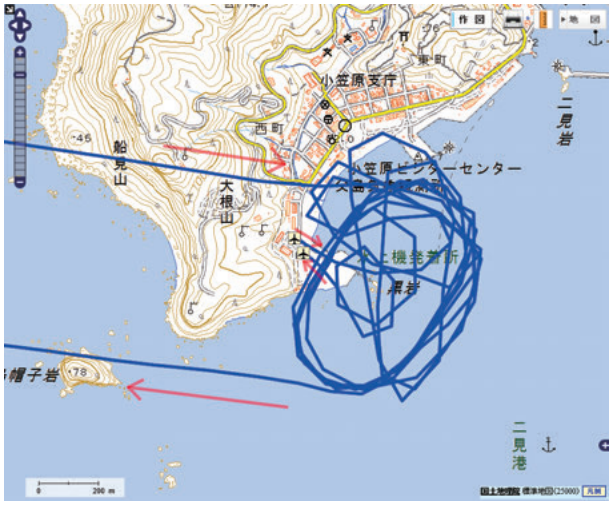

図-2　小笠原村父島での離着陸時の飛行経路図.

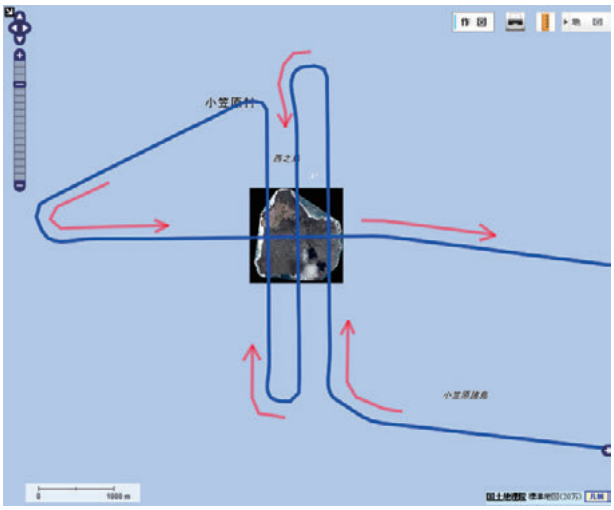

図-3　西之島上空の空中写真撮影時の飛行経路図.

写真-2　固定翼型 UAV が芝生上へ着陸する直前.

上記の固定翼型 UAV の離着陸のためには，100m×30m 以上の平坦な敷地が必要である．エンジン保護のため，砂地は不可である．敷地の周辺には人家や高い構造物がないことが望ましい．父島には空港や滑走路がないため，有人飛行機の離着陸は困難であるが，小笠原村の協力により，上記の条件を満たす場所を見つけることができた．離着陸は，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．高度約 800m から南北 3 コースの撮影を行った後，高度約 1,400m から東向 1 コースの撮影を行った.

3.2 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，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．今回は，受注業者が事前に国土交通省航空局に相談し，指示に従い，模型飛行機の飛

行通報書を提出し，受理された（航空交通管制圏等の一部空域では，150m 以上の高度を飛行させる場合，模型航空機の「飛行許可申請書」の提出と許可が必要）．これに基づき，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．

3.3 無線通信

一般的に，UAV の運用上，無線通信手段が重要である．無線通信が必要となる主なケースは，

1) UAV の飛行状況や燃料・バッテリー残量などの機体状況の把握
2) 飛行中断・帰投等の指令，搭載機器への制御指令
3) 機体の無線操縦
4) UAV からの写真，動画，取得データの送信

である．

しかしながら，「一般的な UAV の利用を考えた場合，空中を飛行する UAV から電波を発するには，電波法の規定により，現状では送信電力が 10mW の特定小電力無線を用いるしか方法がなく，その通信可能距離は周波数にもよるが数 km 程度が限界」（松田，2013）という現状で，長距離で無線通信を確保することが困難である．そのため，父島での離着陸時を除いて，1)から 4)の全てをあきらめざるを得なかった．こうした通信範囲外となる状況では，GNSS（Global Navigation Satellite Systems）による自動自律飛行に頼らざるを得ない．受注業者である㈱エアフォートサービスは，これまで，福島第一原子力発電所の高解像度写真撮影等，UAV による空中写真撮影の実績を多数有していたが，130km という長距離と通信範囲外での撮影は初めてであった．

