

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
課題番号 17K18453

平成 29 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）
研究成果報告書

平成 30 年 3 月

研究代表者 上石 勲
防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・総括主任研究員

目次

はじめに

研究組織

第1章 現地調査結果

那須雪崩災害の現地調査	1
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	
2017 年那須雪崩災害調査への UAV-StM の適用	21
内山 庄一郎・鈴木 比奈子・上石 勲・中村 一樹	
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	29
河島 克久・松元 高峰・渡部 俊・西村 浩一	

第2章 地形情報及び雪崩災害資料の収集とその解析による各種データベースの作成

雪崩災害資料の地理学的分析を通じた地域災害特性の理解に向けた試み	35
鈴木 比奈子・内山 庄一郎・中村 一樹	

第3章 降雪状況の面的解析

降雪状況の面的解析	45
中井 専人・吉田 聡・荒木 健太郎・出世 ゆかり・岩波 越 鈴木 真一・橋本 明弘・本吉 弘岐	
2017 年 3 月 27 日の那須雪崩をもたらした低気圧の予測可能性	47
吉田 聡	
那須における表層雪崩発生に関わる低気圧性大雪の特性	52
荒木 健太郎	
MP レーダー解析による 2017 年 3 月 26 - 27 日那須近辺における降水と風の分布	58
中井 専人・清水 慎吾・前坂 剛・岩波 越・木枝 香織	
降雪による弱層形成に関する数値気象モデルを用いた再現実験	64
橋本 明弘・本吉 弘岐・山口 悟・中井 専人	
低気圧に伴う降雪システムの Ka バンド偏波レーダー観測	70
出世 ゆかり・前坂 剛・木枝 香織・岩波 越	

第4章 雪崩シミュレーションを用いた被害範囲推定

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	76
伊藤 陽一・森口 周二・小田 憲一・西村 浩一	

第5章 低気圧性の降雪を起因とした雪崩にも対応可能な積雪変質モデルの開発

低気圧性の降雪を起因とした雪崩にも対応可能な積雪変質モデルの開発	84
平島 寛行・山口 悟	
風および重力による降雪再分配を考慮した積雪層厚の空間分布予測と検証	90
松四 雄騎・松浦 純生	

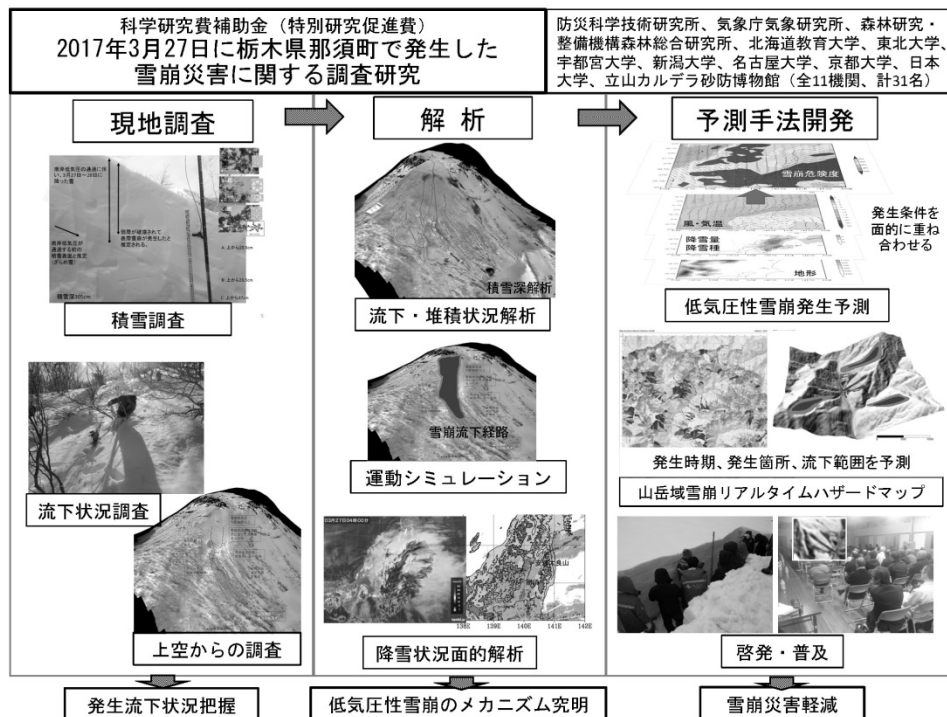
第6章 山岳域雪崩リアルタイムハザードマップの試作

地形条件・樹林条件からなる雪崩ポテンシャル箇所抽出の検討	96
阿部 直樹・中村 一樹・上石 勲	
太平洋側地域に適用可能な雪崩発生危険度の評価方法	102
吉川 知里・河島 克久・松元 高峰	
第7章 雪崩教育	
雪山登山引率者を対象とした講習の試行	108
近藤 伸也・飯田 肇・中村 一樹・上石 勲・瀬谷 旺二郎	
雪崩教育普及プログラムの開発	115
中村 一樹・上石 勲・飯田 肇・榊原 健一・近藤 伸也	

はじめに

2017年3月27日、栃木県那須町的那須岳東斜面で発生した雪崩により、登山講習中の高校生7名、引率教師1名の8名が犠牲となり、40名が負傷する災害が発生しました。遺族の方にお悔やみ申し上げるとともに、事故に遭遇され負傷された生徒、ご家族の皆様にお見舞い申し上げます。

我々は、雪崩発生の原因を突き止めるべく、事故発生直後から現地に入り調査を行いました。調査は次章に示すメンバーにより次に示す流れで実施しました。



事故直後の現地調査と気象状況から、低気圧性の降雪がすべり層となって発生した表層雪崩ではないかと想定されました。この低気圧性の降雪は以前から「降雪結晶」として、雪崩の弱層になっていることは知られていました。4年前の2014年2月の関東甲信の大雪では、南岸低気圧の降雪で山梨県や長野県、群馬県、栃木県、東京都、埼玉県、福島県、宮城県、岩手県などで多数の雪崩が同時発生し、車や道路を埋め、山間集落の除雪を遅らせるなどの大きな影響を与えました。これを契機に、低気圧性の降雪は、崩れやすく雪崩発生の原因となりやすく、とくに留意すべきものであることを徐々に把握してきた矢先、今回の事故となってしまいました。

雪氷研究者にとって、この事故は非常にショッキングであり、これまでの研究活動の在り方も考えさせられました。自分の子供が部活動中に事故に遭い、突然二度と会えないということの重大さは、ご遺族の心中を考えると誠に心が痛みます。雪崩をはじめとした雪

氷災害を研究する私たちは、なぜ、このような災害を防ぐことができなかったか、4年前に低気圧性の雪崩の危険性をさらに広く周知していなかったことを悔んでいます。

今回の調査は、このような雪崩事故を二度と起こさないことを第一の目的として行ってきました。雪崩発生直後の積雪調査、降積雪解析、雪崩運動解析から低気圧性の降雪による雪崩発生の地形や気象的な特徴を把握し、雪崩発生の危険性がいつどこで高まるかをお知らせできるシステムを開発し、登山やスキーの行動を計画する場合にも利用できるような情報を提供することを目指してきました。さらに低気圧性の降雪による雪崩の危険性を周知することを含め、全国7県で、高校登山部顧問の皆さんを対象に、県によっては登山部に属する高校生も含め研修も実施してきました。

今回の調査チームで行ってきたことは、単年度だけで完結することはありません。今回のような雪崩事故を防ぐには課題も多いと思います。開発を試みた表層雪崩予測システムも災害防止につなげるためには、各地での観測に基づく検証が不可欠です。また、これらの情報を活用するための周知や広報活動もさらに進める必要があります。本報告書をご覧になり、「那須雪崩事故を風化させず、二度とこのような災害は起こさない」ために、さらにアドバイスをいただければ幸いです。

本調査は平成29年度科学研究費補助金（特別研究促進費）の助成を受け実施しました。年度替わりの時期に、早急に対応をいただいた京都大学防災研究所自然災害研究協議会の中川一前議長をはじめ、関係者の方々に感謝いたします。

2018年3月31日

研究代表者 上石 勲

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長

研究組織

研究代表者：上石 勲（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・センター長・総括主任研究員）

研究分担者（申請書記載順）

研究分担者：中村 一樹（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員）

研究分担者：尾関 俊浩（北海道教育大学札幌校・理科教育講座・教授）

研究分担者：中井 専人（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・総括主任研究員）

研究分担者：河島 克久（新潟大学・災害・復興科学研究所・教授）

研究分担者：松元 高峰（新潟大学・災害・復興科学研究所・特任准教授）

研究分担者：西村 浩一（名古屋大学大学院・環境学研究科・教授）

研究分担者：小田 憲一（日本大学・理工学部・助教）

研究分担者：森口 周二（東北大学・災害科学国際研究所・准教授）

研究分担者：竹内 由香里（森林総合研究所・森林防災研究領域・チーム長）

研究分担者：根本 征樹（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員）

研究分担者：出世 ゆかり（防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員）

研究分担者：内山 庄一郎（防災科学技術研究所・社会防災システム研究部門・特別技術員）

研究分担者：松四 雄騎（京都大学・防災研究所・地盤災害研究部門・准教授）

研究分担者：近藤 伸也（宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授）

研究分担者：飯田 肇（公益財団法人立山カルデラ砂防博物館・学芸課・課長）

研究分担者：吉田 聡（京都大学・防災研究所・准教授）

連携研究者（申請書記載順）

連携研究者：松浦 純生（京都大学・防災研究所・地盤災害研究部門・教授）

連携研究者：勝島 隆史（森林総合研究所・森林防災研究領域・主任研究員）

連携研究者：橋本 明弘（気象庁気象研究所・予報研究部・主任研究官）

連携研究者：荒木 健太郎（気象庁気象研究所・予報研究部・研究官）

連携研究者：岩波 越（防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・総括主任研究員）

連携研究者：鈴木 真一（防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員）

連携研究者：小杉 健二（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・総括主任研究員）

連携研究者：山口 悟（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員）

連携研究者：本吉 弘岐（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員）

連携研究者：平島 寛行（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員）

連携研究者：伊藤 陽一（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・特別研究員）

連携研究者：阿部 修（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・客員研究員）

連携研究者：安達 聖（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・特別研究員）

連携研究者：鈴木 比奈子（防災科学技術研究所・社会防災システム研究部門・特別技術員）

研究協力者（五十音順）

研究協力者：阿部 直樹（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・外来研究員）

研究協力者：阿部 幹雄（日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム）

研究協力者：伊豫部 勉（京都大学大学院・工学研究科・特定准教授）

研究協力者：木枝 香織（防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・特別技術員）

研究協力者：榊原 健一（北海道医療大学・准教授）

研究協力者：佐藤 研吾（防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・特別研究員）

研究協力者：清水 慎吾（防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員）

研究協力者：瀬谷 旺二郎（宇都宮大学・工学部・建設学科建設工学コース・学部4年）

研究協力者：前坂 剛（防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・主任研究員）

研究協力者：吉川 知里（新潟大学・理学部・自然環境科学科・学部4年）

研究協力者：渡部 俊（新潟大学・災害・復興科学研究所・技術職員）

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*

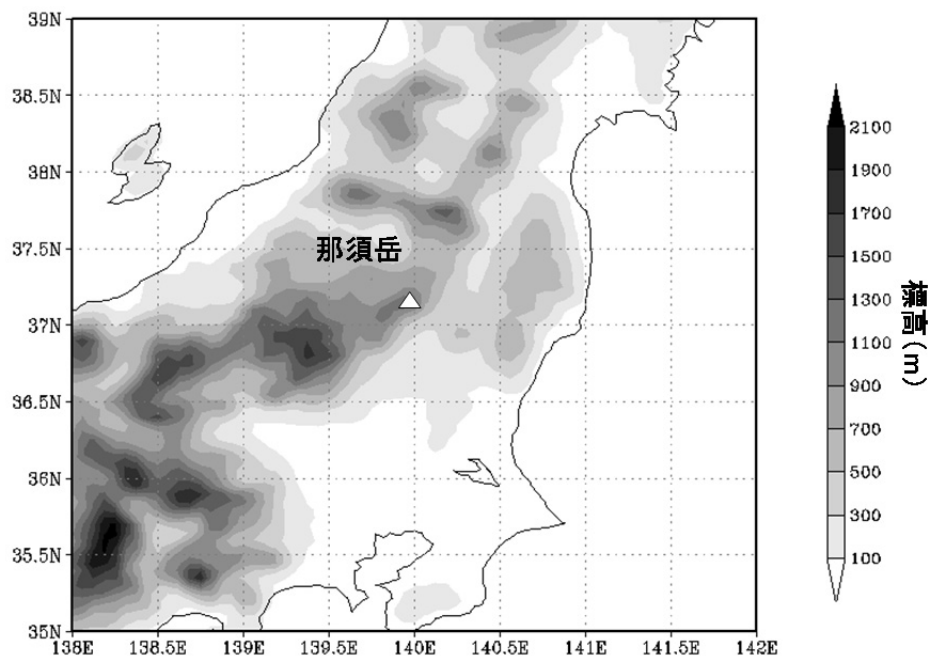
Abstract: An avalanche disaster occurred at Mt. Nasu in Tochigi pref. on 27, March 2017. Seven high school students and one supervising teacher were killed and 40 persons including seven high-school students other high school students and supervising teacher were injured by an avalanche. The field investigations 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℃）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。

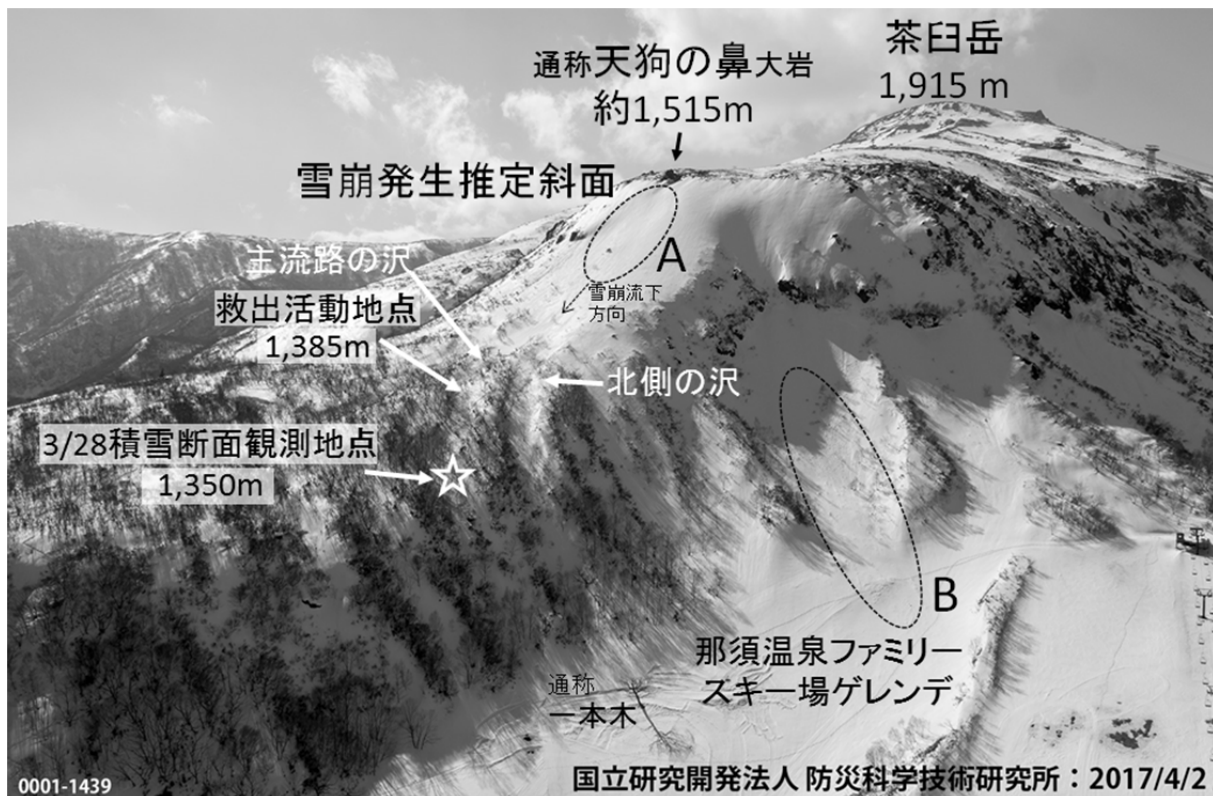


図-2 那須岳雪崩発生地全景（2017年4月2日防災科学技術研究所無人航空機撮影，
☆：3/28 積雪断面観測地点，A：3/27 事故雪崩発生推定斜面，
B：3/28 に別の雪崩の痕跡を発見した斜面）

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℃(13h40m)	
緯度	経度	標高	傾斜角	方位角	座標軸	測定者	
37° 07'06.2"	139° 58'49.0"	1350 m	35°	90°	D	K.K.M.N.K.N	

雪質F			雪温 T(℃)		密度 ρ (kg/m ³)		硬度 PR(kPa)		
深さ, D (cm)	F	雪質 備考	D	T	D	ρ	D	*1 ϕ (cm)	PR
0 - -1.5	▽	hard	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	

備考	
----	--

雪質凡例
+ : 新雪
／ : こしまり雪
○ : ざらめ雪
● : しまり雪
▽ : クラスト

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。

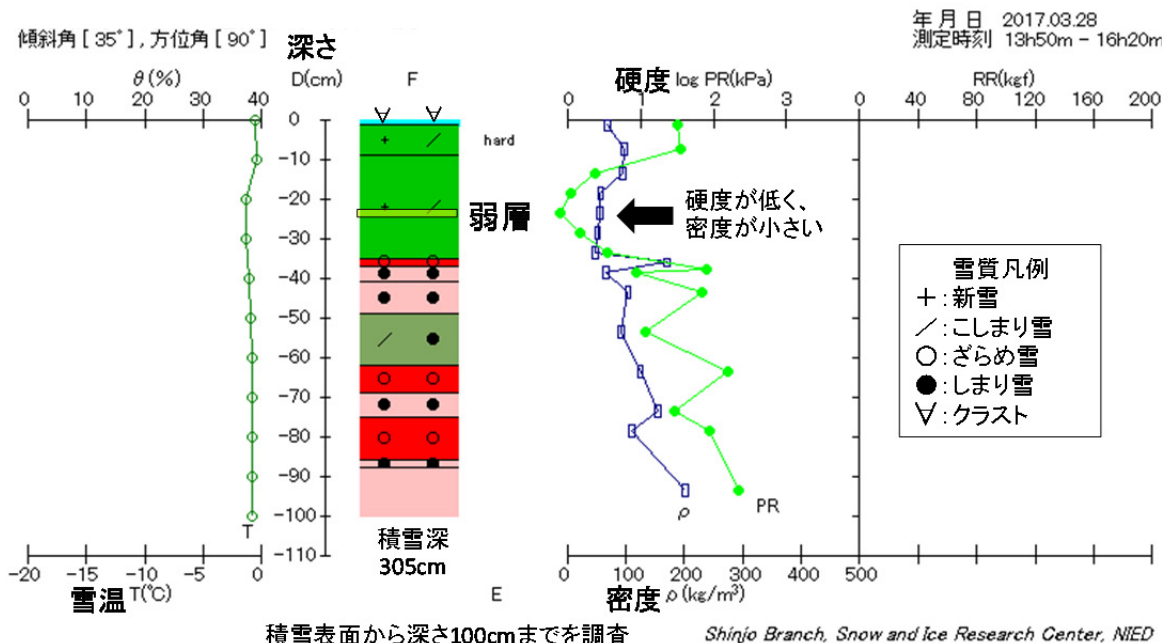
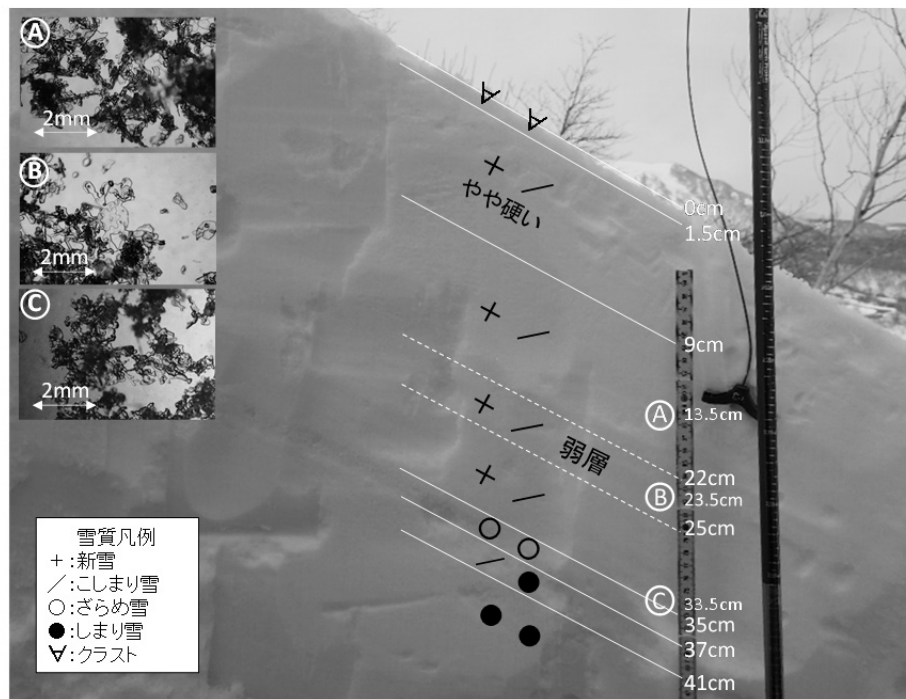


図-3 積雪断面観測結果 (2017 年 3 月 28 日実施)

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 5 km 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。

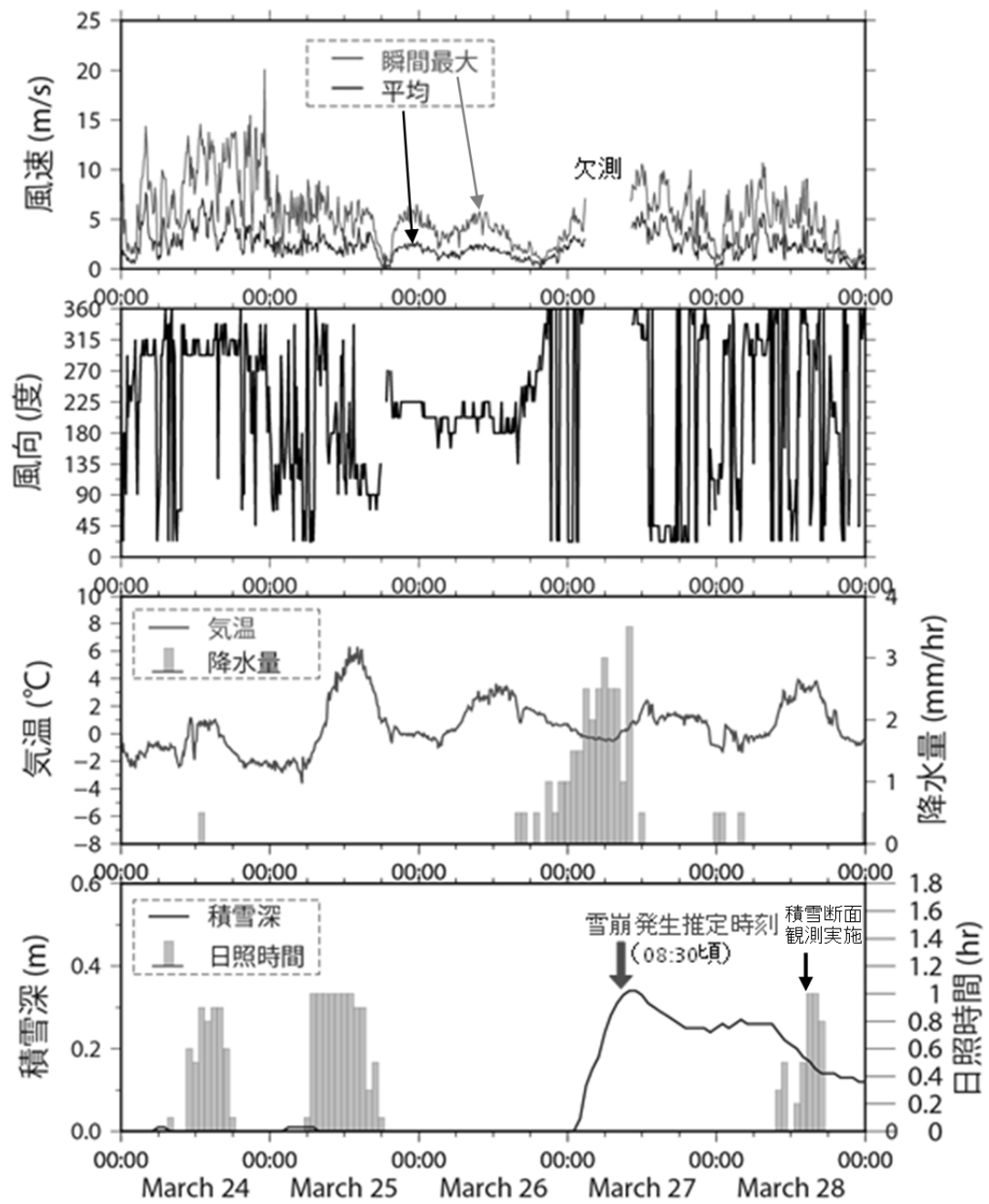
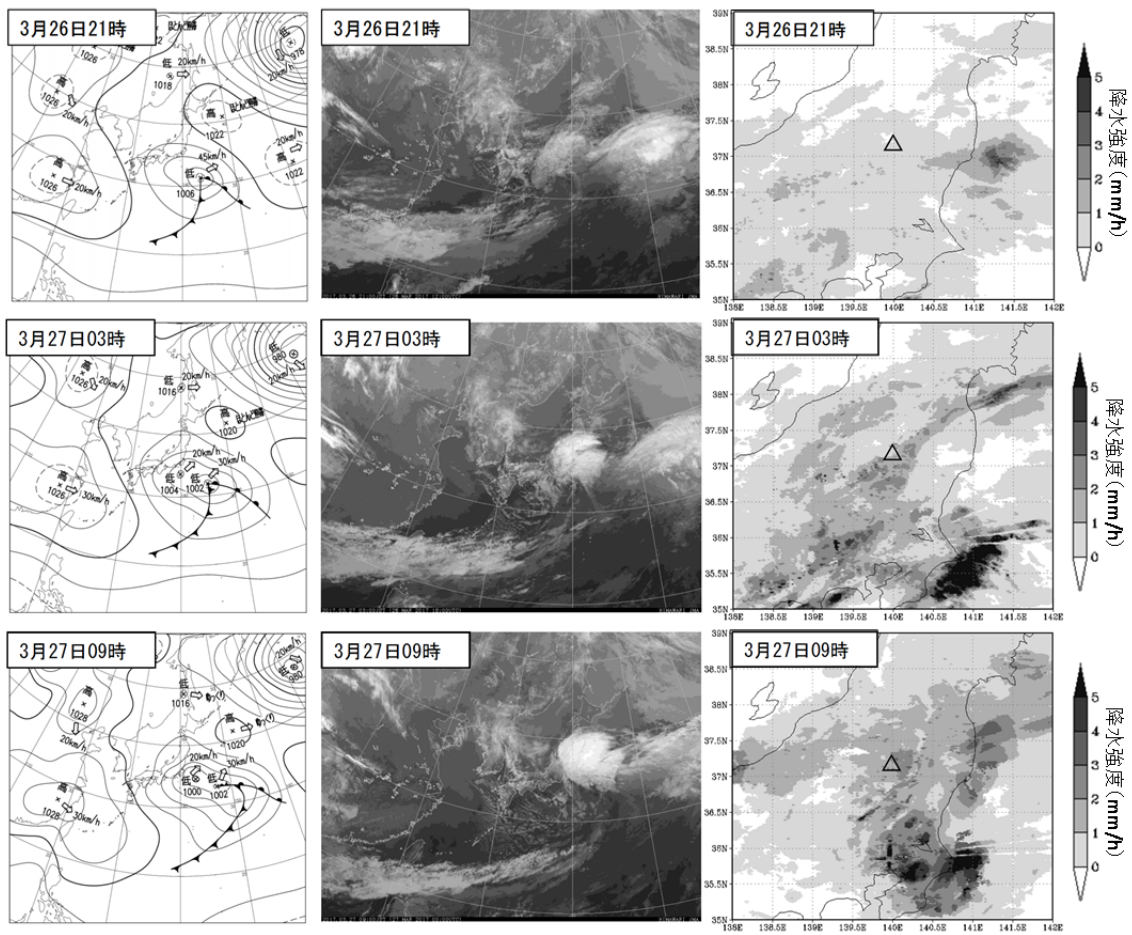


図-5 気象庁那須高原アメダスの3月24日～28日の気象経過
 (那須高原アメダス：3/28 積雪断面観測地点から東に約5 km，標高749m，
 風向：90度：東，180度：南，270度：西，360度：北)



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。

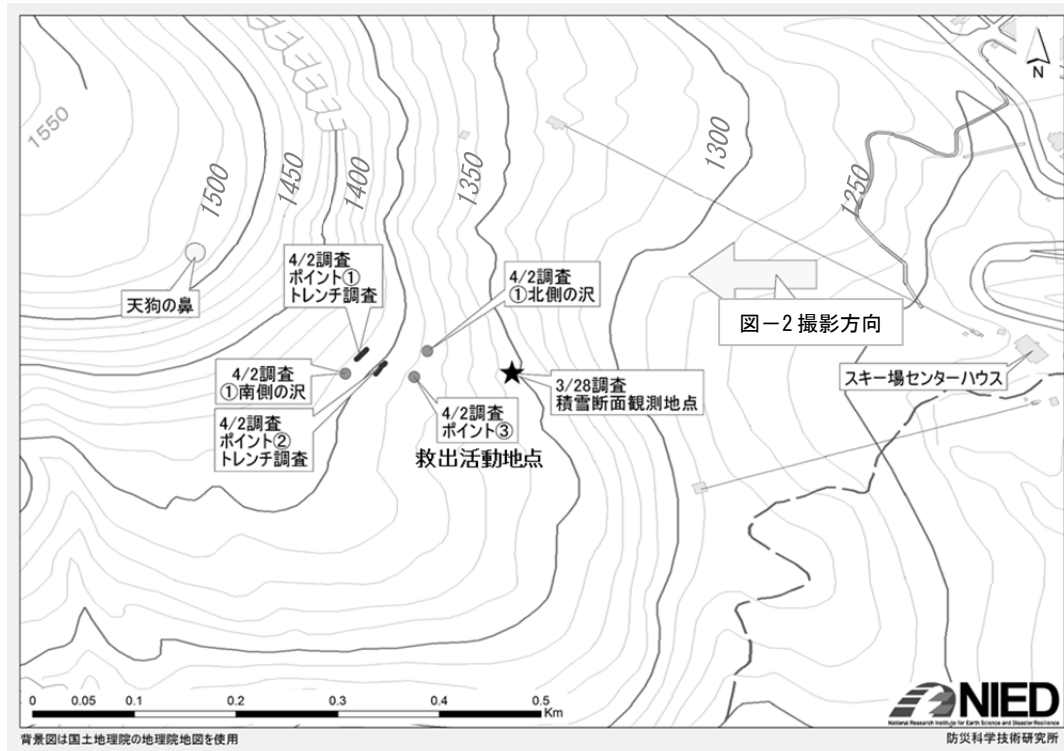


図-7 現地調査地点 ※背景図は国土地理院の地理院地図を使用

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。

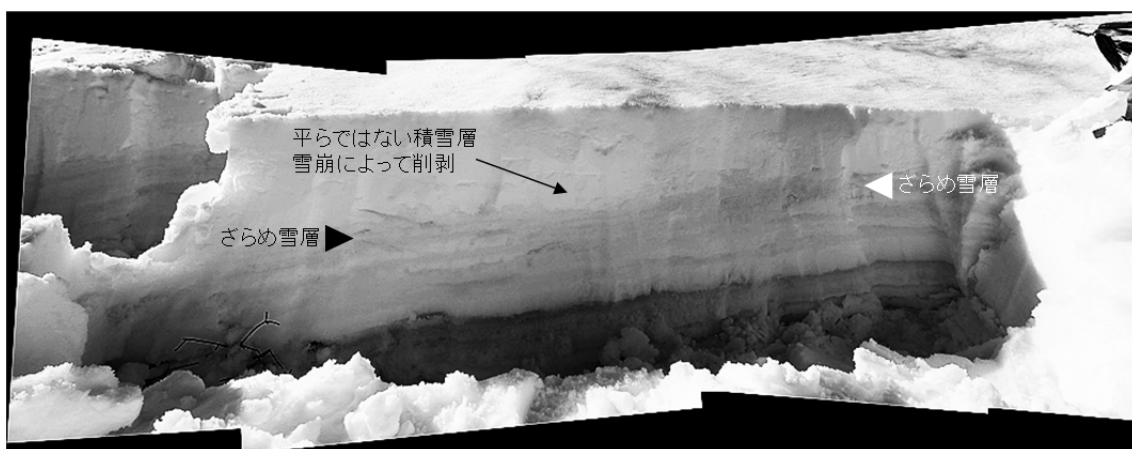


図-12 積雪の状態 (図-7 ポイント②トレンチ, 2017年4月2日撮影)

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)

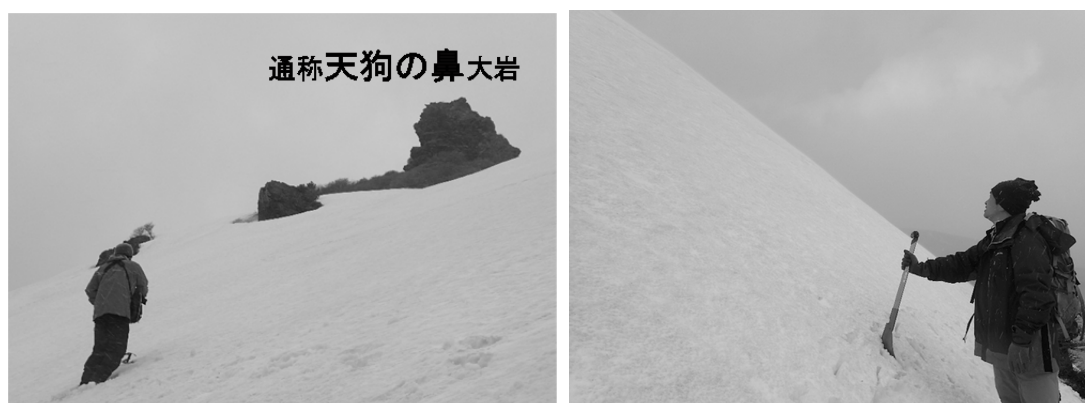


図-21 通称天狗の鼻大岩の直下（標高 1,490m 付近）の状況（2017 年 4 月 19 日撮影）

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。

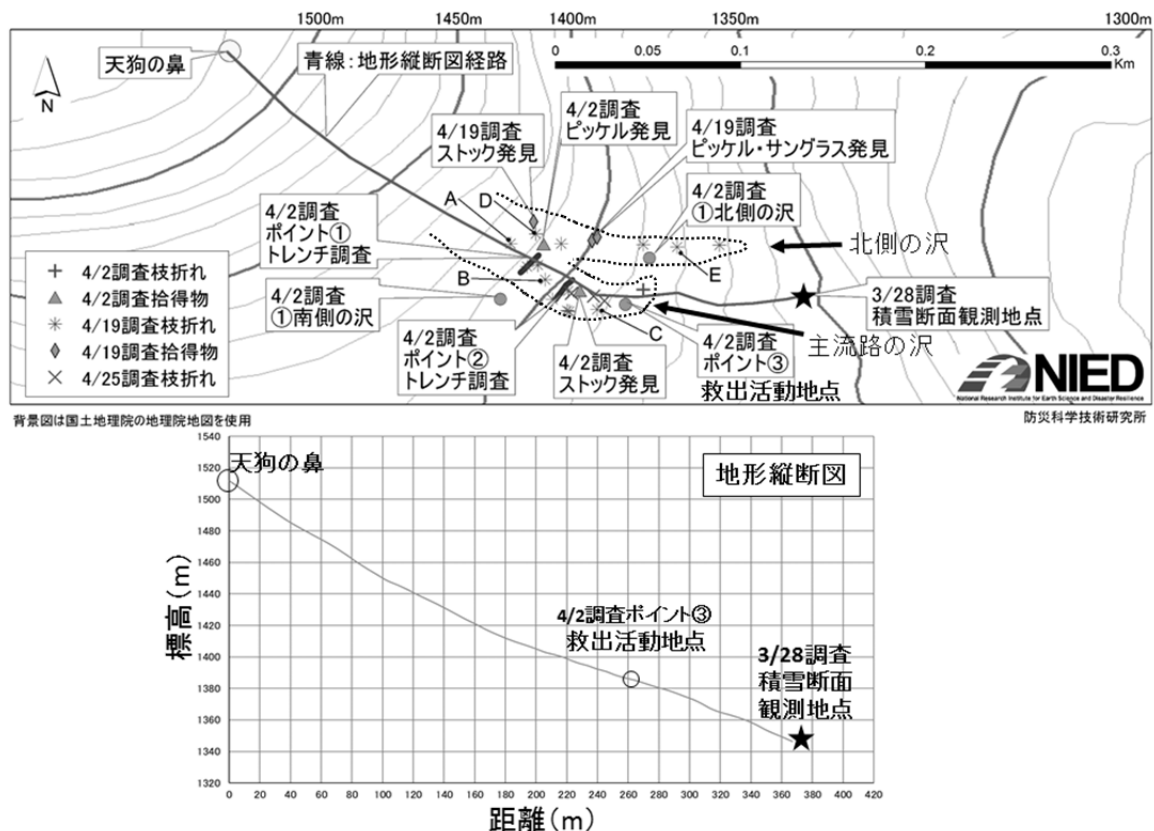


図-22 雪崩痕跡とその地形縦断面図（点線はおおよその雪崩到達範囲，A～E は図-17～図 20 に示した枝折れが認められた樹木の位置）
（国土地理院基盤地図情報 5m メッシュ標高より）

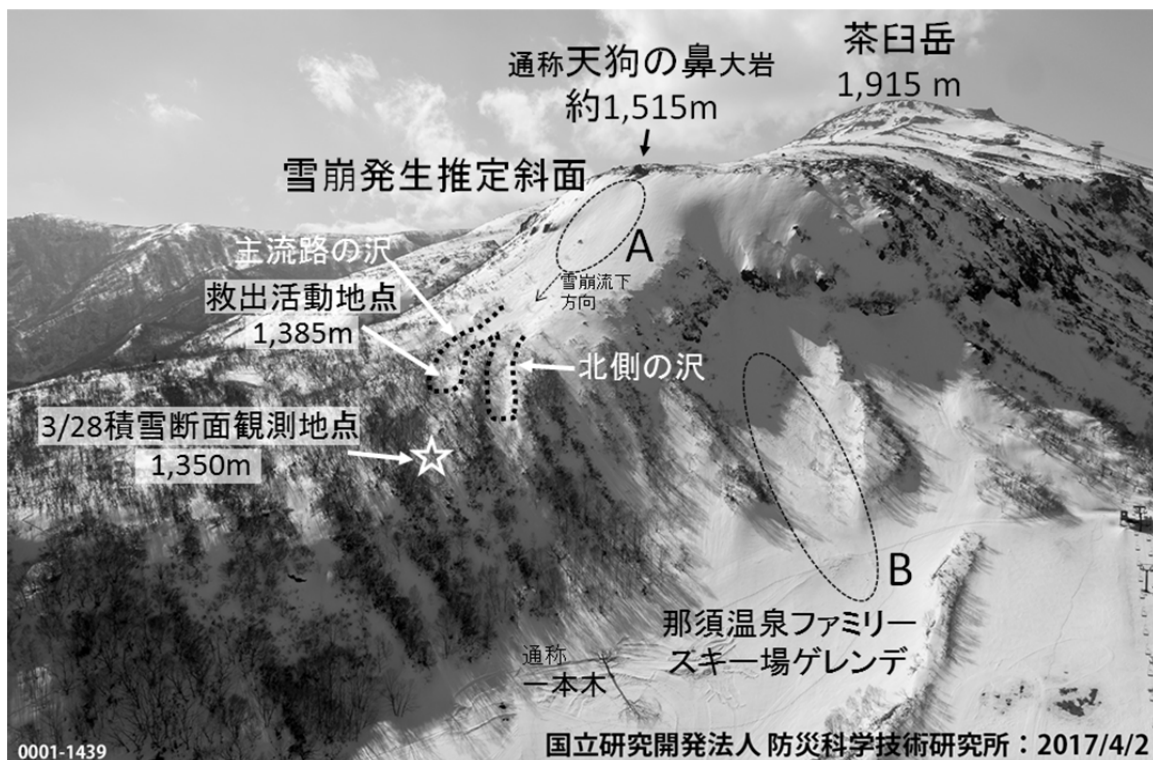


図-23 那須岳雪崩発生地全景（図-2 に点線で示したおおよその雪崩到達範囲を記入）

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が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、話をしても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名の人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ら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名は血の気はなかった。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階に医者に来ており、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。

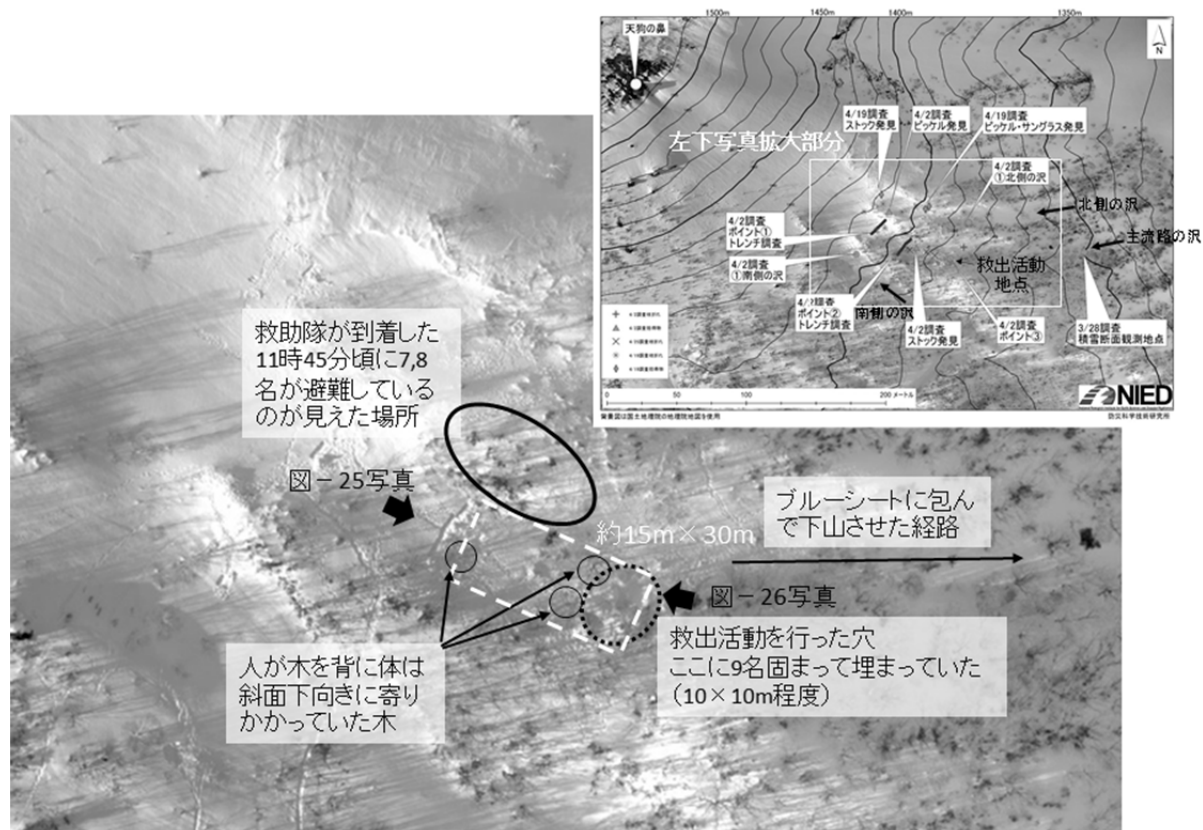


図-24 那須山岳救助隊副隊長への聞き取り調査から作成した救出活動地点付近の位置関係
(ベースの空中写真は2017年4月2日に無人航空機にて防災科研が撮影)



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的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、雪崩発生区の間所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、雪崩発生区の間所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ことで, 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. 一方で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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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。

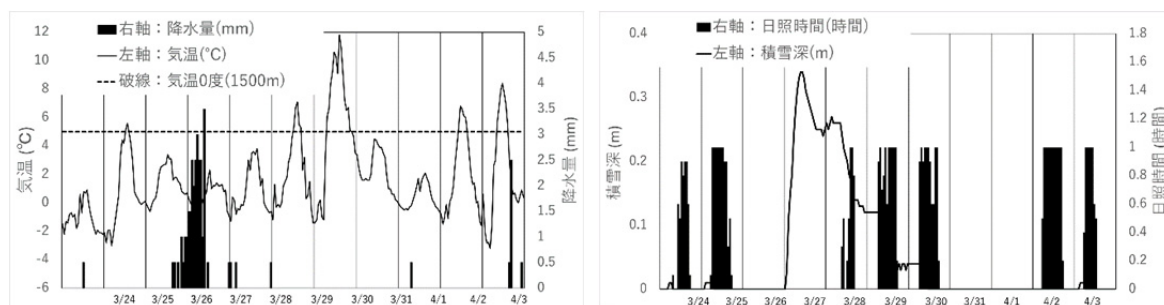


図 2 アメダス観測点「那須高原」の観測値 (2017 年 3 月 24 日～4 月 3 日)

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 1 m 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。今回は南東向きの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

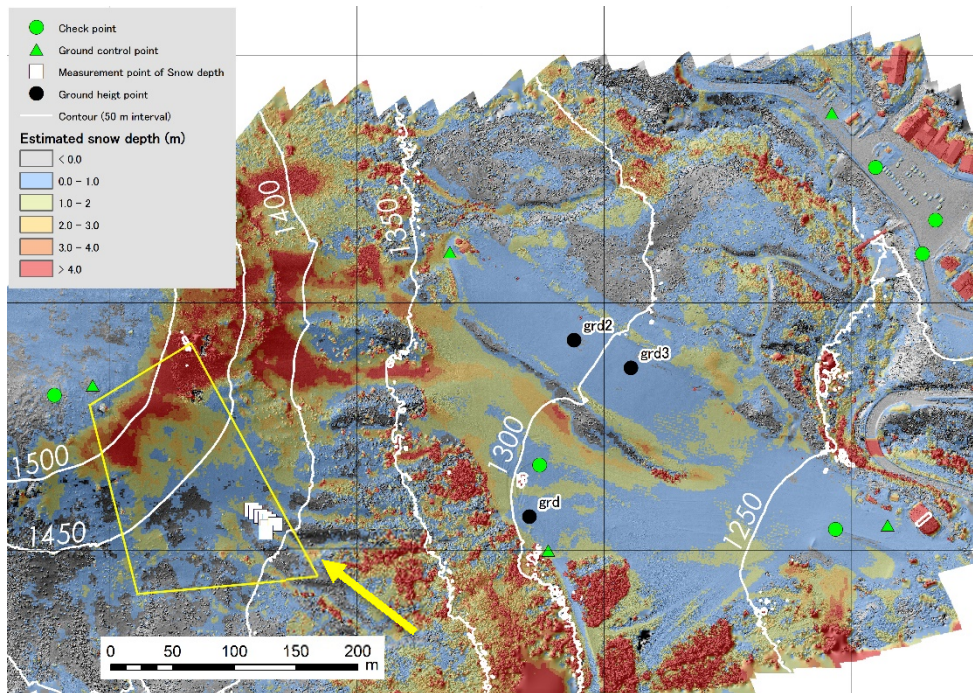


図 4 雪崩発生エリア周辺の推定積雪深 (ESD) 図 (巻末にカラー図を示す)

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.

