

# 2017 年那須雪崩災害調査への UAV-SfM の適用

## Application of UAV-SfM to Disaster Investigation of 2017 Nasu Avalanche

内山庄一郎<sup>1)</sup>, 鈴木比奈子<sup>1)</sup>, 上石勲<sup>2)</sup>, 中村一樹<sup>2)</sup>  
S. Uchiyama<sup>1)</sup>, H. Suzuki<sup>1)</sup>, I. Kamiishi<sup>2)</sup>, K. Nakamura<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

<sup>1)</sup> *Integrated Research on Disaster Risk Reduction Division, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

<sup>2)</sup>防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

<sup>2)</sup> *Snow and Ice Research Center, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

---

*Abstract:* We prepared orthorectified images and snow covering DSM by UAV-SfM, and it was provided for avalanche simulation. The total error at 6 points of accuracy verification point was 3.08 cm. The ratio between accuracy and flight altitude was 1:5,000. The snow depth was estimated from the difference with the DEM by existing LIDAR. Surface DEM contains the height of Sasa and it was difficult to remove the influence easily. High resolution orthorectified images captured the state of snow surface, but it did not lead to estimation of avalanches occurrence areas and the mechanism of this disaster.

*Key words:* UAV-SfM, Robust SfM model, Photo interpretation, Estimated snow depth, LIDAR

---

### 1. 背景および研究目的

2017年3月27日午前8時30分(推定), 栃木県那須郡那須町大字湯本字那須岳国有林内(那須温泉ファミリースキー場付近)において雪崩が発生し, 登山研修中の高校生等が雪崩に巻き込まれた。この雪崩により, 死者8名, 重傷2名, 軽傷38名の人的被害が発生した(内閣府, 2017)。この雪崩について, 発生地点や流下域に関する知見を得ること, および数値シミュレーションに利用可能な積雪表面の標高モデルを得ることを目的として調査を実施した。

### 2. 積雪環境における調査・観測手法

#### 2.1 無人航空機による空撮

積雪は, 気温の上昇や日射など気象条件の変化により短時間でその積雪表面の様相が変化すると考えられる。そのため, 発生した雪崩のメカニズムを調査する上では, 可及的速やかに発生後の状態を調査することが望ましい。しかしながら, 雪崩発生直後は吹雪等の厳しい気象条件や高い雪崩再発リスクがあり, 現場に進入しての積雪状態の観察やデブリ計測など, 直接的な調査の実施には安全管理上の制約が大きい。そのような中, 雪崩調査に適用できる計測技術をいくつか挙げる事ができ, それぞれに長所と実用上の課題が指摘できる。航空レーザ測量や有人航空機の航測カメラによる撮影は, コストが大きいことがデメリットになる。光学衛星リモートセンシングは観測範囲が広いが, 分解能が十分ではない場合がある。さらに, 観測角度と斜面方向の関係性による画質低下, 雪面の過剰露出, 衛星回帰による観測可能時間帯とその時刻における雲の存在による観測機会の逸失といった問題がある。地上レーザ測量(TLS: Terrestrial laser scanner)は遠隔地から計測可能だが, システム全体が高価である。そして, 現場に持ち込んで計測を行うため, 雪崩再発のリスクが高い場所では実施できない。くわえて植生や岩などの障害物の背後や, 勾配の変化が大きい斜面では計測できない領域が生じる。このような中, 無人航空機(UAV: Unmanned aerial vehicle)とSfM多視点ステレオ写真測量との二つの技術を組み合わせた調査手法(UAV-SfM)が提案されている(内山・他, 2014a)。観測者(無人航空機の操縦者)は安全な場所にいながら, アクセス困難地の観測ができ, さらにシステム全体の導入と運用に要するコストが低いことがメリットである(小花和・他, 2014)。積雪環境に適用する場合の特有のメリットとしては, 人間が観測領域に立ち入る必要がないため, 積雪構造に影響を与えないことが挙げられる。一般的なデメリットは, 飛行性能の限界が高くはないため, 風速10 m/sを超えるような強風時や, 機体が見えないような降雨・降雪時には, 安全に使用することは困難である。このほか, 航空法等の関連法規の制約も受ける。

