

流下・堆積区間の雪面地形と雪崩の到達範囲に関する観測調査

研究予算：運営費交付金

研究期間：令和5～令和7

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：藤平大、吉柳岳志、高原晃宙、
榊直人

【要旨】

本研究では、積雪地形変化がその後発生する雪崩の堆積範囲に及ぼす影響を明らかにするための基礎的な知見を得ることを目的とした。雪崩頻発箇所の新潟県糸魚川市柵口地区を調査対象場所とし、UAVによる高頻度の地形計測・雪崩動態観測・雪質調査を実施し、雪崩諸元や雪面の様子等を整理した。雪崩による堆積が繰返し生じる場所では、雪面の平坦化により、同一場所で発生した雪崩でもより遠くまで流下する可能性が定量的に示唆された。

キーワード：UAV、雪崩動態観測、雪崩堆積区、雪崩

1. はじめに

新潟県糸魚川市柵口地区（以下柵口地区とする）において2022年2月に連続して発生した雪崩では、1回目の雪崩の流下堆積により雪面の形状が変化し、流下方向、堆積範囲が変化している可能性が現地計測と調査の結果、明らかとなった¹⁾。雪崩が同一箇所を繰返し発生することによって、雪面が滑らかとなりより遠くまで達する可能性もこれまでに指摘されている。

雪崩発生後や豪雪発生時の危険区域の推定について当面はその時点の雪面に対応した雪崩堆積範囲の推定結果に基づいて行わざるを得ないが、冬季の積雪期間全体にわたる対応を考え、現地の冬期を通じての雪面の変化等も考慮した避難等の対応の検討も求められる。

近年 UAV の台頭により、雪崩前後の雪面地形等雪崩に関するデータに関して容易にかつ高頻度に取得する事が可能となっている。以上を踏まえ本研究の目的を、雪崩動態観測や高頻度の UAV による地形計測等を通じて、積雪地形の変化がその後発生する雪崩の堆積範囲に及ぼす影響を明らかにするための基礎的な知見を得ることとした。調査場所は、雪崩が頻発しデータ取得に適する柵口地区とした。

2. 研究方法

柵口地区では、雪崩流下箇所の近傍の山麓観測点およびそこから離れた集落付近の集落局舎観測点で気象観測を行っている（図-1）。積雪期間の積雪や気温変化等のデータから雪質などを推定する基礎データを継続的に記録し、発生区に向けたカメラによる映像記録と

地震計の設置により発生検知を行っている。こうした観測から年に複数回の雪崩が発生することが確認されており本研究の観測フィールドとして適している。繰返し雪崩が堆積する堆積区を適切に観測および解析するために、下記の項目を実施した。

