

第 1 章

現地調査結果

那須雪崩災害の現地調査

The field investigation of an avalanche disaster at Mt. Nasu

中村 一樹¹⁾, 上石 勲¹⁾, 根本 征樹¹⁾, 小杉 健二¹⁾, 山口 悟¹⁾, 伊藤 陽一¹⁾,
平島 寛行¹⁾, 本吉 弘岐¹⁾, 佐藤 研吾¹⁾, 安達 聖¹⁾, 阿部 修¹⁾, 内山 庄一郎²⁾,
鈴木 比奈子²⁾, 飯田 肇³⁾, 西村 浩一⁴⁾, 河島 克久⁵⁾, 松元 高峰⁵⁾, 渡部 俊⁵⁾,
伊豫部 勉⁶⁾, 阿部 幹雄⁷⁾, 阿部 直樹⁸⁾, 竹内 由香里⁹⁾, 勝島 隆史⁹⁾, 近藤 伸也¹⁰⁾
K. Nakamura¹⁾, I. Kamiishi¹⁾, M. Nemoto¹⁾, K. Kosugi¹⁾, S. Yamaguchi¹⁾, Y. Ito¹⁾,
H. Hirashima¹⁾, H. Motoyoshi¹⁾, K. Sato¹⁾, S. Adachi¹⁾, O. Abe¹⁾, S. Uchiyama²⁾, H. Suzuki²⁾, H. Iida³⁾,
K. Nishimura⁴⁾, K. Kawashima⁵⁾, T. Matsumoto⁵⁾, S. Watabe⁵⁾, T. Iyobe⁶⁾, M. Abe⁷⁾, N. Abe⁸⁾,
Y. Takeuchi⁹⁾, T. Katsushima⁹⁾, S. Kondo¹⁰⁾

¹⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

¹⁾*Snow and Ice Research Center, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

²⁾防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

²⁾*Integrated Research on Disaster Risk Reduction Division, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

³⁾立山カルデラ砂防博物館

³⁾*Tateyama Caldera Sabo Museum*

⁴⁾名古屋大学大学院 環境学研究科

⁴⁾*Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University*

⁵⁾新潟大学 災害・復興科学研究所

⁵⁾*Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University*

⁶⁾京都大学大学院 工学研究科

⁶⁾*Graduate School of Engineering, Kyoto University*

⁷⁾日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム

⁷⁾*The investigation of Snow Damage Research Team in Hokkaido Branch of JSSI*

⁸⁾防災科学技術研究所 気象災害軽減イノベーションセンター

⁸⁾*Innovation Center for Meteorological Disaster Mitigation, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience*

⁹⁾森林総合研究所 十日町試験地

⁹⁾*Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute*

¹⁰⁾宇都宮大学 大学院工学研究科

¹⁰⁾*Graduate School of Engineering, Utsunomiya University*

Abstract: An avalanche disaster occurred at Mt. Nasu in Tochigi pref. on 27, March 2017. Seven high school students and one supervising teacher were killed and 40 persons including seven high-school students other high school students and supervising teacher were injured by an avalanche. The field investigations for this avalanche disaster were started on March 28. As results of snow observation, the avalanche was caused by the weak layer of no rimed falling snow crystals which fell form in the front area of a low-pressure system. This observation result led to analyses for a snowpack model and meteorological characteristics. The hearing investigation from a person of a rescue team for an avalanche disaster, many important matters for an avalanche accident were provided.

Key words: avalanche disaster, weak layer, hearing investigation

1. はじめに

2017年3月27日に栃木県那須町的那須岳で発生した雪崩災害では7名の高校生、1名の教師が亡くなり、40名の方が重軽傷となる大きな被害をもたらした(図-1参照)。発生直後の3月28日から複数回の現地調査を行い、雪崩の発生状況を調査した。3月28日の調査では、雪崩停止箇所より若干下がった地点での積雪断面観測を行い、表面から23~25cmに降雪結晶からなる層を確認した。この層を弱層として表層雪崩が発生したものと推定され、今後の雪崩発生の解析に結

び付いている貴重な観測データとなっている。また、4月2日の現地調査では、雪崩の発生源破断面や積雪表面のデブリは確認できなかったが、積雪の断面観測によって雪崩の痕跡を数か所で確認することができた。その後、数回の現地観測では、樹木の枝折れや関係者の所持していた登山用具も発見され、雪崩発生個所、流下範囲について、ある程度把握することができた。さらに、救助隊の方や雪崩に遭遇した方に聞き取り調査を行い、当日の状況に関する貴重な証言を頂いた。

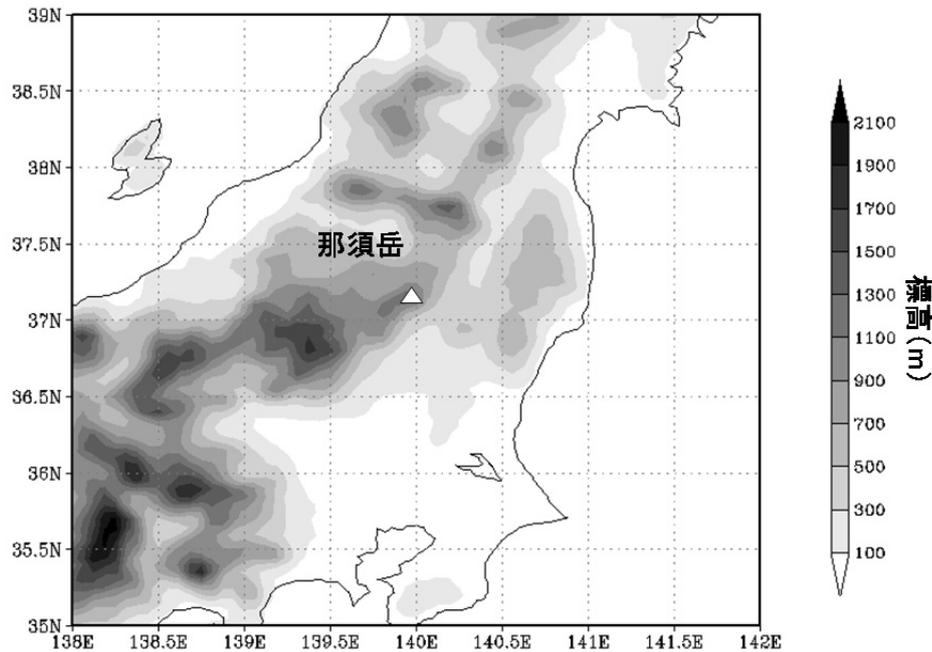


図-1 那須岳の位置（中心付近の△）

2. 現地調査

今回発生した雪崩直後から、現地の安全性を確保しながら上空からの調査と連動し、表-1に示す通り、積雪が残る4月下旬までに5回の現地調査を行い、雪崩の発生状況、規模等について明らかにした。なお、表-1に示した日時以外にも、個別のチームで現地調査を実施している場合がある。それぞれの調査の内容を2.1~2.5節に示す。

表-1 現地調査項目と実施日（○：実施日）

調査項目\調査実施日	2017/3/28	4/2	4/13	4/19	4/25
写真撮影	○	○	○	○	○
積雪深観測	○	○		○	○
積雪断面観測	○	○			
雪崩痕跡調査		○		○	○
無人航空機による空撮		○		○	○

また、現地の関係者（救助に当たった山岳救助隊、学校関係者）を対象に、雪崩災害当日の気象状況や移動箇所、雪崩発生状況並びに埋没箇所、深さや被害状況について聞き取り調査を実施中である。聞き取り調査については、今後も個別に継続して丁寧に調査を行い、調査結果がまとまった段階で公表したいと考えている。

2.1 写真撮影

雪崩発生斜面、積雪深観測、積雪断面観測、雪崩痕跡の調査地点等の写真を撮影し、撮影地点の GPS 情報を記録した。4月13日は、スキー場センターハウス付近から那須岳の斜面の撮影のみを実施した。その他の調査日は、それぞれの調査地点の写真撮影を実施した。

2.2 積雪深観測

積雪深測定用の目盛り入りのプローブにて測定し、測定箇所の GPS 情報を記録した。積雪断面観測地点や雪崩痕跡調査地点の積雪深を確認するという目的のほかに、2.5節で示す無人航空機空撮から求められる積雪深分布を検証するために積雪深データを取得した。

2.3 積雪断面観測

積雪の内部の状態を把握するために、積雪を掘削して実施した。観測項目及び方法は以下の通りである。

層構造・雪質：目視による。

気温・雪温：小型サーミスタセンサーデジタル温度計（表示分解能 1/100°C）による。

雪粒子：3月28日に実施した積雪断面観測での雪粒子撮影は、透過光型で倍率が10倍の雪結晶撮影装置とデジタルカメラを用いて現地で実施した。

硬度：デジタルフォースゲージ（表示分解能 0.001kg，円板直径 15mm）による。

密度：100 cm³の角型密度サンプラーを使用し、採取した積雪試料の重量を計測して求めた。

2.4 雪崩痕跡調査

トレンチ掘削によって積雪表層の断面を確認し、雪崩による積雪層の乱れの有無を確認した。また、樹木の枝折れ、倒木の有無の確認を実施した。それらが発見された場合、写真を撮影し、GPSで場所の緯度、経度を記録し、調査日時、その場所の積雪深、積雪表面から折れた箇所までの高さを記録した。

また、拾得物も雪崩の流路を検討する材料になることから、発見した場合、写真を撮影し、GPSで場所を記録した。

4月2日と19日は、標高1,385m付近の救出活動地点を含む標高1,300～1,420mの調査を実施した。また、4月25日は、同様の調査を実施したが、通称天狗の鼻大岩の直下の標高1,490m付近の斜面まで範囲を広げた。なお、3月28日や4月2日には雪崩発生の危険が考えられたため、この天狗の鼻大岩直下の斜面へは立ち入らなかった。

2.5 無人航空機による空撮

無人航空機による空撮は、雪崩発生推定箇所を含む範囲を対象として実施した。これにより、撮影日時点での積雪状況および雪面標高データを取得し、今後行われる雪崩の発生解析や運動シミュレーション等に活用可能となる。また、今後積雪が消失した時期にも同様に空撮を行い、撮影日時点での斜面上の積雪深分布を求めることが可能である。なお、4月19日は、風や雲等の天候の影響で、低空での撮影しかできなかった。無人航空機による空撮調査の詳細については次節（内山ら）を参照されたい。

3. 調査結果

図-2に2017年4月2日に無人航空機で撮影した那須岳雪崩発生地全景を示す。写真の中央から右の下部の樹林がないエリアは、那須温泉ファミリースキー場のゲレンデである。斜面Aは、標高約1,515mの通称天狗の鼻大岩の直下に位置し、2017年3月27日に大きな被害をもたらした雪崩が発生したと推定される斜面である。4月2日の現地調査では、斜面Aの下方に標高1,385m付近に人為的に掘削された直径数mの穴が2つ確認された。この穴は3月27日の雪崩発生直後に救出活動で掘削されたものであると考えられ、救出活動地点として図-2に示した。3月28日に断面観測を実施した地点は、この救出活動地点と同じ沢のさらに下方の標高1,350mに位置する。また、3月28日午前には、スキー場センターハウス付近から、斜面Bの位置に表層雪崩のデブリや流下の後が確認できた。このデブリはスキー場のゲレンデまで達していた。

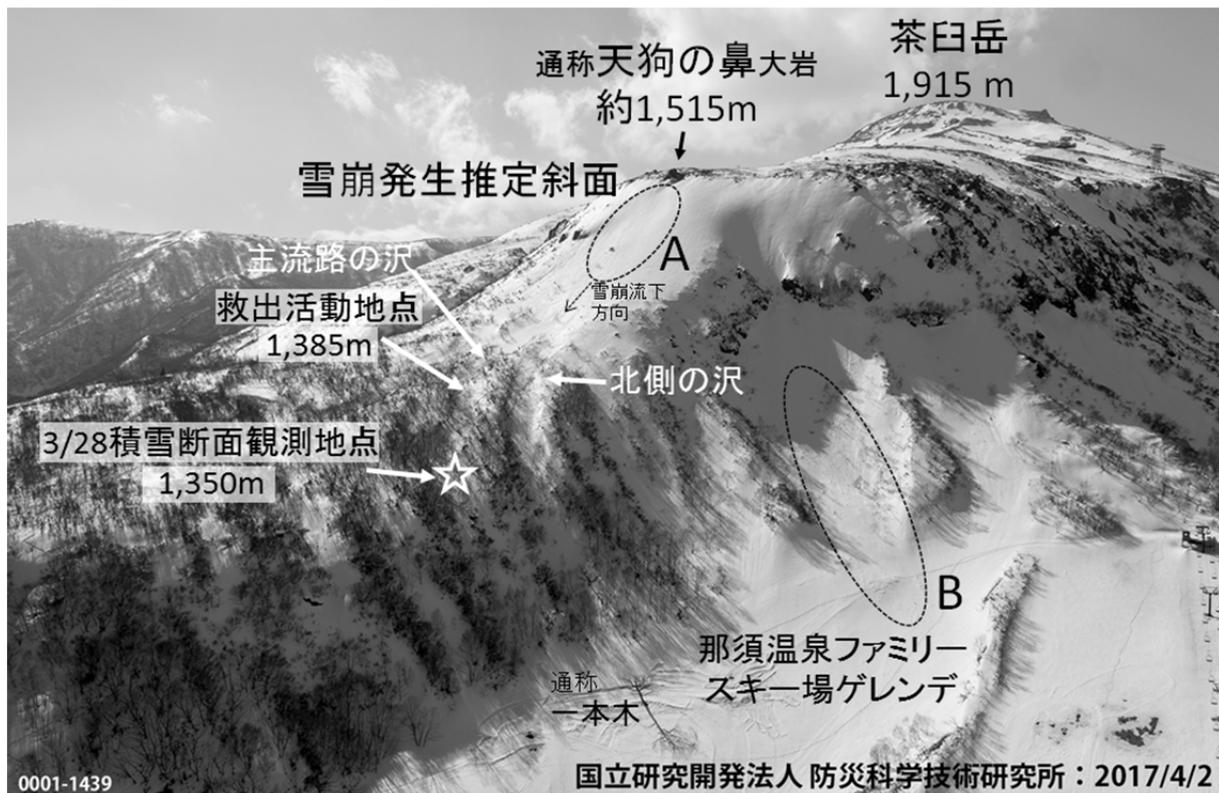


図-2 那須岳雪崩発生地全景 (2017年4月2日防災科学技術研究所無人航空機撮影,
 ☆: 3/28積雪断面観測地点, A: 3/27事故雪崩発生推定斜面,
 B: 3/28に別の雪崩の痕跡を発見した斜面)

