

# 数値シミュレーションを用いた合理的な雪崩防護施設設計諸元の設定手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 26

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：秋山一弥、松下拓樹、池田慎二

## 【要旨】

雪崩防護施設の合理的な設計諸元設定手法を検討するため、雪崩の層厚や流下経路を推定することができる数値シミュレーションの大規模乾雪表層雪崩への適用性について検討した。その結果、地形変化に伴う雪崩高さの変化を再現できることが明らかになった。ただし、雪崩高さを過小評価する場合があります、雪崩の高さをより適切に算出するには雪崩が流下する過程での雪の取り込み量や密度変化を考慮する必要があると考えられた。次に、雪崩数値シミュレーションを用いた対策施設の設計諸元の設定方法について検討した。雪崩高さの不足分を加算する簡易な方法を用いた場合においても、本研究で開発した雪崩数値シミュレーションを用いることにより、雪崩防護施設の規模が小さくなる箇所の検討ができることが明らかになった。

## 1. はじめに

大規模な斜面における雪崩対策では、雪崩予防柵等の発生区対策よりも雪崩防護工等の走路・堆積区対策の方がコストや自然環境への影響などにおいて有利な場合がある。しかし、走路や堆積区における雪崩対策施設の設計において、雪崩の流下経路や幅、高さといった設計諸元については、経験的な手法に基づいて設定することが多く、合理的な手法が確立していない。例えば、雪崩の高さは対象地や近隣において発生した雪崩の履歴を基に検討することになるが、実際にはデータが得られることは多くはない。雪崩の高さに関するデータが得られない場合は、一般的に発生区での初期層厚が流下距離によって一律に増加するものとして検討が行われるため、対策施設の規模が大きくなる傾向がある。また、谷幅の変化による層厚の変化等は考慮されていないといった問題点もある。

そこで、前期基盤研究課題「雪崩対策工の合理的な設計に関する研究（平成 21～23 年度）」において、近年土石流や地すべりなどを対象とした分野で発達が見られる数値シミュレーション技術の雪崩に対する適用性について検討した。その結果、崩壊土砂に関する連続体モデルを基に雪崩シミュレーションを開発し、湿雪全層雪崩事例の解析を行ったところ、概ね雪崩の状況を再現できることがわかった。さらに、このモデルによって算出された雪崩対策施設の設計諸元と現在日本において一般的に使用されている手法によって算出されたものを比較した

ところ、速度、層厚共に小さい値となり、連続体モデルを用いることにより、施設規模を縮小でき、コスト、環境負荷を軽減できる可能性があることが示された。ただし、従来の手法によるものよりも施設規模を縮小することは、安全面では慎重を要するものであり、さらなる事例検証が必要で、特に大規模な乾雪表層雪崩への雪崩数値シミュレーションの適用性を検討する必要がある。

そこで本研究では、数値シミュレーションを用いた合理的な雪崩防護施設設計諸元の設定手法を検討するため、

- (1) 雪崩数値シミュレーションの開発
  - (2) 雪崩対策施設の配置および設計諸元の設定手法の提案
- を行った。

## 2. 雪崩数値シミュレーションの開発

雪崩の層厚や流下経路を推定することができる数値シミュレーションを開発するために「雪崩対策工の合理的な設計に関する研究」（平成 21～23 年度）において、共同研究により開発した雪崩数値シミュレーションをベースとして大規模乾雪表層雪崩への適用性について検討した。

### 2.1. 対象とした大規模乾雪表層雪崩の概要

本研究において雪崩数値シミュレーションの適用性検証のための対象とした雪崩は、福島県南会津郡檜枝岐村において発生した大規模な面発生乾雪表層雪崩である。この雪崩は、栃木県北部を震源とする地震により誘発されたものと考えられている。

現地調査等から得られた雪崩の概要は以下のとおりである（図-1、図-2 参照）。

発生日：2013年2月25日

標高差：約700m

水平距離：約2,100m

雪崩発生厚：1.8m

雪崩発生区の面積：100,600 $\text{m}^2$

この雪崩においては、流下中の雪崩高さの目安となる樹木の破損高さのデータが走路上の数箇所において得られており、雪崩数値シミュレーション結果の検証において有用な事例である（図-3）。

