

第45回地すべりシンポジウム

UAV・SfM技術の地すべり研究への応用

2017. 6. 9

主	催	(公社)日本地すべり学会新潟支部
共	催	(公社)地盤工学会北陸支部
後	援	新潟県
		(一社)新潟県地質調査業協会
		(一社)斜面防災対策技術協会新潟支部
		新潟県地すべり防止工事士会

第45回地すべりシンポジウム

UAV・SfM技術の地すべり研究への応用

2017. 6. 9

主	催	(公社)日本地すべり学会新潟支部
共	催	(公社)地盤工学会北陸支部
後	援	新潟県
		(一社)新潟県地質調査業協会
		(一社)斜面防災対策技術協会新潟支部
		新潟県地すべり防止工事士会

目次

巻頭言	1
(公社)日本地すべり学会新潟支部 支部長 福岡 浩	
< 基調講演 >	
UAV（ドローン）を用いた災害調査，測量技術	2
国土地理院 大野 裕幸	
< 発表 >	
UAV・SfM技術を用いた斜面調査・設計事例	6
アジア航測株式会社 澤 陽之	
ドローンを用いた災害等調査事例	10
国土防災技術株式会社 山村 充	
災害調査における無人航空機とSfM多視点ステレオ写真測量の活用	14
防災科学研究所 内山 庄一郎	
複数時期の航空レーザ測量データを用いた 地すべり変動斜面の抽出事例と今後の課題	18
新潟大学 西井 稜子	

巻 頭 言

(公社) 日本地すべり学会・新潟支部長 福岡 浩

多くの地すべり現地調査は現地の地形判読から始まります。従来、突発災害発生後の航空機によるステレオペアの空中写真の緊急撮影は必要であるものの高価でした。しかし UAV またはドローンと呼ばれる小型無人ヘリと多数の写真から地形の三次元デジタルモデルを容易に構築できるソフトウェアが安価に入手できるようになってから状況は一変しつつあります。Google Scholar で UAV についての欧文論文数を調べると既に 20 万件に達しています。UAV と landslide* (*はワイルドカード)で調べると 1991 年～2000 年までの 10 年間でわずか 49 件であったものが 2001～2005 の 5 年間で 64 件、2006～2010 は 321 件、2011～2015 は 1440 件と論文数も 5 年ごとに約 5 倍に急増し続けています。個人的にも 2000 年代後半から空中写真を撮影するだけでなく、3D モデルの構築、微小変位の抽出ができるようになったことで爆発的に応用されるようになった印象を持っています。

今回の新潟支部シンポジウムでは、「UAV・SfM 技術の地すべり研究への応用」をテーマに近年急速に普及してきた UAV と三次元地形モデリングソフトウェア技術について地すべり学分野への応用や最新動向等について取り上げ、日本地すべり学会および新潟支部における今後の研究・技術開発の可能性や方向性について参加者の皆様と議論していただきます。

今回は基調講演として国土地理院の大野氏にドローンを用いた災害発生時の調査および測量技術についてお話いただきます。話題提供としてアジア航測(株)の澤氏と国土防災技術(株)の山村氏に斜面、地すべりの調査への応用事例について紹介していただきます。地すべり防災への UAV と SfM (Structure from Motion) ソフトウェアの応用における日本国内でのパイオニアである防災科研の内村氏には災害調査における無人航空機と SfM 多視点ステレオ写真測量の活用についてご講演いただきます。新潟大学に今年着任された西井氏には LiDAR (または LP = Laser Profiler) データを用いた地すべり変動域抽出手法の開発、研究成果について紹介していただきます。さらに、総合討論において今後推進すべき諸問題について議論を行います。多くの積極的な議論がなされることを期待します。

UAV（ドローン）を用いた災害調査，測量技術

Disaster investigation and survey technology using Unmanned Aerial Vehicle

大野裕幸（国土地理院）

Hiroyuki OHNO (Geospatial Information Authority of Japan)

キーワード：UAV，ドローン，SfM，災害調査，測量

Keywords：UAV, Drone, Structure from Motion, Disaster investigation, Survey

1. はじめに

災害調査において，無人航空機（UAV）は必要不可欠な調査手段となっている。UAV 自体は，軍事やホビー用途では数十年前から使用されており，「ラジコン飛行機」などと呼ばれるものも UAV の一種である。また，我が国において「ドローン」という用語は軍事用の無人標的機を指して使われることがあった。

近年では，「ドローン」という用語を耳にする機会が多いが，その定義が明確でないことから，本稿では無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle）の略である「UAV」という用語を使用する。

本稿では，表題に関する話題提供として，国土地理院が UAV を用いて実施した災害調査の事例を紹介するとともに，測量や災害調査の際の撮影方法や安全基準について，国土交通省や国土地理院が策定した各種のマニュアル類を基に述べる。

2. UAV による災害調査事例

2.1. 固定翼型 UAV による西之島の観測

小笠原群島から 130km ほど西にある西之島近海で，海底火山活動によって形成された新たな陸地が確認されたのは 2013 年 11 月 20 日のことである。新たな陸地は成長を続け，旧西之島と結合して一体化し，2016 年 7 月時点で面積約 2.75km²，最高標高約 142m の島となった¹⁾。

UAV による西之島の観測は，ガソリンエンジンを搭載した固定翼型の機体（写真-1，表-1）を



写真-1 西之島に観測で使用した固定翼型 UAV

用いて 2014 年 3 月 22 日に初めて実施され，これまでに同一の機体を用いて合計 6 回の観測を行っている^{2) 3) 4)}。

西之島の観測は，小笠原群島の父島を離陸し，西之島までの約 130km を飛行し（図-1），事前に設定した撮影コースに沿って写真撮影を実施して父島に帰還するという内容で，飛行時間は 4 時間程度に及んだ。UAV の飛行は，基本的に自動操縦であるが，離着陸は手動で行った。

撮影した写真は，SfM ソフトの Pix4D Mapper 及び Smart3DCapture（現在は Context Capture）に入力して 3D モデルを構築し，海面上の体積や最高標高値などの測定を行うとともに，オルソモザイク画像を作成した^{2) 3)}。この際の地上基準点（GCP）は，国土地理院が有人航空機くにかぜⅢで撮影した画像からデジタルステレオ図化機で読み取った水平位置と標高値を用いたが，西之島はジオイド高が不明であるため，

表-1 西之島観測で用いた固定翼型 UAV の諸元

サイズ	全長 2.2m，全幅 2.8m
エンジン	86cc ガソリンエンジン×1 基
巡航速度	約 120km/h
航続距離	約 500km
カメラ	Canon EOS5D Mark II



図-1 西之島と父島の位置関係

標高値は、ステレオモデルを一旦楕円体高で構築し、海岸線（＝標高値 0mの地点）の高さ値を読み取ったうえでジオイド高を推定し、標高に補正して取得した⁵⁾。

西之島の観測結果は、有人機による観測分も含め、国土地理院の西之島付近の噴火活動による関連ページ⁴⁾に記載されているので参照されたい。

2.2. マルチコプター型 UAV による災害調査

国土地理院は、UAV 技術者を育成することを目的として 2016 年 3 月 16 日に、i-Construction 向けの測量に必要な指導・助言や災害時に自らが現場の撮影・測量を行う「国土地理院ランドバード（GSI-LB）」という体制を発足させた。

GSI-LB として初めて災害調査を実施したのは、2016 年の熊本地震への対応であった。2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に最大震度 7 の地震が発生したことを受け、GSI-LB チームが翌日 15 日に福岡市に進出したところに遭遇したのが、2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分に発生した、本震と言われるマグニチュード 7.3 の地震である。16 日の夜明けとともに阿蘇地方で大規模な土砂崩壊が発生していることが判明したことから、急遽 GSI-LB チームは、阿蘇市、南阿蘇村に向かい、4 月 16 日～4 月 18 日の 3 日間に渡って土砂崩壊現場や地表に出現した断層の撮影を実施した。撮影に使用した機体は、DJI Phantom3 Professional である。そのうち、国道 325 号阿蘇大橋付近の大崩壊及び南阿蘇村河陽周辺における地表の亀裂の撮影位置を図-2 に示す。特に、4 月 16 日の撮影は、本震の発生直後であったため、状況把握を目的とした動画撮影が中心となった。このときの UAV で撮影した映像から地表に現れた断層や斜面の崩落等による亀裂の状況の判読した例⁶⁾を図-3 に示す。この他にも

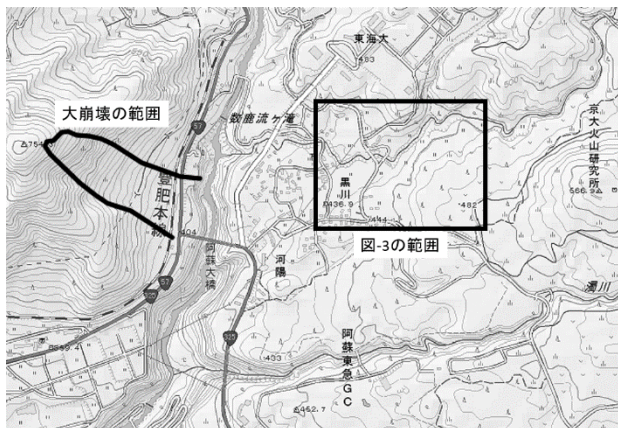


図-2 南阿蘇村の UAV 撮影地区の周辺地図

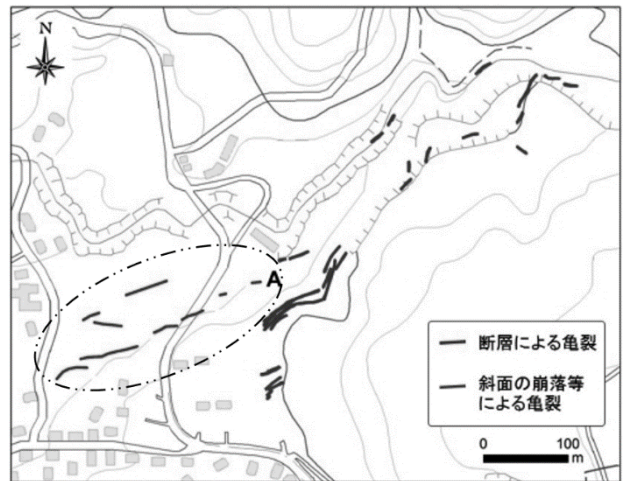


図-3 UAV 動画から判読した地表の亀裂分布図
（二点鎖線の範囲が断層による亀裂）⁶⁾

数か所の撮影を実施している。

3. SfM (Structure from Motion)

SfM は、Structure from Motion の頭文字を取ったものであるが、カメラの位置・姿勢推定とタイポイントの 3 次元座標の取得を行うもので、写真測量 (Photogrammetry) における空中三角測量と同じ処理である⁷⁾。さらに、SfM によって推定したカメラの位置・姿勢から多視点ステレオ (MVS : Multi-View Stereo) の手法を用いて 3 次元形状の復元を行い、オルソモザイク画像や 3 次元点群、3 次元モデルの出力までの機能を備えたソフトウェアがいわゆる SfM ソフトウェアとして市販されている。