3.1 積雪断面観測結果と考察 (2017年3月28日実施)

表-2と図-3に3月28日13時50分～16時20分に積雪内部の状態を把握するために実施した積雪断面観測結果を示す。現地で救出活動に当たった消防隊員から情報を得て、2017年3月28日午後に、雪崩が流下して事故があったとされる沢をスキー場のゲレンデから登り、図-2に示す標高1,350m付近で積雪断面観測を実施した。理想的には図3の斜面Aの雪崩発生区付近で積雪断面観測を実施したかったが、27日の雪崩発生後も3月28日の調査日まで降雪が続いており、調査時においても雪崩発生のリスクがあると判断されたため、救出活動地点の下方の樹林帯の中にある5～10m四方位程度の開けた斜面を観測地点に選定した。選定した積雪断面観測地点は、斜面Aの上端にある通称天狗の鼻大岩までの直線距離は約350mと近く、標高差も約165mと小さいため、雪崩発生区と降雪の状況がほとんど変わらない地点であると判断した。斜面Aの向きは南東(方位角135°)から東南東(方位角112.5°)であり、その下部の沢に位置する積雪断面観測地点の斜面の向きは東(方位角90°)である。傾斜角は斜面Aでは30～38度、積雪断面観測地点では35度であり、いずれも最も表層雪崩が発生しやすい傾斜角35～40度の範囲(McClung and Schaerer, 2006)を含む斜面である。この積雪断面観測地点の積雪深は305cmであった。積雪断面観測は、発生した雪崩に関係すると考えられた積雪表面から深さ約100cmまでの積雪表層部分を対象に実施した。

積雪表面から深さ100cmまでの雪温は、最高-0.6℃、最低-1.3℃であり、これらの深さでは全層氷点下であった。深さ0～1.5cmに硬度が32kPaとやや硬いクラストが確認されたが、この部分は、積雪断面観測を実施した3月28日日中の日射により形成したと考えられる。深さ1.5～9cmは、新雪あるいは新雪からこしまり雪に変態している層に該当する。この層は35kPaとやや硬く、密度は97kg/m³と直下の層よりもやや大きく、強風の影響をうけて再配分されている可能性も考えられる。深さ9～35cmも新雪あるいは新雪からこしまり雪に変態している層である。密度は48～94kg/m³と小さく、硬度は0.8～3.5kPaと小さい。特に、深さ22～25cmは弱層を形成すると考えられ、硬度0.8kPa、密度56kg/m³であった。深さ35～37cmにはざらめ雪層があり、深さ35～38cmの密度は170kg/m³と大きく、硬度は82kPaと硬かった。なお、このざらめ雪層と直上の新

雪・こしまり雪層の結合は弱くなく、雪の一部のこしもざらめ雪への変化も認められなかった。深さ 37~41cm と 41~49cm はしまり雪層、49~62cm はこしまり雪としまり雪が混在する層、それより深い層は、ざらめ雪としまり雪が交互に存在した。ざらめ雪の直下の 37~41cm のこしまり雪、しまり雪層の密度は 66 kg/m^3 とやや小さく、硬度は 8.8 kPa とやや小さかった。それより下の層は、密度は $93 \sim 201 \text{ kg/m}^3$ 、硬度は $12 \sim 220 \text{ kPa}$ であった。

表-2 積雪断面観測結果 (2017年3月28日実施)

年月日	積雪深	測定時刻	天気	気温(時刻)
2017.03.28	305 cm	13h50m - 16h20m	晴れ	-2.6 °C(13h40m)
緯度	経度	標高	傾斜角	方位角
37° 07'06.2"	139° 58'49.0"	1350 m	35°	90°
			座標軸	測定者
			D	KK.MNKN

雪質F		雪温 T(°C)		密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$		硬度 PR(kPa)		
深さ, D (cm)	F	D	T	D	ρ	D	*1 ϕ (cm)	PR
0 - -1.5	▽	0	-0.6	0 - -3	69	-1.5	1.5	32
-1.5 - -9	+ /	-10	-0.4	-6 - -9	97	-7.5	1.5	35
-9 - -35	+ /	-20	-1.3	-12 - -15	94	-13.5	1.5	2.4
-35 - -37	○	-30	-1.3	-17 - -20	57	-18.5	1.5	1.1
-37 - -41	●	-40	-1.1	-22 - -25	56	-23.5	1.5	0.8
-41 - -49	●	-50	-1.0	-27 - -30	52	-28.5	1.5	1.5
-49 - -62	○ ●	-60	-0.9	-32 - -35	48	-33.5	1.5	3.5
-62 - -69	○	-70	-0.9	-35 - -37	170	-38	1.5	82
-69 - -75	○	-80	-0.9	-37 - -40	66	-38.5	1.5	8.8
-75 - -86	○	-90	-0.8	-42 - -45	104	-43.5	1.5	70
-86 - -88	○	-90	-0.8	-52 - -55	93	-53.5	1.5	12
-88 - -305	●	-100	-0.8	-62 - -65	125	-63.5	1.5	160
				-72 - -75	154	-73.5	1.5	30
				-77 - -80	111	-78.5	1.5	90
				-92 - -95	201	-93.5	1.5	220

雪質凡例

- + : 新雪
- / : こしまり雪
- : ざらめ雪
- : しまり雪
- ▽ : クラスト

*1: ϕ は円板径を表わす。

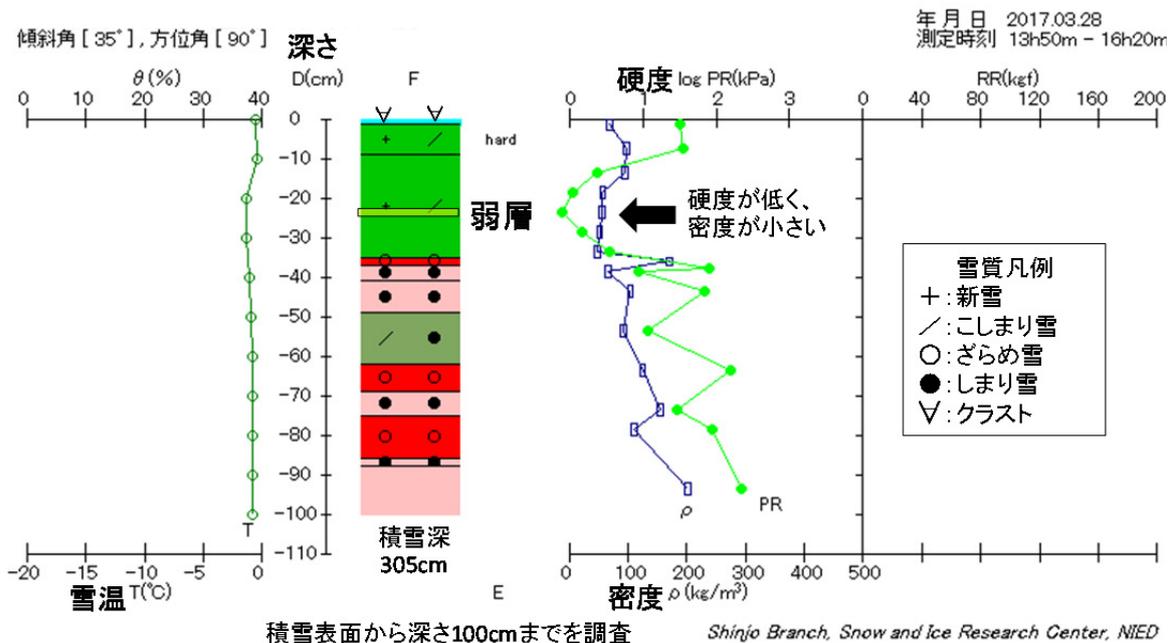


図-3 積雪断面観測結果 (2017年3月28日実施)

図-4 に、2017年3月28日に観測した積雪断面と雪粒子の写真を示す。雪粒子は、弱層に該当する B の位置 (深さ 23.5cm) とその上下の層の A (深さ 13.5cm) と C の位置 (深さ 33.5cm)

から採取して撮影した。雪粒子の写真と比較すると、AとCの雪粒子よりもBの雪粒子の粒径の方が大きく、Bの粒径が2mm以上の雪粒子は、雲粒が付着していない板状結晶であると判断できる。AもCも雲粒は少ないが粒径は小さく、板状結晶ではない。したがって、弱層を形成する主な粒子は、雲粒付着なしの板状結晶であり、雪が降ってくる時の形状が弱層形成に関係している雲粒付着がない（あるいは少ない）降雪結晶の弱層であると考えられる。

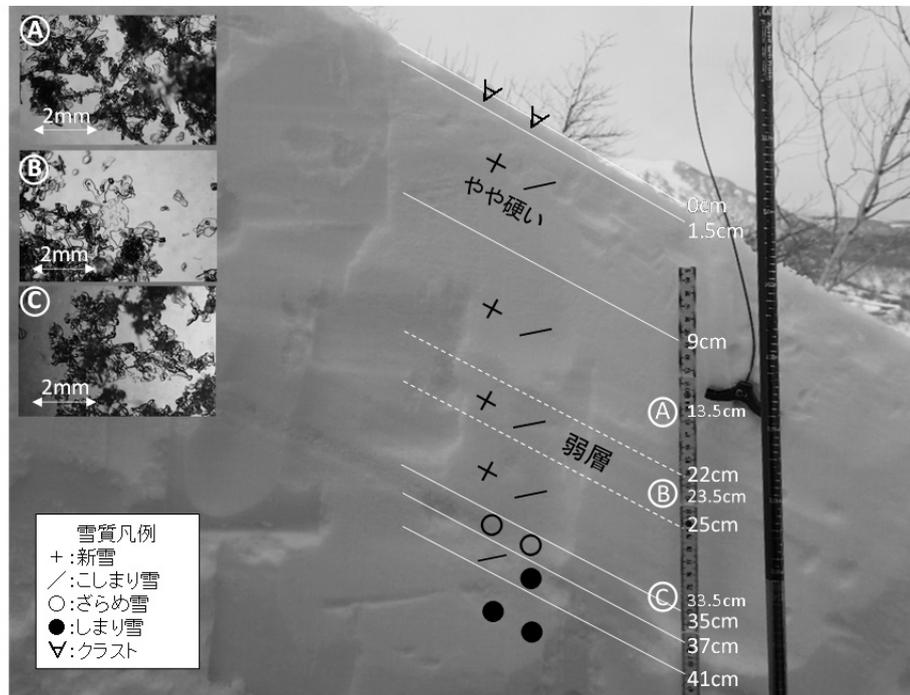


図-4 2017年3月28日に観測した積雪断面と雪粒子の写真

図-5に気象庁那須高原アメダスの3月24日～28日の気象経過を示す。那須高原アメダスは、3月28日の積雪断面観測地点から東に約5kmに位置し、標高749mである。表-2と図-3に示した3月28日の標高1,350m地点での積雪断面観測より、積雪表面から深さ100cmまでの積雪は全て氷点下の乾雪であることが確認されている。対流圏の平均的な気温減率は $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ であるから、図-5で示した標高749mの那須高原アメダスより標高が751m高い発生区付近の標高1,500mでは、気温が那須高原アメダスより約 4.9°C 低くなると考えられる。したがって、図-5の那須高原アメダスの気温の観測結果を基に標高1,500m付近の気温を推定すると、3月27日～28日は氷点下が維持されていると推定できる。したがって、雪崩が発生した3月27日には、雪崩発生区と考えられる標高1,500m付近の表層の積雪は、氷点下の雪温の乾雪であったと考えられる。

図-5より、3月25日の那須高原アメダスの最高気温が 6.9°C であるから、積雪断面観測地点では約 2.0°C と推定される。したがって、表-2と図-3、図-4に示した積雪表面から35～37cmの深さのざらめ雪層は、気温がプラスになった3月25日に形成されたと推定される。図-5の降水量の観測値より、図-3及び図-4の積雪表面～深さ数cmの積雪は28日に降った雪が形成した積雪であると考えられるが、それ以下の深さ35cmまでの積雪（深さ22～25cmの弱層を含む）は、3月26日から27日にかけて通過した低気圧（図-6参照）に伴う降雪が積もって形成されたと判断される。

3月28日の調査時にスキー場ゲレンデから雪崩発生区と考えられた通称天狗の鼻大岩の下の斜面（図-2の斜面A）を観察したが、破断面の痕跡は見つからなかった。図-5に示すように、27日の雪崩発生後も降水があり、先に示したように、標高1,500mでは、3月27日～28日は氷点下であるから乾雪が積もったことが考えられる。また、風速は27日3時00分～10時20分まで欠測であるが、27日11時以降は、例えば27日12時00分に平均風速5.8m/s、最大瞬間風速10.6m/s、28日7時30分に平均風速5.6m/s、最大瞬間風速10.7m/sを記録するなど風がやや強くなっている。