## 2.2 SfM 多視点ステレオ写真測量

無人航空機で撮影した写真を SfM 多視点ステレオ写真測量（以降、SfM）により解析することにより、高分解能の地表面標高モデル（DSM: Digital surface model）やオルソモザイク画像を得られる（早川・他，2016）。積雪環境での SfM 解析の適用事例には、平成 26 年山梨豪雪による雪崩流路と堆積範囲の検討（内山・上石，2014）や、SfM 解析で作成した立体モデルを用いた破断面の可視化（Gauthier, et al, 2014）、複数時期の UAV-SfM 計測による積雪深の推定（内山・他，2014b；Nolan, et al, 2015；小花和・他，2016）など、いくつかの先行研究がある。UAV-SfM では低コストかつ高解像度に面的な情報の取得が可能だが、航空機による空中写真撮影や衛星リモートセンシングで撮影した場合に比して観測範囲が狭い。

## 2.3 積雪環境で SfM を適用する場合の課題

SfM の性質上、コントラスト差が小さい撮影対象の場合、画像解析による画像特徴点の自動抽出ができず、それに続く三次元的な計測処理を行うこともできない。同様に、写真に写らない場所の計測も不可能である。積雪表面は高い可視光反射率を示し、さらに反射輝度のレンジも狭いため、積雪面が過剰露出となり白飛びするため、画像特徴点がほとんど得られない。特に、新雪のように積雪面に凹凸が少なく滑らかな場合や、曇天で直射日光がない場合、南中時刻前後で太陽が直上にあり影が少ない場合、これらのどのパターンでも積雪表面上の陰影が弱くなり、コントラスト差が非常に小さいため、SfM 解析を行う上で大きな障害となる。

## 3. 対象地域の地形、地質、気象の概要

### 3.1 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 1.3 km の位置にある標高 1,915 m の茶臼岳を主峰とし、南北 25 km にある 6 つの火山体から構成される。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 1,300 m 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 1,000 m、幅 500 m から 700 m、厚さ約 100 m であり、厚く短い（貝塚・他，2014）。今回の災害は、舌状に伸びる平坦な溶岩流の末端部で発生した（図 1）。溶岩流の末端は 30 度以上の急崖に囲まれ、雪崩が発生しやすい傾斜をもつ斜面が広く分布している。



図 1 茶臼岳周辺の地形概略図（背景は地理院地図。黒丸は天狗岩、円内は雪崩が生じた斜面）

### 3.2 気象状況

ここでは、無人航空機の飛行時点までの気象状況について述べる。図 2 にアメダス観測点「那須高原」の 2017 年 3 月 24 日から 4 月 3 日までの観測結果を示す。雪崩発生は 3 月 27 日、無人航空機撮影は 4 月 2 日である。アメダス観測点は雪崩発生場所の約 5 km 東、設置標高は

749 m である。気温減率  $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  の場合、雪崩発生領域のある標高 1,500 m における気温は観測点より約  $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  低い。図 2 左の点線は、標高 1,500 m における気温 0 度のラインである。この図によると、3 月 27 日の雪崩発生から 4 月 2 日の無人航空機撮影までの間に、日照がみられたのは 3 月 28 日から 3 月 30 日および 4 月 2 日の 4 日間である。3 月 29 日および 3 月 30 日の 2 日間は、現場付近の気温が 0 度を超え、アメダス観測点での積雪量は 3 月 30 日でゼロとなっている。ここから、撮影が行われる 4 月 2 日までの間に、雪崩発生直後の積雪表面の状態から、表面の様相が変化している可能性が指摘できる。

