

雪崩の規模の推定手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～平 30

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：秋山一弥、原田裕介、松下拓樹

【要旨】

本研究では、近年技術が進んでいる航空レーザや UAV（無人航空機）の測量技術を活用して、雪崩の三次元形状から規模に関するデータを取得することを目的とした。航空レーザ測量では 2 次元形状であれば DEM データから取得が可能であるが、体積を算出するための高さ方向のデータを取得する場合はオリジナルデータのレベルが必要であること、UAV を用いた測量では精度の高いデータを取得することが可能であると考えられた。今後は表層雪崩への適用と精度の検証が課題である。

キーワード：雪崩、発生量、空中写真、航空レーザ測量、UAV

1. はじめに

雪崩災害の多発した 56 豪雪や 59 豪雪（1986、1989 年）以降はしばらく暖冬少雪傾向であったが、平成 18 年豪雪に続いて 23 年（山陰）、24 年（北海道）、25 年（東北）、26 年（関東甲信）、30 年（北陸）と豪雪年が続いて雪崩災害が発生している。土砂災害では被害を受ける恐れがある範囲として、家屋の耐力を基準として警戒区域（イエロー）と特別警戒区域（レッド）に区分して指定している。雪崩に関しては、評点法（斜面勾配、植生、最大積雪深）によって発生の危険性を評価して¹⁾、高橋の経験則（図-1）から雪崩の到達（危険）範囲を定めている²⁾。

雪崩の危険区域を精度よく決定するには、実際に発生した雪崩の発生量や発生面積、到達距離などの規模に関する統計データが必要である。しかし、国内では雪崩の災害報告が少なく、発生後の調査で雪崩の種類や被害の状況は判明しても、雪崩の規模に関するデータが得られることは極めて少ない状況である。

雪崩のデータとして、土木研究所では昭和 63 年に発行した「雪崩及び雪崩予防柵等に関する調査」³⁾で

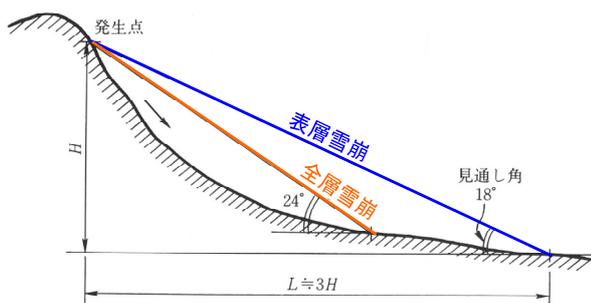


図-1 雪崩の到達範囲（高橋、1900）

収集した 96 件の雪崩災害事例があるが、以降は雪崩の規模に関して新潟県妙高村、長野県白馬村、新潟県湯沢町で発生した 3 件の大規模雪崩の調査が土木研究所資料^{4)～6)}として報告されている程度である。2014（平成 26）年 2 月には関東甲信地方で大雪となり、多数の雪崩災害が発生したため、土木研究所では現地調査の結果から各種の検討を行ったが、雪崩の地形的な諸元は判明したもの、発生量は不明であった^{7)～10)}。

以上のとおり、雪崩の数値的な諸元が体系的に整理された資料は国内では少ない状況であるが、雪崩は痕跡がしばらく残る土砂災害と異なり、降雪や融雪で痕跡が消失して状況が短時間で変化することが理由として考えられる。また、雪崩は地上調査で発生場所や被害状況を把握することは可能で、堆積区付近の調査は容易であるものの、発生区は到達自体が困難で危険が伴うことから、調査が非常に困難であることも理由としてあげられる。

近年では、空中写真撮影や航空レーザ測量などの測量技術を用いることによって、到達が困難な箇所において客観的で高精度の地形データが入手可能となっている。積雪に関する航空レーザ測量については、積雪面（積雪期）と地表面（無雪期）を 2 回計測して積雪深の分布を把握する方法が一般的である^{11)～13)}。航空レーザ測量を雪崩の形状の計測に適用した事例はみあたらないが、高精度なデータが記録できることから、雪崩の数値的な諸元を 3 次元で入手可能と考えられる。