例えば新雪が積もっている場合、気温が 0℃では風速約 8m/s 以上、-5℃以下では、風速約 5m/s 以上で低い地吹雪が発生する（竹内ら、1986）ことから、27 日 8 時 30 分頃の表層雪崩発生後も風雪が続き地吹雪が生じ、28 日の観測時には破断面などの表層雪崩発生の痕跡は分かりづらくなってしまったことが考えられる。

破断面等の直接的な積雪上の証拠は無いが、図-4 で示したように、積雪内に雲粒なし板状結晶の弱層が存在し、積雪内に弱層を伴い非常に不安定な状態になっていたと推定される。したがって、3 月 27 日 8 時 30 分頃に発生した雪崩は、面発生乾雪表層雪崩である可能性が高いと判断される。

図-6 に気象庁地上天気図と気象衛星赤外面像（宇都宮气象台、2017）、及び解析雨量を示す。図-5 と図-6 の気象の状況より、図-4 の深さ 22~25cm の弱層は、本州の南岸を北東に進む低気圧に伴う 3 月 26 日~27 日の降雪中に、降雪の結晶の形状が雲粒の付着の少ない比較的大型の板状結晶が多い時間帯があり、その結晶が積もることによって形成されたと推定された。さらに、弱層となる板状結晶の層が積もった後に、同じ低気圧からもたらされた 27 日未明の比較的短時間に強く降った雪が上載積雪となって積雪が不安定になり、面発生乾雪表層雪崩が発生したと推定された。

3 月 28 日午前のスキー場ゲレンデからの観察によって、図-2 に示した斜面 B では、自然発生と考えられる表層雪崩のデブリや流下の後が確認できた。表-2 と図-3 に示した積雪断面観測結果とこの斜面 B の自然発生の表層雪崩の痕跡から、那須岳付近の積雪は不安定な状態にあったと判断される。これらの状況から、平成 29 年 3 月 27 日那須雪崩事故検証委員会報告書（2017）に示されているように、現時点では、3 月 27 日に大きな被害を生じた図-2 の斜面 A の表層雪崩は、不安定な積雪の斜面から自然発生した可能性と、不安定な積雪の斜面に人が入り込んだために発生した可能性の両方があると考えられる。

雪崩発生時の状況の検討については、現在も調査を継続中である。2018 年度に進める予定である聞き取り調査の結果と本報告書で明らかになった現地調査結果から、今後さらに検討する予定である。

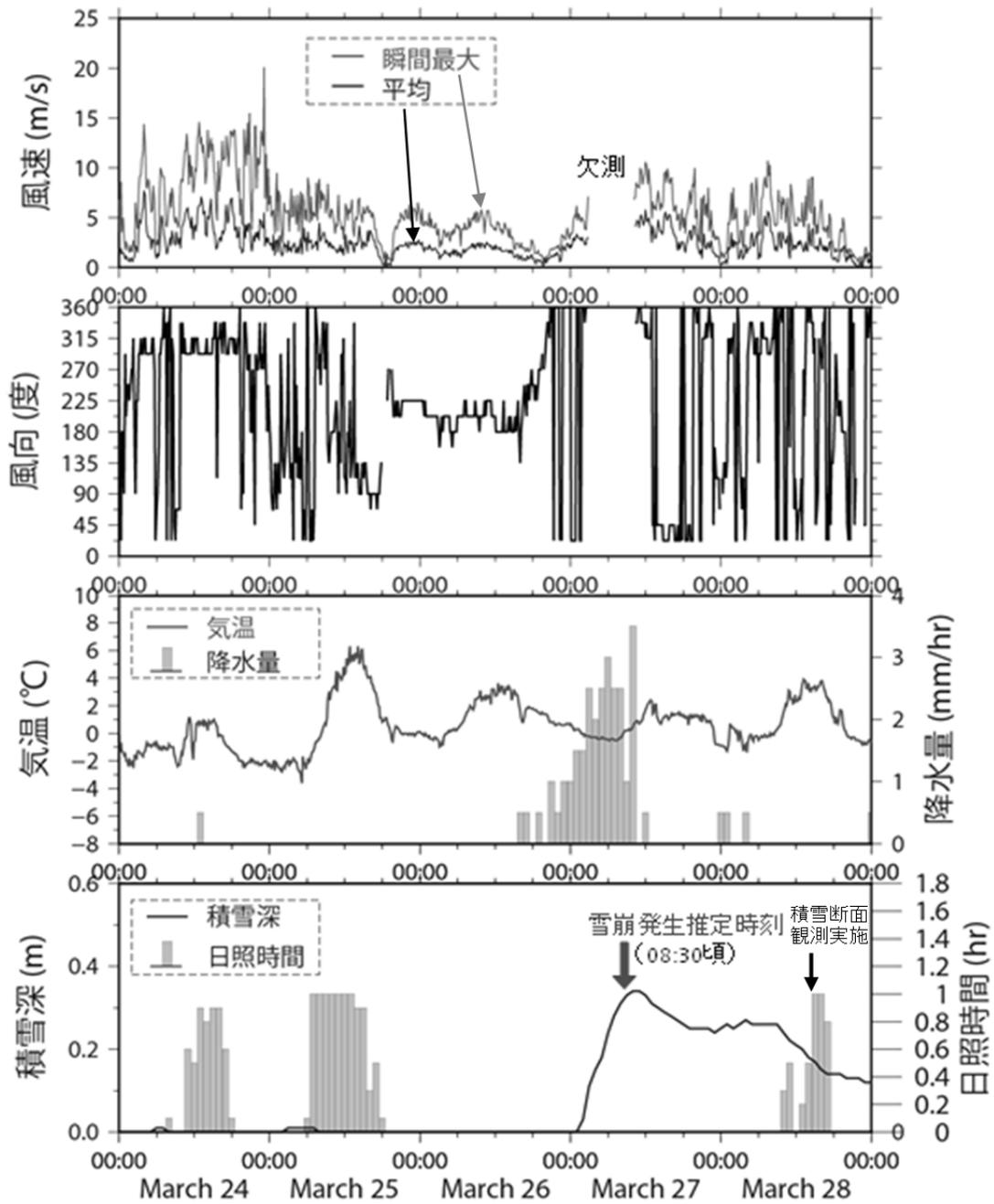


図-5 気象庁那須高原アメダスの3月24日～28日の気象経過
 (那須高原アメダス：3/28積雪断面観測地点から東に約5km，標高749m，
 風向：90度：東，180度：南，270度：西，360度：北)

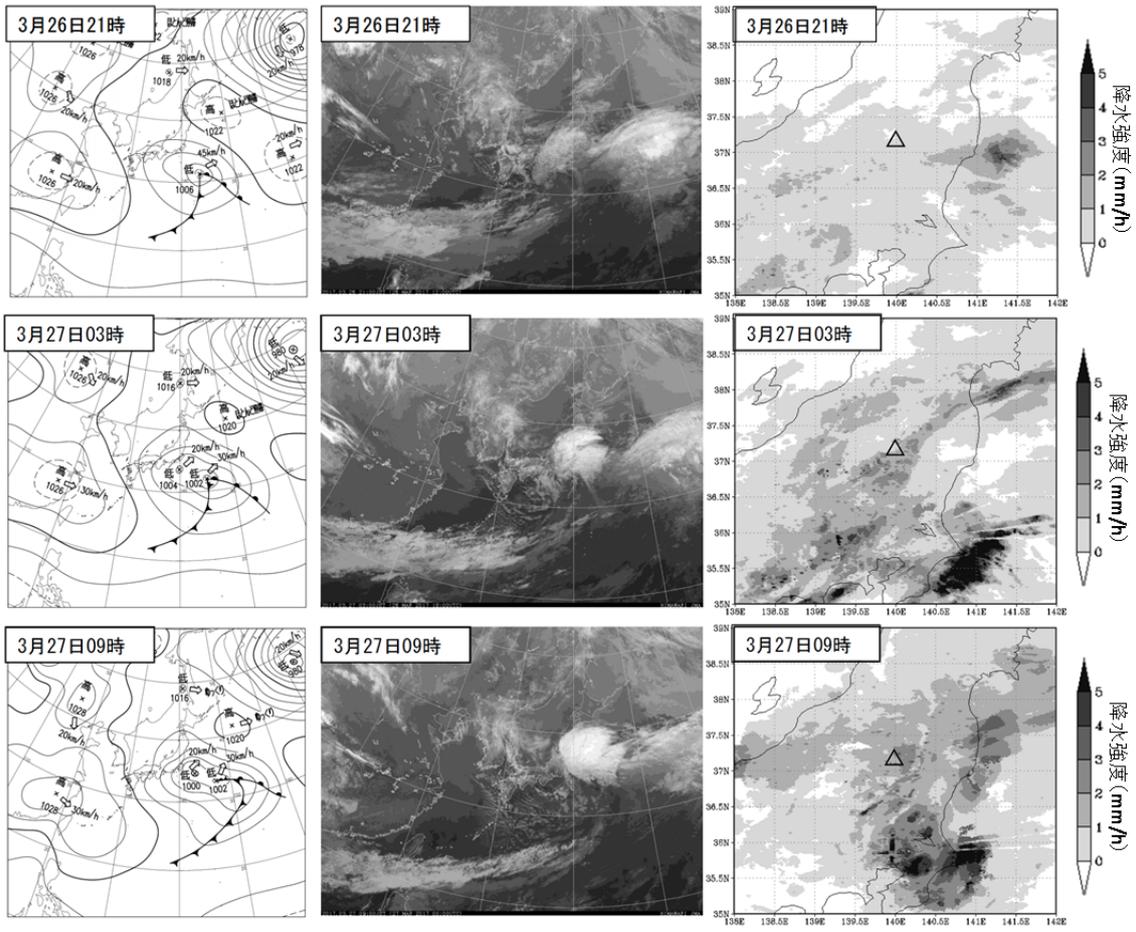


図-6 気象庁地上天気図と気象衛星赤外画像（宇都宮気象台，2017），
及び解析雨量（中心の△は那須岳の位置，GRADSにて作図）

3.2 雪崩痕跡調査結果と考察（4月2日，19日，25日実施）

雪崩痕跡を確認するため，4月2日に，3月28日積雪断面観測地点の上流側を森林限界の標高1,420m付近まで調査を実施した．図-7に示す2つの位置で行ったトレンチ掘削によって積雪表層の断面を確認した．また，図-7に示すポイント①～③の地点で雪崩による積雪層の乱れの有無を確認し，各標高の踏査中に樹木の枝折れ，倒木の有無の確認を実施した．4月19日の調査では，ポイント①～③や標高1,385mの救出活動地点を含む標高1,300～1,420mの樹木の枝折れ，倒木の有無の確認を実施した．また，4月25日の調査では，19日と同様の調査を実施したが，通称天狗の鼻大岩の直下の標高1,490m付近の斜面まで到達し，写真撮影を実施した．

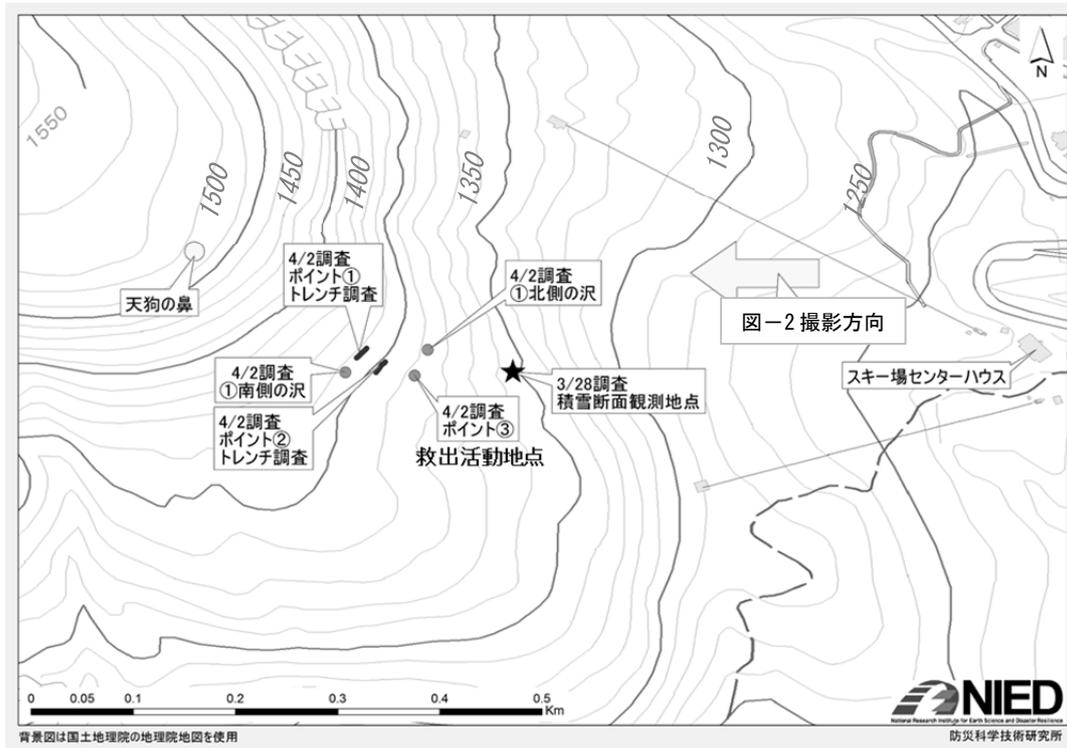


図-7 現地調査地点 ※背景図は国土地理院の地理院地図を使用

3.2.1 ポイント①（2017年4月2日）

ポイント①トレンチ調査地点では沢を横断する形でトレンチを掘削した．同地点の積雪深は2mであった．図-8にポイント①のトレンチの積雪の状態を示す．ポイント①のトレンチでは，3月28日の積雪断面観測の際に，積雪表面から35～37cmの位置に観測されているざらめ雪層と同一と考えられるざらめ層が確認でき，その上に30～50cm程度のしまり雪とこしまり層が観測された．積雪層は通常平行であるべきであるが，図-8に示すように，層の不整合の現象が確認された．この原因として，雪崩流下の削剥が考えられる．また，図-9にポイント①のトレンチの積雪内の樹木の状態を示す．上記ざらめ層の上部の積雪に，雪崩の流下に伴って下流側に押し倒されたと推定される樹木の枝が確認された．これも雪崩が通過した際の痕跡のひとつと考えることができる．

