

## 斜面積雪における雨水の浸透特性を考慮した湿雪雪崩の発生評価

国立研究開発法人土木研究所 雪崩・地すべり研究センター ○松下拓樹, 池田慎二, 石田孝司

### 1. はじめに

湿雪雪崩の発生要因は、雨水や融雪水の浸透により積雪強度が低下することと、降水による積雪の上乗荷重増加により斜面積雪が不安定となることである(図1)。しかし、積雪内部の水の浸透は、積雪の層構造等の影響を受け複雑である。さらに、積雪内部の水の浸透は平地と斜面で異なるため(図2, 松下ら, 2015), しまり雪からざらめ雪への雪質変化過程や積雪の安定性の時間変化も平地と斜面では異なる(池田ら, 2013; 2014a)。このような複雑な過程を経て発生する湿雪雪崩に対して、筆者らは、これまで斜面における水の浸透特性を考慮して、積雪の層構造を再現する積雪モデルを用いた湿雪雪崩の発生評価手法を検討してきた(池田ら, 2013; 2014b)。積雪モデルとは、積雪の密度や含水率、雪質や層構造等の時々刻々の変化を、気象データ(気温、降水量、日射等)を入力条件として計算するものである。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。ここでは、これまでに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について、試行した結果を報告する。

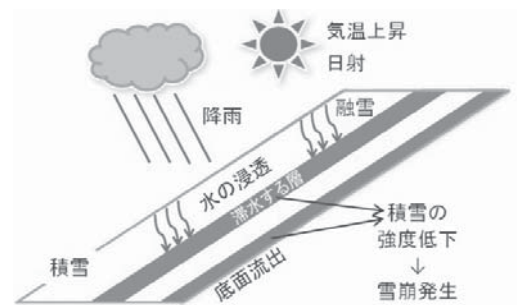


図1 湿雪雪崩発生の概念

### 2. 湿雪雪崩の発生評価方法

#### 2.1 湿雪雪崩の発生評価に用いる積雪モデルについて

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. (2009) の積雪モデルを基本とし、これに積雪の透水係数等に関する最新の知見を反映させた。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。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(図2, 松下ら, 2015)。Katsushima et al. (2009) の積雪モデルでは、仮想的に水みち領域と非水みち領域を設定して、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、平地積雪を対象に開発されたものなので、この積雪モデルを斜面積雪に適用させる必要があった。そこで、筆者らは、積雪モデルにおける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、3冬期のフィールド観測データと比較して検討を行い、融雪時の斜面における積雪構造の再現性を向上させた(池田ら, 2013; 2014b)。

#### 2.2 湿雪雪崩の発生評価の指標について

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を用いる。斜面積雪の安定度は、ある積雪層のせん断強度とその層の上に積もった雪の質量によるせん断方向の応力との比で表され、安定度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。ただし、せん断強度のみを考慮した安定度は、降雪のたびに小さくなって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が小さくなる場合があった。そこで、筆者らは、スラブ(雪崩層)全体の強度を考慮した安定度、つまりスラブ底面のせん断強度に加えて、斜面上部の引張強度、斜面下部の圧縮強度、側面のせん断強度の合計値とスラブの質量による応力の比を湿雪雪崩の発生評価に用いた(池田ら, 2011)。

#### 2.3 湿雪雪崩の発生評価の流れ

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、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

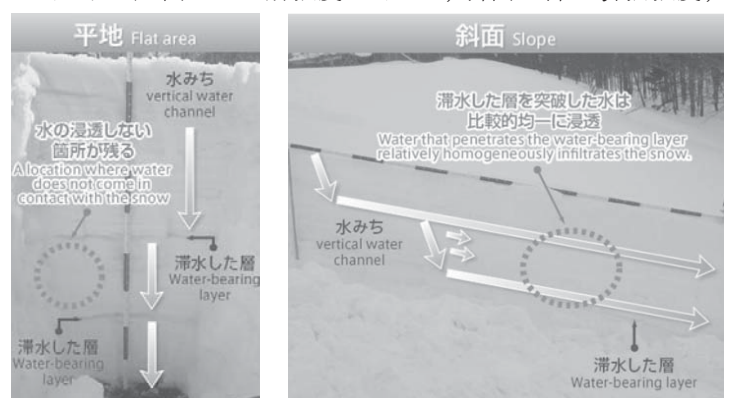


図2 平地(左)と斜面(右)の積雪内の水の浸透状況の例

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)強度を考慮した積雪安定度(2.2節)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。