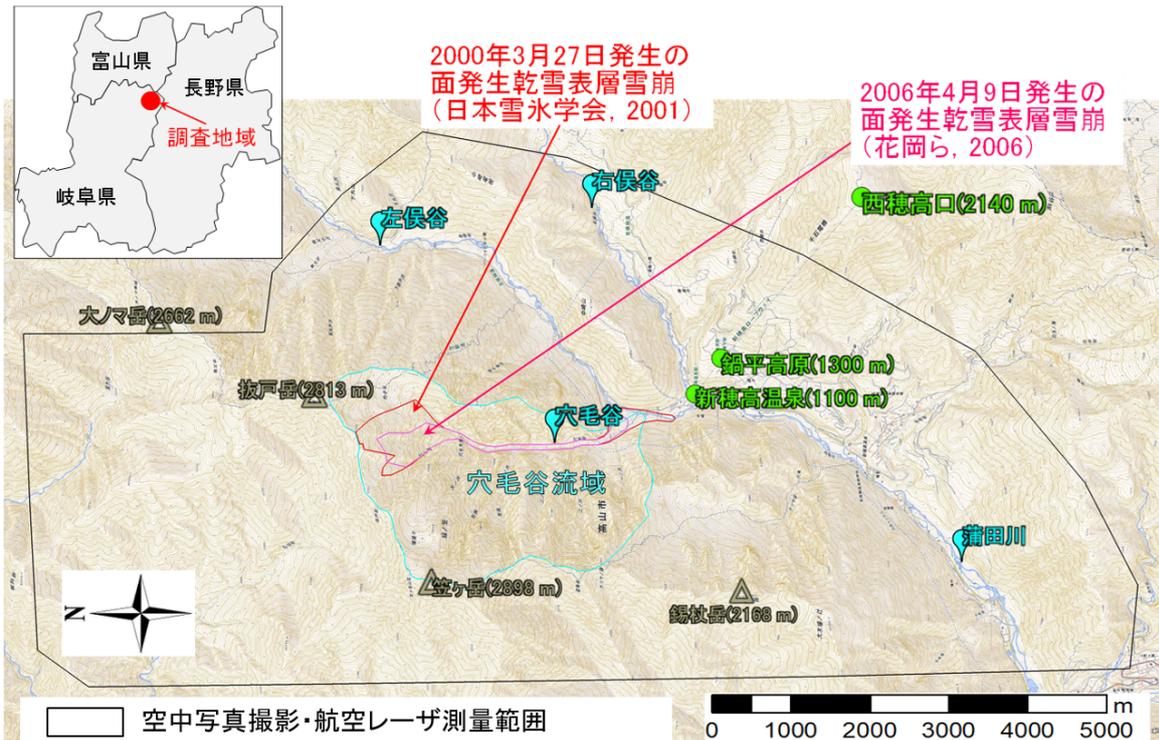


図-2 調査範囲（岐阜県高山市 新穂高）

また、最近では災害時の調査で UAV（小型無人航空機）が活用されていて、積雪に関しては積雪深の分布や雪崩発生状況の調査に用いられている^{14)~16)}。このような技術を雪崩調査に応用することで、正確で多数のデータが取得できる可能性が高く、雪崩の規模を高い精度で推定可能な技術の高度化は、より効果的な雪崩対策施設の配置計画や雪崩危険区域設定の精度向上に寄与すると考えられる。

そこで本研究では、航空レーザ測量と UAV を用いて、雪崩の 3 次元的な数値諸元を取得して、雪崩の規模を推定する手法を検討した^{17)~19)}。

2. 研究方法

冬期に実施した航空レーザ測量と空中写真撮影のデータおよび UAV で撮影した空中写真を用いて、雪崩の規模に関するデータを取得した。それぞれの調査の詳細は次のとおりである。

1) 航空レーザ測量と空中写真撮影による調査

岐阜県高山市（旧上宝村）新穂高の左俣谷支流穴毛谷流域と周辺を対象として、2008（平成 20）年 4 月 15 日に実施された航空レーザ測量と空中写真撮影のデータを用いた（図-2）。調査範囲で発生した雪崩事例として、2000（平成 12）年 3 月 27 日に国内の記録では最大級の面発生の乾雪表層雪崩が発生した。この雪崩は穴毛谷上流の標高約 2700m 付近か

ら発生し、発生量は約 166 万 m^3 で流下距離は約 4.6km であった²⁰⁾。また、平成 18 年豪雪の年である 2006 年 4 月 9 日には、穴毛谷上流の標高約 2500m 付近から大規模な面発生の乾雪表層雪崩が発生した。この雪崩の発生量は約 10~20 万 m^3 で流下距離は約 3.8km であった²¹⁾。

調査範囲では、新穂高ロープウェイの西穂高口（標高 2140m）から穴毛谷流域が一望できるが（図-2）、2008 年 3 月 27~28 日は雪崩の発生がほとんどみられなかったものの、4 月 12 日には多数の雪崩の発生が確認された。このため、航空レーザ測量と空中写真撮影は天候が良好な 4 月 15 日に実施されたが、空中写真に撮影された雪崩は 3 月 28 日以降に発生したものと考えられる。

表-1 空中写真・航空レーザ測量と作成データ

空中写真撮影					
撮影年月日	撮影区域/撮影コース	撮影高度	縮尺	撮影枚数	備考
2008/4/15	穴毛谷を中心とした 90 km ² / 25コース	3800 ~ 4200 m	1/10000	841	デジタルカメラ(1600万画素)・カラー
航空レーザ測量					
計測年月日	計測区域/計測コース	計測高度	パルス 頻度	スキャン 角度	備考
2008/4/15	穴毛谷を中心とした 90 km ² / 25コース	3800 ~ 4200 m	34000~ 36000 Hz	25度	空中写真撮影と 同時に計測
作成データ等					
空中写真	航空レーザ	解析ツール	備考		
オルソ作成 (解像度20cm)	2m DSM	ArcGIS 10			