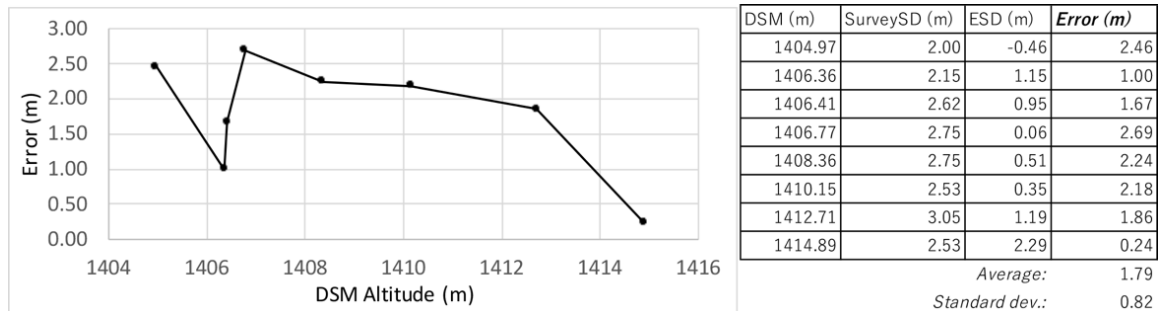


図 5 実測積雪深 (SurveySD) と ESD との差 (Error)



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いため、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、写真判読をとと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. Adatara 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

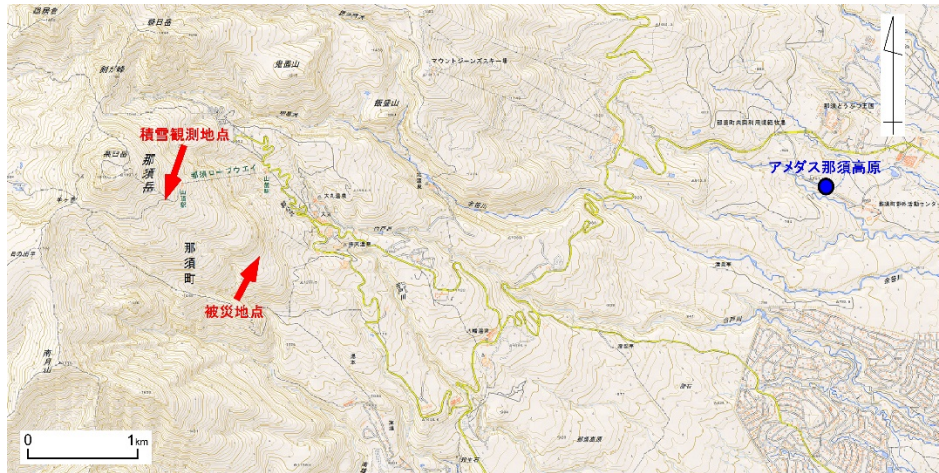
2017 年 3 月 26 日から 27 日にかけて、日本の南を通過した低気圧（南岸低気圧）や伊豆諸島付近に発生した低気圧の影響により、関東甲信地方の山地を中心に大雪となった地域があった。その中で、3 月 27 日午前 8 時 30 分頃に栃木県那須町の那須岳（那須温泉ファミリースキー場付近）において雪崩が発生し、高体連登山専門部会主催の「春山安全登山講習会」に参加していた高校生と教員が巻き込まれ、死者 8 名、重症 2 名、中等症・軽傷 38 名を出す事態となった（平成 29 年 3 月 27 日那須町で発生した雪崩事故について（第 9 報）、栃木県県民生活部危機管理課）。著者らは、この雪崩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

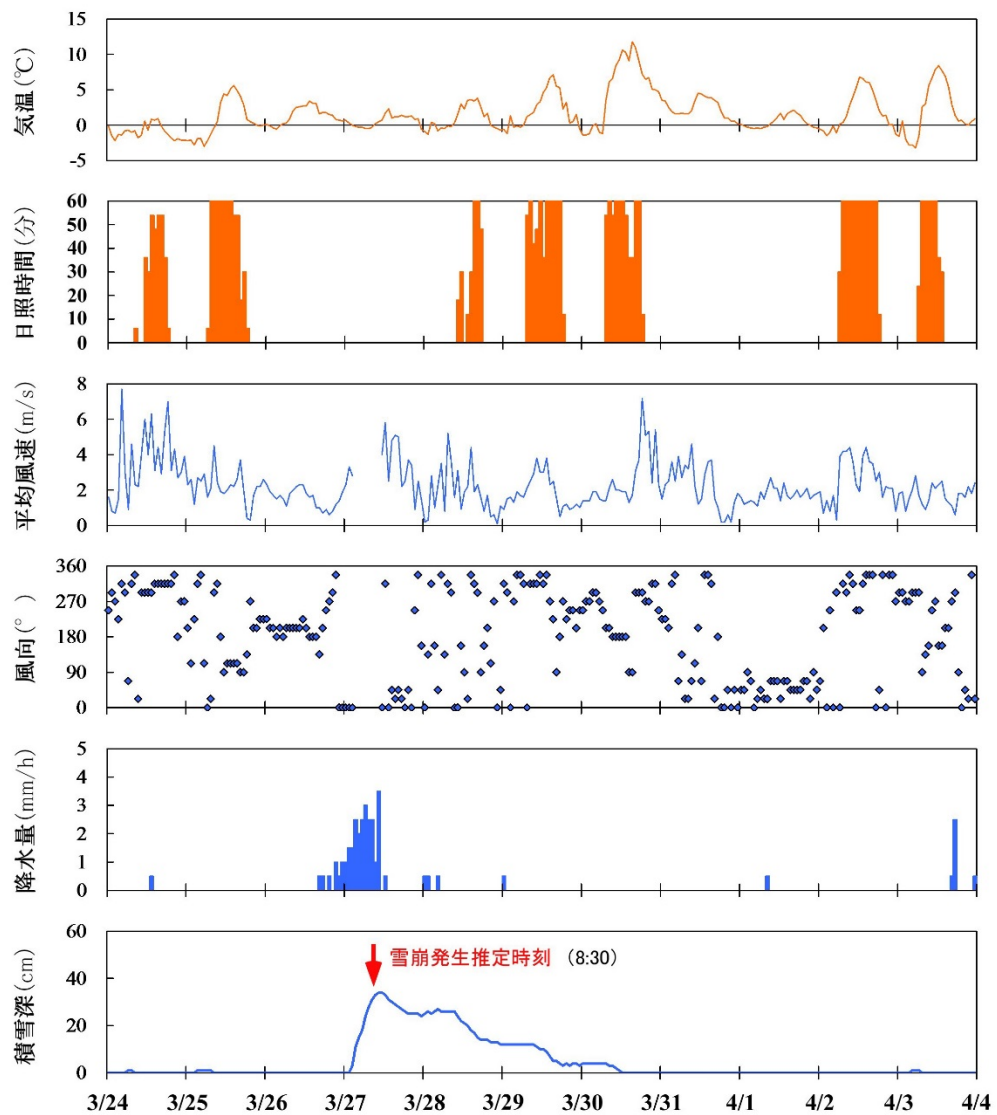
那須岳における調査位置を図-1 に示す。調査では、那須ロープウェイ山頂駅（標高 1690 m）から登山道の牛ヶ首山頂分岐（1718 m）まで登り、この分岐点近傍の那須岳（茶臼岳）南東斜面（標高 1716 m）で積雪断面観測と積雪試料の採取（積雪粒子の撮影のため）を行った。調査地点は被災地点よりも標高が約 300 m 高い。これは、発災から 1 週間経過した時点での調査であることから、高標高地点の方が積雪の変質が少ないと考えたためである。一方、安達太良山では、標高約 1220 m の鷲倉温泉において積雪断面観測（表層部のみ）と積雪試料採取を行った。

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℃) 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℃, 11.8℃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

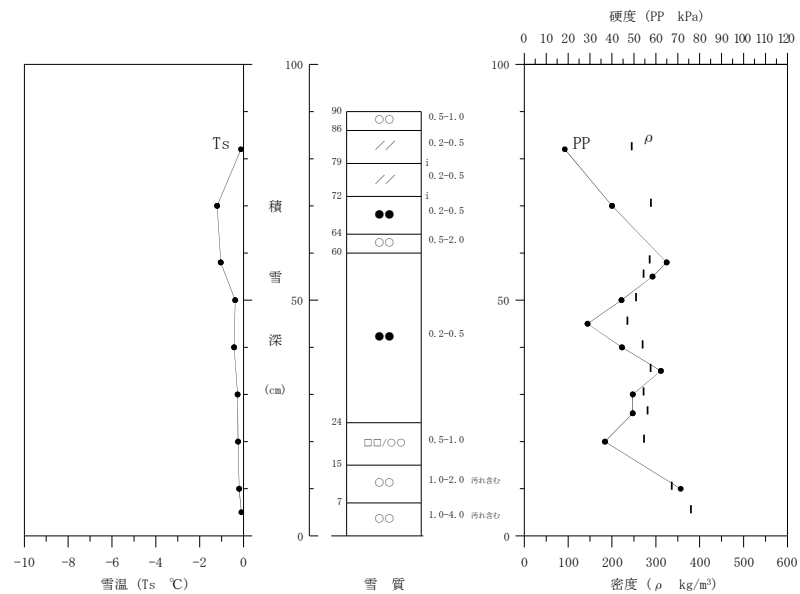
地上高 24~60 cm のしまり雪層の密度と硬度の関係を図-9 に示す. 硬度は密度の増加に伴って急激に増加する傾向が認められる. 図中の破線の曲線は, Tekeuchi *et al.* (1998) 及び竹内ら (2001) が, 日本海側の多雪地域 (主に冬型気圧配置時の降雪) において得た乾いたこしまり雪・しまり雪の密度 ρ (kg/m³) と硬度 H (kPa) の経験式であり, 次式で表される.

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

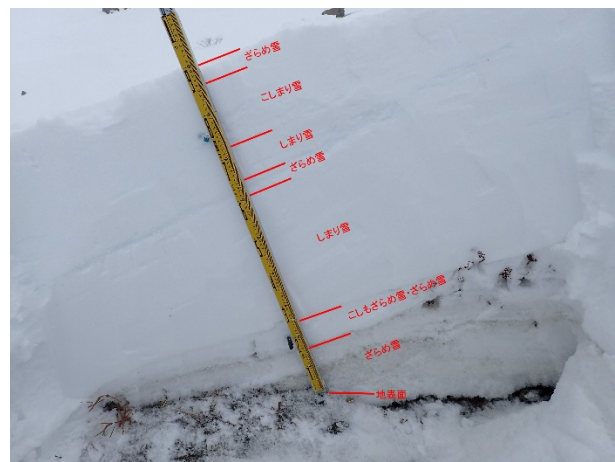
本調査で得られた硬度の多くは式(1)の曲線よりも下側に位置しており, 今回の低気圧による積雪には日本海側地域の経験式が適合しないことが分かる. 乾いたこしまり雪・しまり雪の硬度は密度の 4 乗に比例することは古くから知られているので (木下, 1960), これに従って今回の測定値に最適な経験式を求めると, 図-9 に実線で示した式(2)が得られた.

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

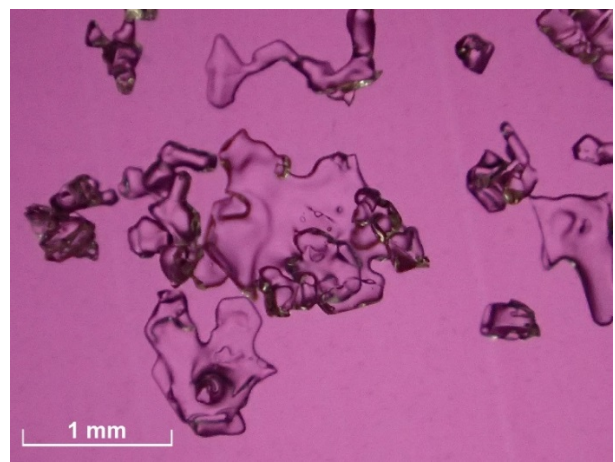
那須茶臼岳南東斜面
 標高 1716m
 2017/04/03
 14:10 - 14:50
 曇ときどき雪
 気温 : -2.7 °C
 積雪深 : 90 cm



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

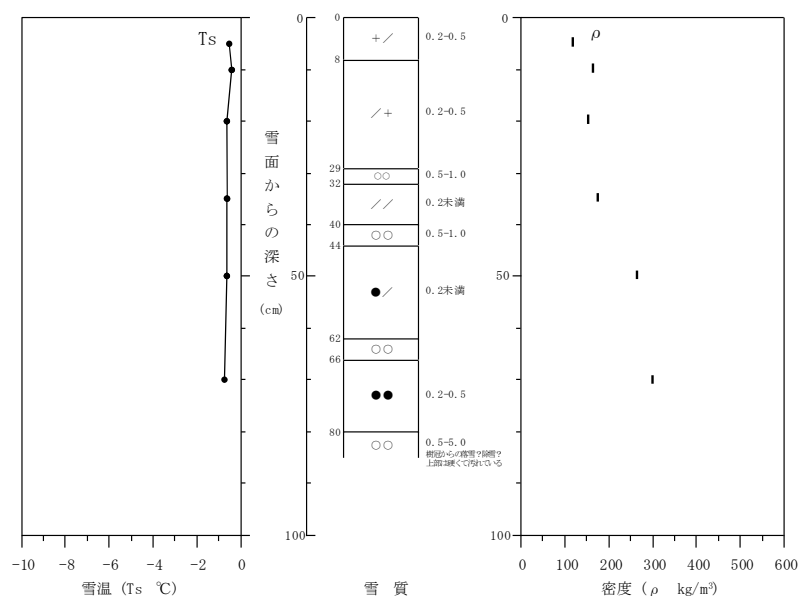


図-6 鷺倉温泉における積雪断面観測の結果.



図-7 鷺倉温泉における積雪断面の写真.

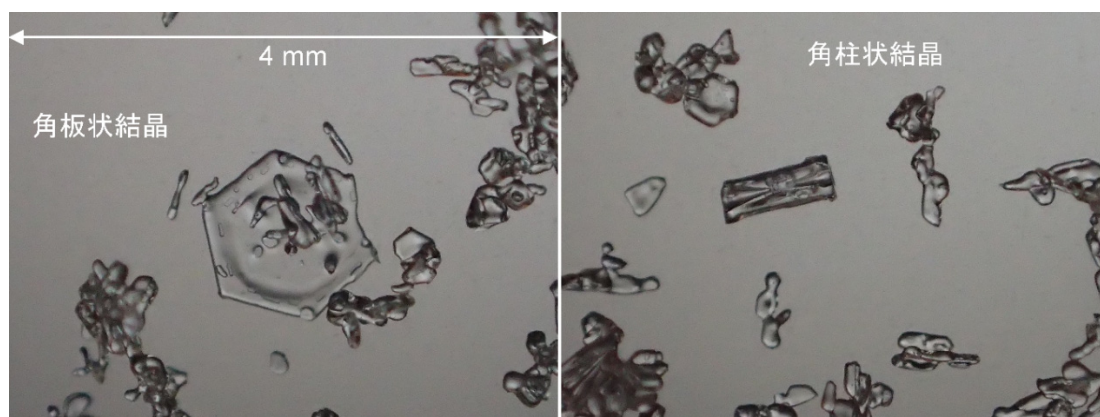
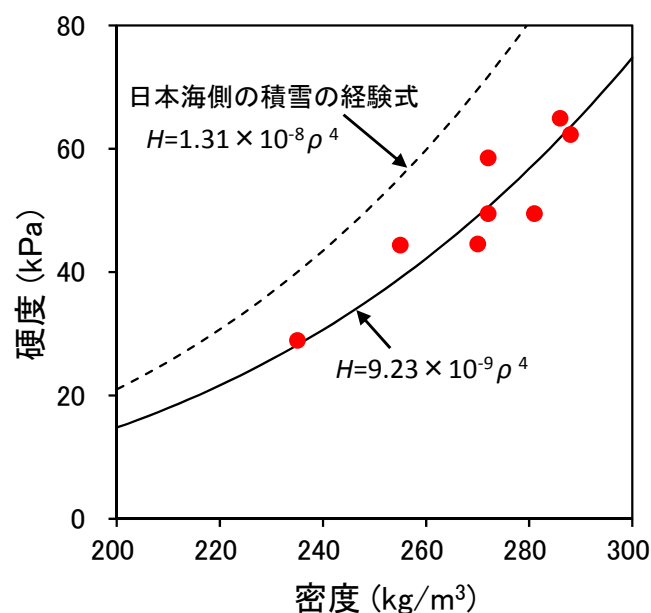


図-8 3月26~27日の降雪に対応する積雪層の粒子(鷺倉温泉).



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.

第 2 章

地形情報及び雪崩災害資料の収集とその解析による
各種データベースの作成

雪崩災害資料の地理学的分析を通じた地域災害特性の理解に向けた試み
An attempt to understand the characteristics of local disasters through geographical
analysis of data on avalanche disasters

鈴木 比奈子¹⁾, 内山 庄一郎¹⁾, 中村 一樹²⁾
H. Suzuki¹⁾, S. Uchiyama¹⁾, 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: In disaster areas, similar avalanche disasters typically occur repeatedly. We collected data on past avalanche disaster events around Mt. Nasudake, using data only for local areas (i.e., ‘local data’) in the analysis. The details of the collected data were organized into a database, according to the nature of the disasters, topography, and meteorology. All disaster occurrence sites were mapped. The following features were noted regarding the past avalanche disasters on the periphery of Mt. Nasudake. The topographical conditions associated with avalanches were characterized by an east- or southeast-facing concave slope, with an average gradient of about 33°, in many events. The meteorological conditions were characterized by 20 to 50 cm of new snow that had been falling from the previous afternoon. The air temperature was around 2 to 5°C below zero, the wind direction was unknown, and the wind speed was considered to be high. These findings were consonant with the data on the avalanche of March 27, 2017.

Key words: Characteristics of local disasters, Mt. Nasudake, Historical disaster event, Avalanche

1. はじめに

1.1 過去の災害事例を整理する意義

自然災害が発生した時しばしば、この地域における災害の経験はなかったといった趣旨の体験談を耳にする。しかしながら、被災地域の歴史を紐解くと、過去の災害事例は様々な形で資料に記載されている。このことはつまり、地域には特有の地理的、社会的な素因を背景とする潜在的な災害リスクが存在していることを示唆する。一方で、災害事例を伝聞する資料は種類や形態が様々であるため、災害発生の実態や発生場所、被害状況等を一覧して把握することが難しい。過去の災害状況に関する地理的傾向を把握し、現在の防災計画等に活用しようとするならば、当該地域の過去の災害資料や地理情報を徹底的に収集し、災害事例を調査、整理する必要がある。命を守るには、ハザードを避ける行動が重要である。この実現には、観測技術に根差した予測技術も効果的であるが、共有された過去の経験から判断を下すことができるならば、ハザードの回避に有効な方策の一つとなろう。本稿は、栃木県那須町の那須岳周辺地域における過去の雪崩災害の事例から、災害の予防に資する知見の抽出を試みるものである。

1.2 調査対象地域および2017年雪崩災害の概要

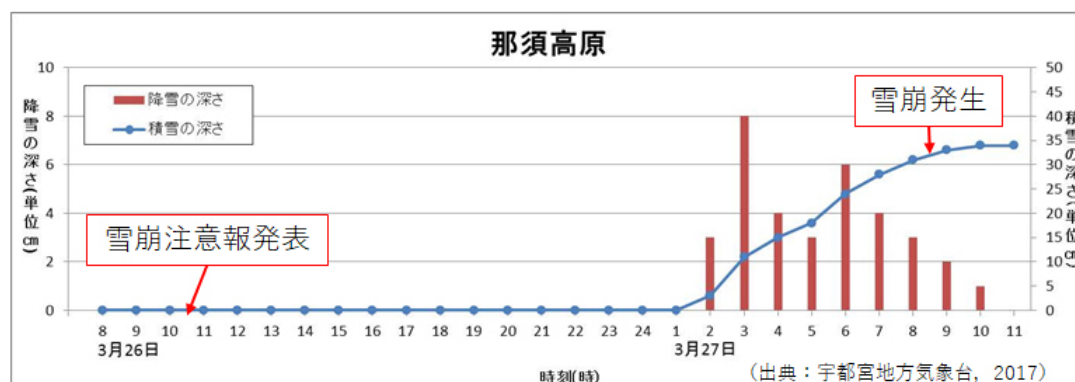
2017年3月27日、那須岳の南東斜面で雪崩災害が発生した。本稿では以降、当該災害を2017年雪崩と呼称する。宇都宮地方気象台(2017)によれば、那須町では3月26日10時32分より、なだれ注意報が発表され、雪崩発生の危険性が示唆されていた(図-1)。しかし、この情報だけでは、雪崩がいつ、どこで、どのように発生するかを具体的に把握することはできない。

2017年3月27日に発生した那須町の雪崩災害の概要は次の通りである。同年3月27日8時30分頃、那須温泉ファミリースキー場敷地外、直線距離で北西150mに位置する那須岳南東斜面のミダガ原(注)付近において、表層雪崩が発生した。この雪崩には登山研修中の高校生、教員合わせて48名が遭遇し、うち8名が死亡した(総務省消防庁, 2017)。本州における当時の気象状況は、3月26日から27日かけて本州太平洋側の南岸低気圧と27日未明頃に伊豆諸島付近に発生した低気圧の影響により、関東甲信越地方の山地で降雪があった(宇

都宮地方気象台，2017）．遭難地点から北西 6.3km 標高差マイナス 600m にあるアメダス那須高原では，27 日 2 時ごろから降雪が観測され，北の風，2.8m 毎秒，気温は 0 度であった．8 時の時点での積雪量は 31cm，風はなく，気温は氷点下 0.3 度であった．防災科学技術研究所の調査（2017a）によれば，雪崩遭難者の救出活動は標高 1,350m 付近で行われ，この周辺で実施した積雪断面観測の結果から，積雪表面から深さ 30cm まで新雪があったことが確認されている．雪崩の幅や長さは本稿執筆時点では不明である．

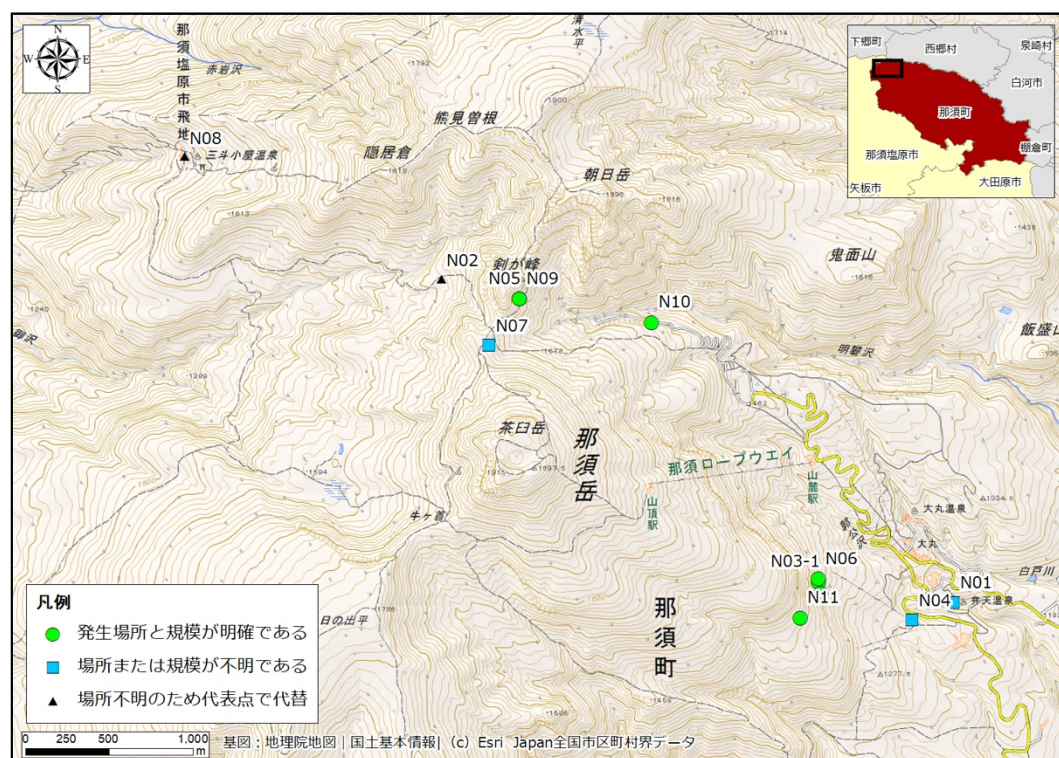
観測（＊）日時	雪	風向	風速	気温
2017年3月27日，2時00分	積雪3cm	北	2.8m/秒	0℃
2017年3月27日，8時00分	積雪31cm	なし	なし	0.3℃

＊観測地点：アメダス那須高原（遭難地点から北西6.3km、標高差－600m）（出典：気象庁，2017）



図ー1 アメダス那須高原の観測情報と注意報の発令状況

本地域が含まれる那須火山の地形的特色は，那須岳（標高 1,915m）の 11,000 年前と，6,000 年前の噴火によって生じた厚い溶岩流による舌状地形と，その周縁部を囲む急傾斜の斜面で



図ー2 那須岳周辺の雪崩災害発生地点

注）2017 年の雪崩災害が発生した南東斜面一帯（N11 周辺）はミダガ原（那須山岳救助隊，1993）と呼称されている．

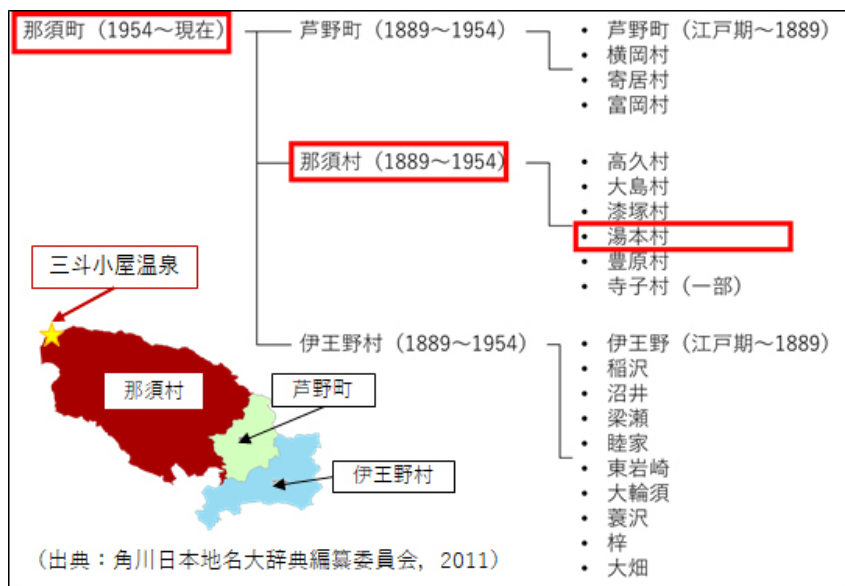
ある。舌状地形の周囲には、雪崩が発生しやすい傾斜 30 度以上の斜面が広く分布していることが確認できる（図－2 N11 周辺）。

2. 資料調査およびその結果

対象地域の地図情報の入手、自治体変遷および既存のデータベース、地域資料を調査し、これらから抽出した災害事例の整理と、災害発生箇所の地図化を行った。作業期間は 2017 年 4 月から 11 月（実働 4 か月程度）、資料調査に要した時間は 4 週間程度である。実施内容は予察、データベース調査、現地図書館での資料入手、他の資料保有施設からの資料取り寄せ、地域に関連する調査、資料の解析である。データの整理、地図作成、解析にはおよそ 3 週間で要した。地図情報の入手には、およそ 1 週間で要した。

2.1 地図情報の入手

雪崩解析に応用するため、対象地域の現地地形の詳細について、入手可能な数値地図等を全て取得した。今回入手した地図情報は、国土交通省関東地方測量部が 2010 年に取得した「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）」である。管理者は国土交通省関東地方整備局、計測密度は 1m、計測期間は 2009 年 6 月 2 日から 2010 年 3 月 20 日、当該地域のオルソ画像の撮影日は 2009 年 10 月 30 日、2009 年 11 月 4 日であった。データの管理、配布手続きは、国土地理院地理情報処理課航空レーザ測量データ担当が管轄しているが、発注者が国土地理院外の機関のため、当該機関にオルソ画像撮影日は別途、発注元への問い合わせを要した。データ利用時の制限があり、国や地方公共団体、指定公共機関、災害対策等を目的とした業務、公共性の高い非営利の研究に対して配布される。2017 年雪崩の解析を目的とするため、問題なく配布された。レーザーデータの入手にあたり、Web 上の日本測量調査技術協会が提供する航空レーザ測量データポータルサイト（日本測量調査技術協会、2017）において、レーザーデータの検索を行った。その後、国土地理院レーザー測量データ担当へ電子メールにて問い合わせ、該当データの必要範囲の指定を行い返送する。次に、「使用申請書」を研究単位または部署単位で作成した。申請書には利用組織の公印を要する。データの利用期間は、最長申請日から 3 年以内で、発表成果の報告を要する。今回は科研費報告書の投稿などを鑑みて、最長の 2020（平成 31）年 3 月 31 日までとした。



図－3 那須町の 1889 年の自治体変遷

2.2 対象地域の自治体変遷調査

地名は災害の発生場所や範囲を特定する手がかりとなるが、現在の地名とは異なる、あるいは消失している場合がある。日本では、1889 年以降、明治（1889 年）、昭和（1953 年から 1956 年頃）、平成（1999 年から 2005 年ごろ）の 3 回の大合併が実施された。総務省

(2010)によれば、自治体の合併に伴い、地名の変更や消失が生じたことが指摘されている。ここでは、平成の大合併に対応した「新版角川地名大辞典 DVD-ROM (角川日本地名大辞典編纂委員会,2011)」のほか、「全訂全国市町村名変遷総覧 (日本加除出版, 2006)」, 対象地域の市町村誌を参考とした。

2018年現在の栃木県那須郡那須町は1954年に那須郡那須村、那須郡芦野町、那須郡伊王野村の3町村が合併して成立した自治体である。那須岳の南東山麓から茨城県の県境である八溝山地までを町域とする。調査対象地域である那須岳周辺は、江戸期までは湯本村、1889年以降は那須村に所属していた(図-3)。那須岳北西に位置する三斗小屋温泉は、那須塩原市(旧黒磯市)の飛び地であり、行政管轄が異なる。研究対象となる行政名称は、栃木県那須町大字湯本ならびに那須塩原市三斗小屋温泉周辺である。2017年雪崩発生付近の那須温泉ファミリースキー場は、那須町教育委員会(2005)によれば1961年12月に国設那須岳スキー場として開設され、1996年に現在の名称に改称された。

2.3 既存のデータベースの事例調査

自然災害事例を収録する既存のデータベースより、那須岳周辺における雪崩災害の事例を調査した。調査対象は、災害事例データベース(防災科学技術研究所, 2017b)、日本の雪崩災害データベース(和泉, 2014)、災害情報データベース(災害情報センター, 2017)、雪氷災害データベース(防災科学技術研究所, 2017c: 雪氷災害事故約2.8万件収録)である。このうち、当該地域の雪崩災害が収録されていたものは日本の雪崩災害データベースのみであった。

(1) 災害事例データベース

災害事例データベース(防災科学技術研究所, 2017b)は防災科学技術研究所が整備する西暦416年から2016年までの日本全国の自然災害事例を収録したデータベースである。対象となる自然災害種別は、地震災害、火山災害、風水害、土砂災害、雪氷災害、その他の気象災害である。市区町村が発行する地域防災計画を中心に災害事例を調査・抽出し、2017年10月現在の収録事例数は約58,000件である。

雪氷災害として登録された災害事例は日本全国で3,201件が認められた。収録年間は714年から2014年の約1,300年間であった。このうち、雪崩の発生を示す事例は217件、収録年間は1572年から2012年の約440年間であった。雪崩の種別は、全層雪崩2件、表層雪崩39件、不明が109件であった。最多月は2月、次いで1月と3月であり、全体の76%を占めていた。なお、3月には46件の収録があり、全体の21%に当たる。3月上旬(1日から10日)が17件、中旬(11日から20日)が13件、下旬(21日から31日)が7件、日付不明が7件であった。ここまでは全国の事例の統計であるが、栃木県に関しては雪崩災害の収録がなかった。本データベースでは地域防災計画を基礎としており、そこに記載されていない災害事例は収録されない。あらためて那須町地域防災計画(那須町防災会議, 2012)を確認したところ、雪崩災害は記載されていなかった。

(2) 日本の雪崩災害データベース

日本の雪崩災害データベース(和泉, 2014)は、新潟大学災害復興科学研究所から公開されている日本の雪崩災害事例に特化したデータベースで、2017年10月現在の収録数は7,468件である。収録期間は西暦1867年から2010年春で、市町村ごとに収録している。新聞記事を主体として、気象庁の発行する報告書などの資料を参照している。那須町では1938年3月7日、1969年2月9日、1972年4月10日、1973年1月12日、1994年12月17日、2009年4月2日の6件の事例が収録されていた。発生月は12月、1月、2月、3月が各1回、4月が2回、発生地点は那須岳山麓、剣ヶ峰、弁天温泉裏手の斜面であった。2017年雪崩に近い那須温泉ファミリースキー場内では、過去2回の雪崩災害が発生していた。

2.4 地域資料調査

栃木県那須町立図書館、那須塩原市立黒磯図書館、栃木県立図書館、国立国会図書館において、地域に保存される資料の調査を2017年5月、10月に実施した。対象資料は、市町村誌、

広報誌，地域防災計画，地方新聞などである．災害事例データベースにおいて採用している雪崩に関連する用語（表－1）と那須町に関連する地名をキーワードとして調査した．

市町村誌や那須山岳救助隊の記念誌等の地域資料は那須町立図書館に所蔵があった．国立国会図書館では過去の下野新聞のバックナンバーを閲覧できたが，1969年の記事は所蔵がなく，栃木県立図書館で入手した．発生日の新聞記事は，栃木県の地方紙である下野新聞のほか，朝日新聞（東京版，栃木版），読売新聞（栃木版），新潟日報で情報を収集した（表－2）．

那須茶臼岳周辺の雪崩災害事例を記載する資料は，次の4資料であった（表－3）．資1，資2は那須山岳救助隊の記念誌で，救助活動を行った際の体験談や那須岳の地名といった限られた地域における被害状況が記載されている．資3は平成に入ってから的那須町の町誌である．資4は三斗小屋温泉が作成した地域誌であり，当地での雪崩を意味する用語として，表層雪崩を「アイ」，全層雪崩を「ナデ」，雪崩の通り道を「ナデ窪」と呼称したことが記載されている．

資料調査の結果，次の資料には，雪崩災害に関する情報の掲載がなかった．那須町誌編さん委員会（1976）「那須町誌 前編」，那須町役場総務課（1979）「広報那須—縮刷版一」，那須温泉株式会社（2014）「鹿の湯ものがたり」，黒磯市誌編さん委員会（1975）

表－1 雪氷災害の用語例

現象	出典資料中に出現する用語の一例		
大雪	豪雪		
雪崩	雪崩，類雪，崩雪，なで，あわ，ほうら，ほう，全層雪崩，表層雪崩，泡雪崩，雪代		
	那須地域の雪崩用語（出典：資4）	用語	意味
		アイ	表層雪崩
		ナデ	全層雪崩
融雪	雪代，雪泥流		
着雪	着雪		
吹雪	暴風雪，吹き溜まり		
流氷	流氷		

表－3 雪崩事例が掲載される地域資料

資料番号	タイトル	発行年	著者
資1	山は生きている 那須山岳救助隊 20周年記念誌	1993	那須山岳救助隊
資2	この山に生きる 那須山岳救助隊 設立35周年記念誌	2009	那須山岳救助隊
資3	那須温泉史	2005	那須町教育委員会
資4	三斗小屋温泉誌	1989	三斗小屋温泉誌 刊行委員会

表－2 雪崩災害が記載されている新聞一覧

災害No.	新聞番号	見出し	新聞紙名	発行年月日	掲載面
N01	新1	弁天温泉の崩雪 2名即死1名重傷	下野新聞	1938年3月8日	3面
N03	新2	那須スキー場でなだれ 生埋めの16人救助、那須 “白魔”スキー客襲う	下野新聞	1969年2月10日	1,2面
	新3	那須 スキー場で雪崩 17人生埋め、全員救助	朝日新聞 12版	1969年2月10日	15面
N05	新4	那須 なだれで高校生ら2人死ぬ 「山の友よ安らかに」新学期を前に残念悲しみに沈む藤田君 春山遭難の悲劇	下野新聞	1972年4月11日	1,2面
	新5	栃木 高校生ら2人死ぬ 朝日岳への途中になだれ	新潟日報	1972年4月10日	18面
	新6	那須朝日岳 なだれ、2人死ぬ 麻布中高生 一人は難のがる	朝日新聞 夕刊3版	1972年4月10日	9面
N06	新7	那須岳で表層雪崩 試走の先生埋まりケガ 競技会は中止	下野新聞	1973年1月13日	2面
	新8	栃木 スキー大会中、雪崩 4人巻きかれ一人けが	新潟日報	1973年1月13日	15面
N09	新9	那須連山で雪崩 2人死傷 三斗小屋に向かう途中 東京の会社員	下野新聞	1994年12月18日	2面
	新10	那須連山の雪崩死亡事故 危険なルート選ぶ 尾根伝いなら避けられた	下野新聞	1994年12月20日	2面
	新11	那須・朝日岳 雪崩が直撃会社員死亡	朝日新聞 夕刊3版	1994年12月18日	22面
N10	新12	那須岳で雪崩 男性死亡、那須岳・雪崩死亡「まさかここで・・・」	下野新聞	2009年4月3日	1,3面
	新13	那須雪崩 気候異変で予測困難 今冬の遭難事故最悪6件	下野新聞	2009年4月4日	3面
	新14	栃木、5人グループ被害 雪崩、59歳男性死亡	朝日新聞 14版	2009年4月3日	35面
	新15	茶臼岳遭難 雪崩、5人巻き込む 風速35メートル慰霊登山も「無謀」の声	読売新聞 栃木南13版	2009年4月3日	27面
	新16	那須岳で5人遭難 1人死亡 雪崩巻き込む 慰霊登山も「無謀」の声	読売新聞 東京朝刊	2009年4月3日	27面

「黒磯市誌」，塩原町誌編纂委員会（1980）「塩原町誌」，栃木県警察史編さん委員会（1977）「栃木県警察史 上巻」，栃木県警察史編さん委員会（1979）「栃木県警察史 下巻」，那須町防災会議（2012）「那須町地域防災計画（平成24年度修正）」．

そのほか，防災科学技術研究所自然災害情報室が所蔵する「東京管区異常気象報告（東京管区気象台，1969）」（資料番号：気1）より，1969年2月の雪崩事例の現場見取り図，および，過去の天気図（気象庁発行のCD-ROM）より雪崩災害当日の天気図を得た（表－4）．発

生当時の観測記録は気象庁ホームページより取得した。2009年に発生した雪崩は、防災科研が、災害発生直後の4月3日より現地調査を実施したため調査結果があった。

表－4 気象情報、災害調査資料

災害 No.	資料 番号	タイトル	発行年	著者	掲載 ページ
N03	気1	東京管区異常気象報告 第10巻第1号（1969年1月～3月）	1969	東京管区気象台	p41-42
N09	気2	東京管区異常気象報告 第35巻（1994年）	1995	東京管区気象台	p40
N10	防1	5.災害調査 那須岳雪崩調査（2009.4.4）	2009	防災科学技術研究所	

2.5 調査情報の整理

収集した事例を9つの項目に着目し整理した。基本情報として災害事例のいつ、どこで、何の災害が、どのような規模で、いかなる被害があったのか、という災害事例の概要を取りまとめ、特に発生場所、地形、気象の情報に着目して項目を設定した。

- a 管理情報：通し番号
- b 発生日時：発生年月日（西暦年）、時刻（24時間）
- c 発生場所：自治体名称、発生地点名称
- d 雪崩の情報：種類（表層雪崩、全層雪崩）、雪崩の規模（幅、長さ、厚さ、面積、箇所数）
- e 気象条件：最深積雪、最深積雪の観測期間、降雪量、降雪量の観測期間、気温、最大風速
- f 被害状況：人的被害（遭遇者、死亡者、負傷者、遭遇者の年齢層）、被害の概要文
- g 地形：斜面方位、平均傾斜
- h 出典：出典資料名
- i 参考情報：他のデータベースの掲載状況

2.6 災害発生箇所の地図化

資料の記述等から発生地点を推定し、国土地理院の地理院地図の地名表記を参考にしてGISで地図化を行った（図－2）。位置の正しさとして3つに区分した。

- ・区分1）発生場所および範囲を特定
発生地点や範囲が明確に決定できた場合。
- ・区分2）発生場所が特定されたが範囲が不明
出典資料に雪崩が発生した地名の記載があるが、具体的な範囲が特定できない場合。地図上の適当な地点に代表点を示した。
- ・区分3）発生場所が不明
雪崩が発生した事実はあるが場所および範囲の特定に至らない場合。地図上の地名や建物等を発生地点の代替として示した。

2.7 那須岳周辺の過去の雪崩

那須岳周辺において覚知された雪崩災害事例として、1938年から2009年までの72年間で10件の事例を認めた（表－5）。そのほか三斗小屋温泉（表－3の資4）周辺の大倉山から大峠にかけての南東斜面では、頻度は不明だが雪崩がたびたび確認されるという記述があった。那須岳周辺における雪崩は登山道やレジャー施設内の雪崩事例が多いが、住宅や公道の被害は1938年の事例を除き、確認できない。雪崩の規模（幅、長さ）に関する文字による記載はあるが、地図情報はN03、N05、N10に付されていた。

・N01：1938年3月弁天温泉裏の雪崩

発生日時：1938年3月7日15時00分

人的被害：遭遇3名、死亡2名、重傷1名

事例の概要：那須温泉ファミリースキー場のセンターハウスから直線距離で東に約200m、標高1,207mに位置する弁天温泉の裏手、高さ約15mの崖から幅9m、雪の厚み約1.2mの雪

崩が発生し、浴室 100 坪の範囲に落下し、入浴客 1 名と弁天温泉関係者 1 名が死亡、関係者 1 名が重傷であった。発生日より前から連続して気温が高い日が続いたための雪崩発生と記録されている（新 1）。

・ N02：戦前 峰の茶屋から避難小屋前の沢の雪崩

発生日時：戦前

人的被害：遭遇 1 名，怪我なし

事例の概要：会津の猟師が沢を横切っている際に遭遇，怪我なし。

・ N03：1969 年 2 月の那須岳スキー場の雪崩

発生日時：1969 年 2 月 9 日 10 時 58 分

人的被害：遭遇 16 名（N03-1：13 名，N03-3：3 名），負傷者なし（くじき 1 名）

事例の概要：那須岳スキー場（現・那須温泉ファミリースキー場）の第 2 リフトの終点（標高 1,360m）から南へ 100m の地点より，表層雪崩が 2 箇所が発生した。雪崩 N03-1（図－4 中の第一現場）が発生したあとすぐに雪崩 N03-2（図－4 中の第二現場）が発生した。東京管区気象台（1969）に簡易的な見取り図が掲載されていた（図－4 左上）。巻き込まれた遭遇者の約半数が 30 分後の 11 時 30 分ごろまでに自力で脱出した。当日の気象条件は，前日までは気温が高く，前夜から 2 月 9 日朝にかけて降った新雪が 40cm 積もっていた。気温は氷点下 2 度，風速は 15m 毎秒であった。なお，発生現場の第 2 リフト終点は，2017 年現在の終点（標高 1330m）より北北西約 100m の地点に設置されていた。N06 も第 2 リフト終点付近から発生した。

・ N04：1969 年 3 月の那須岳スキー場の雪崩

発生日時：1969 年 3 月 5 日

人的被害：遭遇 3 名，死亡 2 名，負傷 1 名

事例の概要：N03 の一ヶ月後に発生した雪崩災害。救助資料に記載はあるが詳細は不明。

1969 年 3 月 5 日付の下野新聞によれば，栃木県下では 3 月 4 日の降雪により約 17cm の積雪があり，県下では学校の授業打ち切り，スリップ事故等が発生する気象条件であった。

・ N05：1972 年剣ヶ峰の雪崩

発生日時：1972 年 4 月 10 日 10 時 00 分

人的被害：遭遇 3 名，死亡 2 名，負傷 1 名

事例の概要：本災害は 3 人組（男性，10 代）の登山者が那須岳峰の茶屋（標高 1,725m）から剣ヶ峰（標高 1,799m）をトラバースし，朝日岳（標高 1,896m）へ登頂する道中で発生した（図－5）。10 時ごろ剣ヶ峰南東の夏道斜面をトラバースしていたところ，頭上 1.5m 付近から亀裂が入り雪崩が発生し，3 名全員が巻き込まれた。10 時 30 分ごろ，うち 1 名がロープウェイ山麓駅に通報し発覚した。那須山岳救助隊（1993）によれば，死亡した 2 名は



図－4 1969 年（N03），1972 年（N06）の雪崩の発生地点と範囲

深さ 20cm から 30cm 付近に埋没しており，発見場所は 15m ほど離れていた（図－5）．
N09 もほぼ同じ地点で発生した．

・ **N06：1973 年の那須岳スキー場の雪崩**

発生日時：1973 年 1 月 12 日 9 時 40 分

人的被害：遭遇 4 名，負傷 1 名

事例の概要：那須岳スキー場（現・那須温泉ファミリースキー場）の第 2 リフト西側の 30 度から 40 度の斜面で幅 30m，長さ 400m の表層雪崩が発生した．第 13 回高校総合体育大会のスキー大会のため，高校教諭と地元のスキークラブが会場の雪崩の危険性とコースの検討と調査をしている際に発生した．遭遇者は全員自力で脱出したが，試走の教諭がけがをした．当日の気象条件は，前日までの積雪が 1m，11 日 13 時からの降雪により，約 40cm の積雪があった．宇都宮地方気象台（標高 120.0m）の記録では，当日 9 時の気温は 3.7 度であった．

・ **N07：峰ノ茶屋直下の雪渓の雪崩**

発生日時：1980 年代

人的被害：遭遇 1 名

事例の概要：那須岳峰ノ茶屋の東側直下にある雪渓をトラバースしていた，三斗小屋温泉の住民女性が雪崩に遭遇し，自力で脱出した．

・ **N08：五六豪雪時の雪崩**

発生日時：1981 年 2 月上旬

人的被害：遭遇 0 名

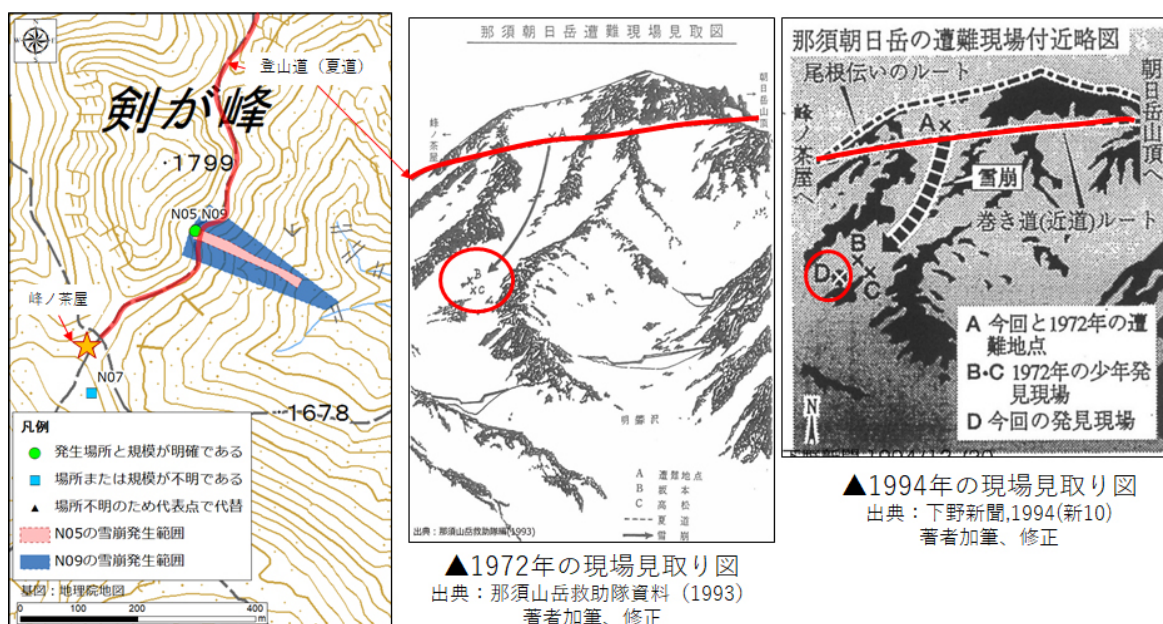
事例の概要：三斗小屋温泉付近の「シラカバ林」において雪崩堆積物の存在が確認された．

・ **N09：1994 年剣ヶ峰の雪崩**

発生日時：1994 年 12 月 17 日 11 時 45 分

人的被害：遭遇 3 名，死亡 1 名，負傷 1 名

事例の概要：本災害は N05 とほぼ同一地点で発生した災害である．3 人組（男性，30 代から 40 代）の登山者が朝日岳（標高 1,896m）へ登頂後，剣ヶ峰（標高 1,799m）をトラバースする道中で発生した（図－5）．三斗小屋温泉へ向かうため，剣ヶ峰南東の夏道斜面をトラバースしていたところ，足元から亀裂が入り雪崩が発生し，2 名が巻き込まれた．当日の気象条件は登山道では約 30cm の積雪があった．アメダス那須高原によれば，12 時時点の気温は氷点下 0.4 度，風速は 5m 毎秒であった．



図－5 1972 年（N05），1994 年（N09）の雪崩の発生地点と範囲

・ N10 : 2009 年那須岳林道の雪崩

発生日時 : 2009 年 4 月 2 日 14 時 30 分

人的被害 : 遭遇 5 名, 死亡 1 名

事例の概要 : 本災害は 5 人組 (男性, 30 代から 70 代) の登山者が, 慰霊登山のため那須岳東側の峠の茶屋から峰ノ茶屋方面へ向かう林道で発生した。雪崩遭遇地点は標高 1,550m である。沢の右岸側を林道が通っており, 植生のない約 20m の区間を通過中に遭遇した。当日の気象条件は, アメダス那須高原によれば当日 15 時の気温は 2.7 度, 風速は 4.8m/s, 積雪は 10cm であった。

3. 那須岳周辺の過去の災害事例の発生傾向

表-5 に過去の事例をまとめた。ここから, 過去の事例では災害の発生月に傾向はみられず, 積雪期にあたる 12 月から 4 月に発生していた。発生場所が特異な事例が 5 事例 (雪崩 6 箇所), おおよそその発生場所が明らかになった事例が 3 事例, 発生地点が不明な事例が 2 事例であった。同一地点で複数回発生した事例は, 那須温泉ファミリースキー場内で 3 事例, 剣ヶ峰登山道で 2 事例であった。発生地点是那須岳の東側山麓に集中したが, 東麓には集落があり, 那須岳登山口であるため, 雪崩に遭遇する人口が多く, 覚知された事例が多くなったと考えられる。

雪崩発生地点の地形は, 那須岳の東向きまたは南東向きの凹斜面に多い傾向がみられた。発生斜面の平均傾斜は 32.9 度, 標準偏差は 8.9 であった。発生日の気象条件は, 前日の昼過ぎから降った 20~50cm の新雪の存在が特徴的である。事例 N03, N06, N10 では, 前日までに融解, 凍結した雪面上に 30cm 程度の積雪があったと記載されており, 雪崩が発生しやすい層が形成されていた可能性が指摘できる。雪崩発生時の気温は氷点下 2 度から 5 度程度, 風向は不明, 風速の定量的な記述が無いが, 体感で激しいと感じる強風が吹いていた傾向がある。発生形式が不明な事例もあるが, 被災者の体験談などから大半の事例が表層雪崩と考えられる。

番号	発生日時	場所	規模		気象条件				人的被害			斜面		出典資料
			幅 m	長さ m	降雪 量 cm	期間	気温 ℃	風速 m/s	遭遇 者	死亡	負傷	斜面 方位	平均斜面 傾斜角	
N01	1938/3/7 15:00	弁天温泉裏	9						3	2	重傷 1	南東	41.8°	新1
N02	戦前	峰の茶屋～ 避難小屋前の沢							1			北西	23.57°	資4
N03-1	1969/2/9	那須岳スキー場*2	10	50	40	1969/2/8 夜	-2	15	12	0	0	南東	40°	資1 新1.2 気1
N03-2	10:58	第2リフト	20	80		-2/9朝			3			南東	40°	
N04	1969/3/5	那須岳スキー場*2							3	1	2		19.47°	資1
N05	1972/4/10 10:00	剣ヶ峰南東斜面	20	200	30	1972/4/9			3	2	1	南東	40.32°	資1 新4-6
N06	1973/1/12 9:40	那須岳スキー場*2 第2リフト	30	400					4		1	南東	19.47°	新7.8
N07	1980年代?	那須岳峰ノ茶屋 東側直下の雪渓							1			北東	25.77°	資4
N08	1981/2 上旬	那須岳シラカバ林												資4
N09	1994/12/17 11:45	剣ヶ峰南東斜面	100	300	3	1994/12/ 16:00～ 12/17:6:00	-1.3 ～- 0.4	5	3	1	1		40.32°	資3 新9-11 アメダス
N10	2009/4/2 14:30	那須茶臼岳北側 斜面旧林道	10	70	30	2009/4/1 -4/2	2.7	35	5	1		北	39°	防1 新12-16 アメダス
N11	2017/3/27 8:30	那須温泉ファミ リースキー場上部 ミダガ原			34	2017/3/2 6-3/27	-0.3	最大 5.8	55	8	40 重2 軽38	南東	35°	アメダス

*1住所情報は栃木県那須町湯本のため割愛、*2那須岳スキー場は後年、那須温泉ファミリースキー場に改称
欄外1 : 峠沢南東斜面は雪崩の発生がたびたび確認される 欄外2 : 2010年3月27日郭公沢の雪崩災害は反映されていない

表-5 那須岳周辺の過去の雪崩災害事例一覧

4.まとめ

過去の災害事例の調査により発生場所の地形および気象条件、積雪状況に傾向が見られることが示された。これらの条件は2017年3月27日の雪崩災害との類似性が指摘できる。過去の災害事例を精査し地図化する手法をとおして、雪崩防災対策や教育啓蒙に活用できる教訓のほか、過去の視点から雪崩発生予測技術を検討するための知見が得られる可能性がある。過去の災害事例を根拠とした雪崩災害の危険性を提示することにより、予測技術に基づいたリスク情報には無い現実味を持った説得力がある。本調査の成果が将来的な雪崩災害の予防に貢献できるよう、研究を推進したい。

引用文献

和泉薫 (2014) 日本の雪崩災害データベース

http://www.nhdr.niigata-u.ac.jp/nadare_db/ (最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

宇都宮地方気象台 (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)

角川日本地名大辞典編纂委員会 (2011) 「新版角川地名大辞典 DVD-ROM」

気象庁 (2017) 那須岳

http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/301_Nasudake/301_index.html (最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

市町村自治研究会 (2006) 全訂全国市町村名変遷総覧

鈴木比奈子・内山庄一郎・堀田弥生・臼田裕一郎 (2013) 日本全国の自然災害事例の網羅的なデータベース化, 日本地理学会発表要旨集 No.83, p297.