2.1 新潟県糸魚川市能生柵口における雪崩堆積区の観測体制整備

流下区間での雪崩発生前後の雪面状況の確認を行うため、流下区間側方に位置する雪崩誘導工へ、これまで設置していなかった近接撮影用の動画カメラを設置

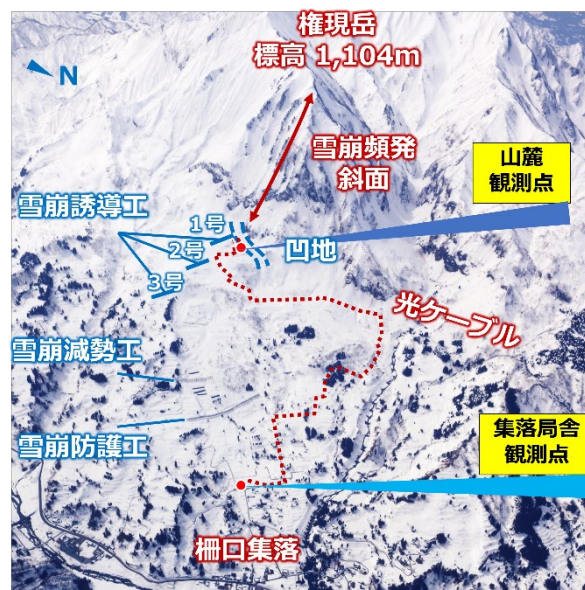


図-1 柵口地区での観測施設、対象雪崩斜面、および雪崩対策施設の位置関係

し、流下前後の雪面状況および流下状況を記録した。雪崩誘導工の位置については、図-1 に記載のとおり。

2.2 雪崩発生前後の積雪地形調査および雪崩動態解析

本項については、下記のとおり実施した。2.2.1 では、定期的な UAV による積雪地形の調査を実施した。2.2.2 では、図-1 による観測システムから雪崩発生を確認した場合に、雪崩の発生箇所や到達範囲を抽出した。2.2.3 では、さらにこれらの抽出した雪崩の数事例に対して動画カメラを解析して速度などの動態解析を実施した。2.2.4 では、図-1 に記載の山麓観測所における気象観測装置を用いた乾湿等の雪崩表面の雪質解析についても別途実施した。加えて、1 事例のみであるが柵口地区の集落付近の安全な箇所でも積雪断面観測を実施し、雪崩発生後の雪密度について推定した。以上の方法で、観測した雪崩につき動態解析を行い、諸元を整理した。

2.2.1 雪崩発生前後の積雪地形調査方法

流下区間の雪崩発生前や発生後の雪面地形を把握することを目的として、1 冬期あたり、10 回程度柵口地区にて連続垂直写真撮影を行った。概ね 1 月中旬から 3 月下旬にかけて週 1 回程度撮影する事を目安とした。撮影範囲は雪崩が頻発する斜面から 1 号誘導工までをカバーする範囲とした。撮影範囲の 3 次元モデルについても同時に作成を行い、データを蓄積した。

2.2.2 差分解析による雪崩の抽出方法

図-1 における雪崩観測体制で見つけた雪崩に対して、およその発生場所を動画カメラで見積った。2.2.1 で作成する 3 次元モデルのうち、その雪崩の発生前と発生後における 3 次元モデルの差分をとった。差分が周囲よりも大きい箇所が発生箇所と推定できるため、その箇所を特定し、雪崩発生区とした。

雪崩到達範囲の場合、その範囲が 2.1 で新たに増設したカメラ撮影体系の画角上明確に写っていない場合も多く、そういった場合には 2.2.1 で作成した雪崩後のオルソ画像のデブリ堆積が確認される箇所を推定範囲として見積った。発生区の場合と同様、その推定範囲のうち差分が大きい箇所として特定が可能であり、雪崩到達範囲を抽出した。

また、雪崩の発生量については、発生前と発生後の 3 次元モデルの差分をとれば推定可能であり、全層雪崩の場合には、無積雪期の DEM データ²⁾と、発生前の 3 次元モデルとの差分をとっても求まる。堆積量については、到達範囲が分かれば、その範囲における雪崩発生前と発生後の差分をとれば見積が可能である。

2.2.3 動画カメラによる雪崩動態解析方法

2.2.2 で抽出した雪崩のうち、動画カメラの映像が鮮明に記録されている場合に限り、何事例かについて動画解析による雪崩動態解析をさらに実施した。

本解析では、下記の手順にしたがって雪崩映像の判読を実施した。

- ① 2.2.1 によって取得した雪崩発生前の雪面に対応した DSM データにおいて、動画カメラのデータから雪崩の先端部（以下「フロント」とする）を読み取り、QGIS 上で描画した。この時、動画カメラの画角と同一となるように調整した。さらに、これら DSM データと雪崩フロント部を QGIS 等を用いて 3 次元表示した。
- ② ①で表示された結果と動画カメラを比較し、位置について細かな調整を行った。この作業を、3 秒ごとのコマごとに実施した。