図-3 調査範囲 (新潟県妙高市 土路地区)

空中写真撮影と航空レーザ測量の諸元は表-1のとおりで、2m 間隔の数値表層モデル (DSM) を作成するとともに、空中写真は正射投影の写真 (オルソ) を作成して、GIS ソフト (ArcGIS) を用いて雪崩のデータを取得した。

2) UAV による調査

UAV による調査については、2015 (平成 27) 年 3 月 5 日に新潟県妙高市内で発見した全層雪崩を対象とした (図-3)。調査地点から北西へ約 5km のアメダス関山 (標高 350m) では、2015 年 2 月 27 日と 3 月 2 日の降雪以降は 3 月 10 日の 5 時まで降雪は無く、2 日の降雪期間前後 (3 月 2 日 16 時~3 月 7 時) を除いた 3 月 1 日から 5 日 16 時 (雪崩の発見日時) までの期間は、気温が連続的に 0°C を上回り最高気温は 8.4°C であった。3 月 6 日の調査では雪崩の発生区や走路、雪崩デブリ上に降雪が積もった痕跡が無かったことから、3 月 3 日から 5 日 16 時の間に面発生の湿雪全層雪崩が発生したと推定した (図-4)。

この全層雪崩を対象として、マルチコプター (DJI 製 Phantom 2 Vision+) に標準搭載のカメラを用いて、3 月 6 日と 9 日に雪崩の発生区から堆積区までの区域とその周辺を網羅するように手動で飛行して鉛直方向の動画撮影を行った (図-5)。飛行時間は約 10 分で、動画から 1 秒ごとに画像をキャプチャして

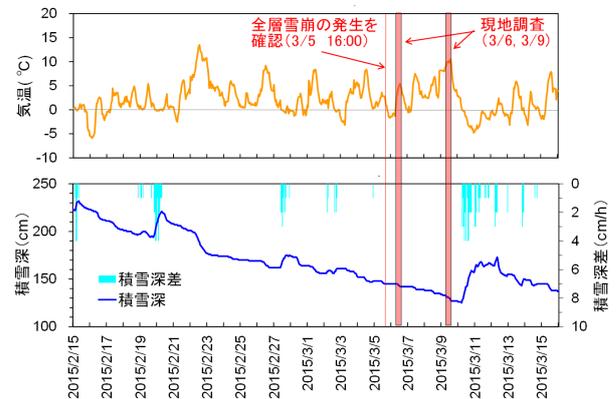


図-4 アメダス関山の気象



カメラ

仕様: 1400万画素, f=5mm
 解像度: 静止画 4384×3288pixel
 動画 1920×1080pixel, 30frame/sec

図-5 調査で使した UAV (DJI Phantom2+)

562 枚の写真を作成して、二次元のイメージから三次元シーンの構造を推定可能な 3D モデリングのソフトである Agisoft PhotoScan Professional を用いて、正射投影の写真（オルソ）を作成した。

次に、オルソ上に基準点を設定して平面直角座標を付与して数値標高モデル（DEM）を作成した。雪崩とその周辺に基準点となる目印がなかったことから、動画撮影の範囲を通過している道路の路面上に基準点を 6 点設定し、地理院地図上で基準点の位置の緯度・経度を取得した。作成したオルソと DEM は GIS ソフト（ArcGIS）に取り込み、雪崩のデータを取得した。

以上の 1) と 2) については、図-6 のとおり雪崩の痕跡から地形的な要素に関する諸元を算出して

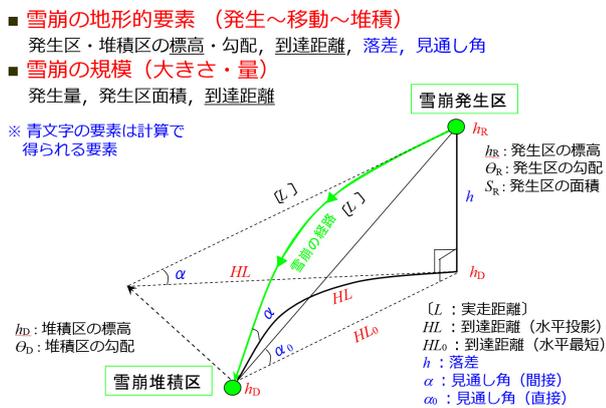


図-6 雪崩の地形的要素と規模の模式図

発生量を推定した。

3. 結果

3.1 空中写真撮影と航空レーザ測量を用いた雪崩の規模推定

空中写真から作成したオルソを判読したところ、大部分が表層雪崩で走路の途中で合流して堆積区が不明な雪崩が多かった。このうち、発生区から堆積区まで追跡可能な雪崩は表層雪崩が 344 個、全層雪崩は 38 個を特定した（図-7）。これらの雪崩については、ArcGIS を用いて航空レーザ測量から作成した 2m 間隔の DSM を用いて地形的な要素に関する諸元を数値化した。