4. UAV 撮影空中写真の解析結果

西之島上空では，463 枚の空中写真を撮影した．これらの写真は，国土地理院技術資料（国土地理院，2014d）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 80 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．これら 80 枚以外の空中写真の入手を希望する場合は，「国土地理院技術資料等の利用承認申請書」で申請する必要がある．

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）点群データの生成，
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．

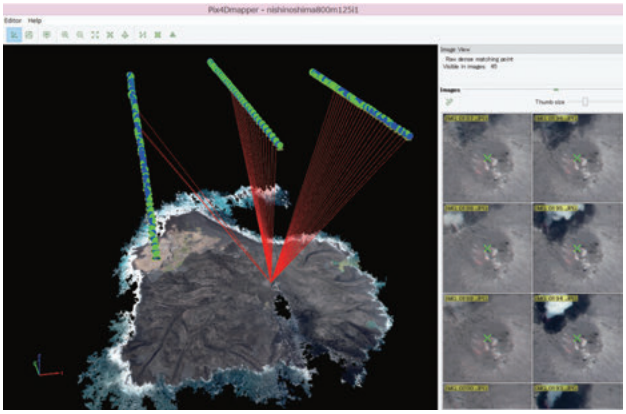

図-4　Pix4Dmapper による Multi ray matching.

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-4）．基準点は，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．こうして得られた基準点は，島の北西部に偏っている．このため，基準点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）とする基準点を追加した．

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，その部分で多数のパスポイントが生成されてしまった．そこで，陸地が概ね 1/3 以上写っている写真から，機械的に 4 枚ごとに写真を抜き出して処理したところ，海面上でのパスポイントの生成が大幅に少なくなったため，原則として 4 枚ごとの写真から作成した DEM とオルソモザイク画像を使用した．また，空中三角測量後に行われる DEM 作成のための自動マッチングにおいては，海面上でのマッチングを防ぐため，デフォルトで 3 枚の写真でのマッチを要求するのに対して，4 枚の写真でのマッチを要求した．

一方，噴煙下では，噴煙の状況が時間とともに変化することと，異なる方向から撮影した空中写真を用いると，噴煙によるオクルージョンが回避できる場合があることから，より多くの写真を用いた方が有利である．そこで，上記の 4 秒ごとの写真に加え，噴煙下の状況を把握するのに役立つ写真を，2 秒ごとの写真から手作業で選定し，DEM とオルソモザイク画像を作成した．この成果は，噴煙下ではより詳細であるが，4 秒ごとの写真を用いた成果と比較すると，ノイズが多いものであった．

以上を考慮し，4 枚ごとの写真から得られた点群データ（DEM 及びオルソモザイク画像を作成する直前のデータ）に対して，噴煙の影響がある部分のみ，

写真を追加した点群データと差し替えた．さらに，差し替えられた点群データを，3 次元メッシュ処理ソフトウェア「MeshLab」を用いて編集し，ミスマッチングと考えられる点データを削除した．こうして得られた点群データから, DEM とオルソモザイク画像を再作成した．

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，その影響で島の北端部分が欠けるという問題が発生した．この問題に対処するため，なるべく広い範囲をカバーする成果が得られるように，Pix4Dmapper で使用するパラメータを試行錯誤により求めたところ，島全体をカバーする成果が得られた．この成果は，通常のパラメータを用いたものと比べ，精度が低い可能性があるが，少なくとも基準点から近い島北端部分では，通常のパラメータによる成果と矛盾なく接合できた．そこで，北端部のみにこの成果を使用するよう, DEM とオルソモザイク画像を接合して，最終的な成果とした．

なお，Pix4Dmapper は，基準点なしでも，DEM とオルソモザイク画像を作成することができる. 当初，Pix4Dmapper に全部の写真（463 枚）を投入して，自動処理を試みたが，長時間（約 1 日）計算が続いた後に，自動処理が中断した．その理由は，撮影高度が異なる写真（高度 1400m と 800m）が混じっていた事と，海域しか写っていない写真が含まれていた事，枚数が多すぎた事が推測された．そこで，撮影高度が 800m の写真のうち，陸域が半分以上含まれ，なおかつなるべく噴煙が少ない写真約 125 枚を入力し，再計算したところ，約 5 時間で計算が終了し，オーバーラップや品質のレポートに問題は無かった．ただし，先述したような島の北端がマッチせず, DEM とオルソモザイク画像データの一部が欠けていた．この症状は，高度 800m の写真のうち，陸域が少しでも含まれる写真を追加して，226 枚にて再計算しても，解消されなかった．また，噴煙の多い写真を削った 125 枚使用の場合の方が，噴煙の下の地形がよく再現されていた．この成果は，仮成果として，別途地形判読図の作成に使用された．

