



Title	UAVによる樽前山溶岩ドームの3次元地形モデリング
Author(s)	工藤, 千聖; 青山, 裕; 田中, 良
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 83, 103-114
Issue Date	2020-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.83.103
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77097
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_83_p103-114.pdf



UAVによる樽前山溶岩ドームの3次元地形モデリング

工藤 千聖

北海道大学理学部地球惑星科学科

青山 裕・田中 良

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2020年2月25日受理)

Three-dimensional reconstruction of topography model of Tarumae lava dome using UAV (unmanned aerial vehicles)

Chisato KUDO

Earth and Planetary Sciences, School of Science, Hokkaido University

Hiroshi AOYAMA, Ryo TANAKA

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received February 25, 2020)

Monitoring of volcanic activity is essential for volcanological studies as well as disaster mitigation. In case of a lava dome eruption, it is particularly important to monitor the instability of the dome that may result in its collapse accompanied by a pyroclastic flow. For a study of the growth mechanism of the lava dome and the hazard assessment against the dome collapse, frequent monitoring of the topography with a high resolution is necessary. The airborne photogrammetry and/or the space geodesic technologies are commonly used to observe the ground surface. However, they are usually not suitable for frequent operations from the viewpoint of its cost and/or the recurrence period. Therefore, in this study, we tried the UAV (Unmanned Aerial Vehicles) photogrammetry for the lava dome topography measurement. This study aimed for evaluating the accuracy of the topography reconstruction by the drone-based photogrammetry as a preparatory step for the future monitoring on a regular basis. We chose the lava dome of Mt. Tarumae as a test field, and tried reconstructing a 3D topography model consisting of dense point cloud and the DSM (Digital Surface Model) from hundreds of aerial images taken by a drone. We succeeded in reconstructing the topography models with or without the GCPs (Ground Control Points), and finally obtained the DSM of a high spatial resolution about 9.5 cm/pixel. To evaluate the accuracy of our DSM, we compared it with the DEM (Digital Elevation Model) provided by the Geographical Survey Institute to estimate the elevation difference between them. Contrary to our expectation, the DSM with the GCPs had a larger self-inconsistency than the one without the GCPs. We suspect that spatially imbalance arrangement of the GCPs may have affected. Our achievement of generating the high-resolution topography model demonstrated that the drone-based



photogrammetry is useful for volcano observation. The technique will be more common and easier with improving performance of UAVs in the future.

I . は じ め に

溶岩ドームは成長するにつれて重力的に不安定になるため部分的に崩落して火砕流を引き起こす(中田・小林, 1991), あるいは溶岩ドームの亀裂から熱を蓄えたドーム内部に雨水が入り込むことで水蒸気爆発が発生しやすくなるなど(Darmawan et al., 2018), 多くの災害危険性を秘めている。溶岩ドームの成長過程を監視して形状を迅速に把握することは, 起こりうる災害の種類や危険性を事前に察知し, 適切な防災情報を発信する上で極めて重要である。そのためには, 成長を続ける溶岩ドームの全体像を, 高頻度で繰り返し調査することが望ましい。

従来, 火山地形の計測には, 現地での GNSS 測量や, 航空機からの空中写真やレーザー, または人工衛星に搭載した合成開口レーダーが利用されてきた。しかし, 活発な活動を続けている火山の近傍では, 硫化水素等の有毒な火山ガスが噴出していたり, 熱や化学物質によって岩石が変質し地盤がもろくなっていたりして, 調査対象とする地域へ立ち入ることすら困難な場合も少なくなく, 現地での地上測量には限界がある。航空機による上空からの測量も, 機体や飛行場の使用料や燃料費, 人件費等のコストがかかることに加え, 天候によって飛行可否の制約を受けるほか, 噴火活動が活発な時期には火山近傍を飛行すること自体が危険であり, 高頻度の繰り返し観測は難しい。より高高度から調査ができる人工衛星は, 航空機と違って天候や火山活動の影響を受けないという利点がある一方で, 回帰日数が数 10 日以上かかるものもあり, 高頻度での繰り返し観測には不向きと言える。

ドローンとも呼ばれる UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機) は, 科学技術の進歩とともに近年急速に普及し, その用途は農業, 映像産業, 調査研究, 趣味と多岐にわたる。ホバリングや垂直離着陸が可能なものもあるため, 離発着地点が限られるような場所での利用にも適している。従来からあるエンジン付きの無人ヘリコプターに比べると小型で持ち運びに便利なおうえ, 簡単なトレーニングをすれば研究者や行政担当者自身で操縦できるため, 人員, 費用, 時間が大幅に節約でき自由度が高い。飛行できる風速や気温(具体的な限界値は機体による)に制限はあるものの, 航空機よりも低空を飛ぶことができるため, より解像度の高い画像を取得することができる。すでに UAV は, Rokhmana and Andaru (2016) による火山噴火後の地形変化の調査や, De Beni et al. (2019) による溶岩流の体積推定などのように, 地形学的目的のために利用され始めている。地形情報の取得や防災情報作成の観点からも, UAV を用いれば手軽に高精度の画像情報が得られることが示されてきた。

他方, 画像情報に基づく物体の 3 次元形状の復元技術の発展もめざましい。SfM (Structure

from Motion) と MVS (Multi View Stereo) と呼ばれる処理により, 異なる視点から撮影された複数枚の画像を組み合わせることで, 撮影対象物の 3 次元形状を復元することができる. 空中写真から復元される 3 次元地形モデルから, DSM (Digital Surface Model) を作成することも可能である.