上記により判読したフロント位置から、まずフロントの先端部の座標を取得した。先端部の座標をトレースし、雪崩が流下した全体の斜距離、水平投影距離が算出された。また、動画カメラのコマ間に移動した斜距離、水平投影距離、平均速度、移動を行った区間の勾配を算出する。距離や面積に関する諸元は、動画カメラから判読できた位置までの情報に基づき算出した。さらにフロント先端部を結んだ線と垂直に交わる線のうち、各コマにおける判読した雪崩フロントの両端と交点を持つ線を考え、その長さが最大となるものを各コマにおける雪崩幅と定義した。また、雪崩幅での横断形状につき、谷角度を定義し、諸元として整理した。谷角度は、横断地形の両端から、最も標高の低い谷へ線を引き、それぞれの線分同士でなす角度とした。

2.2.4 山麓観測点および積雪断面観測による雪崩表面の雪質等判定方法

集落局舎観測の動画カメラに映った雪崩の運動の様子、山麓観測点における気象観測結果および集落局舎観測点付近の安全な場所における積雪断面観測調査により、雪質や密度等の情報についても整理を行った。動画カメラに映った雪崩の運動形態が雪煙を伴わない「流れ型」ないし、伴っていても小規模であれば湿雪、上記以外の雪煙を伴う「煙型」であれば乾雪とした。また、適宜山麓観測点の気温も判別材料として用いた。

誘導工周辺までは危険が伴うことから、図-1 の集落局舎観測点近傍で積雪断面観測を実施した。積雪断面観測を行い、密度について結果を抜き出し、雪崩諸元に追加した。積雪断面観測を実施できたのは 1 回のみで、2024 年 2 月 21 日に実施した。

3. 研究結果

3.1 新潟県糸魚川市能生柵口における雪崩堆積区の観測体制整備結果

これまで山麓観測点では、インターバルカメラの設置のみであったが、2023 年 11 月に雪崩堆積区をより高い時間分解能で観測する事を目的として、1 号誘導工側方に動画カメラを 3 台新たに設置した。観測年によって若干撮影方向は変えているが、誘導工前面における堆積状況については毎年継続して撮影した。

3.2 雪崩発生前後の積雪地形調査および雪崩動態解析の結果

3.2.1 UAV による高頻度の連続積雪地形撮影結果

流下区間の雪面地形推移を把握し、かつ雪崩発生前後の地形データ得るために、柵口地区権現岳の東側斜面に対して高頻度で撮影を行った。具体的撮影回数は次のとおりである。2023/24 冬期：13 回、2024/25 冬期：10 回、2025/26 冬期：10 回の計 35 回実施した。

3.2.2 差解析による雪崩の抽出結果

2.2.2 で述べた方法で雪崩の発生範囲を抽出した例として、2024 年 2 月 19 日に発生したものを図-2 に示す。周囲の差分量より抽出された箇所は大きいことがよく分かる。到達範囲についても同様に、適切に抽出できたことを確認している。

各冬期で抽出した雪崩の数は、次のようになった。2023/24 冬期：4 回、2024/25 冬期：5 回であった。これらの雪崩についても、発生区および到達範囲ともに抽出可能であった。これらのうち、3.2.3 および 3.2.4 で述べるように、追加の解析を実施した（3.2.3 では 3 事例、3.2.4 では 1 事例）。

3.2.3 動画カメラによる雪崩動態解析結果

2.2.3 で述べたように、観測した雪崩の中で動画カメラの映像が鮮明なものにつき数事例選定し、雪崩諸元を算出した。解析対象としたものは次のとおりである。2023/24 冬期：1 回、2024/25 冬期：2 回とした。これらのうち、2023/24 冬期に生じた 2024 年 2 月 19 日のものについて解析結果例を図-3 および表-1 に示す。他の 2024/25 冬期における雪崩についても同様に表にまとめて諸元を整理した。