4.1 オルソモザイク画像

先述の処理により得られたオルソモザイク画像を図-5 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，2014e）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．

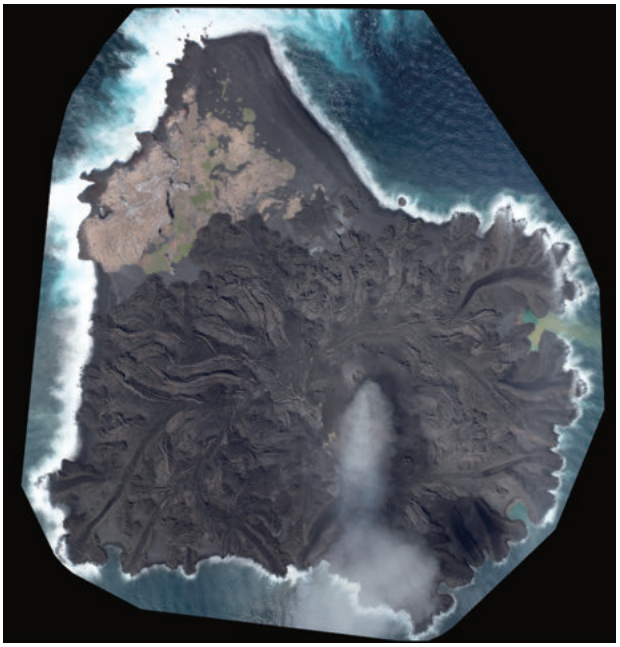

図-5　西之島のオルソモザイク画像（平成26年3月22日）.

4.2 数値標高データ

得られた DEM は， 2.5m メッシュ DEM であり，標高値はメートル単位で格納されている．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, 2014f）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 データによる陰影図を図-6 に示す．

図-6　西之島の陰影図（平成 26 年 3 月 22 日）.

最高標高は，北緯 27°14′33.248″，東経 140°52′43.583″（平面直角座標系 14 系の X = 138157.29m，Y = −111040.53m）における 70.8m（約 71m）と計測された．ここは，2 つある火砕丘のうちの南側の火砕丘の頂上にあたる．最高標高付近のデータを例として示す．

138157.2889,−111043.0292,70.5
138157.2889,−111040.5292,70.8
138157.2889,−111038.0292,70.3

4.3 面積と体積及びそれらの変化

国土地理院は，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 日にくにかぜⅢで，空中写真の撮影を行っている．この撮影は，外部標定要素の算出に使用した GNSS 基準局までの距離を除けば，測量用の撮影の条件を満たしたものである．一方，2014 年 3 月 22 日の UAV による空中写真は，測量用のカメラ，測量用の GNSS 受信機等は使用していないが，検定を受けたカメラを用いて，鉛直写真を面的に撮影するという点においては，測量に準じた撮影方法を採用している．これら 4 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-3 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 3 月 22 日時点の新陸地の面積（噴火による島の面積の増加）は，0.67km^2 である．海上保安庁が 2 日後の 3 月 24 日に撮影した斜め写真から求めた面積は 0.68km^2（海上保安庁海洋情報部，2014）であり，この時期の面積増加率 0.005km^2/日を考慮すると非常に調和的である．

2014 年 3 月 22 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，1,130 万 m^3 である．前回の体積 790 万 m^3 からの増加量を 34 日で割って得られた体積増加率は 10.0 万 m^3/日となった．これは，前回までの体積増加率 11.6 万 m^3/日と比べて若干低い数値ではあるが，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（例えば，東京大学地震研究所，2014）．

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．

このような数値の変化を議論する場合には，空中写真の処理に用いたソフトウェアの違いに起因する誤差の検証が必要である．そこで，今回用いた Pix4Dmapper を用いて，前回 2014 年 2 月 16 日にくにかぜⅢが撮影した空中写真を処理し，比較検証した．その結果，最高標高は 66m で差は 0m，面積は 0.50km^2 で差は 0.01 km^2，体積は 780 万 m^3 で差は 10 万 m^3 となり，ソフトウェアの違いに起因する誤差は十分小さいと判断した．