鈴木比奈子・内山庄一郎・中村一樹 (2017) 文献と地理情報による過去の災害状況の傾向分析, 寒地技術論文・報告集 (33), p248-253.

総務省 (2010) 「平成の合併」について

http://www.soumu.go.jp/gapei/pdf/100311_1.pdf

(最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

総務省消防庁 (2017) 栃木県那須町での雪崩について (第 9 報 2017 年 3 月 30 日 14 時 30 分)

<http://www.fdma.go.jp/bn/2017/detail/997.html>

(最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

東京管区気象台 (1969) 東京管区異常気象報告, 10 (1), p41-42.

那須町防災会議 (2012) 「那須町地域防災計画 (平成 24 年度修正)」

<http://www.town.nasu.lg.jp/hp/page000002800/hpg000002741.htm> (最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

防災科学技術研究所 (2009) 5 災害調査 那須岳雪崩調査 (2009.4.4),

http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyousaigai/report_20090404_nasudakenadare.pdf

(最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

防災科学技術研究所 (2017a) 災害調査 那須町雪崩災害第 2 回調査 (速報) (2017.4.2 実施)

http://www.bosai.go.jp/saigai/2017/pdf/20170410_01.pdf (最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

防災科学技術研究所 (2017b) 災害事例データベース <http://dil.bosai.go.jp/dedb/index.html>

(最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

防災科学技術研究所 (2017c) 雪氷災害データベース

<https://yukibousai.bosai.go.jp/obs/news/index.php> (最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

災害情報センター (2017) 災害情報データベース, <http://www.adic.waseda.ac.jp/adicdata/2017>

(最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

日本測量調査技術協会 (2017) 航空レーザ測量データポータルサイト

<http://www.sokugikyo.or.jp/laser/> (最終閲覧日 2018 年 3 月 11 日)

第 3 章

降雪状況の面的解析

降雪状況の面的解析 Analyses on the meteorological conditions and the distribution of snowfall

中井 専人¹⁾, 吉田 聡²⁾³⁾, 荒木 健太郎⁴⁾
出世 ゆかり⁵⁾, 岩波 越⁵⁾, 鈴木 真一⁵⁾, 橋本 明弘⁴⁾, 本吉 弘岐¹⁾
S. Nakai¹⁾, A. Kuwano-Yoshida²⁾³⁾, K. Araki⁴⁾
Y. Shusse⁵⁾, K. Iwanami⁵⁾, S. Suzuki⁵⁾, A. Hashimoto⁴⁾, H. Motoyoshi¹⁾

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⁾京都大学防災研究所 白浜海象観測所

²⁾*Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

³⁾京都大学防災研究所 潮岬風力実験所

³⁾*Shionomisaki Wind Effect Laboratory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

⁴⁾気象庁 気象研究所

⁴⁾*Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency*

⁵⁾防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

⁵⁾*Storm, Flood and Landslide Research Division, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

Abstract: In this short section, the key points of the activity of the meteorological analysis group of this project is described. The in situ snow survey immediately after the avalanche accident showed two facts that came to be the start point of our analyses: Unusual heavy snowfall from the evening on March 26 to the morning on March 27, and a weak layer at 17 to 30 cm below the snow surface composed of poorly-rimed, typically plate-like snowflakes. The analyses were focused on 1) the process of development of cyclones, water vapor flux, and clouds that resulted in the heavy snow, and 2) the detection of characteristic snowfall that leads to the formation of the weak layer. The predictability of both phenomena was also investigated. The essence of the analysis result is listed, for example, importance of water vapor flux, seeder-feeder mechanism and orographic effect. New method of prediction of snowfall particles was first applied to the real case. The result of the method was consistent to the radar analysis showing that the time of the formation of the weak layer seems to be before midnight. New technology, Ka-band radar analysis detected plate-like crystal layer of another case, showing a possibility of its future contribution to the prediction of weak layer of south-coast cyclones. The details of these analyses are presented in the following sections.

Key words: South-coast cyclone, Predictability, Radar, Cloud microphysics, Orographic effect

1 研究方針の検討

2017年3月27日に那須温泉ファミリースキー場付近の山岳地で発生した災害雪崩については、翌日に現地入りした調査チームにより、積雪状態が明らかにされている(中村ほか, 2017). 特に、1)26日夕方から27日午前中にかけてのこの時期としては稀な大雪による新雪荷重がある状態で、2)積雪表面から17cm~30cm下の雲粒付着の少ない板状等の降雪結晶の弱層が破壊されて表層雪崩が発生した、の2点が降雪状況の解析においてもポイントとなった。このような状況をもたらした降雪はどのような総観場、降水系によってもたらされたか、研究開始時の検討において、次のような指摘と方向付けがなされた。

- ◆ 今回の事例では現地の降雪量がかなり多く、地形による降雪の集中が考えられる。従って、離れた場所の気象観測点データから観測点のない現地降雪量を推定するだけでは必ずしも十分ではない。

- ◆ レーダーや気象モデルなどを用いて、降雪量と降雪粒子のメソスケール(数百 km～数 km)の分布について調査する。
 - 1)降雪をもたらした低気圧の発達状況と構造、関東地方への水蒸気輸送について客観解析データ等を用いて明らかにする。
 - 2)面的な降雪種、降水量推定について現在のレーダー観測、解析技術を活用して調査する。
 - 3)地形性降雪の影響も含めて、今回の災害にかかわる「多量の降雪」の形成過程について数値モデルによる調査を行う。
- ◆ 雪崩の弱層形成にかかわる降雪イベントについて、現在の技術を用いた降雪粒子結晶形状の識別可能性についても検討する。
- ◆ 正確な降雪量、降雪種分布は、今後、観測点のない山岳の雪崩危険度判断を確実にしていくために必要である。
- ◆ 降雪状況の解析についての研究会を開催し、研究まとめにむけて進捗と成果の整理を行う。

以上の検討をもとに研究を行った。進捗に応じて、個別の打ち合わせと本研究全体打ち合わせ以外に、5月と10月に降雪研究グループでのミーティングを行った。また、研究まとめに向けた議論のため、2017年11月21-22日に長岡市において「ワークショップ 降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 in 長岡 ～ 雪崩につながる不安定積雪を作る降雪～」を開催した。

2 研究成果の要点

以上のように実施してきた研究の成果を整理すると、2017年3月26日から27日にかけての降雪状況、及びその予測、解析、技術的展望などについて、次のことが指摘できる。

- 現地調査の重要性
 - 積雪断面観測により雲粒付着の少ない降雪粒子の弱層と上載荷重が指摘されたことは調査の方向付けに非常に重要であった。
- 低気圧の特性と予測
 - 海面気圧場は4日前から予報できていたが水蒸気流入量予測は直前でも過少。
 - 東風による水蒸気流入量の多いところで多量の降雪となる(南岸低気圧か、その後ろに形成される小低気圧かを問わない。)。
- 上載荷重積雪を形成した降雪過程
 - 東風による下層地形性雲が形成され、Seeder-Feederによる降雪増幅が働いた。
 - Seederとなった上層の雲には生成セルがあり、Feederとなった下層の雲では降水に対する山岳地形の寄与が大きかった。
- 弱層を形成した降雪過程
 - 日付が変わる前後の一様性の高い降水強度と風の場合が弱層に寄与した可能性がある。
 - 日付が変わる前に雲粒捕捉のない時間帯があり、弱層に対応の可能性がある。
 - 上載荷重形成時とは上空風向が異なり Seeder-Feeder が働かなかった。
- 将来の研究の方向
 - Ka バンドレーダーで生成セル構造と高密度 Plate を検知し、降雪強化と弱層の解析に可能性を見いだした。
 - 気温毎昇華成長、雲粒捕捉成長の比率を積雪断面に対応させて出力できた。数値気象モデルによる粒子情報は、弱層形成の可能性をある程度表現し得る。

それぞれの成果の詳細は、この後に続く節を参照されたい。

引用文献

中村一樹・小杉建二・根本征樹, 2017: 那須町雪崩災害調査: 第1回調査(2017.3.28).
http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyouaigai/2017/report_20170328_NasuOnsen.pdf, 2018年2月24日確認)

2017 年 3 月 27 日の那須雪崩をもたらした低気圧の予測可能性
Predictability of an Extratropical Cyclone Causing Snow Avalanche at Nasu on
27th March 2017

吉田 聡^{1), 2)}
A. Kuwano-Yoshida^{1), 2)}

¹⁾京都大学防災研究所 白浜海象観測所

¹⁾*Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

²⁾京都大学防災研究所 潮岬風力実験所

²⁾*Shionomisaki Wind Effect Laboratory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

Abstract: On 27th March 2017, a snow avalanche occurred at Nasu. Seven high school students and a teacher became victimized by the snow avalanche. Before then, an explosive extratropical cyclone passing the south coast of Japan precipitated a massive snow rapidly. Statistical predictability analysis of weekly ensemble prediction system of Japan Meteorological Agency shows that the system tends to underestimate explosive cyclone's development passing the south coast compared with cyclones developed over the northern part of Japan. The Nasu case could not be predicted until four days before, the position shifted northwestward even in one day prediction. However, moisture flow pattern to Nasu which is snow origin were predicted from five days before, while the moisture amount is less than observations. The predictability depended on an antecedent ridge. In failed prediction, the weak development of ridge caused weak development of the following cyclone.

Key words: Extratropical cyclone, Predictability, Moisture flux, Numerical weather prediction (max: 5)

1 はじめに

これまでの調査で、2017 年 3 月 27 日に那須高原で発生した雪崩は日本南岸を通過した低気圧がもたらした急激な積雪の増加が要因の一つと報告されている。しかし、気象庁の週間アンサンブル予報では、南岸低気圧は日本海で発達する低気圧に比べ、予測精度が低いことが指摘されている(吉田 2018)。今回の低気圧とそれに伴う降雪がどのくらい前から予測できていたかを明らかにすることは、防災上重要である。そこで本研究では、気象庁週間アンサンブル予報における、今回の低気圧の発達とそれに伴う水蒸気移流の予測可能性を調査した。

2 データと手法

用いたデータは京大生存圏研究所にアーカイブされている気象庁週間アンサンブル予報データである。アンサンブルメンバー数は 27 で、日本付近は水平解像度 1.25° 、6 時間毎、全球データは 2.5° 、12 時間毎の予報が保存されている。毎日 00UTC と 12UTC を初期値として 11 日間予報をしている。今回は 8 日予報までのデータを利用した。日本付近の予報値はジオポテンシャル高度、気温、東西風、南北風の 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa 面、湿度の 925 hPa, 850 hPa 面が、全球予報値はジオポテンシャル高度、気温、東西風、南北風の 850 hPa, 500 hPa, 300 hPa 面、湿度の 850 hPa 面が保存されている。

低気圧の発達指標として、地表気圧の 24 時間変化率を緯度 60° で規格化した LDR24 (Kuwano-Yoshida, 2014)

$$\text{LDR24} = - \frac{p_s(t) - p_s(t - 24h)}{24h} \left| \frac{\sin 60^\circ}{\sin \theta} \right|$$

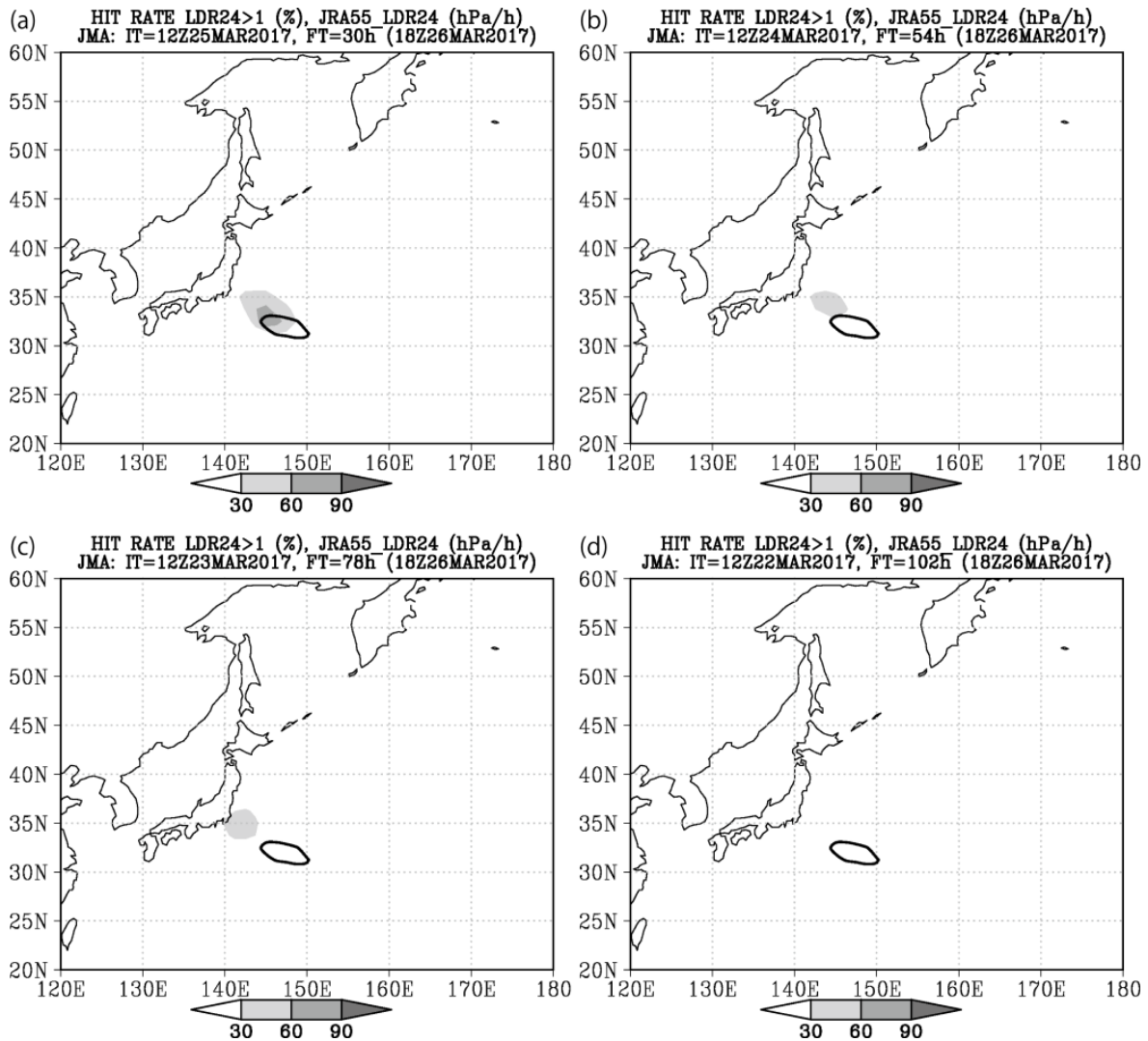


図 1. 2017 年 3 月 26 日 18UTC に気象庁週間アンサンブル予報で $LDR24 \geq 1$ となるメンバーの割合（陰影，%）と JRA-55 の $LDR24 = 1$ （太実線）．それぞれ（a）2017 年 3 月 25 日 12UTC，（b）24 日 12UTC，（c）23 日 12UTC，（d）22 日 12UTC 初期値．

を利用し， $LDR24 \geq 1 \text{ hPa/h}$ を爆弾低気圧とした．ここで p_s は地表面気圧， t は時間， θ は緯度である．予報精度評価のため，気象庁長期再解析データ JRA-55 (Kobayashi et al., 2015) を比較データとして用いた．JRA-55 の水平解像度は 1.25 度で 6 時間毎の解析値を用いた．

3 結果

今回，那須雪崩の要因の一つとなった低気圧は 2017 年 3 月 25 日 00UTC に九州南方沖で発生した．その後，東進しながら 26 日 18UTC に関東の南東沖で急発達し，爆弾低気圧に相当する発達率 ($LDR24 \geq 1$) を示した．アンサンブル予報の各格子で全メンバーのうち $LDR24 \geq 1$ となったメンバーの割合を的中率として，異なる初期時刻からの予報結果を図 1 に示す．22 日 12UTC 初期値からの予報では当該低気圧の急発達を予報したメンバーは一つもなく（図 1d），23 日 12UTC 初期値以降に急発達を予報するメンバーが現れ始めている（図 1c）．しかし，その割合は 30%程度で推移し，直前の 25 日 12UTC 初期値の予報でも 60%程度であった（図 1a）．また，急発達が起こる位置は実際の発達位置に比べて北西方向にずれる傾向があり，低気圧の発達予報としては難しい事例であった．しかし，日本付近の海面気圧の空間分布について，アンサンブル予報の各メンバーと JRA-55 との空間相関を調べると，22 日 00UTC 初期値まではアンサンブルメンバー間のばらつきは大きい，22 日 12UTC 以降の初期値では，予報のばらつきが小さくなっていた（図 2）．この結果は，個々の低気圧の発達強度の予報可能性は 1 日

程度しかなかったが、水蒸気の流れを決める海面気圧の空間パターンは4日程度前から予測できていたことを示している。

実際、急激な積雪の増加の要因となった低気圧から那須高原上空への水蒸気流入の予測を調べると、21日00UTC初期値の予報では東からの水蒸気フラックスは見られず、那須上空の水蒸気量の増加も予報できていなかった(図3a, b)。一方、海面気圧の空間分布の予報ができてきた22日12UTC初期値からの予報では、東からの水蒸気フラックスが予報され始めている。しかし、その大きさは解析値よりも弱かった(図3c, d)。雪崩発生直前の25日12UTC初期値からの予報では水蒸気量は立ち上がり、ピーク時刻が遅れる傾向があるものの、東からの大きな水蒸気フラックスと水蒸気量の急激な増加が高い確率で予測されていた(図3e, f)。また、低気圧発達前の乾燥状態の予報は21日12UTC初期値でも精度よく予報されていることから、低気圧の発達予測が水蒸気流入を左右していることがわかる。

この予測精度の急激な変化の要因を明らかにするため、那須上空の水蒸気量予報の不確実性が大きく改善した21日12UTC初期値とその直前の21日00UTC初期値の予報を比較した。22日00UTCの300 hPa ジオポテンシャル高度予報を見ると、21日12UTC初期値からの予報の方がカスピ海南東で高度場が高く、カスピ海南部のスプレッドが小さくなっていた(図4a, b)。その後、東経80度付近で大きくスプレッドが減少し、アンサンブル平均場には北東方向に延びる波列パターンが形成されていた(図4c, d)。那須で雪崩が発生した頃の27日00UTCでは、日本上空でスプレッドの小さい低高度偏差が現れていた(図4e, f)。爆弾低気圧は上空のトラフの接近をきっかけとして急発達することから、この結果は、対流圏上空の高度場偏差の不確実性がカスピ海付近で弱まったことで、その後の日本付近での低気圧発達をもたらす上層トラフの不確実性が小さくなったことを示している。

以上の結果より、那須雪崩の要因となった低気圧の正確な予測は直前まで予測が難しく、積雪の増加をもたらした水蒸気流入もピーク時刻が遅れる傾向があり、流入量も過小評価されていた一方で、那須への東からの水蒸気流入傾向は4日程度前から確度が高かったことがわかった。

4 まとめ

那須雪崩の要因となった低気圧とそれに伴う水蒸気流入の予測可能性について、気象庁週間アンサンブル予報データを用いて解析した。低気圧そのものの発達には4日前の時点では全く予報されておらず、1日前でも北西方向にずれて予報される傾向を持ったまま、水蒸気流入も過小に予報されていた。しかし、水蒸気流入を決める海面気圧の空間パターンは4日前から精度よく予報されていた。ただし、水蒸気流入量の予測は直前でも過少評価傾向にあり、数日程度のリードタイムをもって、雪崩当日の急激な積雪の増加を予想するのは難しい事例であった。現在の予報技術では南岸低気圧は比較的予報のリードタイムが短く、雪崩の誘因となる降雪量の急激な増加を数日前から予測することは難しいことを考慮した対策が必要である。

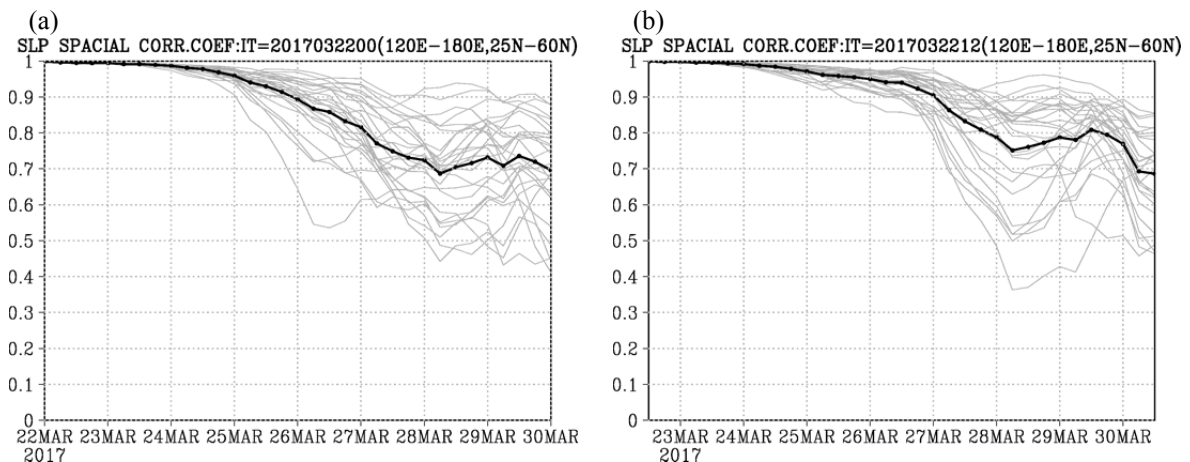


図2. 日本付近(東経120度~180度、北緯25度~60度)の海面気圧のアンサンブル予報とJRA-55との空間相関。黒:平均、灰色:各メンバー。(a) 2017年3月22日00UTC初期値、(b) 22日12UTC初期値。

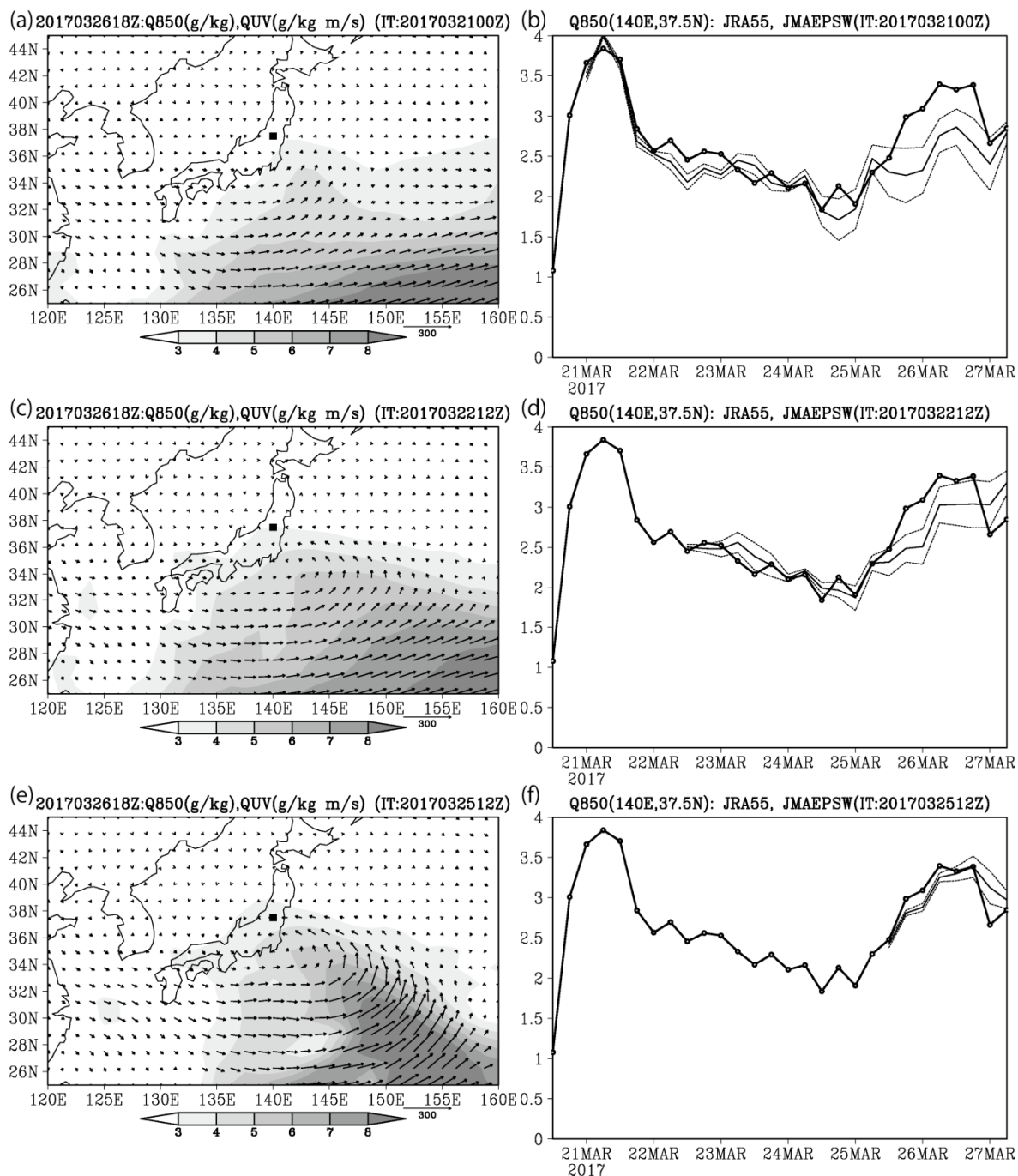


図3. (左) 2017年3月26日18UTCの850hPaの比湿(陰影, g/kg)と水平水蒸気フラックス(矢印, g/kg m/s), (右) 那須高原直近の格子(140°E, 37.5°N)の850hPa比湿の時系列: JRA-55(太実線), アンサンブル予報平均(細実線)と ± 0.5 標準偏差(破線). (a) (b) 21日00UTC, (c) (d) 22日12UTC, (e) (f) 25日12UTC初期値.

引用文献

- 吉田 聡, 2018, 爆弾低気圧の予測可能性, 気象研究ノート「南岸低気圧による大雪」, 印刷中.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Kuwano-Yoshida, A., 2014: Using the Local Deepening Rate to Indicate Extratropical Cyclone Activity. *SOLA*, **10**, 199–203, doi:10.2151/sola.2014-042.

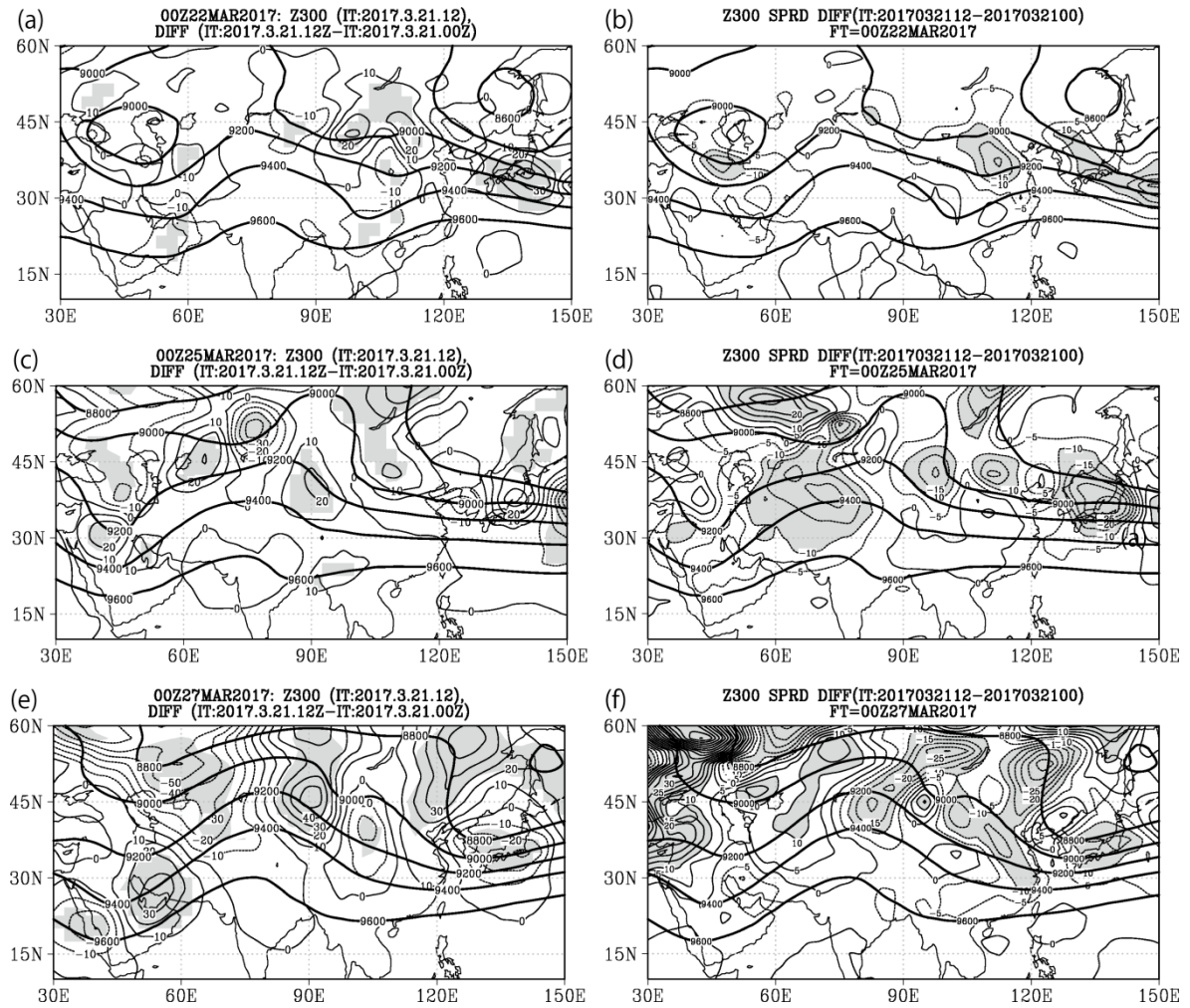


図4. 2017年3月21日12UTC初期値と20日UTC初期値の300hPaジオポテンシャル高度
(m) 予報の差(細実線)と21日12UTC初期値の予報値(太実線). (左) アンサンブル平均(陰影は95%有意かつ差が10m以上), (右) アンサンブルスプレッド(陰影は差が10m以上). (a) (b) 22日00UTC, (c) (d) 25日00UTC, (e) (f) 27日00UTC.

那須における表層雪崩発生に関わる低気圧性大雪の特性 Characteristics of heavy snowfall associated with cyclones causing surface avalanche in Nasu

荒木 健太郎¹⁾

K. Araki¹⁾

¹⁾気象庁気象研究所

¹⁾Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Abstract: A heavy snowfall associated with cyclones caused a surface avalanche in Nasu in Japan on 27 March 2017. It is known that large amounts of snowfall in a short time are important for occurrence of surface avalanches, however, understanding of snowfall characteristics in mountain regions during heavy snowfall events is lacking. In this study, a case study on this case was performed. In addition, we conducted statistical analysis on the cases in Nasu from 1989 to 2017 and investigated the characteristics of snowfall and meteorological conditions. As the result of the case study, low-level supercooled water clouds were formed by orographically-forced updraft in mountain regions in Nasu as moist northerly and easterly flows were intensified due to the cyclone approach on 27 March 2017. It is found that the heavy snowfall in a short time was caused the local snowfall intensification by the Seeder-Feeder mechanism associated with the low-level clouds and snowfall from upper clouds of the cyclone. As the result of statistical analysis, it is found that heavy snowfall events of similar amounts as this case occurred once every 3 years, and in March every 19 years. The surface pressure patterns in heavy snowfall cases in Nasu were about 63% in typical winter monsoon pattern and about 30% in cyclones. Although snowfall amounts became larger as snowfall duration was longer in both patterns, some heavy snowfalls in a short time exceptionally occurred in cyclone cases, where the occluded cyclones passed near the Kanto region.

Key words: South-Coast Cyclone, heavy snowfall, avalanche

1 はじめに

2017年3月27日に本州南岸を通過する低気圧に伴って那須で大雪が起こり、表層雪崩が発生した。現地調査結果から、雲粒付着の少ない弱層上部には一部雲粒付着した降雪結晶による多量の降雪が起こり、表層雪崩に至ったと推定されている（防災科学技術研究所，2017）。本研究では、この短時間での大雪に注目し、那須に大雪をもたらす降雪雲の環境場や降雪特性を理解することを目的に、数値実験等を通じた那須雪崩事例の解析、および再解析データ等を用いた統計解析を行った。詳細については荒木（2018a）を参照いただきたい。

2 2017年3月27日那須雪崩の事例解析

2.1 解析データ・数値実験の設定

降雪実況と環境場の解析には各種レーダー・地上・高層気象観測、気象庁メソ客観解析等を用いた。数値実験は気象庁非静力学モデル（Saito et al., 2006）を用い、まず水平解像度 1.5 km で東日本を覆う 1,425 km 四方を計算領域とした。初期値・境界値に気象庁メソ客観解析を用い、26日12時～27日21時（JST，以下同様）を対象に計算を行った（1.5km-NHM）。次に、この結果から初期値・境界値を作成し、26日21時～27日15時を対象に那須を含む 237.5 km 四方の領域で水平解像度 250 m の実験を行った（250m-NHM）。これらの実験では雲氷・雪・霰を 2-moment バルク法で扱う雲物理過程を用いた。また、降雪に対する地形の影響を確認するため、那須岳の標高を 500m にする実験（NASU500）と全地形を除去する実験（NOZS）を行った。

2.2 低気圧と降雪環境場の特徴

3月26～27日にかけて、上空の寒気トラフ通過に伴い、前線を伴う温帯低気圧（南岸低気圧）が本州南海上を通過した。那須に降雪をもたらした低気圧は南岸低気圧中心の西側で 27

日 0～3 時に発生したもので、前線を伴っていなかった。アメダス那須高原では 27 日 1 時には積雪深が 0 cm だったが、これ以降に積雪深が増え、10 時には 34 cm に達した。26 日午後には南岸低気圧の Warm Conveyor Belt (Browning, 1990) に対応する 850 hPa の水蒸気フラックス量の大きい領域が南岸低気圧中心の北側にのび、27 日 3 時には北東～東の風で那須に流入していた (図-1)。その後も那須周辺では後続の低気圧接近に伴う北～東風による水蒸気供給の多い状態が持続していた。

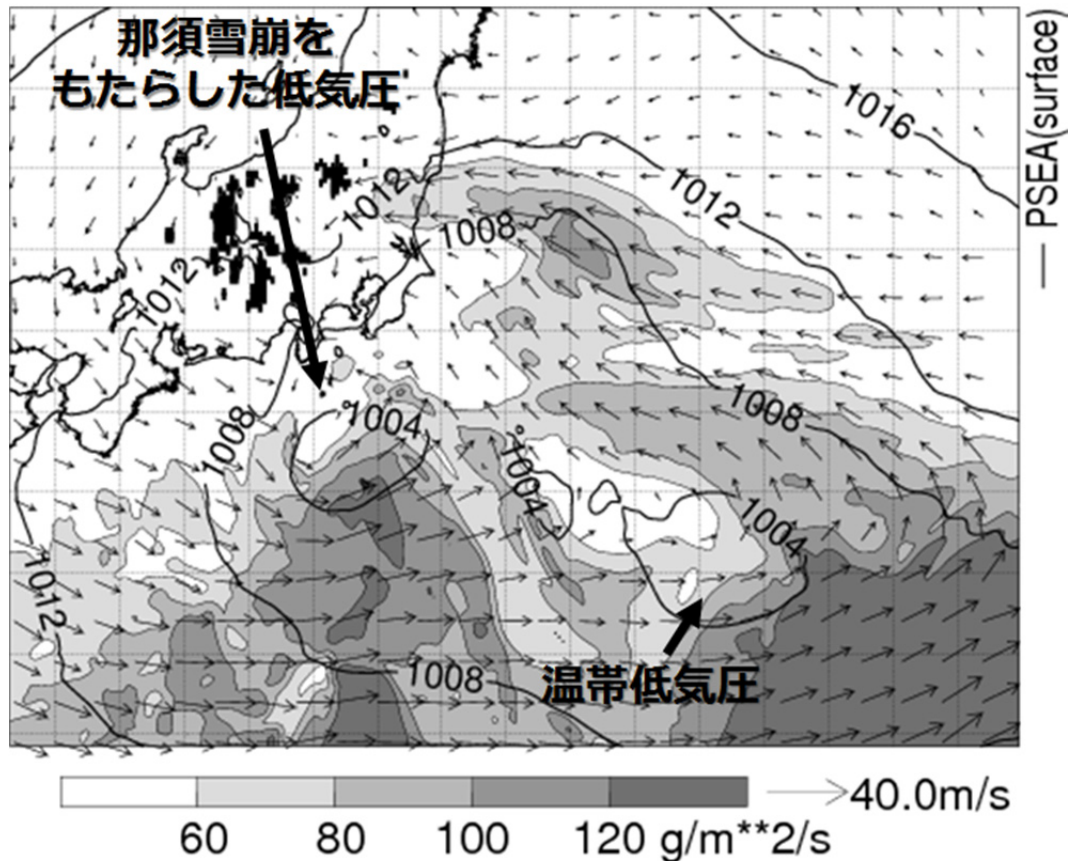


図-1 気象庁メソ客観解析による 3 月 27 日 3 時の 850hPa における水蒸気フラックス量 (陰影) と水平風 (ベクトル), 海面気圧 (等値線, hPa)。

2.3 降雪の集中と降雪種に対する地形の影響

数値実験で再現された気象場や降水状況は、実況よりやや遅れたものの観測とよく整合していた。那須周辺では特に那須岳の北～東側斜面に雪による総降水量が多く、降雪が集中していた (図-2)。那須岳周辺では降雪開始初期に高度約 3km 以下で南寄りの風だったが、徐々に東寄りの風に変わり、強い降雪が持続した時間では高度約 2～2.5 km 以下で北～東の風が吹き風速も強まった。この頃から那須岳の北東斜面上空では高度約 2 km 以下に 0.5～1 m s⁻¹ の地形性上昇流が継続的に形成され、雪混合比も大きくなった (図-3a)。この上昇流域では過冷却雲粒も発生していた (図-3b)。低気圧に伴う多量の水蒸気供給により降雪粒子の昇華成長が促進されたことに加え、地形性上昇流による過冷却雲粒形成で雲粒捕捉成長が効率的に行われ、Seeder-Feeder メカニズム (Houze, 2012) による降雪強化が山地斜面上空の大気下層で起こっていたことが示唆される。26 日 21 時～27 日 15 時の第 2 図青破線領域での雪による平均総降水量は 250m-NHM で約 26 mm, NASU500 で約 11 mm, NOZS で約 5 mm であり、後者 2 つの実験では降雪の集中は見られなかった。

これらのことから、那須岳や周辺地形が降雪の局地的な集中に非常に重要であることがわかった。地形影響を受けない降雪の後、山地斜面上空で発生した過冷却雲粒の影響を受けた強い降雪が持続し、現地調査結果の報告で述べられたものと同様に表層雪崩を起こしうる特性を持つ降雪が起こったと考えられる。

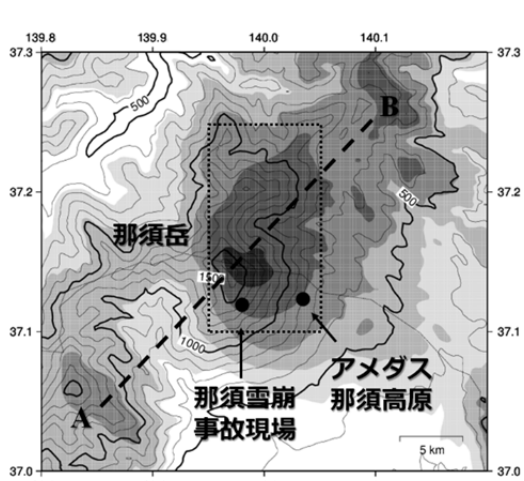


図-2 250m-NHMによる26日21時から27日15時までの雪による積算降水量(陰影). 等値線はモデルにおける標高(m).

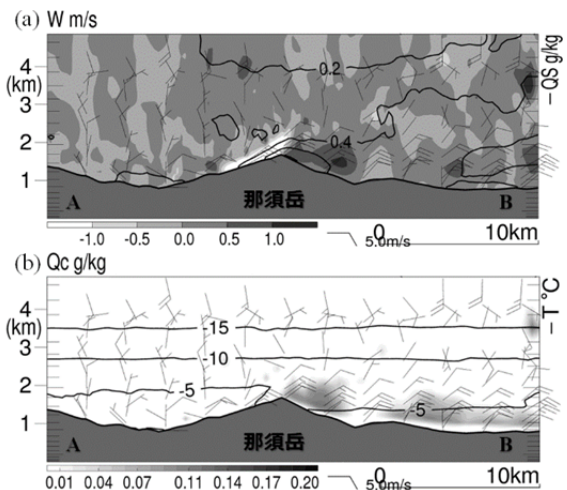


図-3 250m-NHMによる27日8時30分の図-2中AB線分の鉛直断面図。(a)鉛直流(塗分)・雪混合比(等値線), (b)雲水混合比(塗分)・気温(等値線). 矢羽は各高度における水平風を意味する.