SfM ソフトウェアは、カメラの情報を画像の EXIF 情報から自動的に取得したり、カメラパラメータのセルフキャリブレーション機能を有したりといった形で、ほとんどの処理が自動的に実行可能となっていることが特長で、極めて容易にデータ処理を行うことができる。

一方、SfM は写真測量と同じ原理を用いて処理を行うことから、処理結果の良否の大部分は入力する写真の撮影状況によって左右される。そのため、SfM をより有効に活用するためには、ある程度写真測量の知識を有していることが望ましい。UAV で撮影した画像を用いた SfM は、災害調査で効果が確認され^{8) 9)}、最近では i-Construction の一環として測量や土木工事への導入も進んでいる。国土地理院は、そのためのマニュアル¹⁰⁾を作成・公表し、一定の精度確保のための SfM における写真撮影方法などを示している。次章にてその内容を抜粋して紹介する。

4. SfM での精度確保のための写真撮影方法

SfM ソフトウェアで作成する DSM やオルソ画像の精度確保にあたっては、適切な方法で写真が撮影されていることが重要になる。適切な写真の撮影方法を決めるには、撮影される画像の地上画素寸法を知ったうえで、撮影コースを設計する必要がある。

地上画素寸法 S_L は、使用するカメラのセンサーサイズやレンズの焦点距離、撮影する対地高度がパラメータとなって変化するが、写真測量の原理から次式

$$S_L = \frac{h \times S_p}{f} \quad \text{及び} \quad h = \frac{S_L}{S_p} \times f$$

の関係が成り立っている。ここで、 h は対地高度、 f はレンズの焦点距離、 S_p は画素サイズである。画素サイズは、カメラの仕様表にある画面サイズを画像のピクセル数で除して求める。例えば、Canon EOS5D Mark II の場合、画面サイズが $36\text{mm} \times 24\text{mm}$ なので、ラージサイズ (5616×3744 ピクセル) の画像を撮影する場合、画素サイズは約 0.00641mm となる。このカメラで焦点距離 28mm のレンズを使い、対地高度 100m から地上を撮影した場合の地上画素寸法は、 $100,000\text{mm} \times 0.00641 \div 28 = \text{約 } 23\text{mm}$ となる。地上画素寸法が求まれば、1 枚の画像に写る範囲が計算できる。この例では、約 $129\text{m} \times 86\text{m}$ の範囲が写ることが分かる。

逆に、ある地上画素寸法の写真を撮影したい場合は、上式右側の関係から対地高度を求めることができる。先述と同じカメラとレンズで地上画素寸法 20mm の写真を撮影したい場合、対地高度は、 $20 \times 28 \div 0.00641 = \text{約 } 87\text{m}$ から撮影すればよいことが分かる。この場合の 1 枚の画像に写る範囲は、約 $112\text{m} \times 75\text{m}$ となる。

次に、計測対象範囲を撮影するコースを設計する。国土地理院のマニュアル¹⁰⁾では、進行方向に 80%、隣接するコースとの間に 60% の重複率を設けるとともに、計測対象範囲の外側

に 1 枚ずつ写真を多く撮影するよう規定している (図-5)。この規定に従うと、上記の条件で地上画素寸法 20mm の写真撮影を行う場合、1 枚の画像の撮影範囲から、進行方向に向かって $75\text{m} \times (100-80) \div 100 = 15\text{m}$ ごとにシャッターを切ればよく、隣のコースとの距離は、 $112 \times (100-60) \div 100 = 44.8\text{m}$ となるように設計すればよいことが分かる。なお、撮影方向は直下 (鉛直下向き) である。

次に、コース内の写真撮影間隔が分かれば、カメラの撮影間隔から UAV の飛行速度が決まる。仮に 2 秒に 1 枚の写真撮影をする設定とした場合は、2 秒で 15m 飛行するような速度を設定すればよいので、 $7.5\text{m}/\text{秒}$ の速度で飛行させればよい。

撮影する地上画素寸法の設定をいくつにするかは、撮影の目的に応じて決定することになるが、同マニュアルでは、水平方向 X、Y、高さ方向 Z のそれぞれの位置精度が 5cm 以内では地上画素寸法 10mm 以内、位置精度 10cm 以内では 20mm 以内、位置精度 20cm 以内では 30mm 以内を標準としている。ただし、これは平坦地における基準であるため、土砂崩壊地などの比高差が大きい箇所では、状況に応じてより小さな値を設定するなどの考慮が必要となる。

同マニュアルには、他にも標定点や検証点の設置方法、カメラに関する基準など、SfM を災害調査や測量に活用する際に有用な事項が網羅されているので、一度参照されることをお勧めする。

5. UAV を飛行させる際の安全基準

UAV を飛行させる際は、航空法や電波法等の法令を理解・遵守することはもちろん、国土交通省航空局が示している UAV の飛行ルールや必要な手続きに関する Web ページ¹¹⁾、UAV の安全飛行のためのガイドライン¹²⁾ も熟読しておくべきである。国土地理院でも、公共測量で

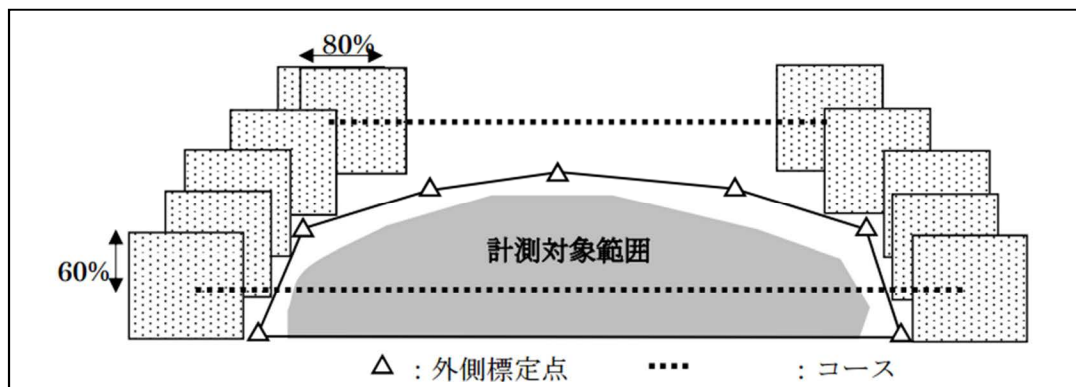


図-5 撮影コースの設計

UAV を飛行させる場合を対象として、UAV の使用に関する安全基準（案）¹³⁾を公表している。これらは必ずしも災害発生時を対象としたものではないが、災害の発生からあまり時間が経過していない段階で災害調査のために UAV を使用する場合は、仮に法令での飛行が禁止されていない地域であったとしても、事前に市町村の災害対策本部など、関係機関に連絡し、飛行に関する調整や周知を行うことが望ましい。災害現場では低空を有人ヘリが飛行することも稀ではなく、無秩序に UAV を飛行させることは、関係機関による災害対応等の妨げになる場合や、二次災害を引き起こす場合もあることから、避けなければならない。

また、国土交通省航空局のウェブサイトには、過去に報告のあった UAV による事故事例の一覧が公開されている^{14) 15)}。これによると、操作に不慣れた者による操縦で制御不能となったケースや、設定ミス、設定の確認漏れなどが原因の墜落事故が多数に上っていることが分かる。事前に十分な操縦訓練を実施し、チェックシートを用いて設定ミスや確認漏れが無いかどうかを飛行前に確認する方法の確立など、安全管理には万全を期す体制を採ることが重要である。

6. おわりに

UAV は、すでに災害調査には不可欠のデバイスとなっており、性能向上も目覚ましい。今後もその活用範囲は拡大していくものと思われる。一方で、安全な飛行の実施や、その有効性を適切に発現させられるかどうかは、使う側のスキルや経験に負うところも大きい。

本講演が、皆さまが災害調査で UAV を活用する際の一助になれば幸甚である。

参考文献

- 1) 国土地理院 (2016) : 西之島の計測結果を報告します, <http://www.gsi.go.jp/kanri/kanri40006.html> (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 2) 飛田幹男・神谷 泉・中埜貴元・岩橋純子・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, No.125, PP.115-124.
- 3) 飛田幹男・神谷 泉・中埜貴元・岩橋純子・大角光司・高桑紀之 (2014) : 無人機による西之島地形計測の高精度化, 国土地理院時報, No.125, PP.145-154.
- 4) 国土地理院 (2016) : 「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> (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 5) 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, <http://www.gsi.go.jp/common/000093165.pdf>, (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 6) 国土地理院 (2016) : 平成 28 年熊本地震に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>, (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 7) 織田和夫 (2016) : 解説 : Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整, 写真測量とリモートセンシング, VOL.55, NO.3, PP.206-209.
- 8) 内山庄一郎・井上 公・鈴木比南子 (2014) : 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, 第 81 号, PP.37-60.
- 9) 小花和宏之・早川裕式・ゴメス クリストファー (2014) : UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング, 地形, 第 35 巻第 3 号, PP.283-294.
- 10) 国土地理院 (2017) : UAV を用いた公共測量マニュアル (案) 平成 29 年 3 月改正, http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/doc/uav_manual_170331.pdf (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 11) 国土交通省 (2017) : 無人航空機 (ドローン, ラジコン機等) の飛行ルール, http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 12) 国土交通省 (2016) : 無人航空機 (ドローン, ラジコン機等) の安全な飛行のためのガイドライン, <http://www.mlit.go.jp/common/001128047.pdf> (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 13) 国土地理院 (2016) : 公共測量における UAV の使用に関する安全基準 (案) 第 1.0 版, http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/doc/anzen_kijun_160330.pdf (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 14) 国土交通省 (2016) : 平成 27 年度無人航空機に係る事故等の一覧, <http://www.mlit.go.jp/common/001125882.pdf> (参照日 2017 年 4 月 20 日)
- 15) 国土交通省 (2017) : 平成 28 年度無人航空機に係る事故等の一覧, <http://www.mlit.go.jp/common/001180665.pdf> (参照日 2017 年 4 月 20 日)

UAV・SfM 技術を用いた斜面調査・設計事例

澤陽之（アジア航測株式会社）※，高山陶子（アジア航測株式会社）

キーワード：UAV，SfM，3次元データ，斜面調査，設計

1. はじめに

近年、地すべりを含む斜面災害の調査および対策検討において、小型無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）の活用が進んでいる。調査箇所も多くは、急峻な地形や脆弱な地質となっており、岩盤斜面など登攀困難な箇所が多く存在する。UAVを用いることにより、比較的容易に高品質・高解像度の空撮写真を撮影することができるようになった。また、三次元形状復元技術（Structure from Motion, SfM）により、撮影した複数の高解像度の空中写真から、斜面の3次元モデルを作成し、等高線図や断面図を作成することも可能であり、対策工の検討にも利用できる。本文では、UAV・SfM 技術を活用した対策工設計への活用事例について紹介する。

2. 対象地区

調査・検討は、国土交通省立山砂防事務所管内の工事用道路における岩盤崩落斜面で実施した。

3. UAV による斜面情報の取得

斜面情報の取得手順を図-1 に示す。UAV は中型のマルチコプター（SPIDER）、カメラはミラーレスデジタル一眼カメラ（SONY α 7R）を使用した。斜面の複雑な形状をもれなく取得するため、オーバーラップ80%、サイドラップ60%以上となるよう、目視およびFPV(First Person View)で確認を行いながらマニュアル操縦でインターバル撮影を実施した（図-2）。撮影に際し、3次元モデル作成の位置を合わせるための基準点（Ground Control Point, GCP）を計6点選定し、対空標識を設置して、スタティック法により座標を取得した。