図-10にポイント①北側の沢地点（図-7参照）の積雪の状態を示す．上記ざらめ層の上に周辺の同じ位置の積雪層よりもやや硬い積雪が確認され，雪崩が流下した可能性が高いと判断された．なお，北側の沢ではブロック状の塊のデブリは無かった．図-11にポイント①南側の沢地点（図-7参照）の積雪の状態を示す．南側の沢では積雪層の乱れが確認できず，雪崩の痕跡は確認されなかった．



図-8 積雪の状態 (図-7 ポイント①トレンチ, 2017年4月2日撮影)



図-9 積雪内の樹木の状態 (図-7 ポイント①トレンチ, 2017年4月2日撮影)

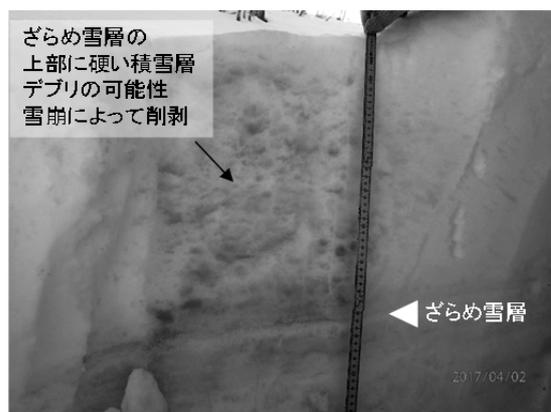


図-10 積雪の状態 (図-7 ポイント①北側の沢, 2017年4月2日撮影)



図-11 積雪の状態 (図-7 ポイント①南側の沢, 2017年4月2日撮影)

3.2.2 ポイント② (2017年4月2日)

ポイント②でも、ポイント①と同様に沢を横断する形でトレンチを掘削した。図-12にポイント②トレンチでの積雪の状態を示す。図-11に示すように、ポイント①と同様のざらめ雪層の上に平らではない積雪層が確認され、その一部はざらめ雪層も削剥していることが確認できる。したがって、この積雪の乱れも雪崩の流下跡と推定される。

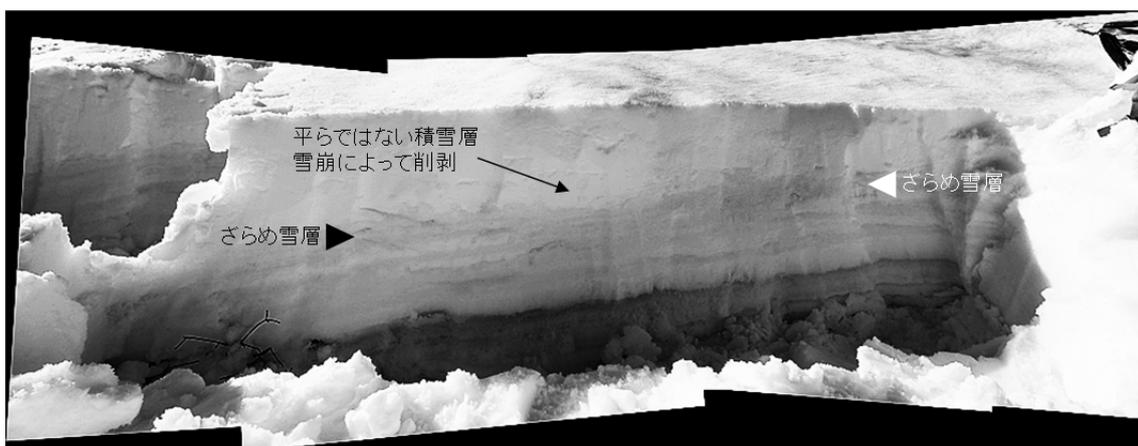


図-12 積雪の状態 (図-7 ポイント②トレンチ, 2017年4月2日撮影)

3.2.3 ポイント③ (2017年4月2日)

図-13 に示すようにポイント③では積雪中に樹木の枝の混入が確認され、また、図-14 に示すように笹などの植生が折れた痕跡などが確認された。これらは雪崩が流下した際の痕跡の一つと考えることができる。図-15 と図-16 に示すように、ポイント③は、上流から見て沢が左側に屈曲している箇所であり、周辺よりも積雪の量が多くなっていた。また、人的に掘り返した痕跡が見られ、救出活動地点であることが推定された。ポイント③周辺では、雪崩が左方向に屈曲したため速度が低下して堆積し、デブリの堆積量が多くなっていたと推定される。なお、ポイント③でもブロック状の塊のデブリは無かった。



図-13 発見した樹木の枝(図-7 ポイント③, 2017年4月2日撮影)



図-14 発見した折れた笹(図-7 ポイント③, 2017年4月2日撮影)

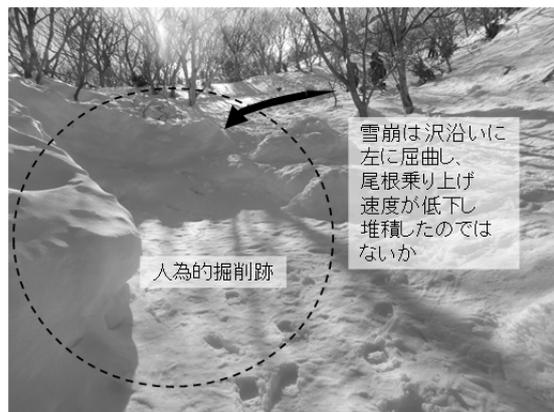


図-15 雪崩の堆積状況 (図-7 ポイント③, 2017年4月2日撮影)



図-16 雪崩の堆積状況 (図-7 ポイント③, 2017年4月2日撮影)

3.2.4 樹木の枝折れ痕跡及び傾斜角調査 (2017年4月19日と25日)

図-17 にポイント②の上部から上流の通称”天狗の鼻”大岩、及びポイント①方向を撮影した写真を示す。また、図-18 にポイント②の上部からポイント③(救出活動地点)方向を撮影した写真を示す。図-17 の A の樹木には雪崩流下の痕跡であると考えられる枝折れを確認した。また、図-18 の B と C の樹木にも、同様に雪崩流下の痕跡であると考えられる枝折れを確認した。ポイント③の救出活動地点から天狗の鼻大岩までは、現地でのレーザー式距離計での測定により直線距離(斜距離)で 241 m、見通し角 31.0 度と計測された。また、ポイント①から③にかけては傾斜角 15~18 度程度であり、天狗の鼻付近からポイント③の救出活動地点までの実際の地形に沿った距離は約 290m と推定された。

図-19 に雪崩の主流路と考えられる沢の樹木の枝折れの状況を示す。いずれも折れた枝の断面の色より、折れてからあまり時間が経過していないと考えられた。枝が斜面下方に落下していたことや枝の折れ方より、斜面上方からの力が枝に加わったと考えられ、3月27日に発生した雪崩の影響で折れた可能性が高いと判断した。左の写真は図-17 に示した A に該当する。また、右

の写真は図-18 に示した C に該当する。両方とも折れた枝は、直径 7cm 程度であった。雪崩の主流路と考えられる沢では、その他の地点も含めて、それより太い枝の折れや倒木は発見できなかった。図-20 に北側の沢の樹木の枝折れの状況を示す。左の写真の枝（図-22 の D）の直径は 1.5cm 程度、右の写真の枝（図-22 の E）の直径は 1.5cm 程度である。北側の沢では、その他の地点も含めて、折れている枝の直径は 2cm 程度が最大で、それより太い枝の折れや倒木は発見できなかった。

図-21 に通称天狗の鼻大岩の直下の 2017 年 4 月 19 日の状況を示す。図-21 に示すように、樹木がない急傾斜の斜面であり、傾斜角は最大 38 度程度である。図-2 と図-7 より、茶臼岳山頂より続く緩斜面がこの天狗の鼻大岩付近で急傾斜に変化し、雪崩の主流路となった沢や北側の沢へ落ち込んでいることが分かる。なお、天狗の鼻大岩直下の斜面の向きは南東から東南東であり、南西～西～北西～北～北東の強風の場合に斜面に雪が吹き溜まる可能性が考えられる。



図-17 図-7 ポイント②上部から上流の通称”天狗の鼻”大岩、及びポイント①方向を撮影（A の樹木には枝折れを確認した、2017 年 4 月 2 日撮影）



図-18 図-7 ポイント②上部からポイント③（救出活動地点）方向を撮影（B と C の樹木には枝折れを確認した、2017 年 4 月 2 日撮影）



図-19 雪崩の主流路と考えられる沢の樹木の枝折れの状況（左：図-17、22 の A、右：図-18、22 の C、2017 年 4 月 19 日撮影）



図-20 北側の沢の樹木の枝折れの状況
(左：図-22 の D, 右：図-22 の E, 2017 年 4 月 19 日撮影)

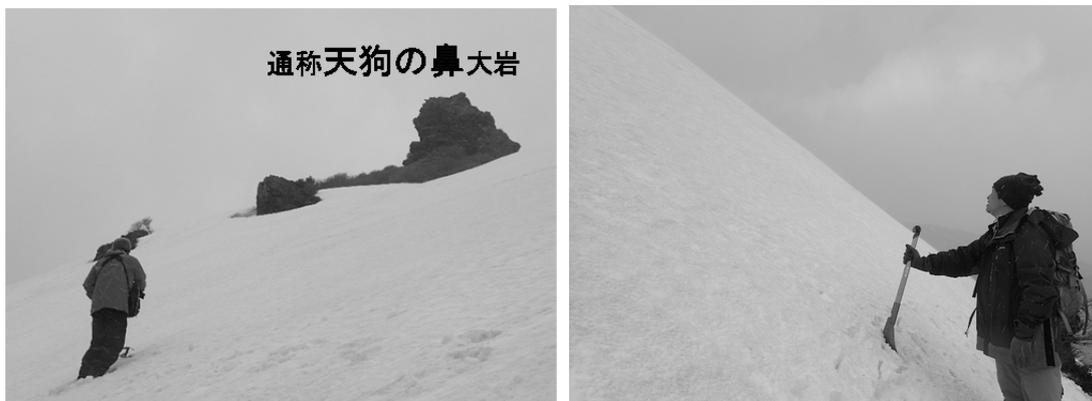


図-21 通称天狗の鼻大岩の直下（標高 1,490m 付近）の状況（2017 年 4 月 19 日撮影）

3.3 雪崩流路に関わる考察

図-22 に雪崩痕跡とその地形縦断図を示す。なお、この図には、樹木の枝折れの雪崩痕跡のほか、ストック、ピッケル、サングラスの拾得物も雪崩の痕跡の証拠としてプロットした。図-22 に示した現地調査結果と国土地理院基盤地図情報 5m メッシュ標高データより、雪崩が発生したと考えられる斜面は、樹林帯を抜けた標高 1,420m 付近から通称天狗の鼻大岩（標高約 1,515m）の間の傾斜角が 30 度～38 度程度の平滑な急斜面で、植生も無く、雪崩の発生しやすい条件を満たしていることが分かる。また、特に標高 1,500m 前後や標高 1,470m 前後は、傾斜角が 38 度前後を示しており、特に急傾斜であることが分かった。図-22 の最も上流側に位置する枝折れの樹木にダメージを与えるためには、ある程度の標高差を流下する必要があることから、雪崩は天狗の鼻大岩下の斜面で発生したと考えられる。3 月 28 日の調査時には、発生区と考えられる天狗の鼻大岩下の斜面は全層の雪が流下して地面が見えるような状態ではなく、積雪が多く残っていたことから、3.1 節で示したように、発生した雪崩の種類は表層雪崩だと推定される。

以上の現地調査結果からおおよそ推定された雪崩到達範囲を国土地理院地図（図-22）に記入した。また、那須岳雪崩発生地全景（図-23）に点線で記入した。天狗の鼻大岩下の発生区では弱層の破壊をきっかけに、弱層の上に降り積もった上載積雪となった新雪が、斜面の傾斜方向に流下したと推定される。さらに、雪崩は、図-22 のポイント①、②を含む沢（主流路の沢）地形を流れ下り、流下中に弱層の下の新雪・こしまり雪層も巻き込んで（図-8 と図-10 のトレンチ調査結果参照）雪崩の質量が大きくなることで流下速度が上昇したと推定される。流路の途中では、雪崩は、ざらめ雪層も巻き込みながら流下した（図-12 のトレンチ調査結果参照）と考えられる。沢地形の幅が狭くなり左に屈曲しているポイント③地点付近で雪崩の速度が低下した堆積区では、ブロック状の塊ではなくサラサラの粒子状のデブリとして堆積したと推定される。図-22 の枝折れ痕跡と拾得物の位置により、主流路の沢では、少なくとも標高 1,380m 付近までは流下したことが確認された。また、発生した表層雪崩は図-22 に示すように北側の沢にも流下し