3 那須大雪の統計解析

3.1 極値統計解析

那須雪崩事例の特異性を把握し、那須大雪時の降雪・気象場の特性するため、アメダス那須高原の毎時の積雪深観測データのある1989年11月～2017年4月を対象に統計解析を行った。まず、この期間のアメダス那須高原における日降雪深が1cm以上の事例(1,665例)を抽出して極値統計解析を行った。日降雪深は1～24時の毎時の降雪深の合計とし、閾値統計であるHazen plotを採用した。日降雪深1cm以上の降雪日に対して再現期間を求め、これを那須での寒候年平均降雪日数(約59日)で割り、那須雪崩事例が何シーズンに1度の規模の大雪であるかを調べた(図-4)。その結果、那須雪崩事例の再現期間は約3寒候年であり、3シーズンに1度程度は起こる大雪だった。一方、3月の事例のみを対象とすると、那須雪崩事例の日降雪深は3月では最も大きく、再現期間は約19年だった。春の大雪としては稀な事例だったといえる。

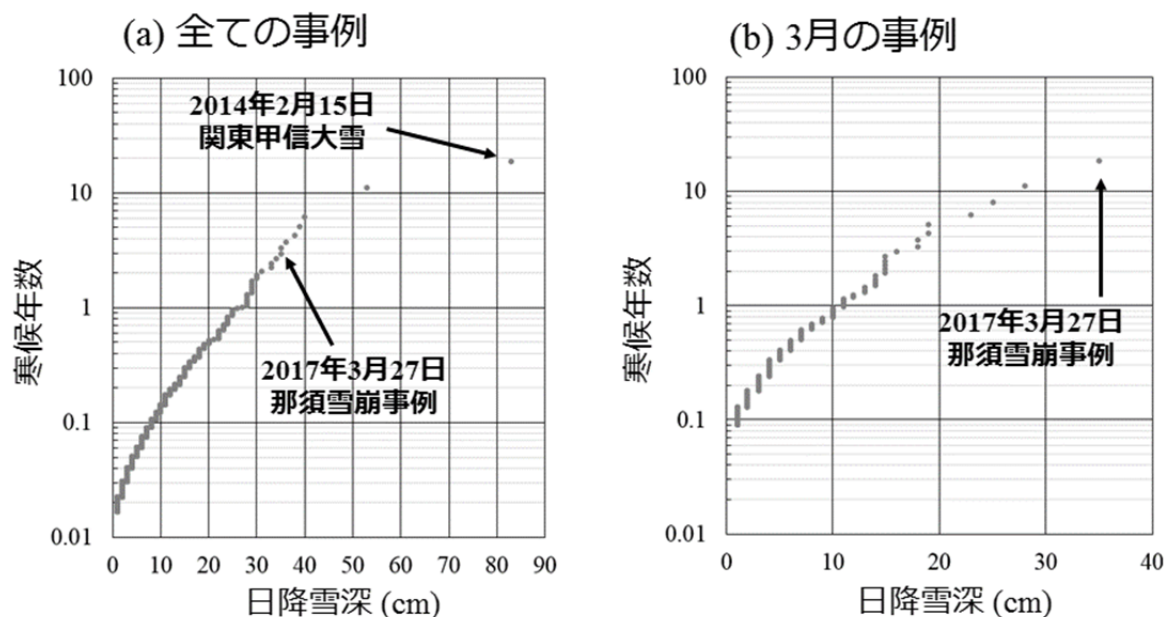


図-4 アメダス那須高原・日降雪深の再現期間曲線。

(a) 日降雪深1cm以上の全事例, (b) 3月のみ。

3.2 気圧配置パターン毎の環境場

次に、アメダス那須高原での日降雪深が 10cm 以上の 226 事例について、降雪特性と気象場の統計解析を行った。事例毎に気圧配置パターンを地上天気図で分類すると、冬型（WIN）が 142 事例（63%）、前線を伴う南岸低気圧（SCC）が 57 事例（25%）、那須雪崩事例のように前線を伴わない低気圧が 11 事例（5%）だった（表-1）。

表-1 1989 年 11 月～2017 年 4 月のアメダス那須高原で、日降雪深 10cm 以上の事例について分類した気圧配置パターン。

略称	パターン	事例数	割合(%)	説明
WIN	冬型	142	62.8	冬型の気圧配置時の降雪
SCC	南岸低気圧	57	25.2	前線を伴う温帯低気圧（南岸低気圧）による降雪
SCCNF	低気圧	11	4.9	前線を伴わない本州南岸の低気圧による降雪
Other	その他	16	7.1	停滞前線，二つ玉低気圧などによる降雪

パターン毎にアメダス那須高原での地上観測の特性を調べると、各事例の日最大降雪深を観測した時刻では WIN では西北西～北西の風、SCC と SCCNF では北北西～北北東の風が卓越するという違いが見られた（図略）。しかし、日最大降雪深や日降雪深などにはパターン間の有意な差は見られなかった。

また、事例毎の日最大降雪深を観測した時刻に最も近い時刻の気象庁 55 年長期再解析（JRA-55, Kobayashi et al., 2015）データを用い、気象場の特徴を調査した。SCC と SCCNF の平均場では、上空の気圧の谷の位置や低気圧の強さにやや違いが見られたが、同じような環境場だった。那須周辺の 850hPa の気温と水蒸気フラックス量を比較したところ、WIN については -5°C 以下のものがほとんどで、SCC と SCCNF はそれより高温の事例が多かった（図-5）。一方、水蒸気フラックス量は SCC では 3 事例が飛び抜けて大きな値だったが、その他はどのパターンでも大差はなかった。

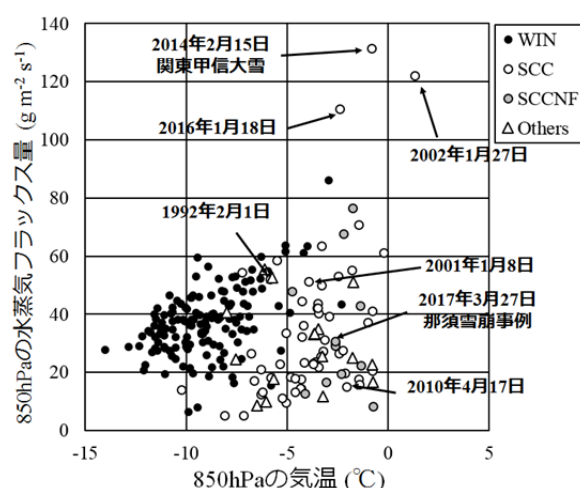


図-5 気圧配置パターン毎の那須周辺における気象場の特性. アメダス那須高原で日最大降雪深が観測された時刻付近の 850hPa における気温と水蒸気フラックス量の関係を表す。

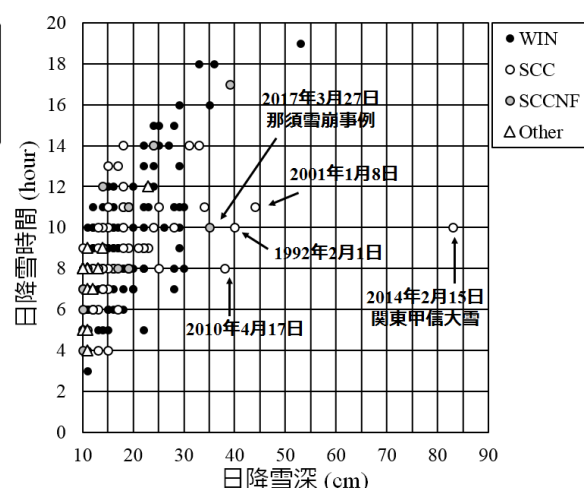


図-6 気圧配置パターン毎の日降雪深と日降雪時間の関係。

3.3 那須における短時間での大雪の環境場

那須における短時間での大雪について考えるため、各事例での降雪深 1cm 以上の時間の総和を日降雪時間とし、日降雪深との関係を調べた（図-6）。その結果、どのパターンでも基本的には日降雪時間が長いほど日降雪深も大きかったが、SCC と SCCNF では日降雪時間が短くても日降雪深の大きい事例が見られた。この特徴は 2014 年 2 月 15 日が顕著であり、他には 2001 年 1 月 8 日、1992 年 2 月 1 日、2010 年 4 月 17 日、そして那須雪崩事例がこれにあたる。

これらの事例の地上天気図を比較したところ、5 事例中 4 事例で前線を伴う低気圧が関東平野に近い海上などを発達しながら通過しており、日最大降雪深を観測した時刻付近で閉塞過程に入っていた（図-7）。いずれの事例でも那須はこの低気圧の北西象限にあたる。閉塞過程の低気圧の北西象限では上空で生成セルが発生し、特に降雪が強まることがある（Colle et al., 2014 など）。仮にこれらの事例でも那須雪崩事例のように Seeder-Feeder メカニズムが働いているのであれば、下層の水蒸気供給による Feeder Cloud の生成に加え、閉塞過程の低気圧中心が那須の南東に位置し、上空に十分な Seeder Cloud が存在することが那須での短時間での大雪に重要である可能性がある。

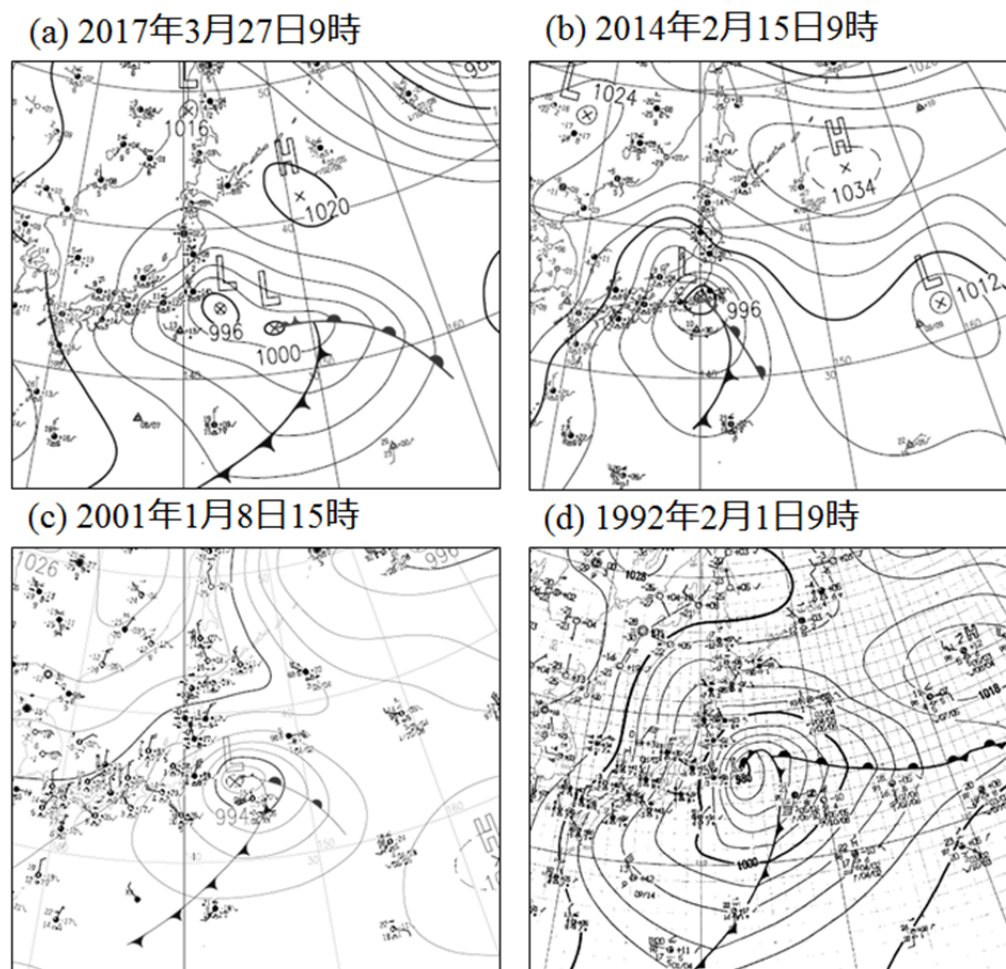


図-7 短時間大雪の発生した事例の地上天気図。

4 結論

本研究では、低気圧の通過に伴って那須で大雪となるときの降雪特性を理解し、表層雪崩発生との関係を把握することを目的として、事例解析と統計解析を行った。その結果、2017 年 3 月 27 日に表層雪崩が発生した大雪事例では、那須では湿潤な北～東風の強まりとともに地形性上昇流が過冷却の水雲を下層で生み、局地的に Seeder-Feeder メカニズムによる降雪の強化が起こっていた。これにより、那須岳の北～東斜面では降雪の集中と短時間での大雪がもたらされたことがわかった。統計解析の結果、この事例と同規模の大雪は約 3 年に 1 度、3 月と

しては約 19 年に 1 度発生していることがわかった。那須で日降雪量が 10cm 以上となる気圧配置は冬型が 63%，低気圧が 30%であり，基本的には日降雪時間が長いほど日降雪深が大きくなった。しかし，低気圧による降雪の場合には例外的に短時間で大雪になる事例が確認され，これらの多くの事例では低気圧が閉塞過程で関東付近を通過していた。

表層雪崩発生に重要な弱層形成は，短時間での多量の降雪だけでなく，どのような降雪結晶がいつどこで降るのかも重要である。本研究で扱った那須雪崩事例で示されたように，地形の影響により降雪結晶の特性も局地的に変化していることが考えられる。しかしながら現状では，降雪結晶の実態把握に必要な観測データが極めて乏しいことから，市民科学による降雪結晶の観測の取り組み（荒木，2018b）などで得られたデータも上手く活用し，関東甲信地方における降雪特性を明らかにしていく必要がある。

本研究では那須における大雪は低気圧よりも冬型の気圧配置時のほうが頻度は高いことが明らかになった。冬型の気圧配置時に日本海上で発達する降雪雲は基本的に積乱雲であり，樹枝状雪片や霰が多く見られる。一方，低気圧に伴う降雪雲では低温型結晶と呼ばれるなだれやすい降雪結晶が多く，表層雪崩のリスクも高いと考えられる。これらのことから，那須で大雪が予想されるとき，冬型の気圧配置ではなく低気圧に伴う降雪現象である場合には，短時間大雪の起こりやすさや降雪結晶の関係から，表層雪崩発生のリスクが高まると考えられる。ただし，大雪が予想される場合には雪崩以外にも見通しの悪化や立ち往生のおそれがあるため，いずれにしても山岳域での活動には留意が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり，首都大学東京の藤部文昭氏と気象研究所の隈健一所長には，極値統計解析について大変有益なアドバイスをいただきました。この場をかりてお礼申し上げます。本研究は，文部科学省科学研究費補助事業「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」（課題番号：17K18453），「首都圏の高精度雨雪判別手法確立に向けた降雪機構の実態解明」（課題番号：17K14394）の一環として実施したものです。

引用文献

- 荒木健太郎（2018a）：低気圧に伴う那須大雪時の表層雪崩発生に関わる降雪特性。雪氷，80，印刷中。
- 荒木健太郎（2018b）：市民科学による超高密度雪結晶観測「#関東雪結晶プロジェクト」。雪氷，80，印刷中。
- 防災科学技術研究所（2017）：那須町雪崩災害調査（2017.3.28 実施）（速報詳細版）。
http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyousaigai/2017/report_20170328_NasuOnsen.pdf
（2018.02.27 閲覧）
- Browning, K. A. (1990): Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 129-153.
- Colle, B. A., Stark, D. and Yuter, S. E. (2014): Surface microphysical observations within East Coast winter storms on Long Island, New York. Mon. Wea. Rev., 142, 3126-3146.
- Houze, R. A. (2012): Orographic effects on precipitating clouds. Rev. Geophys., 50, RG1001.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K. (2015): The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5-48.
- Saito, K., Fujita, T., Yamada, Y., Ishida, J., Kumagai, Y., Aranami, K., Ohmori, S., Nagasawa, R., Kumagai, S., Muroi, C., Kato, T., Eito H. and Yamazaki, Y. (2006): The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. Mon. Wea. Rev., 134, 1266-1298.

MP レーダー解析による 2017 年 3 月 26-27 日那須近辺における降水と風の分布 MP Radar analysis of the distribution of the wind and precipitation around Nasu area on March 26-27, 2017

中井 専人¹⁾, 清水 慎吾²⁾, 前坂 剛²⁾, 岩波 越²⁾, 木枝 香織²⁾
S. Nakai¹⁾, S. Shimizu²⁾, T. Maesaka²⁾, K. Iwanami²⁾, K. Kieda²⁾

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 水・土砂防災研究部門

²⁾*Storm, Flood and Landslide Research Division, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

Abstract: Time series of distribution of snowfall intensity, wind velocity, and hydrometeor are analyzed using the data of X-band multi-parameter (MP) weather radars. Although the radars are at far distances from the location of the avalanche, several characteristics of snowfall were described by applying analysis methods developed in the field of radar meteorology. The volume-velocity processing (VVP) method was used for the wind analysis. Hydrometeor classification algorithm using fuzzy-logic technique was applied to the polarimetric moments observed by the MP radars. A specific period, characterized by weak precipitation intensity, rather uniform reflectivity and wind speed, and small snow/graupel ratio, can be identified. The criteria of these characteristics were decided empirically assuming poorly rimed snowfall forming the weak layer in the snowpack. These characteristics can be clues to judge the formation of possible poorly rimed weak layer of snowpack in conjunction with improved quantitative precipitation estimation. Analysis of three-dimensional structure of wind field and the distribution of each type of hydrometeor is a hopeful method. Radar-modeling cooperative researches will be necessary for the analysis.

Key words: MP radar, VVP, Hydrometeor classification

1 はじめに

2017 年 3 月 27 日に那須温泉ファミリースキー場付近の山岳地(以後「現地」と記述)で発生した災害雪崩については、

- ・ 26 日夕方から 27 日午前中にかけてのこの時期としては稀な大雪による新雪荷重がある状態
- ・ 積雪表面から 17cm~30cm 下の雲粒付着の少ない板状等の降雪結晶の弱層が破壊されて表層雪崩が発生

と推定されている(中村ほか, 2017). このときの弱層となった降雪, 新雪荷重となった降雪の特性を検知できるかどうか, MP レーダーデータを用いた降雪と風の解析を行った.

2 研究方法

2.1 降水量分布と VVP 風解析

国土交通省 X バンド MP レーダー(XRAIN)の極座標低仰角データをもとに, 降水量分布と volume-velocity processing (VVP)による風を解析した. 具体的には, 2 分毎の反射強度とドップラー速度を使用し, 2 変数簡略化 VVP 法(立平・鈴木, 1994; 瀬古, 2010)を用いて上空の風向, 風速を推定した. この手法は, 一定の領域の風ベクトルが一樣であると仮定し, 方位角の変化によるドップラー速度値の変化から, 最小二乗法により風速の 2 成分を求めるというものである. 上の仮定のため十数 km 四方程度の領域を必要とするため, 得られる風の分解能は粗くなり, 10km スケールの大まかな分布を見るのに適している.

風速場のほかには、観測データに含まれている 2 分毎の降水強度(mm hour^{-1})を 2 分間継続したものとみなして、積算した降水量(mm)を求めた。風向、風速、降水量はレーダーを中心とした 1km 格子に内挿した。現地近傍では XRAIN 田村レーダーの仰角 1.6° データが最も広い範囲で風を解析できたので、仰角 1.6° の解析結果を示す。雪崩発生地点に近い「天狗岩」は田村レーダーからの距離約 62.5km であり、この近傍における仰角 1.6° のビーム中心は海面高度約 2500m 、すなわち現地上空約 1000m である。

2.2 降雪粒子判別

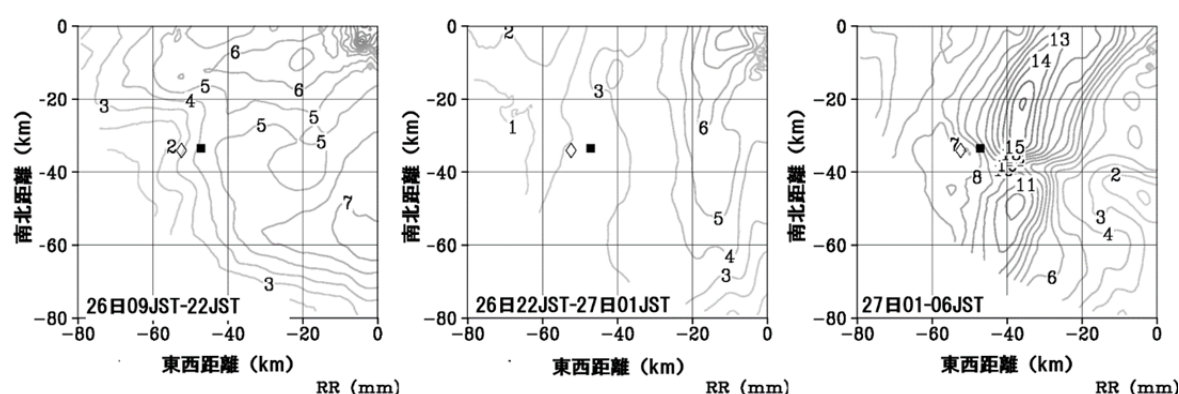
XRAIN の極座標全仰角データを用いて、Kouketsu et al. (2015)に準拠した降雪粒子判別(HC)を行った。このとき前処理として、Zh と Zdr については雨観測データ(7 事例)を用いたバイアス補正、 ρ_{HV} については SNR などを用いた補正とフィルタリング、KDP については異常値の除去を行った。現地近傍を解析可能なレーダーとして氏家、田村の 2 サイトを検討したが、田村レーダーではバイアス補正に用いたデータの期間と本研究の対象とする解析期間の間でバイアス値が同一ではなかったため、氏家レーダーについてのみ解析を行った。直交座標への変換には Cressman 内挿を使用し、緯度経度座標系(「2 分の 1 地域メッシュ」、約 500m 分解能)に 5 分毎の値を出力した。

3 結果

3.1 積算降水量分布

仰角 1.6° の降水量分布をアニメーションにしたところ、期間Ⅰ：26 日には北西－南東走向のバンド構造が見られるなど様々な変化をする期間、期間Ⅱ：日付が変わる前後約 2-3 時間、現地上空が比較的一様な弱い降水域となりその東側に降水強化が見られた期間、期間Ⅲ：その後、現地上空にやや強い降水域が停滞した期間、という特徴的な変化が見られた。それぞれの期間について積算降水量を求めたものが図－1 である。

期間Ⅰにおいては現地から東方にかけて全体的に降水が分布し、特徴的なパターンは見られない。スナップショットで見られたバンド構造は停滞しておらず、レーダー観測範囲を次々と通過していた。積算である図－1 左で特に降水の集中が見られないのはそのためと考えられる(図－1 左)。期間Ⅱにおいては現地上空の降水量は少なくかつ分布が一様である一方、その東側 $30\sim 40\text{km}$ (標高 500m 線付近)に降水が集中していた(図－1 中)。期間Ⅲでは約 5 時間にわたって、現地上空すぐ東側の降水量が多かった(図－1 右)。鉛直断面を取ると、この強い降水域は高度が下がるほど西に中心があるように傾いていたこと、かつ高度が下がるほど降水が強く



図－1 2017年3月(左)26日09JSTから22JSTまで、(中)26日22JSTから27日01JSTまで、(右)27日01JSTから06JSTまでの、仰角 1.6° の積算上空降水量分布。図の範囲はレーダーを原点とした東西、南北距離の座標系のレーダー南西象限である。陰影はレーダー反射因子(dBZ)、等値線は標高を表す。◇と■はそれぞれ現地とアメダス那須高原を示す。レーダーから距離 80km までが観測範囲である。

なっていたことがわかる(図-2)．期間Ⅲの強い降水域は同じ場所に停滞しており，降雪粒子が風に流されながら成長し，現地近傍に強い降水をもたらし続けていたと考えられる．

3.2 VVP 解析

VVP 解析によると，26 日午後の降り始めは西風であったが，夕方頃から，現地西側などに西風が残りながらも全体的には南東～南の風に置き換わり(図-3 左)，特に 26 日 21 時ごろからは南東風が卓越する傾向となった．その後 27 日 0 時ごろにかけて現地上空はかなり一様な南東風の間となった(図-3 中)．27 日 1 時ごろから降水の強まりとともに風速が増加し，5 時 30 分ごろから北東風の領域が広がったが，この間，現地付近の風はあまり一様ではなく，収束が見られることが多かった(図-3 右)．現地上空では 6 時ごろに南成分の風が北東風に置き換わった後，北北西へと変化し風速はさらに強くなった．雲粒無し結晶の降雪による弱層が形成された時間帯は，雪崩発生よりかなり以前のはずであり，上空の風速は雪崩発生時刻より弱く，風向も大きく異なっていたと考えられる．

降水強度と風の間について，時系列を解析した．VVP 解析値から現地近傍の値を求めたところ，反射強度は 27 日 0 時頃までは 15dBZ-20dBZ，0 時以降はほぼ 20dBZ 以上と明瞭な差があった．平均風速は 26 日 13 時から 21 時ごろまでが 5 m s^{-1} 以下と弱く，22 時以降は $5-10 \text{ m s}^{-1}$ ，27 日 7 時以降は 10 m s^{-1} と強い風になっていた(図-4)．

特徴的だったのは風速のテクスチャである．テクスチャとは画像処理の分野で 2 次元的な

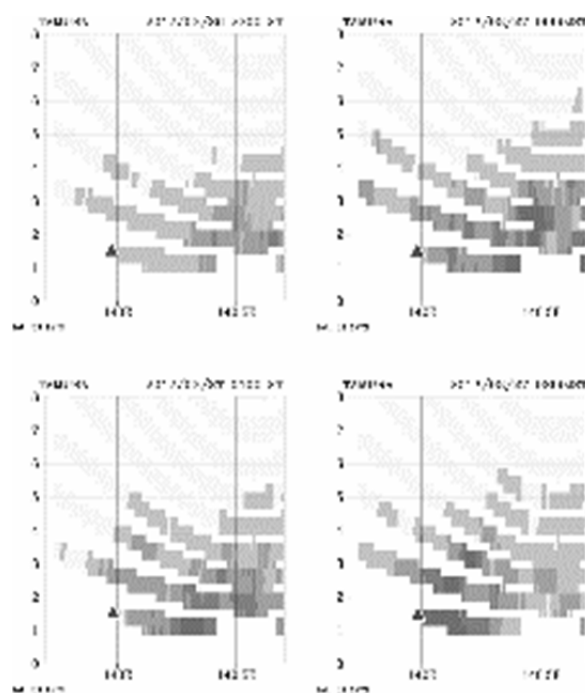


図-2 現地上空を通る東西鉛直断面．降水強度を強いほど濃い色で示す．最も薄い色は無降水，白はデータの無い領域である．仰角間隔に対して内挿の度合いを控えめにしているため，仰角の間にギャップがある．天狗岩の位置を▲で示す．

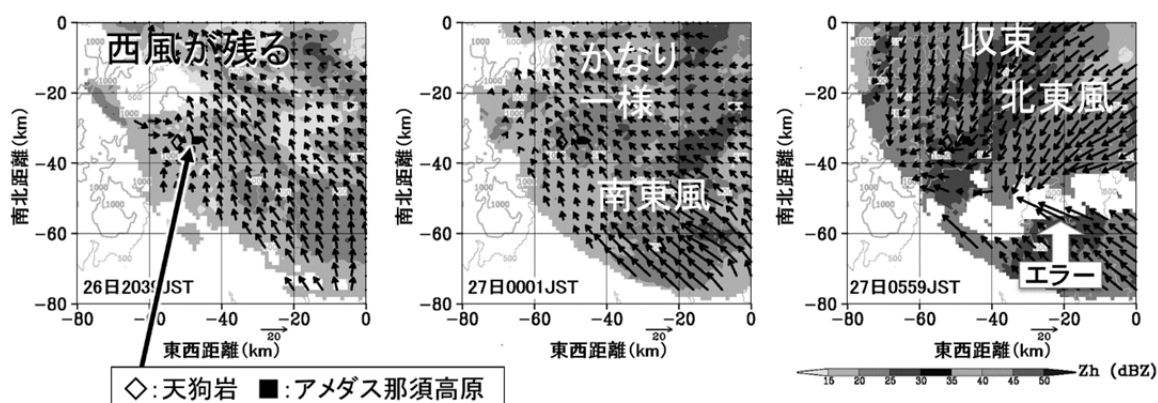


図-3 簡略化 VVP 法で求めた田村レーダー仰角 1.6 度の風ベクトルの分布．図の範囲や記号等は図-1 に同じ．各格子点を中心とする 5x5 格子全てが 0dBZ 以上の点のみ風をプロットしている．

分布や模様の特徴を広く意味する用語であるが、ここでは、Ruiz et al. (2015)等で用いられている隣の格子との値の差の二乗平均平方根(Kessinger et al., 2003)を特徴量として「テクスチャ」と呼ぶことにする。Kessinger et al. (2003)の方法は極座標レーダーデータのレンジ方向についてのみ値の差を計算するが、ここでは東西方向、南北方向の両方について計算したものの平均を用いた。風速のテクスチャはこの計算を風の東西成分、南北成分それぞれについて行った値を平均して求めた。

風速のテクスチャは26日21時30分から27日1時までの間(図-4のA)、非常に小さい状態が安定して継続し、現地付近上空の風速分布が一様であったことを示している。また、この時間帯の中で23時から23時30分の間、一時的に反射強度のテクスチャも小さくなり、反射強度、風速の両方が現地上空を中心とした20km四方で非常に一様であった。27日6時から8時半にかけても風速のテクスチャは非常に小さいが、仮に $Z_h < 20$ dBZ, 風速テクスチャ < 2 m s⁻¹, 風速 < 10 m s⁻¹という条件で“降水と風が比較的弱く一様な期間”を抽出すると、期間Aが抽出され、その中でZhのテクスチャ < 2 dBZの期間が、特にZhの一様性が高い期間となる。ただし、図-4のCの期間も抽出される。

3.3 降雪粒子判別

氏家レーダーデータを用いたHCの結果について水平、鉛直断面を作図して概観したところ、現地近傍では氷晶、乾雪が多く分布し、その中に乾き霰が少し混じっていた(図略)。湿雪、湿り霰、雨滴などは、レーダー近傍や南方の関東平野には多く解析されたが、現地近傍ではほとんど見られなかった。そこで、VVP解析と同様に現地近傍20km四方、かつ高度幅1500mから2500mの領域を取り、その中で10%以上の格子に降水がある時刻について、判別された各粒子ごとの格子数を求めた。10%というしきい値は観測後半の欠けが大体無くなることを目安としており、値が小さいのは無降水域やビームブロックによる観測のない格子も含むためである。

降り始めから27日1時ごろまでは冠雪と氷晶の格子数がほぼ同数で、乾き霰の格子数がそれより一桁少ない状態が続いた。1時以降は氷晶と判別された領域が多くなり、降水の強い時間帯に対応して一時的に乾き霰の格子数が増加した(図-5)。27日に氷晶格子が非常に多かったことから、氷晶という分類は明らかにこの事例に関しては雲粒なしとの対応はつけられない。一方、乾雪と乾き霰の比率(本稿では雪霰比と呼ぶ。)は一時的にその値が0.1以下で

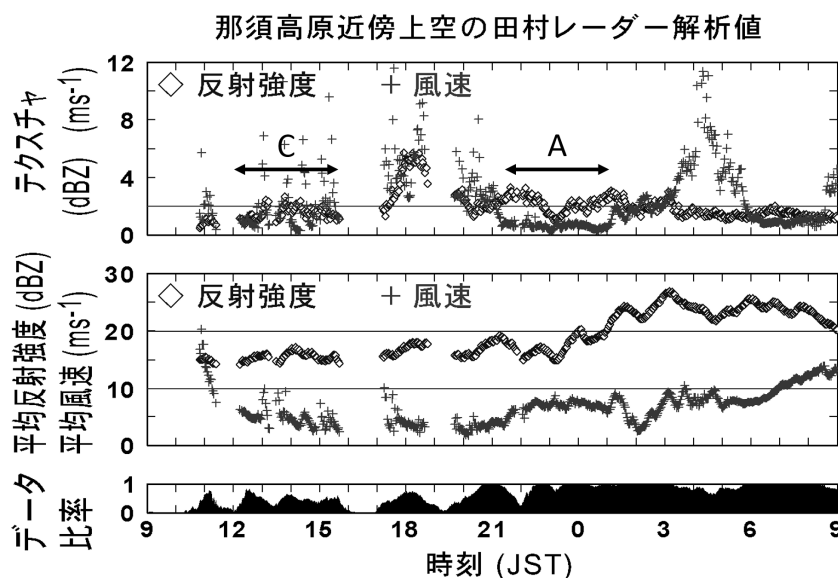
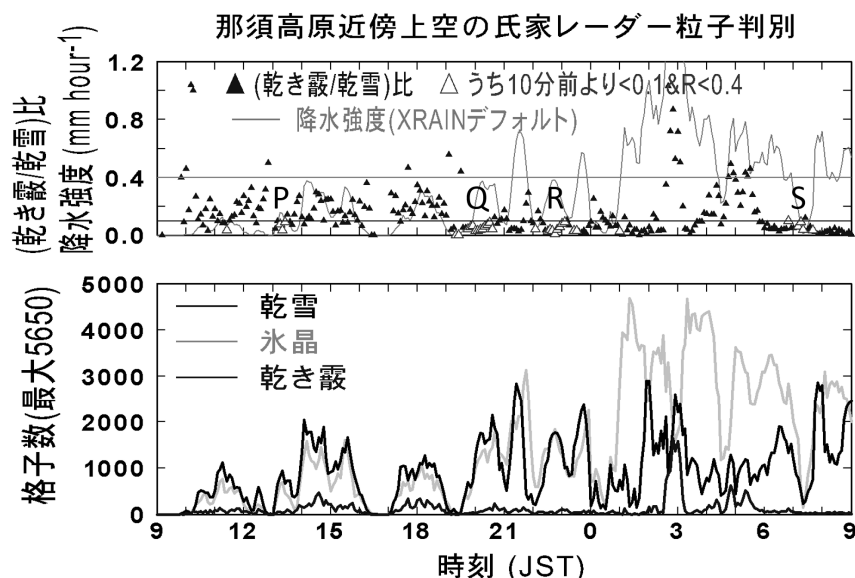


図-4 田村レーダーVVP解析値より求めた、那須高原近傍上空の20km四方(21x21格子)のうち観測値あり格子数(データ比率)が33%以上を有効として求めた平均反射強度(dBZ)、ベクトル平均風速(m s⁻¹)、反射強度と風速のテクスチャの時系列。図中C、Aについては本文参照。

安定することがあり、雪霰比が 10 分前から継続して <0.1 ，かつ降水強度 0.4 mm hour^{-1} 以下，という条件を用いると，図－5 の P，Q，R，S の 4 期間が抽出された。

このうち期間 R(26 日 22 時～23 時 30 分)は図－4 の期間 A に含まれている。このことは，期間 R が，降雪が弱く，降雪強度も風の場合も同様，雪霰比が小さいという条件を安定して満たしており，雲粒が少なく弱層となる積雪層の形成に対応することを示唆する。図－5 の期間 P も同じ条件を満たすが，時間が短くまた弱層形成時と考えるには時間的に早すぎる。



図－5 氏家レーダーデータを用いた降水粒子判別より求めた，那須高原近傍上空の約 20km 四方，高度 1500m から 2500m の領域内における，氷晶，乾雪，乾き霰の格子数(下)，及び，乾き霰と乾雪の比(雪霰比)と降水強度(上)．雪霰比のうち赤で示したのは雲粒付着の少ない弱い降水を想定した条件で抽出したもの．本文参照。

4 考察とまとめ

VVP 解析による風の場合，降水強度，偏波パラメーターを用いた粒子分類を併用し，現地近傍の降水と風の場合の時系列を解析した．その結果，降水強度が弱く，反射強度と風速が同様，かつ雪霰比が小さいという条件で，特定の期間を抽出可能なが分かった．今回抽出された 26 日 22 時～23 時 30 分という期間は，表層雪崩の弱層となった雲粒付着の少ない降雪に対応することが示唆される。

この期間を中心とした期間Ⅱの降雪と風の分布の特徴は，現地東側 30～40km の標高約 500m 付近に比較的強い降水域が停滞し，その西側の弱く一般的な降水域であったこと，及び，レーダー観測高度においても弱く非常に一般的な南東風の場合であったことである．抽出された期間の継続時間は 1 時間 30 分と短く，低気圧からの風の変化と地形の影響などにより，現地付近に形成された数十 km スケールの降水系の構造が特に雲粒付着の少ない降雪粒子を成長させることに寄与したものと考えている。

上記の期間はしきい値を決めることにより抽出されたが，現状そのしきい値は経験的に決めたものであり，今後の事例の積み重ねによって，もっと一般的な条件で雲粒付着の少ない降雪域を特定できるようにすることが望ましい．そのためには，今回の事例に対しても，弱層となった雲粒付着の少ない降雪の時間帯，そのような降雪がもたらされたプロセスについて，他の研究と結果との比較も含めて，さらに解析を進める必要がある。

弱層形成後の新雪荷重となった降雪については，期間Ⅲの降雪が対応するものと考えている．この期間には東に傾いた強い降雪域が現地上空に移動，停滞し，下層ほど降雪が強くなる構造を保ちながら現地付近に強い降雪をもたらしていた．この降水系も停滞する特徴を持って

おり、地形の影響でどこにこのような雪雲が停滞するかが、そのプロセスの解明と予測につなげることが今後の課題である。

弱層となる降雪、新雪荷重となる降雪のいずれについても、低気圧の時間変化の中で形成された停滞性の強い降雪域が存在していた。そのスケールは数十 km 程度である。そのような降雪域の形成条件、ひいては一般的に弱層となり得る降雪がもたらされる過程を明らかにするためには、降雪粒子分布と気流の 3 次元的な特徴を把握する必要がある。図-6 はそれを試行した例である。このような、レーダー解析とモデリングを併用した研究を今後進展させて行くことが必要と考えられる。

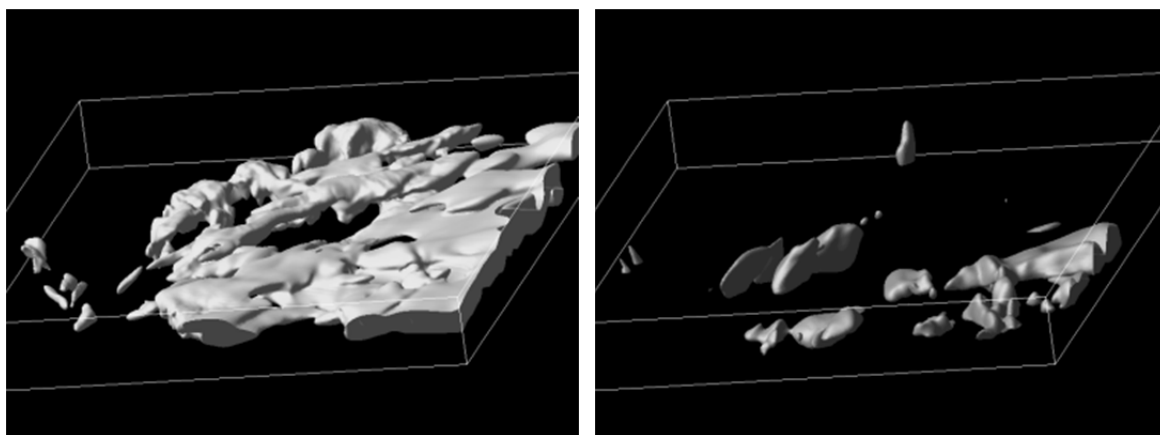


図-6 レーダー観測された風を数値気象モデル CReSS(Tsuboki and Sakakibara, 2007)に同化させて求めた(左)雪と(右)霰の 3 次元分布の例。等値面は 0.5 g kg^{-1} 。レーダーデータを用いた粒子判別による雪、霰と数値モデルで定義されるそれらとの比較など、今後の研究を必要とする部分は多い。

謝辞

降雪粒子分類にあたっては、日本気象協会の板戸昌子、増田有俊の両氏にお世話になりました。利用した XRAIN データは国土交通省より提供されたもので、DIAS の枠組みによるものです。

引用文献

- Kessinger, C., S. Ellis, and J. Van Andel, 2003: The Radar Echo Classifier: A Fuzzy Logic Algorithm for the WSR-88D. 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science, P1.6. (<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/54946.pdf>, 2018 年 2 月 24 日確認)
- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo, and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-Band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 32, 2052–2074, doi:10.1175/JTECH-D-14-00124.1.
- 中村一樹・小杉建二・根本征樹, 2017: 那須町雪崩災害調査：第 1 回調査(2017. 3. 28). (http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyouaigai/2017/report_20170328_NasuOnsen.pdf, 2018 年 2 月 24 日確認)
- Ruiz, J. J., T. Miyoshi, S. Satoh, and T. Ushio, 2015: A quality control algorithm for the Osaka phased array weather radar. *SOLA*, 11, 48–51, doi:<https://doi.org/10.2151/sola.2015-011>.
- 瀬古弘, 2010: 中緯度のメソ β スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究. 気象庁研究時報, 62, 1-74.
- 立平良三・鈴木修, 1994: 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度. *天気*, 41, 761-764.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2007: Numerical prediction of high-impact weather systems. The Textbook for Seventeenth IHP Training Course in 2007, 281pp.

降雪による弱層形成に関する数値気象モデルを用いた再現実験
Numerical weather simulation addressing weak layer formation due to
heavy snowfall

橋本 明弘¹⁾, 本吉 弘岐²⁾, 山口 悟²⁾, 中井 専人²⁾
A. Hashimoto¹⁾, H. Motoyoshi²⁾, S. Yamaguchi²⁾, S. Nakai²⁾

¹⁾気象庁 気象研究所

¹⁾ *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency*

²⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究部門

²⁾ *Snow and Ice Research Division, National Research Institute for Earth Science and
Disaster Resilience*

Abstract: From March 26 to 28, 2017, a developing cyclone passing the south coast of Japan brought heavy snowfall over mountain areas in the Pacific side of Japan. During this snowfall event, an avalanche disaster occurred killing or injuring tens of people on March 27. According to the reports from the urgent in-situ snow pit survey conducted on the next day, this avalanche was classified as a dry snow surface avalanche. The weak layer identified at the vicinity of the avalanche site in Nasu town was composed of weakly rimed planar crystals, in contrast to the upper and lower layers which were composed of more rimed crystals. In this case, characteristics of falling snow crystals were a strong factor for the occurrence of the avalanche.

In order to simulate a transition of characteristics of falling snow crystals during this snowfall event, the authors have introduced a new scheme to the microphysical module of the Japan Meteorological Agency's Non-Hydrostatic Model (JMA-NHM) to diagnose the crystal features. The new model is able to provide information about the mass ratio of different crystal shapes and accreted droplets to the total mass of snow crystals. As a result of numerical experiments, riming ratio drastically decreases in the midnight of March 26, at the avalanche site, as is expected based on the snow pit survey. The drastic changes in the microphysical feature of snowfall occur within half of a day as the cyclone passes.

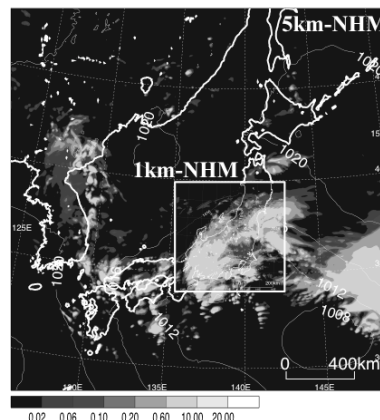
Key words: Snow avalanche, Snow crystal, Riming, Cloud microphysics, Numerical weather prediction model

1 はじめに

表層雪崩発生要因の一つである積雪内部の弱層の形成に降雪粒子の性状が深く関わっている場合、降雪粒子の雲粒付着の度合いや結晶形といった物理特性が、弱層の同定や予測可能性において重要な因子となる。そのため、積雪内部の弱層形成前後の気象条件の特徴に関する解析が数値気象モデルを用いて行われている(中村ほか, 2013)。しかし、従来の気象モデルは、降雪粒子の形状や雲粒付着の度合いを陽に表現し得ないため、大気中での雲・降水形成から積雪内部の弱層形成に至る一連の物理的関連を描き出すには至っていない。そこで、降雪粒子の雲粒付着の度合いや結晶形といった物理特性を診断できるよう数値気象モデル(JMA-NHM)

表－1 雲氷・雪・霰それぞれの温度域別昇華成長量と雲粒捕捉成長量を表す変数.

	Cloud ice	Snow	Graupel
Accretion	Qiacc	Qsacc	Qgacc
Deposition -4<T<0 C	Qidep-0	Qsdep-0	Qgdep-0
Deposition -10<T<-4 C	Qidep-4	Qsdep-4	Qgdep-4
Deposition -20<T<-10 C	Qidep-10	Qsdep-10	Qgdep-10
Deposition -36<T<-20 C	Qidep-20	Qsdep-20	Qgdep-20
Deposition T<-36 C	Qidep-36	Qsdep-36	Qgdep-36



図－1 5km-NHM と 1km-NHM の計算領域および 2017 年 3 月 26 日 23JST の鉛直積分氷水量(mm).

を改良し，降雪・積雪を含めた総合的視野から降雪による弱層形成に迫るための新しい研究手法として応用できるようにした．この手法を用いて，2017 年 3 月 27 日に那須町で発生した雪崩災害時の気象再現実験を行い，弱層形成メカニズムについて気象学的観点から検討した．

2 数値モデル

JMA-NHM の雲物理過程は，大気中の氷粒子を雲氷・雪・霰の 3 クラスに分け，それぞれの総混合比・総数濃度・地上降水量等によって，大気中の降雪粒子の分布や地上降雪量を予測する．そのため，モデルが表現できる氷粒子のタイプは高々 3 つであり，実際の降雪中に観測される多様な粒子タイプに着目した議論に用いるには限界があった．これを克服するために，雲氷・雪・霰それぞれの温度別昇華成長量および雲粒捕捉成長量を新たな予報変数として組み込んだ（表 1），粒子密度や形状に密接に関わる素過程別の粒子成長量を，粒子の生成から降水を経て地上に至るまで追跡できるようにした．氷晶の成長モードが温度に応じて変化することを考慮すると（0～-4℃：角板，-4～-10℃：針・角柱，-10～-20℃：角板・樹枝，-20～-36℃：角柱，-36℃未満：砲弾集合・不規則等），氷粒子の質量に対する温度別昇華成長量の比は，粒子形状を表すパラメータと見なすことができる．

3 数値実験

日本を中心とする水平 2250km×2250km，鉛直約 22km の計算領域を設け，水平格子幅は 5km，鉛直方向には最下層で 40 - 最上層で 735m の可変格子として数値実験を行った（図 1, 5km-NHM）．タイムステップ長は 15 秒，積分時間は 45 時間とし，初期値・境界値には気象庁メソ解析を用いた．さらに 5km-NHM の計算結果を初期値・境界値として，関東甲信地方を中心とする 650km×650km の計算領域を設け，水平解像度 1km，鉛直層は 5km-NHM と同じ設定で実験を行った（図 1, 1km-NHM）．タイムステップ長は 4 秒，積分時間は 30 時間とした．実験対象期間は 2017 年 3 月 25 日 21 時～29 日 21 時（JST）とし，初期時刻を 12 時間ずつずらしながら 8 回の数値実験を行った．

4 結果

図 2, 3 は，栃木県内の地上気象観測データと数値実験結果を比較した結果である．那須高原（標高 749m，図 2a），大丸（標高 1268m，図 2b），中宮祠（標高 1295m，図 2h），湯元（標高 1484m，図 3a）の標高の高い各地点で，1km-NHM は観測された降水量の推移を比較的によく再現していた．一方，清滝，（標高 741m，図 2g），中塩原（標高 604m，図 3b），芦野（標高 252m，図 3c）では，実際には観測されていない 26 日の降水をモデルは予測していた．ただし，測定 of 最小単位に満たない程度の弱い降水があった可能性もあるため，再現性の判定は

難しい。26日から27日にかけての降雪イベントの間、1km-NHMは実際の地上気温を良く再現していた(図2d, 2e, 2f, 2i, 2j)。図4は1km-NHMの結果で、雪崩地点を含むモデル格子の気象パラメータの推移を表している。25日は降水がほとんどなく(図4a)、日中の短波放射(図略)で雪温が上昇しており(図4b)、3月28日に実施された現地調査(http://www.bosai.go.jp/saigai/2016/pdf/20170331_01.pdf)で確認されたざらめ雪層(積雪表面から35-37cm)の形成と整合的であった。図4aを詳しく見ると、雲粒捕捉成長(Psacc)の寄与率は、26日21~24時(JST)の間小さいが、その後、急激に増加していた。26日21時以前の時間帯でも、ある程度の寄与(Psacc)が認められ、26日21~24時の降雪粒子は、前後の時間帯とは対照的な特徴を示していた。現地調査では、積雪面から23.5cm下に雲粒付着の少ない板状結晶からなる弱層が認められており、雲粒捕捉成長の寄与という観点では、数値実験の結果は実際の積雪状態をよく再現していた。一方、雪結晶の形状は、現地調査では弱層中に板状結晶が認められたが、数値実験結果は、柱状結晶の寄与が大きいことを表しており観測結果とは異なっていた。雲粒捕捉成長の寄与は対流圏中層・上層で常に小さく、高度2km未満のごく下層で、時間とともに増減していた(図略)。このことは、弱層形成の要因となった雪結晶の雲粒捕捉成長寄与率の時間変化が、地形性上昇流による雲粒生成の強弱に起因することを示している。

図5は、那須高原(気象庁アメダス)地点における風速と風向の観測値(黒)と1km-NHMの結果(灰色)である。雲粒捕捉成長の寄与が低下した26日21~24時を含む数時間は、観測・数値実験ともに風が弱まっていた(図5矢印)。風向は、この時間帯に、南寄りから北寄りに変化していた。26日午後から27日にかけて低気圧が関東南岸を発達しながら通過したことを

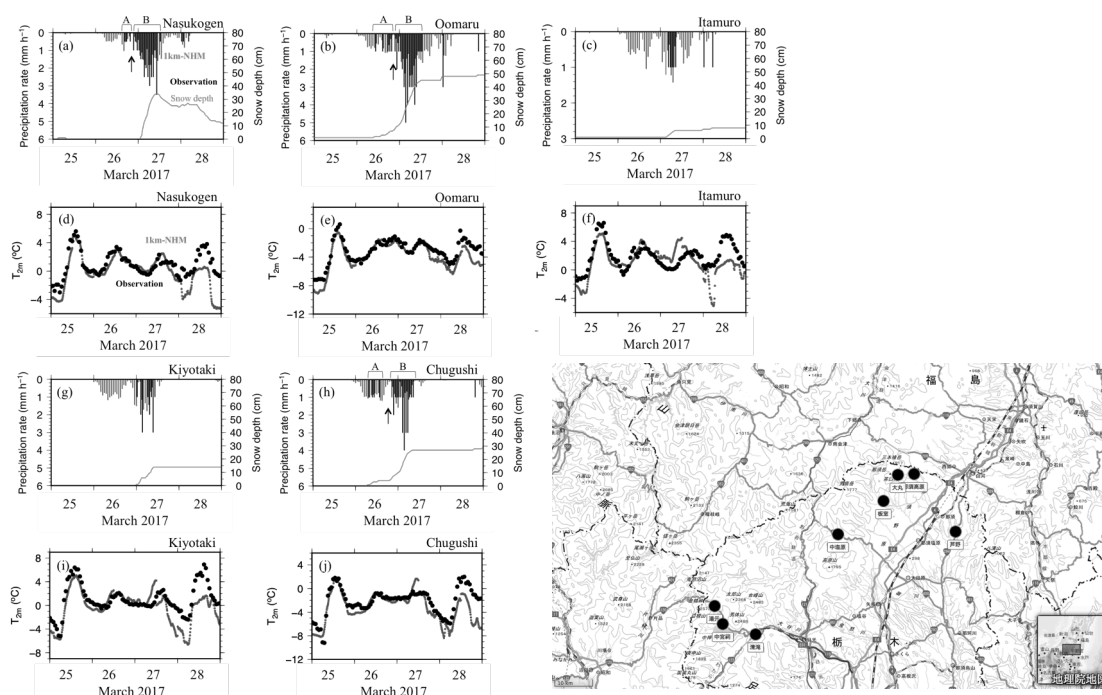


図-2 那須高原、大丸、板室、清滝、中宮祠における降水量・地上気温の観測結果と数値実験結果。黒は観測値。灰色は1km-NHMの結果。(a)(b)(c)(g)(h)の薄灰色実線は積雪深観測値。

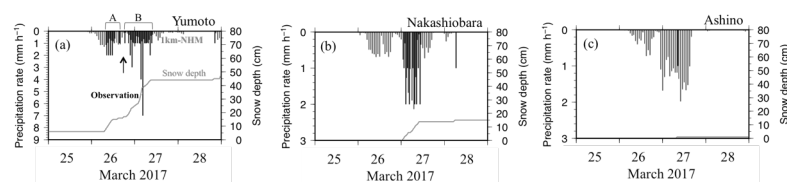
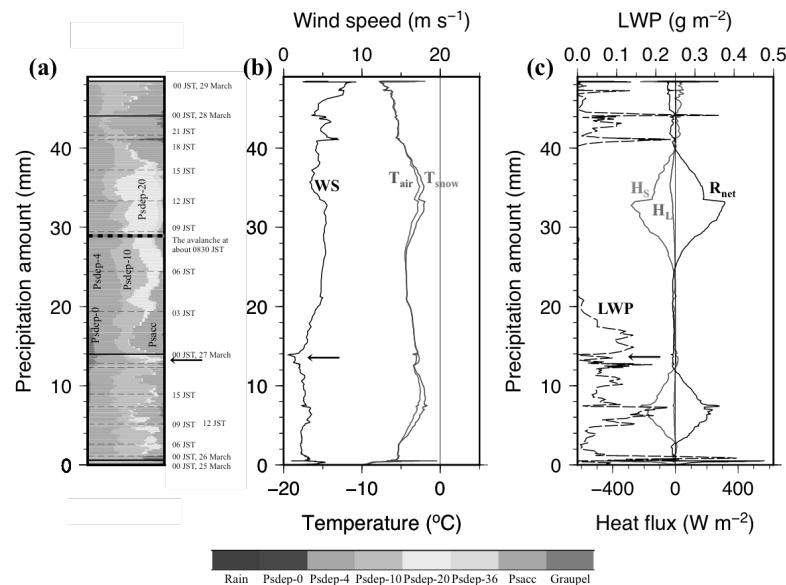


図-3 湯元、中塩原、芦野における降水量の観測結果と数値実験結果。黒は観測値。灰色は1km-NHMの結果。薄灰色実線は積雪深観測値。

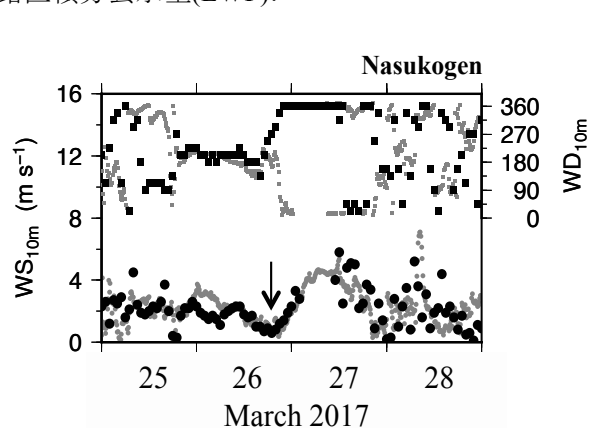
考慮すると、この風向変化は総観規模の気圧パターンの変化によって生じたと見なせる。図 6 は、雪崩地点上空の固体および液体の水粒子の総水混合比である。前後の時間帯に比べて、26 日 21～24 時の間の総水混合比は小さくなっていた。この時、鉛直積分雲水量 (LWP) も減少していた (図 4c 矢印)。標高の高い那須高原 (標高 749m, 図 2a), 大丸 (標高 1268m, 図 2b), 中宮祠 (標高 1295m, 図 2h), 湯元 (標高 1484m, 図 3a) の降水量の推移を見ると、観測・数値実験ともに、この時間帯に降水量は減少していた (各図矢印)。

5 考察

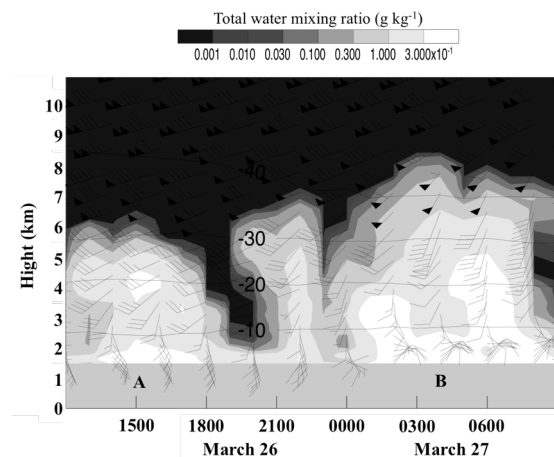
前節で示したように、観測結果と数値実験結果を比較したところ、雪崩地点の降雪粒子の微物理的特性に関して、数値モデルが予測した結晶形は観測結果と異なっていたものの、降雪結晶の雲粒付きの時間変化がよく再現されていた。また、周辺地域の観測点における降雪量の時間変化については、標高の高い地点では良く再現されていた。さらに、比較的標高の高い那



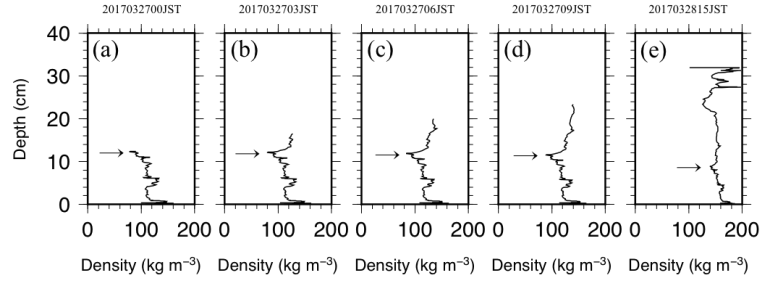
図－4 雪崩地点を含むモデル格子の気象パラメータを、2017 年 3 月 25 日 00JST 以降の 10 分毎積算降水量積算降水量の関数として表記した層位図。(a) 雨滴(Rain)と霰(Graupel)の混合比と、雪粒子の素過程別成長量の寄与率。Psdep-n は温度別昇華生長量の寄与率 (Psdep-0: 0～-4℃, Psdep-4: -4～-10℃, Psdep-10: -10～-20℃, Psdep-20: -20～-36℃, Psdep-36: -36℃以下) を表す。Psacc は雲粒捕捉成長量の寄与率を表す。実線は日界、破線は 3 時間毎の時刻を表す。太破線は、現地調査の結果から推定された雪崩発生時刻 (27 日 0830JST)。(b) 地上風速(WS), 気温(T_{air}), 雪温(T_{snow})。 (c) 雪面での顕熱フラックス(H_s), 潜熱フラックス(H_L), 正味放射フラックス(R_{net}), 鉛直積分雲水量(LWP)。



図－5 那須高原の風速 (WS) と風向 (WD)。黒は観測値。灰色は 1km-NHM の結果。



図－6 雪崩地点上空の総水混合比時間-高度断面図。矢羽は水平風。



図ー7 圧密過程のみ考慮した積雪密度の計算結果.