撮影した写真画像をもとに、ステレオマッチング手法により特徴点の標高情報を自動取得し、ワイヤ

ーフレームモデルにテクスチャ画像を生成した3次元モデルを作成した。作成には、Bentley 社製「Context Capture」を使用した。作成したモデルは、アジア航測製ビューワ「LaVFinder」に搭載した。

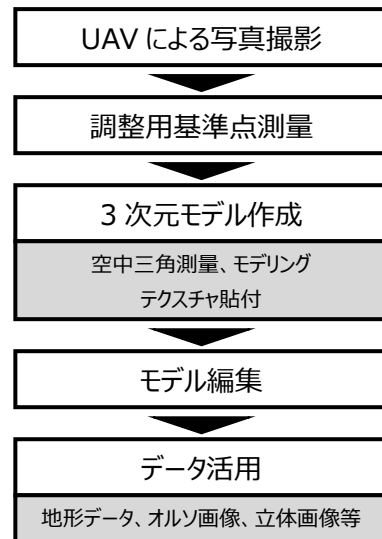


図-1 斜面情報の取得手順



図-2 使用した UAV と撮影状況



図-3 対空標識と設定位置

4.3 次元地形解析

3次元モデルを作成した箇所は、工事用道路沿いにオーバーハングした岩盤斜面が存在しており(図-4)、破砕工による落石発生源の除去工事が実施済みであったが、表面の亀裂の緩みによる剥離落石が懸念されることから、落石防護工の検討を行った。破砕箇所周辺を3次元モデルで拡大表示したものを図-5に示す。ビューワにより任意視点からの表示や拡大縮小が可能であるため、現地における目視では困難な亀裂等の状況が詳細に確認できる。岩盤には雁行状の亀裂が発達し、径0.5m程度の落石の可能性があると明らかとなった。

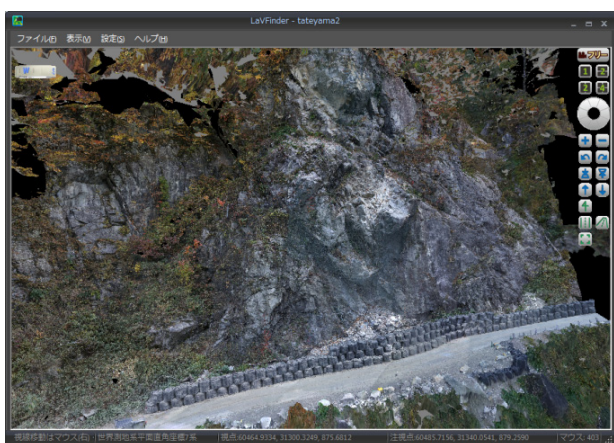


図-4 作成した3次元モデルのビューワ表示例

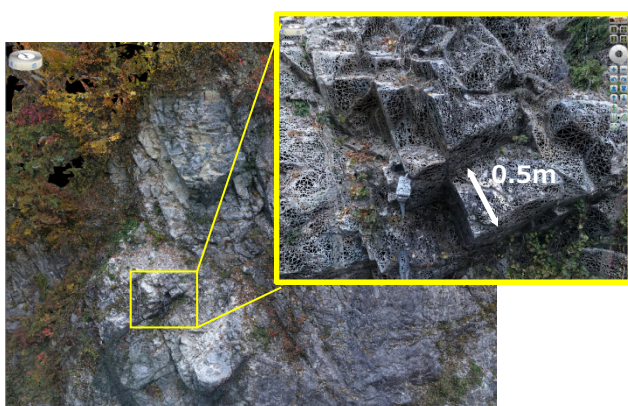


図-5 岩盤亀裂の確認(拡大表示)

テクスチャ(写真画像)付きの3次元モデルを上から投影すると、簡易オルソが作成できる。2cm解像度で作成したものを図-6に示す。3次元モデルを構成する特徴点はXYZの座標を保持している。この点群データから、樹木の枝が岩盤斜面に被さる

部分の点群を手動で除去した上で、5cm間隔のグリッドデータ(Digital Surface Model, DSM)を作成した。5cmDSMより作成した50cm等高線図を図-7に、赤色立体地図を図-8に示す。参考として、同位置の航空レーザ計測データ(1mDEM)より作成した赤色立体地図を図-9に示す。航空レーザ計測では把握しきれない岩盤の詳細な形状をとらえていることがわかる。任意位置で断面図を作成することも可能であり(図-10)、これらのデータを対策工設計に活用した。



図-6 オルソ画像

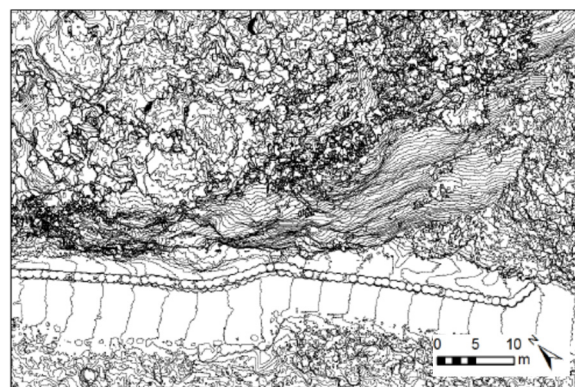


図-7 50cm等高線図

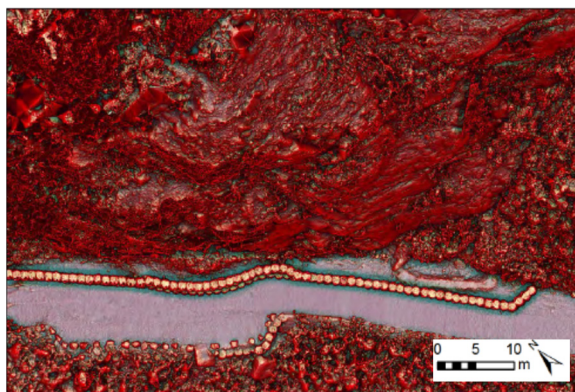


図-8 赤色立体地図(5cm DSM)

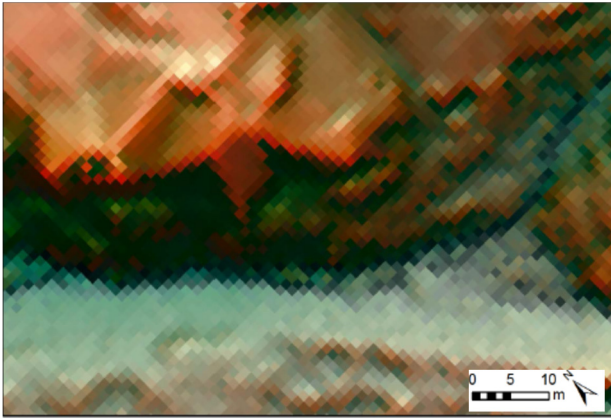


図-9 赤色立体地図（1mDSM）

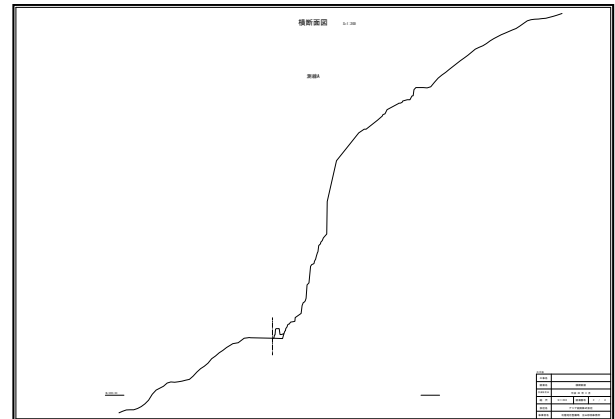


図-11 3次元モデルより作成した断面図

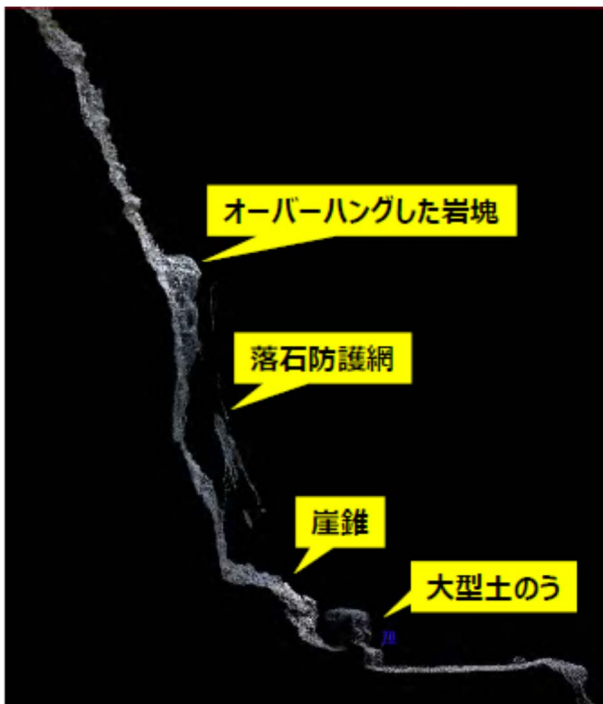


図-10 点群断面の例

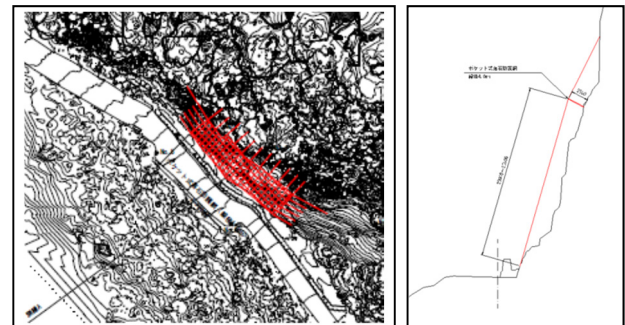


図-12 落石対策工設計



図-13 落石対策工施工状況

3次元モデルの精度検証のため、検証点（現地対空標識設置点）においてモデル上の位置情報（ x, y, z 座標）を取得し、実測値との比較を行った。この結果から、残差の平均値が水平、垂直ともに最大で8.58cmと12cm以内におさまっており、国土交通省公共測量作業規程に定められた地図レベル250（相当縮尺1/250）の基準を満たす結果が得られた。

5. 対策工設計への活用

3次元モデルより断面図を作成し、落石対策工の検討を行った。対策施設の施工状況を図-13に示す。

6. まとめと今後の課題

検討の結果、UAV を地上から目視困難な地点の補足点検に活用することで、効果的・効率的な調査が可能であり、UAV 撮影画像より 3 次元モデルを作成すれば、高精度の地形データが簡便に取得可能であり、災害等緊急時の応急対策検討などに有効で

あることが明らかとなった。一方で、撮影画像から 3 次元データを取得するため、樹木の影響は排除できず、撮影時期の検討やレーザ計測の実施などの検討が必要である。取得したデータは、調査・設計だけでなく、一般向けの事業説明資料としても活用が可能である。