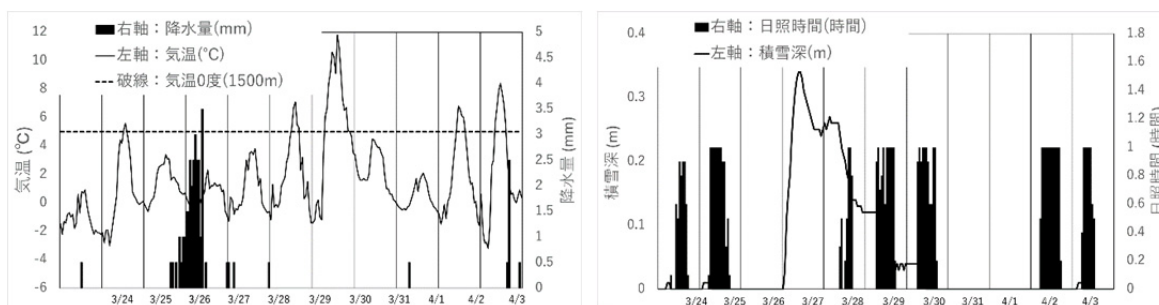


図 2 アメダス観測点「那須高原」の観測値 (2017 年 3 月 24 日～4 月 3 日)  
左：降水量，気温，右：日照時間，積雪深

#### 4. 調査手法と結果

本研究では UAV-SfM により調査を実施し、積雪表面モデル(以降、積雪 DSM: Digital surface model) およびオルソモザイク画像を作成する。これらの実用的な精度を得るために、撮影前に地上基準点および精度検証点を設置し、GNSS によりこれらの地点の位置座標を観測する。次に、積雪深の推定を行う。無積雪期の航空レーザ測量データ(以降、地表 DEM)を入手し、GIS で積雪 DSM から地表 DEM を減算することにより積雪深を推定する。

##### 4.1 地上基準点および精度検証点の設置

SfM の実態はノンメトリックカメラを用いた写真測量である。高精度な撮影姿勢および撮影場所の計測機構を持たないノンメトリックカメラによる撮影であるが故に、内部標定要素および外部標定要素は、SfM ソフトウェアが推定する。SfM で使用する地上基準点は、生成する立体モデルのジオリファレンスに使用されるのみならず、内部および外部標定要素の推定精度の向上にも使用される。このようにして、SfM で作成するオルソモザイクや DSM の精度品質が一定以上に保たれる。本調査では、地上基準点に加えて、三次元モデルのジオリファレンスに使用しない地点として、地上基準点とは独立した精度検証点を設置した。設置の際は、対象範囲を広く囲むように設置すること、対象範囲の内部にも設置すること、対象範囲の標高の全域を含むように設置することを条件として、これらを満足しうる地点を選定した。積雪表面上には 1m 角のターポリン製シートを 4 か所設置し、写真上で明瞭に判読可能な道路の白線、および雪崩発生域の北西にある通称「天狗岩」周辺の岩塊を含め、5 か所の地上基準点と 6 か所の精度検証点を設置した。なお、地上基準点を設置した 4 月 2 日の時点では雪崩発生斜面上に多量の残雪があり、安全上の理由により雪崩発生域の内部やその周辺には地上基準点および精度検証点の設置を行うことはできなかった。このため、天狗岩周辺の地点については、融雪後の 5 月下旬に GNSS による座標観測を行った。GNSS 測量機材には、2 m 高のカーボンレンジポールに装着した Trimble Geo7X と Zephyr Model 2 外部アンテナを使用した。観測には、メーカー公称精度 10 cm の VRS (Virtual Reference Station) 測位方式による 10 秒間の観測を 3 回行い、その平均値を座標値とした。

##### 4.2 無人航空機による写真撮影と SfM による解析

###### (1) 無人航空機による写真撮影および写真判読

機体は DJI INSPIRE 2、カメラは DJI X5S を用いた。カメラの諸元は、総画素数 2,000 万画素、マイクロフォーサーズ CMOS センサー、レンズ焦点距離 15 mm、対角画角は 71.6 度である。このシステムで対地高度 150 m から垂直直下を撮影した場合の計算上の撮影範囲は、横 173 m、縦 130 m、地上分解能は 3.29 cm/px となる。