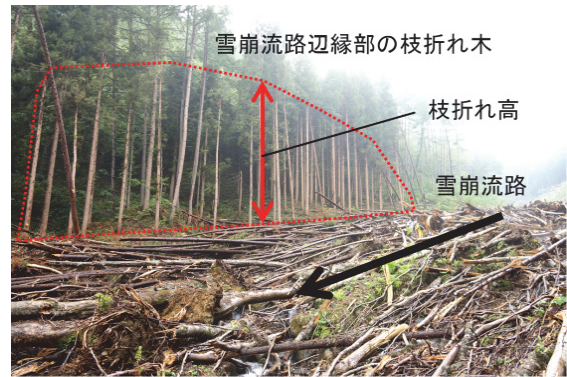


図-3 雪崩高さの目安となる樹木の破損状況

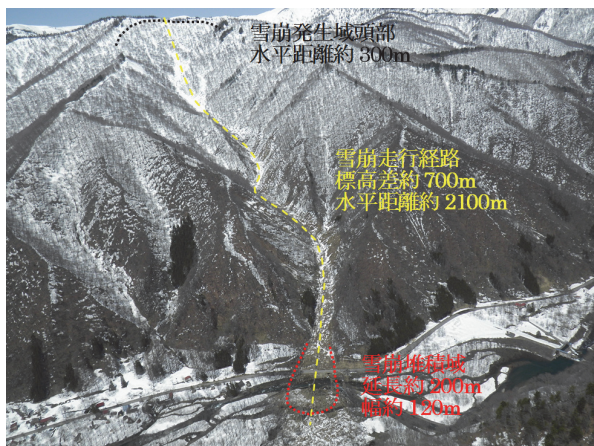


図-1 檜枝岐村において発生した大規模乾雪表層雪崩の概要（撮影：福島県 2013/4/13）

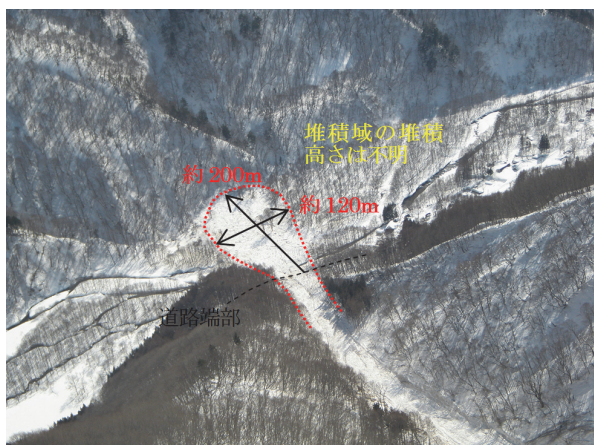


図-2 檜枝岐村において発生した大規模乾雪表層雪崩の堆積域の概要（撮影：福島県 2013/2/28）

## 2.2. 雪崩数値シミュレーションの計算条件

地形データは、国土地理院が公表している 10m $\times$ 10m メッシュ標高から、湯出の沢地区を含む 2.45km $\times$ 2.28km の範囲を利用した。雪崩の発生域と発生時の始動雪崩層厚は不明であったため、伊東ら<sup>1)</sup>の現地踏査結果をもとに、積雪深を 3.5m、始動雪崩層厚を 1.8m とし、発生域の面積は、雪崩発生直後に撮影された写真をもとにして 100,600  $\text{m}^2$  と想定した。このため、始動雪崩体積は 181,080 $\text{m}^3$  となる。なお、今回採用した地形データは無積雪期のデータであったため、積雪状況を再現するように標高データに積雪深 3.5m 分を一律付加した。これらを図-4 に示し、図-4 内の谷筋に合わせて設定した A-A 測線の断面図を図-5 に示す。また、本解析に採用した解析パラメータを表-1 に示す。雪崩の密度は伊東ら<sup>1)</sup>が雪崩経路付近で実施した積雪断面観測結果における弱層より上の積雪密度の平均値を採用した。内部摩擦角  $\phi_{\text{int}}$  は松澤ら<sup>2)</sup>を参考に設定し、底面摩擦角  $\phi_{\text{bed}}$  については実際の到達範囲に最も近くなる値を採用した。なお、本検討に用いている解析法の構成則等の詳細は文献<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>を参照されたい。