UAV による空中写真測量と画像情報に基づく形状復元技術を組み合わせ, 溶岩ドームの観測に適用することによって, ドームの地形学的・構造学的な特徴を迅速に把握することが可能になり, 成長メカニズムの解明や防災情報の迅速な発信に貢献できると期待される.

本研究では, UAV を用いた溶岩ドームの写真測量の可能性を議論するため, 樽前山溶岩ドームをテストフィールドとした. 樽前山のドームは 1909 年の生成から 120 年が経過し溶岩塊の崩落が進むほか, ドーム周辺の火口でも崩落や埋没といった地形変化が時折発生しており, 繰り返し観測から地形の時間変化を追跡できる可能性がある. 本研究では, 将来の地形変化の追跡に向けた準備段階として, GCP (Ground Control Point: 地上基準点) の有無による地形推定精度の評価を目的とした.

II . 3 次元モデリングの原理

画像情報に基づく物体の 3 次元形状モデリングは, SfM (Structure from Motion) と MVS (Multi View Stereo) の理論に基づいて実行される (早川・他, 2016). SfM とは, 対象物を写した複数枚の画像間の対応と, カメラの内部パラメータ (カメラの焦点距離などカメラ固有の値), 外部パラメータ (撮影時のカメラの位置や姿勢) を推定し, 対象物の 3 次元形状を対応点からなる疎な点群で復元する技術である. MVS では, SfM で推定したカメラパラメータを用いることで, 対応点以外の点についても 3 次元座標を求め, より多くの点群からなる 3 次元形状 (これを高密度クラウドと呼ぶ) を復元する技術である. SfM-MVS による 3 次元モデリングの一般的なワークフローは以下の通りである.

- (i) 特徴点の検出
- (ii) 特徴点のマッチング
- (iii) カメラの外部パラメータ推定
- (iv) 対応点の 3 次元座標の推定
- (v) バンドル調節
- (vi) 高密度クラウドの作成

これらの処理についての数学的な背景は, 例えば画像情報教育振興協会 (2015) や金谷・他 (2016) などの教科書に詳しく述べられているので, ここでは処理内容の概略だけを示す. ただし, カメラの内部パラメータは事前のキャリブレーションにより既知とする.

(i) 特徴点の検出では, 色や明度などが急激に変化するような, 画像内で際立って検出できる点を特徴点として検出し, (ii) 特徴点のマッチングで, 異なる画像同士の特徴点を照合して,

対応する特徴点の組み合わせを探す。(iii) カメラの外部パラメータが推定できると、カメラの光学中心と対応点を結ぶ直線(視線)の交点から、(iv) 対応点の3次元座標が推定できる。これをすべての対応点に対して行い、3次元位置情報(本研究では緯度・経度・標高)を持つ点群からなる疎な3次元形状を復元する。推定した3次元形状の精度を高めるため、対応点を各カメラの画像平面へ再投影して実際に投影されている点との誤差を算出し、これが最小になるように対応点の3次元座標とカメラモーションを反復更新する。この操作を(v)バンドル調整という。最後に、より空間密度の高い3次元点群(=(vi)高密度クラウド)を作成するため、対応点以外の点の3次元座標を推定する処理を行う。ある画像上の任意の点の3次元座標をその視線上の適当な空間位置に仮定したとき、その空間点を投影する全画像の投影点の画素を調べる。この作業を視線上で順に行い、最も各投影点の画素値(画素の色や明るさを表す値)が一致するところが、その点の3次元位置と決まる。

Ⅲ. GCP(Ground Control Point): 地上基準点

GCPは、3次元地形モデルに絶対的な座標(緯度、経度、標高)に関する位置情報を組み込むためのツールである。3次元地形モデルに位置情報を組み込む方法は、GCPを用いる他にも、写真に記録されたEXIF(Exchangeable Image File Format: 撮影日時や位置情報、カメラの機種、絞り値、画素数、ISO感度、色空間、といった情報をまとめて記録する画像フォーマット)のデータを利用するものもある。しかしながらEXIFデータの位置情報は、移動しながら撮影するUAVの座標データであるため、絶対的な座標値としての信頼性は低い。ゆえに、GCPの有無によって3次元モデリングの精度が左右される。