積雪環境特有の SfM 解析上の課題 (2.3 節) については、次のように対処した。積雪表面に視認できる微細な形状や模様 (以降、テクスチャ) のコントラスト差を、可能な限り大きく、鮮明に撮影できればよい。まず、色深度を細分化するために RAW 形式で記録した。各色 8 bit の JPEG 形式では 1 チャンネルあたり 256 階調の色深度で表現されるが、RAW 形式では各チャンネル 12~14 bit、つまり 4,096~16,384 階調で記録できる。JPEG ではオーバー (アンダー) な露光状態のため白飛び (黒つぶれ) する画素が、RAW 形式で記録されたデータであれば、わずかな輝度の階調の違いを増幅することにより、被写体のテクスチャを再現できる場合がある。次に、テクスチャがより明瞭になる時間帯と日照条件を検討した。一般的な写真測量では、均一な薄曇りの南中時刻前後の撮影が望ましいが、積雪環境では影が薄くなる条件は好ましくない。雪面の微細な凹凸による陰影が強くなるように、太陽高度が低く日射のある時間帯を選択した。今回は南東向き急斜面が対象のため、これに直交する方角からの日射と低角な太陽高度の条件がベストである。そのため、15 時から 1 時間以内に撮影を行うこととした (表 1)。

表 1 無人航空機による撮影を実施した時間帯の太陽高度および方位 (データは国立天文台)

年月日	時刻	高度[°]	方位[°]
2017/04/02	14:56	35.7	245.9
2017/04/02	15:52	25.2	256.5

那須岳周辺は強風となる場合が多く、安全運航には飛行可能な風速条件の見極めが重要となる。災害発生後より日照があり風が弱くなるタイミングを検討し、撮影 2 日前の 3 月 31 日に実施日を決定した。使用機材の耐風性能は 10 m/s であり、上空で耐風性能を超えない飛行環境を維持する必要がある。耐風性能以内であっても乱流や突風には弱いため、経験をふまえて平均風速との差が 2 m/s 以内かつ瞬間最大風速 8 m/s (地表での 2 分間観測値) を飛行判断の閾値とした。当日は西の風、地表はほぼ一定の風で最大風速 4.3 m/s であり、高標高域で活動する調査者からの情報を加味し、風向の乱れと突風がほぼ無いことから運航可能と判断した。

低温環境での課題として、動力源にリチウムイオンポリマーバッテリーを電源としており、低温下では飛行時間が極端に短くなる。当日の気温は 2 度であり、飛行が難しい条件であった。このため、黒い保温ケースにバッテリーを格納し直射日光下で加温した。飛行前のバッテリー温度は 16 度程度であり、結果として飛行時間の減少等の不具合は生じなかった。

飛行計画は次のように設定した。飛行範囲は東西 800 m、南北 320 m、標高差 270 m、オーバーラップ率は進行方向、コース間ともに 80%、対地高度 150 m を維持する地形追従飛行、分解能は 3.3 cm/px として計画した。飛行方法は、設定した飛行コースを自動で飛行させる自律飛行とし、飛行制御には Map Pilot for DJI を使用した。

これらの準備と計画をもって 2017 年 4 月 2 日午後、地上基準点等の設置後に空撮を実施した。飛行制御ソフトウェアのバグにより、結果として進行方向 72%、コース間 85% のオーバーラップ率で撮影が行われたが、オーバーラップ率としては十分であり、精度低下等の問題はほとんどないと考えられる。これにより、265 枚の RAW 形式の垂直写真を撮影した (図 3)。この写真を用いて、(株)フォテック Stereo Viewer pro を用いて撮影写真の立体視判読を行った。これにより、クラストやスノーボール、流下方向に伸びる直線的な筋やその乱れ、クラック状のテクスチャ等、特徴的な積雪表面の様子が観察された (図 3: 巻末にカラー図を示す)。

## (2) SfM 解析と精度検証

SfM ソフトウェアには Agisoft PhotoScan Professional Edition Version 1.2.6 build 2834 を用いた。無人航空機による撮影写真 265 枚と地上基準点 5 点を SfM により解析した結果、幅 31,660 px、高さ 21,391 px、分解能 2.95 cm/px のオルソモザイク画像および積雪 DSM を得た。次に、SfM 解析で得られた三次元モデルの誤差検証を行った。地上基準点 (5 点) と精度検証点 (6 点) に使用する地点数は同数としながら、それぞれに使用する地点をランダムに入れ替えて、精度検証点における誤差の変化を観察した。いずれのパターンでも精度検証点上の誤差は 3cm 前後を示した。最終的な地形モデルは、計測エリアの周辺に地上基準点が配置されるパターンとした (図 4)。この時、地上基準点 5 点における総誤差は 1.97 cm、精度検証点 6 点では 3.08 cm となった (表 2)。なお、これらの誤差値は、SfM ソフトウェア上に出力された値である。