## 2.4 試行に用いた雪崩発生記録と気象データ

湿雪雪崩発生の評価手法の試行は、土木研究所で実施した新潟県糸魚川市能生地区柵口・権現岳(標高 1104m)における観測データ(2002年12月～2003年3月)を用いて行った。この観測地では、カメラと地震計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。雪崩種類(雪の乾湿、全層・表層)の判断は記録映像と気象データから推定して、一日毎に雪崩発生数を集計した。ここでは、雪崩発生数の集計結果のうち、湿雪雪崩の発生数のみを積雪モデルを活用した評価手法の検証に用いる。また、気温、積雪深、日射等の観測値は、積雪モデルの入力データとした。

## 3. 試行結果

図3は、積雪モデルを用いて計算した柵口観測地の雪質・層構造(図3a)、含水率(図3b)、積雪安定度(図3c)の12月からの時間変化である。図3より、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3a)、含水率と滞水する可能性のある層(図3b)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箇所と時期(図3c)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、また含水に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3dは、図3c下に示す期間(1月5日～3月11日)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3dの積雪安定度は、図3cで示した積雪各層の安定度の最小値である。図3d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推定されるときに、湿雪雪崩の発生件数が増える傾向にある。特に、図3cに矢印で示した1月27日と2月10日の前後では、安定度が最も小さくなるときに雪崩発生件数が増えている。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高く推定された。よって、ここで示した積雪モデルを用いた斜面積雪の安定度により、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、図は省略するが、融雪期後半では、湿雪全層雪崩の発生件数が増えるが積雪安定度は高く推定される場合が多い結果となった。このことから、湿雪全層雪崩に対する発生評価の精度向上には、積雪底面の破壊や地面上における積雪底面のすべりなどの影響を考慮することが今後の課題である。

## 参考文献

- 池田慎二ら(2011): 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, 27, p.46-49  
 池田慎二ら(2013): 浸透水の影響に着目した斜面と平地の積雪の比較, 砂防学会研究発表会概要集, p.B420-B421  
 池田慎二ら(2014a): 斜面積雪における水の浸透状況と積雪安定度, 砂防学会研究発表会概要集, p.B428-B429  
 池田慎二ら(2014b): 斜面積雪における浸透水の水みちへの流量の検討, 寒地技術論文・報告集, 30, p.30-34  
 Katsushima, T., et al., (2009): A multiple snow layer model including a parameterization of vertical water channel process in snowpack, Cold Region Science and Technology, 59, p.143-151  
 松下拓樹ら(2015): 斜面積雪内部の雨水の移動に関する現地試験, 砂防学会研究発表会概要集, p.B310-B311

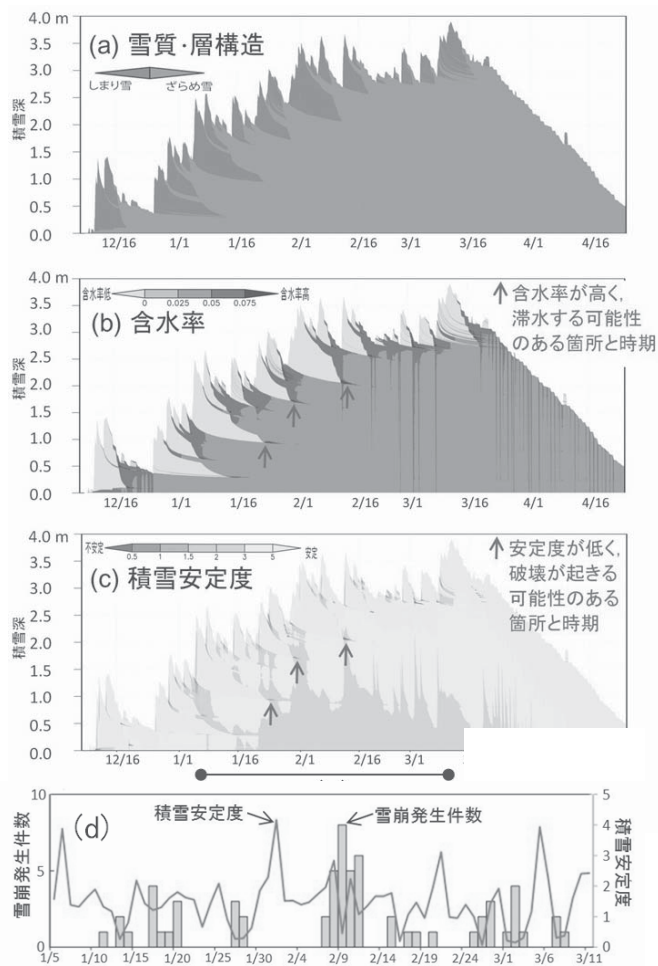


図3 積雪モデルによる(a)雪質・積雪層構造, (b)含水率, (c)積雪安定度の計算結果, (d)積雪安定度の最小値と湿雪雪崩発生数の時系列(柵口)