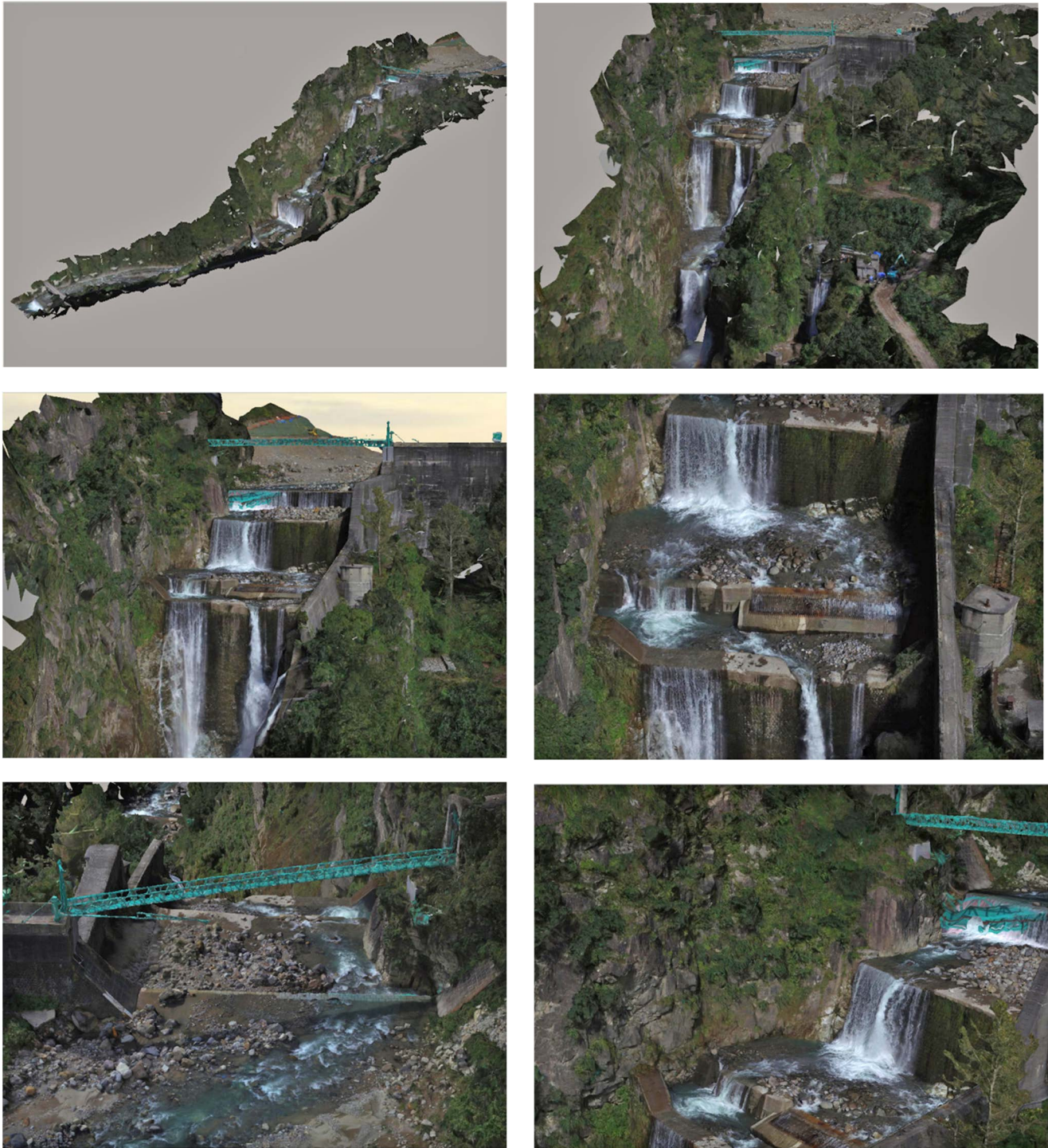


図-14 UAV による計測事例（白岩砂防堰堤）

ドローンを用いた災害等調査事例

山村 充(国土防災技術株式会社)

キーワード: ドローン, オルソ画像, DSM, 差分抽出

1. はじめに

近年, 小型 UAV(small Unmanned Aerial Vehicle; 通称ドローン)及びデジタルカメラの進歩により, 低コストで簡便な空撮や高解像度画像の取得が可能となった。上空からの地形情報は従来, 既存の航空写真等, 撮影時期が限定されているものに頼らざるを得なかった。しかし, 局所的ではあるものの, 例えば災害発生直後の現地状況等の把握をドローン空撮によって迅速に実施することが可能となった。

また複数枚の画像を元とした三次元形状復元, 撮影位置推定及び高密度点群生成等, 高度な画像処理技術が組み込まれたソフトウェアの普及に伴い, 市販 PC でも自然地盤等の数値地表面モデル (DSM; Digital Surface Model) を構築することが可能となった。この技術は公共測量手法の一つとして検討されており, 斜面防災分野において初動段階での調査対象地の状況及び微地形の把握に有用なツールとして期待される。ドローン空撮画像から構築された DSM は, 既存数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) 等との差分抽出に用いることも可能なことがあり, 斜面災害時の土砂動態の把握に繋がるものと期待される。

本稿では, ドローン空撮から得られた情報を用い, 災害直後の迅速対応, もしくは差分の抽出による土砂動態把握に繋がる成果が得られた 3 事例について紹介する。

2. 災害調査事例 1

本事例は, 災害発生直後の初動調査時における現場状況の把握と対策工策定をより迅速に遂行するため, ドローン空撮と対象地の三次元地形モデルの復元を適用したものである。

福島県某所で融雪期において, 地すべりを起因とした雪泥流が発生した。流出土塊は大量の水と雪を含んでおり, 雪塊や石礫等は発生源から約 1.6 km 下流に位置する町道及び県道まで達し, 両道が通行止めとなる事態となり, 早急な監視体制の構築及び対策工立案が求められた。

災害発生から 4 日後, 災害地を対象としたドローン空撮が行われた。空撮にはデジタルカメラ GR (リコー社) を搭載した F450 (DJI 社) を用い, 約 30ha の範囲を約半日かけて 4

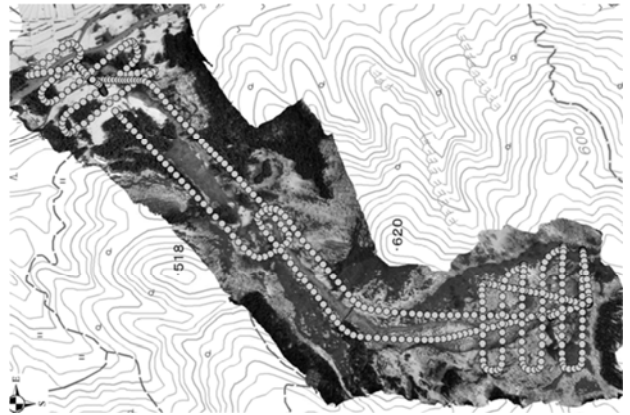


図-1 撮影位置と 5cm/px オルソ画像

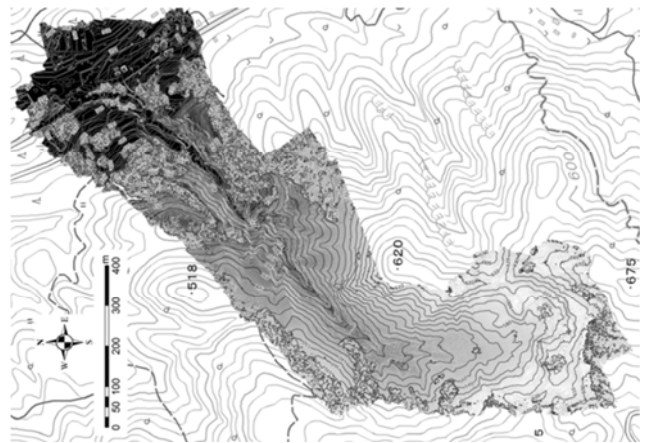


図-2 15cmDSM と 1m 間隔等高線

回のフライトで撮影し, 計 543 枚の画像を取得した。本事例では, 対空標識の設置及び測量が困難だったため, 機体の GPS 情報から割り出された撮影位置情報を画像処理の際に用いた。画像処理は Mac Book Pro (Apple 社) 上で Photoscan Professional (Agisoft 社) を用いて行われ, 画像処理開始から約 6 時間後には地上解像度 5cm/px のオルソ画像 (図-1) と 15cm メッシュの DSM (図-2) を取得することができた。その後, Arc GIS 10.2 (ESRI 社) を用い, これらの画像データから 1m 等高線を生成した (図-2)。

取得したオルソ画像及び DSM の精度は, 国土地理院地図との比較から, 概ね 2m 前後であると判断された。比較的大きな誤差を有するものの, 初動調査及び計画案策定段階では十分な精度であるものと考えられた。これら画像データから調査対象地の平面図及び縦横



図-3 対策工計画案平面図

断面を作成し、災害発生から約 10 日後には土石流警報システムの配置案及び対策工計画案（図-3）を策定することができた。

本事例では、調査時の天候が良く、災害発生から 4 日後には調査対象地のオルソ画像及び DSM を取得することができ、撮影当日中に現地状況を撮影画像及びオルソ画像で確認することができた。調査時の気象条件や調査対象となる面積に依存するものの、撮影当日におけるオルソ画像による現地状況の確認が可能であるものと言える。ドローン空撮及び画像処理技術は、災害等調査に対する迅速対応に十分適用可能であるものと考えられる。

3. 災害対応事例 2

ドローン空撮によって取得される DSM は、撮影画像に写った地物の高さを反映したものである。つまり、対象地に樹木あるいは密な下層植生等が繁茂している場合、その高さは立木樹高あるいは下層植生の高さを反映したものとなる。一方、斜面災害地では、土砂流出が発生することにより、調査対象地が裸地となる場合が多く、このような現場では空撮画像から地表面の標高を復元することが可能となる。さらに災害前の標高データを既存の基盤地図情報（DEM）等から取得できれば、流出した土砂量の推定が可能となる。

本項では 698 枚の画像から、3cm/px オルソ画像（図-4）と 5cm メッシュ DSM（図-5）を構築した現場について紹介する。この現場では、対象地に設置した 6 箇所の標定点を用いて三次元地形モデルに座標値を与えた。画像処理では、三次元モデル上で計算された標定点位置座標と標定点座標の実測値とのズレ、つまり三次元モデル上における標定点位置座標の誤差が算出される。本事例におけるこの

