

積雪モデルの斜面積雪への適用 ～湿雪雪崩の危険度評価を目的として～

池田慎二・勝島隆史・松下拓樹・秋山一弥

1. はじめに

降り積もったばかりの雪（新雪）は、時間の経過とともに昇華・凝結により細かい球形（しまり雪）に変化すると同時にその上に積もった雪の荷重により圧密が進む。この過程において積雪は沈降し密度を増していく。また、降雨あるいは日射や高温による融雪が起こると積雪に水が浸透し雪粒子は急激に粒径を増してざらめ雪となる。これらの過程において、その時々気象条件によって積雪の構造は特徴付けられ、時に不安定な積雪が形成されることによって雪崩が発生する。

このため、雪崩の危険度を評価する上で積雪の状態を把握することは重要である。しかし、積雪は時々刻々と変化し続けている上に、斜面方位、標高等の地形的な要因によっても異なるため、積雪の状態を実測によってモニタリングすることは困難である。

このような時々刻々変化する積雪内部の粒子の状況（雪質）および積雪層構造、密度、含水率等を、気象データ（気温、降水量、日射、湿度、放射収支、風速等）を入力条件として計算するのが積雪モデルである。積雪モデルを活用して積雪の状態を正確に推定することが可能となれば、雪崩の危険度評価を行う上で有用なツールとなる。

ここでは、湿雪雪崩の危険度評価を目的とした場合の既存の積雪モデルにおける課題を整理し、再現性の向上について検討する。

2. 既往の積雪モデルの課題

湿雪雪崩は、融雪または降雨によって積雪に水が供給されることにより、含水率の高い脆弱なざらめ雪層が形成されることによって発生する。このため、積雪モデルを用いて湿雪雪崩の危険度を評価するには、ざらめ雪層の形成状況を正確に再現する必要がある。しかし雪崩の危険度評価への活用を考慮した既存の積雪モデル^{1), 2)}は、主に



写真-1 積雪内の水みち形成の例
インクを混ぜた水を積雪に浸透させた後の積雪断面(青く染まったところに集中的に水が浸透している)。

ヨーロッパの山岳地における乾雪雪崩の危険度評価を想定しており、湿雪雪崩には重点が置かれておらず、ざらめ雪層の形成状況の再現性に課題があった。湿雪の再現における課題は、大きく2つに分けられる。まず一つ目は「積雪層の境界における滞水の再現」である。これについては、Yamaguchi et al.³⁾が、透水係数の積雪粒子粒径依存性を考慮した水分特性曲線の式を提案し、積雪層の境界における滞水の再現性を高めている。

もう一つの課題は「水みちの再現」である。実際の積雪においては、降雨や融雪によって積雪表面から供給された水の一部は積雪内に均一に浸透するのではなく、「水みち」を通して速やかに排出される（写真-1、図-1A）。このため、実際にざらめ雪層の形成に寄与する水の量は、積雪表面から供給された水の量よりも少なくなる。よって、水の浸透をすべて均等として扱っていた従来の積雪モデルにおいては、ざらめ雪層の形成状況を過大評価してしまい、積雪全層に対するにざらめ雪層が占める割合(ざらめ率)が大きくなってしまったり、積雪全層がざらめ雪化する時期を実際よりも早く見積もってしまう（図-1B）。この課題に関しては、Katsushima et al.⁴⁾によって、積雪モ

デルにおいて仮想的に水みち領域と非水みち領域を設定し、水みちへ排出される水の量を調整することによってざらめ雪層の形成状況の再現性を高める手法が提案されている(図-1C)。図-1において、従来のモデル(図-1B)では、積雪内の水の浸透を均一に扱っているため、実際の積雪層構造(図-1A)よりも早い時期に積雪全層がざらめ雪に変化している。これに対し、水みちを考慮した積雪モデル⁴⁾の計算結果(図-1C)では、しまり雪が3月頃まで多く残っており、実際の積雪層構造(図-1A)をよく再現できている。しかし、これまでの研究成果は平地の積雪を対象として検討を行ったものである。斜面積雪における水の浸透には斜面と並行な向きの成分も存在するため、平地と斜面では水の浸透状況が異なり、雪質や積雪構造が大きく異なっていると考えられる。このため、積雪モデルを湿雪雪崩の危険度評価に活用するには斜面積雪における再現性の検討が必要である。

