

雪崩災害調査への UAV-SfM の適用：2017年那須町雪崩災害の事例

内山 庄一郎¹・鈴木 比奈子¹・上石 勲²・中村 一樹²

Applicability of the UAV-SfM survey to the 2017 Nasu avalanche disaster

Shoichiro UCHIYAMA¹, Hinako SUZUKI¹,
Isao KAMIISHI² and Kazuki NAKAMURA²

Abstract

On March 27, 2017, an avalanche occurred in Nasu Town, Tochigi Prefecture, killing eight people. The runout zone of the avalanche was estimated by the field investigation, but the track and the starting zone are not clear. In this research, we conducted surveys through UAV (Unmanned aerial vehicle) and SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-view Stereo) photogrammetry to acquire avalanche data six days after the disaster. Results included an orthomosaic photo and a snow DSM (Digital surface model) (resolution 2.95 cm, root mean squared error 3.08 cm). Snow depth was estimated using the snow DSM and a DTM (Digital terrain model) taken before the disaster. There was a site where the estimated snow depth was small at the most upstream of the gully where the avalanche flowed. The UAV photograph showed crack-like textures as a kind of morphological features called covered snow microform. This may indicate a part of the starting zone. However, there is also the possibility of morphological change due to weather after the disaster.

キーワード：UAV-SfM, 推定積雪深, 写真判読, 積雪表面形態, 2017年那須町雪崩災害

Key words: UAV-SfM, estimated snow depth, photo interpretation, covered snow microform, 2017 Nasu avalanche disaster

1. 背景及び研究目的

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

¹ 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

Integrated Research on Disaster Risk Reduction Division,
National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience

² 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

Snow and Ice Research Center, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience

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^{1,2)}。雪崩発生翌日以降に行われた複数回の現地調査により、雪崩の流下による積雪層構造の削剥や樹木の枝折れが確認され、さらにストック等の遺留品の分布から流下経路の一部と堆積区が推定された。また、地表面の露出がなく、多くの残雪が認められたことから、表層雪崩であると推定された³⁾。発生区については、流動シミュレーションによる推定が行われた⁴⁾。また、いずれの調査でも発生原因は明らかにされてない。本研究では、この雪崩を構成する発生区、走路、堆積区の範囲を明らかにすることを目的として、UAV (UAV: Unmanned aerial vehicle, 以降、UAV) 及び SfM 多視点ステレオ写真測量 (SfM-MVS: Structure from Motion and Multi-view Stereo Photogrammetry, 以降、SfM) を用いた調査を実施した。

2. 積雪の調査・観測手法

2.1 既存の調査・観測手法

積雪は、気温の変化や日射、強風などの気象条件により様相が刻々と変化するため⁵⁾、発生した雪崩の調査は可及的速やかに実施することが望ましい。これには、現場へ進入して実施する積雪断面観測のような直接的な方法、及びリモートセンシングのような遠隔観測による方法が挙げられる。直接的な調査は、得られるデータの信頼性は高いが、雪崩再発のリスクが大きい場合は実施が難しい。さらに、スポット的に得られたデータの適用可能な範囲ついて、明らかではない面がある。また、掘削は積雪構造を乱すため、長期的な変化の観察には向かない。地中探査レーダー (GPR: Ground penetrating radar) は現場で面的かつ非破壊のデータが得られるが^{6,7)}、雪崩再発リスクがある場合は同様に実施が難しい。これに対して、遠隔観測による手法は、アクセス困難な場所を含む広範囲のデータを、積雪構造を乱すことなく面的に取得できる。しかし、衛星や航空機を使用した調査はコストが大きく、分解能の低さや観測タイミングの不一致といった課題がある⁸⁾。地上

レーザ測量 (TLS: Terrestrial laser scanner) は危険区域から離れて計測が可能だが、システムが高価であり、また、植生や岩の背後、斜面の形状によっては計測できない領域が生じる。

2.2 UAV-SfM による調査手法

本研究では、UAV と SfM の二つの技術を組み合わせた調査手法⁹⁾ (以降、UAV-SfM) を適用することとした。UAV はリモートセンシングと同様のメリットに加え、低コストで運用できる¹⁰⁾。このため、繰り返しの観測が実施しやすい。一般的なデメリットの多くは、UAV の運航限界 (機体性能) に起因する。例えば、航続時間が短いため、観測対象範囲が狭い。また、風速10 m/s を超える強風時や、気温5度未満の低温環境、降雨や降雪、霧により機体が見えない場合には、安全に運航することが難しい。このほか、航空法等の関連法規の制約も受ける。

SfM は写真測量をベースにコンピュータビジョン分野で発展した、多視点画像から被写体の三次元形状を復元する技術である¹¹⁾。UAV で撮影した写真を SfM で解析することにより、高分解能の数値表層モデル (以降、DSM: Digital surface model) やオルソモザイク画像 (以降、オルソ画像) を得ることができる¹²⁾。積雪調査に用いた場合は、積雪表面形状の標高モデル (以降、積雪 DSM) が得られる。さらに、積雪のない数値地形モデル (以降、DTM: Digital terrain model) との差分から、積雪深の空間分布が推定される¹³⁻¹⁵⁾。

冬季の積雪調査で UAV-SfM を適用する場合、低温、強風といった気象条件による制約と、積雪表面の可視光反射特性が課題となる。低温は、UAV 航続時間の極端な低下をもたらす。強風は飛行そのものを不可能にする。また、積雪は可視光反射率が高いため、輝度のレンジが狭くピークが大きいスペクトル特性を持つ。さらに、積雪表面は凹凸が小さく陰影が少ないことも相まって、画像の全域でコントラストが小さくなりやすい。このような写真を用いた場合、SfM 解析では十分な数の画像特徴点を抽出することができず、それに続く三次元的な計測処理を行うこともできな

い¹⁶⁾。積雪調査における UAV-SfM の適用には、これらの課題について検討を要する。

2.3 研究手法のフレームワーク

本研究では、USV-SfM により積雪 DSM と高分解能オルソ画像を作成し、DTM を用いた積雪深の推定、及び UAV 写真判読を通して雪崩の範囲を明らかにする。積雪深の推定には、DTM として無積雪期に計測された航空レーザ測量データを使用する。雪崩の発生区では周囲より積雪深が薄く、堆積区では積雪深が厚くなる性質を根拠として、推定積雪深から雪崩の範囲の特定を試みる。次に、UAV 撮影写真の立体視及びオルソ画像の判読により、発生区に存在する破断面など、雪崩の運動により形成された特徴的な形態を抽出し、

雪崩構造との関連を検討する。

3. 対象地域の地形、地質、気象の概要

3.1 地形・地質の概要

災害現場は、茶臼岳 (標高1,915 m) の南東1.3 km に位置する溶岩流の斜面上にある。遷急線を境に、高標高域には緩傾斜の台地状斜面が広がる。遷急線上には通称、天狗岩 (標高1,515 m) と呼ばれる高さ約2.5 m の細長い岩があり、現場一帯から目視できる (Fig. 1)。この一帯は、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¹⁷⁾。溶岩流の周囲には平均傾斜が30度を超える急斜面が広がり、これは一般的な知見として、雪崩が発