GCPは写真測量による調査領域内に最低3つ設置し、配置は空間的に偏らないことが望ましい(De Beni et al., 2019)。また、調査領域内で急激な標高の変化がある場合は、GCPの数を増やして垂直方向にも分散させるほうが良い(De Beni et al., 2019)。GCPの位置情報は、GNSS機器を用いて正確に測量する。GCPはUAVの撮影写真上で設置地点が認識できなければならないため、目立つ岩や建物等の付近に設置するか、対空標識を用いることが一般的である(国土地理院, 2016)。

火山の近傍では活動の状態や地形的な制約により立ち入りが難しい場所も少なくなく、いつも理想的な条件でGCPを設置できるとは限らない。そこで本研究では、GCPを満足に設置できない状況でのUAV写真測量の有用性を確かめるため、GCPの有無を変えて3次元モデルを作成する。

Ⅳ. UAV 写真測量

本研究では、DJI Phantom 3 AdvancedとDJI Mavic 2 Enterprise Dualの2台のUAVを使用した(Fig. 1)。Table 1にそれぞれの仕様を示す。どちらもジンバルシステムを備えており、写真の

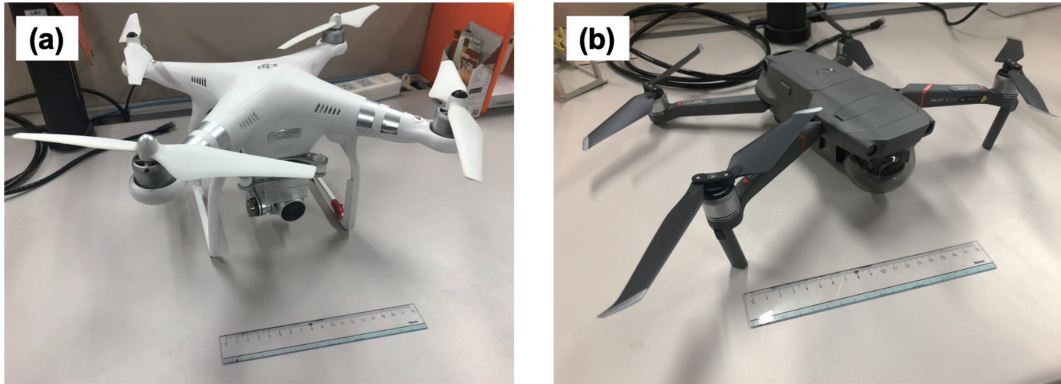


Fig. 1. UAVs used in this study. (a)DJI Phantom 3 Advanced. (b)DJI Mavic 2 Enterprise Dual.

ブレを低減する工夫が施されている。また、撮影時の EXIF データは自動的に記録される。バッテリーは、各 UAV でそれぞれ4個ずつ用意して測量に臨んだ。

測量は当初 2019 年 6 月 13 日に行う予定だったが、あいにく樽前山頂は雲に包まれて視界が悪いため UAV の飛行は中止し、GCP とする岩塊の GPS 測量のみを行った。再測量は 2019 年 6 月 19 日に実施した。多少雲が浮いていたが晴れており風も弱く、UAV を用いた写真測量には適切な気象条件であった。バッテリーを交換しながら UAV を計 6 回飛行させ、溶岩ドーム全体をカバーする空中写真撮影を行った。その時の飛行経路を Fig. 2 に示す。本研究では、バッテリー容量からきまる撮影可能時間を考慮し、50 cm 程度の物体が識別できるような UAV 画像からなる 3 次元地形モデルの復元を目指した。内山・早川 (2017) に従えば、物体の識別に必要な画素数は 12 pixel であるので、UAV 画像の GSD (Ground Sampling Distance : 地上分解能) は約 4 cm/pixel と求まる。この GSD と各 UAV の画角と画素数から、撮影飛行時の対地高度の上限を Phantom では 75 m, Mavic では 88 m と決めた。UAV は手動で操作し、画像の重複率が 80% となるように撮影した。1 日の測量作業で、最終的に Mavic で 256 枚, Phantom で 107 枚撮影できた。

Table 1. The performance of UAVs.