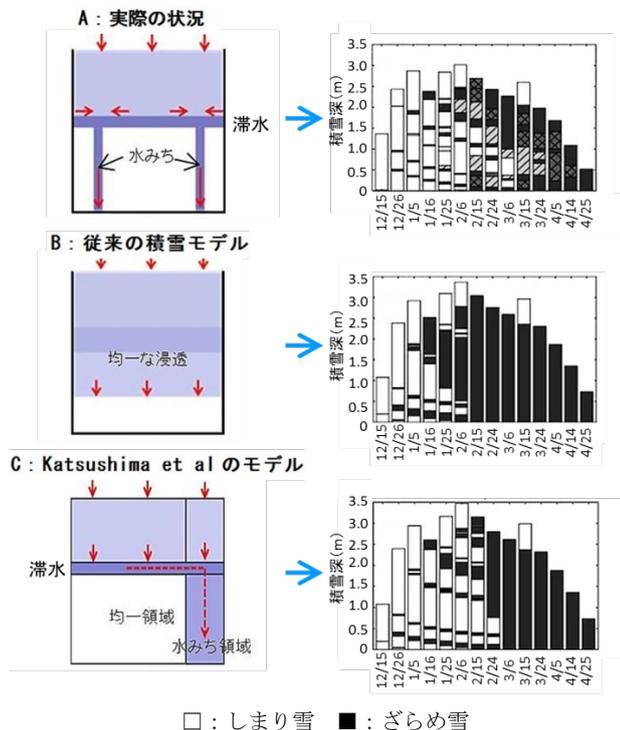


図-1 既往の積雪モデルにおける水の浸透の再現方法

3. 積雪モデルの斜面への適用に関する検討

水みちを考慮した積雪モデル⁴⁾の斜面への適用について、隣接する斜面と平地で同時に実施した積雪断面観測によって得られた積雪層構造の実測値との比較により検討を行う。

3.1 観測方法

積雪断面観測は、森林総合研究所十日町試験地において実施した。平地の観測は露場において、斜面の観測は勾配40°の北東向き試験斜面において実施した。積雪断面観測を行った平地と斜面の距離は、約50mである。観測では、雪質や粒径等の積雪層構造の観察を行い、積雪層全体に占めるざらめ雪層の占める割合をざらめ率とした。観測頻度は概ね20日に1回の頻度で、2012年1月5日から4月13日までの期間に計6回の観測を実施した。また、積雪モデルの入力条件として必要な気象データは、森林総合研究所十日町試験地の露場における観測値を用いた。

3.2 積雪モデル

Katsushima et al.⁴⁾によって提案された積雪モデルを用いた。ただし、粒径の異なる層の境界での滞水の再現性を向上させるために飽和透水係数をCalonne et al.⁵⁾によって示されたものに、水分特性曲線の式は透水係数と積雪粒子粒径の関係を考慮したYamaguchi et al.³⁾のものに変更した。

3.3 観測結果

図-2に、積雪断面観測による雪質および積雪層構造の推移を示す。全体的な傾向として、積雪初期(1月～2月)ではしまり雪が多くみられるものの、4月頃には概ね全層ざらめ雪となる。ただし、図-3に示すざらめ率の推移をみると、平地に比べて、斜面積雪のざらめ率が高いことがわかる(平均で26%の差)。最もざらめ率に差異がみられた3月上旬のざらめ率は、斜面で99%、平地で54%であった。また、観測時の積雪断面の例を写真-2と写真-3にそれぞれ示す。積雪断面の観察において、斜面では、平地に比べて局所的に水が浸透する鉛直方向の水みちの形成が少なく、平地よりも積雪層全体に均一に水が浸透している傾向が見られる。このことから、平地と斜面における積雪内の水の浸透状況の差異が、前述の雪質や積雪層構造の差異をもたらしていると考えられる。

3.4 積雪モデルの斜面への適用に関する検討

Katsushima et al.⁴⁾においては、水の浸透によって増加する積雪の空隙含水率に閾値を設けて、その閾値を超える浸透水の供給があった際には、以降の浸透水は水みちを通して排出されるよう設定する手法がとられている。ここでは、ざらめ率を指標として、積雪断面観測と積雪モデルの計算

におけるざらめ率が一致するように、積雪モデルにおける水みちへの流下が発生する空隙含水率の閾値を検討した。空隙含水率とは、積雪粒子間の空隙の全体積に占める水の体積の比である。積雪中で水の移動が可能になるのは、雪質によらず空隙含水率で7%程度以上であるといわれている⁶⁾。よって、水みちが形成される空隙含水率の閾値を7%から徐々に増やしていき、ざらめ率の観測結果と計算値との平均二乗誤差 (RMSE) が最も小さくなった際の値を閾値として採用することとした。