次に、雪崩の 3 次元形状として発生量を算定するために、事前の検討として図-8 に示す全層雪崩の堆積区を対象として ArcGIS で断面図を作成した。全層雪崩の堆積区と 2m 間隔の DSM のメッシュは図-9 のとおりで、図-10 に示すとおり雪崩の堆積区と構造物（砂防堰堤）を通る測線を 2 本設定して、2m 間隔の DSM で横断面図を作成したところ、堆積状況や砂防堰堤の凹凸形状が再現できなかった。このため、DSM を作成した航空レーザ測量の照射点（オリジナル）のデータを用いたところ、図-11 のとおり雪崩の堆積状況と砂防堰堤の形状が横断面図に明瞭に再現できた。

次に、図-8 に示す全層雪崩の発生区を対象として、同様に ArcGIS で断面図を作成した。断面図は

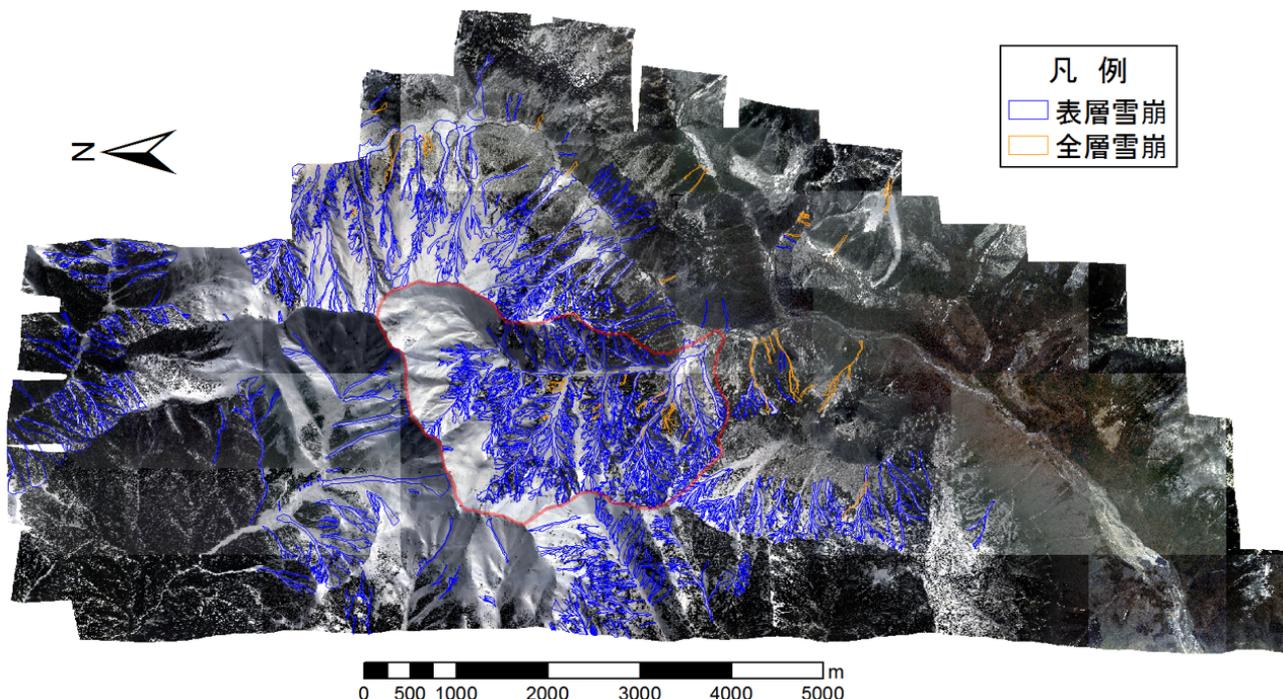


図-7 空中写真（オルソ）と雪崩の判読結果

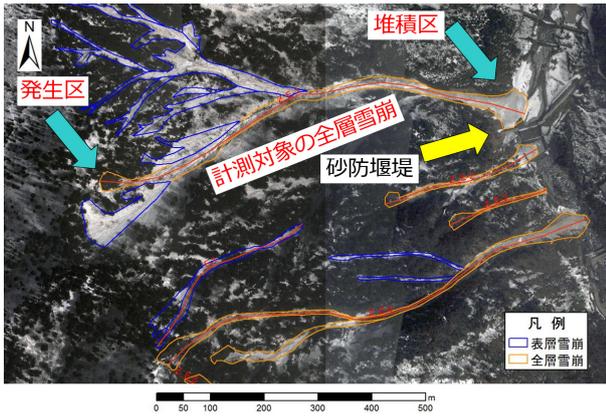


図-8 計測対象の全層雪崩と構造物（砂防堰堤）

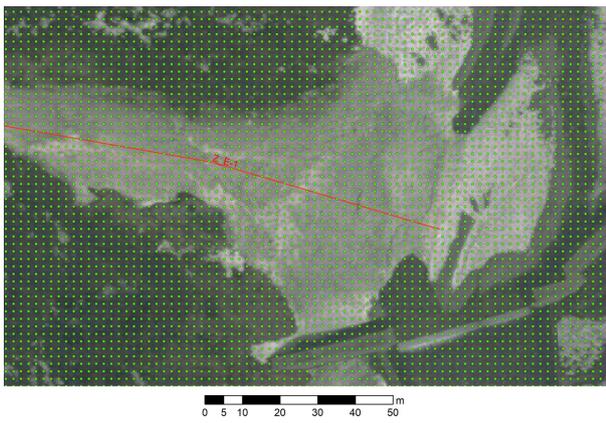