須高原地点の風向・風速の推移を数値モデルは良く再現していた．これらのことから，数値モデルの再現性は一部不完全であるものの，水平風に対する地形効果による上昇流の発生，上昇流にともなう断熱凝結による雲粒生成，雪粒子の雲粒捕捉成長と雪崩地点の降雪量への寄与という一連の物理過程については，本質を捉えていると考える．

標高の高い観測点における降水量が 26 日夜に一時的に減少していた点と（図 2a, 2b, 2h, 3a の矢印），これと同期して風速が極小を示すとともに風向が南寄りから北寄りに変化した点に着目すると（図 5），この時間帯を境に，2 つの異なる降水システムが前後して那須岳に降雪をもたらしたと推定できる（図 2a, 2b, 2h, 3a の A, B）．数値実験から得られた上空の雲・降水粒子の時間変化を見ると，これらに対応した降水システムがみとめられる（図 6 の A, B）．降水システム A は，雲頂が低いものの，総水混合比は高度 2km 以下のごく下層で大きな値を示している．降水システム A の通過後、降水システム B が差し掛かるまでの時間帯（26 日 18-24 時）は，降雪量は少なく，雲粒の寄与の比較的小さい時間帯を含んでいる．降水システム B は A よりも雲頂高度が高く，27 日朝にかけて，総水混合比がより大きな値を示すとともに，多量の降雪をもたらしている．このことは，南岸低気圧の通過に伴うシステムチックな状況変化の中で起きた降雪イベントで，弱層形成につながる降雪量および粒子特性の劇的な変化が，およそ半日程度の短い間に起きたことを表している．この点は，雪崩リスク評価・予測の観点から注目すべき重要な知見である．

ここまでは，降雪の粒子特性の変化と弱層との関係について，気象学的観点から考察を加えてきた．次に，数値気象モデルから得られた降雪粒子特性の時間的遷移の特徴が，積雪密度等の積雪パラメータにどの程度影響を与え得るのかについて考察する．本来，積雪内部で起きる熱や水蒸気の伝搬・相変化・力学的変性等全ての物理過程を考慮すべきだが，簡単のため，圧密過程のみを考慮した簡易な計算を行う．今注目している 26 日から 27 日にかけての降雪イベントの間，積雪層の温度は融解が起きない十分低い温度に保たれていたと推定できるため，1 日程度の短時間に限っては許容可能な近似解が得られると考える．福田ほか(2000)に従い，積雪密度 ρ に次の式を適用した．

$$\rho = \left[\frac{n}{C} \cos^2 \theta \int_{t_1}^t W dt + \rho_{init}^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

ここで， $C = 0.392 \text{ Pa s}$ ， $n = 4.0$ ， W は積雪内部の層に対する上載荷重である．傾斜角は $\theta = 30^\circ$ とした．新雪初期密度 ρ_{init} は，1 km・NHM から出力された降雪量に対する温度別昇華成長量・雲粒捕捉生長量・霰粒子質量の各寄与率 $r_{sdep-0}, r_{sdep-4}, r_{sdep-10}, r_{sdep-20}, r_{sdep-36}, r_{accr}, r_g$ と各成分の密度 $\rho_{sdep-0}, \rho_{sdep-4}, \rho_{sdep-10}, \rho_{sdep-20}, \rho_{sdep-36}, \rho_{accr}, \rho_g$ ，及び，地上風速 WS を用いて，次のように定式化した．

$$\rho_{init} = r_{sdep-0} \rho_{sdep-0} + r_{sdep-4} \rho_{sdep-4} + r_{sdep-10} \rho_{sdep-10} + r_{sdep-20} \rho_{sdep-20} + r_{sdep-36} \rho_{sdep-36} + r_{accr} \rho_{accr} + r_g \rho_g + 13.0 \times WS \quad (2)$$

各成分の密度は次のように与えた．

$$\rho_{sdep-0} = \rho_{sdep-4} = \rho_{sdep-10} = \rho_{sdep-20} = \rho_{sdep-36} = 70 \text{ kg m}^{-3}, \quad (3)$$

$$\rho_{accr} = 100 \text{ kg m}^{-3}, \quad (4)$$

$$\rho_g = 120 \text{ kg m}^{-3}. \quad (5)$$

いくつかの先行研究で、粒子タイプ別に新雪密度の推定式が提案されているが(梶川ほか, 2004, 2005), 数値気象モデルが表現する粒子特性に対応づけるには、さらに多様な粒子タイプに関する推定式が必要である。

図 7 は、式(1)から求めた雪崩地点における積雪密度プロファイルである。雲粒付きの少ない粒子が降っていた 27 日 00 時 (図 4a) には、雪面の新雪密度は約 80 kg m^{-3} と小さな値を示し (図 7a), その後、雲粒の寄与が大きい粒子が降っていた 27 日 03 時 (図 4a) には、雪面近くで約 120 kg m^{-3} (図 7b), 弱層にあたる層は約 80 kg m^{-3} のままだった。この層は、雪崩発生推定時刻 (08:30 頃) に近い 27 日 09 時の時点で、依然、上下の層より小さい密度を保っていた (図 7d の矢印)。現地調査が行われた翌日 28 日 (15 時) になると、上下の層に対するコントラストは弱くなっていた。弱層形成に関する厳密な議論には、積雪内部の物理過程を網羅した積雪モデルの適用が必要だが、この結果は、数値気象モデルの出力する粒子情報が、積雪内部の弱層形成ポテンシャルをある程度表現し得ることを示している。

6 結論

温度別昇華成長量および雲粒捕捉成長量を新たな予報変数として組み込んだ新しい数値気象モデルを用いて、2017 年 3 月 27 日に那須町で発生した雪崩災害時の気象再現実験を行った。雲・降水に関わる素過程や温度・湿度条件が粒子密度や晶癖の形成に強く関与していることから、新しいモデルを用いることで、降雪粒子の物理特性を従来よりも遥かに精緻な形で診断できる。

数値実験結果をもとに雪崩災害前後の降雪粒子特性を調べたところ、今回の雪崩災害の背景的要因となった弱層形成には、26 日夜から 27 日朝にかけて、南岸低気圧の通過に伴う気象場の変化に応じて現れた二つの降水システムによる降雪とその合間の時間帯の降雪の特徴の違いが影響していた。26 日夜に現れた降水システムは、極端に多量の降雪をもたらすことは無かったが、地形性上昇流による雲粒生成を通して、雲粒の寄与の大きい降雪をもたらした。その後、総観規模の気象場の推移に伴い風が弱まるとともに雲粒生成も弱まり、雲粒の寄与の小さい降雪が 26 日深夜にかけてもたらされた。この前後で風向が南寄りから北寄りに変化し、27 日未明から、風の強まりとともに雲粒の寄与の大きな多量の降雪がもたらされた。圧密過程のみ考慮した簡易な計算を行い、積雪密度プロファイルを求めたところ、雲粒の寄与の大小に応じて積雪密度の小さい弱層に対応する層がみとめられた。このように、気象場および降雪粒子特性の劇的な変化が半日程度の短い間に起き、それが弱層形成に関与し得ることは、雪崩リスク評価・予測に取り組む上で注目すべき重要な知見である。

本研究課題において、雲物理学的モデリングと気象観測・積雪観測を組み合わせた分野横断的アプローチにより、降雪にともなう弱層形成メカニズムの具体的な姿に迫ることができた点は、上記知見とともに大きな成果であり、気象・雪氷分野の連携研究による新たな展開の可能性を表している。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K01340, 16K05557, 17K18453 の助成を受けたものです。湯元、中塩原、芦野、大丸、板室、清滝、中宮祠の気象観測データは、栃木県より提供していただきました。

引用文献

- 梶川正弘, 後藤博, 金谷晃誠, 菊地勝弘, 2004: 新積雪密度と降雪粒子の諸特性の関係. 雪氷, 66, 561-565.
- 梶川正弘, 後藤博, 猿渡琢, 金谷晃誠, 橋本正秀, 菊地勝弘, 2005: 新積雪密度と降雪粒子の諸特性の関係. 雪氷, 67, 213-219.
- 中村一樹, 佐藤友徳, 秋田谷英次, 2013: 降雪系弱層形成時の気象の特徴. 北海道の雪氷, 32, 14-17.
- 福田 正己, 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫, 2000: 雪崩と吹雪 (基礎雪氷学講座 第Ⅲ巻). 古今書院, pp236.

低気圧に伴う降雪システムの Ka バンド偏波レーダー観測 Ka-band polarimetric radar observation of a low-pressure snowfall system

出世 ゆかり¹⁾, 前坂 剛¹⁾, 木枝 香織¹⁾, 岩波 越¹⁾
Y. Shusse¹⁾, T. Maesaka¹⁾, K. Kieda¹⁾, K. Iwanami¹⁾

¹⁾防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

¹⁾ National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience

Abstract: Ka-band polarimetric radar observation in Tsukuba was carried out on a snowfall system associated with south-coast cyclone on 20 January 2017. Characteristics of polarimetric radar measurements related to snow crystal types and the finescale structure of the snowfall system related to snowfall formation processes were analyzed. During the snowfall period on the ground, two layers of radar echoes were observed at an altitude of less than 2.5 km and an altitude of about 3.5 km. The generating cells with horizontal and vertical scales of about 1 km were observed near echo top of the lower echo, which probably related to rapid growth of the snow crystals. Their associated fall streaks reaching the vicinity of the ground were also found. These finescale structures in the snowfall system likely contributed to the strengthening the snowfall on the ground. The radar echo of the upper layer had remarkably large Z_{DR} values of about 5 dB. Scattering calculations support that plate-like snow crystals with high density mainly constituted the upper echo. These observation results show the possibility of monitoring and early detection of snow crystals forming weak layers in accumulated snow that could lead to avalanches by Ka-band polarimetric radars.

Key words: Ka-band polarimetric radar, snowfall system, snow crystal, generating cell

1 はじめに

2017 年 3 月 27 日に栃木県那須町の山岳地域において雪崩災害が発生した。これまでの調査から、南岸低気圧に伴う降雪中に積雪内に形成された弱層が破壊されて表層雪崩を引き起こしたと推定されており、弱層では雲粒付着の少ない板状等の雪結晶が検出された（中村ほか, 2017）。積雪内の弱層の有無を把握するためには、降雪時に雪結晶のタイプを面的に把握することが重要である。そのため、偏波レーダーによる貢献が期待されているが、低気圧に伴う層状性降雪雲に関して雪結晶のタイプに注目した偏波レーダー観測事例は少ない。また、国内ですでに普及している X バンド偏波レーダーに加え、よりビーム幅が狭く（0.4deg 以下）、高感度（距離 20km で -17dBZ）のスキャン型 Ka バンド偏波レーダー（Maesaka et al, 2015）は、雪結晶タイプに関わる偏波パラメータ特性だけでなく、降雪形成過程に関わる降雪雲の微細構造も観測できると考えられる。このような新しい観測技術が雪結晶タイプの監視や早期検知に役立つ可能性も検討する必要があると考えられる。

2017 年 1 月 20 日、日本の南海上を通過した複数の低気圧に伴い関東地方で降雪が報告された。防災科学技術研究所（以下、防災科研）では、この降雪システムを茨城県つくば市に設置した Ka バンド偏波レーダーで観測した。本研究では、降雪システム内で観測された偏波パラメータの特徴と微細構造について解析を行った。

2 降雪の概況と環境場

つくば市周辺では、1 月 20 日 0900JST（Japan Standard Time ; JST=UTC+9 時間）頃から 1130JST 頃にかけて、防災科研で運用中の地上気象リポートシステム「ふるリポ！」（<https://fururipo.bosai.go.jp/fururipo/>）に降雪の報告が寄せられた。また地上では、樹枝状結晶や雲粒付き雪結晶およびそれらで構成される凝集雪片などが確認された。この降雪期間中は、日本の南海上を前線を伴わない 2 つの低気圧が通過しており（図 1）、つくば市周辺はその北側の層状性降水領域に位置していた（図 2）。館野における 0900JST の高層気象観測（図 3）によると、地上から高度 500m の気温は約 0℃～2.8℃、相対湿度は 44%～70%であり、降雪が開始した時刻には大気下層が比較的乾燥していたことが分かる。つくばにおけるアメダス観測

(図4)によると、降雪開始後の0900JSTから1000JSTにかけて、相対湿度が70%から84%まで高くなり、気温は0.4℃から0℃に低下した。その後地上での降雪が終了する1130JST頃にかけて、地上の相対湿度は約85%とほぼ一定であり、気温は徐々に上昇した。

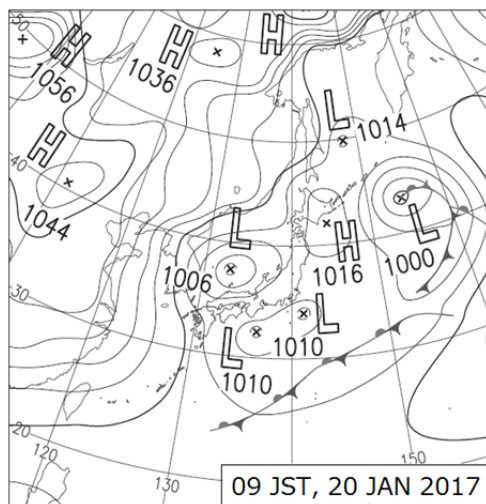


図-1 2017年1月20日0900JSTの地上天気図。

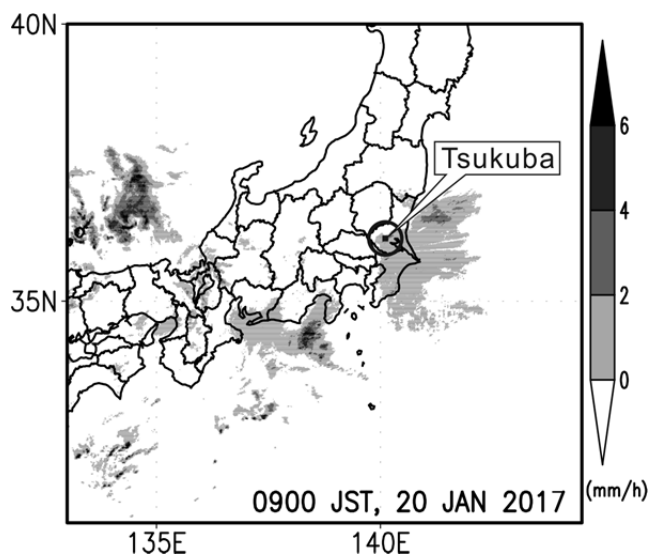


図-2 気象庁レーダー観測による2017年1月20日0900JSTの降水強度分布。丸で囲んだ領域は、つくば市に設置したKaバンド偏波レーダーの観測領域(半径30km)。

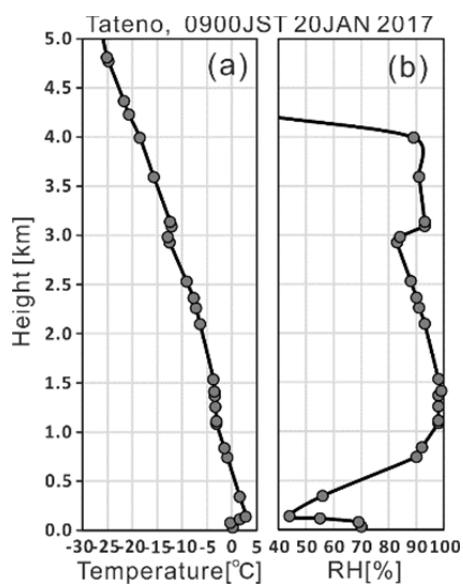


図-3 2017年1月20日0900JST館野における(a)気温と(b)相対湿度の高層観測データ。

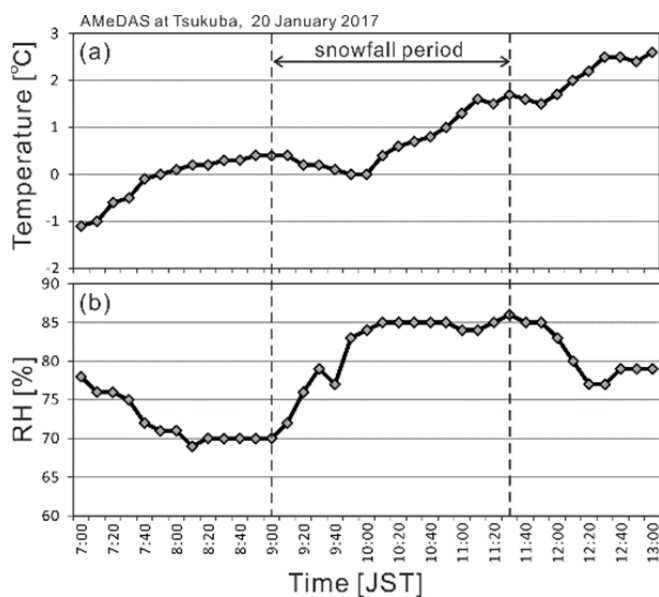


図-4 2017年1月20日つくばアメダス地点の(a)地上気温と(b)地上相対湿度。

表ー1 防災科研 Ka バンド偏波レーダーの主要諸元.

タイプ・偏波	直交 2 偏波・HV 同時送受信
周波数	Ka バンド (短パルス : 34.815GHz, 長パルス : 34.82GHz)
空中線, ビーム幅	カセグレン方式円形パラボラ ($\phi=2.2\text{m}$), 0.31deg
利得, 交差偏波識別度	52dB 以上, 30dB 以上
送信出力	EIK, 3kW
パルス幅	短パルス : 1.0 μs , 長パルス : 55 μs
PRF	2.5kHz 以上 (観測時設定 high : 1980, low : 1584)
レンジピン	150m
走査範囲 (最大走査速度)	水平 : 0~360 deg (36 deg/sec) 垂直 : -10~182 deg (12 deg/sec)
観測半径	30km

3 Ka バンド偏波レーダー観測

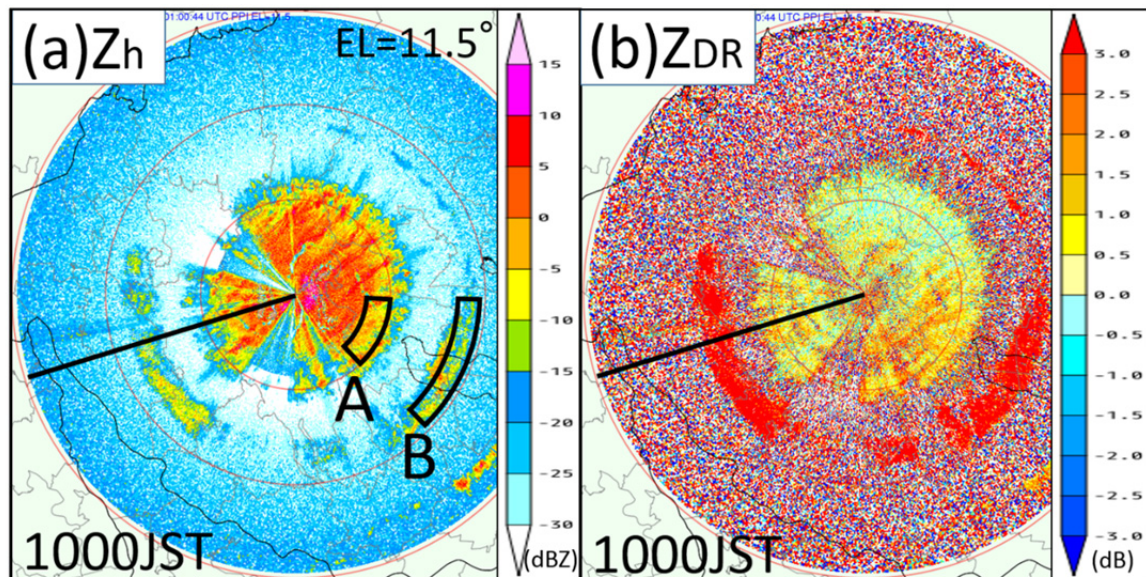
本研究では茨城県つくば市の防災科研に設置した Ka バンド偏波レーダーの観測データを利用した。表 1 にレーダーの主要諸元を示す。レーダーの観測範囲は図 2 に示す。解析対象である降雪システムについて、3 分毎に 6 仰角の PPI スキャン (仰角 5.2° から 27.2°) と 2 回の RHI スキャン (方位角 253.4°) を連続して行った。Ka バンド偏波レーダー観測では、レーダー反射因子 ($Z_h(\text{dBZ})$)、レーダー反射因子差 ($Z_{DR}(\text{dB})$)、偏波間位相差変化率 ($K_{DP}(\text{deg/km})$)、偏波間相関係数 (ρ_{hv})、ドップラー速度 ($V(\text{m/s})$) などのパラメータが取得される。ここでは主に、顕著な特徴が見られた $Z_h(\text{dBZ})$ と $Z_{DR}(\text{dB})$ について報告する。なお本研究で示す $Z_h(\text{dBZ})$ は、水の誘電率を用いて換算した等価レーダー反射因子である。

この日つくば市のレーダーサイト上空では、早朝より層状性のレーダーエコーが観測されており、地上で雪が確認される直前の 0845JST 頃には、エコーが地上付近まで到達する様子がみられた (図省略)。図 5 と図 6 は、地上気温が降雪期間中で最も低く、地上の降雪も顕著であった 1000JST の PPI 画像と RHI 画像である。地上付近で観測されたエコーの高さは約 2.5km であったことが分かる。一方、高度 3.5km 付近 (0900JST の館野のゾンデデータの気温は約 -15°C (図 3)) には鉛直方向の厚みが数百 m 程度のレーダーエコーが層状に広がっていた。

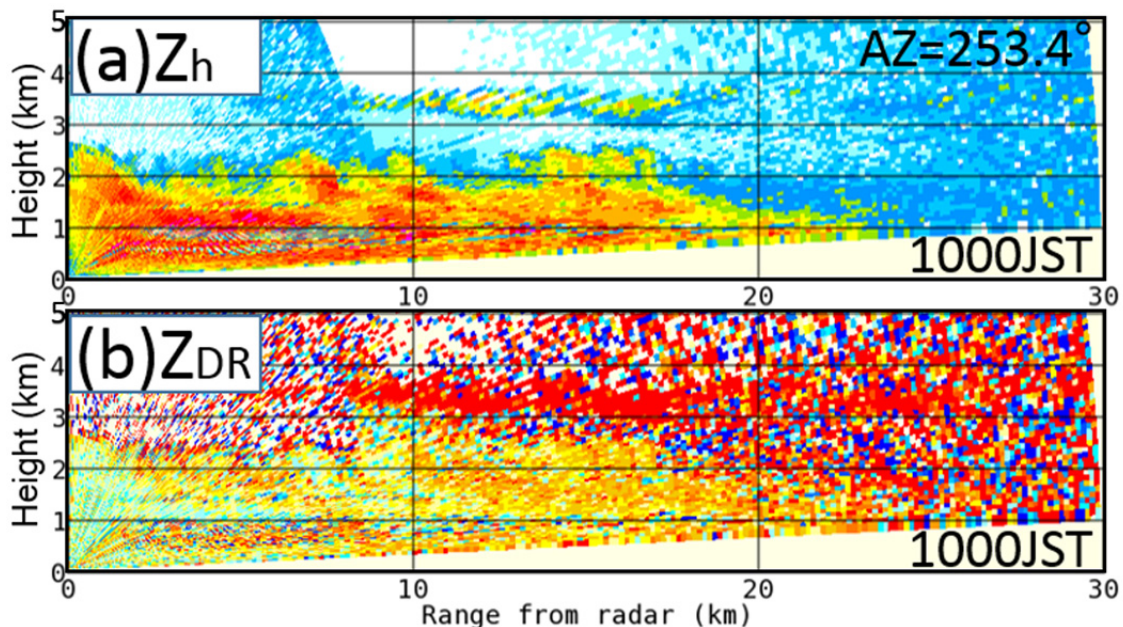
高度 2.5km 以下に観測されたレーダーエコーは、 Z_h の最大値が 10dBZ 程度であり、 Z_{DR} は平均で 1dB 程度の値がエコーの全域に分布していた (図 5b, 図 6b, 図 7a)。特徴的なエコー構造として、レーダーエコー上端部 (高度 2km から 2.5km 付近) に水平及び鉛直スケールが 1km 程度の生成セルの構造が捉えられた (図 5a と図 6a)。生成セルは、層状性降水の雲頂付近でしばしば観測され、小規模の対流を伴う。一般的に生成セル内部では氷晶の数濃度が高く、過冷却水滴が存在する事例の報告もあり、雪結晶が著しく成長すると考えられる (例えば、Kumjian et al. 2014)。本事例では、生成セル下方の高度 2km 以下で南西から北東の走向を持つストリーク状のエコーが地面付近まで到達していた (図 5a) ことから、上空の生成セルにおける雪結晶の形成や成長は、地上の降雪の強化にも貢献していたと考えられる。

高度 3.5km 付近に広がるエコーの Z_h の値の範囲 ($\sim 5\text{dBZ}$) は、下方のエコーの値とそれほど大きな違いはなかったが、 Z_{DR} は平均で 5dBZ 程度の大きな値が観測された (図 5b, 図 6b, 図 7b)。0900JST の高層気象観測による高度 3.5km 付近の気温はおよそ -15°C (図 3) であり、Orikasa and Murakami (2015) では -15°C 以上の気温で板状の氷粒子が卓越していたことが報告されている。そこで、高度 3.5km 付近のエコーを構成する雪結晶のタイプについて考察するため、板状結晶 (軸比 0.1) を想定し、雪結晶の密度を変化させた散乱計算を T-matrix 法で行った (図 8)。粒子の密度を 0.917 g cm⁻³ とした場合、等価直径 1mm 程度までの範囲において、 Z_{DR} は 4.7dB 程度となり、レーダー観測値に相当する大きな値であることが確認された (図 8b)。また、粒子の密度を 0.5 g cm⁻³ と低くした場合、 Z_{DR} は 3dB 未満の値となり (図省略)、高度 3.5km 付近のエコーの Z_{DR} 観測値より顕著に小さい値となることが分かった。なお、図 8 の横軸は等価直径であるが、等価直径 1mm は軸比が 0.1 の場合の長軸直径約 2.1mm に相当する。また図 8 において、等価直径 1mm 程度までは Ka バンド帯と X バンド帯で Z_h , Z_{DR} 共に値に大差がないた

め、Ka バンド帯でもレイリー散乱と考えるとよさそうである．以上の結果より，高度 3.5km 付近のエコー領域を構成する雪粒子は，密度が高い板状の結晶であったと推定され，雲粒付着の少ない角板等の雪結晶であったと考えられる．一方， Z_{DR} が 1dB 程度であった高度 2.5km 以下の下層エコーは，高度 3.5km 付近のエコーに比べ，密度が小さく，より球形に近い粒子で構成されていたと考えられる．地上では凝集雪片や雲粒付きの雪結晶が確認されており，散乱計算で得られた結果と矛盾しない．このように，Ka バンド偏波レーダー観測により，雪結晶のタイプに応じた偏波パラメータ特性を取得することができたと考えられる．



図－5 Ka バンド偏波レーダーで観測された 2017 年 1 月 20 日 1000JST の仰角 11.5° の PPI 画像．(a)レーダー反射因子，(b)レーダー反射因子差．観測半径は 30km.



図－6 2017 年 1 月 20 日 1000JST の方位角 253.4° の RHI 画像．(a)レーダー反射因子，(b)レーダー反射因子差．各パラメータのカラースケールは図 5 と同じ．RHI 画像の位置は図 5 に示す．

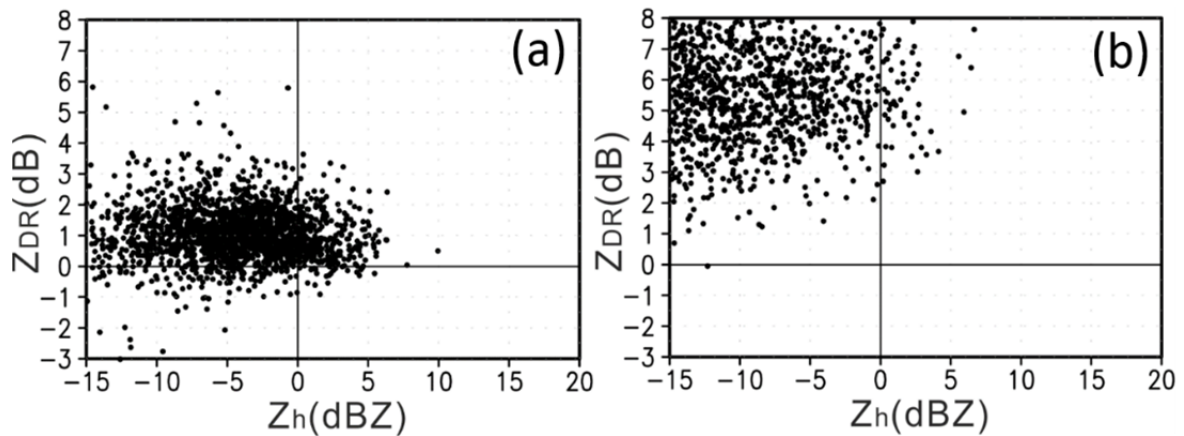


図-7 図5に示した(a)領域Aと(b)領域Bにおけるレーダー反射因子とレーダー反射因子差の関係.

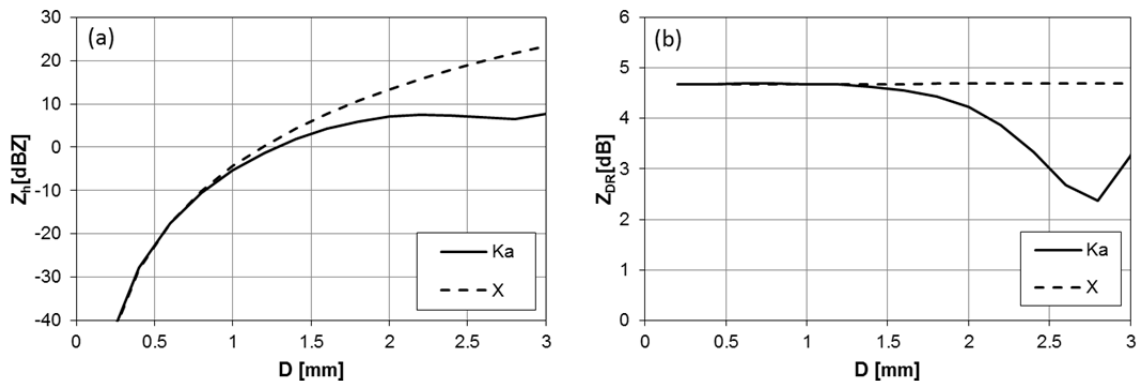


図-8 T-matrix 法による Ka バンドレーダー偏波パラメータの散乱計算結果. 参考のため, X バンドレーダーパラメータについても示す. 横軸は等価直径. 縦軸は(a)レーダー反射因子と(b)レーダー反射因子差. 計算は板状結晶を想定して行い, 以下の仮定を用いた. 温度: -15°C , 密度: 0.917g cm^{-3} , 軸比: 0.1, キャンティング角: (範囲) $0\sim 90^{\circ}$, (平均) 0° (分散) 20° , 仰角: 11.5° .

4 まとめ

2017年1月20日茨城県つくば市において, 低気圧に伴う層状性降雪システムを対象とした Ka バンド偏波レーダー観測を実施し, 雪結晶のタイプに関わる偏波パラメータの特徴と降雪形成過程に関わる微細構造について調査した.

地上での顕著な降雪が見られた時間帯には, 地上から高度約 2.5km までと, 高度 3.5km 付近に 2 つのエコーが観測された. 高度 2.5km 以下のエコーの上端には生成セルが, その下方には地上付近まで到達するストリーク状のエコーが観測されており, 雪結晶の成長と地上降雪の強化に関わる降雪雲の構造を捉えることができた. また高度 3.5km 付近には Z_{DR} が大きい (平均で約 5dB) エコーが観測された. T-matrix 法の散乱計算により, 雲粒付着の少ない角板等の板状結晶 (高密度, 軸比小) で構成されていたことが示唆された. 一方, 高度 2.5km 以下のエコーでは Z_{DR} が小さかった (平均で約 1dB). 地上では凝集雪片や雲粒付きの雪結晶 (低密度, 軸比大) が確認されており, 低層における偏波パラメータと矛盾しない特徴がみられた.

2017年3月27日に那須町で雪崩災害が発生した際には, 表層雪崩の要因であったと推定される積雪内の弱層で, 雲粒付着の少ない板状等の, 比較的大型の雪結晶が検出された (中村ほか, 2017). この雪結晶のタイプは, 本研究で高度 3.5km 付近のエコーを構成すると示唆された雪結晶と共通する. そのため, 感度の高い Ka バンド偏波レーダーで Z_{DR} が高い領域を抽出することにより, 弱層形成に関わる降雪粒子を早期に検知できる可能性があると考えられる.

今後、Xバンド偏波レーダーに加えてKaバンド偏波レーダーでも、低気圧に伴う層状性降雪システムの観測を積極的に行い、雪結晶のタイプ毎の時空間分布と降雪形成過程に関わる観測的知見をさらに積み重ねて行くことが期待される。

謝辞

本研究は文部科学省科研費特別研究促進費「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（課題番号：17K18453）」の一環として実施したものです。

引用文献

- 中村一樹・小杉建二・根本征樹, 2017: 那須町雪崩災害調査: 第1回調査(2017.3.28). (http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyouaigai/2017/report_20170328_NasuOnsen.pdf, 2018年2月28日確認)
- Kumjian, M. R., S. A. Rutledge, R. M. Rasmussen, P. C. Kennedy, and M. Dixon, 2014: High-resolution polarimetric radar observations of snow-generating cells. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1636-1658.
- Maesaka, T., K. Iwanami, S. I. Suzuki, Y. Shusse, and N. Sakurai, 2015: Cloud radar network in Tokyo metropolitan area for early detection of cumulonimbus generation. *Proc. 37th Conf. on Radar Meteorology.*, Norman, Oklahoma, Amer. Meteor. Soc., [Available online at https://ams.confex.com/ams/37RADAR/webprogram/Handout/Paper275910/37RadarConf_Maesaka_handout.pdf]
- Orikasa, N., and M. Murakami, 2015: Ice crystal shapes in midlatitude cirrus clouds derived from hydrometeor videosonde (HYVIS) observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 143-155.

第4章

雪崩シミュレーションを用いた被害範囲推定

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 Simulations for estimating flow behaviors of Nasu Avalanche

伊藤 陽一¹⁾, 森口 周二²⁾, 小田 憲一³⁾, 西村 浩一⁴⁾
Y. Ito¹⁾, S. Moriguchi²⁾, K. Oda³⁾, K. Nishimura⁴⁾

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⁾東北大学 災害科学国際研究所

²⁾*International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University*

³⁾日本大学理工学部 土木工学科

³⁾*Department of Civil Engineering, College of Science and Technology, Nihon University*

⁴⁾名古屋大学大学院 環境学研究所

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

Abstract: In this study, we reproduced Nasu Avalanche using two types of simulation tools to estimate flow path and flow velocity. The flow path was firstly estimated by using TITAN2D, and the simulated flow area was compared to the observed data reported in the field survey. Then, three-dimensional stabilized finite element method was applied to the simulation to check detailed flow behaviors. According to the obtained results, similar tendency of flow path was seen between results of two simulations, and maximum flow velocity was estimated to be 11~12 m/s.

Key words: avalanche, flow area, flow velocity, computational fluid dynamics

1 はじめに

雪崩発生後に行われた現地調査では、斜面下方の樹林帯で雪崩の流動に起因すると思われる積雪層構造の乱れなどが確認され、雪崩の流下範囲をある程度絞りこむことができた。しかし、斜面上方で雪崩が発生・流下したと思われる痕跡は視認できなかったため、発生箇所は天狗岩付近の斜面であろうとの推測にとどまった。このような背景のもと、雪崩運動シミュレーションによって雪崩の流下経路や流下速度を推定する試みを行った。本報告では、2つの連続体モデルを用い、それぞれの特徴を生かし、現地調査で得られた流下推定範囲をどの程度再現できるかをまとめる。

2 簡便な連続体モデル (TITAN2D) を用いた雪崩の流下状況の推定

2.1 連続体モデル (TITAN2D)

雪崩の流下状況 (流下経路や速度など) を推定するために、まず初めに簡便な雪崩運動モデルを用いて雪崩発生箇所を推定する試みを行った。使用したモデルは、土石流や地すべりなどの乾燥粒状体の流れを対象に開発された TITAN2D¹⁾ で、インターネット上で無料公開されている最新版 (v4.0.0) を使用した。TITAN2D は、粒状体の流れを非圧縮性の連続体の流れとみなし、さらに流れの厚さが幅・長さに対して十分小さく、鉛直方向の速度勾配を無視できると仮定 (浅水流近似) することにより、3次元の流れを準3次元な2次元流れに変換して計算を行い流れの厚さや速度の時空間分布を求めることが可能である。なお、雪崩は流下時に斜面上の積雪を内部に取り込み、質量が流下距離にともない増加する場合があることが知られているが²⁾、TITAN2D では質量変化は考慮せず一定としている。

TITAN2D で用いられている質量保存式・運動量保存式は以下のとおりである。斜面を流下する流れに対し、斜面と平行に x 座標と y 座標 (XY 平面) を、斜面と鉛直に z 座標をおいた場合に、厚さ方向に平均化された質量保存式は式(1)で表すことができる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここで、 h は流れの厚さ、 t は時間、 $\bar{v}_x$ および $\bar{v}_y$ はそれぞれ x および y 方向の速度（厚さ方向の平均値）である。また、同様に厚さ方向に平均化された運動量保存式（ x 方向）は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial t} + \frac{\partial (h \bar{v}_x^2 + 0.5 k_{ap} g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_x \bar{v}_y}{\partial y} \\ & = g_x h - \frac{\bar{v}_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \left[g_z h \left(1 + \frac{\bar{v}_x^2}{r_x g_z} \right) \right] \tan \mu_{bed} - \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin \mu_{int} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 g_x および g_z は重力加速度の x および z 成分を、 μ_{bed} は底面摩擦角、 μ_{int} は内部摩擦角である。式(2)の右辺の第一項は駆動力としての重力項である。第二項は底面におけるクーロン摩擦抵抗の効果を表し、 r_x は底面の曲率半径で無限大に近づくほど底面が平坦で曲率の効果が無視できるように示されている。第三項は流れ内部の速度勾配にともなう内部摩擦の効果を表し、 k_{ap} は流れが流下方向や横断方向に広がる方向（ k_a ）か縮む方向（ k_p ）かで決定される土圧係数、 $\operatorname{sgn}(\partial \bar{v}_x / \partial y)$ は $\partial \bar{v}_x / \partial y$ の正負によって正なら1を、負なら-1を返す関数である。

実際の TITAN2D を用いた計算は、雪崩発生後に無人航空機による空撮で得られた 1 m グリッドの雪面標高データ上に楕円柱を設定し、この楕円柱が崩壊し連続体として斜面上を流下するものとして行われる。雪崩の発生箇所や始動体積は、雪面標高データの座標や楕円の径および厚さを任意に設定することで決定される。その他、雪崩の流動状態（流れの拡がりや到達距離）に関連する底面摩擦角 μ_{bed} 、内部摩擦角 μ_{int} も入力パラメータとして設定することで計算を行った。計算時間は斜面の規模や地形の複雑さによって大きく変化するが、本解析では長くて 1～2 分程度で計算が終了することが多かった。

2.2 TITAN2D を用いた流下経路の推定結果

雪崩の発生箇所は不明であるが、現場の様子から天狗岩直下の斜面付近と推定されていたため（図-1）、初めにこの推定結果を参考に雪崩流下状況を試算した。このときの初期条件は以下のとおりである。

- ・ 位置：図-1 の推定発生区とほぼ同様
- ・ 始動積雪：長径 55 m，短径 48 m，厚さ 0.6 m の楕円柱（体積 1244 m³）
- ・ 入力パラメータ：底面摩擦角 30°，内部摩擦角 25°

なお、始動積雪の厚さは、雪崩発生時の推定積雪深に加えて雪の取り込みで雪崩の質量が増加することを見込んでやや多めに設定している。

雪崩の初期位置と、流下後 20 秒経過した後の流下範囲を図-2 に示す。図-1 に比べると、本流（埋没地点のある沢）に加えて南側の沢に流れが集中し、現地調査で雪崩の痕跡が確認された北側の沢にはほとんど流入しないという計算結果が得られた。このことから、実際の雪崩発生箇所は現地調査で推定された位置よりもさらに北側（埋没地点から天狗岩に向かって右方向）であった可能性が考えられる。そこで、雪崩の初期体積や標高などは変更せずに、初期位置のみ北方向に 5 m 程度ずつ変化させながら計算を行い、現地調査で得られた流下推定範囲と一致するような雪崩発生箇所を求めることにした。何例か試行錯誤しながら計算を行った結果、北方向に約 15 m 初期位置をずらした場合に、現地調査と比較的よく一致する結果が得られた（図-3）。なお、このときの雪崩の平均速度は最大で 12 m/s 程度と計算された（図-4）。



図-1 現地調査（2017年4月）後の雪崩の流下経路の推定図

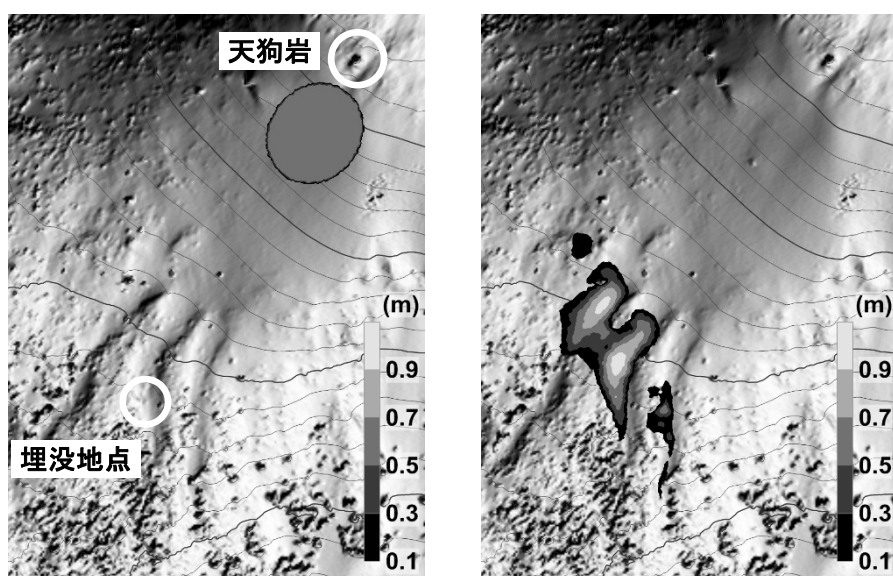


図-2 雪崩の初期位置（左）と始動から20秒後（右）の流れ厚さの計算結果.