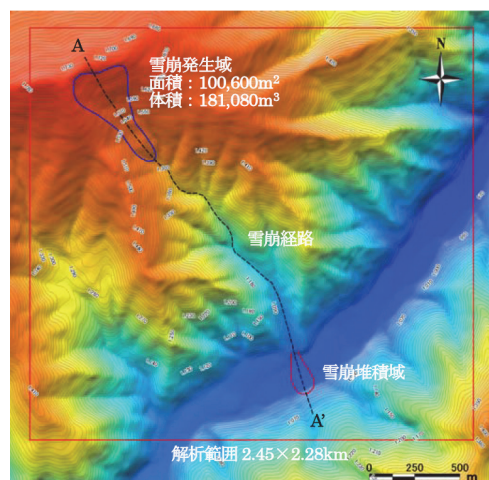


図-4 湯出の沢雪崩解析に用いた地形データと解析範囲および推定した雪崩発生域

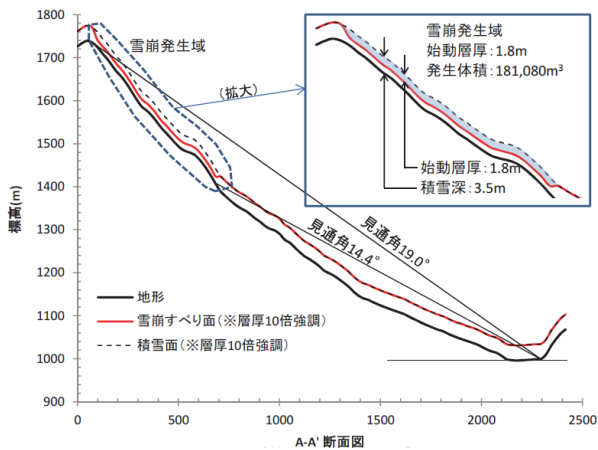


図-5 湯出の沢 A-A' 断面図

表-1 湯出の沢雪崩解析に用いた解析パラメータ

パラメータ	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	内部摩擦角 $\phi_{int}$ [degree]	底面摩擦角 $\phi_{bed}$ [degree]
値	260	30	3

### 2.3. 雪崩数値シミュレーションの計算結果

前述の解析条件にて行った雪崩数値シミュレーションの計算結果について示す。本解析における雪崩では、発生域末端部から水平距離約 1400m 下の湯出の沢末端部の道路まで到達するのに 116 秒を要した。平均速度は約 12m/s であり、表層雪崩の速度としては遅い値となった<sup>5)</sup>。図-6 に各メッシュグリッドにおける雪崩通過中の最大層厚の分布を示す。図-6 に示す通り、標高 1350m 付近に示す位置にて最高雪崩層厚 19.4m (積雪 3.5m+解析雪崩層厚 15.9m) が算出された。この位置は、図-4 および図-6 から分かるように谷筋に沿って流下する雪崩の最初の屈曲点付近である。図-7 に湯出の沢谷筋の A-A'断面上での雪崩通過中の最大層厚の分布図を示す。図-7 に示す通り、雪崩通過中に雪崩が達する最大の高さは標高 1350m 付近において 17.9m (積雪 3.5m+解析雪崩層厚 14.4m、図-6 の最大層厚発現位置とは異なる) と算出された。図-6 および図-7 から分かるように、谷筋の屈曲点に差し掛かる①、②、③の位置にて、雪崩層厚の増加が認められる。これは、狭い V 字谷への雪崩流入量よりも V 字谷からの流出量が小さいために雪崩層厚が一時的に増したものと考えられる。また、標高 1350m 付近から標高 1200m 程度までの連続的に屈曲している V 字谷を通過するときに一時的に層厚が増したり、斜面に衝突して流下方向が変化することは、雪崩速度の低下の一因と思われる、本検討において雪崩の平均速度が表層雪崩の一般的