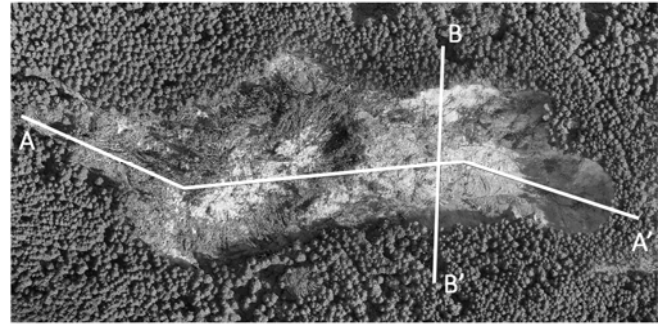


図-4 3cm/px オルソ画像

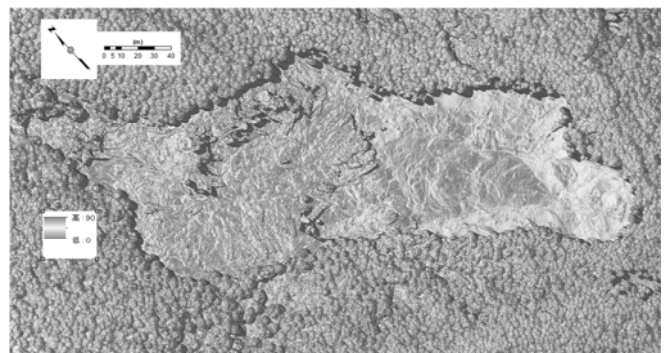


図-5 5cm メッシュ DSM

表-1 標定点における座標値誤差

ID	点群最適化処理後の誤差 (cm)			
	X	Y	Z	3D
GCP1	-0.89	0.11	0.32	0.95
GCP2	0.32	0.00	-1.36	1.40
GCP3	1.19	-0.35	0.22	1.26
GCP4	0.62	-0.20	0.27	0.70
GCP5	-0.61	0.53	0.25	0.85
GCP6	-0.64	-0.10	0.39	0.75
平均誤差	0.76	0.28	0.62	1.02

誤差は平均で 1.02 cm となった（表-1）。

図-4 上のオルソ画像に示した A-A'及び B-B'側線上の標高値をそれぞれ、図-6 上段及び下段に示す。グラフ中の実線はドローン空撮画像から復元した DSM 標高値、破線は災害発生前の国土地理院 5m DEM から取得した DEM 標高値である。

崩壊地中央部に沿った A-A'側線上の DSM・DEM 標高を比較すると、斜面上部では、災害発生前後において約 20m の標高差が生じていることが確認された。冠頭部及び末端部では DSM 標高値の方が高く、流出した土砂あるいは樹木の影響を受けているものと考えられた。一方、地すべり地を横断する B-B'側線上では、左端・右端共に樹高の影響による高まりが認められるものの崩壊地内はオルソからも概ね裸地であると判断され、左右側壁側

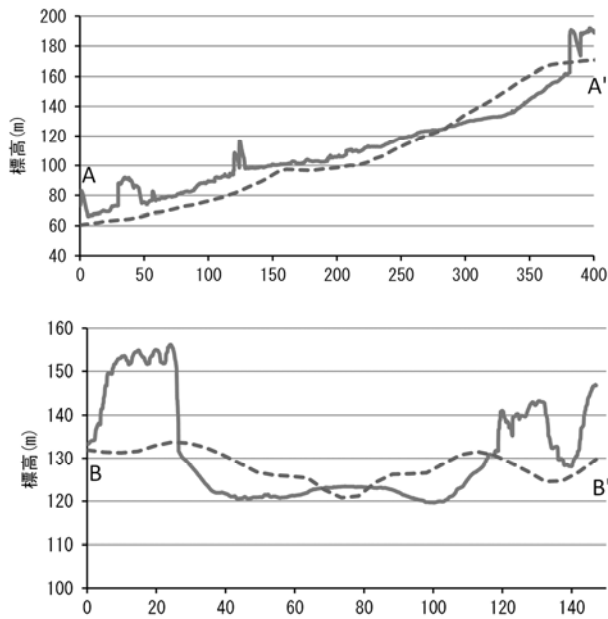


図-6 国土地理院 5mDEM との比較

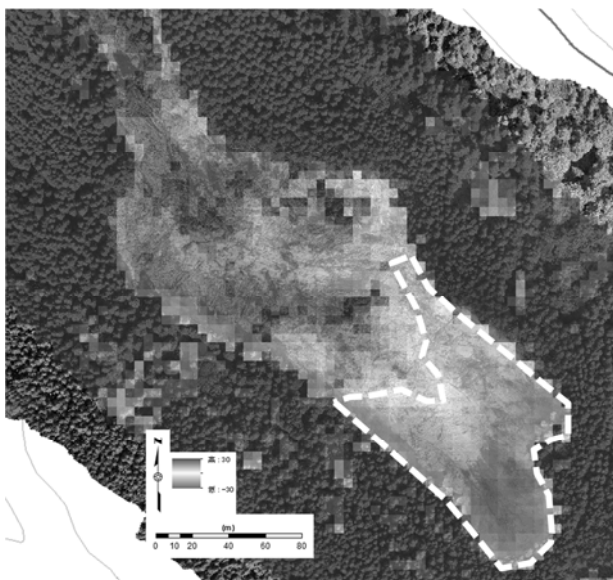


図-7 国土地理院 DEM との差分

の土砂流出及び、災害前に存在した中央の沢地形部への土砂の堆積状況が確認された。

ここで、崩壊土砂量を試算するにあたり、下部の標高値が高い値となる範囲では、流出土砂の堆積と樹木の影響が複合しているため、上部の災害前に比べ標高が低くなったエリアに着目して算出することとした。まず、GIS上でDEM標高値とDSM標高値の差分を抽出した。標高値が負を示す範囲(図-7 白点線域)の面積は、約8,600 m²となり、平均標高変化幅は、約-11.3 mと算定され、流出した土砂量は約97,000 m³と推定された。本調査地では実測量から流出土砂量が約10万 m³と推定され

ており、今回標高値の差分から推定した土砂量が概ね妥当であると判断された。

本現場のように、崩壊地が概ね裸地であり、発生前の地形情報の取得が可能な現場では、災害前のDEM標高値と災害発生時のDSM標高値の差分から流出土砂量を推定することが可能であるものと考えられる。

4. 災害対応事例 3

対象地が森林域である場合、ドローン空撮画像から復元できる地表面の高さは、立木樹高を反映したものであり、既存 Lidar データ等と直接比較できない。しかし、このような場合であっても、オルソ画像から水平方向の差分を抽出することで土塊の移動量あるいは移動方向について情報を抽出できることがある。

本項では1331枚の画像から、3cm/px オルソ画像を構築した現場について紹介する。対象地に設置した10箇所の標定点から三次元地形モデルに座標値を与えた。本事例における三次元的な平均誤差は2.01 cmであった(表-2)。

表-2 標定点における座標値誤差

ID	点群最適化後の誤差 (cm)			
	X	Y	Z	3D
GCP01	0.78	-1.24	0.05	1.47
GCP02	0.05	2.97	-0.44	3.01
GCP03	-0.31	-1.15	0.64	1.35
GCP04	-0.86	1.48	0.62	1.82
GCP05	-0.99	-1.39	2.16	2.75
GCP06	0.25	-0.70	-2.53	2.63
GCP07	-0.48	1.03	-0.17	1.15
GCP08	-0.58	-0.95	-0.09	1.12
GCP09	0.65	-1.32	-0.76	1.66
GCP10	1.49	1.26	0.52	2.02
平均誤差	0.75	1.47	1.14	2.01

図-8 上段は災害前、下段は災害後のオルソ画像であり、上下段の画像四隅の緯度経度は共に同一となる。画像中で樹木の配置が特徴的である箇所を楕円及び矩形で囲って示した。図-8 下段の白点線矢印は、災害前後の画像から、それぞれ樹木の特徴点を目視にて抽出して線で結んだものであり、災害前後における地表面の水平移動量及び方向を反映したものとなる。この画像では、抽出した樹木特徴点は災害前後で10~14m水平移動したものと算出された。

同様に調査対象域全域で樹木特徴点の災害前後における水平移動量を算出したところ、地すべり移動体の移動方向及び移動量について推察することができた(図-9)。本調査地では、樹冠移動量の全計測値の平均値が14.5m

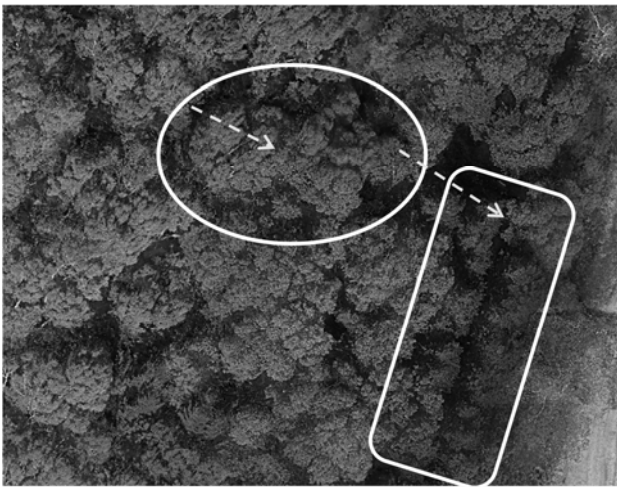
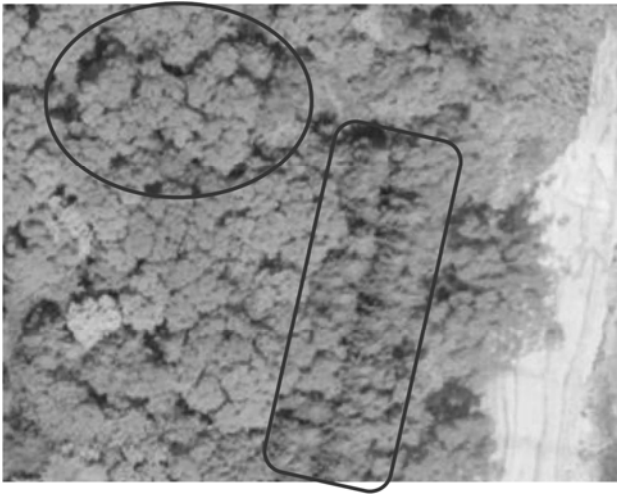


図-8 災害前後における樹冠特徴点の比較

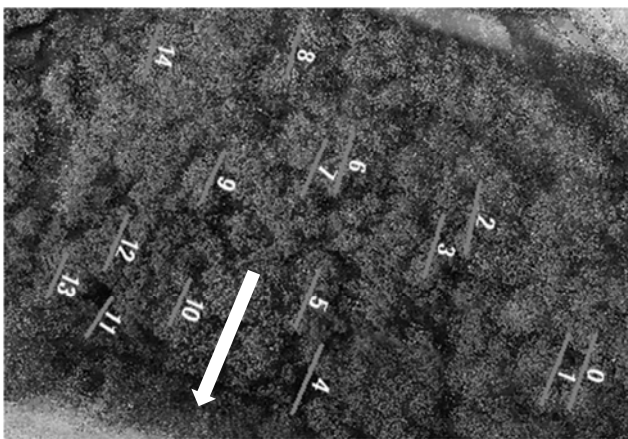


図-9 樹冠特徴点移動量

となり、北部の移動量が大きい傾向が認められた。

土塊移動時には、樹木の倒れ込みが生じるため実際の土塊移動量と比較して誤差が生じると考えられるものの、本手法のように複数の特徴点を抽出し、その移動量を見積もることによって、森林域のように撮影画像から地表面情報を直接取得できない場合であっても、大局的な土塊移動量及び移動方向について提示できる可能性がある。

