

積雪モデルを用いた湿雪雪崩の発生評価

松下拓樹・石田孝司

1. はじめに

雪崩は、積雪内部の水の存在の有無により乾雪雪崩と湿雪雪崩に分けられる。湿雪雪崩は、図-1に示すように融雪水や降雨などの水の存在により積雪強度が低下することと、降水による積雪への上載荷重の増加により斜面積雪が不安定となり発生する¹⁾。積雪内部の粒子の状況（雪質）や積雪層構造、密度、含水率等は時々刻々と変化するが、これを気象データ（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であれば、雪崩の発生評価を行う上で有用なツールとなる。

雪崩発生評価への活用を考慮した既存の積雪モデルは、主に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たものが多いが、最近では湿雪雪崩にも焦点を当てた取り組みが行われている²⁾。ただし、これらの積雪モデルは、平地の積雪を対象に開発されたものである。著者らのこれまでの観測^{3)~6)}により、積雪内部の水の浸透とそれに伴う積雪構造や雪質、密度等の変化は、平地と斜面で異なることが明らかになった（図-2）。そのため筆者らは、斜面での水の浸透特性や積雪構造の再現性を向上させた積雪モデルを用いて、湿雪雪崩の発生を評価する方法を検討した^{6),7)}。

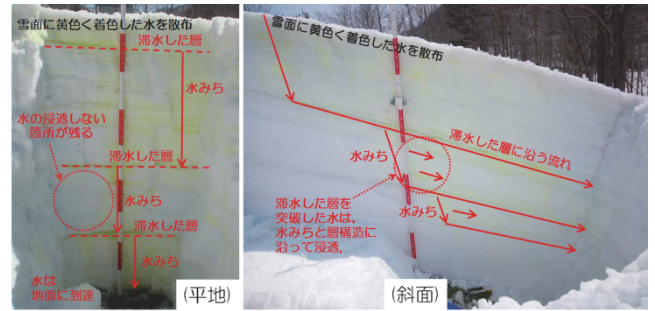


図-2 平地(左)と斜面(右)の積雪表面に黄色く着色した水を散布させたときの積雪内部の水の浸透状況の観察例

本報文では、これまで筆者らが検討してきた積雪モデルを活用した湿雪雪崩の発生評価方法の概要を説明し、それを試行した結果を報告する。

2. 湿雪雪崩の発生評価方法の概要

2.1 湿雪雪崩発生評価に用いる積雪モデルの概要

湿雪雪崩の発生評価に用いる積雪モデルは、積雪内部の水の浸透における水みちの影響を考慮したKatsushima et al.²⁾の積雪モデルを基本とし、これに積雪の透水係数と水分特性曲線に関する最新の知見を反映させた^{6),7)}。ここで、水みちとは、積雪内部に形成される鉛直方向の水の通り道のことである。図-2に示すように、水みちが形成された場合、積雪表面から供給された水がすべて積雪内を均一に浸透するのではなく、その一部は水みちを通して速やかに積雪底面に達する^{4)~6)}。Katsushima et al.²⁾の積雪モデルでは、積雪内部に仮想的に水みち領域と非水みち領域（均一に浸透する領域）を設定する（図-3）。例えば、図-3のように、浸透水がある積雪層に滞水した場合、その積雪層の空隙含水率の閾値を超えた水の量は、水みち領域を通じて速やかに地面に到達すると考え、それより下層の積雪への浸透（均一に浸透する領域）から除かれる。このように、水みちへ排出される水の量を調整することによって積雪層全体の再現性を高める工夫がなされている。