	Phantom	Mavic
Diagonal size	350 mm	354 mm
Weight	1280 g	899 g
Limit of flight time	23 min	31 min
Image dimensions	4000 × 3000	4056 × 3040
Angular field of view	94°	85°
Focal length	2.8 mm	2.8 mm

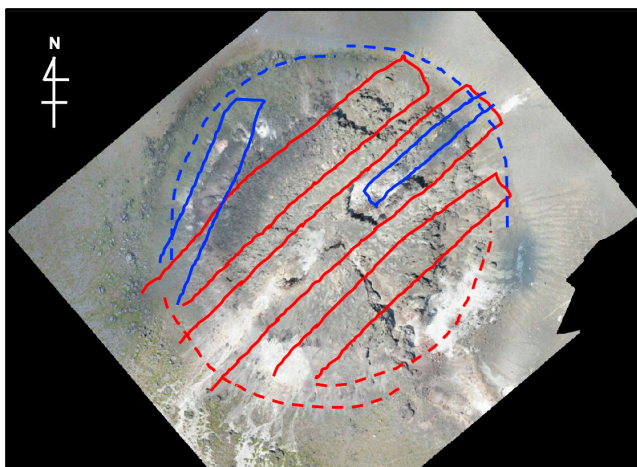


Fig. 2. The red lines represent the flying paths of the Mavic, and the blue lines represent those of the Phantom. On the paths of the solid line, we took pictures keeping the camera looking down. On the paths of the dotted line, we took pictures keeping the camera looking obliquely downward.

V. 結 果

本研究では、写真測量による3次元地形モデリングを実行するソフトウェアとして Agisoft Metashape Professional を使用し、高密度クラウド、DSM、オルソモザイクを作成した。農業環境変動研究センター（2018）に例示されている手順に従った。Metashape での処理に約5～6時間を要した。その結果を Fig. 3-5 に示す。Metashape はモデル構築の処理中に、各画像に記録された EXIF データと画像のオーバーラップおよび検出した特徴点から、カメラパラメータを自動的に推定・調整する機能を備える。これにより、GCP の座標情報を組み込まなかった3次元モデルは、UAV のカメラが取得した EXIF データによって位置情報付けされている。EXIF データから推定したカメラの外部パラメータは、Metashape のレポート機能で取得できる (Fig. 6)。Fig. 2 の飛行経路図と見比べると、使用した UAV によって水平・鉛直の誤差がともに大きく変化していることが分かる。

ここでは、GCP の座標情報を利用した3次元モデルおよびそこから作成する DSM やオルソモザイクを「TRMGCP」、同様に GCP 情報を利用せずに作成したモデル等を「TRMnoGCP」と呼ぶ。

1. 高密度クラウド

Fig. 3 を見ると、TRMnoGCP と TRMGCP はともに、樽前山溶岩ドームの形状をよく復元できている。岩石による凹凸や亀裂の内部もきれいに見ることができる。TRMnoGCP と TRMGCP との差は見た目にはほとんどわからない。高密度クラウドを構成するポイント数は、TRMnoGCP で 109,796,855 ポイント、TRMGCP で 122,573,064 ポイントとなった。高密度クラウド中で色味

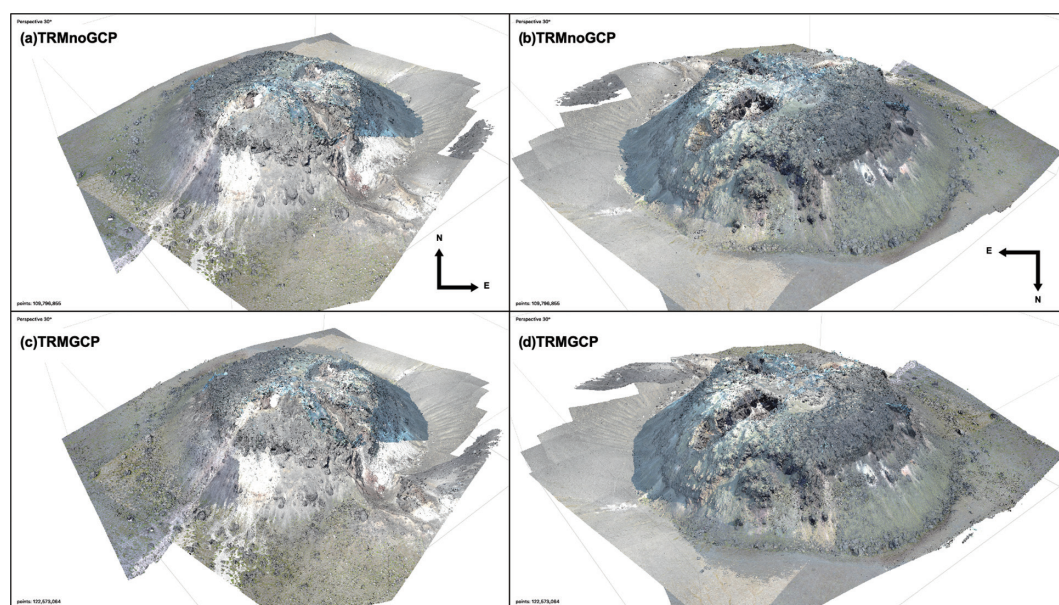


Fig. 3. The dense point clouds.