図 3 分解能 2.95 cm/px の垂直写真の一部（右上矢印は天狗岩，中央はクラック状の模様）

表 2 地上基準点（左），精度検証点（右）における誤差 (RMSE)  
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude

GCP Label	Error (cm)				CP Label	Error (cm)			
	X	Y	Z	Total		X	Y	Z	Total
3	-0.84	-0.97	0.43	1.35	12	0.96	-0.08	0.49	1.08
g1	1.05	-1.66	-0.12	1.96	dia	0.57	3.65	1.35	3.94
g3	0.03	0.72	0.19	0.74	dia2	0.40	-0.38	0.03	0.56
g4n	0.81	3.08	-0.15	3.19	g2	-1.01	-4.98	1.25	5.23
josestu	-0.97	-1.30	-0.56	1.71	line-u	-0.32	2.31	0.75	2.45
<b>Total</b>	<b>0.83</b>	<b>1.75</b>	<b>0.34</b>	<b>1.97</b>	p	-1.86	-1.77	-0.22	2.58
					<b>Total</b>	<b>1.00</b>	<b>2.79</b>	<b>0.84</b>	<b>3.08</b>

#### 4.3 雪崩発生前地形データ（地表 DEM）の取得

日本測量調査技術協会による「航空レーザ計測データポータルサイト」において当該地域の航空レーザ測量データの有無を調査し、2件のデータセットを確認した。このうち「H20 渡良瀬川流域及び鬼怒川流域航空レーザ計測業務 (ID: A89546C5D569DA66)」を入手した。当該地域は、国土交通省関東地方整備局により 2009 年 10 月末から 11 月初旬に計測された。

#### 4.4 積雪深の推定 (ESD: Estimated snow depth) と積雪深精度の確認

地表 DEM の分解能 (1 m) に合わせて、積雪 DSM の分解能 (2.95 cm) をリサンプリングし 1 m メッシュの積雪 DSM を作成した。その後、積雪 DSM から地表 DEM を減算することにより、ESD を求めた (図 4)。なお、積雪が無い駐車場や道路上で地表 DEM と積雪 DSM の系統的な垂直方向のズレ量を計測し、地表 DEM の標高値にズレ量の平均値を加算し補正した。

積雪深の精度確認は後述の理由により、地表が露出している場所でのみ行なった。北東部の平地（駐車場）は地表 DEM と積雪 DSM の垂直方向のズレ補正に使用したため、積雪深の精度確認には使用しない。斜面中程にあり、地表の一部が露出している 3 地点について確認を行った (表 3)。地表が露出しているため、ESD が 0 m になればよい。ただし、検証地点は斜面上にあり、1m メッシュ内で持ちうる標高には幅がある。ESD がその幅に収まっていれば、誤差は十分に小さいと考えられる。結果として、1 点は 1 m メッシュの標高幅に収まり、他 2 点では 3 cm 程度の誤差がみられた。誤差の程度としては精度検証 (表 2) と調和的であった。

表 3 推定積雪深 (ESD) 確認地点の ESD と斜面傾斜角および 1m メッシュ内の標高幅

Point	ESD (m)	Slope (deg.)	Elevation range	Error (m)
grd	0.216	19.5	±0.177	0.039
grd2	0.108	10.0	±0.088	0.02
grd3	0.076	16.0	±0.143	Within range