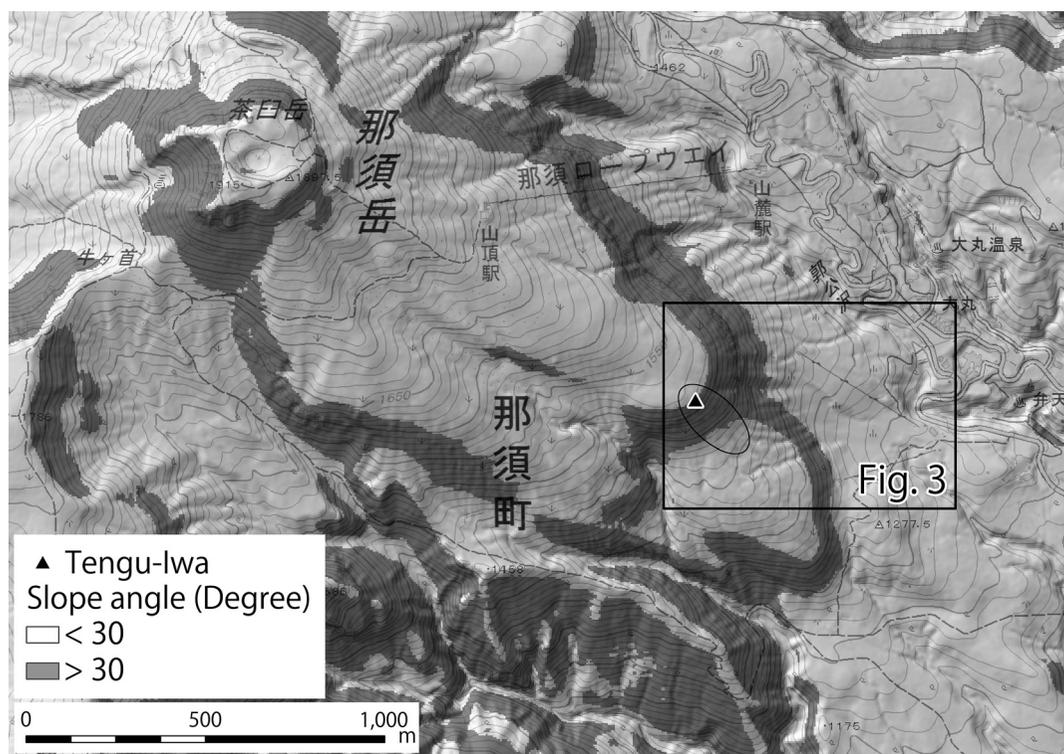


Fig. 1 Topographic map around Mt. Chauu

The black triangle is Tengu-Iwa. Surrounded by a black circle is the slope where the avalanche was thought to have occurred on March 27, 2017. The background is a topographic map (GSI Maps) with a translucent shading relief created by the digital elevation data (5 m grid) of the fundamental geospatial data¹⁸⁾.

生しやすい地形である。

3.2 気象状況

災害後から UAV 撮影までの気象変化把握のため、現場から約 5 km 東に位置する最寄りのアメダス観測点「那須高原」(設置標高749 m)¹⁹⁾において、災害3日前の2017年3月24日から4月3日までの降水量と気温、及び日照時間と積雪深のグラフを示した (Fig. 2)。融雪の可能性のある気温の境界として、気温減率0.65°C/100 mとした場合の標高1,500 mにおける気温0度のラインを破線で示した (Fig. 2a)。概観すると、3月27日の雪崩発生から4月2日の UAV 撮影までの間、3月28日から30日及び4月2日の4日間において日照があった。さらに、3月29日と30日及び4月2日の3日間では、現場付近の気温が0度を超えた。3月30日にはアメダス観測点における積雪量がゼロとなった。

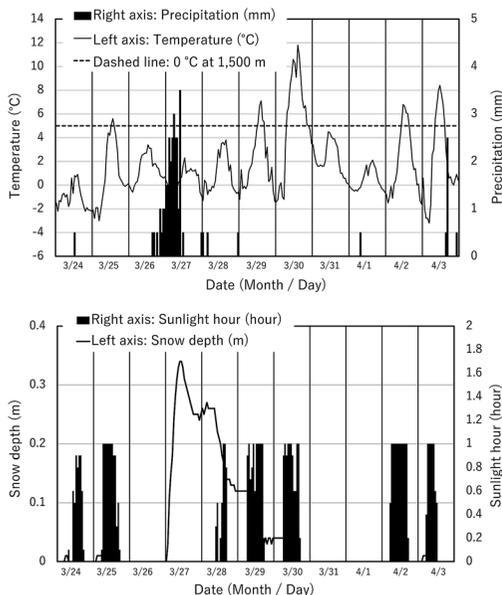


Fig. 2a (upper) Precipitation and temperature
 Fig. 2b (bottom) Sunlight hour and snow depth
 These observation items were obtained from the Nasu-kogen observation point of the Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS)¹⁹⁾. Observation period from March 24, 2017 to April 3, 2017.

4. 調査手法

4.1 地上基準点及び精度検証点の設置

UAV-SfM による計測対象範囲内に、地上基準点 (以降, GCP: Ground control point) と精度検証点 (以降, CP: Check point) を設置した。GCP は SfM で作成する三次元モデルのジオリファレンスに使用する地点であり, CP は、精度検証にのみ用いる。これらの地点には、道路の白線及び雪崩発生域の北西にある天狗岩周辺の露岩など, UAV の写真上で明瞭に判読可能な地点を利用した。ゲレンデの積雪面上には、1 m 角のターポリン製シートを対空標識として打設した。GCP 及び CP は GNSS (Global Navigation Satellite System) 測量により地理座標を計測した。機材は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、測位方式は VRS-RTK (Virtual reference station and real-time kinematic) を利用した。サイクルスリップ等の影響がなく、測位解の安定を確認する目的で、1 地点あたり10エポックの観測を3回行った。観測結果に異常値が確認されない場合、3回の平均値を観測地点の座標として使用した。

4.2 UAV による写真撮影

GCP 等の設置作業後に、UAV による垂直写真撮影を行った。UAV 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。

冬季の積雪調査における UAV-SfM 手法の課題には、次のように対応した。低温への対処は、黒い保温ケースにバッテリーを格納し、直射日光下で加温を行った。強風への対処は、あらかじめ風が弱い日を選定するとともに、機体の耐風性能と経験から飛行可能な風速条件を定めた。風速条件は、携帯型風速計 Kestrel 2000 による地表での2分間観測値において、平均と最大の風速の差が2 m/s 以内かつ瞬間最大風速8 m/s 以内とした。低コントラスト写真の改善策として、雪面の微細な凹凸の陰影が強く出る日照条件で撮影を行っ

た。加えて、撮影画像を RAW 形式で記録した。RAW 形式は RGB の各チャンネルで12~14 bit(4,096~16,384) の階調で記録され、JPEG 形式 (8bit, 256階調) に比して、情報量が多い。このため、画素の白飛びや黒つぶれが生じにくい¹⁶⁾。飛行の方法は、自律飛行により撮影を実施した。飛行制御ソフトウェアには Map Pilot for DJI を使用し、撮影写真の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、撮影される写真の地上分解能は3.3 cm/px (px: pixel, 画素) として計画した。

4.3 SfM 解析

UAV 撮影写真と GCP を使用して SfM 解析を行い、オルソ画像及び積雪 DSM を作成した。SfM ソフトウェアには Agisoft PhotoScan Professional Edition Version 1.2.6 build 2834 を使用した。SfM 解析で必要となる外部標定要素のうち、撮影位置の初期値には写真の EXIF に記録された GNSS 位置情報を使用した。カメラの姿勢情報は取得していないため、外部標定要素の初期値は未設定とした。内部標定要素には、本研究とは異なる取り組みで得たパラメータを使用した。その概略を以下に述べる。

SfM では解析ごとに外部及び内部標定要素の最適値を推定するため、写真数や GCP が少ない場合など、解析条件によっては十分な推定精度が得られない。精度の悪い推定値は、計測精度を低下させる要因となる。そこで、多数の GCP を設置した範囲を SfM で解析することにより、高精度に内部標定要素の推定を行った²⁰⁾。具体的には、120 m 四方に等間隔で43点の GCP を設置し、L1 帯 GNSS により 1 cm 精度の座標値を計測する。UAV により地上分解能 1 cm の垂直写真及び斜め写真を撮影し、これらを SfM で解析した。これによって得られた高精度な内部標定要素を固定パラメータとして使用した (Table 1)。なお、内部標定要素はレンズキャリブレーションパラメータであるため、カメラとレンズの個体及び撮影時の設定が同一であれば、撮影現場を問わず共用できる。

これに続く SfM 解析は、次の流れで実施した。

- 1 写真のアラインメント
- 2 手動タイポイント (写真間の共通地点) の設定
- 3 GCP 及び CP の座標入力
- 4 GCP を用いたジオリファレンス
- 5 DSM 及びオルソ画像の作成と出力
- 6 CP を用いた精度検証

精度検証は CP の座標を基準として、GCP と CP の地点を様々に入れ替えた複数パターンにおいて、CP の RMSE (Root Mean Squared Error: 平均二乗誤差) を比較した。RMSE は、SfM ソフトウェアに出力された値を使用した。