な速度に比べて小さかったことの原因の一つと考えられる。図-8 に雪崩停止後の最終雪崩堆積層厚の分布図を示す。図-8、図-9 に示すように、雪崩停止後のデブリでは、標高約 1000m 付近に示す位置 (道路と河川との間付近) にて最大堆積層厚 9.4m (積雪 3.5m+解析雪崩層厚 5.9m) が算出された。図-9 に示すように、雪崩の到達距離に関しては、実際の雪崩の 206m に対して、解析では 198m となり 8m 未達であった。また、堆積域の幅は、実際の雪崩が 118m (破損木を指標にした幅) に対し、解析では 465m となり、約 4 倍程度の幅に拡散してしまう結果となった。到達距離に関しては、雪崩の流下速度が遅かったこと、堆積幅に関しては、河川に到達した際に平坦地であるため、モデル内で内部摩擦角  $\phi_{int}$  によるせん断強度よりも雪の自重によるせん断応力が勝るために均衡がとれる高さになるまで拡散したものと考えられる。

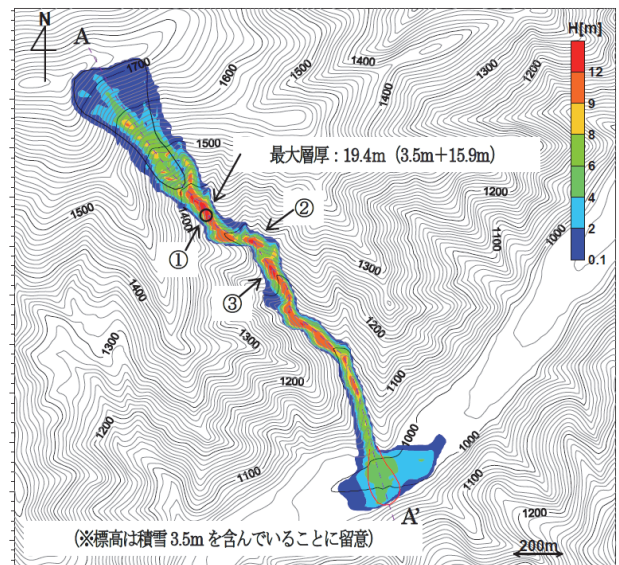