図-9 全層雪崩の堆積区と2mDSMのメッシュ（緑色の丸印はメッシュの位置、赤線は雪崩の地形的要素を計測した側線）

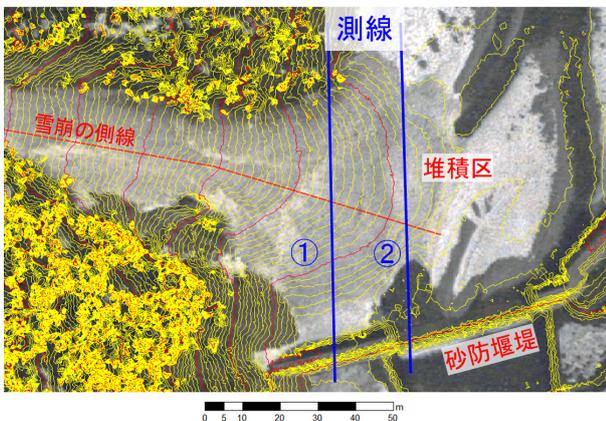


図-10 全層雪崩の堆積区と堰堤の横断形状の側線（黄）

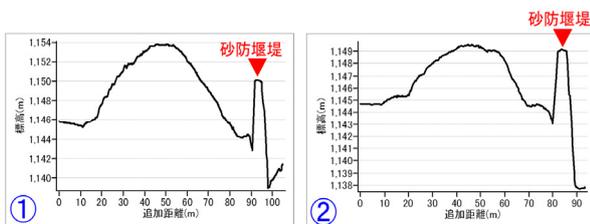


図-11 全層雪崩の堆積区と砂防堰堤の横断形状

樹林をはずした範囲に設定する必要があることから、図-12 のとおり 3 本の側線を設定した。その結果、

堆積区と同様に2m間隔のDSMでは全層雪崩の発生区の形状がうまく再現できなかったが、航空レーザ測量のオリジナルデータを用いたところ、図-13 のとおり全層雪崩の破断面付近で段差が明瞭に再現された。なお、断面図は図-14 のとおりオリジナルデータで構成される三角網 (tin) と計測線との交点の座標で作図されるため、破断面の形状は鉛直 (垂直) でなく斜めに表現されているが、高さは2.5~3mで、全層雪崩の破断面の高さが表現できていると判断された。

以上から、雪崩の地形的な要素を把握するためには2m間隔のDSMで十分であるが、三次元形状を復元するには不適當で、航空レーザ測量のオリジナルデータを用いることが必要であると考えられた。