4.4 積雪深の推定

積雪深の推定に使用する DTM には、災害前に計測された航空レーザ測量データを使用した²¹⁾。UAV-SfM と航空レーザ測量データを重ねて使用する場合、水平及び垂直方向の系統的なズレの存在が知られている²²⁾。積雪深の推定の前に、この補正作業を行った。また、積雪 DSM のメッシュサイズを、地上分解能が低い DTM に合わせてリサンプリングした。推定積雪深は、積雪 DSM の各メッシュの標高値から、補正された DTM の対応するメッシュ値を減算して求めた (次式)。

$$\text{推定積雪深} = \text{積雪 DSM} - \text{DTM}$$

これは、ESRI ArcGIS Spatial Analyst の「ラスター演算」ツールにより行った。この後、精度検証として実測積雪深との比較を行った。

推定積雪深の判読を補助するデータとして、落水線及び2009年秋の植生範囲図を作成した。落水線は雪崩の流向や流路の目安として使用した。こ

Table 1 Fixed internal orientation parameter of the camera system mounted on the UAV.

f	4578.196040	b1	-11.800820
cx	38.748427	b2	1.815484
cy	-26.914177	p1	-0.000649
k1	-0.227553	p2	0.000145
k2	0.128918		
k3	-0.027081		

れは、ESRI ArcGIS Spatial Analyst の「累積流量ラスタの作成」ツールにより DTM から作成した。植生範囲図は、推定積雪深と植生範囲との関係を考察する目的で使用した。これは DTM と同時に取得された 1 m 分解能のオルソ画像から判読した。ただし、オルソ画像の分解能が低く、植生の種類を完全に区別できなかったため、ササ、立木及び樹林帯を含む範囲を示した。

4.5 UAV 写真及びオルソ画像の判読

雪崩跡を構成する発生区、走路、堆積区を明らかにするため、雪崩の外形、すなわち発生範囲と不動域の境界の判読を試みた。次に、雪崩の流下が推定される範囲の内外において、「その場で、または移動により、あるいは気象や外力による変化を受けて生じた、積雪が織り成す形態的特徴の小単位」に着目し、判読・図示した。本研究ではこれを積雪表面形態 (covered snow microform) と呼称する。各形態の形成プロセスに関して、既存の分類基準が見られないため、ここでは次の 3 点に着目した。

- 1) 既によく知られた積雪表面の形態。クラスト、スノーボールなど。
- 2) 積雪層の分離・剝削に関連しうる形態。クラックなど。
- 3) 積雪層の堆積・変形に関連しうる形態。落水線の歪みなど。

積雪表面形態という用語は以下の理由で使用した。雪は上空で生成されてから地表面に集積し消失する全過程において雪と呼ばれる。さらに、雪の形態では結晶形に関する研究分野があり、これらとの区別が必要であった。また、判読する形態の空間サイズは 10^{-1} ~ 10^1 m 程度の、いわゆる微地形スケール²³⁾に相当するが、積雪は地形ではない。このため、判読対象を意味する適当な用語が必要と考えたものである。

積雪表面形態の判読作業は、(株)フォテック製 Stereo Viewer pro を用いた UAV 撮影写真の立体視判読、及びオルソ画像単独の判読を組み合わせ実施し、判読結果をオルソ画像上に記入した。判読に使用する写真は明るすぎる積雪面が多いた

め、人間の目で読み取りやすくする目的で、明部と暗部の階調を中間階調に近づける処理を行った。この処理は Adobe Photoshop で行った。

5. 結果

5.1 GCP の設置と UAV による写真撮影

調査対象は人工物のない自然斜面だが、雪崩発生の可能性もあり、対象地内に対空標識を設置することができなかった。このため、対空標識の設置が可能なスキー場のゲレンデや、人工物が存在する駐車場等が含まれるように、計測対象範囲を南東に延長した。GCP と CP の配置は、対象範囲を広く囲み、その内側及び高標高域と低標高域を含むように地点を選定した。この結果、東西 800 m、南北 320 m、標高差 270 m の範囲について、5 地点の GCP と 6 地点の CP を設置し、GNSS 測量を行った。GCP と CP の設置予定地点のうち、残雪のため立ち入れない場所については、融雪後の 5 月下旬に GNSS 測量を行った。

UAV の空撮は、日射があり雲量が少なく風が弱い日を条件とし、撮影の 2 日前に実施日を決定した。当日の気温は 2 度、西の風で風速はほぼ一定、最大風速は 4.3 m/s であった。現地調査者からの情報を加味し、乱流や突風がないことから運航可能と判断した。撮影時間帯は、積雪表面の陰影が強く出る時間帯を選択した。調査対象が南東向きの急斜面のため、これに直交する方角からの日射と低角な太陽高度 (Table 2) が得られる 15 時頃から撮影を行う計画とした。

UAV 空撮の結果、265 枚の RAW 形式の垂直写真が撮影された。飛行制御ソフトウェアのバグにより、進行方向 72%、コース間 85% のオーバーラップ率で撮影されたが、オーバーラップ率は十分であり、SfM 解析上の問題はないと判断した。また、

Table 2 Solar elevation and azimuth at the time of UAV shooting (Data source: National Astronomical Observatory of Japan²⁴⁾).

Date	Time	Elevation (degree)	Azimuth (degree)
April 2, 2017	14:56	35.7	245.9
April 2, 2017	15:52	25.2	256.5

バッテリー温度は数時間の GCP 等の設置作業中に16度程度まで加温され、低温による飛行時間減少等の不具合は生じなかった。UAV による空撮は、2017年4月2日、19日(強風のため中止)、25日、5月30日に実施した。本研究では4月2日に撮影したデータのみを使用した。

5.2 SfM 解析

UAV 撮影写真と既存の内部標定要素を使用して、SfM 解析を行った。その際、撮影写真間の共通地点を明示的に指定するため、手動タイポイントとして20地点を設定した。その内訳は、GNSS 測量を行った GCP 及び CP として使用する計11地点と、座標値を持たない9地点である。11地点には GCP 及び CP の座標値を入力した。GCP の初期配置として、対象範囲の周縁部に近い5地点を選択した。タイポイント、GCP 及び CP の位置は後の Fig. 3に示す。このモデルにおける CP の RMSE は3.08 cm であった (Table 3)。十分な精度が得られたため、オルソ画像及び積雪 DSM として幅31,660 px、高さ21,391 px、地上分解能2.95 cm/px の GeoTIFF ファイルを出力した。

次に、モデルの精度検証を行った。GCP と CP の単純な順列組み合わせの総数が多いため、ここでは、初期配置の5地点の GCP から1地点ずつ、6地点ある CP と相互置換した計30パターンを対象とした。この結果、CP における RMSE の

最大値が4.01 cm、最小値が2.58 cm、平均値が3.39 cm、標準偏差は0.40となった (Table 4)。理想としては、SfM 解析の成果品となる DSM やオルソ画像は、精度検証で最良の結果を得たモデルから作成するべきだが、作業上は、精度改善の試行錯誤に長時間を要することから、研究目的の達成に齟齬のない精度のモデル (ここでは、初期モデル) が得られた時点で成果品を出力した。

5.3 積雪深の推定

積雪深の推定に使用する DTM には、災害の約7年半前、2009年10月末に計測された航空レーザ測量データを使用した²¹⁾。このデータセットには、1 m メッシュの DSM、DTM、オルソ画像、及びフットプリントデータが含まれていた。積雪深を

Table 3 Error and RMSE (Root mean squared error) on accuracy check points (CP). In the initial model (same as final model), five points were used as ground control point (GCP).

Error (cm)				
CP	X	Y	Z	Total
12	0.96	-0.08	0.49	1.08
dia	0.57	3.65	1.35	3.94
dia2	0.40	-0.38	0.03	0.56
g2	-1.01	-4.98	1.25	5.23
line-u	-0.32	2.31	0.75	2.45
p	-1.86	-1.77	-0.22	2.58
RMSE	1.00	2.79	0.84	3.08

Table 4 Variation of RMSE on accuracy check points.

