

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されているが、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℃の逓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。

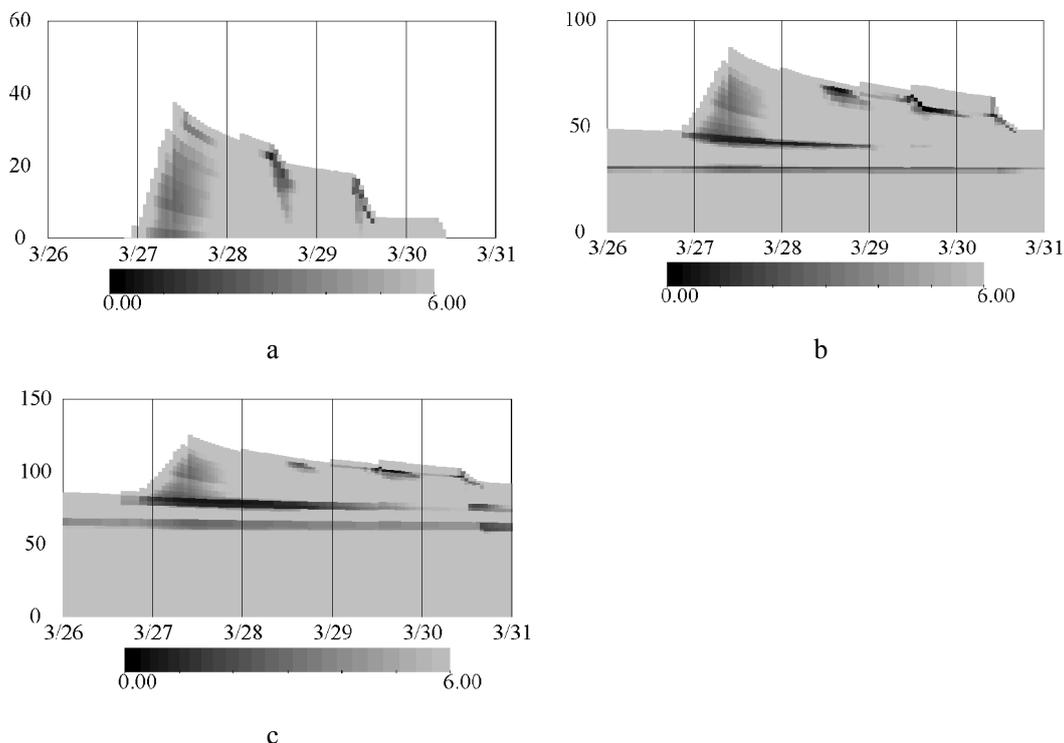


図3 那須における標高別の SNOWPACK で計算された積雪安定度。a: 750m, b: 1350m, c: 1750m

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。

- a. 降雪種の情報を実験的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。
- b. 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。

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

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

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

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

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。

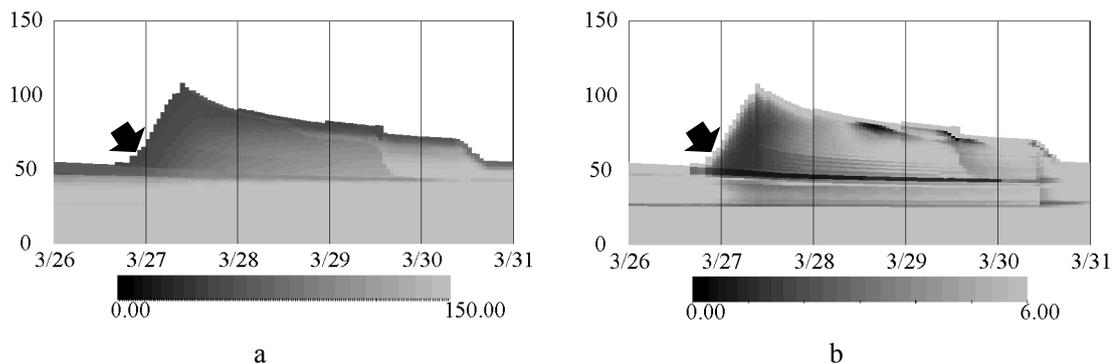


図 4 梶川ら、後藤らの式を組み込んで異なる降雪種の影響を考慮した標高 1350m における計算結果。矢印が樹枝の層を示す。 a: 密度、b: 積雪安定度

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ざ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ざらめ雪が同じぐらい粒子同士の結合が弱いと仮定し、しもざ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)。しもざ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。

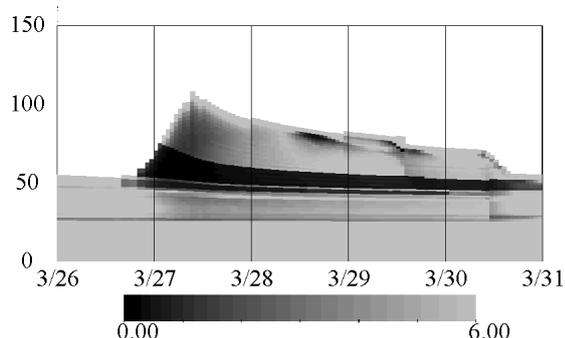


図5 雲粒なし降雪結晶のせん断強度をしもざらめ雪と同じ式で与えた時の積雪安定度

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

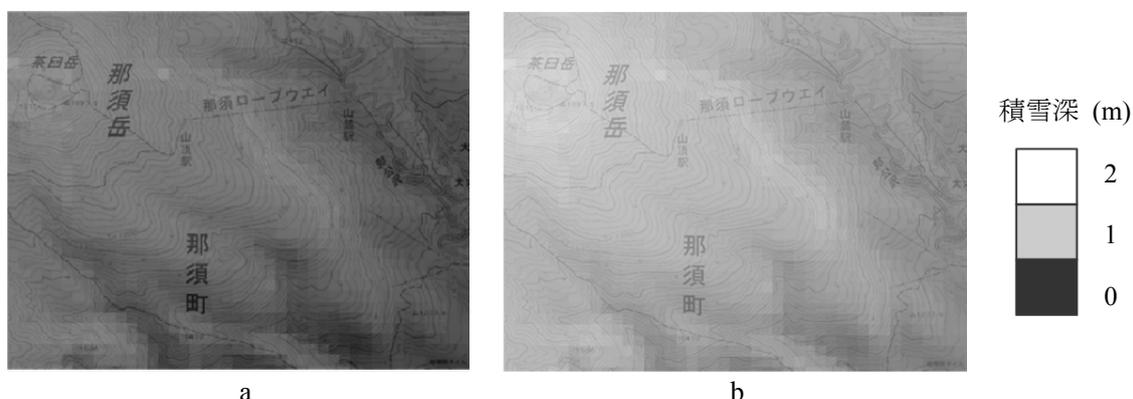


図6 ALPINE3Dを用いて計算した積雪深分布。3月26日から27日にかけての雪により全域で積雪深が増加した。 a: 3月26日正午 b: 3月27日正午

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