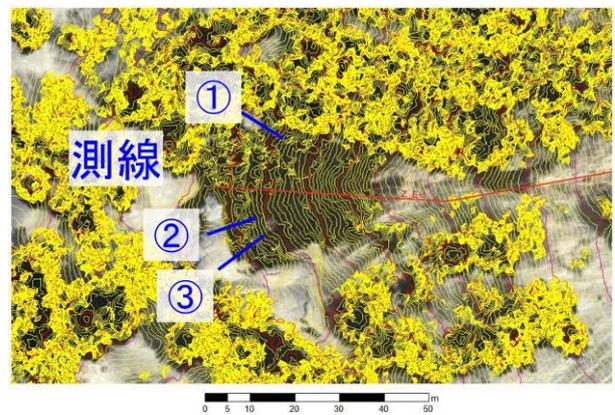


図-12 全層雪崩の発生区の横断形状の計測（等高線は1m間隔）

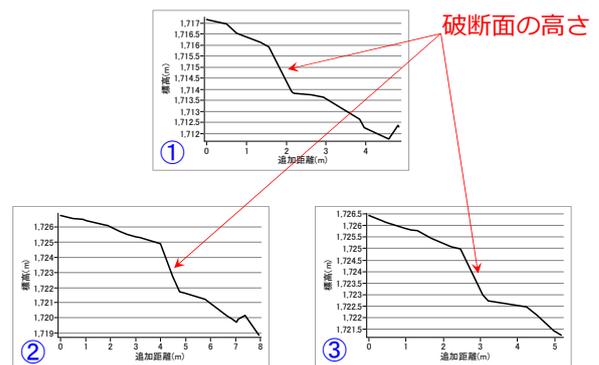


図-13 全層雪崩の発生区の横断形状

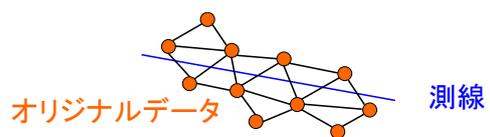


図-14 オリジナルデータと横断面図を作成した側線との位置関係

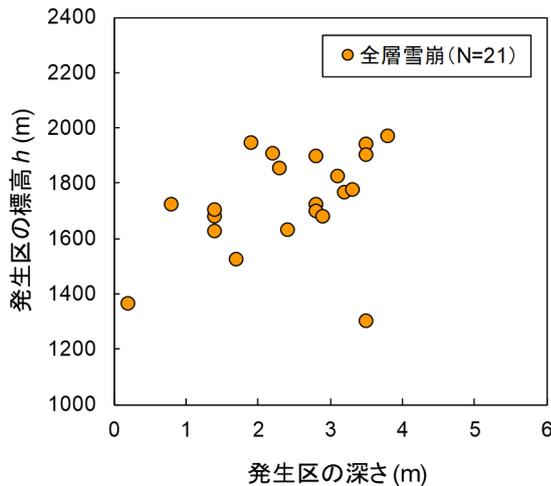


図-15 全層雪崩の破断面の高さ（発生区の深さ）と発生区標高との関係

写真判読で特定した 38 個全層雪崩のうち、21 個の発生区の破断面の高さ（発生区の深さ）を 3 本の計測線の平均値として計測して、標高の関係を図-15 に示す。発生区の深さは 0.2~3.8m と幅が広いが、発生区面積にこの深さを乗じることで雪崩の発生量が推定可能である。また、積雪断面観測を行って積雪の密度を計測すれば、発生量と合わせて雪崩の質量も推定可能となる。

なお、写真判読で特定した表層雪崩は雪底が崩壊するタイプが多く、発生区に破断面が明瞭にみられなかった。このため、航空レーザ測量のオリジナルデータを用いた場合、雪底の形状は明瞭に表現されるものの、雪崩発生区の破断面の形状が不明瞭であったことから、表層雪崩への適用は今後の課題である。

3.2 無人航空機 (UAV) を用いた雪崩の規模推定

全層雪崩の発生区から堆積区までを UAV で撮影した状況を図-16 に示す。発生区から堆積区にかけて落葉樹による影響はなく空中から明瞭に認識可能であった。動画から作成した 562 枚の写真を用いて Agisoft PhotoScan Professional で作業中の状況は図-17 のとおりで、オルソを作成した後に基準点に座標を付与して DEM を作成した。オルソと DEM を GIS ソフト (ArcGIS) で取り込んだ結果は図-18 のとおりで、雪崩の発生区勾配は 36.6 度、堆積区勾配は 12.8 度、発生区の水平投影面積は 2279m²、走路幅は 19~50m となった。また、発生区の頂点と堆積区の末端の位置を基準とすると、雪崩の落差は 137m、到達距離 (雪崩経路の水平投影) は 319m で、直接見

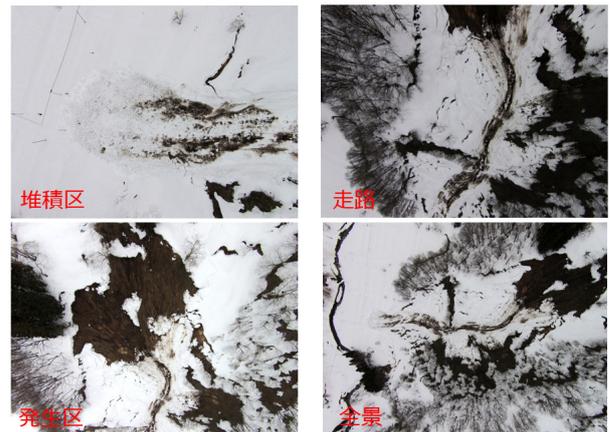


図-16 UAV による全層雪崩の状況

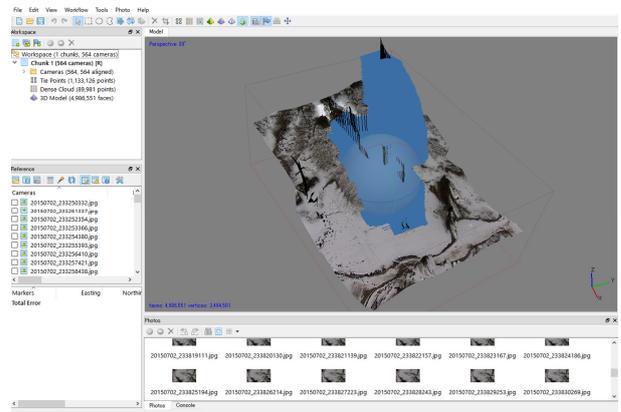


図-17 Agisoft PhotoScan Professional による作業状況

通し角は 24.3 度となった。なお、現地では直接見通し角しか実測していないが、クリノメータで実測した結果は 24 度で、UAV で取得した結果に近い値であった。

