

# 瓶ヶ森山頂における 植生調査のための精密地形計測

石 黒 聡 士

## 1. はじめに

地形と植生に関する詳細な検討を行うためには、現状の植生の状況と、地形について、適切な解像度のデータ取得が必要である。現状で入手可能な全国的な地形データは国土地理院が公開している5mメッシュの標高データがもっとも詳細である。しかし、起伏が数十cm以下の微地形について考察する場合は解像度不足である。また、植生を判読する材料として航空写真や衛星画像が考えられるが、これらは特に山間部においては撮影頻度が低く、数年から十数年間撮影されないことが多いうえ、地形図作成の目的で撮影される航空写真は植生調査には解像度が不足したり、白黒写真であったりして実用的でない場合が多い。本研究は、瓶ヶ森山頂付近（愛媛県西条市～高知県の町）において、解像度数cmの細密地形モデルとオルソ画像の作成を目的に、小型無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle；UAV）を用いた細密地形データおよび詳細な植生被覆データとして高解像度のオルソ画像の作成を試みた。なお、本稿は、『公益財団法人国土地理協会 学術研究助成報告集 第4集』を加筆・修正したものである。

## 2. 対象地域の概観

愛媛県西条市と高知県の町に跨る瓶ヶ森は、山頂の標高が1,896.5mあり、南東およそ8kmには西日本の最高峰である石鎚山が眺望できる。瓶ヶ森の山頂付近の地形は概ね東西方向に非対称な傾斜をもっており、山頂から南南東に伸びる稜線を境に、東側は特に急峻で、その勾配が45度にもなる急崖である。一方、尾根の西側は氷見二千石原とよばれる勾配が7.5度～18度程度の緩傾斜の斜面が広がっており、準平原が地殻変動によって現在の標高まで持ち上げられたもの（隆起準平原）と考えられて

いる（図1）。

瓶ヶ森山頂付近の植生は、尾根の西側において笹原が広がっており、その中に針葉樹が点在している。このような景観は、通常森林限界よりも高標高の「高山帯」に区分される地域に見られるが、瓶ヶ森を含めて西日本には高山帯に区分される地域は存在しない。尾根の東側の急崖は、広葉樹林が卓越している。瓶ヶ森山頂付近において、あたかも高山帯のような景観が広がっている理由については、偽高山帯として形成された可能性のほか、人為的な要因の可能性も指摘されているが、はっきりしていない。

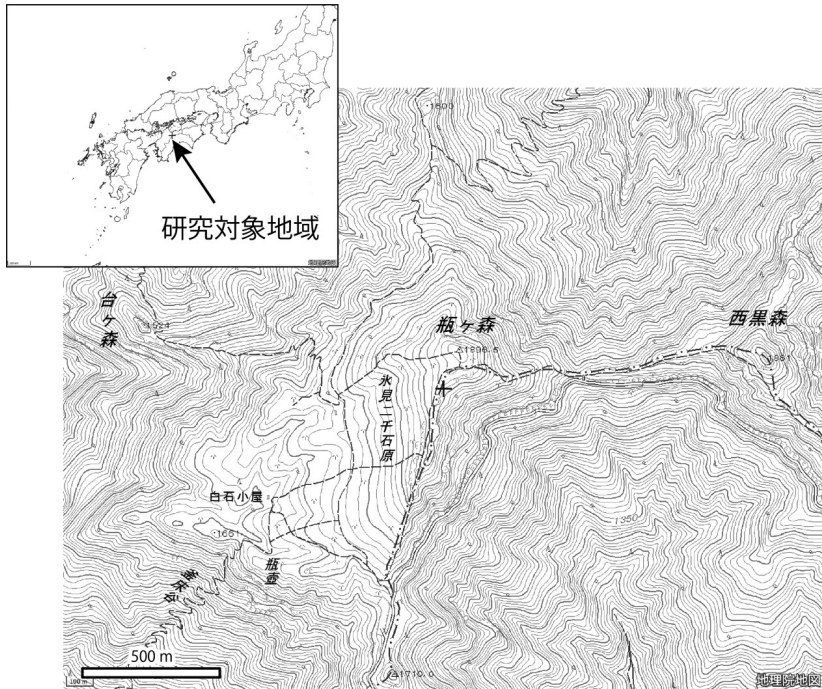


図1 研究対象地域の瓶ヶ森山頂付近の地形図。地理院地図により作成。  
山頂の南東の緩斜面に笹原の地図記号が確認できる。

### 3. 調査手法

#### 3-1. UAVによる空撮と地形モデル作成

本研究は、瓶ヶ森山頂付近において細密な地形モデルを作成する。近年爆発的に普

及した UAV は、従来の有人機に比べて格段に低い対地高度から空撮を行うことができ、さらに SfM-MVS (Structure from Motion-Multi-View-Stereo) 解析により高精度な地形モデルを作成できるようになった。本調査地域程度の空間的広がりの地形を細密に計測する手段として最適と考えられる。