Original GCP	to	Replaced CP	RMSE of 6 CPs (cm)	Original GCP	to	Replaced CP	RMSE of 6 CPs (cm)	Original GCP	to	Replaced CP	RMSE of 6 CPs (cm)
3	→	12	3.32	g3	→	12	3.08	josetu	→	12	3.74
		dia	3.33			dia	2.98			dia	4.01
		dia2	3.82			dia2	3.11			dia2	3.48
		g2	2.65			g2	2.81			g2	2.91
		line-u	3.88			line-u	2.98			line-u	3.91
		p	4.01			p	3.11			p	3.04
g1	→	12	3.55	g4n	→	12	3.55	RMSE (cm)			
		dia	3.66			dia	3.23	MAX	4.01		
		dia2	3.30			dia2	3.62	MIN	2.58		
		g2	2.58			g2	3.94	Average	3.39		
		line-u	3.60			line-u	3.17	SD	0.40		
		p	3.57			p	3.63	Initial model	3.08		

求める二時期の時間差が大きいため、災害前後のオルソ画像と陰影図を確認した。その結果、対象範囲内で大きな地形変化が認められないことから、無積雪期の地形モデルとして使用できるものと判断した。また、内挿補間された1 m DTMについて、内挿前の点密度を確認した。この作業は、積雪深を実測した地点 (Fig. 3, 白い四角形) を含む30 m 四方の範囲で実施した。この結果、地形面に反射した点は1,329点、点密度は1.48点/m²であった。二時期のデータ間の系統的なズレについては、Izumida et al. (2017)²²⁾と同様の手法で補正を行った。簡単にまとめると、災害前後の共通の建物外形の位置からズレ量を求める手法である。この結果、DTMを東に1.06 m、南に0.11 m 水平移動させた。垂直ズレ量は、DTMに0.133 m

を加算し補正した。研究開始当初の計画では、融雪後、植生の高さが回復する前に UAV 空撮を行い、これを DTM として使用する予定であった。しかし、圧雪下のササは、残雪が解消した場所から速やかに直立した。一部の谷底には露岩が見られたが、斜面上は人の背丈を超える高さでササが高密度に繁茂しており、地表面付近から空はほぼ見えない状況であった。このため、UAV 空撮による DTM の取得は断念した。

UAV-SfM により得た積雪 DSM を1 m メッシュにリサンプリングし、補正された DTM を減算することにより推定積雪深を得た (Fig. 3)。この結果、駐車場など積雪のない地点では、推定積雪深はゼロに近い値を示し、ゲレンデではほぼ一様の値を示した。積雪深を実測した地点を含む斜面上

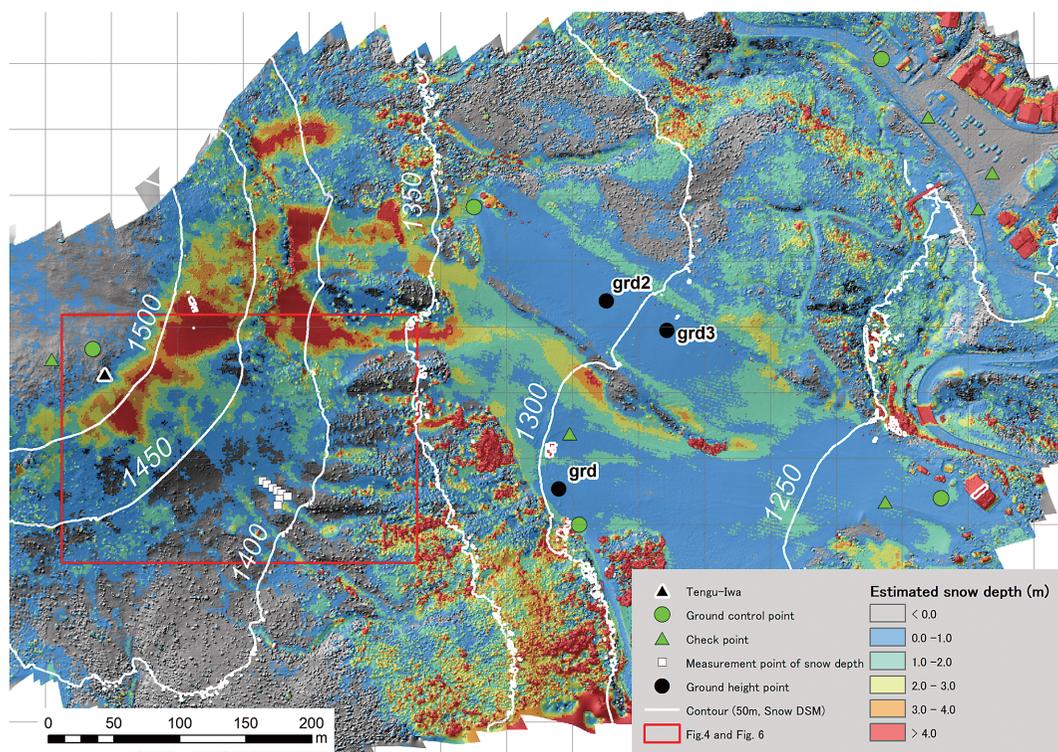


Fig. 3 Estimated snow depth (ESD) around the avalanche area.

An achromatic color with an ESD of 0.0 m or less. The background is a shaded relief created from snow DSM. The green circle is a ground control point. The green triangle is the accuracy check point. The white square is the actual measurement point of snow depth. The black circle is used to confirm ESD accuracy at the point where the ground surface is exposed. The white line is a contour (50 m intervals) of snow DSM. The red rectangle is the range of Fig. 4 and Fig. 6.

では、推定積雪深が0~1.0 mの低値を示す範囲が広がり、現実の積雪状況と相違があった。また、積雪 DSM は建物や植生の高さを含むため、標高1,390 m以下の樹林帯や単体の樹木、建物のある場所では推定積雪深が大きく示された。

次に、雪崩の走路上でゾンデ棒により8地点の積雪深を計測し、推定積雪深との比較を行った (Fig. 3, 白い四角形)。この結果、推定積雪深は平均で2.26 m小さく見積もられていた (Table 5)。続いて、積雪がゼロの地点において同様の検証を行った。これは、UAV 撮影日 (4月2日) のグレンデ上で植生が薄く、地表が露出していた3地点 (Fig. 3, 黒丸の地点) について実施した。これらの地点は斜面上にあるため、1 m メッシュが持ちうる標高には幅がある。そのため、メッシュが持ちうる標高幅と推定積雪深との較差に着目した。結果として、標高幅に収まった地点が1地点、そこから10 cm 前後逸脱した地点が2地点あった (Table 6)。

次に、雪崩が発生したと推定される範囲を拡大し、雪崩範囲の判読を行った (Fig. 4)。トレンチ

調査の位置、現地調査で確認された雪崩による枝折れの位置、被災者の遺留品等の発見位置、走路の下部から堆積区にかけての推定範囲を引用し³⁾、推定積雪深に重ねて示した。加えて、DTM から作成した落水線、及び災害前のオルソ画像から作成した2009年秋の植生範囲を図示した。背景図には積雪 DSM から作成した陰影図を用いた。

この結果をまとめると次のようになる。堆積区の推定範囲 (Fig. 4, 黄色破線) の南側の沢 (Fig. 4, 矢印1: トレンチ調査地点) には雪崩の流入は確認されていない²⁵⁾が、この沢と雪崩が流下した北側の沢とでは、落水線の系統が異なることが示された。また、DTM が取得された時点で、既に斜面の広い範囲が植生に覆われていた (Fig. 4, Vegetation area, Fall 2009) が、堆積区の推定範囲の最上流部では、植生がない範囲も確認された (Fig. 4, 矢印2)。Fig. 4の矢印3付近で谷筋がL字型に屈曲しており、この部分で最大3.4 mの推定積雪深の高まりがみられた。ここは、「周囲よりも積雪の量が多くなっており、救助活動が行われた地点」²⁵⁾とされ、現地調査結果と調和的で

Table 5 Difference (equivalent to error) between measured snow depth (MSD) and ESD.

Snow DSM elevation of measured point (m)	Measured snow depth (MSD) (m)	Estimated snow depth (ESD) (m)	Error (m) MSD-ESD
1405.0	2.00	-0.50	2.50
1406.4	2.15	0.48	1.67
1406.4	2.62	0.55	2.07
1406.8	2.75	-0.22	2.97
1408.4	2.75	0.27	2.48
1410.2	2.53	0.13	2.40
1412.7	3.05	0.84	2.21
1414.9	2.53	0.77	1.76
<i>Average:</i>			2.26
<i>Standard deviation:</i>			0.42

Table 6 ESD value, slope angle, and elevation range within a 1 m mesh at the ESD confirmation point.