ただし、この積雪モデルは平地の積雪を対象に開発されたものであるため、斜面積雪の破壊現象

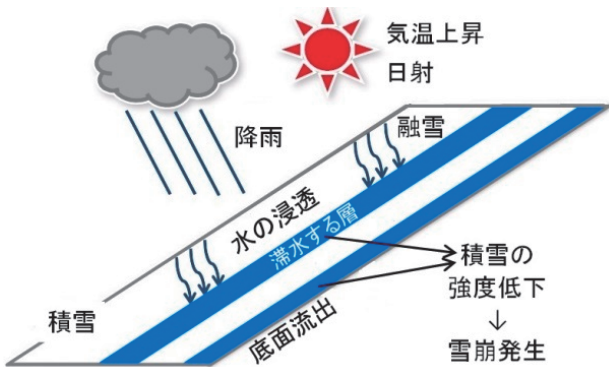


図-1 湿雪雪崩の発生過程の概念⁵⁾

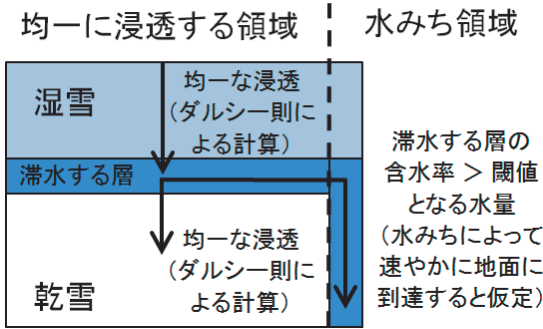


図-3 積雪モデルにおける水の浸透の概念

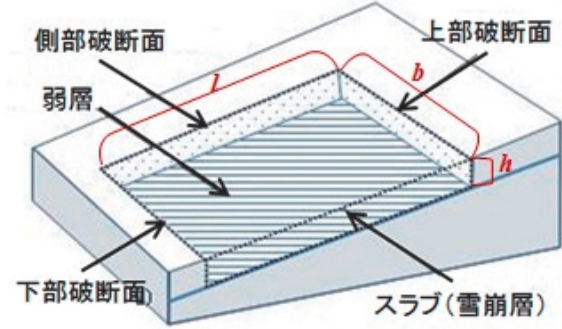


図-4 雪崩発生時の積雪の破壊の模式図

である雪崩の発生評価に用いるためには、この積雪モデルの斜面における積雪構造の再現性を向上させる必要があった。そこで、筆者らは、新潟県十日町市において実施した平地と斜面における3冬期の積雪断面観測データと積雪モデルによる計算結果を比較して、滞水する層の空隙含水率の閾値や水みちへの流出量の設定値を見直した。その結果^{4),6),7)}、積雪モデルによる融雪時の斜面での積雪構造の再現性を向上させることができ、これを湿雪雪崩の発生評価に用いることとした。

2.2 湿雪雪崩の発生評価の指標

湿雪雪崩の発生評価の指標として、ここでは斜面積雪の安定度 SI を用いる。斜面積雪の安定度 SI は、ある積雪層のせん断強度 σ_w (N/m^2) とその層の上に積もった雪の単位面積当たりの質量 W によるせん断方向の応力 $W \sin \theta \cos \theta$ (N/m^2) の比で表され (式(1))、安定度 SI が小さいほど斜面積雪が不安定であり、雪崩が発生しやすい状況にあると考えられる。

$$SI = \frac{\sigma_w}{W \sin \theta \cos \theta} \text{ -----式(1)}$$

ここで、 θ は斜面勾配 ($^\circ$) である。

ただし、式(1)は、せん断強度のみを考慮しているために、降雪によって応力が増加すると安定度 SI は小さいまま継続することがあり、実際には安定化した積雪でも安定度 SI は小さくなる場合があった⁸⁾。そこで、筆者らは、式(2)で表される雪崩層 (以下「スラブ」という) 全体の強度を考慮した安定度 SI_{wefs} 、つまりスラブ底面のせん断強度 σ_w に加えて、斜面上部の引張強度 σ_c 、斜面下部の圧縮強度 σ_s 、側面のせん断強度 σ_f の合計値とスラブ質量による応力の比を考案した^{8),9)}。

$$SI_{wefs} = \frac{bl\sigma_w + bh(\sigma_c + \sigma_s) + 2lh\sigma_f}{blW \sin \theta \cos \theta} \text{ -----式(2)}$$

ここで、 b 、 l 、 h はそれぞれスラブの幅、長さ、厚さ (m) である (図-4)。式(2)の斜面積雪の安定度 SI_{wefs} を用いることにより、安定度が低くなって斜面積雪が不安定と推定される期間の絞り込みが可能となった^{8),9)}。