本研究で使用する UAV は、DJI 社の Phantom 4 pro である (図2)。当該機種は 4K カメラが搭載されており、一度の充電 (バッテリー) で約30分程度の飛行が可能である。また、純正またはサードパーティのプログラムを使用することにより、あらかじめ設定された空中の点 (ウェイポイント) を指定した順番に通過するように航路を設定し、離陸から着陸に至るまで、コントローラーの操縦スティックを触ることなく、オートパイロットが可能である。機体のスピードと航路長、離着陸に要する時間等をあらかじめ自動計算し、バッテリーの残量と照らして安全に帰還できる航路設定でない場合、または自機の位置を高精度に特定するに十分な数の GNSS を受信していない場合は、警告を発するとともに、離陸できない仕組みになっている。さらに、機体の前方、後方、左右、下方の5方向に光学センサーまたはソナーが搭載されており、万一障害物に衝突しそうになるとその場でホバリングをして操縦者の指示を待つ態勢に入るなどの安全機能が充実している。



図2 本研究で使したUAVの外観。Phantom 4 proとカメラからの映像を確認したり航路を設定するためのタブレット端末。

空撮によって得られた多数の写真を、SfM-MVS によって解析し、数値標高モデル (Digital Surface Model ; DSM) を作成する。SfM-MVS は、従来の航空写真測量の理

論に基づいて、コンピュータ上で画像解析することにより、複数の空撮画像から半自動的に地形のデジタルモデルを作成可能である。本研究では、多くの研究で採用されており、DSM 作成精度が明らかになっている Photo Scan Professional Edition (Agisoft 社) を用いる。

UAV と SfM-MVS を用いた地形計測は、すでに多くの調査研究に使用されている。例えば、中田ほか (2014) は、2013年10月15日にフィリピン・ボホール島で発生した M7.2 (PHIVOLCS) の地震に伴って出現した地表地震断層について、UAV による空撮と SfM-MVS を用いた解析を試みた。断層沿いの約300mの範囲2箇所において、地表地震断層の位置、形状、変位量に関する詳細なデータを効率的に収集できることを示し、地形調査・活断層研究への活用の可能性を指摘した。また、2014年11月22日に長野県北部で発生した M6.7 (気象庁) の地震 (神城断層地震) に伴って出現した地表地震断層について、石黒ほか (2016a) はその約7割の地区を撮影し、解像度が数センチメートルの DSM およびオルソ画像を作成した。これにより、地震後の復旧作業や積雪によって観察が困難になった地震時の変位量を詳細に記録することに成功した。ほかにも、2014年4月の熊本地震における地表地震断層の計測 (石黒ほか 2016b) など、UAV と SfM-MVS を用いた地形研究は、まさに新たな段階に入ってきており、今後も応用範囲が広がることが予測される重要な技術・調査手法である。

### 3-2. RTK-GNSSによるGCPの測位

SfM-MVS を用いた DSM 作成には、2つのアプローチがある。一つは、撮影地点の情報として、空撮時に画像に自動付加された位置情報 (ジオタグ) のみを利用する解析手法である。もう一つは、空撮画像に写った地物を GCP (Ground Control Point) として、別途 GNSS 測量等により正確な位置を計測して解析に利用する場合である。

前者は現地における GNSS 測量が不要であるために、現地で必要な調査は UAV による空撮のみであり、簡易かつ短時間の調査で地形データを取得できる。しかし、空撮画像に付与されるジオタグは、空中を移動しながら撮影する UAV が取得する座標であり、高精度な位置決定は期待できない。この精度不明の位置情報のみを頼りに撮影座標を計算するため、作成された DSM も精度を期待できない。

後者の GCP を用いる手法では、写真上の地物の高精度な絶対座標を付与する。GCP は複数の写真に写り込んでおり、それぞれの写真における正確な座標が矛盾しないよう (残差が閾値を下回るよう) 計算を繰り返すため、一般的により高精度な DSM の作成が可能である。また、計算上決定される GCP の位置座標と、実際の GNSS 測量によって得られた座標との比較が可能となり、作成された地形モデルにおける精度評価が可能である。