Point	Estimated snow depth (ESD) (cm)	Slope angle (Degree)	Elevation range of values within a 1 m mesh (cm)	Error (cm)
grd	-1.7	18.5	± 16.8	within range
grd2	19.7	12.9	± 11.5	8.2
grd3	24.4	15.2	± 13.6	10.8

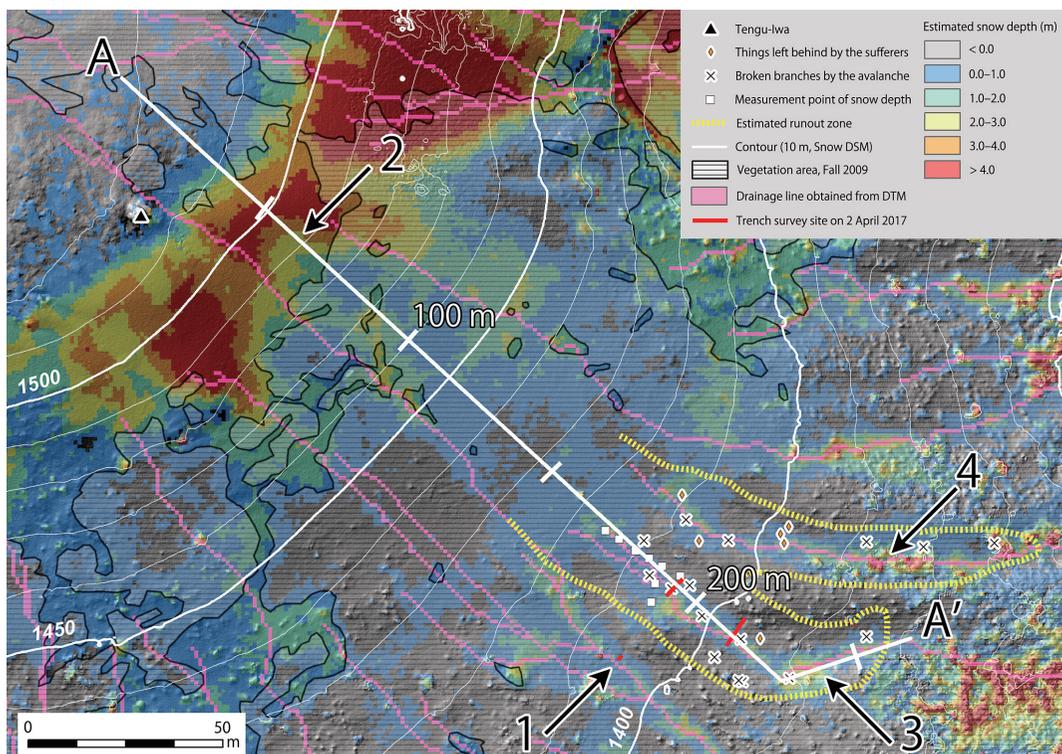


Fig. 4 Enlarged view of ESD around vicinity of the avalanche site.

The white A-A' line with 50 m scale is the survey line shown in Fig. 5. The yellow dotted line is the estimated runout zone, broken branches by the avalanche and things left behind by the sufferers were quoted from field survey report³⁾. The translucent with horizontal bar is a vegetation area in fall 2009. The pink line is a drainage line calculated from DTM. The arrow 1 indicates the trench survey site where inflow of avalanche was not confirmed³⁾. The arrow 2 indicates a range not affected by vegetation. The arrow 3 indicates the rescue activity site³⁾. The arrow 4 indicates the point where the estimated snow depth increased due to the influence of the standing trees.

あった。このさらに北側の谷筋では、標高1,385 m 付近にある複数本の樹木の影響により、推定積雪深が大きい値を示した (Fig. 4, 矢印4)。なお、枝折れ及び遺留品の位置はハンディー GPS ロガーにより測定され、10 m 程度の水平誤差を含む。また、引用した堆積区の推定範囲は、2.5 万分の1 地形図上に描画されていたものである。

次に、A-A' 測線 (水平距離265 m) における積雪 DSM と DTM の断面図、及び推定積雪深のプロットを示す (Fig. 5)。台地状の溶岩流のへりには遷急線がある (標高1,511 m)。その直下に積雪深の深い範囲があり、推定積雪深は最大で4.3 m を示した。そこから植生範囲に入る直前 (標高

1,482 m) にかけて、推定積雪深は1.8 m まで低下する。以降より低標高側の領域は、すべて植生範囲に含まれる。植生範囲に入ると、推定積雪深は一度0.2 m 程度まで低下し、その後は最大2.5 m 程度のスパイク状のピークを示しながら、1 m 程度の幅で上下し、低い値のまま推移した。標高1,390 m (水平距離225 m 地点) でL字型の屈曲地点に達し、そこから標高1,385 m (同243 m 地点) にかけて3.4 m のピークを持つ推定積雪深が大きい領域がみられた。ここは前述の救助活動地点²⁵⁾ である。

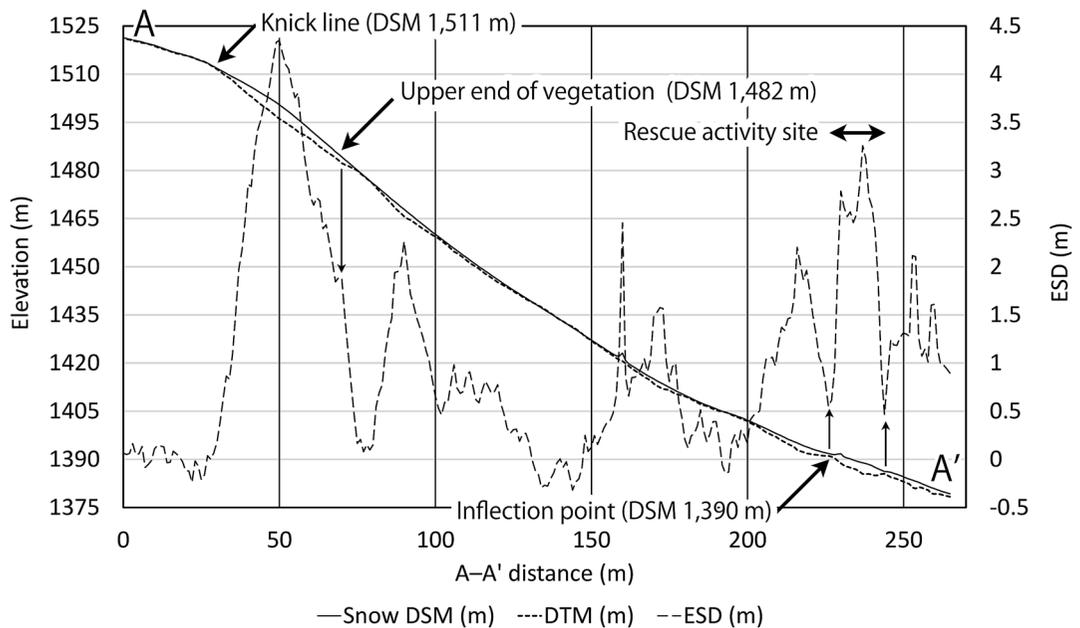


Fig. 5 A-A' Cross-sectional profile of snow DSM and DTM with ESD distribution. Left axis: Elevation of the snow DSM (solid line) and the DTM (short-dashed line). Right axis: The estimated snow depth is indicated by a gray long dashed line.

5.4 UAV 写真及びオルソ画像の判読

UAV 写真及びオルソ画像判読によって抽出された積雪表面形態をオルソ画像上に示す (Fig. 6)。なお、オルソ画像の範囲は Fig. 3 に示した。雪崩の外形については、発生区、走路、堆積区のいずれについても、これらと不動域との境界部について、その全部及び一部について判読することはできなかった。判読された積雪表面形態について、その形態的特徴を列挙する。a 及び b は現場の空間把握や状況説明のために示した。c、d 及び e は、雪崩斜面に限らず、一般的な雪斜面上に観察される。f、g、h 及び i は、雪崩が推定される範囲の内部及び隣接位置に観察された。

- a. 天狗岩：斜面の低い位置から見上げると、遷急線上に細長い岩が天狗の鼻のように突き出ている。ロケーションの目標物になる特徴的な岩である。
- b. トレンチ調査：UAV の撮影日と同時に実施された積雪断面観測調査のトレンチ。北側の沢にある二つのトレンチ (b1) では、いずれも雪崩