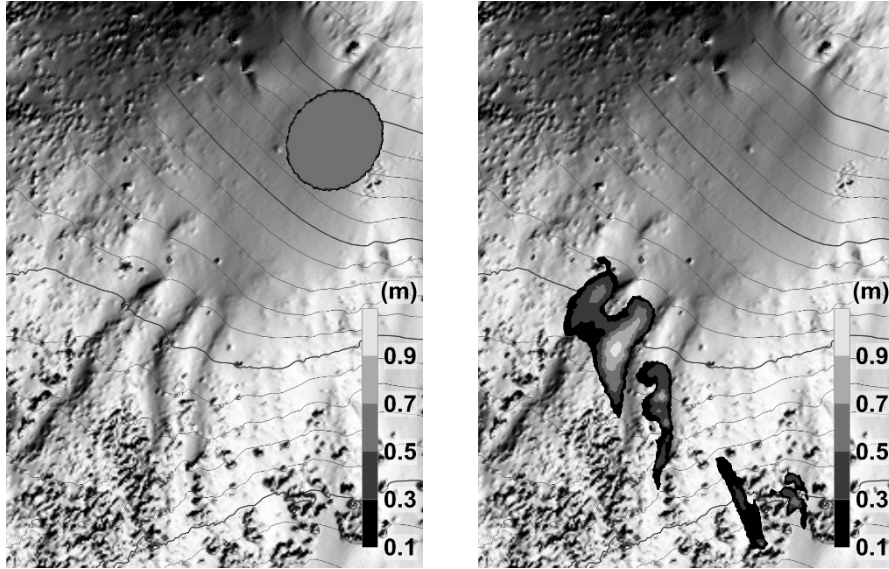


図-3 雪崩の初期位置を約 15 m 北方向にずらした場合（左）の始動から 20 秒後（右）の流れ厚さの計算結果

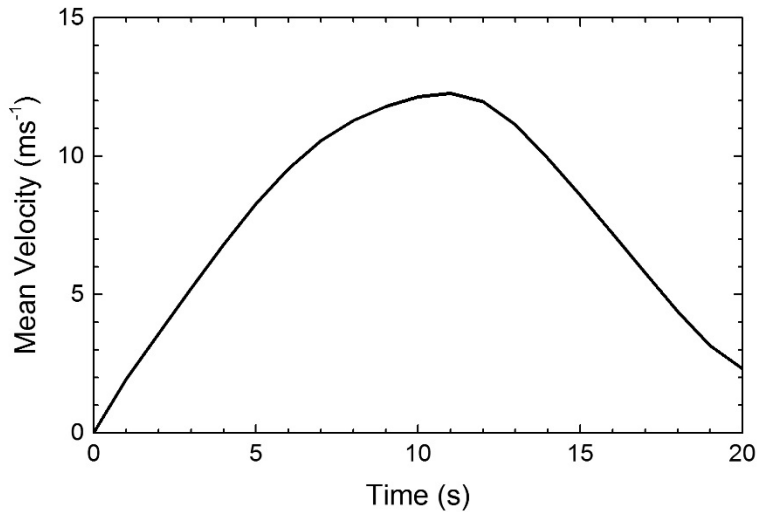


図-4 雪崩の平均速度の計算結果（図-3 の計算時）

3 3次元安定化有限要素法を用いた雪崩の流下状況の推定

3.1 解析手法と支配方程式

本解析では、非構造四面体要素を用いた SUPG/PSPG 法³⁾に基づく 3 次元安定化有限要素法を用いて雪崩の流下挙動を表現する。雪崩は非圧縮性の Bingham 流体と仮定し、下記の運動方程式と連続式を解くことにより流動挙動が表現される。

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \rho g_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

ここで、 ρ は密度、 u は速度、 p は圧力、 η は等価粘性係数である。等価粘性係数は、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関数として表現され、クーロンの破壊規準を導入した Bingham 流体モデルの割線粘性係数（疑似的に Newton 流体としてみた場合の等価な粘性係数）として下記のように求められる。

$$\eta = \eta_0 + \frac{p \tan \Phi + c}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

ここで、 η_0 は最小粘性係数、 Φ は内部摩擦角、 c は粘着力である。なお、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は、せん断ひずみ速度テンソル V_{ij} を用いて下記のようにスカラー値で表現する。

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} V_{ij} V_{ij} \quad (6)$$

自由表面の表現には VOF (Volume of Fluid) 法⁴⁾を用いており、下記の密度関数 ϕ の移流方程式を解くことで自由表面の位置の時間発展を解いている。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

本手法は、もともと土砂流動を対象として開発された手法⁵⁾であるが、これまでの研究で雪崩に対する適用性も確認されている^{6),7)}。また、完全な3次元条件での計算となるため、計算コストが高いという欠点があるが、地形形状や植生、および防護工の影響なども含めて解析が可能であり、適用範囲が広いのが特徴である。なお、本手法においても、TAITAN2Dと同様に斜面上の積雪を取り込む効果は考慮しておらず、質量変化は一定としている。

3.2 解析モデルと解析パラメータ

TITAN2Dの結果を踏まえて、図5に示す2ケースについて解析を実施した。Case 1は頂上部の大岩(天狗の鼻)の直下に発生区を設定した条件であり、Case 2はCase 1の発生区的位置から北側に発生区を15m移動させた条件である。なお、図中には、現地調査の結果⁸⁾から推定された雪崩の到達範囲および、救出活動地点の位置も含めている。解析メッシュは、図6に示すように地形に沿って高さ10mの範囲で空間を分割することで作成している。地表面に近いメッシュほど細くなっており、地表面付近では四面体メッシュの1辺の長さが約15cmの解像度でモデル化している。

地形形状については、TAITAN2Dと同様に、雪崩発生後に無人航空機による空撮で得られた1mグリッドの雪面標高データから作成しているが、計測結果の生データは植生の影響を含んでおり、部分的に不自然な凹凸が存在した。この凹凸は、雪崩の流動挙動や計算安定性にも影響を与える可能性があったため、平滑化処理を施し、図6のように滑らかな地形形状に変換している。なお、この処理のために、ラプラシアンフィルターという処理方法を用いたが、元の地形特性を変化させないように、平滑化の度合いを試行錯誤によって決定している。

本解析に用いた解析パラメータは表-1に示すとおりであり、密度については現地の調査報告結果⁸⁾、粘着力と最小粘性係数については既往の研究⁷⁾を参考に決定した。また、内部摩擦角については、別途実施した解析結果に基づいて決定している。なお、計算にはスーパーコンピュータを用いて並列数約2500程度の規模で行っている。

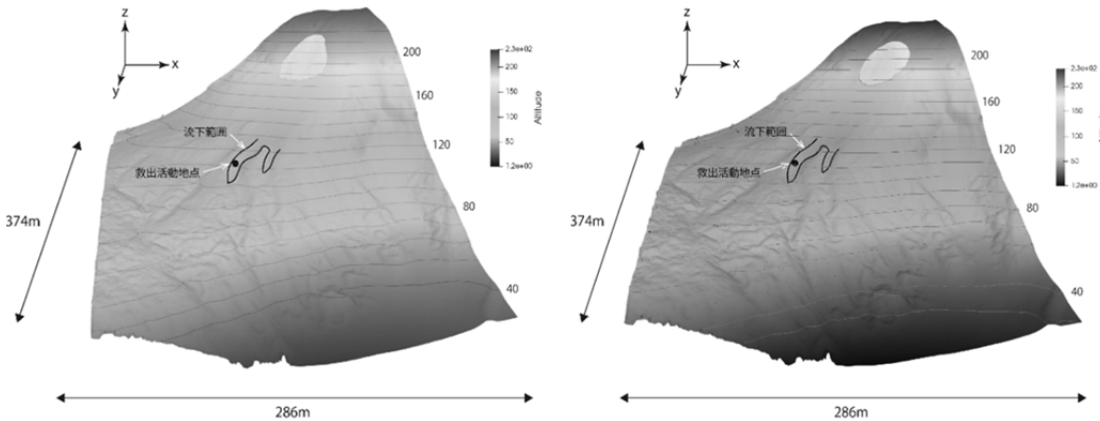
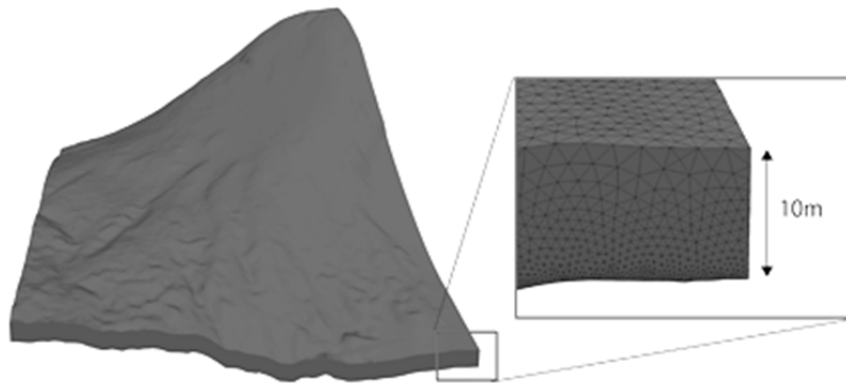
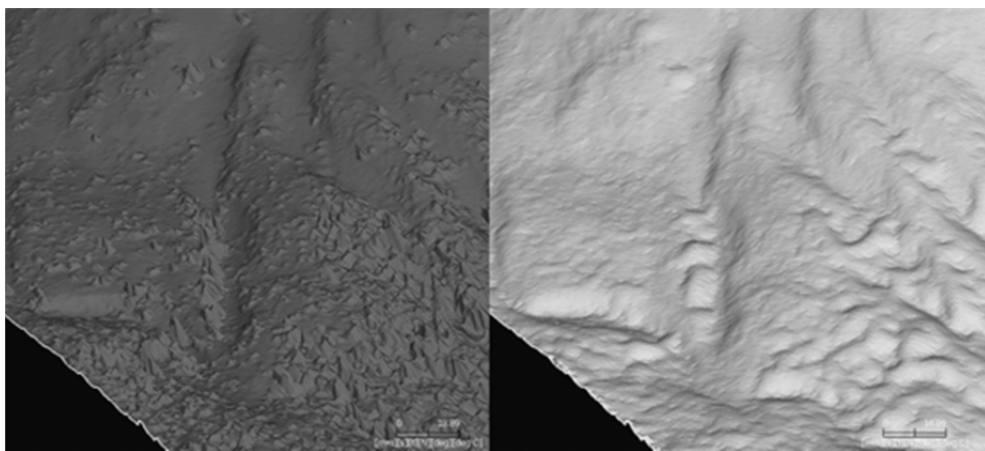


図-5 解析モデル (左: Case 1, 右: Case 2)



図－6 解析メッシュ



図－7 地形形状の平滑化处理（左：平滑化处理前，右：平滑化处理後）

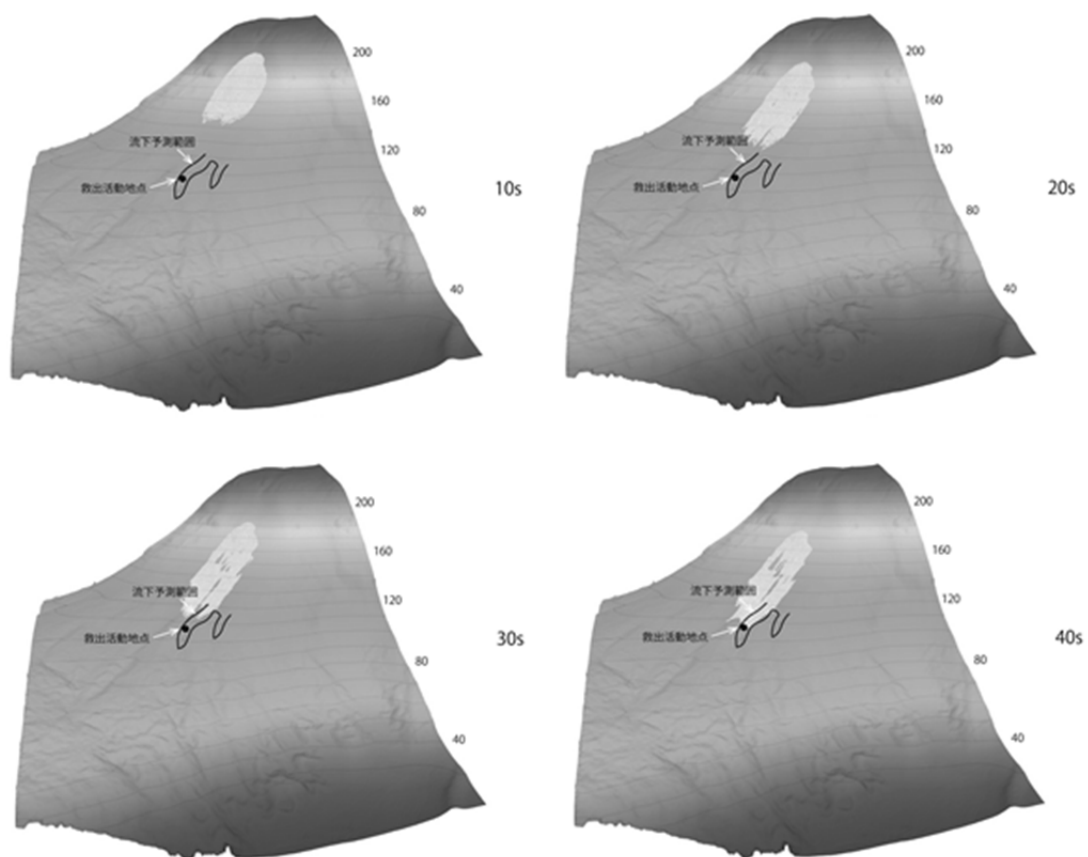
表－1 解析パラメータ

密度(kg/m ³)	内部摩擦角(deg)	粘着力(N/m ²)	最小粘性係数(Pa/s)
200	15.0	100	1.00

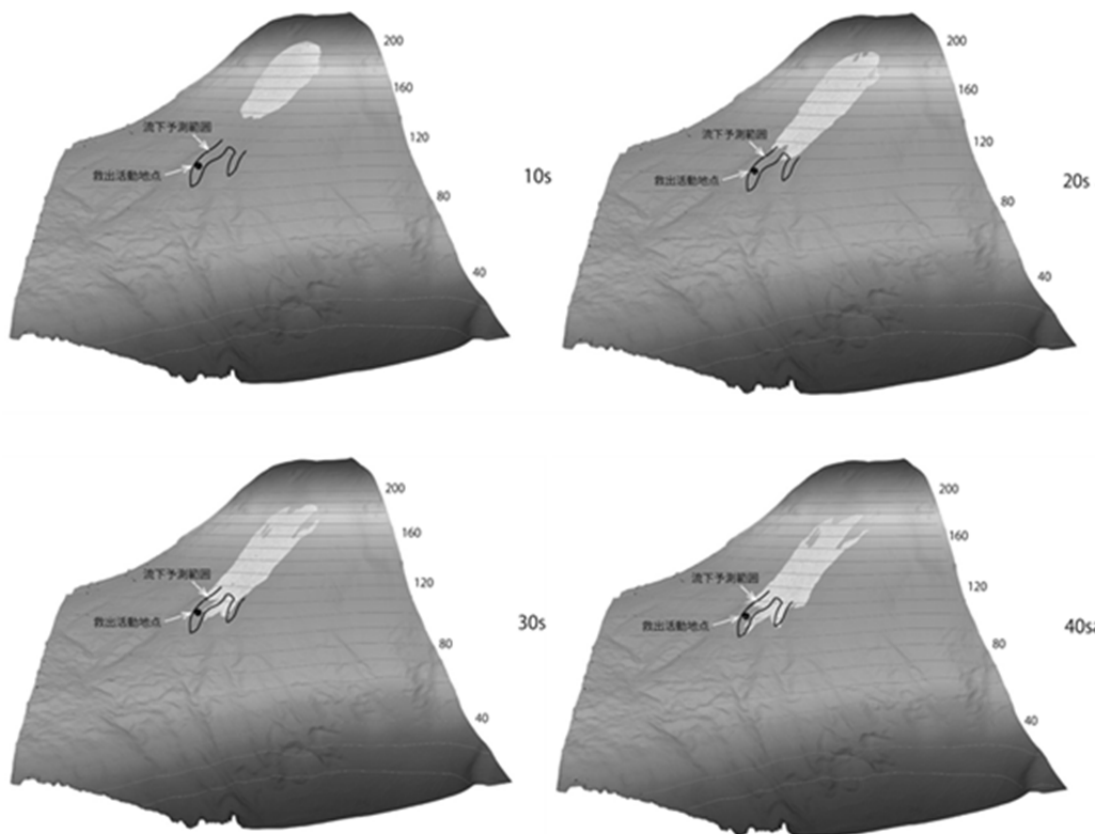
3.3 解析結果

得られた解析結果に基づいて可視化した流動挙動を図－8 と図－9 に示す．図－8 が Case 1 の結果，図－9 が Case 2 の結果である．Case 1 の結果では，流下後の雪崩の到達範囲が現地調査から推定された到達範囲から外れた南側の沢に流れる結果となっており，実現象とは異なる流動挙動になっていると考えられる．これに対して Case 2 では，Case 1 よりも実際の到達範囲に近い結果となっている．本解析の結果は，現地調査で推定されている被災箇所と完全には一致していないが，全体的な流下方向として Case 2 の結果が実現象に近いと考えられる．そのため，発生区は Case 2 で設定した位置付近に存在した可能性が高いと考えられる．

一方で，Case 2 の結果から最大流速分布を求めたところ，最大で 11m/s 程度となる箇所が確認された．本研究で用いた手法では，底面（斜面表面）の境界条件が non-slip（底面で速度が 0）条件となっており，底面付近のメッシュサイズが 10cm 程度であるため，底面摩擦が実現象よりも過大評価されている可能性が高い．また，実際の雪崩が表層雪崩であることを考えても，やはり今回の解析結果は流動速度を過小評価している可能性がある．このため，実際の流速の最大値は 11m/s 以上であった可能性が高い．



図一8 解析結果 (Case 1)



図一9 解析結果 (Case 2)

4 まとめ

本報告では、2つの連続体モデルを用いた雪崩発生個所の推定や流下状況の推定についてまとめた。TAITAN2Dを用いた解析では、雪崩の発生個所を現地調査で推定された範囲よりも北側に15mの位置とすることで流下予測範囲に到達する結果が得られた。また、3次元安定化有限要素法を用いた詳細な解析においても同様の結果となることが分かった。流下速度はTAITAN2Dの結果では最大12m/s、3次元安定化有限要素法を用いた結果では最大11m/s以上であると推定された。以上のことから、両解析によって得られる結果はおおむね一致しており、雪崩の流下範囲を推定する際はTAITAN2Dを使用した大まかな解析を採用し、より詳細に流下状況を推定する際は3次元安定化有限要素法を用いた解析によって行う方法が雪崩のソフト対策に有効である可能性を示唆することができた。

謝辞

3次元安定化有限要素法を用いた数値解析に関して、八戸工業大学の高瀬慎介講師より多くの助言を頂いた。記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) Pitman E.B., C.C. Nichita, A.K. Patra, A.C. Bauer, M.F. Sheridan, M. Bursik: Computing granular avalanches and landslides. *Physics of Fluids*, **15**(12), 3638–3646, 2003.
- 2) Sovilla, B., F. Somavilla, A. Tomaselli: Measurements of mass balance in dense snow avalanche events. *Annals of Glaciology*, **32**, 230–236, 2001.
- 3) Brooks, A.N., Hughes, T.J.R.: streamline-upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied MEchanics and Engineering*, Vol.32.1, pp.199-259, 1982.
- 4) C.W. Hirt and B.D. Nichols: “Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries”, *J. Comp. Phys.*, 39, pp.201- 225, 1981.
- 5) Moriguchi S., Yashima A., Sawada K., Uzuoka R. and Ito M., Numerical simulation of flow failure of Geomaterials based on fluid dynamics, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.2, pp.155-166, 2005.
- 6) Oda K., Moriguchi S., Kamiishi I., Yashima A., Sawada K. and Sato A., Simulation of snow avalanche model test using computational fluid dynamics, *Annals of Glaciology*, pp.57-64, Vol.52, No.58, pp.57-64, August 2011.
- 7) 山口裕矢, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 小田憲一, 上石勲: 非ニュートン流体モデルを用いた雪崩の3次元非構造有限要素解析, *日本計算工学会論文集*, Vol.2017, p.20170011, 2017.
- 8) 上石勲, 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), http://www.bosai.go.jp/saigai/2017/pdf/20170410_01.pdf(2018.2.25閲覧).

第 5 章

低気圧性の降雪を起因とした雪崩にも対応可能な積雪変質 モデルの開発

低気圧性の降雪を起因とした雪崩にも対応可能な積雪変質モデルの開発 Development of numerical snowpack model to predict avalanches induced by weak layer of cyclonic precipitation particles

平島 寛行¹⁾, 山口 悟¹⁾
H. Hirashima¹⁾, S. Yamaguchi¹⁾

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*

Abstract: The numerical snowpack model SNOWPACK was applied to predict avalanches released at Nasu on 27 March 2017. The SNOWPACK simulation showed unstable conditions of the snowpack. However, weak layer was not reproduced in the precipitation particle layer but shown near the interface between old and new snow layers, different from observed results. The purpose of this study is to develop the model, which can predict avalanches induced by weak layer composed of cyclonic precipitation particles. In this study, different algorithms to calculate new snow density, viscosity coefficient, and shear strength depending on precipitation particle types were implemented as an attempt. Parameterized SNOWPACK model showed the trend of smaller strength at the layer of non-rimed precipitation particles. However, it also showed accurate estimation of stability index in weak layer was still difficult. Parameterization of metamorphism for various precipitation particles based on experimental and observational data are necessary to predict avalanches induced by cyclonic precipitation particles.

Key words: Avalanche prediction, numerical snowpack model, precipitation particle types

1 はじめに

2017年3月27日に栃木県那須郡那須町の山岳地で発生した雪崩は、8名の犠牲者を出す大きな災害となった。この雪崩は、3月26日から27日にかけて南岸低気圧の接近・通過によって降り積もった雪が弱層となり、それが崩壊して発生した表層雪崩であったことが調査結果から確認されている。また、このような弱層になりやすい低気圧性の雪は雲粒が付着していない、雪粒子同士の結合が弱い雪であったことが過去の雪崩調査事例より確認されている。中村ら(2018)はこのような雪崩の発生を予測することを目的に「低気圧性降雪による表層雪崩危険度予測システム」を構築している。これは低気圧接近時における気温や降水量、風の条件から弱層になりやすい雪が降っていたかを判断するとともに、その低気圧から降る累積降雪量を見積もることで雪崩発生危険度を予測する方法である。計算負荷が小さいため短時間で広域の危険度が予測可能であるが、積雪安定度の見積もりや雪の安定化の予測等、より高精度な予測にむけた細かいプロセスは考慮されていない。

一方、防災科学技術研究所(以下、防災科研)では、詳細な積雪の層構造を計算する積雪変質モデル(SNOWPACK)を用いて雪崩の発生予測を進めてきた(平島, 2014)。SNOWPACKは積雪の詳細な層構造の情報を計算することで、しもざらめ雪等、積雪の変質に関わる弱層に起因した雪崩発生の危険度の予測が可能なモデルである。しかしながら、SNOWPACKは降雪結晶の種類による違いが組み込まれていないため、現状では那須の雪崩のような低気圧性の降雪を起因とした雪崩の発生予測は困難である。

本研究は、双方のモデルの長所を組み合わせることにより、SNOWPACKを用いて低気圧性の降雪に起因した雪崩の予測を可能にすることを目的としている。本報告では、現状の積雪変質モデルが今回の雪崩を予測可能であったか、また試みた改良と今後必要と思われる実験、観測について報告する。

2 現行の SNOWPACK を用いた計算

2.1 那須の雪崩への SNOWPACK の適用

積雪変質モデル SNOWPACK は、スイス連邦雪・雪崩研究所が開発した、気象情報を入力して積雪の層構造を計算するモデルである。大気-雪面間の熱交換や積雪中の熱伝導、圧密過程、水分移動等を計算することで積雪中の温度や密度、含水率のプロファイルを計算することができる(図 1)。それらの結果をもとに雪質やせん断強度、積雪安定度を計算して雪崩の発生予測に応用している。一般的に積雪安定度が 1.5 以下になると雪崩が発生しやすいと言われているが、SNOWPACK の計算結果と表層雪崩の発生事例を比較した結果(平島ら, 2006; 平島ら, 2007; 阿部・平島, 2015)では、多くの表層雪崩は積雪安定度が 2 以下と計算された時に発生していたことが確認されている。

SNOWPACK で入力する気象データは気温、湿度、風向、風速、日射量、長波放射、降水量または積雪深である。降雪量を決定する際には、降水量と積雪深のどちらから見積もるか選択することができ、計算対象地点付近で積雪深が観測されている場合は積雪深を、離れている場合は降水量を入力する。那須岳周辺においては、入力に有効な気象データが観測されているのは下記の 3 地点である。図 2 にそれぞれの位置関係を示す。

- ・ 那須アメダス (標高 751m), 観測項目: 気温、風速、風向、日照時間、降水量、積雪深
- ・ 大丸 (標高 1268m), 観測項目: 気温、積雪深
- ・ ロープウェイ (標高 1439m), 観測項目: 降水量

那須のアメダスで観測されているデータを用いて、日照時間から日射量や長波放射量を推定することで SNOWPACK に必要な入力データを作成して計算することが可能である。一方で、那須のアメダスは雪崩の発生した地点より 600m ほど低いため、より近い場所に積雪深のデータがある場合はそれを使うことが望ましい。そのような場所として、大丸で積雪深が観測されていたが、積雪深の観測値が雪崩発生時の 3 月 27 日 8 時の時点で 40cm 程度であり、雪崩発生地点の積雪深を反映していないと考えられる。そのため、本計算では那須のアメダスのデータのみから入力データを作成し、降水量を降雪量の見積もりに用いた。那須岳の雪崩発生地点との標高差を考慮するため、100m あたり 0.65℃の遞減率を与えて気温を補正して入力データを作成し、計算を行った。



図 1 SNOWPACK の概略図



図 2 気象観測点の位置関係

2.2 計算結果

標高をアメダス地点の 750m、雪崩発生地点の 1350m、山頂の 1750m、それぞれの標高における SNOWPACK の計算結果として、雪崩発生前後の積雪安定度を図 3 に示す。標高 750m で計算した結果では、アメダスで観測された積雪深と同様に 3 月 26 日時点では雪はなく、27 日の降雪により 30cm 程度の雪が積もっていた。一方、1350m 及び 1750m の標高では降雪前からそれぞれ 50cm 及び 90cm ほどの積雪が存在していたと計算されていた。その上で、30cm 程の降雪があり、古い雪と新しい雪の境界付近で積雪が不安定になったと計算された。

本計算の結果から、積雪が不安定になった傾向はみられたものの、調査で確認された新雪層における弱層は見られなかった。これは現在の SNOWPACK では降雪結晶の種類による積雪の

強度への影響が考慮されていないためである。そのため、現行の SNOWPACK では低気圧性の降雪結晶を起源とした弱層の再現や、それによる雪崩の発生には対応しておらず、そのような雪崩の発生予測を行うには改良が必要とされる。

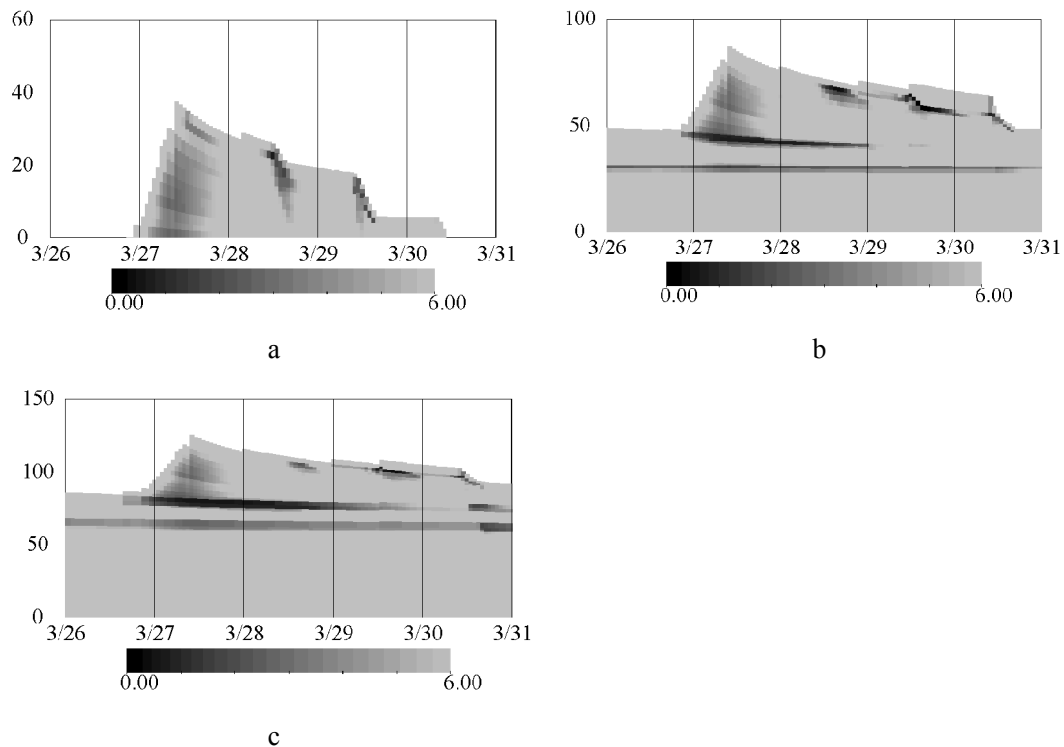


図3 那須における標高別の SNOWPACK で計算された積雪安定度。a: 750m, b: 1350m, c: 1750m

3 低気圧性の降雪を起因とした雪崩にも対応可能な積雪変質モデルの開発

3.1 降雪種に関する情報の導入

低気圧性の降雪結晶のような、弱層になりやすい降雪の影響を考慮するためには、降雪結晶の種類(降雪種)の情報を入力データとして取り込み、弱層になりやすい降雪種の層がその周囲よりせん断強度が小さくなる傾向を再現する必要がある。弱層は密度が周囲より低い、密度が同じでも雪粒子同士の結合が弱く、そのためせん断強度が周囲より小さい。したがって、降雪種に起因した弱層による雪崩の予測を可能にするためには、初期密度、圧縮粘性係数、及び密度とせん断強度の関係式を降雪種ごとに明らかにしていく必要がある。

SNOWPACK では降雪種に関する情報は入力データとして扱われていないため、まずそれを組み込むための改良が必要がある。ここで、降雪種の影響を組み込む方法としては次の2つのアプローチがある。

- 降雪種の情報を特定のパラメータとして入力し、その値を保存しつつ降雪種の値によって異なる圧縮粘性係数やせん断強度の式を与えて密度及び強度を計算する。
- 降雪種によって異なる物理パラメータ(例えば比表面積)を組み込み、その変化を計算するとともにそれに依存した圧縮粘性係数や強度の式を与える。

a の手法は降雪種ごとに測定した経験式を取り込みやすいが、物理的根拠に乏しいため、測定された時の条件に左右されやすい。一方、b の手法は物理特性を考慮するため汎用性の高いモデルになることが期待できるが、多くの観測や実験が必要となるため開発に多くの時間を要

する。そのため、短期的には a の手法、長期的には b の手法で進めるのが望ましく、本報告内では、a の手法を用いて新雪中の不安定な層の再現を試みた。

3.2 降雪種別の新雪密度及び圧縮粘性係数

降雪種別の密度や圧縮粘性係数の違いに関する過去の研究として、梶川ら、後藤らにより行われてきた例がある(梶川ら, 2004; 後藤ら, 2006; 梶川ら, 2006)。そこで、それらを応用して梶川ら(2004)の式を新雪密度の値に、後藤ら(2006)及び梶川ら(2006)の式を圧縮粘性係数の計算式に組み込んだ。新雪密度に関する式は下記のとおり。

$$\bullet \text{ 樹枝 } \rho = 23.4 + 37.5R + 7.32v + 0.579T \quad (1)$$

$$\bullet \text{ 雲粒付樹枝 } \rho = 41.2 + 8.26R + 5.16v + 0.422T \quad (2)$$

$$\bullet \text{ 立体樹枝 } \rho = 13.3 + 53.9R + 6.54v \quad (3)$$

$$\bullet \text{ 雲粒付立体樹枝 } \rho = 67.5 + 23.4R - 1.29v + 3.65T \quad (4)$$

ここで、 ρ は密度(kg m^{-3})、 R は降雪強度(mm h^{-1})、 v は 1m 高の風速(m s^{-1})、 T は気温($^{\circ}\text{C}$)を表す。また、圧縮粘性係数 η (Pa s)については下記の式を用いて異なるパラメータを与えることで降雪種の違いを反映している。

$$\eta = C_1 \rho^a \quad (5)$$

このパラメータとなる C_1 及び a に関しては、下記の値が得られている。立体樹枝に関しては後藤ら(2006)で定式化されていないが、梶川ら(2006)の式で代用することが可能である。

樹枝 $C_1=15.4$, $a=3.39$ (後藤ら、2006)

雲粒付樹枝 $C_1=0.0682$, $a=4.56$ (後藤ら、2006)

立体樹枝 $C_1=0.048$, $a=4.64$ (梶川ら、2006)

雲粒付立体樹枝 $C_1=23.2$, $a=3.26$ (後藤ら、2006)

本計算では、この違いが与える影響を確認するために、3月26日21時から3月27日2時までの降雪を樹枝、それ以外の期間に降った雪を雲粒つき立体樹枝として密度及び安定度の計算を試みた。標高 1350m で計算した結果を図 4 に示す。

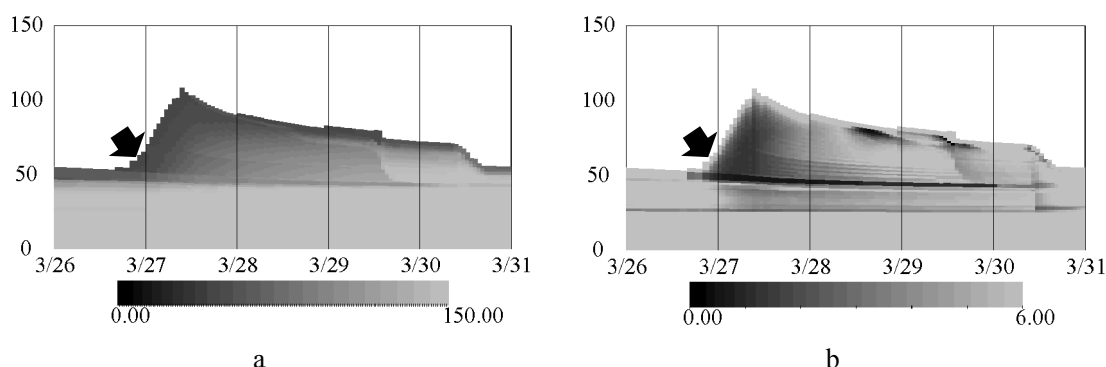


図 4 梶川ら、後藤らの式を組み込んで異なる降雪種の影響を考慮した標高 1350m における計算結果。矢印が樹枝の層を示す。 a: 密度、b: 積雪安定度

樹枝として与えられた層は、他の層と同じ条件で与えられた場合に比べ、雪崩発生時には約 5% 密度が小さくなる計算結果となった。また、それによりその層における積雪安定度は他の新雪層より約 2 割小さく計算された。このようにせん断強度が若干小さくなる傾向はみられたものの、実測で見られたような弱層における密度や硬度の大きな差は再現されなかった。

3.3 密度とせん断強度の関係

現在のところ、降雪種ごとの密度とせん断強度関係の違いはモデル化されていない。現状で参考になる情報としては、雲粒なしの降雪結晶の安息角が $42^{\circ} \sim 45^{\circ}$ と、雲粒付きの降雪結晶の安息角(60° 以上)と比べ小さいこと、またこの安息角はしもづらめ雪で測定された 44° に近いといった測定結果がある。そこで、雲粒なし降雪結晶としもづらめ雪が同じぐらい粒子同士の結合が弱いと仮定し、しもづらめ雪の密度とせん断強度の式を用いて積雪安定度を計算した(図5)。しもづらめ雪のせん断強度を雲粒なし降雪結晶に適用した場合、その層における積雪安定度は3月27日午前9時時点で0.2まで低下し、極端に不安定な値になるとともに、不安定な状態が長時間続いた。今回用いた代替のせん断強度推定手法では正確な危険度の予測が困難であることが示された。

今後は、橋本ら(2018)が行っているような降雪種の予測のモデル化や、Ishizaka et al. (2016)の新雪密度をとりこんだ改良を進める予定である。また、降雪種と比表面積の関係が明らかになり、比表面積に依存した圧密やせん断強度のモデル化が進むことで、降雪種に起因した雪崩の予測精度が向上していくと期待される。

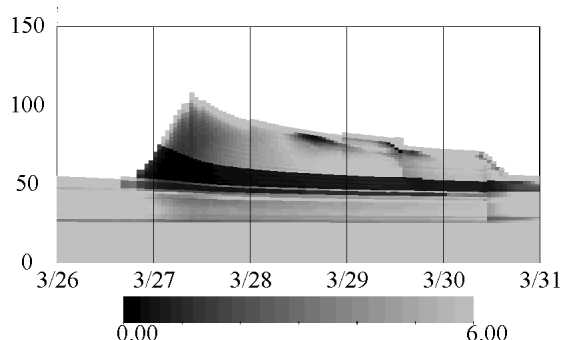


図5 雲粒なし降雪結晶のせん断強度をしもづらめ雪と同じ式で与えた時の積雪安定度

4 雪崩危険度の面的な予測に向けた試み

山岳地における雪崩の発生は変質による弱層の形成の他、吹雪による積雪の再配分も影響するため、雪崩の発生危険度は面的に予測できることが望ましい。雪崩の発生危険度を面的に計算するためには、山岳の領域をメッシュで分けし、吹雪の影響を考慮した上で各々のメッシュでSNOWPACKの計算を行う必要がある。本報告書においては、松四・松浦(2018)が新潟-長野県境の蒲原沢において航空レーザー測量を行った結果から得られた積雪分布を用いて、地形から積雪分布を見積もる手法の開発を試みている。本報告では再配分の見積もり手法は異なるが、ALPINE3D (Lehning et al, 2006)を用いて那須岳周辺における積雪分布の計算を試みた。ALPINE3Dはスイス連邦雪・雪崩研究所で開発された、吹雪の影響を考慮して面的にSNOWPACKを動かすツールである。各々のメッシュで積雪の計算を行うとともに、吹雪によ

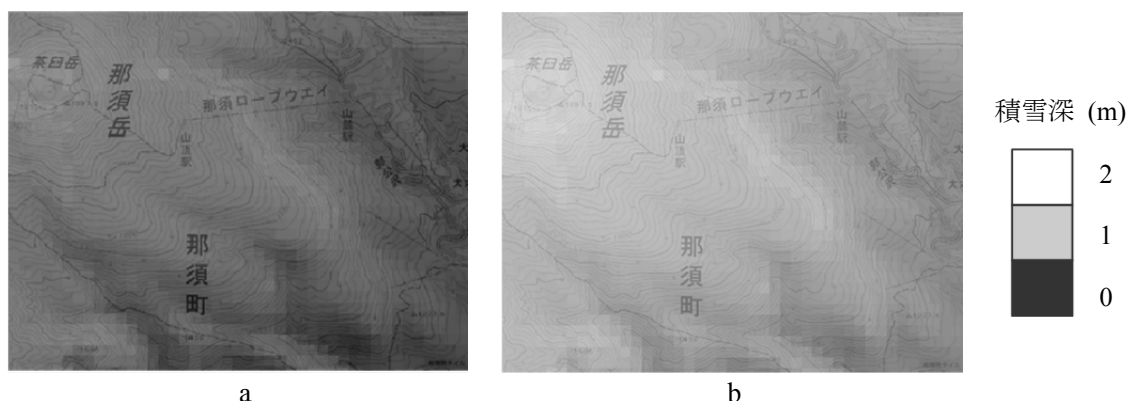


図6 ALPINE3Dを用いて計算した積雪深分布。3月26日から27日にかけての雪により全域で積雪深が増加した。 a: 3月26日正午 b: 3月27日正午

る積雪再配分を同時に計算する。今回は2017年1月20日から3月31日にかけて計算した。図6に3月26日正午及び3月27日正午における積雪分布を示す。降雪前(図6a)は山頂付近で1m前後の雪があり、麓では雪が少なかったこと、また降雪後(図6b)に山頂付近で2m弱、麓でも1m近くまで積雪深が増加していた結果が得られた。今後、ドローンを用いた積雪分布の観測結果等と比較して積雪深の計算結果に関する検証を進めていくとともに、本情報を用いて積雪安定度の面的な分布の計算にもつなげていく予定である。

5 まとめ

低気圧性の降雪結晶に起因した雪崩の発生予測を可能にする事を目的に、降雪種の影響を考慮した積雪変質モデルの開発に着手した。降雪種の情報を入力として与えられるように改良し、文献や最近のデータを用いて降雪種ごとに異なる新雪密度、圧縮粘性係数及びせん断強度を計算するアルゴリズムを組み込むことで、現在の知識で可能な範囲で降雪結晶の弱層が再現可能か試みた。雲粒のない降雪結晶の層は上下の層とくらべて崩れやすい層として計算される傾向が定性的には再現されたものの、弱層のせん断強度を正しく再現するのは現時点では困難であった。今後、降雪種ごとの変質メカニズムやそれらのせん断強度のモデル化の研究が進むことで、本研究で対象としたような雪崩の発生予測が可能になっていくものと考えられる。

また、モデルを用いた面的な危険度の予測に向けて、ALPINE3Dによる面的な積雪の計算を試みた。今後、積雪深分布の実測値を用いた検証や積雪安定度の面分布の解析等を進めていく予定である。

引用文献

阿部修・平島寛行, 2015: しもぎらめ雪の成長過程を組み込んだ雪崩予測システムの検証. 雪氷, 77 巻 1 号, 37-45.

後藤 博・梶川正弘・菊地勝弘・猿渡琢, 2006: 新積雪の圧縮粘性率に関する実験的研究. 雪氷, 68 巻, 3 号, 191-198.

橋本明弘・本吉弘岐・山口悟・中井専人, 2018: 降雪による弱層形成に関する数値気象モデルを用いた再現実験. 本報告書.

平島寛行・西村浩一・山口悟・佐藤篤司・M. Lehning, 2006: 雪崩発生予測モデルで計算した雪崩災害発生時の積雪安定度. 寒地技術論文・報告集, 22, 26-30.

平島寛行・上石勲・佐藤篤司・松浦利之・町田敬・M. Lehning, 2007: 入力気象データが雪崩発生予測精度に与える影響—国道 17 号における検証—. 寒地技術論文・報告集, 23, 192-197.

平島寛行, 2014: 積雪変質モデルによる雪崩発生予測の現状と課題. 雪氷, 76 巻 6 号, 411-419.

M. Ishizaka, H. Motoyoshi, S. Yamaguchi, S. Nakai, T. Shiina, and K. Muramoto, 2016: Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications. The Cryosphere, 10, 2831-2845.

梶川正弘・後藤博・金谷晃誠・菊地勝弘, 2004: 気象要素を考慮した新積雪密度の推定式. 雪氷, 66 巻, 5 号, 561-565.

梶川正弘・佐藤昇・遊馬芳雄・菊地勝弘, 2006: 北極域における新積雪の密度と圧縮粘性率の特徴. 雪氷, 68 巻, 4 号, 277-285.

松四雄騎・松浦純生, 2018: 風および重力による降雪再分配を考慮した積雪層厚の空間分布予測と検証. 本報告書.

中村一樹・根本征樹・本吉弘岐, 2018: 低気圧性降雪による表層雪崩危険度予測の試み. 本報告書

風および重力による降雪再分配を考慮した積雪層厚の空間分布予測と検証 Modeling snow redistribution by wind and gravity: prediction and validation of spatial snow coverage in a mountainous terrain

松四 雄騎¹⁾, 松浦 純生¹⁾
Y. Matsushi¹⁾, S. Matsuura¹⁾

¹⁾京都大学防災研究所 地盤災害研究部門
¹⁾Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Abstract: Prediction of potential sites of snow avalanche requires evaluation of spatial distribution of snow cover in mountainous hillslopes. Thickness of snowpack depends on redelivery of snowfall through suspension and saltation of snow particles by wind, as well as gravitational creep along the snow surface. This study attempted to model the processes of snow redistribution on hillslopes and calculated the spatial snow accumulation using a geographic information system. Suspension and saltation of snow were modelled and calculated based on wind velocity and direction, and aspects and gradient of hillslopes. Creep of snow particles was evaluated according to the budget of gravitational movement as a function of hillslope gradient. We tested the model at a observation site of Gamahara-zawa, central Japan. The model roughly explained the actual snow thickness in the watershed measured by airborne laser scanning. A more precise prediction needs a further search for the optimal set of parameters, which should be estimated from an in-situ observation of snow transport and settlement at varying topographic and meteo-hydrological conditions.

Key words: saltation, creep, geographic information system, airborne laser scanning

1 はじめに

山間地における雪崩の発生場を予測し、減災を図るうえで、斜面上の積雪層厚の空間分布を予測することは極めて重要である。一般に、雪崩は、積雪層内の特定層位のせん断破壊を起点とする上載積雪の崩落・流動現象であり、発生源の拡がり（点発生あるいは面発生）、すべり面形成位置（表層破壊あるいは全層破壊）、積雪層の水分含有状態（乾雪あるいは湿雪）などによって分類される。このうち、面発生型表層雪崩は、積雪表面あるいは積雪層内での霜形成のような変質や、粗大粒径で乾いた雪の供給により形成される弱層がすべり面となる。このタイプの雪崩は前兆が少なく突発的なうえ、面的拡がりをもつ破壊が瞬時に伝搬し、大量のデブリを生じることが多いので、弱層の存在や上載層の厚みを予期しておくことが重要である。また、積雪底面をすべり面とする全層雪崩は、融雪期に特定の斜面で繰り返し発生することが多く、ある程度の前兆現象がみられるために警戒が可能である。しかし、その運動様態は積雪層の厚みと性状および底面の水理状態に依存して正確な予測は難しい。いずれにせよ、今日では山地斜面の傾斜は、細密デジタル地形情報の解析によって得られるようになっているため、任意場所・任意時点での積雪層の厚みおよびその構造を予測することが雪崩災害の被害軽減につながる。

山地斜面における降雪は、風および重力によって再分配される。そのため、風向と風速、および地形条件により、積雪層厚は空間変化に富む（図-1）。特に風衝斜面では、アブレーションによる削剥が卓越し、風背斜面では風速通減と渦形成により堆積が生じる。こうした風による再分配は、稜線付近でより顕著に発生する。風が雪粒子を輸送するプロセスは、地表風速と粒径に依存して異なる（図-2）。小さな粒径の雪は、風速が十分に大きい場合、浮遊運動し、長距離を移動する。相対的に粒径の大きな雪は、風により浮上して風下側へ着地するような跳動により輸送される。一方、斜面の勾配が大きい場所では、雪粒子は重力に従って積雪表面を下方へと転動し、凹地へと集積する（図-1, 2）。このように山間地における積雪層は、一般的には、風背斜面の尾根付近で厚く、また凹型収束斜面で厚い。これらの場において斜面の勾配も大きいときは、特に雪崩に対する警戒が必要となる。

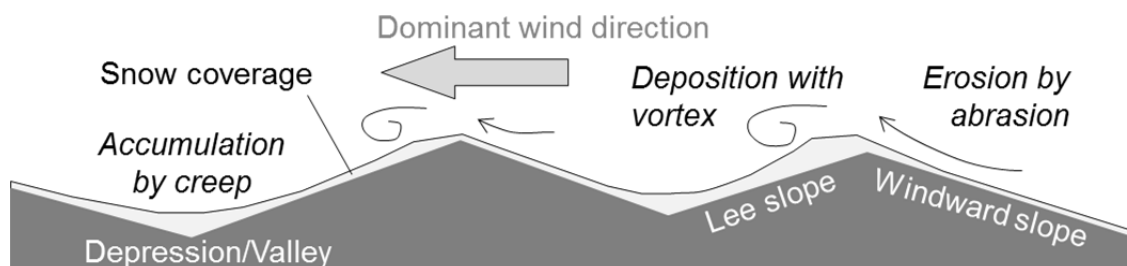


図-1 山地斜面における積雪層厚の空間分布の概念.

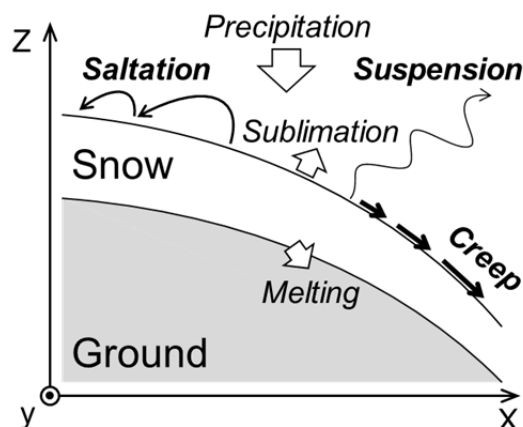


図-2 風および重力による積雪の移動と収支に影響するその他の過程

積雪層の空間分布を予測するうえでは、風および重力による輸送の過程をモデル化し、地形条件が、それらの過程にどのような影響をもつか計算可能な形にする必要がある。前述のように雪の再分配には、いくつかの様式が存在するが（図-2）、実用性を考えると、地表近傍大気の運動とそれへの雪粒子の取り込み・輸送・堆積といった素過程を全て計算するのは全く現実的ではない。また、観測点における気象観測データを入力として、空間的な計算が実行できることが望ましい。そこで、各輸送過程を想定した形ではあるものの、ある程度経験的に定式化された関数を結合させて計算するアプローチが良いように思われる。本研究では、そのような半経験的プロセスベースモデルを開発する。具体的な計算法はのちに述べることにするが、これにより、入力としての降雪を、風・地形・積雪層厚をパラメータとする関数により、地理情報システムを用いてデジタル地形モデル上に再分配する。得られた結果を、現実の積雪層厚の空間分布と定性的に比較することで、計算の妥当性を検証することにした。

2 検討対象地

2.1 場所と地形条件

モデルを用いた計算が可能となる条件が整っており、かつ積雪層の空間分布データが得られる場所として、新潟—長野県境に位置する蒲原沢を検討対象とした（図-3）。蒲原沢は、標高 400-1600 m の範囲にわたる大起伏な山岳流域である。流域の斜面は 30-40° の急勾配を呈し、地すべりやガリーなどにより起伏に富む。

2.2 積雪の空間分布データ

この場所では、無積雪落葉期（2004 年 11 月 23 日）に航空レーザー測量が行われており、1 m メッシュのデジタル地形情報が得られている（図-3A）。また、最大積雪期の 2 月最後半（2003 年 2 月 26 日）には雪面の形状を把握するための航空レーザー測量が行われており、この 2 時期のデータの差分をとることによって、積雪層厚の空間分布が得られている（図-3B）。

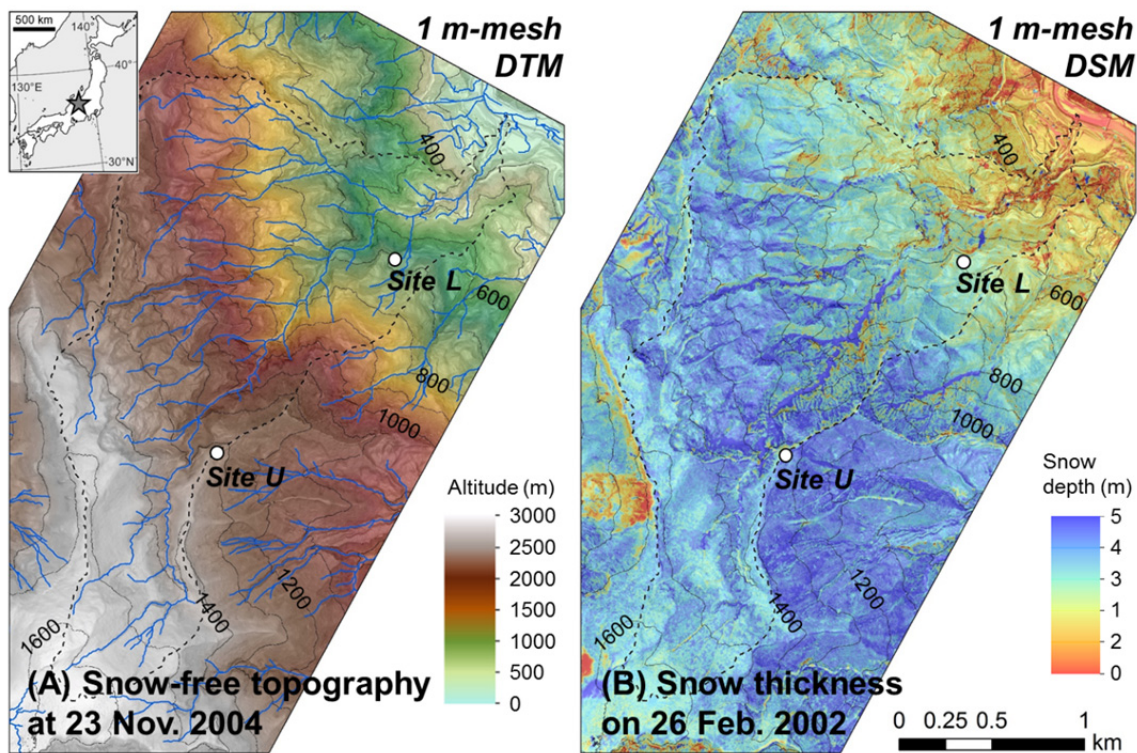


図-3 検討対象地域とした蒲原沢の地形と積雪特性.