5. まとめ

本稿では、ドローン利活用事例として3例について示した。事例1では、ドローン空撮の迅速性及び写真測量技術を、緊急的な対応策等の検討に用いた地形情報を基に警報システムや対策工計画案策定に適用できる可能性について紹介した。事例2では、土砂崩壊等により地表面が露出している場合、DSM標高値と既存の災害前DEM標高値から土砂流出量を推定することができる可能性について示した。また、事例3では森林域等、DSM標高値に立木樹高が大きく影響するため標高差分が抽出できない場合でも、オルソ画像上から特徴点を抽出することにより、土塊の移動量及び移動方向の情報を抽出できる可能性について示した。

災害調査における無人航空機と SfM 多視点ステレオ写真測量の活用

Utilization of unmanned aerial vehicles and SfM multi-view stereo photogrammetry in natural disaster survey

内山庄一郎 (国立研究開発法人 防災科学技術研究所)

Shoichiro Uchiyama (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

キーワード: 無人航空機、SfM 多視点ステレオ写真測量、高解像度データ

Keywords: Unmanned aerial vehicles, SfM multi-view stereo photogrammetry, High-definition data

はじめに

自然災害の調査において、無人航空機の活用が始まっている。現時点で、単に無人航空機を飛行させるだけで有用な観測結果が得られるような最高に便利なツールにはなっていない。しかし、少なくとも地上からでは決して得られない視点で自由に高解像度な写真を撮影するツールとしては、非常に有用である。無人航空機を「空飛ぶデジカメ」として考えれば、その目的に特化した機体が普及してきており、価格も安価で、飛行性能や機械的信頼性も着実に高まってきて

いる。上空からペアで写真を撮影することができれば、実体視が可能である。コース上を連続して撮影することができれば、写真測量も可能となる。近年、SfM 多視点ステレオ写真測量と呼ばれる、簡易な写真測量技術がパッケージ化された市販ソフトウェアとして入手可能となった。無人航空機で連続撮影した高解像度写真を利用して、ノート PC でも実行可能な SfM 多視点ステレオ写真測量を実行することにより、局所的ながら非常に高解像度なオルソモザイク画像や、地表面標高モデルを作成することができるようになった。本

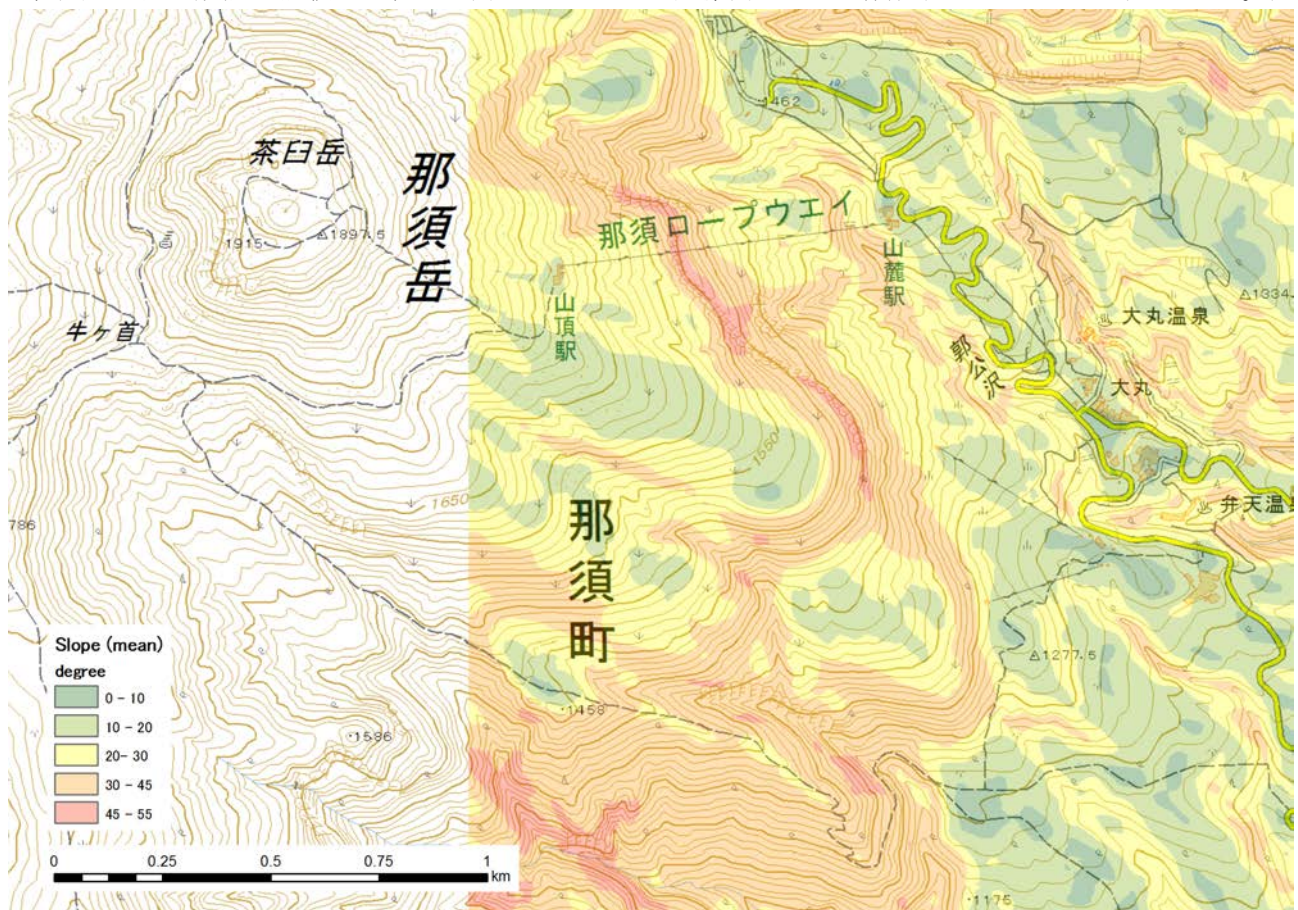


図 1 調査地周辺の地形概略図

レーザー測量 (国土交通省、2009) による 1mDEM が得られた東側の領域について、平均傾斜度を表示した。平均傾斜は 50m 矩形内の移動平均によって求めた。舌状に伸びる平坦な溶岩流と、その末端が 30 度以上の急崖に囲まれていることが読み取れる。

稿では、これまでに、無人航空機を用いて数十万枚の写真撮影・解析を行ってきた経験を総括し、直近の事例とともに、今後の調査に有用な知見を紹介する。

対象とする災害の概要

2017年3月27日午前、栃木県の山林において雪崩が発生し、人的被害が発生した。この雪崩について、無人航空機による垂直写真の撮影、地上基準点のGNSS測量を実施した。

地形・地質の概要

那須火山群は、東北日本弧の火山フロント上に位置している。災害現場から北西に1.3kmの位置にある標高1915mの茶臼岳を主峰とし、南北25kmにある6つの火山体から構成される(貝塚・他、2014)。茶臼岳に着目すると、最近1万年以内に形成された火砕丘に溶岩円頂丘が重なる茶臼岳、および、茶臼岳から標高1300m付近まで南東方向へ延びる3つの溶岩流で構成されている。溶岩流は長さ約1000m、幅500~700m、厚さ約100mであり、厚く短い(貝塚・他、2014)。図1に、茶臼岳周辺の地形概略図を示した。災害発生域(赤丸印)の周辺地域の平均傾斜は30~45度の急崖である。茶臼岳溶岩流の先端部は、いずれも同様の地形的特徴が観察される。

気象状況

本州の南海上にある南岸低気圧の通過により、那須周辺では3/26夕方から降雪が続いた。3/27の午前8時には積雪深31cmを記録し、12時間程度で大量の降雪が観測されている。宇都宮地方気象台により、3/26午前10時半すぎ、那須町を対象とした大雪、雪崩、着雪の注意報が発令されていた。一方、3/25には最高気温6.9℃が観測され、気温減率を考慮すると、雪崩発生エリアでは2.1℃程度まで気温が上昇していたことになる。図2に、アメダス観測点「那須高原」の3/24~4/3までの観測値をグラフにしたものを示す。3/27は雪崩発生日であり、4/2は無人航空機による地形撮影の実施日である。中村・他(2017)の調査速報によれば、3/25の気温上昇によって雪崩の発生しやすい弱層が形成され、3/27午前8時までの短時間での乾いた豪雪が積もることにより、雪崩が発生しやすい状態になっていたと説明されている。

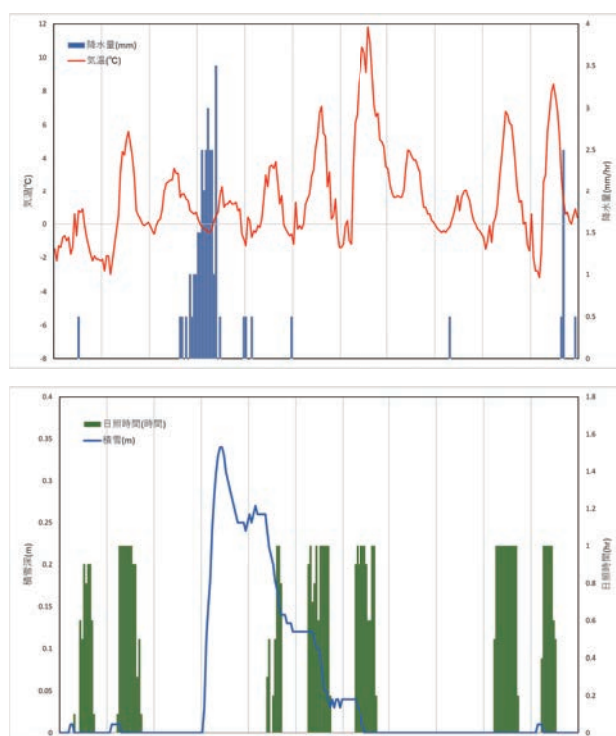


図2 アメダス観測点「那須高原」の観測値(3/24~4/3: 雪崩発生3/27、無人航空機撮影4/2)

上: 降水量、気温、下: 日照時間、積雪深
観測点は現場の東、約5kmにあり、設置標高は749mである。気温減率0.65℃/100mの場合、標高1500m付近の気温は観測値よりも約4.9℃低い。

雪崩発生エリアの詳細積雪面モデルの作成

2017年4月2日、雪崩発生エリアの詳細積雪面モデルを得るために、無人航空機による垂直写真の空撮、および地上基準点測量を実施した。同時に、雪崩のすべり面およびデブリ(雪崩堆積物)の調査のため、遭難者が発見された地点周辺において積雪断面観測調査を行っている(上石・他、2017)。使用した無人航空機はDJI INSPIRE 2、カメラはDJI X5S(20Mpx、焦点距離15mm、マイクロフォーサーズセンサー)である。現地には、1m角のターボリンシートに印刷した地上基準点を4か所設置し、上空から明瞭に判読可能な道路の白線等を合わせて、9か所の地上基準点を設けた。GNSS機材にはVRS-RTK方式のTrimble Geo7Xを用いて誤差10cm精度で地上基準点の座標観測を行った。観測範囲は、東西900m、南北550m、標高差は320m、写真オーバーラップは進行方向、コース間ともに80%、対地高度は150m、地上解像度は約3.3cm/pxである。