雪崩の発生量については、発生区の破断面付近で細かい間隔で等高線を描いても段差が表現できておらず、発生区の深さが不明瞭であったため、積雪断面観測の深さを雪崩の発生深さと同一と考えて算出した。堆積区付近で行った積雪断面観測では、雪質は全てざらめ雪で積雪深が 269cm であったことから、雪崩の発生量は 5200m³ と推定された。

4. まとめとの課題

本研究の結果から、航空レーザ測量では 2 次元形状であれば DEM データから取得が可能であるが、体積を算出するための高さ方向のデータを取得する場合はオリジナルデータのレベルが必要であることが判明した。ただし、調査対象箇所では表層雪崩は雪底が崩壊するタイプが多く、発生高さを推定するのは困難

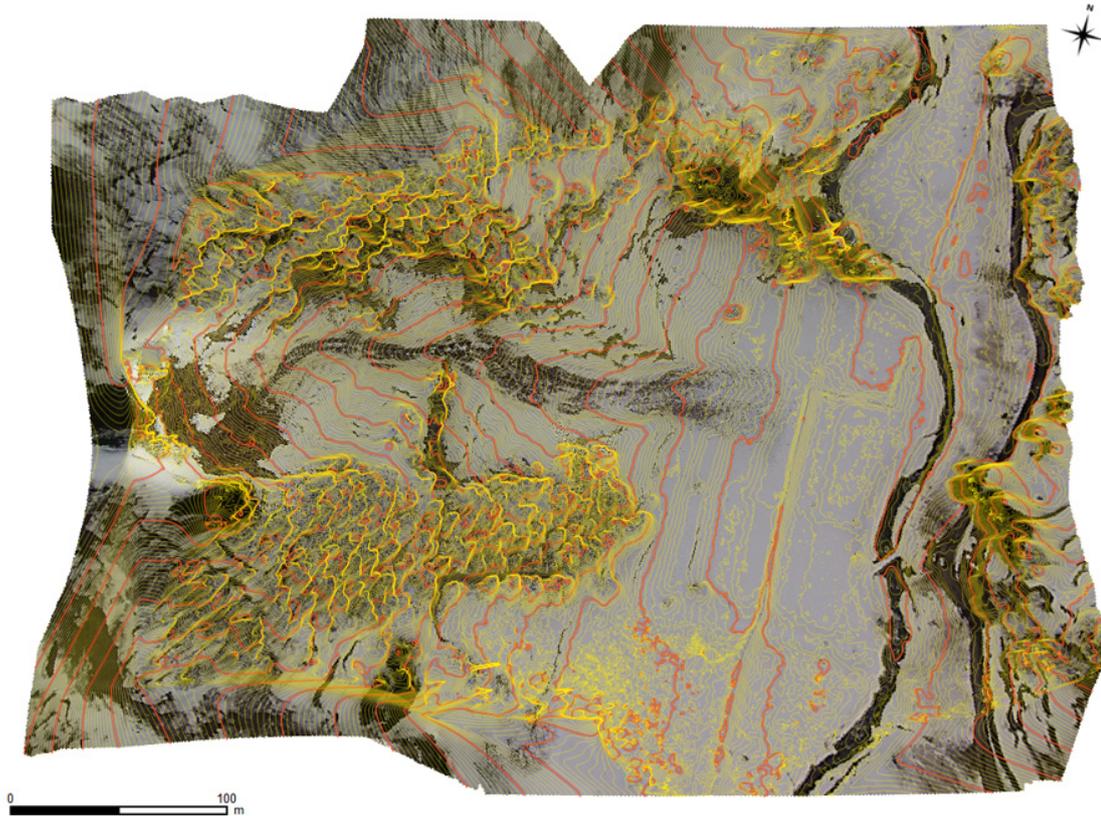


図-18 空中写真(オルソ)とDEMから作成した等高線(1m間隔)

で発生量を算出することができなかったことから、表層雪崩の発生量推定は今後の課題である。UAVを用いた測量では精度の高いデータを取得することが可能であると考えられた。ただし、本研究の調査対象箇所では撮影方法や経路、オルソの作成、基準点の設定方法から判断すると、精度的に満足できるものではなく、今後は一定の高度で飛行して定率でオーバーラップする写真の撮影と正確な基準点の設定、実際に発生した雪崩の現地での実測値と解析値を比較した精度検証が課題である。