3.2.4 雪崩の雪質等判定結果

3.2.2 で抽出された雪崩について、2.2.4 で定めた方法に従うと、「流れ型」であったため、湿雪であった蓋然性が高いと推測された。また、2024 年 2 月 21 日に集落付近で積雪断面観測を行い、全層密度として約 470kg/m^3 を得たため、3.2.2 で発生した雪崩後の密度につき、 470kg/m^3 と推定された。

4. 雪崩到達距離に影響を及ぼす流下区間の地形の特性に関する分析

これまでの結果より、柵口地区における雪崩到達距離に影響を及ぼす流下区間の地形の特性に関する分析を行った。つまり、雪崩が同一箇所を繰り返し発生することによって、雪面が滑らかとなりより遠くまで達する可能性について提案した。1 冬期の間にほぼ同一箇所から雪崩が発生した例について解析を行うことが理想であると考えられる。そういったケースにつき、

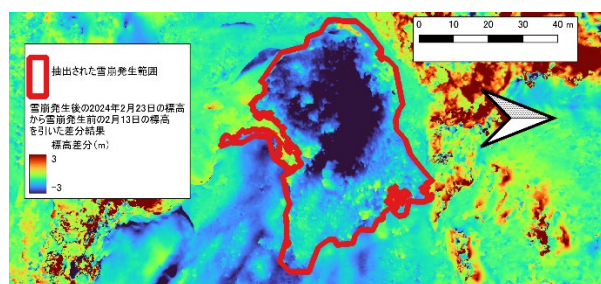


図-2 2024 年 2 月 19 日に発生した雪崩をその発生前後に撮影した UAV 撮影結果の差分から抽出した例

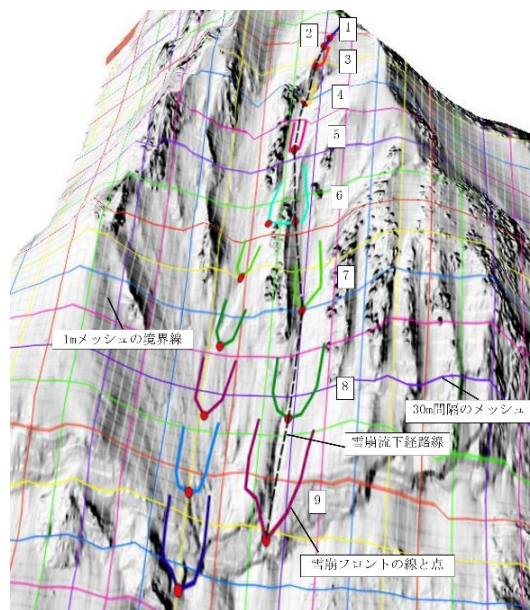


図-3 2024 年 2 月 19 日に発生した雪崩の映像判読結果による雪崩のフロントの時間変化

表-1 2024 年 2 月 19 日に発生した雪崩の映像判読結果による雪崩諸元の整理

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
雪崩記録時刻	15:54:42	15:54:45	15:54:48	15:54:51	15:54:54	15:54:57	15:55:00	15:55:03	15:55:06
1) 発生及び最終読み取り時刻	発生								最終
2) 発生位置 : X:37° 01' 48" Y:138° 02' 59" Z:1026m	発生位置 : X:37° 01' 47" Y:138° 03' 02" Z:621m ※X, Yは緯度経度で示してある								
3) 見通し角	66.38°								
4) 流下距離	569.3m								
5) 区間流下距離 (m)	12.8	29.7	62.2	54.9	76.7	106.2	107.0	119.9	
6) 流下速度 (m/s)	4.3	9.9	20.7	18.3	25.6	35.4	35.7	40.0	
7) 流下方位 (方位角)	120.9	108.8	104.8	97.3	82.6	75.1	93.5	98.1	
8) 雪崩の幅	1.7	2.9	8.3	6.7	11.9	26.5	24.6	44.0	53.7
9) 流下範囲面積	11130.2m ²								
10) 区間勾配 (°)	34.9	39.1	56.3	37.3	41.4	47.9	44.0	48.3	
11) 全角度 (°)	154.2	152.7	149.3	176.7	147.0	129.5	140.0	148.2	149.5
12) 屈曲角 (°)	—	167.9	176.0	172.5	165.3	175.5	195.4	184.6	—