表-3　西之島の最高標高，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

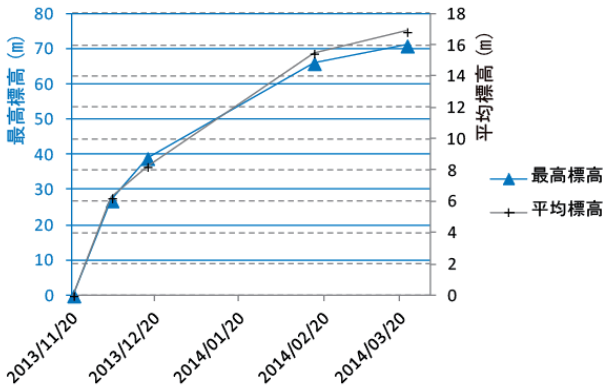

図-7　西之島（新陸地）の最高標高と平均標高の変化．

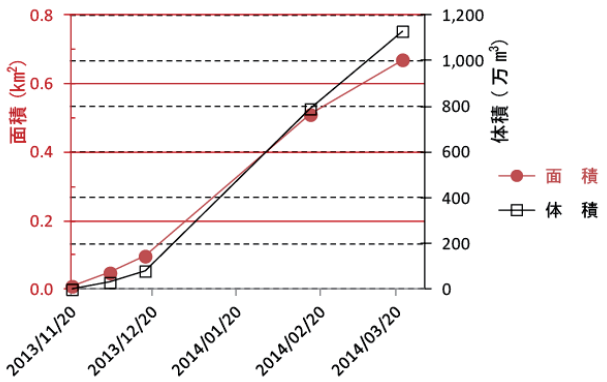

図-8　西之島（新陸地）の面積と体積の変化．ここでの面積と体積は，今回の噴火によって増加した面積と体積である．

体積を面積で割ることで算出した平均標高を表-3の右端の列に示す．斜め写真しかない場合などで写真測量が行えず，面積は計測できるが数値標高データが作成できない場合には，平均標高を仮定して体積が推定されることもある．なんら手がかりがない場合には，平均標高を一定とする試みもあり得るが，標高は増加しており，少なくとも一定ではないことがわかる．平均標高の時間変化の傾向を見るため，表-3 を基に図-7 の時系列グラフを作成した．平均標高の時間変化は，最高標高と似た増加傾向を示すことが明らかになった．

図-8 は，表-3 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-3 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（国土地理院，2014a 別紙 5-2）を作成した（図-9）．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) ピンクの実線で示した 2 つの火砕丘があり，火砕物や噴煙を盛んに出して活動している．この内，北側の火砕丘の赤い○で示した火口が 1 つ増え，2 つになった．
2) これまで継続的に溶岩流を噴出してきた南側火砕丘西縁の火口（溶岩噴出口）の北側にも溶岩流噴出の中心となる火口があることが，溶岩流の流下方向の軌跡から確認できた．2 つの火口（溶岩噴出口）から全方向に溶岩流が流下し，新たな陸地の面積は拡大している．

これらの結果は，平成 26 年 6 月 3 日に開催された第 129 回火山噴火予知連絡会で報告された（国土地理院，2014g）．

図-9　西之島の地形判読図（平成 26 年 3 月 22 日）．

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-10 に示す. 地形が非常に明瞭に表現されている. 特に，2014 年の図では，旧島と新島が接合した部分の境界が粗度の境界として明瞭である．また，国土地理院（2014c）では，マウスにより，赤色立体地図を，回転，拡大・縮小して見ることができる.

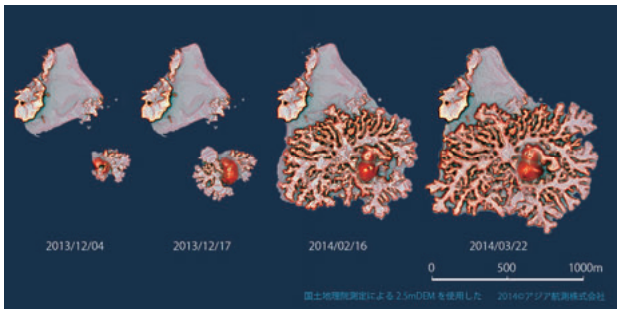

図-10　西之島の赤色立体地図. (http://www.gsi.go.jp/common/000092032.png)

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-11）．マウスにより，回転，拡大・縮小して閲覧することができる.