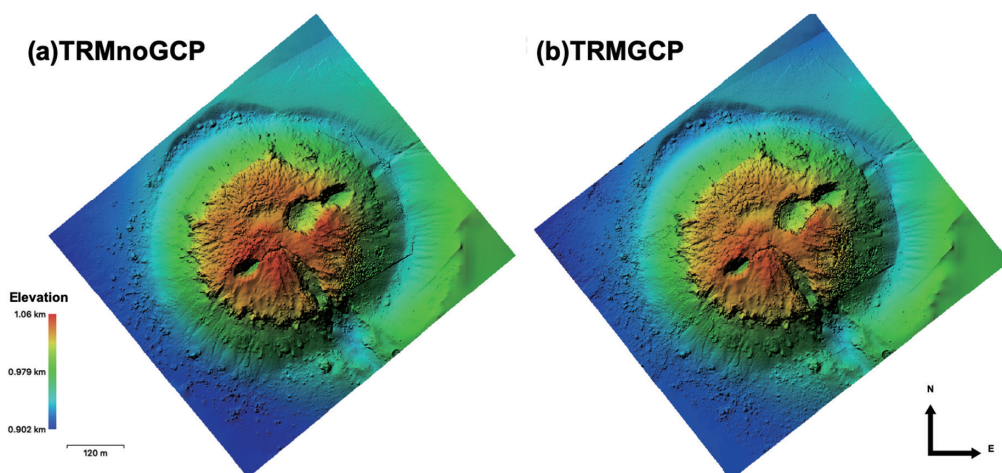


Fig. 4. The Digital Surface Models.

が変化している部分は、雲の影響で一時的に陰になってしまっていた部分と考えられる。また、ドームの上面では細かい形状が再現しきれていない部分も見られるが、噴気の影響でドーム表面が鮮明に写せなかった画像も混じっていたためと考えられる。関連して、3次元座標推定がうまくいかなかった点（空中に浮いているポイント等）は、TRMnoGCP、TRMGCPsともにドーム上面で特に多かった。

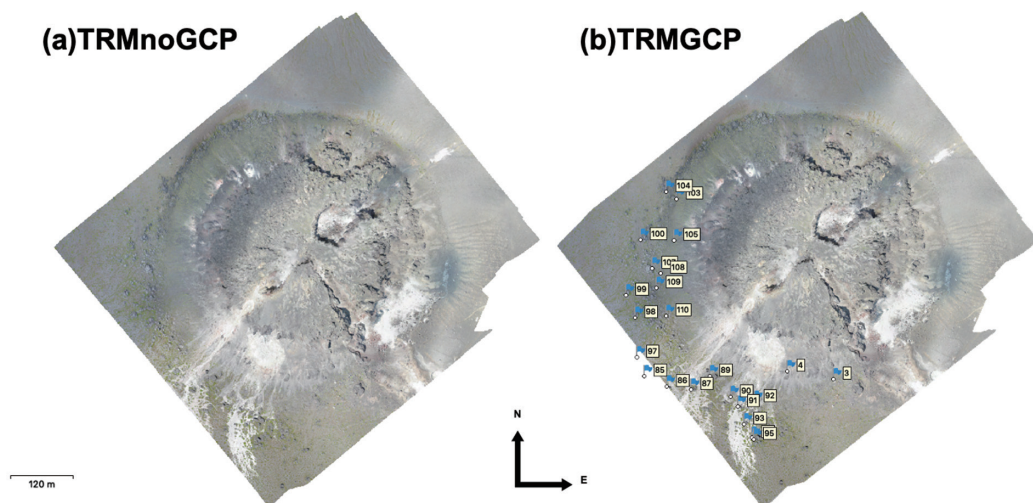


Fig. 5. The ortho images. (a) analyzed without GCPs. (b) analyzed with GCPs. White points with integer numbers show the location of GCPs.

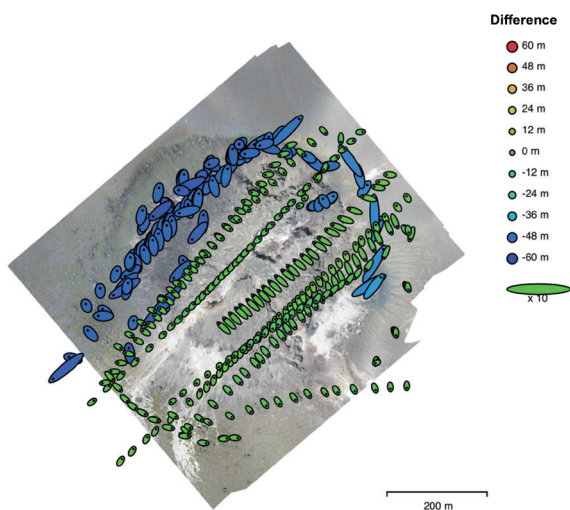


Fig. 6. The black dots represent the camera locations. The shape of ellipses represents horizontal error, and the color represents elevation error. The error scale shown by the ellipses are magnified 10 times for visibility.