の流下痕跡が認められたが、南側の沢にあるトレンチ (b2) では認められなかった²⁵⁾。

- c. クラスト：鱗状に鏡のように明るく反射するテクスチャが確認された。図では典型的な場所を示しており、雪面上に広く観察された。風や日射といったクラストの形成要因は明らかではない。
- d. 筋状の条線：落水線方向に沿って整った配列を示す筋状の条線がみられた。矢印は典型的な場所を示しており、雪面上に広く観察された。
- e. スノーボール：雪面上に、明瞭な深い筋状の凹部があり、その下部には10~60 cm (3~20画素) のスノーボールが確認された。
- f. クラック状の条線 (直線的)：標高1,486 m 付近に、落水線方向を斜めに横切るクラック状の条線がみられた。
- g. クラック状の条線 (円弧形)：標高1,476 m 付近に、落水線方向に直行する円弧形のクラック状の条線がみられた。ただし、テクスチャは薄い。
- h. 蛇行する筋状の条線：落水線方向に沿って配列

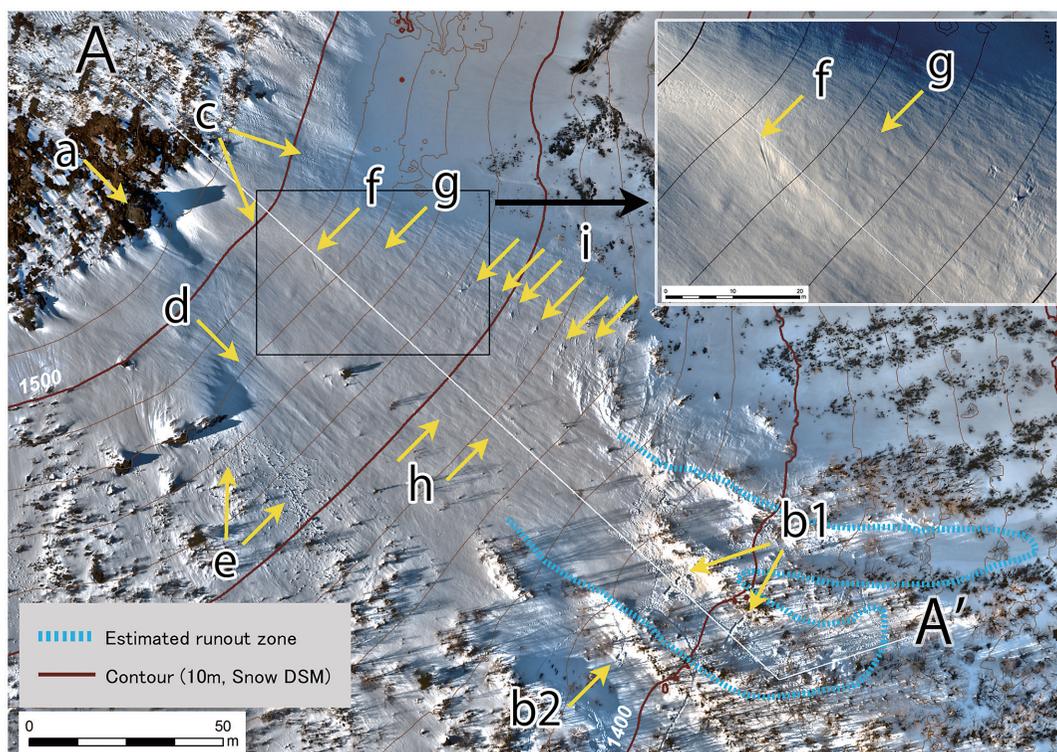


Fig. 6 “Covered snow microform” extracted by photo interpretation with UAV photographs.

a: Tengu-Iwa, b1 and b2: Traces of trench survey, c: Crust, d: Dimple line by water path, e: Snow ball, f: Linear streak line which appears to be a fracture line, g: Arc-shaped streak line which appears to be a fracture line, h: Dimple line (d) distorted to meander, i: Group of streak lines patterned like echelon cracks. To clearly show the shadow, a high dynamic range (HDR) image with contrast amplification is shown on Fig 6.

し、筋状の条線 (d) と同程度の深さだが、その条線が直線ではなく、蛇行していた。

- i. 雁行亀裂状の条線群：標高1,429 m ~1,457 m にかけて、標高約 5 m のほぼ等間隔で斜面を横切る方向に、明瞭な条線群が観察された。

6. 考察

本研究では、雪崩を構成する発生区、走路、堆積区の範囲を明らかにすることを目的として、UAV-SfM による調査を行った。そこから得られた推定積雪深及び積雪表面形態の判読結果から、雪崩範囲の推定を試みる。また、推定積雪深の正確さ、UAV-SfM の計測精度、積雪調査における UAV-SfM の活用について考察する。

6.1 雪崩範囲の推定

次に示す二つの理由により、今回得られた結果から、雪崩の主要な構造や不動域との境界を明瞭に示すことはできなかった。第一に、積雪深の推定結果では、実際の積雪状況と異なる値を示す範囲が広がっていた。このため、積雪深の空間分布から有意な情報を判読できる領域が限定された。第二に、UAV 写真判読の結果では、破断面や走路上の積雪層の乱れ、堆積区におけるデブリの盛り上がりといった明瞭な痕跡が認められなかった。これらに共通する背景には、雪崩発生時の雪質がサラサラの粒子状であった³⁾ため、雪崩後に形状を維持しにくい物理的性質であったこと、及び UAV 撮影までの6日間の気象によって、積雪表面形態が変化したことが指摘できる。しかしな

がら、限定的ではあるが研究目的に関連しうる知見も得られたため、これらについて整理する。

(1) 発生区の位置及び形状について

Fig. 4の矢印2で示した範囲は、DTM計測時に植生がなく地表面が露出していたため、推定積雪深が実際の積雪深を示している可能性がある。この付近は、北西よりの強風によって吹き溜まりやすいことが指摘され³⁾、急崖の遷急線付近は雪庇が発達しやすい地形である。遷急線直下の推定積雪深は全体として値が大きく、風下側への吹き溜まりやすさ及び雪庇が発達しやすい傾向を示していると考えられる。さらに、Fig. 4の矢印2の地点において、推定積雪深の空間分布が幅、奥行きともに約20 mの範囲で馬蹄形にえぐられたような箇所が存在する。この範囲の推定積雪深の断面図 (Fig. 5) を見ると、推定積雪深のピーク地点 (4.3 m) から植生範囲に入る地点 (同1.8 m) までの区間において、推定積雪深が2.5 m程度減少している。この推定積雪深の急減と今回の雪崩との直接的な関連を示す手がかりは得られていないが、上載荷重となった吹き溜まりの積雪が、他の地点よりも崩れやすいことは指摘できる。推定積雪深が周囲より相対的に小さい範囲の存在は、発生区の位置の検討において重要な着眼点の一つになると考えられる。

次に、発生区の形状について検討する。雪崩流下シミュレーション⁴⁾では、長径55 m、短径48 m、厚さ0.6 mの始動積雪が設定された。このシミュレーションでは、雪崩が流下していない南側の沢 (Fig. 4, 矢印1, 及び Fig. 6, b2) へも流入していることから、幅 (短径) の設定が大きすぎる可能性がある。南側の沢へ流入が生じない雪崩の幅の最大値を、推定堆積区の最大幅 (Fig. 4, 黄色破線) と仮定すると、約35 mとなる。さらに、この溶岩流斜面は末広がり形状のため、上流部ほど幅が狭まると考えられ、落水線 (Fig. 4, ピンク線) の配列にもその傾向がみられる。また、雪崩発生時、斜面上で被災した方の話によれば、斜面の下方から上方に向かって亀裂が伝播し、その後、雪崩が発生したという²⁶⁾。これらのことから、

発生区の範囲は、幅が狭く、細長い形状が推定される。

(2) 発生区に生じる破断面について

写真判読により、積雪表面形態としてクラック状の条線が二か所で抽出された (Fig. 6, f 及び g)。いずれも堆積区に雪崩が流入した沢の直上にあるが、推定積雪深が馬蹄形状を示した地点 (Fig. 4, 矢印2) より20 mほど標高が低い位置にあり、発生区の位置や範囲を直接的に示すものではない可能性がある。これは、先の証言にあった亀裂の伝播²⁶⁾の一部を示すものかもしれないが、その形成プロセスや雪崩との関連を明らかにすることはできていない。また、破断面を判読できた事例として、テレビ映像の明るさを調整することで破断面を読み取った事例²⁷⁾があるが、ここでは、階調を調整した写真を用いても、明瞭な破断面を判読することはできなかった。