ただし、GNSS 測量には一般的に高額な測量機器が必要となるほか、機械操作の訓練、習得も必要となる。本研究で想定している、比較的狭い範囲に5～10点程度のGCPを測量する場合に適したGNSS測量は、RTK測量と呼ばれる測量方法である。これは、2台のGNSS測量機器を用い、一台は「固定局」として任意の地点に三脚で固定して測量の間不動とし、もう一方を「移動局」としてGCPの各地点を測量して回る方法である(図4)。固定局で観測された揺らぎを移動局の測量結果から差し引くことで、高精度な測位が可能となる。

測量用のRTK-GNSSの機器は、概ね数百万円のオーダーであるが、近年、「格安RTK-GNSS」を謳う製品が登場し、その利用可能性が注目されている。さらに、操作性も比較的容易であるため、本研究ではGCPの測量にいわゆる「格安RTK-GNSS」を使用した測量を試行した。本研究で使用したのは、EMLID REACHである。本機種は本体の大きさが僅か3×4.5センチメートル、厚さ7ミリメートルほどの半導体基板であり(図3)、これに付属のGNSSアンテナ(Tallysman TW4721)と外部電源

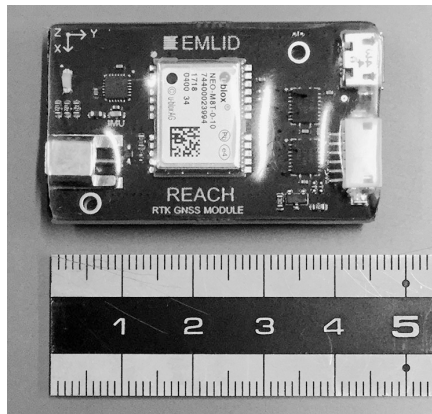


図3 本研究で使用した「格安RTK-GNSS」の本体。これにGNSSのアンテナと、市販のモバイルバッテリーを接続して使う。

(市販のポータブルリチウムバッテリー)を接続して使用する。基盤には着脱不可の2GBのメモリを搭載しており、電源が通電した時から連続的にGNSSのログを記録し続ける。受信する衛星の種類やインターバル、記録したデータの読み出し等は全て無線で行う。WiFi接続が可能なタブレット端末またはコンピュータと無線接続したうえで、一般的なWebブラウザを使用した設定が可能である。稼働中も無線を介したモニタリングが可能であり、信号の受信状況等を監視できる。

以上で述べた、本研究で使用するUAV、GNSS機器および解析ソフトウェアにつ

いて、表1に示す。

表1 本研究で使用する機器とソフトウェアの性能等

使用機器および解析ソフトウェア	機種・ソフトウェア名等	主な仕様や機能等	備考（参考価格等）
UAV	Phantom 4 pro	最大飛行可能時間：約30分 重量：1,388 g 搭載カメラ：1インチ CMOS、200万画素	Pix4D Capture（無償アプリ）により、オートパイロットが可能。 価格：約20万円
GNSS（RTK）	EMLID REACH	位置決定精度：1～3 cm程度（ただし経験値）	2台1組で使用。 価格：約10万円
SfM-MVS解析ソフトウェア	Photo Scan Professional ver. 1.4.0	多数の画像のマッチング技術により撮影位置を逆計算するとともに、高精度な立体モデルを作成する。	Agisoft社（ロシア）による。価格（アカデミック）549米ドル。（Windows/Mac版）
GNSS解析ソフトウェア	RTKLIB	GNSS測位データから高精度に位置決定の計算を行う一連のプログラム群。RTK測位の後処理にはRTKpostを使用する。	オープンソースプログラム（Windows版のみ）



図4 瓶ヶ森山頂付近において観測中のRTK-GNSS（移動局）



図5 空撮画像の例。瓶ヶ森山頂。調査員とハイキング客が写っている。画面の左側が北東。南西側（＝画面の右側）には笹原が広がり、ハイキングコースが伸びていることがわかる。

## 4. 調査結果

### 4-1. 空撮の結果

空撮は2017年11月3日に行った。撮影の結果得られた画像の例を図5に示す。撮影対象地域が斜面であるため、地上解像度は大きく変動するが、概ね1cmから10cm程度である。空撮は、Pix4D Captureのアプリを導入し、オートパイロットによって行った。このアプリを使用することにより、進行方向とコース間において、計算上のオーバーラップ率を自動算出し、適切なタイミングでシャッターを自動で切ることができる。空撮の結果、287枚の画像を得た。