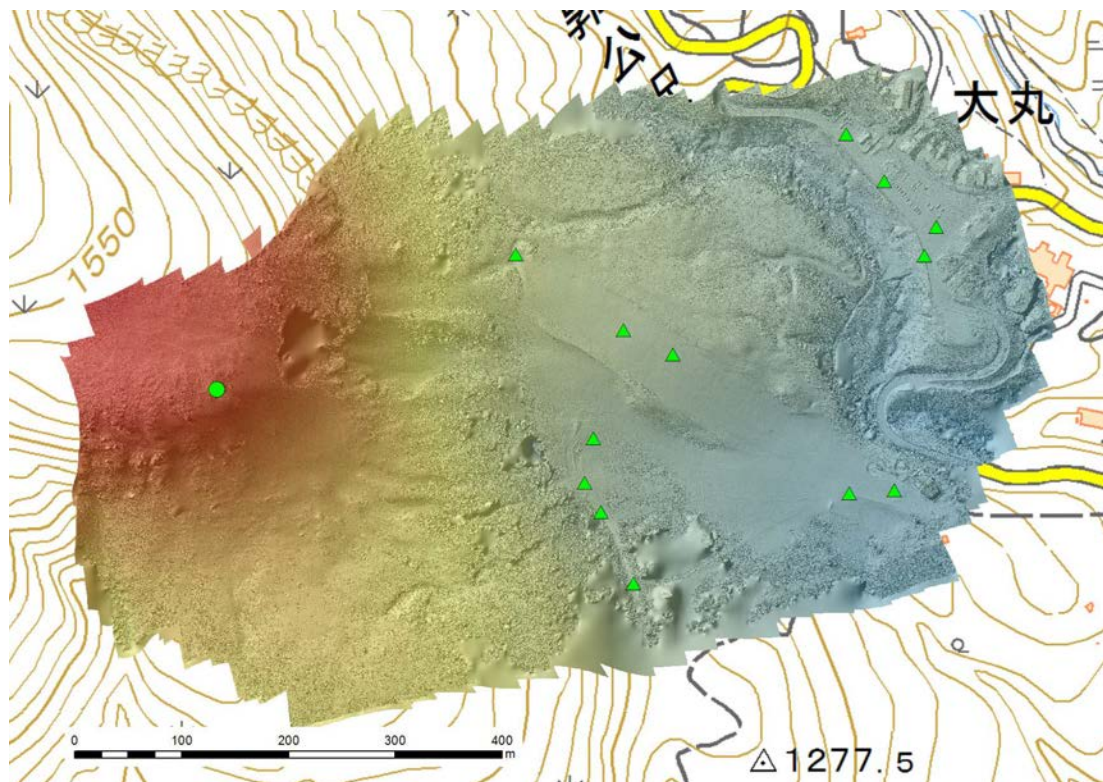


図3 無人航空機による撮影と詳細積雪面モデルの作成

丸印は雪崩発生点付近と推定される天狗岩（大きな露岩）、▲は地上基準点および検証点の計測位置を示す。無人航空機で撮影した写真は、SfM 多視点ステレオ写真測量（SfM: Structure from Motion）により三次元化し、オルソ画像および数値表面モデルを得た。

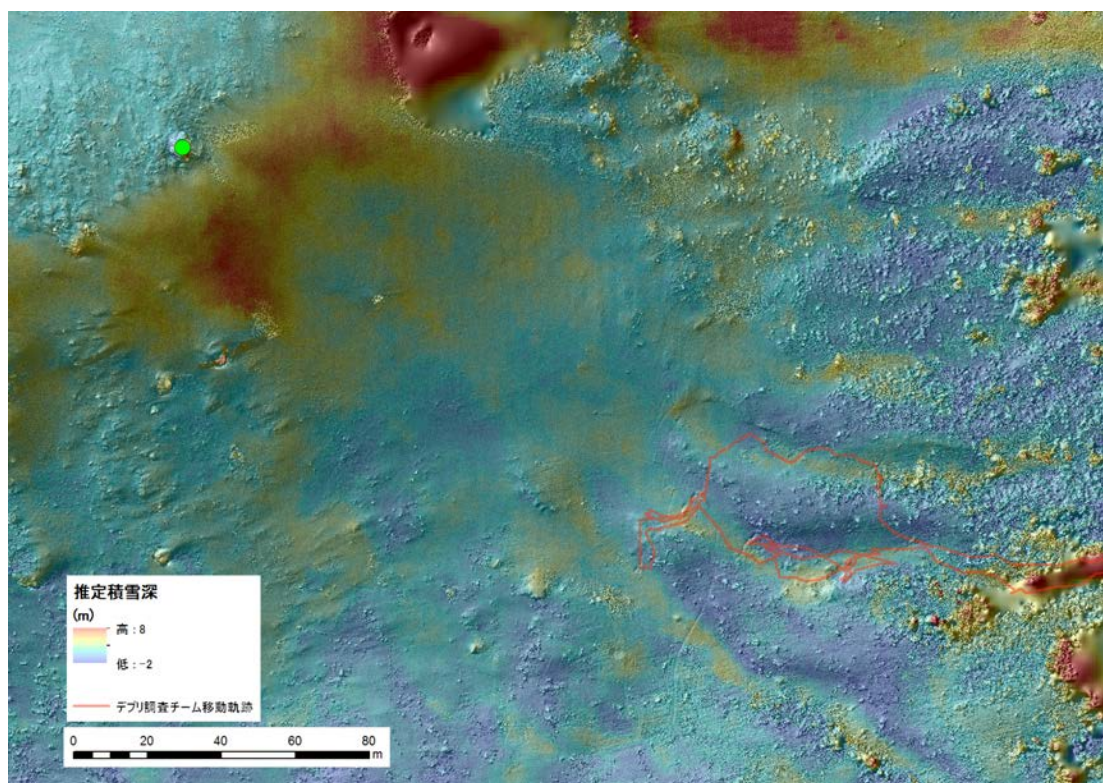


図4 雪崩発生エリア周辺の推定積雪深図

暖色系は積雪深が深く、寒色系は浅いことを示す。凡例では、最小の積雪深を-2mとして描画しているが、この範囲では積雪深がマイナスの地点は無い。緑の丸印は天狗岩、赤色の線は、デブリ調査チームの移動軌跡を示す。

雪崩発生前地形データの取得

日本測量調査技術協会が提供する「航空レーザー計測データポータルサイト」にて、当該地域の航空レーザー測量データの有無を調査し、2 件ヒットした。このうち、H20 渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザー計測業務 (ID: A89546C5D569DA66) について、国土地理院に対し利用申請を行い、入手することができた。このデータは、国土交通省関東地方整備局により、2009 年 06 月 02 日～2010 年 03 月 20 日にかけて計測された、計測密度 1m のデータである。当該地域が計測された時期は不明だが、豪雪時に計測することは考えられないため、レーザー計測と同時に撮影された簡易オルソ画像の残雪の様子から、2009 年 6 月ころに計測が実施されたものと推測している。

積雪深の推定

雪崩発生前地形データの解像度 (1mDEM) に合わせて、積雪表面モデル (0.033mDEM) を 1m メッシュにリサンプリングしたうえで、積雪表面モデルから地形データの差分を取ることで、積雪深を推定した。

課題

推定積雪深を見ると、天狗岩の直下付近の急崖において、一部、積雪深が薄くなっている領域がある。積雪断面には、雪崩によって巻き込まれた植生や、雪崩によって剝離され不整合となった積雪断面が観測されている。また、3/27 の救助活動によって掘削された人為的な掘削跡がみられ (上石・他、2017)、現地調査の結果と統合して検討する必要がある。

課題は、積雪表面モデル全体の精度検証および、高標高エリア (雪崩発生エリア) の積雪表面モデルの精度向上である。4/2 時点では残雪が多く雪崩発生の危険があり、天狗岩付近へ接近することはできなかった。融雪後に、天狗岩付近にある、4/2 時点で判読できる露岩について GNSS 観測を実施し、高標高部の積雪表面モデルの精度向上を行う必要がある。

次の課題は、雪崩発生前地形データに含まれる、植生 (ササ等) の影響の検討である。航空レーザー測量では植生を貫通して地形データが得られる場合があるが、密生した植生の場合、レーザー光が地形に達しない可能性がある。本地域は高さ 1～2m のチシマザサ、チマキザサが繁茂するエリアであり、これらが地形モデルの標高値に影響している可能性が懸念される。

まとめ

2017 年に発生した栃木県の雪崩災害について、同年 4/2 に無人航空機による垂直写真の撮影、地上基準点測量、SfM 多視点ステレオ写真測量、現地調査、過去の地形データの取得を実施した。その結果、暫

定的な推定積雪深を得た。

無人航空機を用いることにより、これまでは点でしか得られなかった観測情報を、面的に取得したデータと対比させながら議論を行うことができるようになった。さらに、高頻度のデータ取得を可能にし、地形変化をより細かいタイムスケールで観測することを可能にした。

技術面では、精度の高いデータを取得するには、それに見合った装備品と準備が必要になる。つまり、センチメートル級の精度を得たいのであれば、地上基準点をその精度で計測できる測量機材が必要になる。また、十分な数の地上基準点の設置が必要になる。その準備の労力や機材への投資は小さくない。

安全面では、現時点で「安全な無人航空機」は存在しない。墜落させれば山林火災の発生や第三者への傷害をもたらすリスクがある。利用者は専門知識を含む座学および実技の学習を通じた、不断の安全運航の努力が求められる。

無人航空機にレーザー測量機を搭載したり、各種センサーを搭載したり、その活用の夢は広がる一方である。そして同時に、機材が高度化すると、そのオペレータに求められる能力も高度化する。今後、操作が簡単になってもオペレータの仕事は簡単にはならないだろう。今現在も今後も、無人航空機のオペレータに求められる最後の仕事は、安全機能が失われた機体に対する緊急事態への適切な対処を通じた、第三者への危害防止 (および高額な機材の損傷の防止) である。これには高度な知識と、一瞬での確な判断を下すための訓練が求められる。つまりは、その難易度は有人航空機と同じ方向性になるものと推測している。それでもなお、無人航空機は価値のあるツールであろう。

参考文献

- ・ 貝塚 爽平、遠藤 邦彦、鈴木 毅彦、小池 一之、山崎 晴雄 (2014) 日本の地形 (4) 関東・伊豆小笠原 (第四版)、東京大学出版会、p.49-53p.
- ・ 国土交通省関東地方整備局 (2009) H20 渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザー計測業務 (ID: A89546C5D569DA66)
- ・ 中村一樹、小杉健二、根本征樹 (2017) 那須町雪崩災害調査 (速報・詳細版) (2017.3.28 実施)、防災科学技術研究所クライシスレスポンス Web サイト、2017 年 4 月 14 日閲覧、URL: <http://ecom-plat.jp/nied-cr/index.php?gid=10231>
- ・ 上石勲、山口悟、根本征樹、佐藤研吾、伊藤陽一、内山庄一郎 (2017) 那須町雪崩災害第 2 回調査 (速報) (2017.4.2 実施)、防災科学技術研究所クライシスレスポンス Web サイト、2017 年 4 月 14 日 閱 覧 、 URL: <http://ecom-plat.jp/nied-cr/index.php?gid=10231>