たと考えられる。図-22の枝折れ痕跡と拾得物の痕跡により、北側の沢では、表層雪崩は少なくとも標高1,370m付近までは流下したことを確認できた。

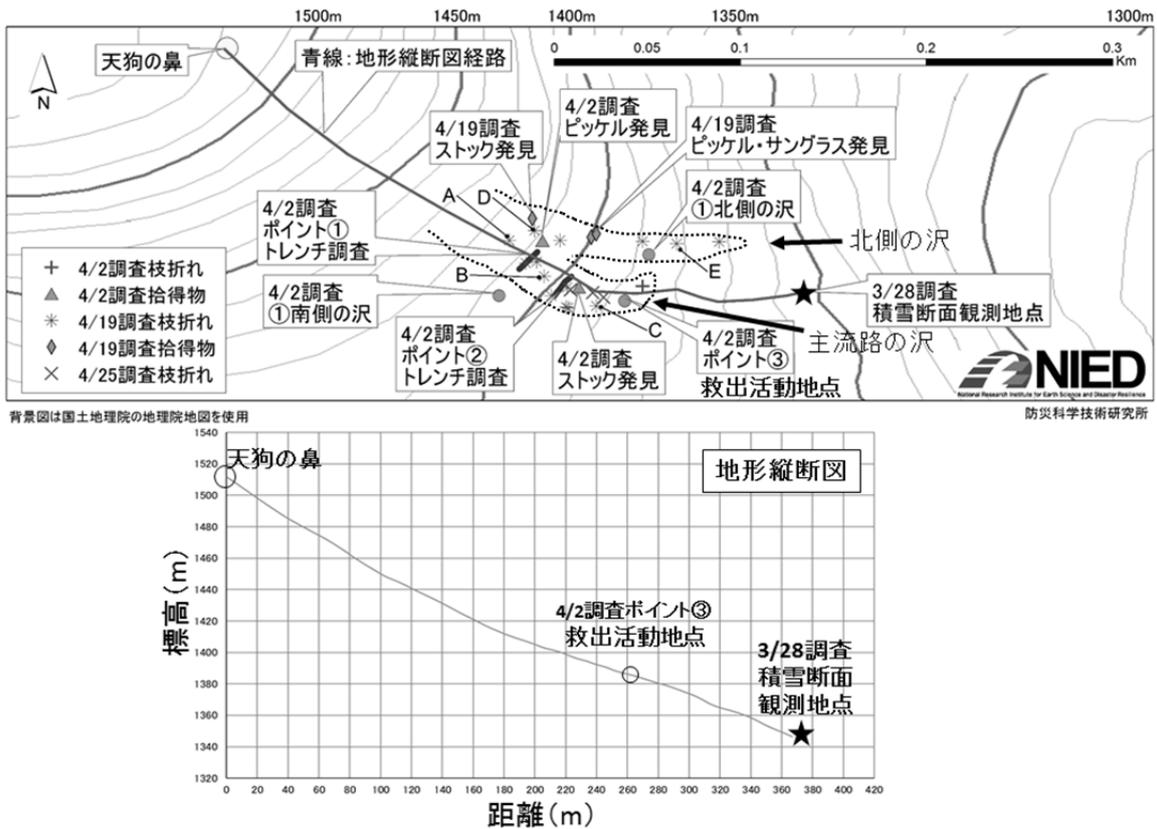


図-22 雪崩痕跡とその地形縦断図（点線はおおよその雪崩到達範囲，A～Eは図-17～図20に示した枝折れが認められた樹木の位置）
（国土地理院基盤地図情報5mメッシュ標高より）

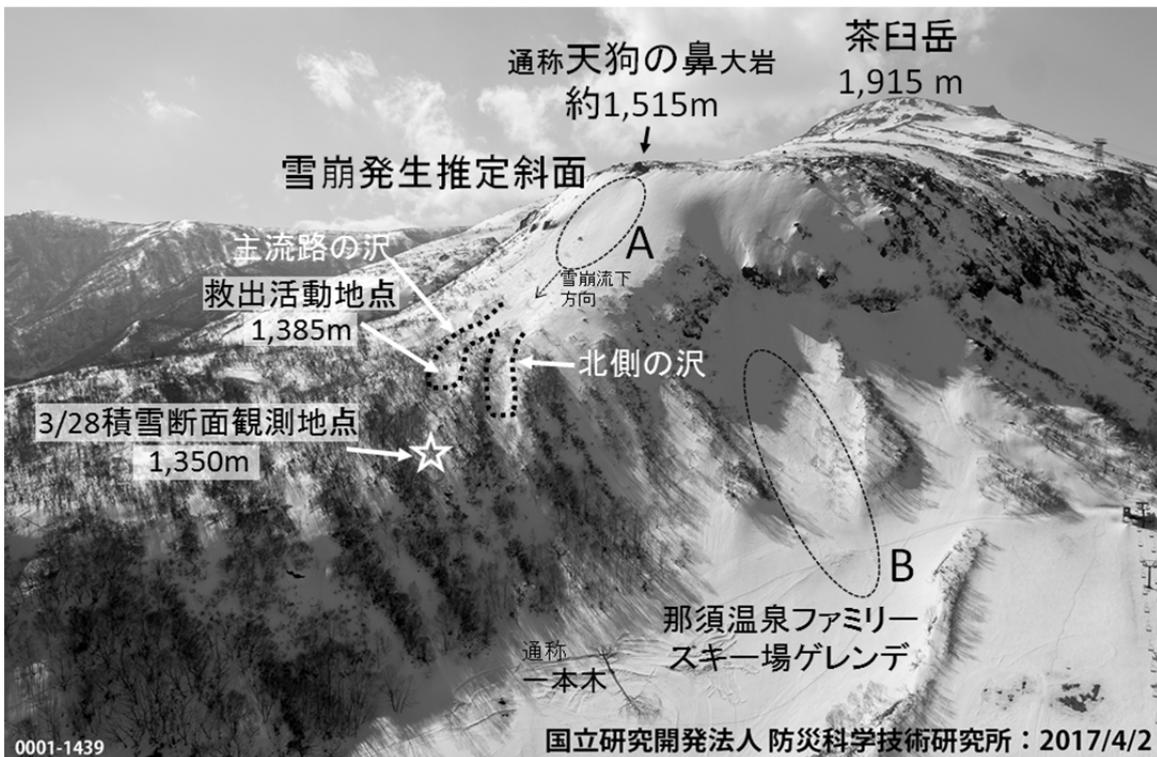


図-23 那須岳雪崩発生地全景（図-2に点線で示したおおよその雪崩到達範囲を記入）

3.4 聞き取り調査

那須山周辺の雪崩発生状況に詳しく、事故当日に救助活動を行った那須山岳救助隊副隊長に聞き取り調査を行った。また、当日雪崩に遭遇した一部の生徒への聞き取り調査も2017年10月から開始しているが、現時点ではまだ不十分であるので、今後も継続して調査を実施し、結果がまとまった段階で公表する予定である。

3.4.1 那須山岳救助隊副隊長に対する聞き取り調査

1) 実施日

那須山岳救助隊副隊長への聞き取り調査を2017年7月8日と2018年2月10日の2回実施した。

2) 聞き取り結果

2017年3月27日の救助活動の状況について聞き取りを実施した。当日の救助活動の状況を以下の3つのフェーズ及びその他の事項に分けて整理した。

【第1フェーズ：那須町の自宅から那須温泉ファミリースキー場のヒュッテまで】

9:40頃 那須山岳遭難防止対策協議会（以下遭対協）メンバーから「スキー場で雪崩があり2~3名が巻き込まれた」という電話があった。すぐに遭対協の連絡網に従い電話で連絡を回した。2~3分後、那須山岳救助隊隊長から電話があり、出動要請があった。

10:00前頃 10分くらいで支度をして、自分の四輪駆動車に乗って自宅を出た。自宅付近でも雪が降って真っ白になっていた。標高が高くなるほど雪が多くなっていった。

10:30~35頃 スキー場下の鉄の階段がある県道脇の駐車場に車を止めた。スキー場は営業期間を終了し除雪されていないので、何度も前後に車を動かし駐車スペースを確保した。この時は、山に向かって右側のスキー場内の斜面（時々雪崩が到達する場所）まで雪崩が到達して、スキー愛好家がゲレンデで数名巻き込まれた程度だと思っていた。高校生が巻き込まれたとは思っていなかった。そこに高校生や引率の先生が50名程度もいることは知らなかった。

【第2フェーズ：スキー場ヒュッテから救出活動地点到達まで】

10:30~35頃 すでにヒュッテに隊長がいた。遭難場所は、ゲレンデではなくて、ゲレンデ内の一本木付近（図-2及び図-23参照）からゲレンデ外の斜面を上った所のことだった。救助隊員として、ヒュッテには、自分と同じ役割のもう一人の那須山岳救助隊副隊長がいた。その他に、警察の方が5~6名程度、消防の方が5~6名程度いた。吹雪で、膝くらいまでの新雪があるから、スキー場の圧雪車でゲレンデ内を圧雪してもらい、その後を歩くようにした。圧雪車を動かすまで5~10分位かかった。那須山岳救助隊は2名、警察の方3名程度、消防の方2~3名程度とともに、現場に出動した。警察と消防の方はやや遅れ気味であった。吹雪でやや視界が悪かった。隊長は本部の役割としてヒュッテに残った。なお、毎年遭対協として、山岳救助隊、警察、消防の訓練を実施しており、2017年は3月2日に実施したばかりであった。遭難の対応の場合は、事前の取り決めにより3者で動くことにしている。また、連絡手段として、無線（と携帯電話）を持参した。この時点で遭難場所がはっきり分からないので、本部の隊長と無線で随時連絡を取りながら行動した。足の速い我々山岳救助隊が先頭で、次に消防の方、その後警察の方の順に進んだ。警察の方は遅れていたから、話をして吹雪で聞こえないくらいだった。高校生達のトレースは吹雪で消えていたようだった。遭難のポイントは分からなかったが、一本木を目指してまっすぐに行くように本部の隊長から指示をうけていた。ただ隊長もこの時点では遭難場所ははっきり分かっておらず、無線で、右や左に行くようにと指示を受けた。ゲレンデ外の斜面を登り始めて、笛を吹き、声を出したが、何の反応もなかった。遭難していると思われる沢を大声で呼びかけながら登っていくと、

吹雪中でぼやっと人が手を振っているのが見えた。これを見て遭難はこの沢の上で起こったことで間違いないと確信した。

【第3フェーズ：救出活動地点での救出活動から終了まで】

11：45頃以降

救出活動地点に到着すると、雪に半分埋まっている3名くらいの人が見えた。また、さらに上の斜面に放心状態で座っている人が3～4名程度見えた。おそらく雪の中から這い出したか、仲間や先生に救助され、木を背中にして斜面の下を向き座っているような状態であった。遭難して助かった先生や高校生達の中で、スコップを持っている人はスコップを使って自分達でできる範囲の救出のための雪の掘り出しをやっていたようだった。雪は硬くなく、固まったブロック状ではなく、サラサラであった。したがってスコップで掘りやすい雪ではあった。斜面の上方を見て右上の15～20mほど離れた救出地点の沢と2班が流された北側の沢の間の尾根状の地点に7、8名の方が避難しているのが見えた。最初に、体が半分出ていた3名を掘り出した。唇が真っ白で心肺停止の状態のように見えた。その作業をしていたら、3名が埋まっていた場所の少し上側の雪の中から「うー」とか「おー」という、うめき声が聞こえた。斜面の上方に向かって左側に頭があり、右側に足があるような埋まり方であった。その人を掘り出したら、唇に血の気があった。声をかけたが無反応であった。苦し紛れに声を出していたような感じであった。まずは、この人を優先的に下山させようという方針を決定した。手袋が脱げていたが、手を握った状態で力が入っており、手袋が入りづらかった。眠らないように声をかけたり、ほっぺたをたたいたりしながら、ブルーシートに包んで下山させる準備作業をした。作業しているうちに、他の救助隊員も到着した。山岳救助隊、消防、警察の3者で協力して、この生存者を一番目に下山させた。引き続き付近を掘ると、それまで見つかった4名も含めて10m四方前後くらいのエリアで埋まっている人が次々と見つかった。その付近は、雪がたまりやすいところだったように感じる。頭が斜面の上方や下方、右向きや左向きにのようにはばばらの方向を向いて埋まっており、だいたい1～2m弱くらいの深さに埋まっていたように思う。血の気があったのは、うめき声があった人一人だけであった。残りの8名は血の気は無かった。引率の先生だと思われる方に何度もこれで全員なのか確認した。次に、自力で下山することができない重傷者を下山させることにした。ブルーシートで重傷者を包んでロープを使って4点確保で下山させた。包んでいるときに、足や胸が痛いなどと言っていたのを聞いている。重傷者が先生なのか生徒なのか分からなかった。4番目の重傷者を包んで、私（聞き取り調査をした山岳救助隊副隊長）がこの重傷者を搬送しながら下山したのは、14時前くらいだった。この時にはすでにヒュッテ1階に医者が来ており、重傷者を引き渡した。私（副隊長）が下山後も何人かをこの方法で下山させていた。怪我をした人のうち、最後の人が下山したのは、15時頃だった。ゲレンデまではブルーシートを引っ張り、ゲレンデ内は、スノーボードに乘坐代えて、スノーモービルで引っ張って搬送した。そのうち、自衛隊の方なども到着した。掘り起こしの救出活動は終了していたため、その後の8名の搬送などは自衛隊の方などに任せようということになった。8名の搬送完了は17時過ぎだった。遭対協のヒュッテでの活動が終わって解散となったのは17時20分頃だった。帰りは、車のパワーウインドが凍っていたくらい寒かった。

【その他の事項】

- ・雪崩遭難発生個所は雪崩の発生しやすい危険斜面であり、周辺にも数か所の雪崩発生、事故の記録がある。
- ・これらの記録を整理して今後の事故防止に役立てるのがよいと考える。
- ・雪崩発生が8時30分頃であるから、助かった一人は、3時間以上雪の中において、よく無事だったと感じる。