### 4-2. RTK-GNSS測定の結果

GNSS測量は2017年11月3日に実施した。撮影した画像を現地で確認し、画像中に写っている特徴的な岩や、地表にある人工構造物（塩ビパイプ等）が確実に同定できるものをGCPとして選定した。GCPとして選定した例を図6に示す。現地において、撮影範囲に偏りなく配置できるよう、9地点を測位した。なお、GNSS測位は2台の受信機を使用し、1台は山頂近くに固定局として設置し、もう1台を移動局として連続測位した。移動局は、GCPとして測位する場所まで移動し、最低5分間の静止測

位を実施した後、次の GCP まで移動することを繰り返した。この間、基本的には連続測位を実施し、RTKLIB の RTKpost による後処理には固定局の連続観測データと移動局の観測データを用いた。後処理の結果算出された移動局の軌跡と、GCP における静止観測の結果の例を図 7、図 8 に示す。静止観測の結果は概ね 2cm 以内の位置決定精度があることがわかる。後処理の結果、本来は 9 地点全てで高精度に位置が算出される Fix 解<sup>1)</sup> が得られるはずであったが、受信した衛星の数等の影響等により、Fix 解が得られたのは 5 地点であった。



図 6 GCP の例。point 4 は地中に埋まった塩ビパイプが一部で地面から露出していた場所を選んだ。

1) Fix 解は GNSS 測量によって観測されたデータを用いた解析の結果、解（座標）が定まった場合の結果。解が定まらない場合は、Float 解となり、精度が著しく低下するため、通常は Float 解は計測結果として用いることができない。



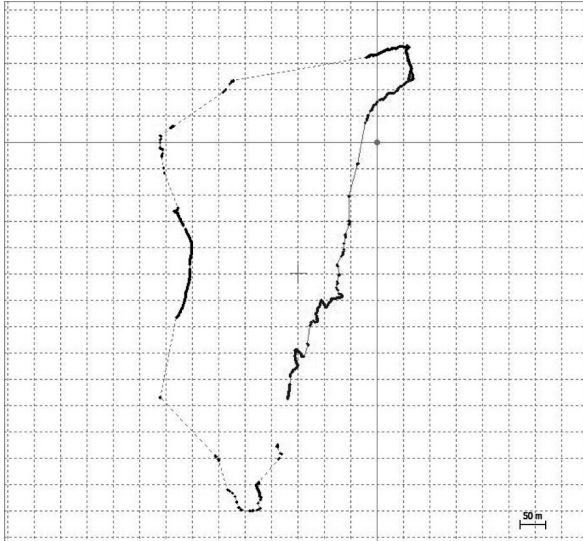


図7 GNSS測位の結果。Fix解を得られた地点のみを表示。格子は50 m間隔である。

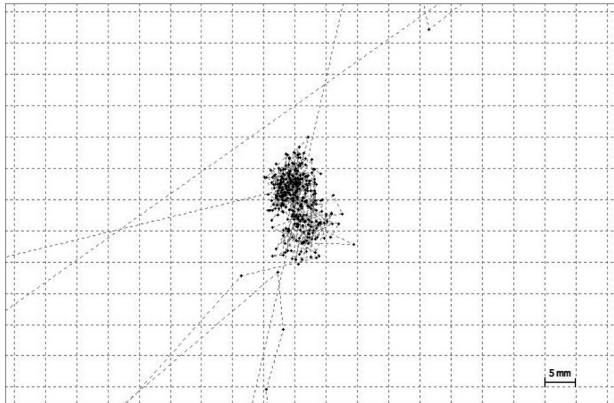


図8 移動局により計測したGCPにおけるGNSS測定の結果。格子は5mm間隔。およそ1～2cm四方の中に収まっていることがわかる。

### 4-3. SfM-MVS解析の結果

GNSS 測位によって得られた座標を GCP として使用し、解析した結果を図9に示す。作成された地形モデルから DSM を作成した結果、解像度21.4cmの DSM が作成された。図中の point 1～5 は Fix 解を得られた GCP の位置を示す。なお、point

1～5のGCPは、それぞれ、4枚、7枚、8枚、32枚、31枚の画像に写り込んでいた。

前述の通り、GCPを用いた SfM-MVS 解析により、基準点の誤差を計算することができる。今回の解析では、GCP 5地点における標定誤差の平均は、計算上、東西方向に0.81cm、南北方向に1.9cm、鉛直方向に0.65cmという計算結果となった。これら3方向の誤差の合成成分は、約2.2cmとなる。