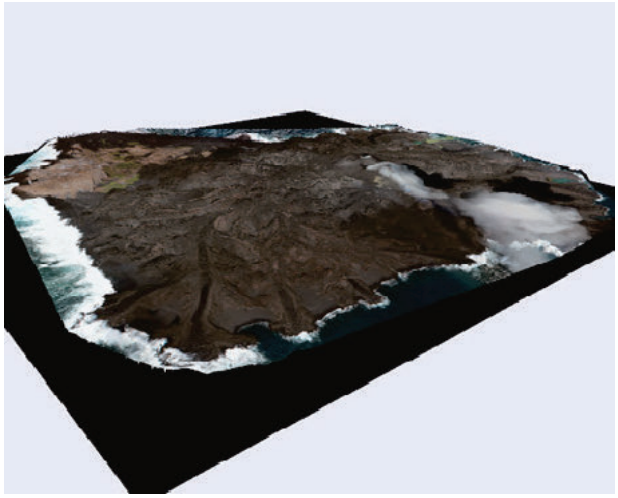

図-11　西之島の立体図. (http://saigai.gsi.go.jp/2/20131120nishinoshima/nishinoshima_3d/20140322nishinoshima_all.html)

6. 技術的な知見と今後の課題

今回の西之島における UAV による空中写真撮影と解析処理を通して得られた，技術的な知見と今後の課題を示す.

6.1 UAV を用いた空中写真撮影に関する知見

1) 130 km 先の目標に対して，自動制御のみで，想定したコースと高度における写真撮影が可能なことが実証された.
2) 速度が遅い UAV は，有人機と比較して，風による速度の変化が大きい．具体的には，主点間隔の変化，総飛行時間の増大による帰還可能性に注意すべきである．一方，強風下においても，GNSS を使用した自動航法であるため，撮影コースへの影響は小さく，この点を考慮する必要がないことが分かった.
3) 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.
4) 非測量用カメラを用いて高精度の計測を行う場合は，日本測量協会が実施しているカメラ検定を行う必要があることが実証された. 今回は, 厚さ 2 mm のアクリル板を通しての撮影であったが，アクリル板をつけている場合でも，カメラ検定を行うことにより，正常にキャリブレーションができることが実証された.
5) 今回は, シャッタースピードを 1/800 秒に固定し，露出絞りを自動として撮影を行った．カメラ検定の観点からは，露出絞りを固定して，シャッタースピードを自動とした方が好ましいが，今回は，特別の問題は生じていない.
6) 外注による撮影においても, 発注前に離発着場所を事前に確保する（内諾を得る）ことが望ましい. また，本件では，当該自治体の協力が得られたことが，離発着場所の確保に有利に働いたと考えられることから，当該自治体に事前に相談することとが望ましい.

6.2 Pix4Dmapper を用いた解析処理に関する知見

1) Pix4Dmapper に限らず，空中三角測量全般において，地上基準点がなく，カメラの位置だけで調整する場合において, 撮影が単コース撮影であると，飛行コースを軸としたブロック全体の回転（Ω，ローリング）が不定となり，空中三角測量が不安定となる．この場合には，地上基準点が必須である.
2) Pix4Dmapper の場合は，信頼できるカメラの傾きのデータがあるくにかぜⅢの空中写真を用いても，飛行コースを軸としたブロック全体の回転が不定となる現象が発生した．したがって，地上基準点がない場合は，GNSS データがあることと，複数コース（あるいは直交コース）の撮影が必要であると考えられる.
3) 日本測量協会が実施するカメラ検定の結果を

Pix4Dmapper で利用するには，両者のディストーションのモデルが異なるため，変換が必要である．本件において，変換の方法が確立された．

4) Pix4Dmapper は，自動的な DEM 及びオルソ画像作成ツールとして有効である．重複度の高い撮影，特に直交コースを用いた撮影が有効と考えられる．この場合，地上基準点なしでも調整は可能であるが，UAV に搭載できる GNSS の精度を考えれば，絶対位置の計測には，四隅への地上基準点の配置が望ましい．
5) 今回得られたオルソ画像は，くにかぜⅢの撮影によるオルソ画像ほど鮮明ではないが，地形判読用としては十分なものであった．
6) なお，単に画像をつないだだけのパノラマモザイク画像（地理空間情報部で作成）は，容易に作成でき，速報性のある成果として有用である．
7) 離島の空中写真撮影では GCP（地上基準点）が得られないことが多い．UAV の GPS の測位精度は低い場合が多いので，位置の基準として（GPS/IMU を装備した）「くにかぜⅢ」による撮影が必要である．