- ・救助活動を行っていた時は、視界があまり無かったが、天狗の鼻大岩が見えていたかどうかは分からない。
- ・一本木は、昔、この木の付近まで流れてきた雪崩で一人が亡くなったこと忘れないという目的で、伐採しないでゲレンデ内に残している。

3.4.2 聞き取り調査から整理した救出活動時の位置関係

第3フェーズ救出活動に関わる聞き取りから、2017年3月27日の救出活動時における救出活動地点付近の位置関係を図-24～図-26に整理した。

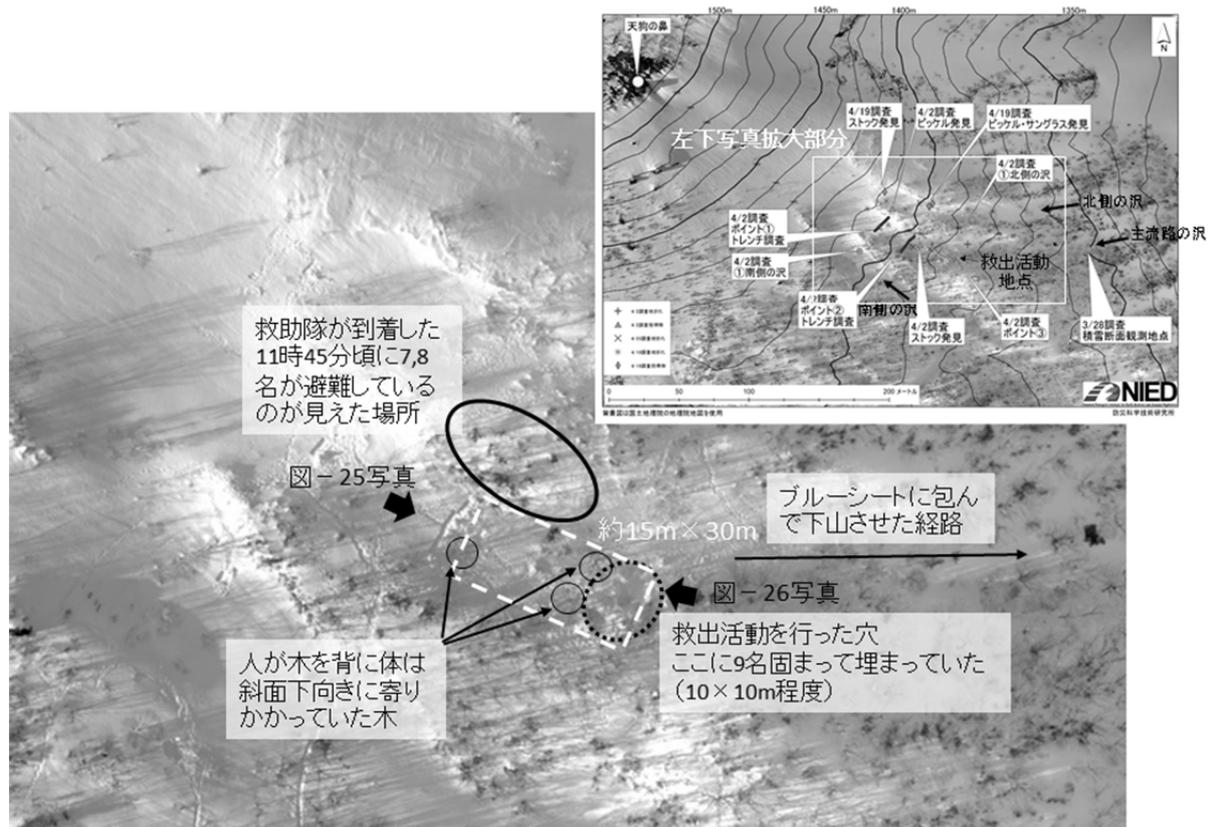


図-24 那須山岳救助隊副隊長への聞き取り調査から作成した救出活動地点付近の位置関係 (ベースの空中写真は2017年4月2日に無人航空機にて防災科研が撮影)



図-25 那須山岳救助隊副隊長への聞き取り調査から作成した救出活動地点付近の斜面上方から見た位置関係 (ベースの写真は2017年4月2日に防災科研が撮影)



図-26 那須山岳救助隊副隊長への聞き取り調査から作成した救出活動地点付近の斜面下方から見た位置関係 (ベースの写真は2017年4月2日に防災科研が撮影)

3.5 まとめと今後の課題

3.5.1 まとめ

2017年3月27日8時30分頃(推定時刻)、栃木県那須郡那須町の那須岳で雪崩が発生した。当該山岳地にて春山登山研修中の高校生と教員が雪崩に巻き込まれ、死亡8名、重症2名、中等症・軽症38名の被害となった。

現地の雪崩跡および積雪が時間経過とともに変質する前に現地調査を行い雪崩の状況を明らかにすることを目的として、3月28日午後に、雪崩が流下して事故があったとされる沢をスキー場のゲレンデから登り、遭難地点近くの標高1,350m、傾斜角35度の東向き斜面で積雪断面観測を実施した。その結果、積雪表面から22~25cm下の新雪・こしまり雪層中に雲粒の付着の少ない板状等の降雪結晶の弱層が検出された。弱層の密度は50kg/m³前後、硬度は1.0kPa前後(最低0.8kPa)であった。地上天気図や近隣の那須高原アメダス等の気象観測データを用いて、積雪断面観測結果を考察した。その結果、この弱層は、本州の南岸を北東に進む低気圧に伴う3月26日~27日の降雪中に、降ってくる結晶の形状が雲粒の付着の少ない比較的大型の板状結晶により形成されたと推定された。さらにその後、同じ低気圧からもたらされた比較的短時間に強い降雪が上載積雪となって積雪が不安定になり、表層雪崩が発生したと推定された。

表層雪崩発生後も風雪が続き地吹雪が生じ、28日の現地観測時には破断面などの表層雪崩発生痕跡は分かりづらくなってしまったことが考えられる。破断面等の直接的な積雪上の証拠は無いが、積雪内に雲粒なし板状結晶の弱層が存在し、積雪内に弱層を伴い非常に不安定な状態になっていたと推定され、3月27日8時30分頃に発生した雪崩は、面発生乾雪表層雪崩である可能性が高いと判断される。

2017年4月2日、13日、19日、25日にも現地で積雪調査(積雪深、積雪断面観測)、雪崩の痕跡調査、無人航空機による空撮等を行った。また、当日現地で救助を行った那須山岳救助隊副隊長への聞き取り調査を2017年7月8日と2018年2月10日の2回実施した。その結果、表層雪崩は樹林帯よりも上部のオープンな斜面に位置する通称「天狗の鼻」大岩(標高約1,515m)の下の斜面(傾斜角30~38度)で発生し、少なくとも樹林帯に位置する2つの沢に流下したことが推定された。また、雪崩の堆積区では、ブロック状の塊ではなくサラサラの粒子状のデブリとして、少なくとも厚さ1~2m程度は雪崩の雪が堆積したと推定された。

図-2に示した斜面Bでは、自然発生と考えられる表層雪崩のデブリや流下の後が確認できた。積雪断面観測結果とこの斜面Bの自然発生の表層雪崩の痕跡から、2017年3月27日の那須岳付近の積雪は不安定な状態にあったと判断される。これらの状況から、平成29年3月27日那須雪崩事故検証委員会報告書(2017)に示されているように、現時点では、3月27日に大きな被害を生じた図-2の斜面Aの表層雪崩は、不安定な積雪の斜面から自然発生した可能性と、不安定な積雪の斜面に人が入り込んだために発生した可能性の両方があると考えられる。

平成29年3月27日那須雪崩事故検証委員会報告書(2017)の各班の行動の調査結果と本報告の調査結果を合わせて考察すると、主流路の沢では、天狗の鼻大岩の下の斜面を登坂していた1班のメンバー、北側の沢では2班のメンバーが雪崩に巻き込まれたものと推定された。一方、1~4班の被災位置や被災状況については、さらに検討が必要であると判断された。

3.5.2 課題と今後の予定

現地調査、聞き取り調査等で雪崩の概要が明らかになってきたが、雪崩発生区の場合と発生直後の雪崩の流路、そして被災位置や雪崩発生のトリガーの詳細は未だ課題である。そのため、雪崩発生時の状況の確認については、現在も調査を継続中である。

本調査を進める中で、これらの課題を明らかにするには、雪崩の特徴と現地の特徴を理解する者が、直接雪崩に遭遇した方へ聞き取りを行う調査が不可欠と判断するようになった。そのため、2017年度途中から一部の聞き取り調査を開始している。2018年度に進める予定のさらなる聞き取り調査の結果と本報告書で明らかになった現地調査結果から、雪崩発生区の場合と発生直後の雪崩の流路、そして雪崩発生の詳細について慎重に検討し、公表する予定である。

謝辞

聞き取り調査を行わせていただいた那須山岳救助隊副隊長ならびに事故遭遇者の方には貴重な証言を頂いた。また、平成29年3月27日那須雪崩事故検証委員会の戸田芳雄委員長や委員の

皆様，及び栃木県教育委員会には，栃木県の気象及び積雪観測データなど関係資料の収集でご配慮を頂いた．また，ほかの多くの皆様にも調査にご協力いただいた．ここに感謝申し上げます．

引用文献

- 1) McClung D. and Schaerer P., 2006 : The avalanche handbook 3rd ed., The Mountaineers Books, Seattle, WA. 271pp.
- 2) 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男・福沢義文，1986：降雪時の高い地吹雪の発生臨界風速，昭和 61 年度日本雪氷学会全国大会予稿集，pp.256.
- 3) 宇都宮气象台，2017：平成 29 年 3 月 26 日から 27 日にかけての大雪に関する栃木県気象速報，http://www.jma-net.go.jp/utsunomiya/img/20170327sokuhou_ooyuki.pdf（最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日）．
- 4) 平成 29 年 3 月 27 日那須雪崩事故検証委員会，2017：平成 29 年 3 月 27 日那須雪崩事故検証委員会報告書，http://www.pref.tochigi.lg.jp/m01/documents/20171015_houkokusyo.zip（最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日）．

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¹⁾, 鈴木比奈子¹⁾, 上石勲²⁾, 中村一樹²⁾
S. Uchiyama¹⁾, H. Suzuki¹⁾, I. Kamiishi²⁾, K. Nakamura²⁾

¹⁾防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

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

²⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

²⁾ *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。

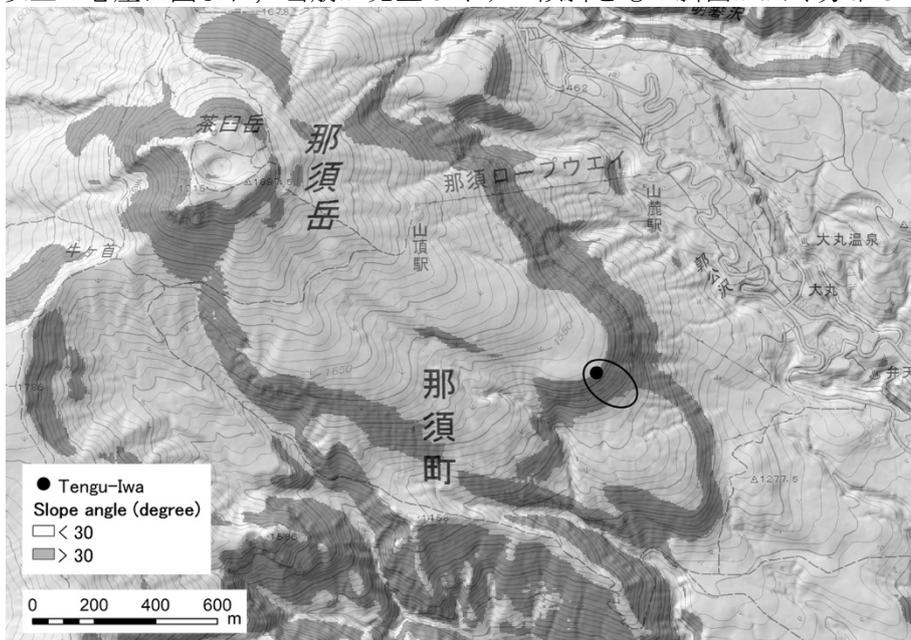


図 1 茶臼岳周辺の地形概略図（背景は地理院地図。黒丸は天狗岩、円内は雪崩が生じた斜面）

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。

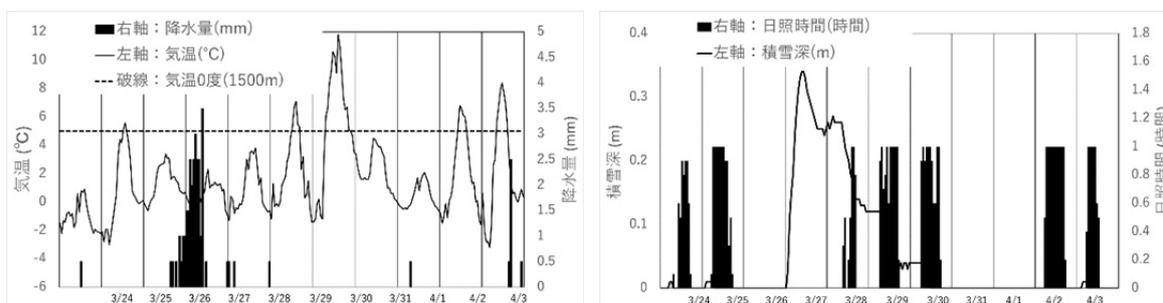


図 2 アメダス観測点「那須高原」の観測値 (2017 年 3 月 24 日～4 月 3 日)
左：降水量，気温，右：日照時間，積雪深

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 ° 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
Total	0.83	1.75	0.34	1.97	p	-1.86	-1.77	-0.22	2.58
					Total	1.00	2.79	0.84	3.08