2. DSM・オルソモザイク

Fig. 4 に示した DSM に関しては、TRMnoGCP の方が標高の変化が大きい（ドーム上面を見るとわかりやすい）。しかし、全体的に顕著な相違はないように思われる。解像度は、TRMnoGCP が 9.42 cm/pixel, TRMGCP が 9.52 cm/pixel だった。

Fig. 5 に示したオルソモザイクに関しては、高密度クラウド同様に GCP の有無による見た目の変化はほとんど見つけられない。解像度は、TRMnoGCP が 4.71 cm/pixel, TRMGCP が 4.76 cm/

pixel だった。本研究での測量では、GCP の配置がドームの南西側に偏ってしまった。GCP を設置する場所を事前に十分検討せず、作業時間内にドーム周辺へ均等に配置することができなかったためである。

VI. 考 察

本章では、Metashape から作成した DSM (TRMnoGCP, TRMGCP) の鉛直精度を検証するため、国土地理院が提供する（基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>) 5m メッシュの DEM (Fig. 7) との比較を行う。樽前山のドームは植生がほとんどなく地表面がむき出しのため、本研究で推定した DSM は DEM とみなしても問題はない。

本研究で求めた DSM は地理院の DEM に比べて座標値が格段に多いため、本研究の自作 DSM (TRMnoGCP, TRMGCP) を 1 m/pixel の空間分解能に間引いて出力した。つづいて、地理院 DEM の各グリッド点（緯度・経度）の半径 5m 以内にある自作 DSM の標高値だけを取り出して平均し、地理院 DEM と同じメッシュサイズの標高データに書き出した。このような手続きで地理院 DEM と同じ格子点で作成し直した自作 DSM から地理院 DEM を引くことで、各グリッド点での標高差を算出した。

Fig. 8 は、標高差から作成したヒストグラムである。TRMnoGCP のヒストグラムの方が全体的に右寄り、正の標高差が大きい。空中を動きながら撮影する UAV の EXIF データは位置情報の信頼性が低いため、モデルの 3 次元座標推定精度が低下したためと考えられる。それぞれの標準偏差は、TRMnoGCP で 3.90, TRMGCP で 6.67 と、ヒストグラムの形状からもわかる通り、TRMGCPの方がデータのばらつきが大きくなった。これは、写真測量時の GCP 設置場所の偏りが一因であろう。TRMGCP では、GCP によりうまくバンドル調整で 3 次元座標を調整できた場所とそうでない場所ができ、その結果として標準偏差が大きくなったと考えられる。つまり、

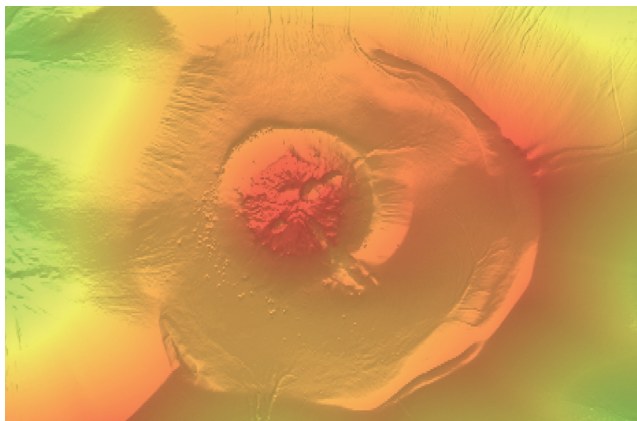


Fig. 7. The Digital Elevation Model issued by the Geographical Survey Institute in 2007.