複数時期の航空レーザ測量データを用いた

地すべり変動斜面の抽出事例と今後の課題

Detection of an unstable slope using Airborne LiDAR scanning data in multiple periods and future tasks

西井稜子* (新潟大学, 元土木研究所), 石井靖雄 (土木研究所)

Ryoko NISHII (Niigata University, PWRI), Yasuo ISHII (PWRI)

キーワード: 航空レーザ測量, 空中写真, オルソ画像, GIS

Keywords: Airborne LiDAR scanning, Aerial photograph, Orthophoto, GIS

1. はじめに

航空レーザ (LP) 測量は、高分解能・高精度の地形データを提供する。そのため、広域において地すべり変動斜面を抽出する場合、複数時期の LP データを用いた地形変化解析 (以下、LP 解析という) が有力な抽出方法の一つといえる。しかし、LP 計測には多額の費用が必要なため、計測間隔は短くても年 1 回程度である。そのため、地すべり変動斜面の詳細な変動特性を把握するには、計測間隔がより短い計測法の併用も必要と考えられる。UAV・SfM 技術は、LP 計測に比べ、相対的にコストパフォーマンスがよく、数値表層モデル (DSM) を取得できる。したがって、今後、広域における LP 解析によって検出された地すべり変動斜面群の詳細な動態把握の方法として、UAV・SfM 技術の導入が期待される。

本発表では、上述の UAV・SfM 技術導入の前段階である LP 測量データを用いた変動斜面の抽出事例について紹介する。具体的には、姫川水系金山沢を対象に、5 時期の LP データを用いて再活動型地すべりを抽出した事例について報告する。また、広域における LP 解析の課題点についても言及する。

2. 地すべり変動斜面の抽出事例

2.1 調査地概要と調査方法

姫川水系浦川支流の金山沢では、1911 年 8 月に稗田山崩れが発生し、約 1.5 億 m^3 の土砂が生産された¹⁾。金山沢流域には、当時の崩壊堆積物やその後の崩壊土砂に加えて、地すべり移動体も分布しており、近年においても土石流や融雪型地すべりの発生が報告されている。本研究では、金山沢源頭部に位置する地すべり斜面の変動有無を把握するため、表-1

に示した 5 時期の LP データを用いて、計測期間毎の標高差分値と 3 次元変位ベクトルを算出した。また、LP 測量が実施される 2009 年以前の状況も把握するため、Agisoft PhotoScan1.1 を用いて、1968~2009 年までの空中写真からオルソ画像を作成した。そして、それらのデータと LP データを GIS 上で重ね合わせ、各時期における地すべり地形の変化を検討した。

2.2 調査結果

対象とした地すべり移動体の規模は、1968 年時点では、幅約 350 m、長さ約 500 m、滑落崖の最大比高は約 100 m に達する (図-1)。空中写真のオルソ画像の比較から 1979 年から 1999 年の間に、地すべり移動体の側方斜面の侵食が急激に進行したことが確認された²⁾。また、LP 解析の結果から、2009~2011 年において、地すべり移動体が下方へ向って移動し、地すべり頭部の沈下と末端部の隆起が明らかになった (図-2、3)。地すべりの再活動に伴い、地すべり移動体が細分化される様子も確認された。2011 年~2013 年においては、主に谷沿いにおいて、標高差分値の増減が生じる傾向が認められた。

稗田山崩れから約 100 年経過したが、流域内には、依然、再活動中の地すべりが存在することが明らかになった。しかし、その詳細な変動特性は不明であり、今後、UAV・SfM 技術の導入も視野に入れ検討する必要があると考えられる。導入する際には、現場の大部分は森林に覆われており、人工構造物が少な

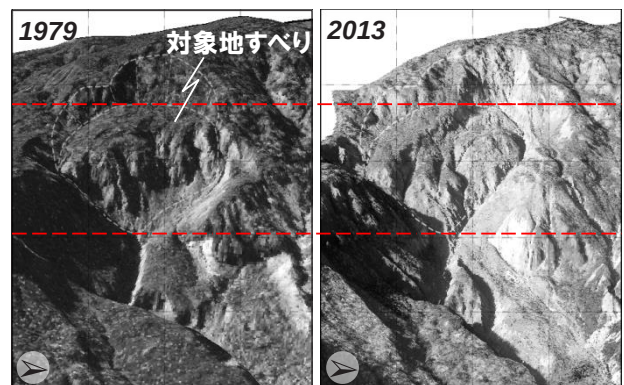


図-1 解析対象地すべりの鳥瞰図

2 本の横破線は地すべり頭部と末端の位置に相当

表-1 使用した空中写真と LP データ

LP データ		空中写真	
撮影年	グリッドサイズ	撮影年	縮尺
2009	1 m	1968	1/20000
2010	1 m	1979	1/16000
2011	1 m	1994	1/16000
2012	1 m	1999	1/20000
2013	1 m	2009	1/16000

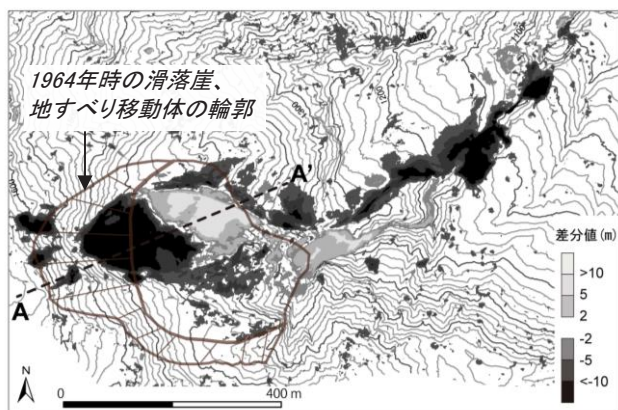


図-2 2010～2011 年の標高差分析結果

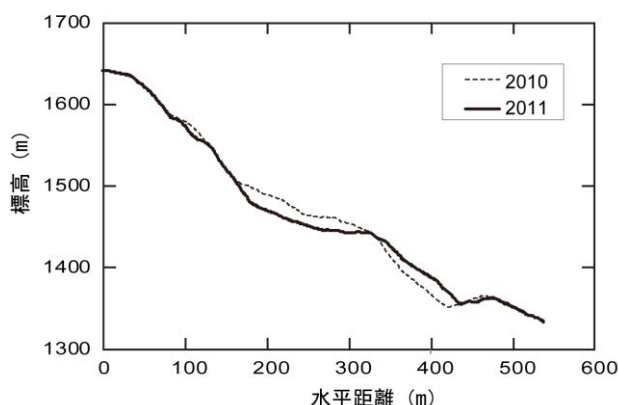


図-3 測線 A-A' における 2010～2011 年の地形断面
測線の位置は図-2 に図示

いため、地上基準点 (GCP) の取得の工夫が必要と考えられる。

3. 広域における LP 解析の課題

広域 (10^2 km^2 以上) を対象とした場合においても、金山沢の事例のように効率的かつ精度よく地すべり変動斜面の抽出が可能かを評価するため、安倍川流域 (約 200 km^2) を対象に LP 標高差解析を実施し、変動斜面の抽出状況を調査した。使用した 5 時期 (2005、2009、2011、2012、2013 年) の LP データは、全て 1 mDEM である。解析結果から、時期によって、対象流域の標高差分値は大きく異なることが示された (図-4)。地すべり変動斜面を抽出できた箇所も存在したが、例えば、「2012-2009」差分セットでは、多くのパッチ状の標高差分値群が認められた (図-4)。場所によっては、尾根部での標高上昇も示され、真の地形変化ではない可能性が示唆された。そこで、解析に用いた LP データが差分解析に適していたかを把握するため、各計測時期の LP データを基に地形モデル (陰影図) を作成した (図-5)。2009 年のデータは、他の時期に比べて、相対的に微地形が表現されていない。この結果から、パッチ状の標高変化

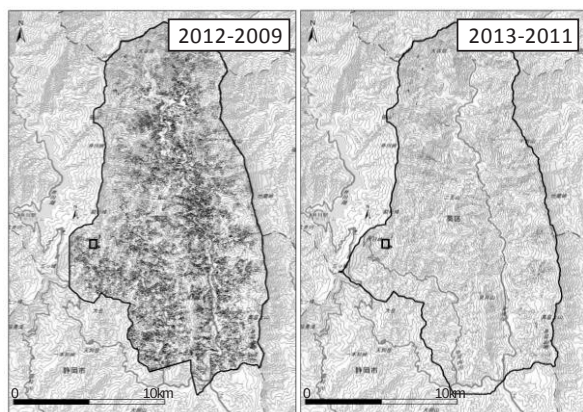


図-4 安倍川流域における差分析結果の事例
黒四角は、図-5 の範囲。

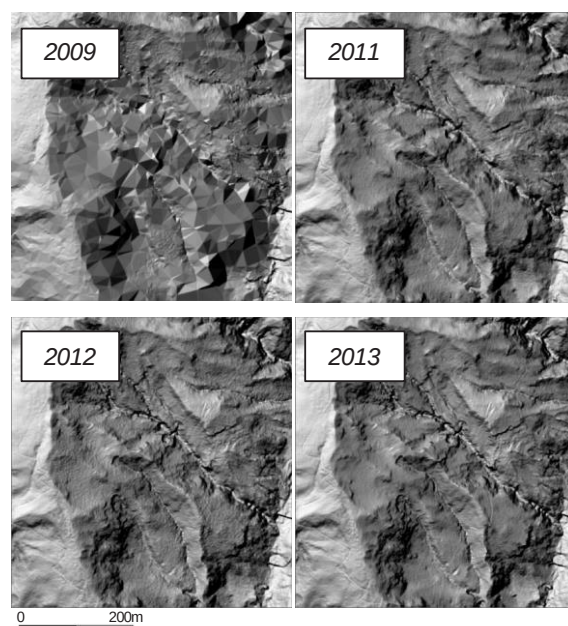


図-5 安倍川流域における 4 時期の陰影図
範囲は、図-4 に図示。

は、差分解析に必要な分解能を有していないデータを用いたことによって生じた可能性が高いと考えられた。標高差解析によって、効率的かつ精度よく変動斜面を抽出するには、解析前に、まず使用するデータが標高差解析に適した分解能を有しているかを判別することが重要であり、その判別方法の確立が必要と考えられる。

謝辞: 本発表で扱った LP データは、国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所および国土交通省国土地理院から提供いただいたものです。ここに感謝の意を表します。

引用文献: 1) 町田洋 (1964) : 姫川流域の一溪流の荒廃とその下流部に与える影響、地理学評論、37、477-487. 2) 西井ほか (2015) : 過去 45 年間における金山沢源頭部の地すべり斜面の地形変化、第 54 回日本地すべり学会研究発表会講演集、185.

第45回地すべりシンポジウム
UAV・SfM技術の地すべり研究への応用

2017. 6

編集・発行 公益社団法人日本地すべり学会新潟支部
印 刷 株式会社 文 久 堂

(公社) 日本地すべり学会新潟支部のホームページ
<http://www.landslide-niigata.org>