(3) 堆積区及び雪崩構造に関する知見について

堆積区に関して、救助活動地点付近の推定積雪深が大きく示されており、この傾向は災害調査の速報²⁵⁾と調和的であった。また、現地調査では、谷底に地山が露出した地点が見られたため、そのような場所では航空レーザー測定の反射点が実際の地表面上で得られた可能性は高い。このような場所では、正確な推定積雪深を示す可能性はある。ただし、そうした地点において具体的な検証は行っておらず、また、そのような地点は調査地内でも限定的であり、不正確な推定積雪深との見分けは難しい。

雪崩の構造に関する知見に関して、積雪表面形態として、走路上で蛇行する筋状の条線 (Fig. 6, h), 及びその近傍には雁行亀裂状の条線群 (Fig. 6, i) が判読された。いずれも、雪崩が発生した斜面付近以外では確認されておらず、特徴的な積雪表面形態である。しかし、その形成プロセスや雪崩との関連を明らかにすることはできていない。

6.2 推定積雪深の正確さ

推定積雪深 (Fig. 3, Fig. 4) 及びその検証結果 (Table 5, Table 6) から、雪崩推定斜面を含む広い範囲で、現実の積雪状況と異なる推定積雪深が示された。この差異は、推定積雪深の計算に用いたデータの計測原理に起因する精度が原因とは考えにくい。別の要因の存在が示唆される。この要因について、積雪 DSM と DTM の精度、及び現地調査の結果から検討する。

積雪 DSM における CP の RMSE は 3.08 cm であり、センチメートル級の精度が確認された (Table 3)。DTM のソースデータの点密度は 1.48 点 /m² であり、数値標高モデル作成マニュアルの運用基準²⁸⁾ で定められた取得点密度 (0.91~0.67 点 /m²) よりも十分に高い。この点密度の場合、DTM の標高値の標準偏差は、0.3 m 以内とされている²⁹⁾。また、実測に基づく LIDAR の精度検証では、斜面の場合 0.4~0.6 m 程度の誤差で計測できることが示されている³⁰⁾。これらの点、及び積雪ゼロ地点における推定積雪深の確認結果 (Table 6) を踏まえると、DTM の標高計測精度が特異的に悪いとは考えにくい。

ここで、UAV-SfM による DTM の取得を中止した理由を再掲すると、斜面上に高密度なササがあり、融雪直後であっても地表面に近似した高さが得られなかったことである。この地域の植生図では、高さ 2 m 前後のチシマザサ等の分布域となっている³¹⁾。加えて、DTM 取得時のオルソ画像にも、ササ等の植生が広い範囲で確認された (Fig. 4)。これらのことから、DTM のソースとなった航空レーザ測量では、ササを透過して地表の高さを計測できておらず、広い範囲でササの高さを含んだ標高を計測した可能性が考えられる。

このような状況で正確な DTM を取得しようする場合、例えば植生の種類に応じたグラウンドデータの分類アルゴリズムを適用する方法³²⁾があるが、レーザが地表に到達していることが前提である。本研究で用意したデータセットでは、ササの上面で反射したレーザをグラウンドデータとしている可能性が高く、その場合、前提条件をクリアできない。UAV-LIDAR は、航空レーザ測量と

比して地表へのレーザ透過率に大きな差はないが、UAV の飛行対地高度が低いため、地表に反射する点数が多くなる³³⁾。また、TLS は横方向から計測を行うため、透過率及び地表到達点数ともに多い³³⁾。ただし、これらの計測コストは大きく、現時点で実施予定はない。

6.3 UAV-SfM の計測精度

推定積雪深を正確に求めるためには、UAV-SfM の計測精度を向上させることも重要である。災害後の速報段階では、GCP と CP を含む全 RMSE の平均値が 0.41 cm、標準偏差 4.46、最大値 9.5 cm、最小値 -7.7 cm であった³⁴⁾。この結果は、値のばらつきが大きく、さらに GCP と CP を区別していないため、モデル全体の精度を示しているとはいえない。これに対して、あらかじめ用意した高精度な内部評定要素を使用することにより、より高い計測精度を得た (Table 3)。現在普及している SfM 計測の実態は非測量用 (ノンメトリック) カメラを用いた写真測量である。さらに、普及型の UAV では、一般的に高精度な撮影姿勢及び撮影地点の計測機構を持たない。ゆえに、UAV-SfM の解析では、計測精度を左右する外部標定要素及び内部標定要素の全てのパラメータについて、ソフトウェアによる推定と最適化に頼っている。ここでは、高精度な内部標定要素定を用意し、SfM によるパラメータ推定の変動によるモデルの不確定性を減じた結果、計測精度の向上につながったものと考えられる。

6.4 積雪調査における UAV-SfM の活用

UAV 活用の発展には、飛行の安全確保が重要である³⁵⁾。運航においては、強風と低温、降雨・降雪・霧などの気象が制約条件となる。使用した機材の耐風性能は 10 m/s とされているが、それ以下であっても乱流や突風には弱いため、飛行中に耐風性能を超えない環境で運用する必要がある。低温障害は、バッテリーの加温により回避できた。飛行方法として、標高差が大きい山岳地で遠距離まで飛行させる場合は、SfM 解析に必要な写真オーバーラップを維持しながら、手動操縦で

撮影を行うことは困難であるため、自律飛行が必須である。これらの UAV の機械的特性を踏まえた運用が望まれる。積雪表面の陰影の有無は SfM 解析の成否に影響する¹⁶⁾。この対応策として、積雪表面に陰影が生じる時間帯での撮影と、RAW 形式の記録が有効であった。適切に撮影できた場合、非積雪環境と変わりなく SfM 解析が適用することができた。

雪崩の運動により積雪構造は変形を受け、高機動かつ高分解能な UAV 写真はその詳細な記録を可能にする。物性は異なるが、地すべりのような重力による斜面滑落運動では、空中写真判読による微地形判読が現象の理解を支える手法となっている³⁶⁾。同様の力学現象である雪崩の場合にも、運動様式に応じた積雪表面形態がもたらされる可能性が示唆される。雪崩の場合は、発生後の時間経過により積雪表面形態の変化が生じるため、速やかな撮影が必要であり、UAV はその点でも優位性が高い。また、積雪斜面に関する空中写真判読の有効性や分類の体系化の必要性は以前から指摘されている^{37,38)}。今後 UAV 調査による研究事例が蓄積し、地すべり地形の判読³⁹⁾のように、写真判読と現象との対応関係が体系的に示されれば、成因が不明な積雪表面形態のメカニズム的な意味が明らかになる可能性がある。延いては、この災害を引き起こした雪崩現象のより正確な理解と、有効な再発防止対策につながるものが期待される。

7. まとめ

2017年那須町雪崩災害において、雪崩を構成する発生区、走路、堆積区を明らかにするため UAV-SfM による調査を行った。これにより分解能 2.95 cm、RMSE 3.08 cm のオルソ画像と積雪 DSM を作成し、既存の航空レーザ計測による DTM との差分から積雪深を推定した。また、UAV 写真から積雪表面形態を判読した。

得られた結果から、雪崩の主要な構造や不動域との境界を明確に示すことはできなかった。しかし、限定的ながら研究目的に関連しうる知見を得た。第一に、発生区の位置及び形状について、推

定積雪深が周囲より馬蹄形に小さくなっている範囲の存在が示された。これは発生区的位置を検討するうえで重要な着眼点となる。第二に、発生区の範囲として、幅が狭く、細長い形状が推定された。第三に、雪崩が発生した斜面にのみ存在する特徴的な積雪表面形態が確認された。

調査手法に関して、使用した DTM は、ササが密生する領域においてその高さが含まれた標高を示していることが示唆された。UAV-SfM の計測精度に関して、高精度な内部評定要素を使用することにより、計測精度が向上した。積雪調査における UAV-SfM の活用に関して、UAV と気象の特性把握による安全確保の重要性を指摘した。SfM 計測については、積雪表面に陰影が生じる時間帯での撮影と、RAW 形式の記録により、非積雪環境と変わりなく SfM 解析が適用できることを示した。

本研究では、UAV-SfM による雪崩調査を通して、その課題と活用可能性を示した。こうした手法が確立されれば、雪崩調査のエビデンス取得に有用なツールとなるだろう。さらなる研究蓄積を通して、雪崩現象の理解の促進と雪崩災害の効果的な抑止への貢献に向けて努力したい。