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

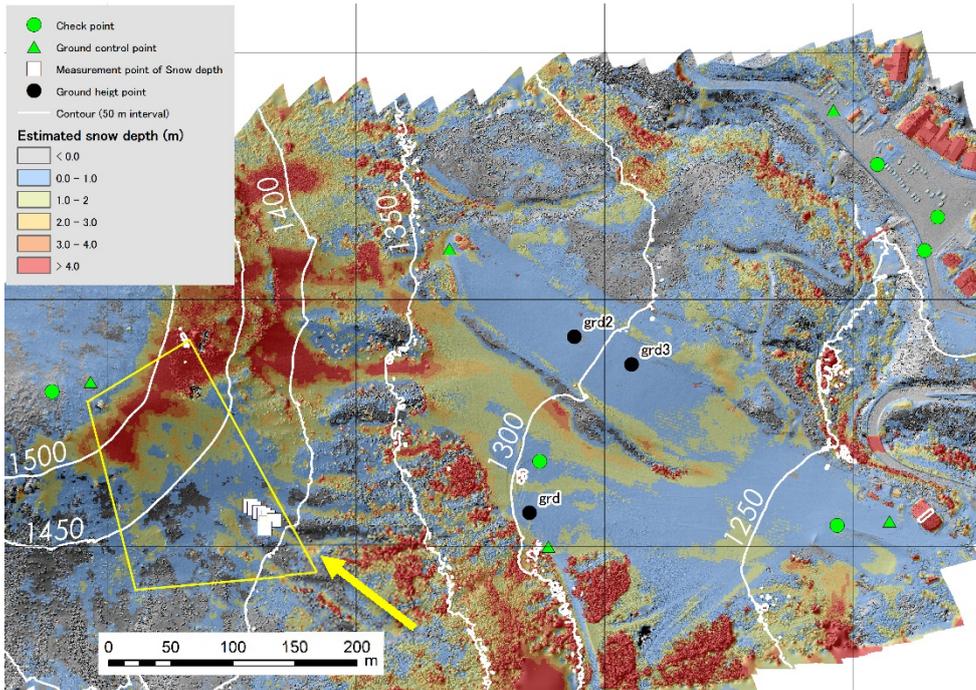


図4 雪崩発生エリア周辺の推定積雪深 (ESD) 図 (巻末にカラー図を示す)

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.

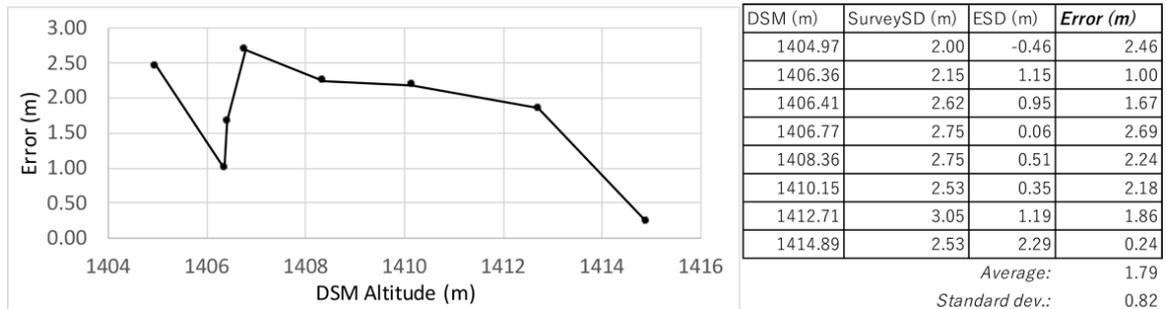


図 5 実測積雪深 (SurveySD) と ESD との差 (Error)



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
- ・ 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)

2017年3月27日に那須岳で雪崩災害をもたらした積雪の力学的特性 Characteristics of snow cover causing an avalanche accident at Mt. Nasu on March 27, 2017

河島 克久¹⁾, 松元 高峰¹⁾, 渡部 俊¹⁾, 西村 浩一²⁾
K. Kawashima¹⁾, T. Matsumoto¹⁾, S. Watabe¹⁾, K. Nishimura²⁾

¹⁾ 新潟大学 災害・復興科学研究所

¹⁾ *Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University*

²⁾ 名古屋大学大学院 環境学研究科

²⁾ *Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University*

Abstract: Aiming at clarifying characteristics of snow cover causing avalanche accidents at Mt. Nasu and Mt. Adataro on March 27, 2017, snow pit works were conducted with special attention to the type of snow crystal and the strength of snow. Consequently, it was found that the snow layer formed by extratropical cyclons passing along the Pacific Ocean side of Japan on March 26-27 includes a lot of plate crystals and column crystal without cloud droplet. The above-mentioned snow layers are characterized by less snow-hardness in comparison with snow layers formed by northwesterly winter monsoon at regions along the Sea of Japan, which is related to the occurrence of avalanche accidents.

Key words: snow pit work, characteristics of snow cover, snow hardness, snow crystal

1 はじめに

2017年3月26日から27日にかけて、日本の南を通過した低気圧（南岸低気圧）や伊豆諸島付近に発生した低気圧の影響により、関東甲信地方の山地を中心に大雪となった地域があった。その中で、3月27日午前8時30分頃に栃木県那須町の那須岳（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、高体連登山専門部会主催の「春山安全登山講習会」に参加していた高校生と教員が巻き込まれ、死者8名、重症2名、中等症・軽傷38名を出す事態となった（平成29年3月27日那須町で発生した雪崩事故について（第9報）、栃木県県民生活部危機管理課）。著者らは、この雪崩災害をもたらした積雪の力学的特性や降雪結晶の特徴を調べることを目的として2017年4月3日に現地調査を実施した。また、那須岳から北北東方向に約60 km離れた安達太良山（福島県）でも3月27日午後1時頃に雪崩災害が発生しており（死者1名）、この事例に関しても降雪結晶の特徴を調べることを目的として3月29日に現地調査を行った。

2 調査地点

那須岳における調査位置を図-1に示す。調査では、那須ロープウェイ山頂駅（標高1690 m）から登山道の牛ヶ首山頂分岐（1718 m）まで登り、この分岐点近傍の那須岳（茶臼岳）南東斜面（標高1716 m）で積雪断面観測と積雪試料の採取（積雪粒子の撮影のため）を行った。調査地点は被災地点よりも標高が約300 m高い。これは、発災から1週間経過した時点での調査であることから、高標高地点の方が積雪の変質が少ないと考えたためである。一方、安達太良山では、標高約1220 mの鷺倉温泉において積雪断面観測（表層部のみ）と積雪試料採取を行った。

3 アメダス那須高原のデータからみた気象の推移

被災地点から東に約5.3 km離れた気象庁・アメダス那須高原（図-1、標高749 m）における気象の変化（2017年3月24日～4月3日）を図-2に示す。アメダス那須高原では3月27日2:00から積雪深の増加が認められ（アメダス那須高原よりも高標高地点では3月26日夜

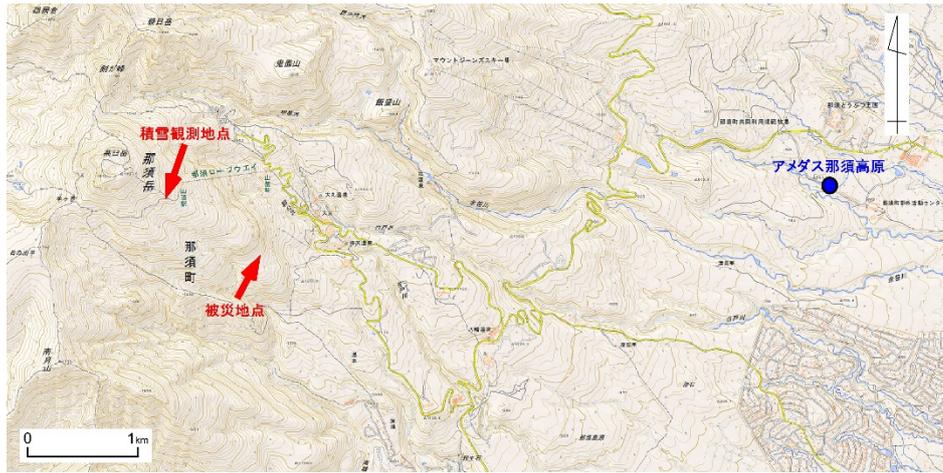


図-1 積雪観測地点，被災地点，アメダス那須高原の位置（国土地理院「地理院地図」画像を使用）。

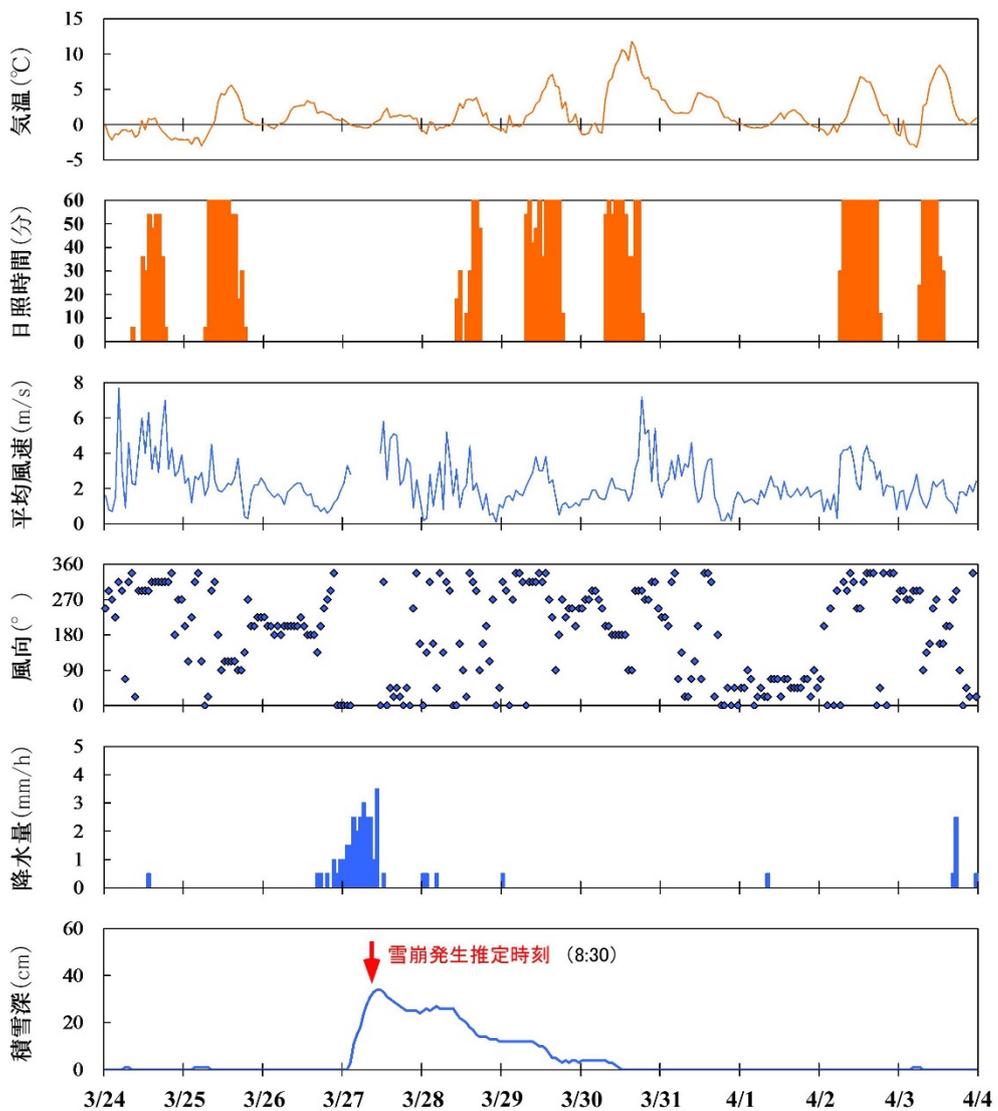


図-2 アメダス那須高原における気象推移（2017年3月24日～4月3日）。

から降雪があったものと考えられる), 被災時刻に近い同日 9:00 には 33 cm に達している. 降雪時間帯の風向風速は, 3 月 27 日 3:00~10:10 が欠測のため不明な点が多いが, 欠測時間帯前後のデータから見る限り, 北寄りの風で風速 (10 分間平均) は 4 m/s 前後はあった可能性がある. 降雪時の気温は 2:10 から 8:20 までマイナス (-0.5~-0.1°C) であり, 降雪は乾雪が主であったと考えられる.

雪崩発生後の気象に着目すると, 日照時間から分かるように 3 月 29 日と 30 日は晴天であり, 気温もそれぞれ 7.8°C, 11.8°C まで上昇している. 3 月 31 日からは天気が下り坂になり, 聞き取り調査の結果, 4 月 1 日には那須温泉ファミリースキー場周辺では降雪がもたらされたことが分かった (標高の低いアメダス那須高原では降雪なし). その後, 4 月 2 日から 4 月 3 日午前までの天気は晴であり, 調査を行った 4 月 3 日午後には曇から雪へと変化した.