2.3 湿雪雪崩の発生評価の流れ

図-5に、積雪モデルを用いた湿雪雪崩の発生評価の流れを示す。積雪モデルを活用した湿雪雪崩の発生評価は、まず気象データ (気温、降水量、日射、湿度、放射収支、風速など) を入力条件として、2.1節で斜面積雪の層構造の再現性向上を図った積雪モデルにより、積雪の圧密、熱収支、水の浸透、それに伴う雪質変化を計算し、積雪の密度や雪質、含水率、滞水する層の時間変化を計算する。積雪モデルで計算された積雪の密度と含水率から積雪強度を求め、スラブ (雪崩層) 強度を考慮した斜面積雪の安定度 (2.2節、式(2)) を計算する。そして、計算された安定度と実際の湿雪雪崩の発生状況を比較し、ここで示す湿雪雪崩発生の評価手法の妥当性について検討を行った。

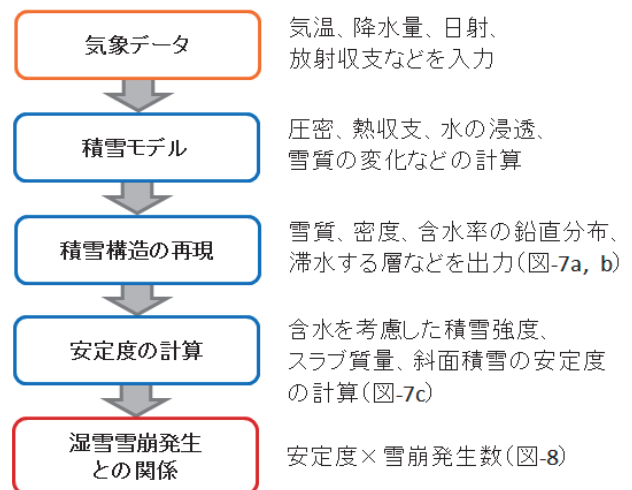


図-5 積雪モデルを用いた湿雪雪崩の発生評価の流れ

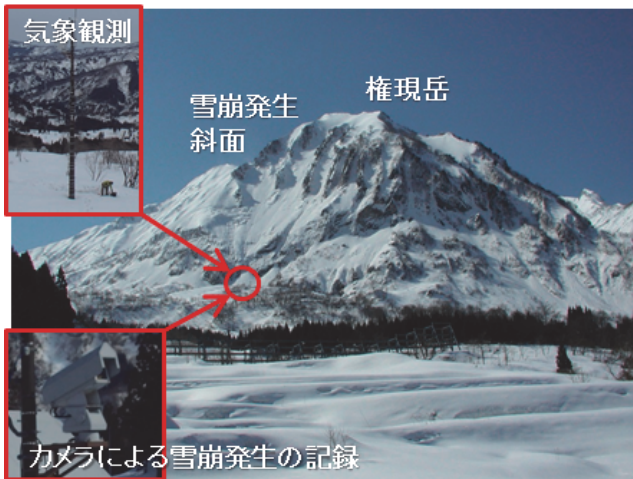


図-6 新潟県糸魚川市柵口の雪崩観測地

2.4 試行に用いた雪崩発生記録と気象データ

湿雪雪崩の発生評価方法の試行は、土木研究所で実施した新潟県糸魚川市能生地区柵口の権現岳(標高1104m)における観測データを用いて行った(図-6)。柵口の雪崩観測地では、カメラにより雪崩の発生を記録しており、気温、積雪深、日射、風速等を観測している。これらの観測データに欠測がなく、さらに地震計も用いて雪崩の発生を記録した2002年12月から2003年4月の期間を湿雪雪崩の発生評価方法の試行期間に選んだ。

雪崩種類(雪の乾湿、全層・表層)の判断を記録された映像と気象データから推定して、1日毎に雪崩発生件数を集計した。ここでは、雪崩発生件数の集計結果のうち、湿雪雪崩の発生件数のみを積雪モデルを活用した評価方法の検証に用いる。また、気温、積雪深、日射等の1時間間隔の観測値を、積雪モデルの入力データとした。