献辞

この小論を閉じるにあたり、雪崩災害により亡くなられた 8 名の方々のご冥福を心より祈り申し上げます。この小論をこれらの方々へ謹んで献呈いたします。

謝辞

3名の匿名の査読者には、多数の重要なご指摘をいただき、論文の質が向上した。大八木規夫博士には、実際に空中写真判読を行っていただき、有意義なご助言をいただいた。本研究は、日本学術振興会特別研究促進費 (17K18453)、及び日本学術振興会科研費 (17H02031) の助成を受けた。また、株式会社地圏総合コンサルタントの受託研究「無人航空機によるマルチスペクトルセンサーの利活用に関する基礎研究」による成果を含む。ここに記して感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣府, 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), http://www.bousai.go.jp/updates/h290328nasunadare/pdf/h290328nasunadare_02.pdf, 2018年3月21日.
- 2) 那須雪崩事故検証委員会:平成29年3月27日那須雪崩事故検証委員会報告書, pp.13-17, 2017.
- 3) 中村一樹・上石 勲・根本征樹・小杉健二・山口 悟・伊藤陽一・平島寛行・本吉弘岐・佐藤研吾・安達 聖・阿部 修・内山庄一郎・鈴木比奈子・飯田 肇・西村浩一・河島克久・松元高峰・渡部 俊・伊豫部 勉・阿部幹雄・阿部直樹・竹内由香里・勝島隆史・近藤伸也: 那須雪崩災害の現地調査, 2017年3月27日に栃木県那須町で発生した雪崩災害に関する調査研究平成29年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp.1-20, 2018.
- 4) 伊藤陽一・森口周二・小田憲一・西村浩一: 那須雪崩の流下状況推定を目的とした流動シミュレーション, 2017年3月27日に栃木県那須町で発生した雪崩災害に関する調査研究平成29年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp.76-83, 2018.
- 5) 雪氷災害調査チーム&雪崩事故防止研究会: 雪崩教本, 山と溪谷社, pp.25-35, 2017.
- 6) Arne Instanes, Ida Lønne, Knut Sandaker: Location of avalanche victims with ground-penetrating radar, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 38, Issue 1, pp.55-61, 2014. DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.08.002
- 7) Takayuki Nakano, Hideo Sakai: Application of ground-penetrating radar and high-density electrical sounding for the study of seasonally frozen ground, *Bulletin of Glaciological Research*, 25, pp.27-35, 2008.
- 8) Markus Eckerstorfer, Yves Bühler, Regula Frauenfelder, Eirik Malnes: Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential, and limitations, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 121, pp.126-140, 2016. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.11.001
- 9) 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子: 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, pp.37-60, 2014.
- 10) 小花和宏之・早川裕式・ゴメスクリストファー: 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*, Vol. 35, No. 3, pp.283-294, 2014.
- 11) 満上育久: 私の研究開発ツール Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections, *映像情報メディア学会誌*, 53, pp.479-482, 2011.
- 12) 早川裕式・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎: SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用, *地形*, Vol. 37, No. 3, pp.321-343, 2016.
- 13) 内山庄一郎・上石 勲: 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*, Vol. 30, pp.43-46, 2014.
- 14) Nolan, M., Larsen, C., and Sturm, M.: Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry, *The Cryosphere*, Vol. 9, pp.1445-1463, 2015. DOI: 10.5194/tc-9-1445-2015
- 15) 小花和宏之・河島克久・松元高峰・伊豫部勉・大前宏和: 小型 UAV を用いた積雪分布の3次元計測, *雪氷*, Vol. 78, No. 5, pp.317-328, 2016.
- 16) 内山庄一郎・上石 勲・井上 公・鈴木比奈子・丸小有沙: 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, 259p., 2014.
- 17) 貝塚爽平・遠藤邦彦・鈴木毅彦・小池一之・山崎晴雄: 日本の地形(4)関東・伊豆小笠原(第四版), 東京大学出版会, pp.49-53, 2014.
- 18) 国土地理院, 基盤地図情報数値地図5 m メッシュ, <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>, 2018年3月21日.
- 19) 気象庁, 過去の気象データ・ダウンロード, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php#>, 2018年3月21日.
- 20) 内山庄一郎・早川裕式: ノンメトリックカメラを用いる SfM 写真測量の課題と対応., 第9回 GIS-Landslide 研究会集會ワークショップ, pp.1-20, 2018.
- 21) 国土交通省関東地方整備局: 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) .
- 22) Atsuto Izumida, Shoichiro Uchiyama, Toshihiko Sugai: Application of UAV-SfM photogrammetry and aerial lidar to a disastrous flood: repeated topographic measurement of a

- newly formed crevasse splay of the Kinu River, central Japan, Natural Hazards Earth System Sciences, 17, 1505–1519, 2017. DOI: 10.5194/nhess-17-1505-2017
- 23) 藤本 潔・宮城豊彦・西城 潔・竹内裕希子：微地形学, はじめに, 2016.
- 24) 国立天文台, 暦計算室, <http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/>, 2018年3月21日.
- 25) 山口 悟・根本征樹・佐藤研吾・伊藤陽一・中村一樹・内山庄一郎：災害調査 那須町雪崩災害第2回調査(速報)(2017.4.2実施), pp.1-6, 2017. http://www.bosai.go.jp/saigai/2017/pdf/20170410_01.pdf, 2018年3月21日.
- 26) HTB ニュース: MIKIO ジャーナル那須雪崩事故から1年, <https://www.youtube.com/watch?v=u27hjz4i8LQ&feature=youtu.be>, 2018年6月26日.
- 27) 阿部 修・小杉健二・佐藤 威・佐藤篤司：2000年12月26日山形県立川町で発生した雪崩災害の調査報告, 雪氷, Vol. 69, No. 1, pp.71-77, 2007.
- 28) 国土交通省国土地理院：航空レーザ測量による数値標高モデル(DEM)作成マニュアル(案), 国土地理院技術資料, A1-No.310, 2005.
- 29) 国土交通省：作業既定の準則(平成28年一部改正), 2016
- 30) 佐藤 浩・関口辰夫・織茂 郁・中島 保：現地測量の成果を用いた航空レーザ測量DTMの高さ方向の精度検証, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 43, No. 4, pp.13-21, 2004.
- 31) 薄井 宏：栃木県の動物と植物, 植生(栃木県の動物と植物編集委員会編), 下野新聞社, pp.7-28, 1972.
- 32) George T. Raber, John R. Jensen, Steven R. Schlll, Karen Schuckman: Creation of Digital Terrain Models Using an Adaptive Lidar Vegetation Point Removal Process, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(12), pp.1307-1315, 2002.
- 33) 菊地輝行・秦野輝儀・千田良道・西山 哲：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, pp.65-71, 2018.
- 34) 内山庄一郎・鈴木比奈子・中村一樹・上石 勲：無人航空機と SfM 写真測量による2017年3月27日栃木県那須町の雪崩災害調査, 雪氷研究大会(2017・十日町)講演要旨集, 74p., 2017.
- 35) 内山庄一郎：必携ドローン活用ガイドー安全かつ効果的な活用を目指してー, 東京法令出版, 2018.
- 36) 八木浩司・檜垣大助・(社)日本地すべり学会平成14年度第三系分布域の地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員会：空中写真判読とAHP法を用いた地すべり地形再活動危険度評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 5, pp.358-366, 2008.
- 37) 荘田幹夫：航空写真による雪崩の研究, 写真測量, Vol. 2, No. 3, pp.111-117, 1963.
- 38) 大場鍬次郎：なだれ診断に対する航空写真の利用性について, 雪氷, Vol. 26m No. 1, pp.22-24, 1964.
- 39) 大八木規夫：地すべり地形の判読法〔増補版〕ー空中写真をどう読み解くかー, 近未来社, 2018.

(投稿受理：平成30年4月6日
訂正稿受理：平成30年7月4日)

要 旨

2017年3月27日, 栃木県那須町において雪崩が発生し, 8名の人的被害が生じた。現地調査により雪崩の堆積区が推定されたが, 走路及び発生区は明らかではない。これらを明らかにするため, 災害の6日後に UAV と SfM-MVS 写真測量による調査を実施した。これにより, オルソモザイク画像と積雪 DSM, さらに積雪 DSM と災害前の DTM から推定積雪深を得た。この結果から, 雪崩が流入した沢の最上流部には, 推定積雪深が周囲より小さい領域が認められ, 発生区との関連が示唆された。また, 発生区の範囲として, 幅が狭く細長い形状が推定された。さらに, UAV 写真から判読した積雪表面形態のうち, クラック状のテクスチャは, 発生区の一部を示している可能性がある。