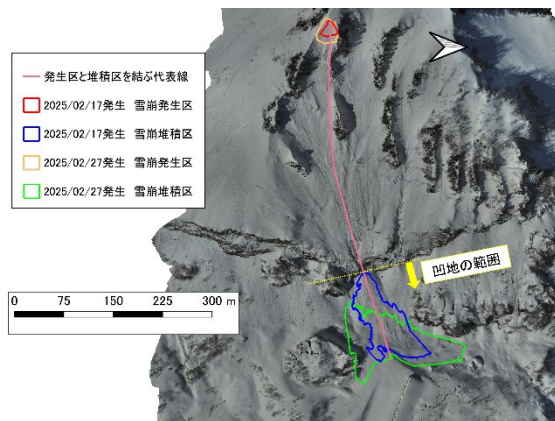


図-4 2025年2月17日および同27日に発生した雪崩の発生区、堆積区および経路（背景は2025年2月12日にUAV撮影したオルソ画像）

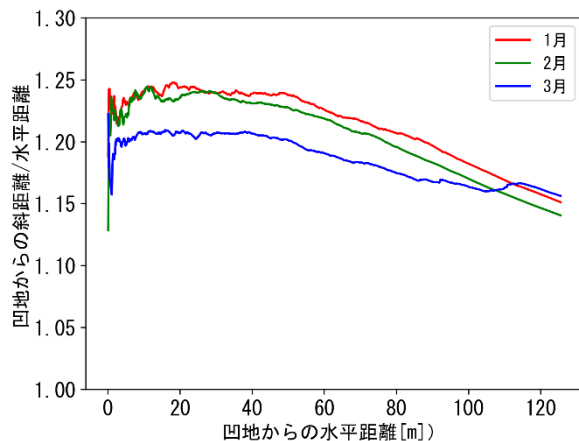


図-5 2025年2月17日および同27日に発生した雪崩の発生区と堆積区を結ぶ代表線のうち凹地以降からの水平距離と斜距離と水平距離の比（2025年1月・2月・3月ごとの月平均で表示）

1 ケース（2025年2月17日および同27日に発生した雪崩の組）観測したため、考察を行った。

2025年2月17日に発生した雪崩について、その発生直前にUAVで撮影した際のオルソ写真およびその発生区と堆積区を図-4に示す。2月27日に発生した雪崩の発生区と堆積区についても示している。27日に発生した雪崩の方がより遠くまで到達していることがわかる。また、図-4には、発生区上端から堆積区を結ぶ代表線についても図示している。雪崩による雪面の平坦化を解析するために、この代表線に沿って、凹地以降からの水平移動距離を横軸に、雪面標高から算出される凹地以降からの斜距離と水平距離の比を縦軸にとったグラフを図-5に示しているが、個別の日付の結果では誤差が生じるため、各月ごとにおける平均値

で表示している（1月：3時期、2月：2時期、3月：4時期でそれぞれ平均）。また、雪面の平坦化が目立つと予想される図-1 および図-4の凹地以降のみを示している。月日が経過するにしたがって雪崩による堆積等の影響により凹地全体では比の値がより小さくなっており、運動エネルギーが斜距離に応じて損失すると考えると、後から発生する雪崩の方が流下しやすくなっている。実際図-4より、後から発生した2月27日の雪崩の方が流下距離は伸びている。発生量が多いことも流下距離が伸びた要因の一つではあるが（17日の発生量は約400m³、27日は約2400m³程度）、図-5より、月日の経過に伴い雪崩が凹地に堆積した結果、2月27日は同月17日に比べて雪面が平坦化されたため、より遠くまで到達した可能性が示唆された。同27日に発生したこの雪崩の直前に小規模なものが2回ほど発生しており、400m以降の凹地範囲では、斜距離と水平距離の比がさらに小さくなっていたことも到達距離が17日より距離が伸びたことの一因として考えられる。