作成した DSM をもとに、オルソ画像を作成した。空撮画像と地形データの空間解像度から自動算出されるオルソ画像の解像度は、約5.3cmであったが、計算量が多い上にオルソ画像のファイルサイズが巨大になり、画像の取り扱いが困難になることから10cm解像度とした。作成されたオルソ画像の全体を図10に示す。

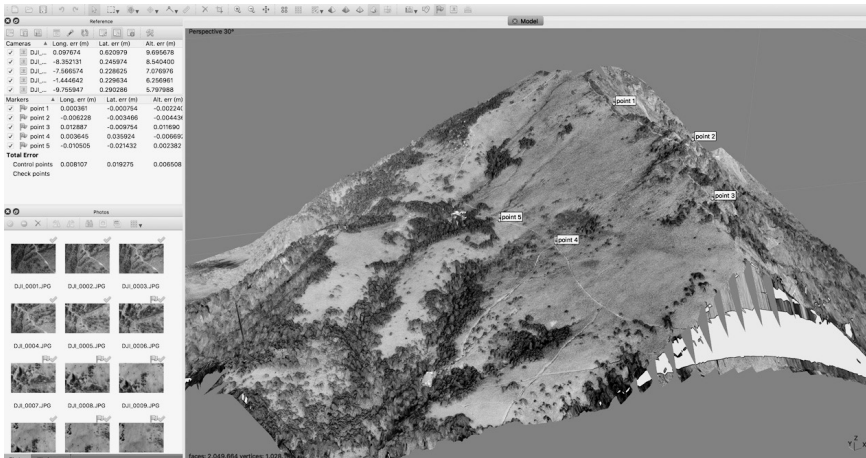


図9 SfM-MVS解析の結果作成された地形モデル。地形モデル上に表示されている point 1～5はGCPの位置を示す。山頂付近の一部でモデルが作成できていない。

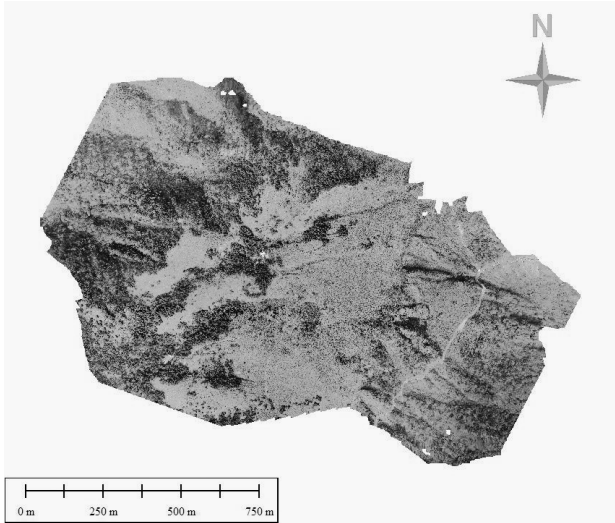


図10 SfM-MVS解析の結果作成されたオルソ画像。解像度は10 cm。

## 5. 考察

### 5-1. 地形モデル作成上の特性

UAVによって撮影された画像は287枚であった。本研究の対象地域は急勾配の地域を含むため、改正航空法に抵触しないように、UAVを飛行させる高度に注意しながら空撮を行なった。その結果、瓶ヶ森山頂において対地高度が低くなった影響で、地形モデル作成に必要な画像間のオーバーラップが確保できず、結果として山頂のごく一部において地形モデルの作成ができなかった範囲が生じた。モデル作成に使用されなかった写真は、山頂付近の7枚であった(図11)。