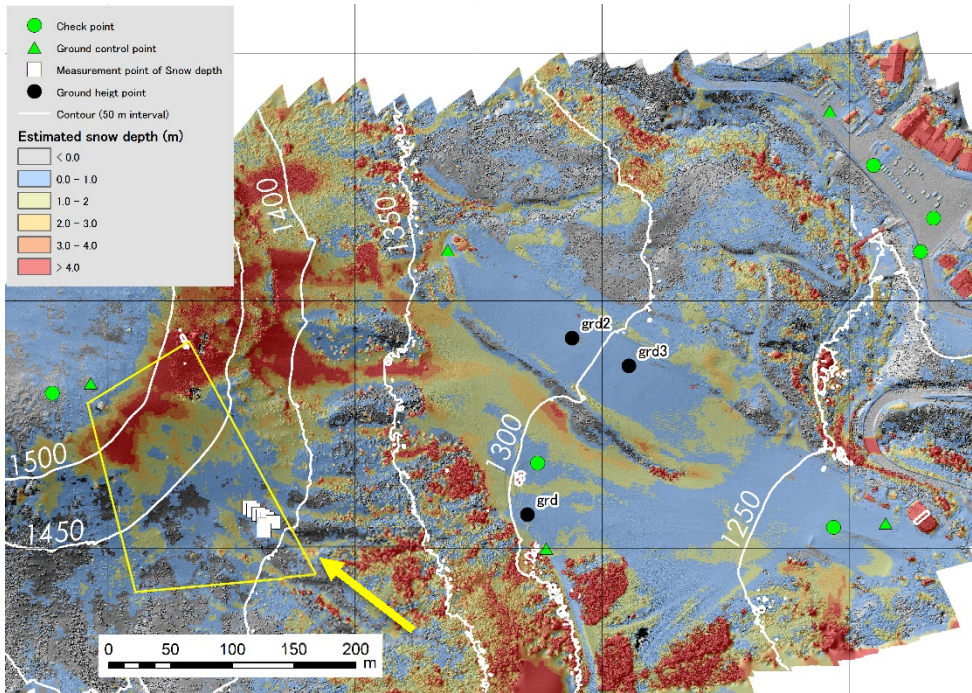


図4 雪崩発生エリア周辺の推定積雪深 (ESD) 図 (巻末にカラー図を示す)

ESD が 0.0 m 以下は無彩色. 背景は積雪 DSM 陰影図. 三角は地上基準点, 丸印は精度検証点, 四角は積雪深の実測地点, 黒丸は ESD の精度確認に使用した地表面が露出している地点. 白線は積雪 DSM から作成した等高線 (50 m 間隔). 矢印は救助活動が行われた地点, 黄色四角は図 3 の範囲を示す.

#### 4.5 実測積雪深と ESD との比較

3月27日の雪崩災害発生後に救助活動が行われた地点より 30 m 程度上方の斜面において, ゾンデ棒により 8 点の積雪深を計測した. 実測値と ESD とを比較した結果, ESD が平均 1.79 m 小さく見積もられていた (図 5). この地域には高さ 2 m 前後のチシマザサ等が分布しており (薄井, 1972), 4月25日以降の現地観察では, 既に人の背丈を超える笹が密生し (図 6 左), 地表面から見上げて空はほぼ見えない (図 6 右). ここから, 航空レーザ測量のレーザが地表まで到達しておらず, 笹の高さが含まれた地表 DEM となっていることが考えられる.

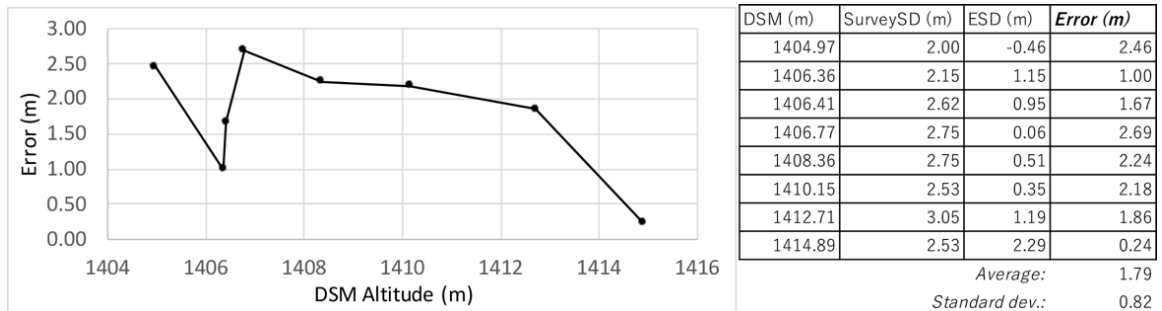


図 5 実測積雪深 (SurveySD) と ESD との差 (Error)