航空レーザ測量は雪崩の統計データを広域に取得することが可能であるものの、コストが大きく機動性が少ない欠点がある。UAVは1箇所が発生する雪崩を対象とした場合はコストが低く機動性も高いことから効率的な調査方法と考えられから、今後も継続する予定である。

参考文献

- 1) 社団法人日本建設機械化協会編：「新編 防雪工学ハンドブック」、森北出版、p.134、1988
- 2) 高橋喜平：「雪崩の被害」、雪氷、Vol.22、No.1、pp.7-9、1960
- 3) 吉松弘行、藤澤和範、大浦二郎、菊井稔宏：「雪崩および雪崩予防柵等に関する調査」、土木研究所資料、第2684号、pp.1-21、1988
- 4) 是沢一樹、下村忠一、酒井洋一、中島久男：「大規模表層雪崩実態調査」、土木研究所資料、第2618号、56pp.、1988
- 5) 下村忠一、寺田秀樹、中島久男、吉松弘行、藤澤和範：「苗場山麓で発生した全層雪崩について」、土木研究所資料、第2818号、35pp.、1989
- 6) 中村良光、寺田秀樹、大浦二郎、綱木亮介、藤澤和範：「1992年5月4日 白馬大雪溪の大雪崩について」、土木研究所資料、第3181号、38pp.、1992
- 7) 池田慎二、松下拓樹・秋山一弥：「2014年2月の関東甲信地方大雪において建物に被害をもたらした雪崩の運動解析」、平成27年度砂防学会研究発表会概要集、A210-A211、2015
- 8) 池田慎二、松下拓樹、石田孝司：「2014年2月の関東甲信大雪時に発生した雪崩の抵抗係数の検討」、雪氷研究大会(2015・松本)講演要旨集、p.79、2015
- 9) 池田慎二、松下拓樹、石田孝司、秋山一弥：「2014年2月の関東甲信大雪時に発生した雪崩の運動の特徴」、寒地技術論文・報告集、Vol.31、pp.70-73、2015

- 10) 秋山一弥、池田慎二、木村諤、松下拓樹：「2014年2月の大雪によって山梨県早川周辺で発生した雪崩の到達距離と地形の関係」、雪氷、Vol.78、pp.439-457、2016
- 11) 秋山實、佐藤浩：「航空レーザ測量による積雪深分布の計測と積雪相当水量の推定」、写真測量とリモートセンシング、Vol.45、No.2、pp.24-33、2006
- 12) 岡本隆、黒川潮、松浦純生、浅野志穂、松山康治：「山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討」、水文・水資源学会誌、Vol.17、NO.5、pp.529-535、2004
- 13) 秋山一弥、花岡正明、佐野寿聰：「航空レーザ測量を用いた山地積雪深の計測と積雪深分布の地形的特徴」、日本雪工学会誌、Vol.25、No.3、pp.3-11、2009
- 14) 小花和宏之、河島勝久、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
- 15) 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・論文報告集、Vol.30、pp.43-46、2014
- 16) 内山庄一郎、鈴木比奈子、上石勲、中村一樹：「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」、自然災害科学、Vol.37 特別号、pp.119-135、2018
- 17) 秋山一弥、石川泰裕：「高精度空間情報による雪崩の発生規模の推定」、雪氷北信越、第38号、p.18、2018
- 18) 秋山一弥、石川泰裕：「航空レーザ測量を用いた雪崩の規模推定」、雪氷研究大会(2018・札幌)講演要旨集、p.137、2018
- 19) 秋山一弥、松下拓樹、中村絵美：「マルチコプターを用いた全層雪崩の調査」、雪氷研究大会(2015・松本)講演要旨集、p.78、2015
- 20) 社団法人日本雪氷学会：「日本最大の雪崩はいかにして起こったか 3.27 左俣谷雪崩災害調査報告書」、pp.1-68、2001
- 21) 花岡正明、金子正則、本間信一、上石勲、池田慎二、新開龍三郎：「2006年4月、岐阜県高山市上宝穴毛谷で発生した雪崩について」、2006年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集、p.108、2006

RESEARCH ON THE METHOD FOR ESTIMATING AVALANCHE SCALE

Research Period : FY2015-2018

Research Team : Erosion and Sediment Control

Research Group(Snow Avalanche
and Landslide Research Center)

Author : AKIYAMA Kazuya

HARADA Yusuke

MATSUSHITA Hiroki

Abstract : The purpose of this study was to obtain data on scale from the three-dimensional shape of snow avalanches using the survey technology of airborne laser scanning data and UAV (unmanned aerial vehicle), which have advanced in recent years. Two-dimensional shape of avalanches can be obtained from DEM data. However, original data level of airborne laser scanning data is necessary to obtain height dimension to calculate avalanche volume. UAV surveying was considered to obtain highly accurate data of avalanches. Future studies are needed to apply these methods to surface avalanches and verify the accuracy of measurement.

Key words : avalanche, avalanche volume, aerial photograph, airborne laser scanning data, UAV (unmanned aerial vehicle)