3. 湿雪雪崩の発生評価方法の試行結果

図-7は、積雪モデルを用いて計算した柵口観測地の雪質と積雪層構造(図-7a)、含水率(図-7b)、積雪安定度(図-7c)である。図-7より、2.1節で説明した積雪モデルを用いることにより、しまり雪からざらめ雪への層構造の変化(図-7a)、含水率と滞水する可能性のある層(図-7b)が再現され、積雪層内に安定度が低く積雪の破壊が起こる可能性のある層と時期(図-7c)が推定された。特に、図中に矢印で示した箇所は、水の浸透によってしまり雪からざらめ雪へ変化して間もない層の下部で含水率が高くなっており、また含みに

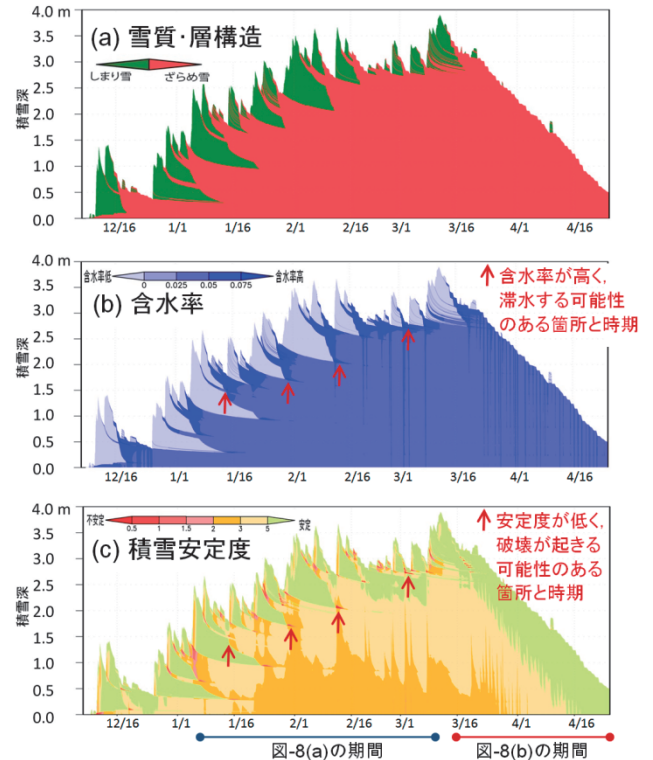


図-7 積雪モデルによる柵口の積雪構造の計算結果 (a)雪質と積雪層構造、(b)含水率、(c)積雪安定度

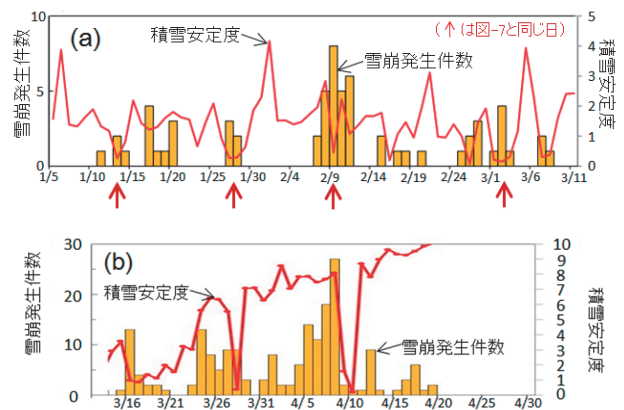


図-8 積雪モデルの計算結果から算出した斜面積雪の安定度の最小値と雪崩発生件数の時系列の比較 (a)1月5日～3月11日、(b)3月15日～4月20日

よる強度低下によって積雪安定度が小さくなると推定されている。

図-8aは、図-7c下に青線で示す期間(1月5日～3月11日)の柵口における湿雪雪崩の発生件数と積雪安定度の計算値の時系列を比較したものである。図-8aの積雪安定度は、図-7cで示した積雪各層の安定度の最小値を示している。図-8aにおいて、積雪各層の安定度の最小値と湿雪雪崩の発生件数を比較すると、安定度が低くなって斜面積雪が不安定と計算されるときに、湿雪雪崩の発生件数が増える傾向にある。特に、図-7cに矢印で