6.3 今後の撮影に向けた主な技術的課題

1) UAV による地形図作成・修正に関する経験・知見の蓄積
2) 機体位置情報精度の向上
3) UAV 用に最適な対空標識の検討
4) Pix4Dmapper 等による効率的な 3D データ作成方法の習熟・検討
5) 速報用パノラマモザイク画像の作業フロー構築
6) 電子防災情報システムでの DSM・オルソモザイク画像の自動処理の検討

7. まとめ

小笠原村西之島の空中写真を UAV により自動撮影した．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するとともに，撮影と解析を通して得られた知見や課題を整理した．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．

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選定・確保することができた．基準点の取得には，国土地理院基本図情報部地図情報技術開発室の協力を得た．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㈱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 8 月 11 日）

参 考 文 献

長谷川均，磯谷達宏，小野勇（2014）：UAV（自律型飛行体）を使った空中写真の活用，2014 年日本地理学会春季学術大会発表要旨集，313.

井上公，内山庄一郎，鈴木比奈子（2014）：自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術，防災科学技術研究所研究報告，81，61-98.

海上保安庁海洋情報部（2014）：西之島，海域火山データベース，http://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/kaiyo18-2.htm (accessed 7 Jun. 2014).

神谷泉（2014）：2013 年西之島噴火の海岸線の初期変化，日本写真測量学会平成 26 年度年次学術講演会発表論文集，pp.9-12.

気象庁（2014）：潮位表 父島（CHICHIJIMA），http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php?stn=CC (accessed 12 Jun. 2014).

国土地理院（2014a）：西之島の空中写真を無人航空機で初めて自動撮影，http://www.gsi.go.jp/kenkyukanri/kenkyukanri60006.html (accessed 7 Jun. 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 7 Jun. 2014).

国土地理院（2014c）：赤色立体地図による 4 時期比較，http://saigai.gsi.go.jp/2/20131120nishinoshima/nishinoshima_3d/20140322-vt.html (accessed 7 Jun. 2014).

国土地理院（2014d）：小笠原諸島西之島周辺の空中写真，国土地理院技術資料 H1-No.11.

国土地理院（2014e）：小笠原諸島西之島周辺の正射画像，国土地理院技術資料 H1-No.12.

国土地理院（2014f）：小笠原諸島西之島周辺の DEM，国土地理院技術資料 H1-No.13.

国土地理院（2014g）：西之島の地殻変動，火山噴火予知連絡会会報，118，準備中.

小坂丈予（1975）：西之島火山の活動とその観測（続），地質ニュース，no. 246，1–9.
松田幸雄（2013）：無人航空機の長距離無線データ通信方法の検討，宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-13-005，1-26.
長井正彦，柴崎亮介（2009）：センサ統合による UAV 搭載型マッピングシステム，写真測量とリモートセンシング，48，5，260-265.
谷口弘樹，吉松祐香，森田学，鈴木真二，廣川類，実松洋平，鈴木太郎，橋詰匠，久保大輔（2010）：防災用飛行ロボットシステムの開発と適用，計測自動制御学会論文集，46，1，49-51.
東京大学地震研究所（2014）：西之島における噴火活動について（続報），第 129 回火山噴火予知連絡会資料，西之島.
内田恭司，森　大（2009）：簡便な低高度プラットフォームを用いた文化財調査，写真測量とリモートセンシング，48，5，285-288.
内山庄一郎，井上公，鈴木比奈子（2014a）：SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究，防災科学技術研究所研究報告，81，37-60.
内山庄一郎，中田高，井上公，熊原康博，杉田暁，井筒潤，後藤秀昭，福井弘道，鈴木比奈子，谷口薫（2014b）：小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試み－根尾谷断層水鳥断層崖を例に－，活断層研究，40，35-42.
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.
渡部要一，佐々真志（2009）：UAV と MASW を活用した効率的な干潟堆積土砂調査，土木学会論文集 B2（海岸工学），B2-65，1，1441-1445.