その結果、斜面では7.41% (RMSE: 1.9%)、平地では7.17% (RMSE: 5.4%) とした際に最もざらめ率の再現性が良くなった。つまり、斜面の方が空隙含水率の閾値が大きく、水みちへ流下する水量が少なくなる。図-4は、この閾値を用いて積雪モデルで計算したざらめ率と積雪断面観測による実測値の推移を比較したものである。積雪モデルによるざらめ率の計算結果は、実測値における平地と斜面の違いをよく再現している。また、積雪層構造について、積雪断面観測による実測値 (図-2) と積雪モデルによる計算結果 (図-5) を比較すると、今回検討した空隙含水率の閾値を用いた積雪モデルによって、平地においては遅い時期まで、積雪中・下層にしまり雪層が残っているのに対し、斜面では、比較的早い時期に全層ざらめ化が進むという斜面と平地の積雪層構造の違いがよく再現されている。

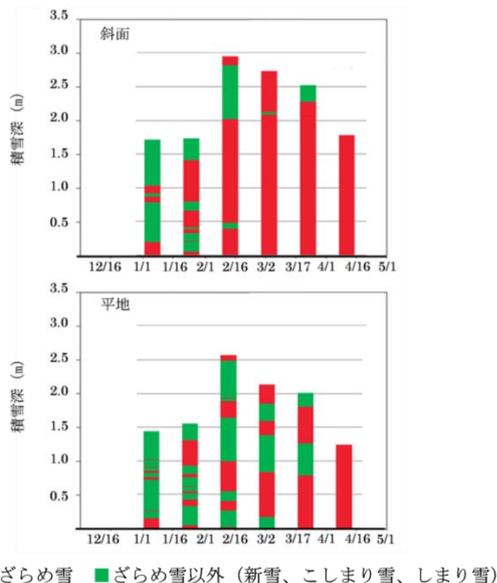


図-2 積雪断面観測結果(雪質および積雪層構造の推移)

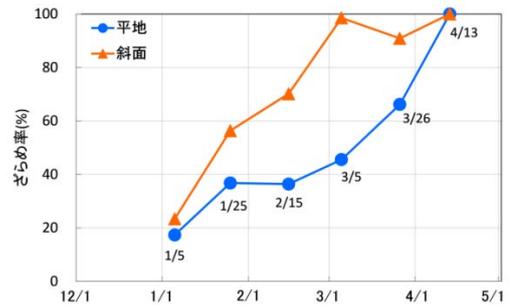


図-3 積雪断面観測結果(ざらめ率の推移)

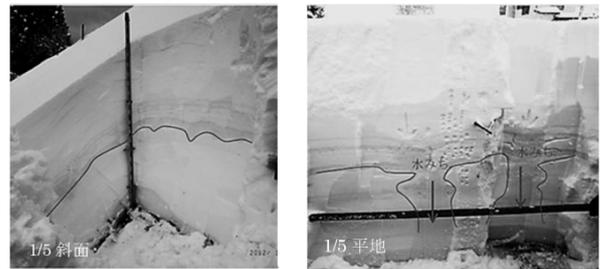


写真-2 積雪断面の例(2012年1月5日)

写真中の実線は浸潤前線を表す。斜面(左)においては、浸潤前線が積雪層とほぼ並行で均等な水の浸透が起きているのに対し平地(右)においては、水みちが形成され、局所的な水の浸透が起きている。



写真-3 積雪断面の例(2012年3月26日)

斜面(左)においては、水が均等に浸透しているために層構造が単純なのに対し平地(右)においては、水みちにより水が局所的に浸透したために無数の薄い積雪層が形成されている。

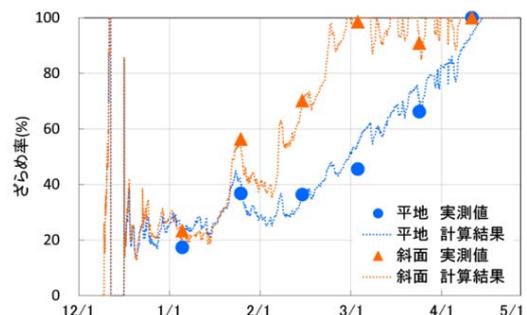


図-4 ざらめ率の推移(実測と計算結果の比較)