積雪層厚は標高に依存して空間変化していることがみてとれる．標高 100 m おきに積雪データを抽出し，標高と積雪層厚の関係をプロットすると，図-4 のような傾向が得られる．積雪深は，標高 300 m から 1000 m の区間では線型的に増大し，4 m 程度にまで達する．しかし，標高 1100 m 以上では，ほぼ横ばいになり，1400 m 以上ではむしろ高標高地ほど減少する傾向がみてとれる．一般に，標高が高くなるにつれ，気温低下に伴う飽和水蒸気量の減少と凝結量の増大により，降雪量は増大すると考えられる．しかし，線型的増大を示す区間での，標高と積雪量の増分の傾きは 4.4×10^{-3} である．これは明らかに，単純な降雪量増加の考え方では説明しにくい大きな増大傾向といえる．この全体として非線形的な積雪分布は，風背斜面の稜線近傍での風衝斜面側からの尾根を越えた雪の輸送と，斜面上方からの重力による雪の再配分が少なくなることの両方を反映したものと考えられることができるだろう．

その他の地形特性と積雪層厚の関係をみてみよう．まず斜面方位に関しては，後述するように卓越風向である西風の風背側となる東向き斜面で，積雪層厚が大きいことが期待されるわけであるが，標高の影響の陰に隠れてはっきりした傾向はみえない（図-5A）．むしろ，東向き斜面で積雪層厚が小さい傾向があるようにもみえる．次に，斜面傾斜角と積雪層厚では，解釈可能な傾向があるようにみえる（図-5B）．傾斜 30° 以下では一定の層厚を保っている場所が多いが，傾斜 30° 以上では，削剥の影響がみられ，積雪層厚がゼロとなる場所が多くなる．そして傾斜が 50° 以上の場所では，厚い積雪に覆われるケースが減少する．斜面の地形曲率との比較では，曲率が正の値をとる凸部よりも，曲率が負の値をとる凹地で積雪層厚が大きい傾向にある（図-5C）．こうした地形と積雪との関係は，いずれも風や重力による雪の再分配と関係すると思われるが，どの地形パラメータをとっても単純には積雪層厚が予測できないことに注目すべきである．このことは，風向・風速と地形とが相互作用し，複雑な条件で，積雪層厚が規定されていることを意味しており，本研究で追及するような再分配過程を考慮したモデリングの必要性を示している．

2.3 気象観測データ

蒲原沢では，図 3 に示す L 地点で通年での気象観測が実施されている．積雪層厚の空間分布の航空レーザー測量を実施した 2002-2003 年の冬季のデータを図-6 に示す．この地域では西風が卓越し，1 時間平均風速はおおむね 5 m/s 以下である．このシーズンでは 2002/12/9 以降に

根雪の蓄積が始まり、12/25以降は融雪浸透水量がほぼ一定となって積雪層が安定的に発達し、翌3月初旬をピークに、4/29に消雪している。本研究では、積雪の生じはじめる12/5以降を解析の対象とした。

なお、航空レーザー測量の取得された2003/2/26時点での積雪層厚を、地点標高を用いて図4にプロットすると、地点Lについては、おおよそ平均的な厚みを持つ場所での計測となっていることがわかる。一方、もう一つ、高標高部（地点U）でも積雪深の実測データがあるが、これは、地点標高の平均よりも大幅に低い値となっている（図-4）。この地点は稜線上に位置しており、相対的には削剥の卓越する場であったことがわかる。

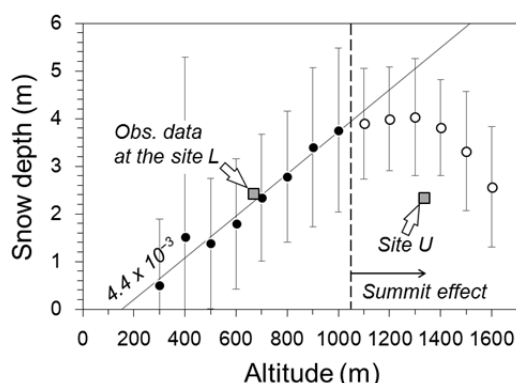


図-4 蒲原沢における標高と積雪層厚の関係。
エラーバーは1標準偏差。

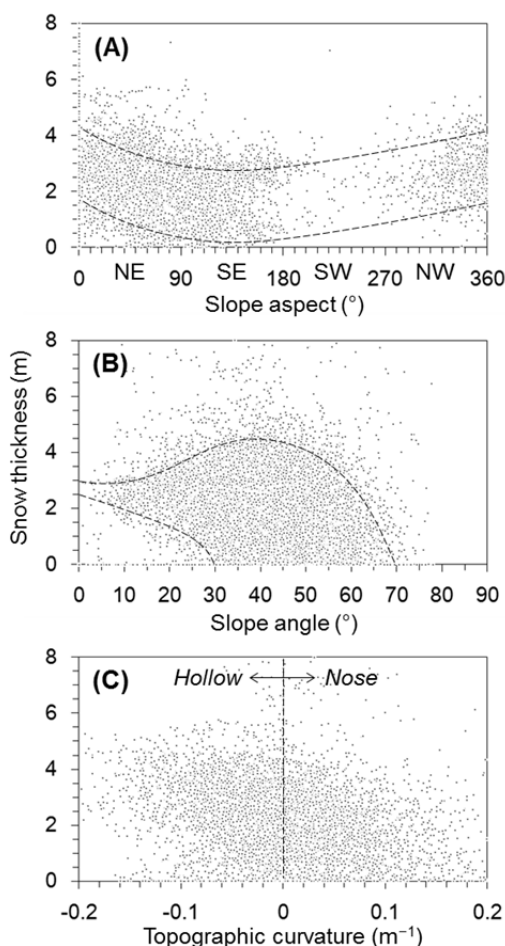


図-5 積雪層厚と地形特性の関係

3 モデル化と計算および検証

3.1 風による降雪再分配のモデル化

雪が風によって輸送されるとき、その輸送量は風速の3乗にほぼ比例することが知られているが、山間地のように給源と堆積域が輸送経路に沿って繰り返し出現する場での、正味の削剥と堆積量の推定は、難しい問題となる。ここでは、風が斜面表面にもたらした積分的な仕事量として、斜面の傾斜ベクトルと風向ベクトルの内積を考えることとする。この指標は風衝斜面で正の値を、風背斜面で負の値をとる。この指標に比例するものとしてあらわされうる量は、跳動によって輸送される雪の削剥と堆積である。

ただし、方向的には風衝斜面に相当しても、谷底では、風が当たらないために堆積がより促進され、稜線付近では逆に削剥が強化されるはずである。これを定量化するため、吹送距離を半径とする円窓領域を用いた地形の近傍解析により、 $-\pi$ （凹部）から $+\pi$ （凸部）の値をとる地表開度を定義し、双曲線正接関数を用いて、削剥強化指数（0~2）と堆積強化指数（0~2）を定義し、計算した。この指数は、平板斜面で1となり、その場合は削剥・堆積のいずれも強

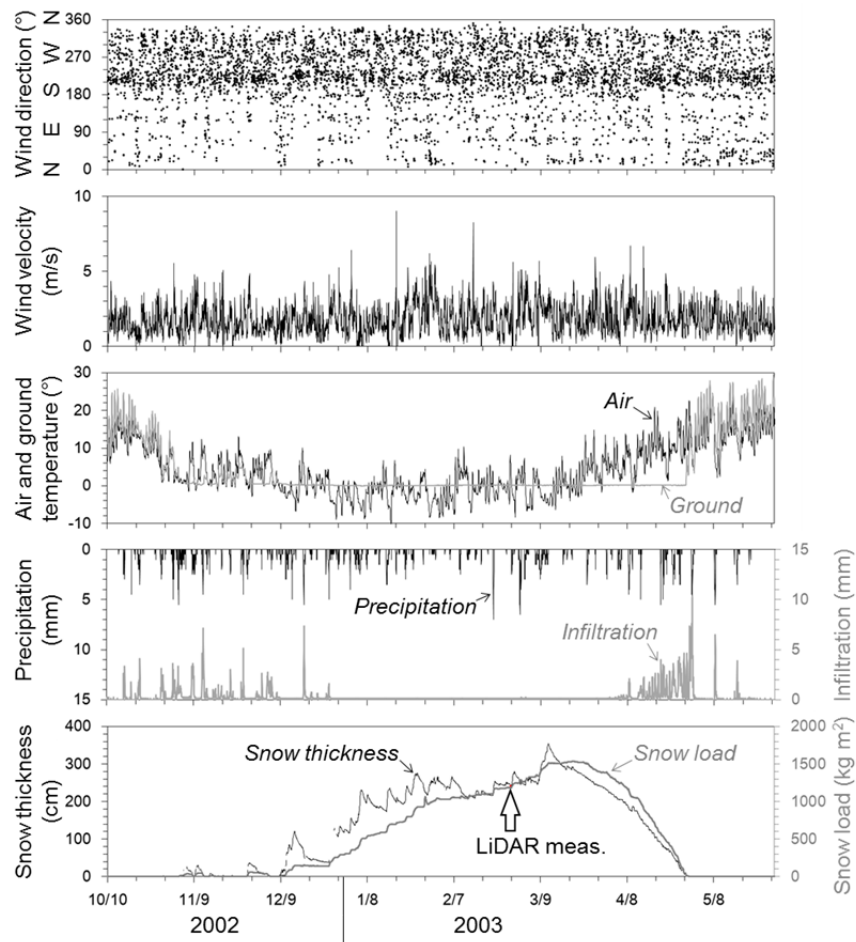


図-6 蒲原沢における 2002-2003 年冬季の気象観測データ

調されない。周囲の開けた尾根では、削剥が最大 2 倍強調され、周囲を斜面に囲まれた谷底では、堆積が最大 2 倍強調される。ここでは吹送距離は、積雪分布の傾向から 50 m とした。

風によって輸送されてくる雪は、当然系外からも供給されるはずであるから、この過程については、計算領域内での物質収支は成立せずともよい。本研究では、最終的に、風向・風速・斜面方位・斜面勾配・地形開度とそれらにかかる係数により、風による降雪再分配を考えることになる。浮遊過程による雪の輸送は明示的には組み込まれていないが、ここで設定された地形効果の中に含まれるものとみなされる。

3.2 重力による降雪再分配のモデル化

次に、重力による降雪再分配を考える。降雪直後の新雪は低密度で軟らかく、急勾配斜面では重力に従って斜面下方に匍行するものと考えられる。この過程は、ある集水域の中で収支が閉じるはずであるので、保存則に従うものとする。雪粒子の輸送量が斜面の勾配に比例するものとして連続の式を立て、地理情報システム上で、セルベースの輸送計算を行った。このとき、移動層の厚みは、その計算サイクルで付加された新雪相当の値とした。この過程は、凹地や谷底への雪の集積および尾根部での緩やかな積雪層の削剥を表現するものである。

3.3 計算結果の例

本研究では、蒲原沢を対象に、気象観測露場で得られた降水量、風向、風速を入力として、デジタル地形モデル上での、降雪再分配を計算した。新雪の密度は 0.2 g/cm^3 とし、12/5 から 2/26 までの時系列データを、風向はベクトル積算により、降雪は算術積算により、12 時間ごとにまとめて入力とした。そのうえで、モデル上での雪の移動性を支配する削剥/堆積係数や拡散係数を変えて計算を行い、実際の積雪分布と比較した。

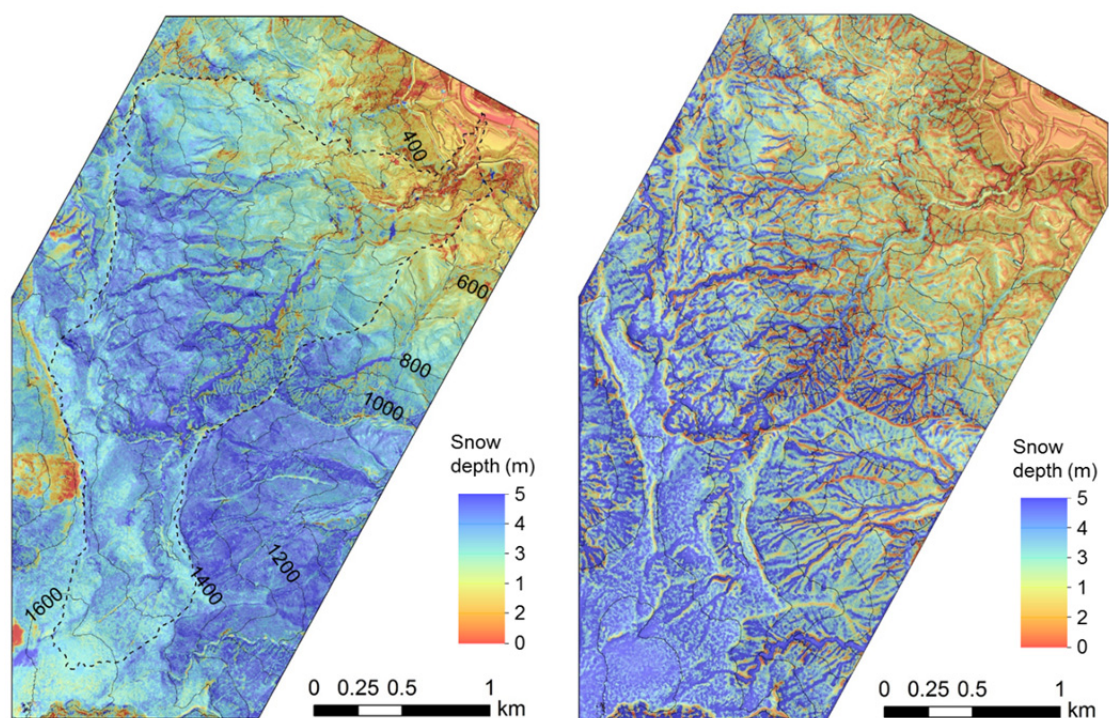


図7 航空レーザー測量された積雪層厚分布（左）と計算結果（右）との比較例

図-7 に計算結果と実測データを比較した例を示す．移動性パラメータを大きく設定すると，尾根部で削剥が進行しすぎたり，凹地部への堆積が過度に生じる．計算は実際の積雪層厚分布の大まかな傾向を再現することがわかった．ただし，完全なパラメータチューニングはしておらず，何をもって妥当な再現といえるかという点も含めて今後の課題となっている．本モデリングによって再現できていない点は多くある．例えば忠実に地形に従って重力性の移動が生じれば，図7右の計算結果のように尾根部で積雪層厚が小さくなるはずであるが，実際は，比較的等厚で尾根を覆っていることが多い．それを再現しようと，移動性を抑えると，凹地での集積が再現されなくなる．これは，現在定数として扱っている移動をつかさどる係数が経時的に変化していることを示唆している．雪粒子の可動性は雪の乾湿にも強く影響を受けているであろう．そうしたパラメータを精緻に推定してゆくことは困難であるが，予測精度を高めるうえでは避けて通れないと考えられる．

4 まとめ

本研究では，雪崩の発生場予測を最終目的として，山間斜面における積雪層厚の空間分布を予測するための半経験的数理モデルを構築した．雪の再分配は，風によるものと，重力によるものとに分けてそれぞれモデル化した．風による再分配は雪粒子の跳動を主たる対象とし，風向・風速による風ベクトルと，斜面方位・斜面勾配による斜面ベクトル，および風の効果の強化/逓減を表現するための地形開度指数から，跳動による削剥/堆積のポテンシャルを定量化した．また重力に従う雪粒子の転動による輸送・集積は，斜面勾配と新雪堆積厚に比例して物質が輸送される拡散的モデルにより計算した．

このモデルを，気象観測データおよび積雪空間分布の得られている，蒲原沢流域に適用して予測計算を行ったところ，全体の傾向は再現されたが，細部の積雪層厚を説明するには至らなかった．異なる気象・地形環境下における積雪層発達過程を調べ，パラメータの値およびモデリングの妥当性をより詳細に検討してゆく必要がある．また，本モデルでは，雪堆積の過程における弱層の形成やその位置を推定することができないため，積雪層の力学的不安定性を評価するには至らなかった．特定の層準がどのような深度に埋没するか，また削剥により失われるかどうか，った鉛直方向への層厚・物性の変化を計算するための項を組み入れていくこともまた残された課題といえる．

第 6 章

山岳域雪崩リアルタイムハザードマップの試作

地形条件・樹林条件からなる雪崩ポテンシャル箇所抽出の検討
Extraction of avalanche potential sites based on
topographical factor and vegetation factor.

阿部 直樹¹⁾, 中村 一樹^{1,2)}, 上石 勲^{1,2)}
N. Abe¹⁾, K. Nakamura^{1,2)}, I. Kamiishi^{1,2)}

¹⁾ 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

¹⁾ *Innovation Center for Meteorological Disaster Mitigation, 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: In order to create avalanche hazard maps for all Japan, we tried to extract avalanche potential sites automatically by factors for topography and vegetation in Mt. Nasu area. The topographic factors are evaluated from the gradient classification from 5 m DEM maintained by the Geographical Survey Institute. For vegetation factors, high resolution satellite image is processed and evaluated from the DSM based on the forest height and coverage.

The evaluation method by combining these two factors was applied to Mt. Nasu area (Tochigi Prefecture), and a place with high avalanche potential was extracted.

Key words: avalanche potential sites, topographical factor, vegetation factor, GIS, satellite image,

1. はじめに

2017年3月27日に栃木県那須町的那須ファミリースキー場近傍で雪崩が発生し、春山登山研修中の高校生と教員が巻き込まれ、8名が死亡するなど甚大な被害が発生した。このような雪崩災害の防止・軽減には、雪崩が発生するポテンシャルが高い箇所をあらかじめ抽出し、雪崩ハザードマップの整備によって対策を講じることや、実際の積雪深に応じた特定の斜面の雪崩発生危険度を知らせるリアルタイムハザードマップの整備など、雪山の状況を捉え広く伝えることが必要である。

一方、雪崩ポテンシャル箇所の抽出には、地形条件ならびに樹林条件の把握が必要となる。一般に地形情報や樹林情報の現況を把握するためには、航空機レーザーによる測量が有効であるが、全国の雪崩ポテンシャル箇所を抽出するために新たに航空機レーザー測量を実施するためには、多大な費用が必要となることから、全国的な雪崩ハザードマップの整備は困難となっている。

そこで、本研究では、比較的安価に整備が可能な衛星画像を用いて、今回の雪崩発生箇所を含む茶臼岳を中心とした100平方キロメートル範囲について雪崩ポテンシャル箇所の抽出を試行し、検討を行った。

2. 解析方法

本研究では、まず地形条件として基盤地図情報の5mメッシュ数値標高モデル(DEM)を利用して、対象範囲の傾斜度を算出した。また、樹林条件として衛星画像による数値表層モデル(DSM)を利用して、対象範囲の植生区分と樹林高さ、植生被覆率を算出した。

次に雪崩が発生するポテンシャルが高い箇所を評価因子により得点設定し、傾斜区分図と樹木高さ別の植生被覆図から、対象エリアの傾斜評価と植生被覆率評価を統合し、雪崩ポテンシャルの高い箇所として評価した。

なお、それぞれの値の抽出と区分図および被覆図の作成には、GIS (Geographic Information System) を用い、10mメッシュ図に評価得点の埋め込み処理をおこなった。

2.1 傾斜区分の算出

那須茶臼岳を中心とした 100 平方キロメートル範囲の数値標高モデル (DEM) 5m メッシュデータの標高値に基づき、GIS を用いて 3×3 メッシュ間の変化率を計算し、各メッシュの傾斜角を算出した。図-1 に GIS を用いて傾斜区分を色分けして地図化した結果を示す。なお、当該範囲の数値標高モデルは、2009 年 6 月 2 日から 2010 年 3 月 20 日までに撮影された成果から作製されたものである。

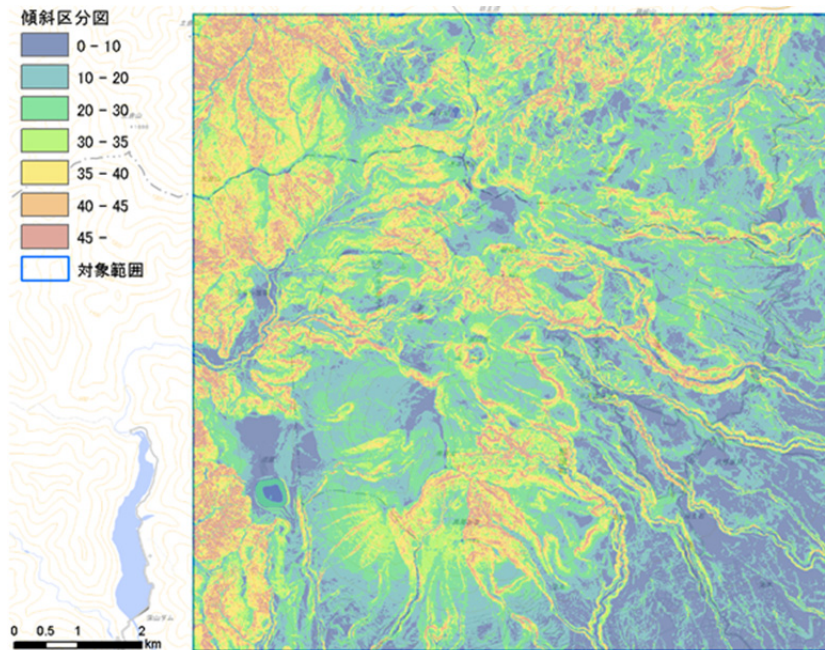


図-1 傾斜区分図

2.2 植生区分と樹林高さの算出

衛星画像による数値表層モデル (DSM) は、米国 Digital Globe 社の World View 衛星等の画像を元に作製された「AW3D 高精細版地形データ」を利用した。AW3D は市販されている衛星数値表層モデルの中でも高精細かつ網羅性に優れており、2m の解像度を有している。なお、今回使用した数値表層モデルの元となった衛星画像は、2014 年 10 月 24 日から 2015 年 12 月 9 日の撮影成果によるものである。

この数値表層モデル (DSM) と前項の数値標高モデル (DEM) との差分をとり、樹木を含む地物の高さ (樹冠高さモデル: DCHM) を作製した (図-2)。DCHM のうち 2m 以上を評価対象の植生とした。また、対象の植生から樹高別に、2m 以上 4m 未満 (低木相当)、4m 以上 8m 未満 (中木相当)、8m 以上 (高木相当) と植生を区分した。

各樹高による植生区分において、処理対象から半径 10m の円内に含まれる植生に該当する面積を算出し、円の面積から割り戻すことで植生の被覆率を算出した (図-3)。図-4 に GIS を用いて樹高区分別の植生被覆率により色分けして地図化した結果を示す。

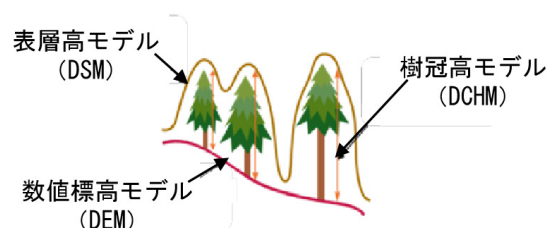


図-2 DCHM の概念図

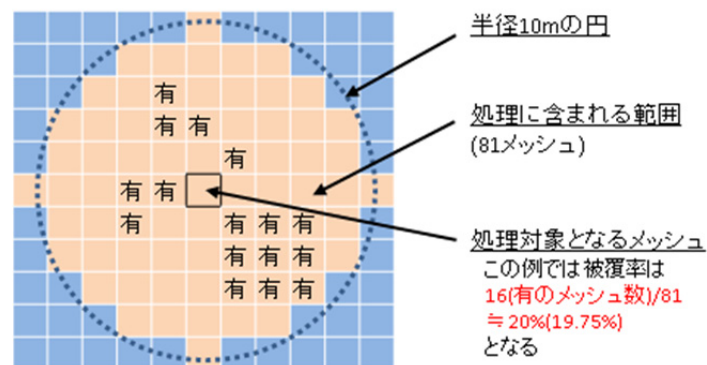


図-3 半径 10m の森林被覆率の算出概念図

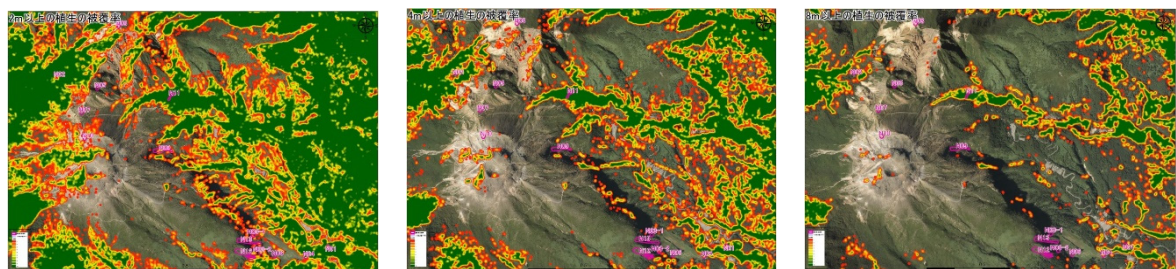


図-4 植生被覆図（左から樹高 2m 以上，4m 以上，8m 以上）

2.3 評価因子別の得点設定

雪崩が発生するポテンシャルが高い箇所を評価因子により得点設定するにあたり，雪崩防災対策調査報告書（建設省，1983）の「危険度分級基準」を参考に評価得点設定を行った（表-1）．それぞれ地形の傾斜度や樹高の高さ，植生の被覆率によって得点化されていることから本得点評価表を参考とした．さらに，傾斜区分評価得点と植生被覆率評価得点を合計した値から総合危険度評価得点表（表-2）を設定し，雪崩ポテンシャルとして危険度を評価することとした．なお，雪崩防災対策調査報告書の「危険度分級基準」の得点は傾斜・植生に加え，積雪深の評価得点を合計して雪崩の危険度を評価しているが，本評価では傾斜と植生の2項目を用いて雪崩のポテンシャルを評価する．

表-1 傾斜区分と植生区分の評価得点表

要因	階級	データとの対応	得点
傾斜	30° 未満	地形データより傾斜度30° 未満の箇所	4
	30° ～40°	地形データより傾斜度30° 以上40° 未満の箇所	7
	40° 以上	地形データより傾斜度40° 以上の箇所	10
植生	裸地、草地、樹高2m未満の灌木、樹冠疎密度20%未満	森林データより樹高2m未満または被覆率20%未満の箇所を抽出	10
	疎密度20%～100%の低木 または疎密度20%～50%の中木	低木条件(森林データより樹高2m以上4m未満かつ被覆率20%以上)または中木条件(森林データより樹高4m以上8m未満かつ被覆率20%以上50%未満)を満たす箇所	9
	疎密度50%～100%の中木 または疎密度20%～50%の高木	中木条件(森林データより樹高4m以上8m未満かつ被覆率50%以上)または高木条件(森林データより樹高8m以上かつ被覆率20%以上50%未満)を満たす箇所	7
	疎密度50%～100%の高木	高木条件(森林データより樹高8m以上かつ被覆率50%以上)を満たす箇所	4

雪崩防災対策調査報告書（第8巻 雪崩対策 建設（1983））

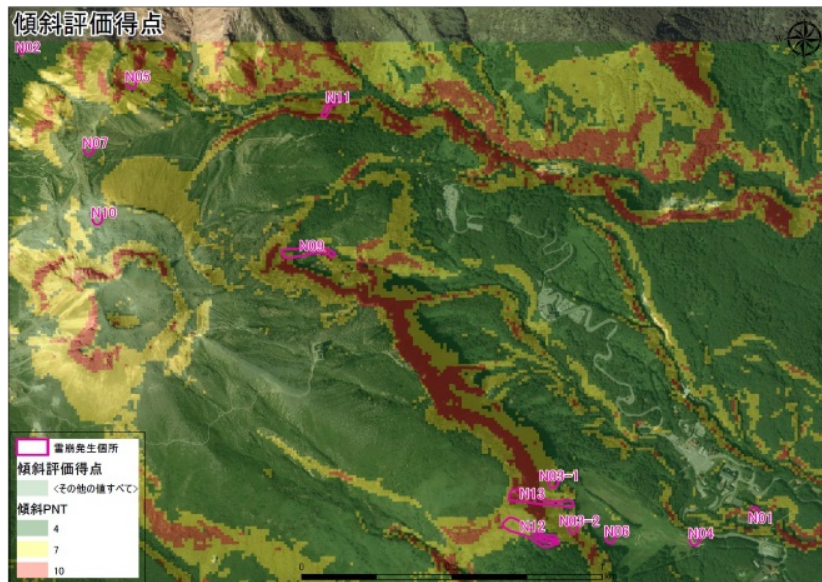
表－2 総合危険度評価得点表

危険度	得点	評価
A	18 以上 20 以下	雪崩発生の起こりやすさが大
B	15 以上 17 以下	雪崩発生の起こりやすさが中
C	13 以上 14 以下	雪崩発生の起こりやすさが小
D	13 未満	雪崩発生の起こりやすさが極めて小

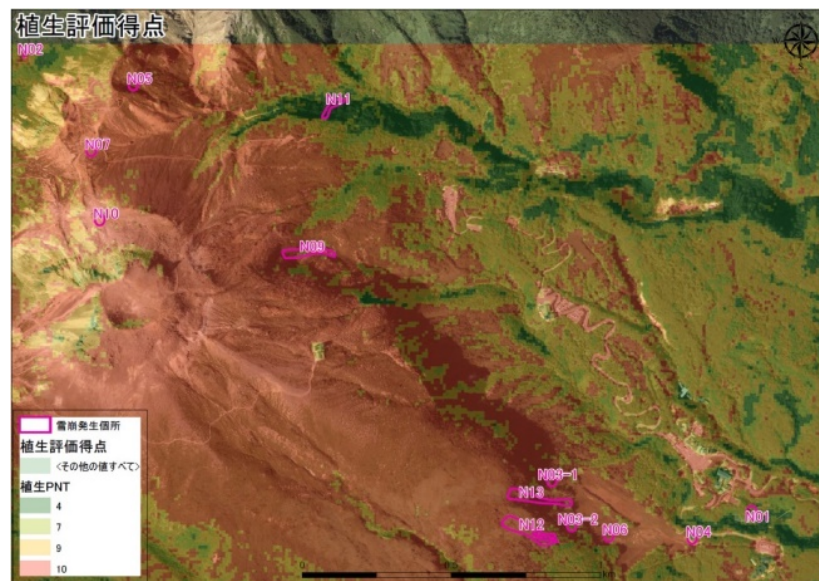
3. 評価結果

3. 1 雪崩ポテンシャル箇所抽出

傾斜区分と植生区分の評価得点表を元に、傾斜区分図と植生被覆図について評価得点による色分類を行った（図－5、図－6）。なお、図－6 の植生被覆率評価図については、樹高 2m, 4m, 8m の被覆図を GIS で空間的に統合し、1 メッシュごとの評価を行うために 10m メッシュ図に評価得点値の埋め込みを行った。

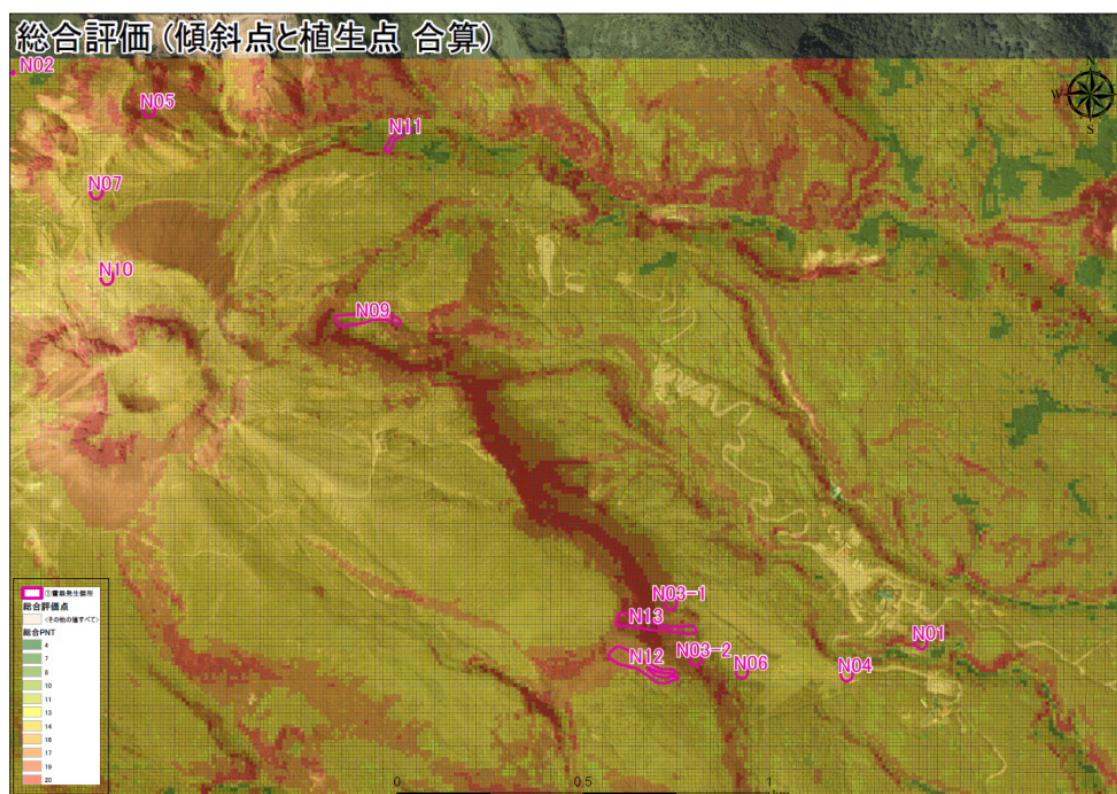


図－5 傾斜区分評価図



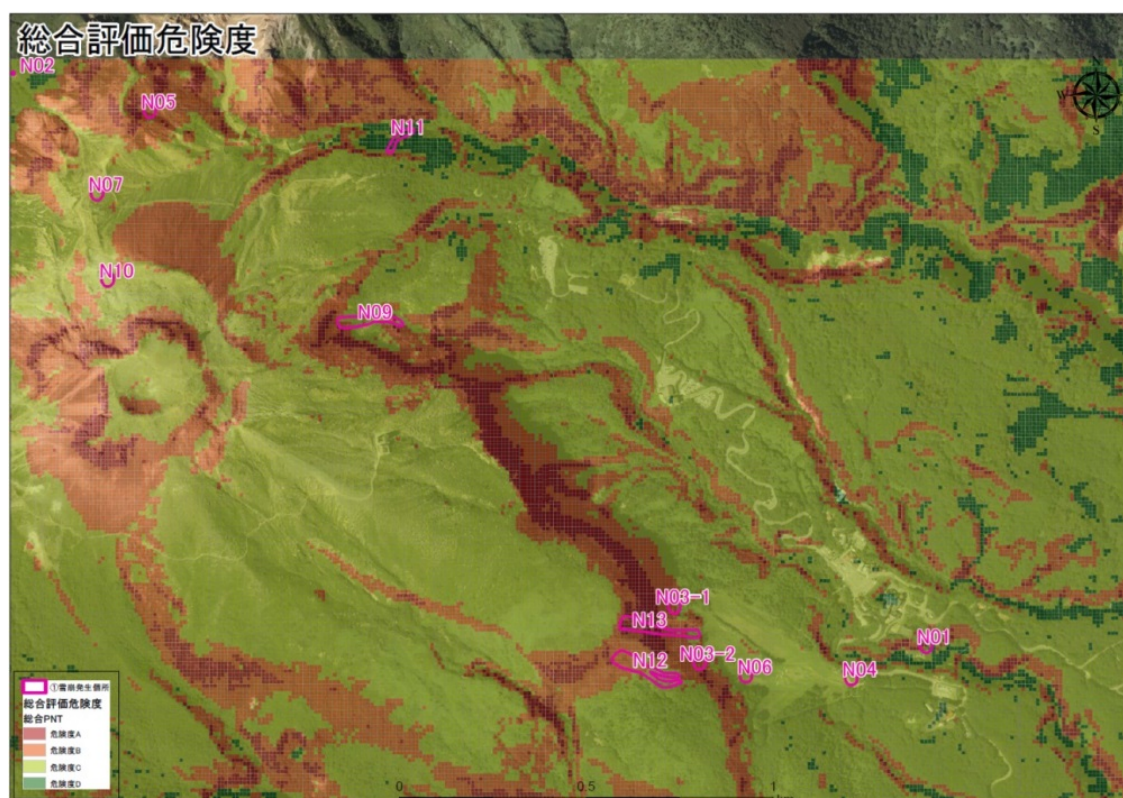
図－6 植生被覆率評価図

次に作成した傾斜評価と植生被覆率評価を統合した（図－7）。



図－7 植生被覆率評価・傾斜評価統合図

統合した傾斜評価結果と植生被覆率評価結果を表－2 の総合危険度得点表に従いランク化し，雪崩ポテンシャル評価図を作成した（図－8）。



図－8 雪崩ポテンシャル評価図

3. 2 雪崩ポテンシャル箇所抽出結果の考察

当該地域における雪崩発生事例と地形情報・植生情報から雪崩の発生ポテンシャルについて整理を実施した（表－3）．雪崩発生箇所の地形（傾斜度）・植生（樹高と植生疎密度）をGISの空間解析機能によりに雪崩発生箇所ごとの比較を行ったところ，傾斜や植生疎密度に関してはほぼ同一の危険度評価結果が得られた．

表－3 雪崩発生箇所別評価結果

番号	発生日	精度	傾斜評価点数	植生被覆評価点数	総合評価点数
N01	1938 年 3 月 7 日	おおよそ	10	10	20
N02	戦前	代表点	4	10	14
N03－1	1969 年 2 月 9 日	明確	7	10	17
N03－2	1969 年 2 月 9 日	明確	7	10	17
N04	1969 年 3 月 5 日	おおよそ	4	10	14
N05	1972 年 4 月 10 日	明確	10	10	20
N06	1973 年 1 月 12 日	明確	4	10	14
N07	1980 年代	おおよそ	4	10	14
N09	2000 年 3 月 27 日	明確	10	10	20
N10	2009 年 4 月 2 日	おおよそ	4	10	14
N11	2009 年 4 月 4 日	明確	4	10	14
N12	2017 年 3 月 27 日	明確	10	10	20
N13	2017 年 3 月 28 日	明確	10	10	20

4. まとめ

本研究では 2017 年 3 月に雪崩が発生した栃木県那須町茶臼岳を中心に，衛星画像の活用による地形・植生要因を指標とした雪崩ポテンシャル箇所の抽出方法を提案した．本研究では，地形の傾斜状況，植生の植生疎密度状況の評価因子としたが，地形条件には発生区の傾斜・斜面形（縦断形状・横断形状・平面形状）・斜面規模・標高・方位があり，植生条件には樹種・樹高・疎密度・配置があることから，今後，評価因子と雪崩発生との相関が明らかにされることで，より多面的な評価による雪崩ポテンシャル箇所の抽出が実現すると考える．

引用文献

建設省，1983：雪崩防災対策調査報告書（第 8 巻 雪崩対策）．
 鈴木 比奈子，内山 庄一郎，中村 一樹，2017：災害事例の文献調査と地図化を通じた那須岳周辺の雪崩災害の発生傾向の調査．雪氷研究大会（2017・十日町）講演要旨集， 77．

太平洋側地域に適用可能な雪崩発生危険度の評価方法 A Method for Evaluating Avalanche Starting Risk Applicable to the Pacific Side Area of Japan

吉川 知里¹⁾, 河島 克久²⁾, 松元 高峰²⁾
C. Yoshikawa¹⁾, K. Kawashima²⁾, T. Matsumoto²⁾

¹⁾ 新潟大学 理学部

¹⁾ Faculty of Science, Niigata University

²⁾ 新潟大学 災害・復興科学研究所

²⁾ Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

Abstract: A simple method for evaluating avalanche starting risk was developed by using data of snow avalanches observed in Yamanashi Prefecture and Tokyo metropolitan area in February, 2014, with the object of application to the Pacific side area of Japan where extratropical cyclons cause heavy snowfall in general. In this method, the avalanche starting risk is determined according to the combination of slope angle factor and vegetation factors, and is expressed in seven levels in 10-meter grid square. The application of the method to Hayakawa region (Yamanashi Prefecture) and Mt. Nasu (Tochigi Prefecture) confirmed its relevance.