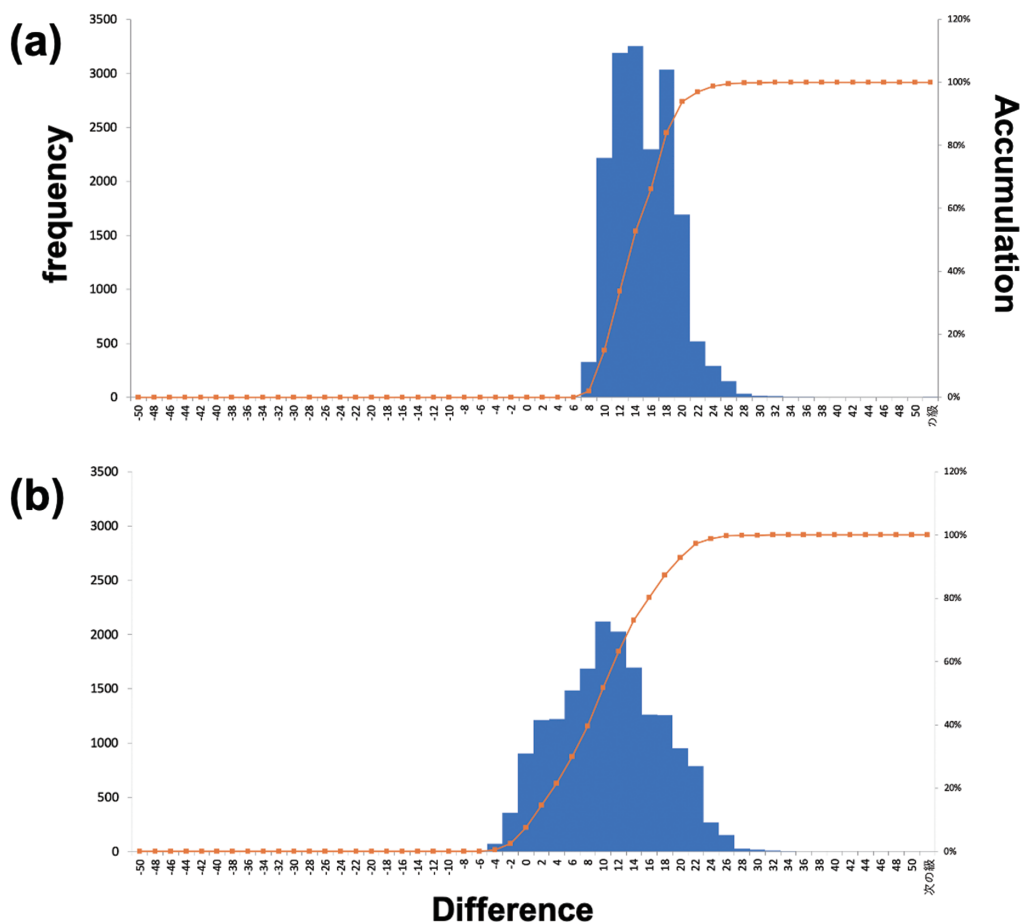


Fig. 8. Histograms of elevation differences between DSM created in this study and DEM issued by the Geographical Survey Institute in 2007.

GCPに近い側では本来の標高値に近いDSMが得られているが、GCPがない側では絶対座標との調整ができず、全体として傾いたDSMが得られたと考えられる。一方で、TRMnoGCPはカメラのEXIFデータだけに基づいて点群全体を最適化できたため、地理院DEMとの標高誤差が空間的に均一になったと推測される。つまり、TRMnoGCPでは絶対値としての誤差は大きいものの、得られたDSMは大きく傾いていないと考えられる。

Fig. 9は、自作DSMと地理院DEMの標高差を階層分けして色を付け、オルソモザイクに重ねた図である。上の考察から、TRMGCPではGCPから遠ざかるにつれ標高差が大きくなると予想したが、Fig. 7ではそのような構造は見られない。実際には北西から南東方向へと標高差が大きくなっており、GCPの偏りと関連づけられるような標高差の変化は見つけられなかった。TRMnoGCPとTRMGCPに共通してドームの東側面の標高差が最も大きくなっており、その標高

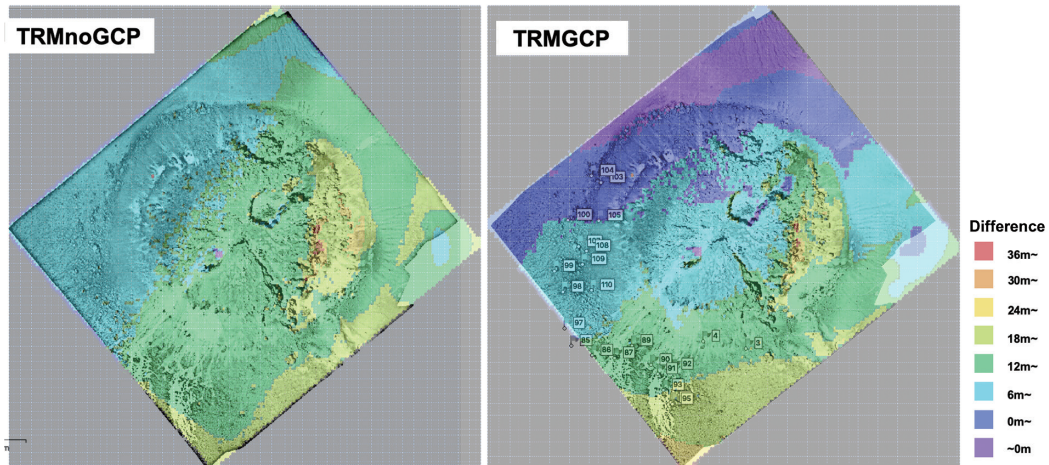


Fig. 9. Spatial distribution of elevation differences between DSM created in this study and DEM issued by the Geographical Survey Institute in 2007. White points with integer numbers in (b) show the GCP locations.