図 6 雪崩発生エリアに繁茂する笹の状況 (左), 地表から天頂方向を見た状態 (右)



#### 4.6 その他の時期の撮影

無人航空機による空撮は4月2日、19日、25日、5月30日の4回実施した。このうち4月19日は山頂付近で強風のため、SfM解析に使用できる写真を得ることはできなかった。初回の4月2日は積雪状態の調査、2回目以降は融雪により地表面が露出することを期したものである。しかしながら前述のとおり融雪後の笹の高さの回復は著しく速く、結果として地表面高に類するデータの取得はできなかった。しかし、調査地全景を撮影しており、融雪の過程で現れる谷筋や残雪量の過多、笹植生の被覆等を明瞭に判読することができる(図7)。



図7 調査地全景(撮影日は左:2017年4月2日,中:4月19日,右:4月25日)

### 5. 考察

#### 5.1. 積雪環境での UAV-SfM の適用

積雪表面に陰影が生じる時間帯と気象条件において RAW 形式で撮影することにより、非積雪環境と同様に SfM 解析を適用することができた。4回の撮影において1回は強風のため飛行中止とした。このことから、気象条件は山岳地での UAV-SfM 適用の大きな制約となる。次に、精度検証における誤差は 3.08 cm であった。地上基準点と精度検証点をランダムに入れ替えて検証した場合でも同様の誤差を示したことから、この三次元モデルは精度的に安定していると考えられる。よく見られる精度検証の方法として、検証地点を固定する手法ではそれ以外の地点の誤差が明らかではない欠点がある。また、地上基準点は三次元モデルを強制的に地理座標にフィッティングさせる点のため、地上基準点のみで行う精度検証は正しくない。対して、今回のようにジオリファレンスする地点と検証地点を入れ替えながら分離・独立させ、複数パターン配置で精度検証を行う手法は、地形モデル全体の精度を示す手法として有用である。

#### 5.2. 推定積雪深 (ESD)

現地観察の結果から、地表 DEM は笹の高さを含むことが示唆された。このため、笹の分布する範囲で見積もられた積雪深は正しくなく、その深さは一様ではないため、積雪深の過多を根拠とした議論の展開は難しい。したがって、積雪深の厚さの急変点を雪崩の発生域と推定することや、積雪深が薄くなっている領域からデブリの体積を求めることも適切ではない。ただし、ESD で積雪が薄い場所であっても、実測で 2.5 m 程度の積雪が確認されたことから、現実には実測した量の積雪が存在するため、UAV-SfM で作成した積雪 DSM を雪崩シミュレーションに用いること自体は問題ないと考えられる。

次に、笹の影響を除去しうる手法を議論する。画像判読やマルチスペクトルセンサー等により、笹植生の範囲を特定しその範囲を除外した場合、本調査領域では笹の分布範囲が広いから、雪崩発生斜面上に有用なデータが残らないことになる。また、航空レーザ計測では、密生した笹の被覆率が高いことから、地表に到達するレーザは限定され、点密度が小さくなる(菊地・他, 2018) ため、笹の影響を除去することは難しい。

#### 5.3. 雪崩発生域に関する知見

作成したオルソ画像の分解能は 2.95 cm/px であり、雪面に落ちているペットボトルを認識できる分解能である。このような超高解像度の画像を立体視して観察することにより、雪面上にクラック状のテクスチャ等が確認された(図3)。しかし、発生から6日が経過し、途中の2日間で気温がプラスに転じる日を挟むため、積雪表面の状態は発生直後の状態をどの程度残しているのかは明らかではない。したがって、写真判読をとおした雪崩発生域の認定や、雪崩発生メカニズムの推定を行うことはできなかった。過去、このレベルの超高解像度な積雪状態を撮影したデータは少なく、雪面のテクスチャが意味する雪崩運動現象との対比に関する知見が十分ではないことも、推定を難しくする理由の一つである。今後、無人航空機が普及し、多

様な雪崩現象の高解像度写真が蓄積すれば、地すべり地形分布図（大八木・他，2015）の例のように、写真判読を用いた雪崩発生メカニズムに関する調査が実行できる可能性がある。