5. まとめ

本研究は、積雪地形変化が雪崩堆積範囲に及ぼす影響を明らかにするための基礎的な知見を得ることを目的として実施し、得られた結果は下記のとおり。

- 1) 柵口地区を観測対象として、高頻度のUAVによる地形計測（計35回の撮影、うち雪崩発生前後に撮影し、3次元モデルの差分により発生範囲等を抽出したのは9事例）、雪崩動態観測（動画カメラ解析は3事例）、気象データや積雪断面観測による雪質調査（断面観測は1事例実施）を通じ、雪崩の観測および観測した雪崩の諸元を整理した。
- 2) 2025年2月17日および同27日に発生した雪崩は、同一箇所でも発生したが、27日の方が流下距離は伸びている。発生量が多いことも理由の一つと考えられるが、流下距離に影響のある凹地において雪面が2月27日の方が17日より平坦化され、エネルギー損失が少ないためであることも発生区と堆積区を結ぶ代表線の始点からの斜距離と水平距離の比を考慮することで定量的に示唆される。

参考文献

- 1) 高原晃宙、渡辺伸一、奥山悠木、吉柳岳志、判田乾一：UAVの活用による雪崩の流下範囲の推定、雪氷研究大会（2022・札幌）講演要旨集、p.169、2022
- 2) 国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所：令和2年度新潟焼山航空レーザー計測業務、2019

INVESTIGATION OF SNOW TERRAIN IN THE TRACK AND DEPOSIT ZONES OF SNOW AVALANCHES AND THE ANALYSIS OF RUNOUT AREAS

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Snow Avalanche and Landslide Research Center

Author: TOHEI Masaru

KIRYU Takeshi

TAKAHARA Teruyoshi

SAKAKI Naoto

Abstract: This study aims to understand how changes in the snow surface influence the deposit areas affected by subsequent snow avalanches. The Maseguchi district in Itoigawa City, Niigata Prefecture, was selected as the study site. First, we conducted high-frequency avalanche dynamic observations using unmanned aerial vehicles and analyzed the data captured by video cameras. We recorded avalanche and snow surface conditions. Second, we examined how the changing snow surface affects the deposit area at a depression where repeated avalanche deposition occurs. In avalanches initiated on February 17 and February 27, 2025, the avalanche on the 27th traveled a longer distance. This difference was analyzed by plotting the horizontal distance on the horizontal axis against the ratio of slant distance to horizontal distance on the vertical axis along a representative line between the depression and the deposition area. This analysis revealed that at the depression where the snow surface undergoes remarkable changes owing to repeated deposition, the snow surface flattens, thereby influencing travel distance. In particular, the ratio of slant distance to horizontal distance for the avalanche tended to be smaller at the same horizontal distance over time. This indicates that kinetic energy loss was restricted when an avalanche from the same release area occurred later. Although one contributing factor was a larger starting volume for the avalanche on the February 27, the findings reveal that a flattened snow surface can enable an avalanche to travel farther from the same starting area.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, Avalanche dynamics, Deposit area of snow avalanche, Snow avalanche

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

学会発表等その他（計 2 本）

- e-1) 渡辺伸一、榊直人：今冬（2024/2025 冬期）の柵口地区降積雪状況と雪崩発生、2025 年度（公社）日本雪氷学会北信越支部総会および研究発表会・製品発表検討会、2025.5
- e-2) 渡辺伸一、榊直人：今冬（2024/2025 冬期）の柵口地区降積雪状況と雪崩発生、雪氷研究大会（2025・津）、2025.9