4 調査結果

4.1 積雪層構造と降雪結晶の特徴

那須岳南東斜面で行った積雪断面観測の結果を図-3 に, 積雪断面の写真を図-4 に示す. 図-3 において積雪深は斜面に垂直に測定している. 地上高 0~24 cm の積雪はざらめ雪 (一部こしもざらめ雪) であり, 汚れを含んでいることから, 3 月 26~27 日の大雪の前から堆積していた古い雪であると判断できる. 前章の気象の推移と照らし合わせると, 地上高 24~64 cm の積雪が 3 月 26~27 日の大雪によってもたらされたものであり, この内, 上部 4 cm (地上高 60~64 cm) は 3 月 29 日~30 日の晴天時の融解によってざらめ化したと考えられる. また, 地上高 64~90 cm の積雪が主に 4 月 1 日に降った雪であり, この内, 上部 4 cm (地上高 86~90 cm) は 4 月 2 日から 4 月 3 日午前までの晴天時の融解によってざらめ化したとみなすことができる. 雪温はほぼ全層にわたってマイナスであり, 3 月 26~27 日の積雪は上部 4 cm を除いて温暖変態の影響をあまり受けていないと言える. 3 月 26~27 日の大雪に対応する地上高 24~60 cm のしまり雪層に着目すると, その密度は地上高 45 cm を除くと 255~288 kg/m³ の範囲であるが, 地上高 45 cm だけが小さく 235 kg/m³ であった. また, この層の硬度 (デジタル式荷重測定器 (プッシュゲージ) による測定) は 28.9~64.9 kPa の範囲であり, 密度の小さい地上高 45 cm の硬度が極めて小さいことが明らかになった. 密度・硬度ともに極めて小さかった地上高 45 cm の積雪の粒子をほぐし, 接写した写真を図-5 に示す. この高さの積雪は比較的大きいサイズの板状結晶のなごりを有する雪粒子を多数含んでいることが特徴であった.

次に, 安達太良山 (鷲倉温泉) で行った積雪断面観測の結果を図-6 に, 積雪断面の写真を図-7 に示す. 観測地点近傍における気象の推移 (アメダス鷲倉 (標高 1220 m) 及び新潟大学白糸の滝駐車場観測点 (標高 1120 m), 図省略) と照らし合わせた結果, 雪面から 8~29 cm の深さの積雪層が 3 月 26~27 日の低気圧性の降雪に対応しており, 雪温がマイナスであること等から堆積後に温暖変態の影響は受けていないものと考えられる. 3 月 26~27 日の降雪に対応する積雪層の粒子をほぐし, 接写した写真を図-8 に示す. この積雪層には, 雲粒付着のほとんどない板状結晶や柱状結晶が多数認められた.

4.2 低気圧性の降雪による積雪層の硬度の特徴

地上高 24~60 cm のしまり雪層の密度と硬度の関係を図-9 に示す. 硬度は密度の増加に伴って急激に増加する傾向が認められる. 図中の破線の曲線は, Tekeuchi *et al.* (1998) 及び竹内ら (2001) が, 日本海側の多雪地域 (主に冬型気圧配置時の降雪) において得た乾いたこしまり雪・しまり雪の密度 ρ (kg/m³) と硬度 H (kPa) の経験式であり, 次式で表される.

$$H = 1.31 \times 10^{-8} \rho^4 \quad (1)$$

本調査で得られた硬度の多くは式(1)の曲線よりも下側に位置しており, 今回の低気圧による積雪には日本海側地域の経験式が適合しないことが分かる. 乾いたこしまり雪・しまり雪の硬度は密度の 4 乗に比例することは古くから知られているので (木下, 1960), これに従って今回の測定値に最適な経験式を求めると, 図-9 に実線で示した式(2)が得られた.

$$H = 9.23 \times 10^{-9} \rho^4 \quad (2)$$

那須茶臼岳南東斜面
 標高 1716m
 2017/04/03
 14:10 - 14:50
 曇ときどき雪
 気温 : -2.7 °C
 積雪深 : 90 cm

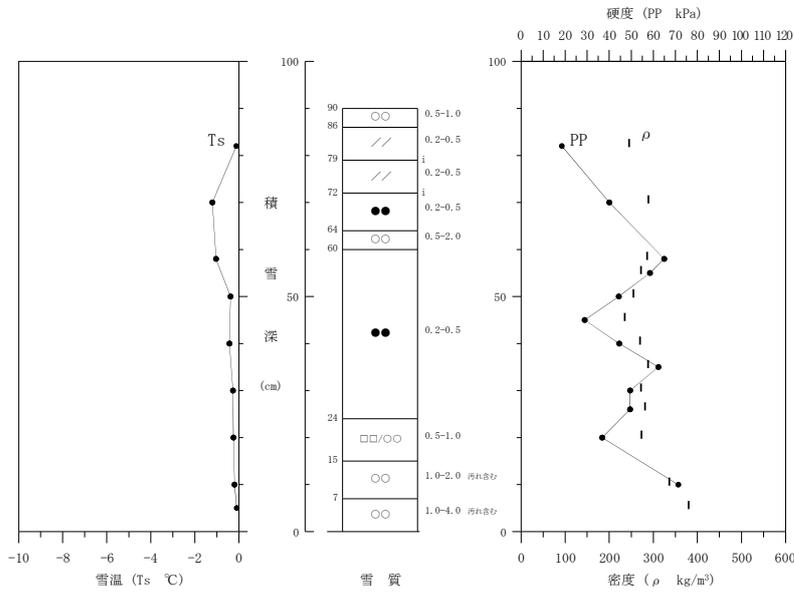


図-3 那須岳南東斜面における積雪断面観測の結果.

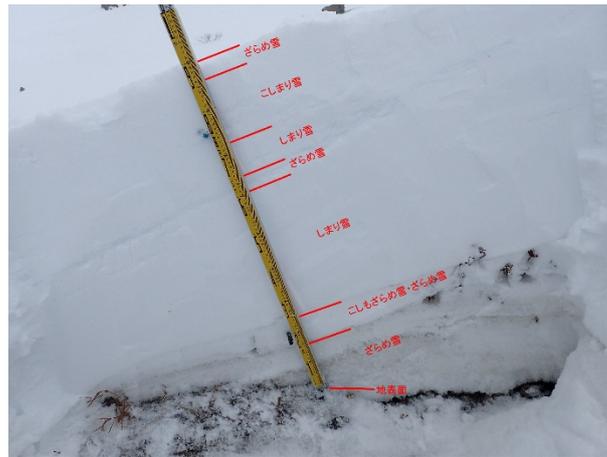


図-4 那須岳南東斜面における積雪断面の写真.

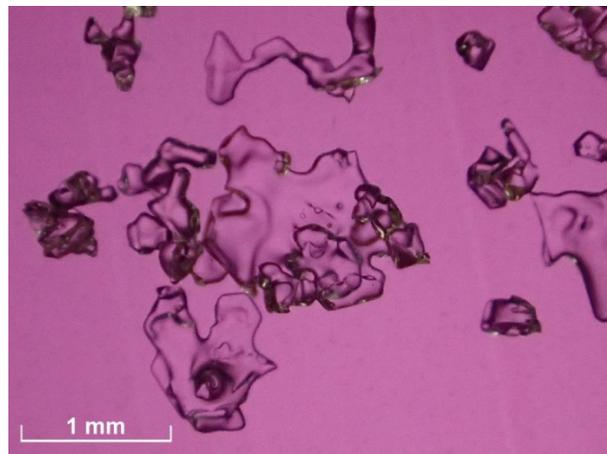


図-5 地上高 45 cm の積雪の粒子 (那須岳南東斜面).

鷺倉温泉東方約100m地点
 2017/03/29
 17:15 - 17:45
 快晴
 気温 : -1.2 °C
 0-29cmの積雪水量 : 44 mm
 0-29cmの平均密度 : 150 kg/m³

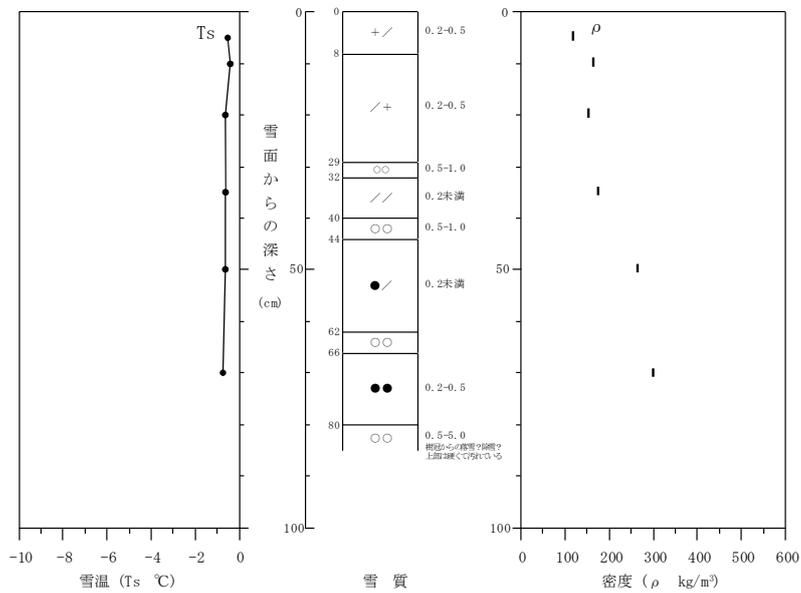


図-6 鷺倉温泉における積雪断面観測の結果.



図-7 鷺倉温泉における積雪断面の写真.

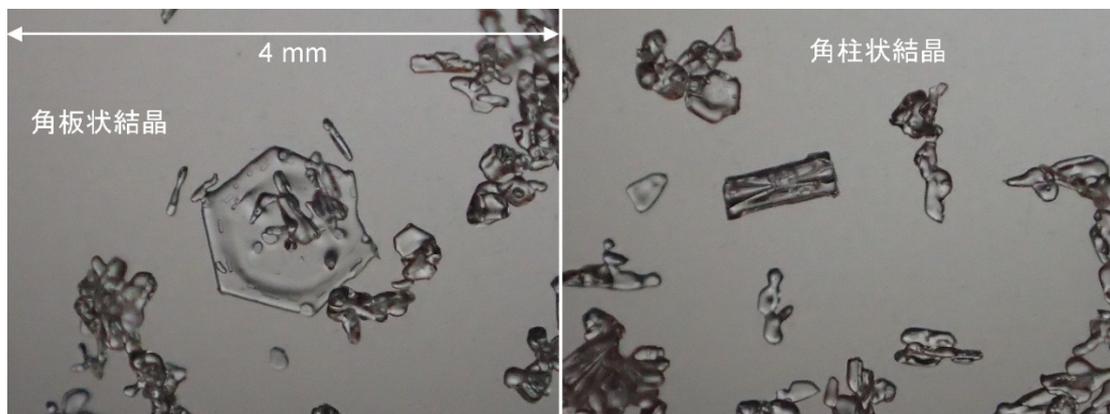


図-8 3月26~27日の降雪に対応する積雪層の粒子(鷺倉温泉).

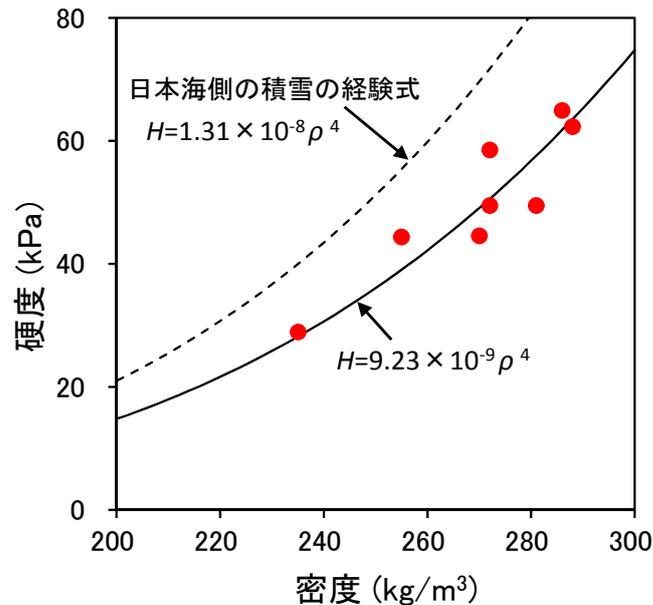


図-9 那須岳南東斜面における地上高 24~60 cm のしまり雪層の密度と硬度の関係。

式(2)の係数と式(1)の係数の比の値は約 0.70 であることから、同一密度でみたとき地上高 24~60 cm の積雪の硬度が日本海側地域の平均的な値の約 70%であることを意味している。これはあくまで大雪から 1 週間経過した積雪の力学的特性であるが、3 月 27 日の時点でも低気圧によってもたらされた積雪層（新雪）の硬度が極めて小さかった可能性が考えられる。

5 まとめ

2017 年 3 月 26~27 日に日本の南を通過した低気圧（南岸低気圧）や伊豆諸島付近に発生した低気圧によって、那須岳（栃木県）や安達太良山（福島県）にもたらされた積雪は力学的強度が極めて小さかった可能性がある。また、3 月 26~27 日の降雪で形成された積雪層の強度も一様ではなく、その内部に特に強度の小さい積雪を含んでいることが分かった。さらに、この積雪層には、雲粒付着のほとんどない板状結晶や柱状結晶が多数含まれていたことが特徴である。

謝辞

積雪粒子の接写撮影にご協力いただいた新潟大学理学部の栗原璃氏と吉川知里氏に感謝の意を表します。なお、本研究は JSPS 科研費 17K18453 及び 15K01161 の助成を受けて実施された。

引用文献

- Takeuchi, Y., Y. Nohguchi, K. Kawashima and K. Izumi, 1998 : Measurement of snow hardness distribution. *Annals of Glaciology*, **26**, 27-30.
- 竹内由香里, 納口恭明, 河島克久, 和泉薫, 2001 : デジタル式荷重測定器を利用した積雪の硬度測定. *雪氷*, **63**, 441-449.
- 木下誠一, 1960 : 積雪の硬度 I. *低温科学, 物理篇*, **19**, 119-133.