#### 5.4. UAV-SfM の活用

UAV-SfM のメリットとして、低コスト、高解像度、面的な情報取得の3点が挙げられる。飛行にかかる費用はほぼゼロのため、高頻度のデータ取得が可能である。また、立ち入れない領域を含め数百メートル四方の範囲において、これまでにない高分解能によるデータを取得できる。今後、機体性能や機械的信頼性が向上し、SfM 解析処理が自動化されるなど、オルソ画像や DSM が容易に得られるようになれば、幅広い活用が期待される。例えば、地上基準点に相当する地物をあらかじめ設置しておき、冬季間中に定期的に飛行させれば、積雪量の推定のみならず、一回の降雪イベントの量や分布を面的に計測したり、様々な規模の雪崩の発生を感知したり、積雪表面に発達するクラックやクラストの状況を連続的に観測できる可能性がある。このような観測技術は、例えばスノーリゾートの運営者による敷地内の安全管理や滑走可否の判断の精度向上など、研究以外の用途にも活用可能であると考えられる。

#### 6. まとめ

UAV-SfM によりオルソ画像と積雪 DSM を作成し、雪崩シミュレーション用のデータを作成した。さらに、既存航空レーザ計測による地表 DEM との差分から積雪深を推定した。地表 DEM は笹の高さを含み、その影響を簡易に除去することは困難であった。高解像度オルソ画像は、アクセス困難地における細密な積雪表面の状態を捉えていたが、本災害の雪崩発生域や雪崩メカニズムの推定には至らなかった。しかし、今後の研究蓄積による雪崩現象の写真判読技術の発展が期待される。UAV-SfM は、雪崩災害対応や研究に限らず安全管理等にも活用可能であり、雪崩現象の理解の促進と雪崩災害の効果的な抑止に効果を期待できる。

#### 引用文献

- ・ 内閣府 (2017) 平成 29 年 3 月 27 日栃木県那須町の雪崩について (平成 29 年 3 月 29 日, 8 時 30 分現在), 2017 年 4 月 14 日閲覧, URL: [http://www.bousai.go.jp/updates/h290328nasunadare/pdf/h290328nasunadare\\_02.pdf](http://www.bousai.go.jp/updates/h290328nasunadare/pdf/h290328nasunadare_02.pdf)
- ・ 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.
- ・ 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, 35, 283-294.
- ・ 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.
- ・ 内山庄一郎・上石勲 (2014) 平成 26 年 2 月豪雪での山梨県早川町における SfM による雪崩発生状況解析, 寒地技術論文, 2014, 43-46.
- ・ D. Gauthier, M. Conlan, B. Jamieson (2014) Photogrammetry of fracture lines and avalanche terrain: potential applications to research and hazard mitigation projects, Proceedings, International Snow Science Workshop, 109-115, 2014.
- ・ 内山庄一郎・上石勲・井上公・鈴木比奈子・丸小有沙 (2014b) SfM による積雪環境の三次元モデリングと積雪深推定, 雪氷研究大会 (2014・八戸) 講演要旨集, 259.
- ・ Nolan, M., Larsen, C., and Sturm, M. (2015) Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry, The Cryosphere, 9, 1445-1463, <https://doi.org/10.5194/tc-9-1445-2015>.
- ・ 小花和宏之・河島克久・松元高峰・伊豫部勉・大前宏和 (2016) 小型 UAV を用いた積雪分布の 3 次元計測, 雪氷 78(5), 317-328.
- ・ 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計測業務 (ID: A89546C5D569DA66) .
- ・ 気象庁 (2017) アメダス那須高原観測データ.
- ・ 国立天文台 (2017) 暦計算室, URL: <http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>
- ・ 薄井宏 (1972) 植生, In 栃木県の動物と植物編纂委員会 (編), 栃木県の動物と植物, pp.7-28, 下野新聞社.
- ・ 菊地輝行・秦野輝儀・千田良道・西山哲 (2018) 三次元点群データを用いた急斜面の維持管理における変動解析, 日本地すべり学会誌, Vol. 55, No. 2, 65-71.
- ・ 大八木規夫・内山庄一郎・小倉理 (2015) 地すべり地形分布図第 60 集「関東中央部」. 防災科学技術研究所研究資料, 394. (注: 全 60 集の最終巻のみ示す)