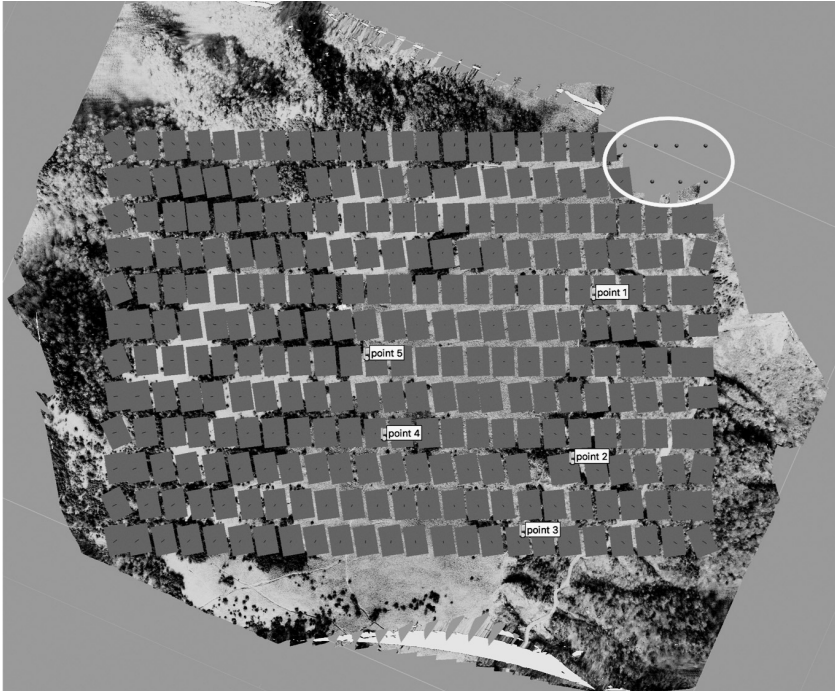


図11 SfM-MVS解析の結果。小さな長方形の一枚一枚が空撮地点を表すが、右上の丸で囲った範囲の点（7点）は解析に使用できなかったことを示す。

## 5-2. RTK-GNSS測量と後処理に関する考察

現地においてはGCPの選定にあたり、地形モデル作成範囲にまんべんなく配置するために、9地点を選定し、計測を試みた。しかしながら、後処理を実施したところ、このうちの4地点においてFix解を得ることができなかった。この原因として、次の3点が影響したことが考えられる。すなわち、1) 上空の衛星の状態（分布）が偏っていたこと、2) 遮蔽物などの影響で、正確な計算に必要な重要な衛星からの信号を受信できていなかったこと、3) アンテナが振動するなどして、連続的な信号の受信に問題が生じていたこと、のそれぞれである。

上述のうち、1と2の原因については、EMLID REACHのログ項目にそれらの情報が記録されないことから、後から検証することが困難である。3については、当日は快晴であったものの、毎秒5m程度の風が恒常的に吹いていたことと、移動局として使用していた三脚の安定性に問題があったため、アンテナ部分が不規則に揺れていた可能性がある（図4）。アンテナがGNSSの信号を受信する際の特性として、アン

テナに大きな加速度が加わると受信が途切れやすい傾向がある。したがって、アンテナがカタカタと揺れると、断続的に逆向きに大きな加速度が加わり続けるため、受信が安定しなかった可能性がある。

## 6. おわりに

本研究は瓶ヶ森山頂付近の細密な地形モデルおよびオルソ画像の作成を目的に、UAVによる空撮と SfM-MVS による解析を試みた。その結果、解析対象地域の大部分において、地形モデルについては約24cm、オルソ画像については10cmの解像度のデータを作成できた。SfM-MVS 解析においては、現地で GNSS 測量を実施して得られた5地点の GCP を用いることにより、計算上の標定誤差を2.2cmに抑えられた。本研究で作成された細密データを基礎として、植生と地形の関係性の考察が進むことが期待される。

一方で、GNSS 測位に関しては、全ての GCP において Fix 解を得られたわけではなく、課題が残った。その原因は本文で述べた通り、移動局のアンテナの安定性に問題があったと考えられるため、今後精査するとともに、今後の測量時において改善する必要がある。

## 謝 辞

本研究は公益財団法人国土地理協会平成28年度学術研究助成（代表：小山拓志）を受けて行った。記して感謝申し上げます。

## 引用文献

- 石黒聡士・熊原康博・後藤秀昭・中田 高・松多信尚・杉戸信彦・廣内大助・渡辺満久・澤 祥・鈴木康弘 (2016a) 「UAV による空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度—2014年11月長野県北部の地震を例に一」。日本リモートセンシング学会誌 36:107-116.
- 石黒聡士・松多信尚・井上 公・中田 高・田中 圭・石山達也・箕田友和・竹竝大士・森木ひかる・廣内大助 (2016b) 「UAV を用いた平成28年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成」。日本リモートセンシング学会誌 36:214-217.
- 中田 高・井上 公・Cahulogan M・Rivera D. J.・Lim R・Pogay C. (2014) 「小型 UAV と写真測量ソフトを用いた簡易地形計測：—2013年ボホール地震断層の緊急調査を例に一」。日本地理学会要旨集 85:216.