示した1月14日と27日、2月9日、3月2日の前後では、安定度が最も低くなる日に雪崩発生件数が多くなっている。また、雪崩の発生がみられない1月10日以前の時期や1月30日から2月6日頃までの期間などでは積雪安定度が比較的高く推定された。よって、2.1節で示した斜面における積雪構造の再現性を向上させた積雪モデルを用いて積雪安定度を計算することで、湿雪雪崩の発生を推定して評価することが可能と考えられる。

ただし、図-8bに示すように、融雪期後半(図-7c下に赤線で示す期間)では、湿雪雪崩の発生件数が多いものの積雪安定度は高く推定される場合が多い結果となった。これらの雪崩の多くは、積雪全層が地面との接触面で移動する全層雪崩であった。積雪安定度が一時的に小さくなる日(3月28日と4月9～10日)があるが、これは雪面付近の雪の融解により強度が低下して、積雪の表層部分で雪崩が発生すると推定されたためである。湿雪全層雪崩に対する発生評価の精度向上には、融雪期後半の湿雪全層雪崩の発生に関わる現象、特に積雪底面の破壊やすべりなどの影響の解明が今後の検討課題である。

4. まとめ

筆者らは、斜面での水の浸透や積雪構造の再現性を向上させた積雪モデルを用いて、湿雪雪崩の発生を推定し評価する方法を検討した^{6),7)}。この報文では、積雪モデルを活用して湿雪雪崩の発生を評価する方法に関するこれまでの取り組みの概要と、この方法を一冬期通して試行した結果を報告した。

試行の結果、積雪モデルによって計算される斜面積雪の安定度が低くなる時に、湿雪雪崩の発生件数が多くなることから、湿雪雪崩発生を推定して評価することが可能と考えられる。ただし、融雪期後半では、湿雪全層雪崩の発生件数が多くなるものの斜面積雪の安定度は高く推定された。今後、融雪期後半の湿雪全層雪崩に対する発生評価、特に積雪底面の破壊やすべりなどの影響等を検討していきたい。

謝 辞

積雪モデルの斜面積雪への適用に関して、国立研究開発法人森林総合研究所の勝島隆史博士にご協力をいただきました。また、本報文は故池田慎二博士と取り組んだ内容をまとめたものである。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) Tremper, B.: Wet snow, Staying alive in avalanche terrain, The Mountaineers Books, Seattle, WA, USA, pp.143-147, 2008
- 2) Katsushima, T., T. Kumakura and Y. Takeuchi: 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
- 3) 池田慎二、勝島隆史、伊東靖彦、竹内由香里、野呂智之: 平地と斜面の積雪における含水状態と積雪安定度の差異について、寒地技術論文・報告集、Vol.29、pp.29～33、2013
- 4) Ikeda, S., T. Katsushima, H. Matsushita, Y. Ito, Y. Takeuchi and K. Akiyama: Comparison of snowpack on a slope and on flat land focusing on the effects of water infiltration, Cold Regions Science and Technology, Vol.108, pp.91-97, 2014
- 5) 松下拓樹、池田慎二、石田孝司: 湿雪雪崩の発生と積雪内部の水の浸透との関係、土木技術資料、第57巻、第9号、pp.14～17、2015
- 6) 池田慎二、勝島隆史、松下拓樹、秋山一弥: 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～、土木技術資料、第56巻、第10号、pp.36～39、2014
- 7) 池田慎二、勝島隆史、松下拓樹、竹内由香里、秋山一弥: 斜面積雪における浸透水のしみちへの流下量の検討、寒地技術論文・報告集、Vol.30、pp.30～34、2014
- 8) 池田慎二、勝島隆史、竹内由香里、野呂智之: スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討、寒地技術論文・報告集、Vol.27、pp.46～49、2011
- 9) 池田慎二、勝島隆史、伊東靖彦、竹内由香里、野呂智之: スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討(その2)、寒地技術論文・報告集、Vol.28、pp.40～43、2012

松下拓樹



土木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、博士(理学)
Dr. Hiroki MATSUSHITA

石田孝司



土木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
Koji ISHIDA