差は 30 m を超えている。ドームの亀裂や陰になっている部分の標高差の局所変化は、UAV で可視画像を撮影した際に陰になってしまって正確に形状が復元できなかったためと考えられる。

VII. ま と め

本研究では、UAV を用いて撮影した空中写真から対象領域の 3 次元地形を復元するための写真測量技術を樽前山溶岩ドームに適用し、詳細な 3 次元地形モデルの構築を試みた。高密度クラウドから構築した DSM とオルソモザイクの解像度は、それぞれ約 9.5 cm/pixel と約 4.7 cm/pixel だった。国土地理院が航空レーザ測量で作成して公開している DEM の 5 m という空間分解能と比較すると、本研究の DSM が非常に高分解能であることがわかる。

使用する UAV によってカメラの外部パラメータの推定誤差に大きな違いがみられた。これは UAV の GPS の精度の差によるものと考えられる。これによる DSM の精度への影響は不明だが、測量を通して一つの UAV を使用することが望ましいといえる。

今回は、GCP の設置の有無が 3 次元地形モデルの精度に与える影響を検証するため、GCP の有無を変えて TRMnoGCP、TRMGCP を作成した。それぞれの高密度クラウド、オルソモザイクに見た目の違いはほとんどなかった。DSM は、わずかに変化を認められる箇所もあるが、やはり見た目にはわかりにくい。そこで、それぞれの DSM の標高と地理院 DEM の標高の差分をとった結果、GCP 有無による違いが顕著にあらわれた。TRMnoGCP は、TRMGCP と比較して、全体的に標高差が大きかった。一方で、TRMGCP の方が標高差の標準偏差が大きく、実際の形状と比較して歪んでいる（全体的に傾いている）と推測され、本来 3 次元モデルの位置情報精度を高める役割をする GCP が裏目になる結果となった。これは、偏った GCP の配置による影響と考え

られたが、具体的な原因説明には至らなかった。ただし、GCP を満足に配置できない状況で地形の3次元形状を復元するときは、GCP を全く組み込まない方が、形状の再現性が高いことが明らかになった。

完成した高密度クラウドを見れば分かる通り、GCP を利用しなくとも、対象の3次元地形形状の復元はおおよそ可能である。樽前山溶岩ドーム程度の広さのフィールドであれば、1-2 日で画像取得から3次元地形モデル復元までを完了することができる。短時間で非常に高解像度の地形モデルの作成に成功したことは、UAV による写真測量が火山地形変化の迅速な観測や評価に役立つ可能性を示唆する。ただし絶対的な標高値の精度が低いため、正確な座標情報（緯度・経度・標高）が必要な場合や、溶岩ドームの体積推定等のための定量的な観測には、十分な量と配置のGCPをあらかじめ用意しておくことが大事かもしれない。将来的に、UAV の位置情報取得精度（EXIF データ精度）の向上が見込まれることを考慮すれば、UAV を用いた写真測量はより一般的で手軽なものになるだろう。有珠山などで見られるような大きな地形変化を伴う火山活動では、UAV による迅速な地形測量が役立つと期待される。

謝辞 地震火山研究観測センター火山分野の学生の皆様には、写真測量時のGCP測量を手伝って頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- Darmawan, H., T. R. Walter, K. S. Brotopuspito, Subandriyo, and I. G. M. A. Nandaka, 2018, Morphological and structural changes at the Merapi lava dome monitored in 2012-15 using unmanned aerial vehicles (UAVs), *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **349**, 256-267, doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.11.006.
- De Beni, E., M. Cantarero, and A. Messina, 2019, UAVs for volcano monitoring: A new approach applied on an active lava flow on Mt. Etna (Italy), during the 27 February-02 March 2017 eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **369**, 250-262, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.12.001.
- 画像情報教育振興協会, 2015, デジタル画像処理 改訂新版, pp443.
- 早川裕式, 小花和宏之, 齋藤 仁, 内山庄一郎, 2016, SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用, *地形*, **37**, 3, 321-343.
- Johnson, J., 1958, Analysis of image forming systems, Image Intensifier Symposium, 244-273.
- 金谷健一, 菅谷保之, 金澤 靖, 2016, 3次元コンピュータビジョン計算ハンドブック, 森北出版, pp308.
- 国土地理院, 2016, UAV を用いた公共測量マニュアル (案), 16.
- 中田節也, 小林哲夫, 1991, 雲仙岳 1991 年噴火によって生じた溶岩ドームの成長と火砕流, *火山*, **36**, 3, 391-393.
- 農業環境変動研究センター, 2018, ドローンを用いたほ場計測マニュアル, 不陸 (凹凸) 編, 24-38.
- Rokhamana, C. A., and R. Andaru, 2016, Utilizing UAV-based mapping in post disaster volcano eruption, 2016 6th International Annual Engineering Seminar (InAES), Yogyakarta, 202-205.
- 内山庄一郎, 早川裕式, 2017, SfM 多視点ステレオ写真測量による地形モデリングの基礎, 第 26 回学術研究発表大会ハンズオンセッション.