Key words: avalanche starting risk, Pacific side area of Japan, vegetation factor, GIS

1 はじめに

普段は積雪の少ない太平洋側の地域でも南岸低気圧の影響により大雪となり、雪崩が発生することがある。例えば、2014年2月14日～16日に関東甲信地方を中心として広範囲に大雪となった結果、山梨県や埼玉県の山間部などで雪崩が頻発し、集落が孤立する事例が多数見られた。また、2017年3月27日には栃木県那須町で雪崩が発生し、48名もの死傷者を出した。このような雪崩災害を防止・軽減するためには、雪崩発生危険度の高い斜面を特定し、対策を講じる必要がある。

日本海側の多雪地域では倉島（1985）や新山ら（2003）が、傾斜・植生・積雪深の3要因から雪崩発生危険度を定量的に評価する方法を提案している。しかし、この評価方法をそのまま太平洋側地域に適用することはできない。なぜなら、日本海側では植生が雪崩の抑制に大きな効果を発揮するため、樹林帯での雪崩は通常発生しにくい。太平洋側では、2014年関東甲信大雪の際に秋山ら（2015）が指摘しているように、密な樹林内でも雪崩が発生する事例が多数みられるためである。そこで、本研究では太平洋側の地域に適用可能な雪崩発生危険度の評価方法を確立することを目的とする。南岸低気圧により太平洋側で降る雪はサラサラとして崩れやすい性質を持っていることが多いため（中村ら、2014）、積雪深が少なくても雪崩が発生することがある。このことから、積雪深は必ずしも良い指標とはならないので、本研究では積雪深を除いた傾斜と植生に基づいて、潜在的な雪崩発生危険度の評価方法を検討する。

2 解析方法

本研究では、まず2014年2月14日～16日の大雪イベントにおける雪崩発生地点と非発生地点について、傾斜要因と植生要因（樹高、樹冠密度、植生種類）を新山ら（2003）を参考にして求める。次に発生・非発生の標本分布に基づき各要因の階級を区分し、数量化二類を適用して雪崩発生への影響度を表すスコアを求める。得られたスコアを用いて、10 m メッシュで雪崩発生危険度を定量的に評価する方法を提案する。

2.1 雪崩の発生地点及び非発生地点の特定

2014年2月の関東甲信大雪時の山梨県と東京都の雪崩調査結果（和泉ら、2014）に基づき、雪崩発生地点44か所を特定した。また、その近傍において非発生地点44か所を選んだ。本作業ではデジタル空中写真も用いた。

2.2 傾斜と植生の算出

特定した地点について、国土地理院の航空レーザ測量データを用いて GIS（Geographic Information System）上で傾斜と植生を算出した。まず、航空レーザ測量データから、樹木や地上構造物を含んだ地表面形状を表す 2 m メッシュの DSM と、地盤標高を表す 1 m メッシュの DEM を作成した。DEM から四近傍法により 1 m メッシュの傾斜を求めた後、発生地点もしくは非発生地点を含む 10 m メッシュの平均傾斜を求めた。樹高は DSM と DEM の差から 2 m メッシュ毎に算出した後、10 m メッシュの平均をとることで求めた。また、2 m メッシュ毎の樹高が 2 m 以上であった場合に「樹木あり」とし、10 m メッシュ内に「樹木あり」のメッシュが存在する割合を樹冠密度として算出した。植生種類については環境省の植生区分図から判断した。

2.3 階級区分と数量化二類の適用

発生地点と非発生地点の各要因の標本分布に基づき、傾斜要因と植生要因を階級区分した。次に数量化二類による判別分析を行うことで、雪崩発生・非発生を傾斜と植生に基づいて予測するためのスコアを得た。

3 解析結果

3.1 発生・非発生地点における各要因の分布の特徴

算出した各要因の標本分布を図-1 に示す。傾斜要因は、発生地点では 35°~45° に集中しており、非発生地点では 20° 未満の緩斜面から 60° 以上の急斜面まで幅広く分布していた。一方、植生要因には、樹高 8 m 以上の高木では雪崩が発生しにくいという特徴が見られた。また、樹冠密度は、非発生地点では 90% 以上にほとんど集中しており、0~100% の間に広く分布する発生地点とは大きく異なる。さらに、落葉樹では発生の割合が多く、常緑樹では非発生の割合が多いことが分かった。これらの特徴に基づいて、数量化二類で用いる階級区分を表-1 のように設定した。

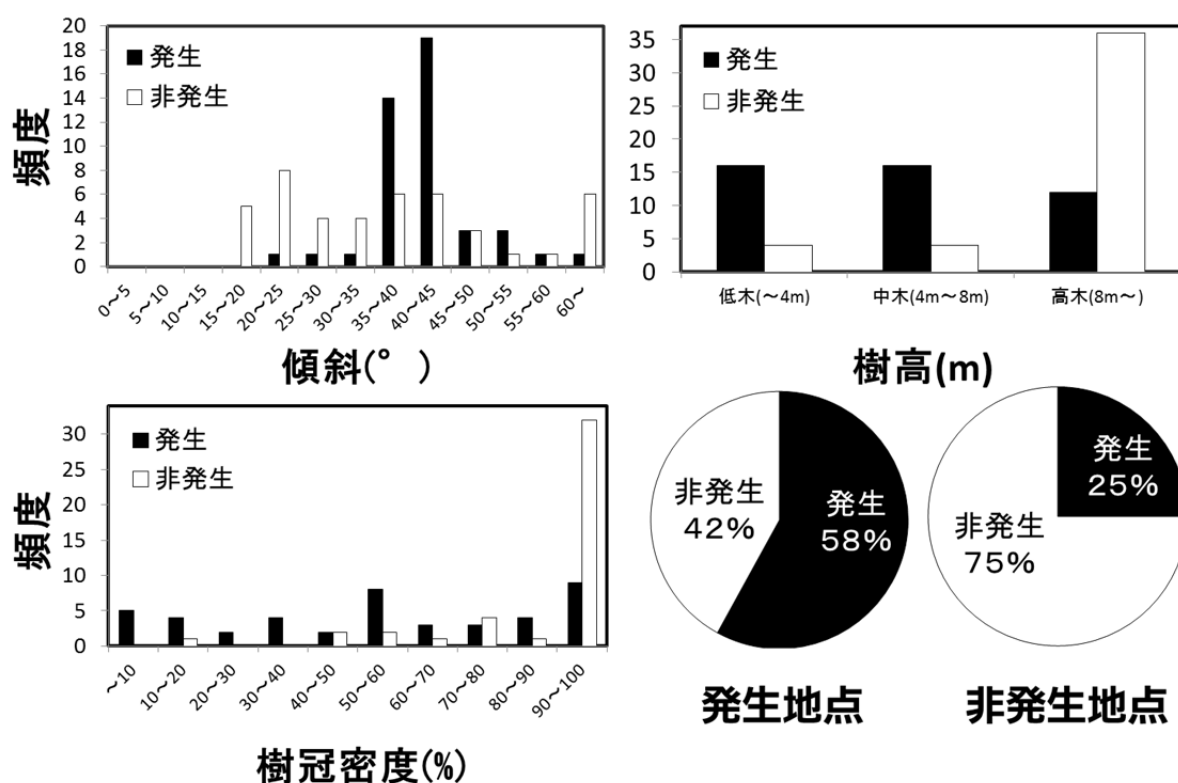


図-1 傾斜要因と植生要因の標本分布。

表－1 雪崩発生に寄与する要因と階級区分及びスコア

要因	階級	スコア
傾斜	20°未満または60°以上	-0.9302
	20°以上かつ35°未満	-0.6013
	35°以上かつ45°未満	0.7037
	45°以上かつ60°未満	0.212
植生	樹冠密度80%以上の高木	-0.493
	樹冠密度80%以上の中低木 樹冠密度80%未満の常緑樹	-0.0434
	樹冠密度80%未満の落葉樹 草地、裸地	0.6244

表－2 本研究で提案した雪崩発生危険度の評価方法

植生	傾斜			
	～25°,60°～	25°～35°	45°～60°	35°～45°
樹冠密度80%以上の高木	-1.423	-1.094	-0.281	0.211
樹冠密度80%以上中低木 樹冠密度80%未満の常緑樹	-0.974	-0.645	0.170	0.660
樹冠密度80%未満の落葉樹 草地、裸地	-0.306	0.023	0.836	1.328

■ ～ -1.25 ■ -1.25～-0.75 ■ -0.75～-0.25 ■ -0.25～0.25 ■ 0.25～0.75 ■ 0.75～1.25 ■ 1.25～

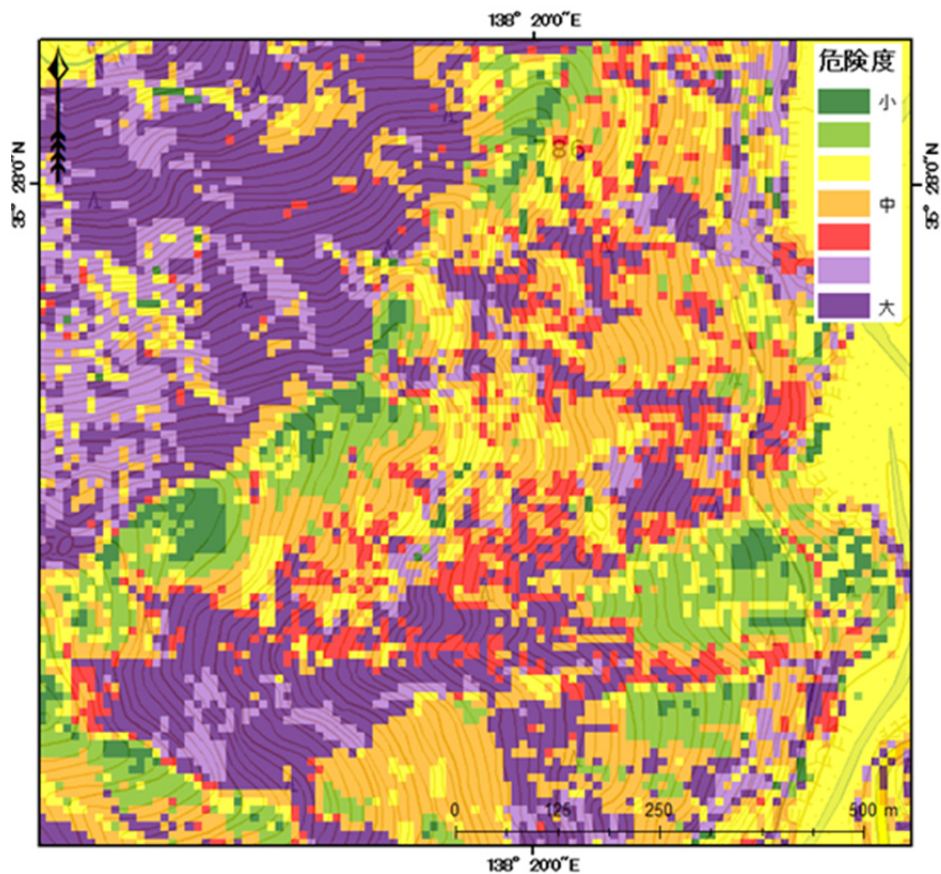
低 ←————— 雪崩危険度 —————→

3.2 数量化二類により得られたスコアと評価方法

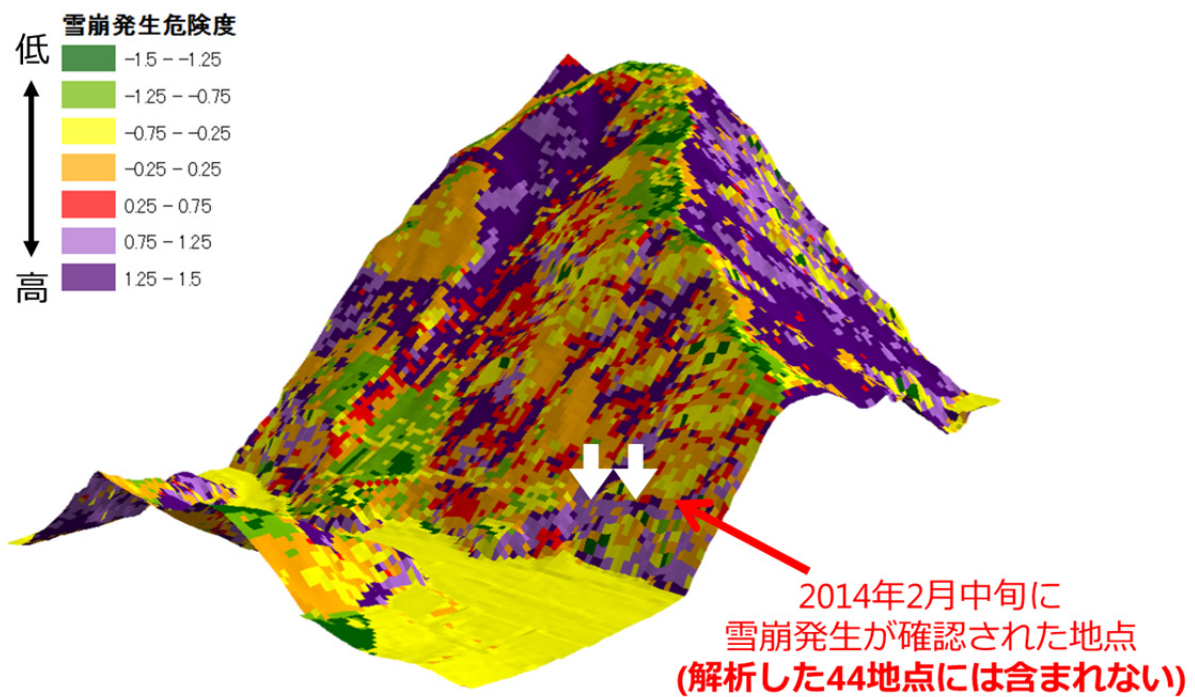
数量化二類による解析から、表－1のようなスコアが得られた（的中率 88%）。雪崩発生危険度は傾斜・植生要因の各スコアを足し合わせることで行い評価し、合計スコアがプラスで大きくなるほど危険度が高いことを意味する。例えば、ある地点において傾斜が 20°かつ樹冠密度 80%以上の中木の植生が存在している場合、合計スコアは-0.6447 となり、合計スコア<0 であるので雪崩発生危険度は低いと評価される。傾斜が 4 階級、植生が 3 階級あるので、12 通りの合計スコアが出現する。本研究では、この 12 通りの合計スコアを 0.5 間隔で 7 段階に分けて雪崩危険度を評価することとした（表－2）。

4 妥当性の検証

本研究で確立した評価方法を山梨県早川町の 1 km 四方の領域に適用し、図－2 及び図－3 のような雪崩発生危険度マップを作製した（10 m メッシュ毎）。図－2 において、北西側の斜面は植生が少ないため危険度が高いと評価される地点が多いが、南東側の斜面は植生が密かつ樹高も大きい急な斜面であっても危険度が低いと評価されている。図－3 で↓印を付けた地点は空中写真から 2014 年 2 月 14 日～16 日の大雪イベントで雪崩が確認された地点である。この 2 地点は、7 段階で 2 番目に高い雪崩危険度のメッシュに位置しており、実際に雪崩が発生したことを考慮すると妥当な評価がなされていると言える。また、栃木県那須町的那須岳周辺に適用した結果を図－4 及び図－5 に示す。那須岳においても、過去に雪崩が発生した 5 地点（図－4 の×印、図－5 の↓印）全てが雪崩危険度が最も高いメッシュに位置していることがわかる。以上から、本研究で提案した雪崩発生危険度の評価方法は、山梨県、栃木県などように、降雪が主に南岸低気圧によってもたらされる太平洋側地域に広く適用できる可能性が示唆された。



図ー2 山梨県早川町への適用結果（雪崩発生危険度マップ）



図ー3 山梨県早川町への適用結果（3D 表示）

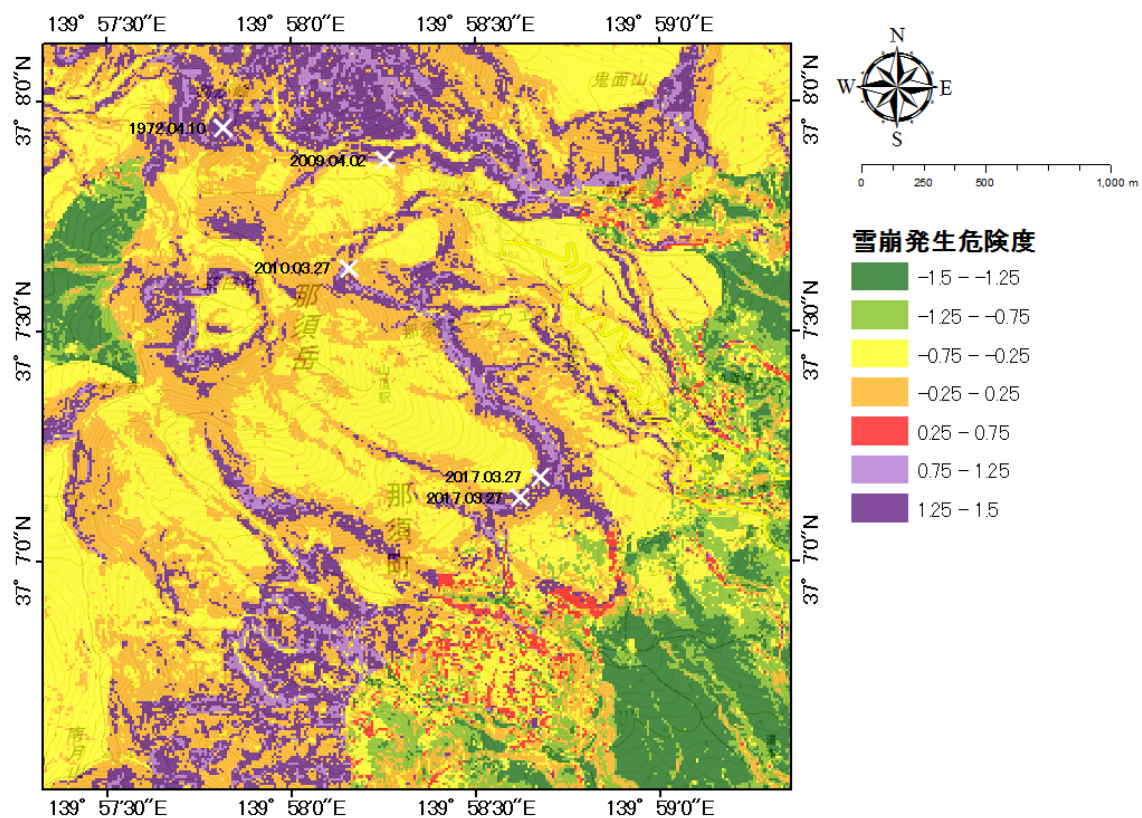


図-4 栃木県那須町（那須岳周辺）への適用結果

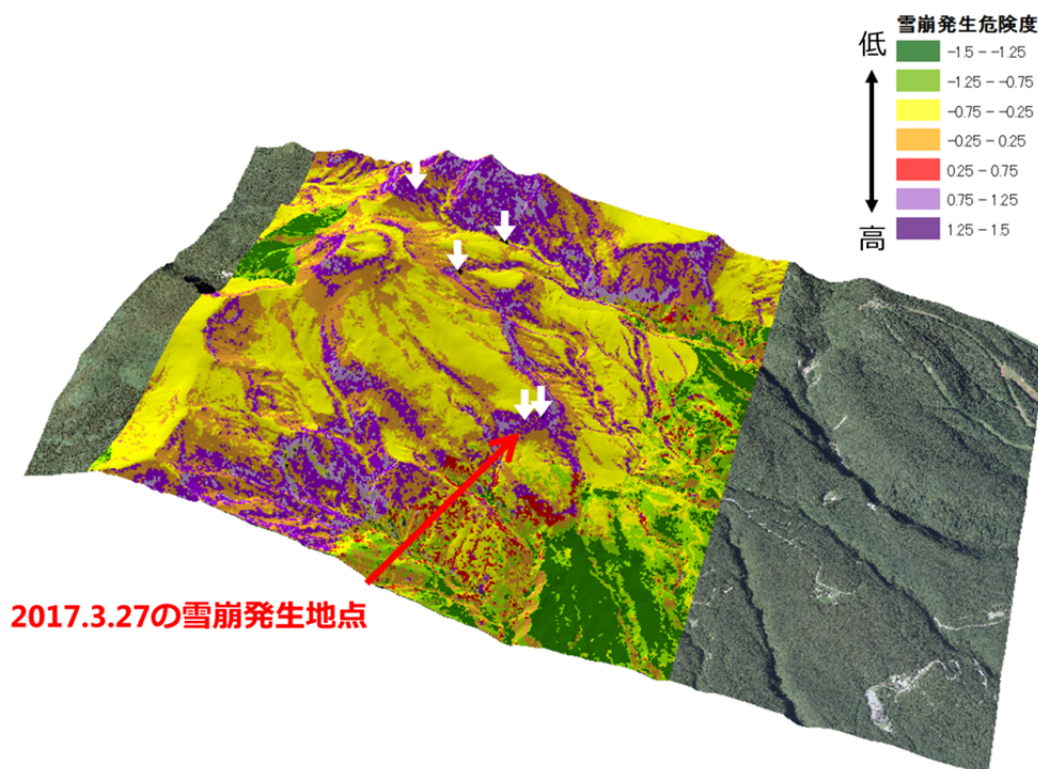


図-5 栃木県那須町（那須岳周辺）への適用結果（3D 表示）

5 まとめ

本研究では2014年2月の関東甲信大雪時の雪崩調査結果に基づいて、地形・植生要因を指標とした雪崩発生危険度の評価方法を提案した。この方法の妥当性を検証した結果、2014年2月の山梨県での雪崩発生地点と2017年3月の栃木県での雪崩発生地点等が適正に評価されており、評価方法の妥当性が確認でき、太平洋側地域に広く適用できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究を実施するに当たり、国際航業株式会社の佐藤匠氏及び松田宏氏から貴重なご意見を頂いた。また、本研究の解析では、国土交通省国土地理院が管理する航空レーザ測量データを利用させていただいた。上記の関係各位に心からお礼申し上げます。なお、本研究はJSPS 科研費 17K18453 の助成を受けて実施された。

引用文献

- 秋山一弥，関口辰夫，池田慎二，2015：2014年2月の大雪によって山梨県の早川周辺で発生した雪崩の特徴．雪氷，**77**，47-57.
- 和泉薫，河島克久，伊豫部勉，松元高峰，2014：2014年2月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴．2014年2月14-16日の関東甲信地方を中心とした広域雪氷災害に関する研究（課題番号25900003），平成25-26年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）（特別研究促進費）研究成果報告書（研究代表者：和泉薫），111-118.
- 倉島収，1985：なだれ発生斜面の発生危険度の判定基準モデルについて．交通工学，**20**，9-23.
- 中村一樹，上石勲，阿部修，2014：2014年2月の低気圧の降雪による雪崩の特徴．日本雪工学会誌，**30**，106-113.
- 新山純一，松田宏，飯倉茂弘，河島克久，藤井俊茂，2003：東北新幹線盛岡・八戸間のなだれ危険度評価とその工学的意義．日本雪工学会誌，**19**，91-101.

第 7 章

雪崩教育

雪山登山引率者を対象とした講習の試行 Trial of Training Program for Snow Mountaineering Leaders

近藤 伸也¹⁾, 飯田 肇²⁾, 中村 一樹³⁾, 上石 勲³⁾, 瀬谷 旺二郎⁴⁾
S. Kondo¹⁾, H. Iida²⁾, K. Nakamura³⁾, I. Kamiishi³⁾, O. Seya⁴⁾

¹⁾宇都宮大学大学院工学研究科

¹⁾ *Graduate School of Engineering, Utsunomiya University*

²⁾公益財団法人立山カルデラ砂防博物館

²⁾ *Tateyama Caldera Sabo Museum*

³⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

³⁾ *Snow and Ice Research Center, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

⁴⁾宇都宮大学工学部建設学科建設工学コース

⁴⁾ *Department of Civil Engineering, Utsunomiya University*

Abstract: In this research, the authors examined the future of the training program aiming at learning what is necessary for the leadership of snow mountaineering. This program is for advisors of the mountaineering club activities of the high school to become snow mountaineering leader. Specifically, based on the causes of the avalanche disaster in Nasu-machi, were constructed as a unit of the course which advisors acquire. Then, improvement of capacity of situation judgment ability were examined from the viewpoint of risk communication. After developing teaching materials necessary for exercises to improve courses and situation judgment skills, classes and exercises for advisors (teachers) of mountaineering specialty departments of high schools were tried in 7 prefectures.

Key words: snow mountain leaders, disaster training program, high school teacher, avalanche disaster

1 はじめに

日本で発生する自然災害の1つに雪崩がある。最近では平成29年3月27日に、栃木県那須郡那須町の山岳地で雪崩が発生し、高校生と教員が巻き込まれ、生徒7名、教員1名が死亡、40名が重軽傷を負う甚大な被害が発生した。これを機に設置された検証委員会の第一次報告書¹⁾では、登山の引率に必要なこととして、「気象等に関わる情報収集が不十分で、専門家の助言を求めなかったこと」と「講師等の雪崩に関する知識が未熟ないし不十分であったこと」に加えて、「危機管理のための『教職員研修』が不十分」であることが指摘されている。また検証委員会の最終報告書²⁾では、「県教育委員会は、高体連、登山専門部及び域内の学校において、登山活動等における危機管理の徹底と関係機関等との連携が推進され、総合的な安全への対応力が向上するよう『顧問等の研修』の充実を図り、一層の支援を行うこと。」とあり、「専門家の協力を得て、講義及び実習などを取り入れ、『初任の登山部顧問等の研修』、『経験者の研修』などをきめ細かにかつ継続的に実施する」と提言している。以上より、高等学校の登山専門部の雪山登山引率者となる顧問を対象とした講習の実施が必要だと言える。

本研究では、雪山登山引率者となるべき高等学校の登山専門部の顧問を対象として、雪山登山の引率に必要なことを身につけることを目的とした講習のあり方について検討する。具体的には、那須町での雪崩災害の要因を踏まえて、顧問が身につけることを構成し、必要な教材を開発してから、高等学校の登山専門部の顧問を対象とした講習を数県で試行する。

2 講習カリキュラムの検討

2.1 雪山登山の引率に必要なことの抽出

雪山登山引率者として身につけるべき項目について検討する。はじめに検証委員会の最終報告書に記載されている那須町の雪崩災害発生の要因を5項目抽出し、雪氷災害および雪山登山経験者によって雪山登山の引率に必要なことを抽出した(図-1)。この図より降雪パターンや

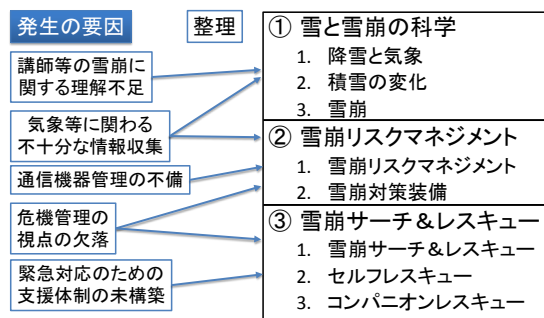


図-1 雪山登山引率者が身につけるべき項目

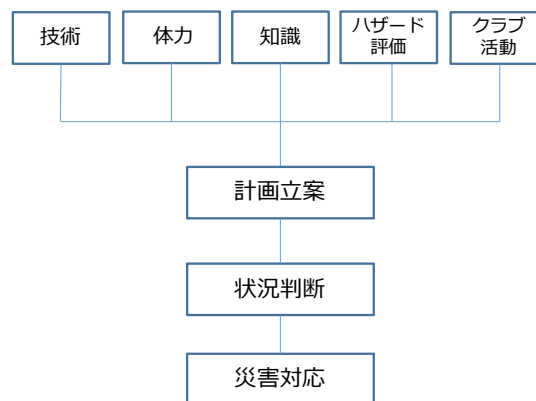


図-2 雪山登山引率者に必要な能力

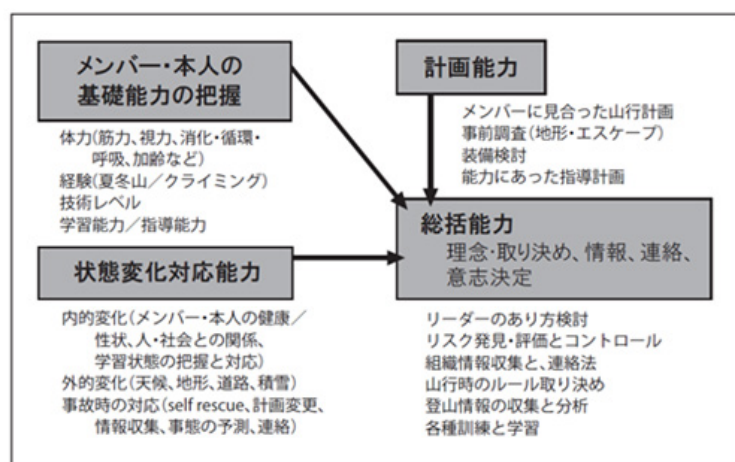


図-3 登山リスクを考慮した引率リーダー能力³⁾

積雪のメカニズムおよび雪崩のメカニズムからなる「雪と雪崩の科学」、雪崩リスクと行動の意思決定および雪崩対策装備からなる「雪崩リスクマネジメント」、雪崩発生後のレスキュー活動からなる「雪崩サーチ&レスキュー」からなることがわかる。

2.2 状況判断に関する能力

2.1 節で抽出した項目だけでは不足する可能性がある。そこで雪山登山を引率する一連の流れをフロー図として整理した(図-2)。雪山登山引率者は、図-1の項目について理解し、それらをマネジメントすることで雪崩を回避し、安全に登山の引率を行うことが求められる。雪山という刻々と気象やパーティの状況が変化する環境において、それらの変化に対応するための能力は、雪山引率を行う上で必要不可欠となっている。青山³⁾は、登山引率者に必要な能力として、図-3の4つに分類した。本研究では、図-3の「状態変化対応能力」を向上させて、図-2の雪山における「状況判断」に関する能力を身につけることが重要であると考えた。

2.3 講習カリキュラム

2.1 節および2.2 節の能力を身につけるための講習カリキュラムを検討する。特に2.1 節の能力については量が多いため1週間かけて講義、および野外実習を行うことが理想的である。しかし、現状の学校教員は多忙であることなどを考慮すると、長くて1泊2日の講習とすること、同じ内容の講習を複数回実施してスケジュールに合う講習を選択できること、複数のコースから自分の能力に見合うものを選択することが考えられる。そのため、いかなる講習に関する実施期間や講習会場をはじめとした様々な制約条件にも対応できるよう、短時間で最低限の能力を講義形式および野外実習で身につける教材を開発することが必要だと考えた。この教材

の開発に関しては、本報告書の中村・上石・飯田・榊原・近藤の担当分(雪崩教育普及プログラムの開発)を参照されたい。

状況判断に関する能力は、雪山登山中に判断する機会に遭遇しなければ使用しない機会がない。また状況判断に関する能力は図-2 にもあるように 2.1 節に関する知識が身につくことで発揮できるものである。そのため、雪がない平地でもこの能力を向上できる机上演習を開発し、前段落で説明した講義および野外実習を行った後にこの演習を実施することで、この能力が向上できると考えた。次章ではこの開発した演習について述べる。

3 状況判断力向上を目指した演習の開発

3.1 リスクコミュニケーション

近年、防災の分野においてリスクコミュニケーションへの関心が高まりつつある。米国研究評議会によれば、リスクコミュニケーションとは「個人、機関、集団間での情報や意見の交換過程」とであるとされている。ここで交換される情報は、リスクについて直接に関係する情報と、必ずしもリスクそのものについて言及しているわけではないが、それに関連して伝えられる情報が含まれる。後者の例として、リスク問題に対する関心を表明すること、あるいは疑問があることを伝えることなどが挙げられる⁴⁾。

状況判断力を向上させるにあたり、受講者に演習を通して他者と情報共有をさせること（リスクコミュニケーションを取る）ことで、自分が雪山登山に関して知らないことを減らし、自分が知っている領域を増やすことで、雪山登山に関するリスクを減らすことができる。この過程は、ジョハリの窓⁴⁾を使って示すことができる（図-4）。情報共有をすることで自分が雪山登山に関して知らないこと（盲点領域）が減少するとともに、他者がそれに関して知らないこと（隠蔽領域）が減少することから公開領域を拡大することができる。以上より、「状況判断力の向上」は、「雪山登山に関するリスクについての公開領域の拡大」と定義することができる。

3.2 演習内容の検討

本研究では、ゲーミングという多重話を通してゲーミングに参加する受講者が創造的かつ主体的にリアリティを構築する支援をする「クロスロード」⁴⁾を参考に演習を作成することとした。これは、心理的ジレンマを伴った状況下での意思決定をさせることにより、新たな理解や意外な解決を参加者が情報共有をすることで提案できるようになる効果があると言われている。

ゲーミングの役割は、リスクコミュニケーションを積極的かつ効果的に行わせるための「道具」としての位置づけである。ゲーム化という行為によって、リスクコミュニケーションを取るためのルールを明確にし、その中でリスクに関する新たな発見や知識の共有を図ることができると考えた。

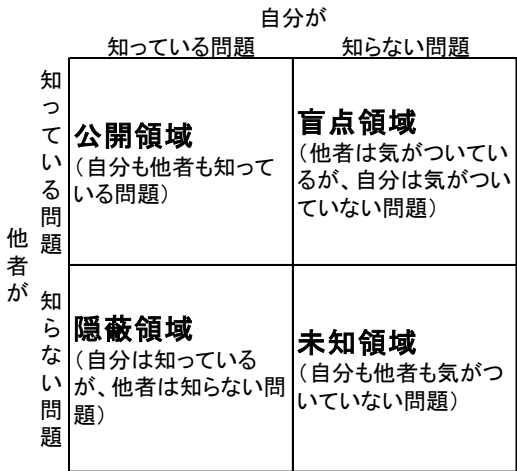


図-4 ジョハリの窓

表-1 演習の状況設定として
受講者に与える情報

・天気図(1週間分)	・装備
・地形図	・目的地までの距離
・気温	・パーティの人数
・積雪深	・積雪テストの結果
・降雪量	・部員のモチベーション
・風速	

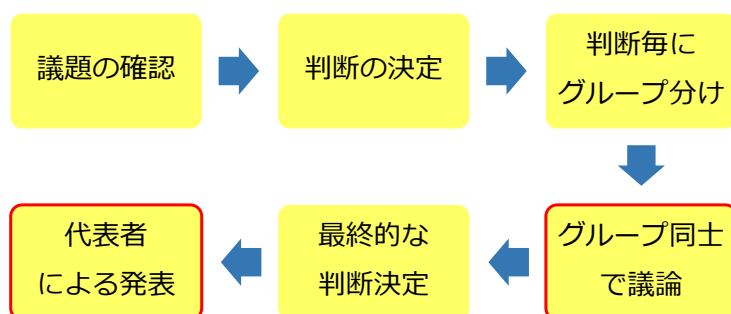


図-5 演習の流れ

心理的ジレンマを作成するにあたり、図-3の「状態変化対応能力」を形成する「内的変化」「外的変化」「事故時の対応」の3つの要素に着目した。メンバーや顧問に関することを「内的変化」、気象や積雪に関することを「外的変化」とし、それらに関する各種データを受講者に与えることにより、ジレンマを感じさせるような演習を作成する。「事故時の対応」として、雪崩の危険を示すようなきっかけを与え、その状況でどの判断を下すかを議論させることによって、雪山登山に関するリスクについての公開領域の拡大を図る。

3.3 演習内容

演習の状況設定（議題）は3月下旬の「雪山登山合宿の引率」とした。当初予定していた登山日を、悪天候を理由に1日ずらし、もう日程変更ができない条件の下で、雪山登山引率中に、1人の部員からワッフ音のような音が聞こえたという報告を受けて、登山を続けるか下山するかを引率者が判断する、という設定とした。演習の受講者に「状態変化対応能力」を構成する3つの要素をもとにした表-1の情報を与えて、雪崩リスクを評価し、登山を続けるか下山するかを判断をしてもらうこととした。

演習の流れを図-5に示す。はじめに5人又は7人の班に分かれて議題として演習の状況設定を確認してから、登山を続けるか下山するかを受講者が一人で判断する。次に班内で登山を選択した人と下山を選択した人でそれぞれグループを作り、グループ間で議論する。最後に班としての最終的な判断を決定し、各班の代表者による発表を行って議論した成果を共有する。

4 講習の試行

4.1 講習の試行

本研究では、2.1節で抽出した能力をもとに開発した「雪と雪崩の科学」、「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」の教材と、2.2節での能力をもとに開発した状況判断力を向上する演習をもとに、高等学校の登山専門部の顧問を対象とした講習を試行した。主に

表-2 講習試行の概要

都道府県	期間	場所	備考
福島県	2017年12月25日	福島市	県高体連登山部冬季登山技術研究大会の一環として実施 「演習なし」
宮城県	2018年1月13日	蔵王町	県高体連冬山顧問研修会の一環として実施 「演習なし」
長野県	2018年1月20日	大町市	中信地区安全登山研究会研修交流会の一環として実施
三重県	2018年1月27日	四日市市	三重高体連登山専門部安全登山研修交流会の一環として実施 「演習なし」
新潟県	2018年2月2～3日	長岡市	県高体連登山専門部講習会の一環として実施
秋田県	2018年2月2～3日	秋田市	全県顧問冬山講習会の一環として実施 「演習なし」
群馬県	2018年2月16日	片品村	県高体連登山専門部冬山登山顧問講習会の一環として実施 「演習なし」

都道府県の高体連登山専門部の協力を仰ぎながら、表-2 の 7 県で実施した。表-2 の「演習なし」とは、状況判断力を向上する演習は行わなかったことを示す。

講師は「雪と雪崩の科学」、「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」に関しては、本研究プロジェクトに参加している雪氷災害および雪山登山の専門家が担った。状況判断力を向上する演習については、雪氷災害および雪山登山の専門家ではない者が司会進行を行い、雪氷災害および雪山登山の専門家が議論のフォロー、および演習最後の講評を行った。

「雪と雪崩の科学」、「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」の実施形態は会場によって異なる。講習の時間がとれない場合は、講義のみとしているが、時間がとれ、かつ会場近辺に雪のある場所が確保できた場合には野外実習も合わせて行っている。

4.2 講習の評価

試行した講習の評価は、講習終了後にアンケートにより実施した。アンケートの項目は、「雪と雪崩の科学」、「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」については、各単元の参加者の満足度、参加者が理解したこと、講習終了後に各学校に持ち帰ってやるべきことと、講習そのものの改善点等である。状況判断力を向上する演習については、演習による判断能力の変化やジョハリの窓での公開領域の拡大がなされたかどうかなどについてである。

講習は、県高体連が主催している会の一環で行ったことから、顧問のみが参加しているものと、顧問と生徒が参加しているものがあった。後者については、両者を対象に講習を実施してアンケートは顧問のもののみ集計した。

「雪と雪崩の科学」、「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」への満足度が図-6 である。今回は福島県、長野県、三重県、新潟県の参加者へのアンケート結果を分析している。参加者は新潟県の「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」の 1 名を除いて「とても満足できた」もしくは「ある程度満足できた」と回答していることから、講義および野外実習の内容には概ね満足できるものであったといえる。各単元で身につけた単語の記入した数（最大 10 単語）を平均したもの（回答なしは記入する時間がなかったものとして除いている）が表-3 である。回答した単語数の平均は約 4 語程度であり、「雪と雪崩の科学」が多く、「雪崩サーチ&レスキュー」が少ない傾向にあることが明らかとなった。学校に戻ってからやるべきこととしては、雪を観察することや雪山登山に天気予報以外のデータを用いること、そして生徒と雪山の安全について考えることをはじめとした意見が記述されていた。改善点としては、講義形式だけだった県では実習の必要性に関する意見があった。

状況判断力を向上する演習は長野県と新潟県で実施したが、新潟県の数名を除いて全員が「下山する」を選択した。アンケートを集計した結果、全員（N=29）が公開領域を拡大できたとの回答を得ることができた。しかし、少数ではあるが盲点領域と隠蔽領域の縮小を図ることができなかったと答えた受講者もいた。また複数人の視点から決定を行う重要性や現場で考えなくてはならない要素が数多くあることに気づいたという意見があった。これらの結果を踏まえて、「登山を続ける」という判断をする人を増やし、より盲点領域・隠蔽領域の縮小を図れるよう演習を改善した。主に改善した点は、受講者に与える情報の中の、「気温、降雪量、パ

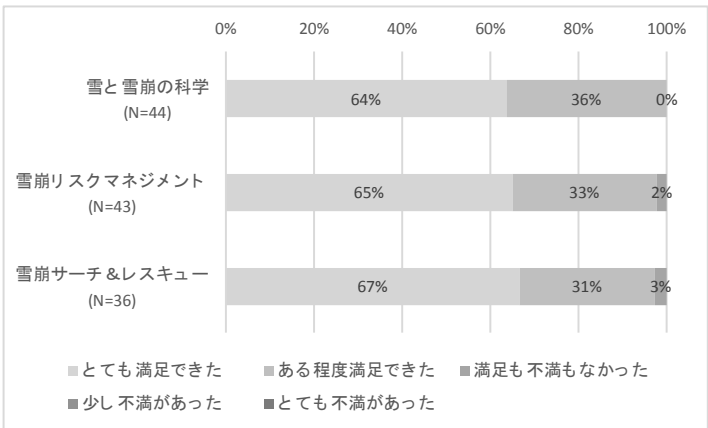


図-6 各単元に対する満足度

表-3 各単元に関して
記述した平均単語数

単元	平均回答個数
雪と雪崩の科学 (N= 43)	5.63
雪崩リスクマネジメント (N= 39)	4.33
雪崩サーチ &レスキュー (N= 26)	3.81

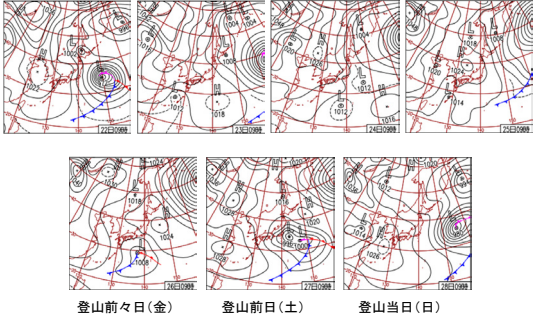
演習議題 • あなたは〇〇県A高校登山部の顧問です。 • A高校では3月の第4土曜日に冬山合宿を行う予定でした。 • 金曜日の降雪の影響を考慮し、日曜日に登山するよう予定を変更しました。 • 日曜日の天気は良好で、予定通り、飯縄山山頂への到達を目標に登山を行います。 • 残雪のある飯縄山を登山していると、標高1800m地点で 生徒の1人 から足下に亀裂ができたとの報告が入り... ⇒登山を続ける？or下山する？	各種データ • 歩くと足元の積雪に小さな亀裂が入った 位置：標高約1800m • 山頂の位置：標高1917.3m • 生徒のモチベーション：頂上目前でモチベーション高い • 気温：8℃(長野県北部) • 積雪深：350cm • 降雪量：当日は降雪無し。前々日、前日の降雪量はそれぞれ20cm、7cm • 風速：最大風速5m/s • ハンドテストの結果：肩までを使った力で剥がれる • パーティの人数：先生2名、生徒12名 • 装備：雪崩トランシーバー、シャベル、ブローブ、ワカン、スノーソー
	

図-7 改善した演習資料

ーティの人数，風速」の調整と，顧問の経験に応じて演習のグループ編成を行うことについてである．図-7は改善した演習資料である．

5 おわりに

本研究では，雪山登山引率者となるべき高等学校の登山専門部の顧問を対象として，雪山登山の引率に必要なことを身につけることを目的とした講習のあり方について検討した．具体的には，那須町での雪崩災害の要因を踏まえて，顧問が身につける講習の単位として「雪と雪崩の科学」，「雪崩リスクマネジメント」と「雪崩サーチ&レスキュー」を構成するとともに，状況判断力の能力の向上についてリスクコミュニケーションの観点から検討した．そして講習および状況判断力を向上する演習に必要な教材を開発してから，高等学校の登山専門部の顧問を対象とした講習および演習を7県で試行した．その結果，講習の参加者の満足度は高く，単元の理解度もある程度あったほか，学校に戻ってからの対応について前向きに検討していただけた．演習についても公開領域の拡大に伴い状況判断力が向上されたと言える．

謝辞

本研究の実施にあたり，長野県大町岳陽高校の大西浩教諭からのご協力をいただきました．ここに記して，厚く御礼申し上げます．

引用文献

- 1) 平成29年3月27日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第一次報告書，2017，<http://www.pref.tochigi.lg.jp/m01/kensyouiinkai.html>（2018年2月28日確認）
- 2) 平成29年3月27日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，2017，<http://www.pref.tochigi.lg.jp/m01/kensyouiinkai.html>（2018年2月28日確認）

- 3) 青山千彰：引率リーダーのための山岳事故リスクを想定した研修会・講習会のあり方，ならびに事故後の対処法について，日本山岳文化学会論集，第5号，pp.179-192，2007.
- 4) 矢守克也ほか：防災ゲームで学ぶリスク・コミュニケーション クロスロードへの招待，ナカニシヤ出版，2005.

雪崩教育普及プログラムの開発

The development of the avalanche education program

中村 一樹¹⁾, 上石 勲¹⁾, 飯田 肇²⁾, 榊原 健一³⁾, 近藤 伸也⁴⁾
K. Nakamura¹⁾, I. Kamiishi¹⁾, H. Iida²⁾, K. Sakakibara³⁾, S. Kondo⁴⁾

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⁾富山県立山カルデラ砂防博物館

²⁾*Tateyama Caldera Sabo Museum*

³⁾北海道医療大学

³⁾*Health Sciences University of Hokkaido*

⁴⁾宇都宮大学 大学院工学研究科

⁴⁾*Graduate School of Engineering, Utsunomiya University*

Abstract: After the avalanche accident of Mt. Nasu, avalanche education program for the high school teacher and student were developed. A program is composed of "snowcover and avalanche", "avalanche risk management" and "avalanche search & rescue". We added a research result about the avalanche due to the snowfall of the low pressure to the program. These programs were practiced in the high school avalanche training meeting carried out in the seven prefectures, and it was popularity mostly.

Key words: avalanche education, avalanche accident, high school

1. はじめに

本研究プロジェクトの「啓発普及」分野では、今科研の研究成果を基に、教育関係者や山岳団体等へも本研究成果の普及を図ること、そのための雪崩教育普及プログラムを開発することを目標とした活動を実施した。

具体的には、各都道府県の高体連登山専門部等で今冬に開催される登山研修会等で、開発した雪崩教育普及についてのプログラムを実施した。プログラム中には、今回の研究成果である低気圧に伴う降雪が引き起こす表層雪崩についての注意喚起も含めることとした。

以下に、著者らが関係して今年度を実施した雪崩教育普及プログラムの実施日を示す。また、図-1に、2018年1月20~21日に行われた2017年度長野県中信安全登山研究会「登山技術交流研修会」での高校教諭と高校生向け雪崩教育プログラムの実施状況を示す。

- | | |
|----------------|-------------------------------|
| ①2017年12月25日 | 2017年度福島県高体連登山部冬季登山技術研究大会 |
| ②2018年1月13~14日 | 2017年度宮城県高等学校体育連盟登山専門部冬山顧問研修会 |
| ③2018年1月20~21日 | 2017年度長野県中信安全登山研究会「登山技術交流研修会」 |
| ④2018年1月27~28日 | 2017年度三重県高体連登山専門部 安全登山研修交流会 |
| ⑤2018年2月2~3日 | 2017年度秋田県高体連登山専門部全県顧問冬山講習会 |
| ⑥2018年2月2~3日 | 2017年度新潟県高体連登山専門部「基礎技術講習会」 |
| ⑦2018年2月16日 | 2017年度群馬県高体連登山専門部 冬山登山顧問講習会 |

本稿では、雪崩教育普及プログラムの内容を紹介する。雪山登山の引率に必要なことの抽出、状況判断力向上を目指した演習の開発、及び講習の試行等については、本報告書の近藤・飯田・中村・上石・瀬谷の担当分(雪山登山引率者を対象とした講習の試行)を参照されたい。

なお、高校教諭や高校生への雪崩普及教育の必要性については、『平成29年3月27日那須雪崩事故検証委員会報告書』(2017)にも重要な提言として述べられている。

2. 雪崩教育普及プログラムの作成

雪崩教育普及プログラムの作成にあたり、プログラムの流れを、①積雪と雪崩、②雪崩リスクマネジメント、③雪崩サーチ&レスキューとした。

①でまず積雪の基礎知識を身につけて雪崩とはどのような現象なのか、どのような発生の仕方をするのか等を理解してもらう。①では、可能な限り積雪断面観測等の実技時間を設ける。

続いて②で、雪崩にあわないためにはどうすれば良いのか、その基本的な知識について知ってもらう。②でも、可能な限り積雪安定度評価のための積雪断面観測や積雪安定度テストの実技時間を設ける。

次に③では、雪崩にあってしまったらどうするのか、についてその基本的な知識とスキルを身につけてもらう。③では、ビーコン、プローブ、シャベル等の雪崩捜索用具の扱いについて実技を通して身につけてもらい、さらに、雪崩遭遇時のパーティー内での初動捜索と救助（コンパニオンレスキュー）についての模擬実技を実施して実践的なスキルを身につけてもらう。

なお、本プログラム作成では、本稿の著者の中村、榊原らが執筆編集した『雪崩教本』（2017）の内容を参考とし、また同本中の内容を多数引用した。さらに、本科学研究費の研究成果のうち雪崩教育普及に資する情報を抽出して新たなスライドを作成して加えた。

各プログラムのコンテンツは以下のとおりである。

①積雪と雪崩

- ・降雪と気象
- ・積雪とその変化
- ・雪崩の分類（表層雪崩、全層雪崩）
- ・雪崩の運動形態
- ・雪崩の発生メカニズム

②雪崩リスクマネジメント

- ・雪崩リスク
- ・行動の意思決定
- ・雪崩ハザード評価と用いる情報
- ・積雪観察とその手法
- ・積雪の安定性評価（弱層テスト）
- ・雪崩対策の装備

③雪崩サーチ&レスキュー

- ・雪崩による埋没と生存率
- ・セルフレスキュー
- ・コンパニオンレスキュー（ビーコン、プローブ、シャベル、1次救命処置）



図ー1 長野県中信安全登山研究会「登山技術交流研修会」での雪崩教育プログラムの様子

3. 雪崩教育普及プログラム

研修会等で使用した雪崩教育プログラムのコンテンツの「積雪と雪崩」の項のスライドのうち、本科学研究費による研究の成果を雪崩教育普及に活用した例を以下に示す（図-2）：スライド中の南岸低気圧に関わる項で、今回の研究成果である低気圧に伴う降雪が引き起こす表層雪崩についての注意喚起についてのスライドを作成しプログラムに加えた。

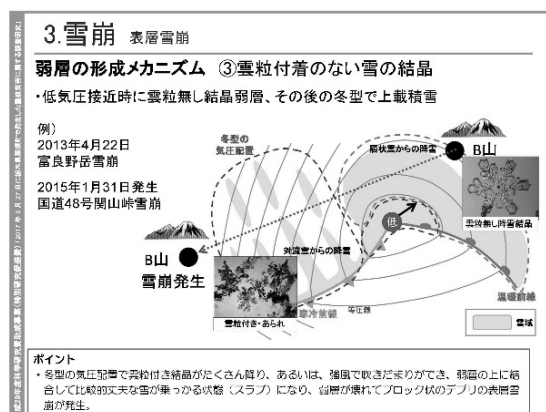
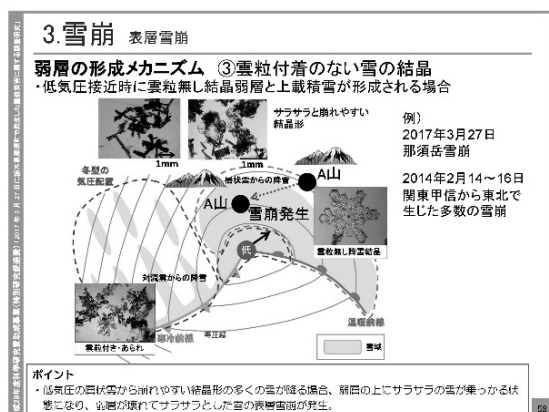
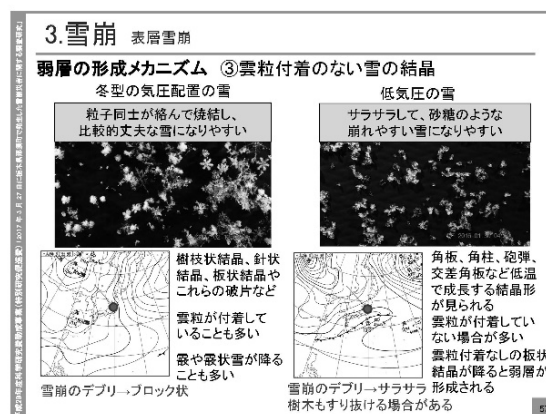
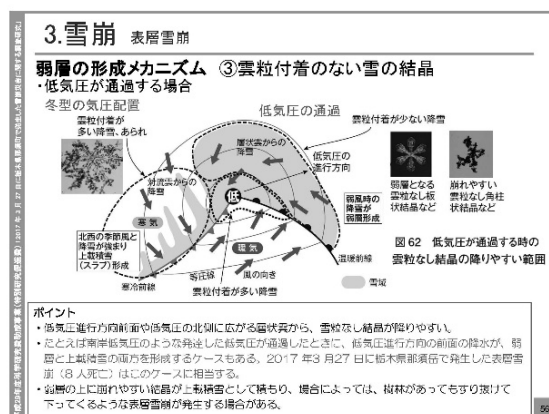
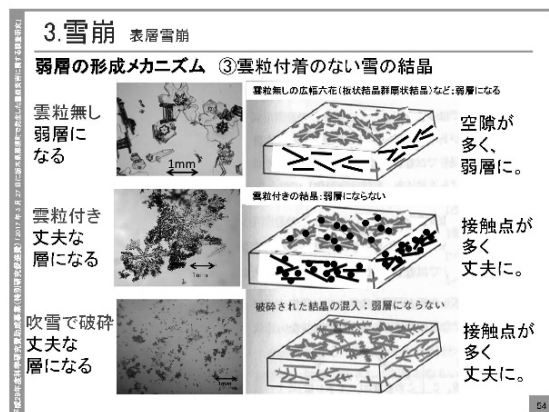


図-2 本科学研究費による研究の成果を雪崩教育普及に活用したスライド例
(雪崩教育プログラム「積雪と雪崩」より)

4. まとめと今後の課題

『平成 29 年 3 月 27 日那須雪崩事故検証委員会報告書』の提言を受けて、高校顧問教諭や高校生向けの雪崩教育普及プログラムを開発した。プログラムは、「積雪と雪崩」「雪崩リスクマネジメント」「雪崩サーチ&レスキュー」で構成され、科研の成果を活用した南岸低気圧による降雪が引き起こす表層雪崩についてのスライドをあらたに作成した。

これらのプログラムは、全国 7 ケ所（福島県、宮城県、長野県、三重県、秋田県、新潟県、群馬県）で実施された高等学校体育連盟登山専門部の冬山研修会の中で実践され、各県とも概ね好評であった。積雪や雪崩の科学はもちろん、これまであまり高校顧問教諭の間で普及していなかったビーコンの扱い方やコンパニオンレスキューなどを知っていただくことができたことは、大きな成果であった。

今後の課題として、この種の雪崩教育普及のための研修会を継続して実施していくためのシステム作りが必要不可欠である。各県とも、50 代の顧問教諭が主流で後継者不足であり、若い山岳部顧問教諭の養成は喫緊の課題となっている。今冬の研修会は、これまで各県の高等学校体育連盟登山専門部などで行われてきた研修会に便乗する形で開催し、雪崩教育の講師として研究者等の専門家があたることができた。しかし今後は、各県の高体連と研究者等が連携を取りながら、雪崩教育の講師を地元の山岳関係者等から選任することが、継続性の観点からも必要であろう。そのため、今回実施した 7 県での雪崩教育普及プログラムは、可能な限り、近隣の山岳ガイドとともに実施するよう努めた。今回開発した雪崩教育普及プログラムを取り入れた研修会が、各県独自の雪崩教育普及指導者のもとで、継続的に実施されることが望まれる。

謝辞

雪崩教育普及プログラムの開発にあたっては、2017 年に山と溪谷社より発行された『雪崩教本』の内容を多数引用させて頂いた。また、雪崩教育プログラムの実践については、福島県、宮城県、長野県、三重県、秋田県、新潟県、群馬県の高等学校体育連盟登山専門部の担当教諭の皆様や各地域の山岳ガイドの方、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの多くの研究者にご協力頂いた。特に、長野県大町岳陽高等学校の大西浩教諭には、7 県で開催した登山研修会等の中で那須雪崩事故について報告をいただき、各県との調整やプログラムの内容について有益なご教示を頂いた。ここに感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 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)。
- 2) 雪氷災害調査チーム&雪崩事故防止研究会編, 2017: 雪崩教本, 山と溪谷社, 143pp.