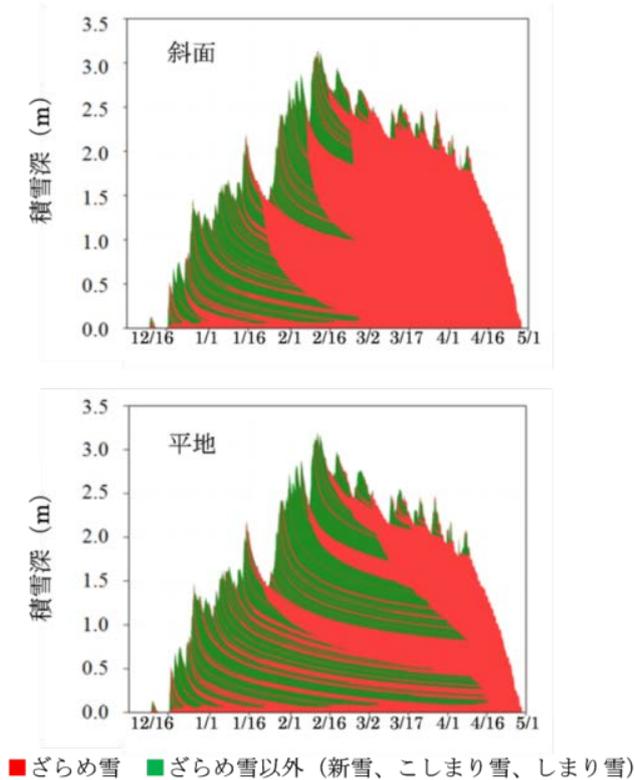


図-5 積雪モデルによる積雪層構造の計算結果

4. まとめ

積雪中の水みちへの排水量の適正化に着目して、積雪モデルによる斜面積雪におけるざらめ雪層の形成状況の再現性向上に関する検討を行った。その結果、斜面積雪における水みちへの排水量は従来研究が行われていた平地積雪における水みちへの排水量よりも少ない可能性があることが明らかになった。この結果を反映し、積雪モデルにおける水みちへの排水量を調整した結果、斜面積雪におけるざらめ雪化の進行状況の再現性を高めることができた。

今後は、今回検討した空隙含水率の閾値の妥当性を他の積雪断面観測結果を用いて検討することによって、積雪モデルによる斜面上の湿雪の再現性の向上に取り組む。さらに、再現性が向上した積雪モデルを用いて実際の雪崩発生事例を解析することにより、積雪モデルを活用した湿雪雪崩の危険度評価手法の検討を行う。

参考文献

- 1) Brun, E., David, P., Sudul, M. and Brunot, G.: A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, Vol.38, No.128, pp.13-22, 1992
- 2) Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C. and Satyawali, P.: A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part II: Snow microstructure, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.35, pp.147-167, 2002
- 3) Yamaguchi, S., Watanabe, K., Katsushima, T., Sato, A., Kumakura, T.: Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics, *Annals of Glaciology*, Vol.53, No.61, pp.6-12, 2012
- 4) Katsushima, T., Kumakura, T. and Takeuchi, Y.: "A multiple snow layer model including a parameterization of vertical water channel process in snowpack", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.59, pp.143-151, 2009
- 5) Calonne, N., Geindreau, C., Flin, F., Morin, S., Lesaffre, B., Rolland du Roscoat, S., Charrier, P.: 3-D image-based numerical computations of snow permeability: links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy, *The Cryosphere*, Vol.6, pp.939-951, 2012
- 6) Colbeck, S.C.: The capillary effects on water percolation in homogeneous snow, *Journal of Glaciology*, Vol.13, pp.85-97, 1974

池田慎二



(独)土木研究所つくば中央
研究所土砂管理研究グループ
雪崩・地すべり研究センター
専門研究員、博(理)
Dr. Shinji IKEDA

勝島隆史



(独)国立高等専門学校機構
富山高等専門学校商船学
科助教、博(工)
Dr. Takafumi KATSUSHIMA

松下拓樹



(独)土木研究所つくば中央
研究所土砂管理研究グループ
雪崩・地すべり研究センター
主任研究員、博(理)
Dr. Hiroki MATSUSHITA

秋山一弥



(独)土木研究所つくば中央
研究所土砂管理研究グループ
雪崩・地すべり研究センター
上席研究員、博(学)
Dr. Kazuya AKIYAMA