図-6 各グリッドにおける雪崩通過中の最大雪崩層厚分布図

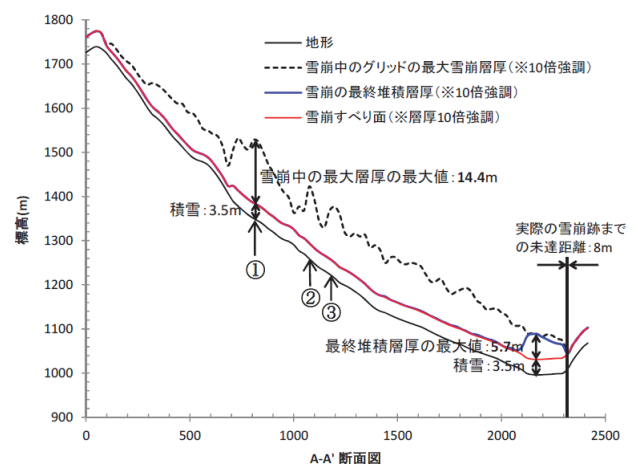


図-7 湯出の沢 A-A' 断面上での雪崩層厚

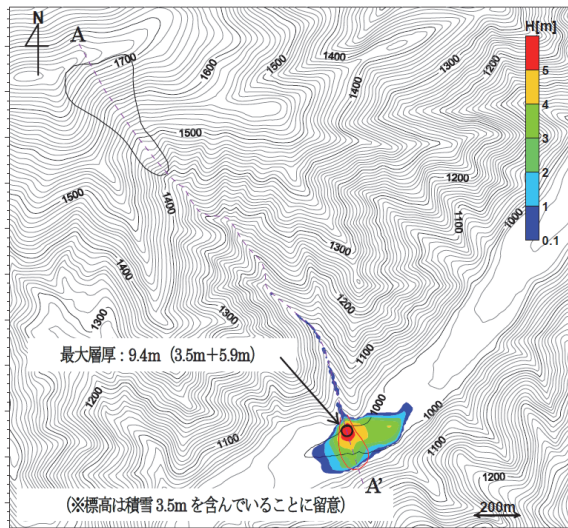


図-8 雪崩停止後の最終雪崩堆積層厚

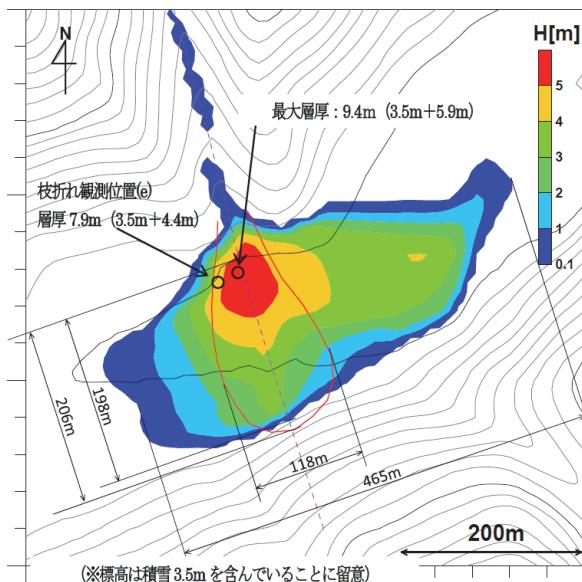


図-9 雪崩停止後の最終雪崩堆積層厚 (拡大図)  
赤い実線は実際の雪崩堆積の範囲

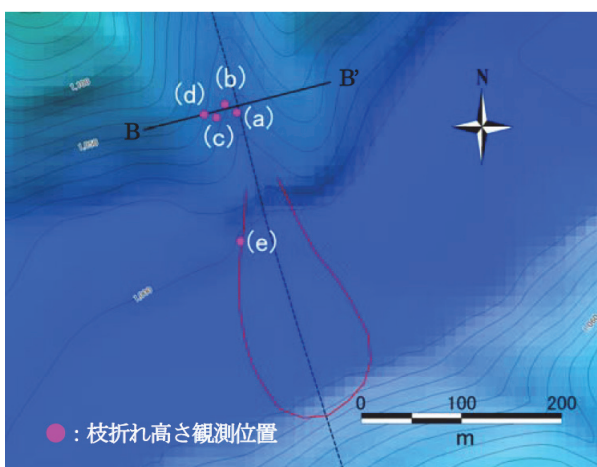


図-10 枝折れ高さ観測位置図

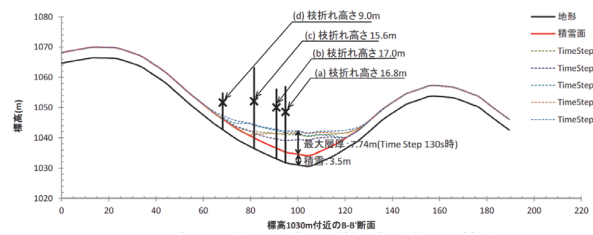


図-11 標高1030m付近での雪崩による枝折れ高と雪崩層厚

## 2.4. 雪崩数値シミュレーション結果の検証

解析対象とした雪崩について、池田ら<sup>6)</sup>による雪崩経路上での樹木の枝折れ高さのデータとその位置における本解析で得られた雪崩高さを比較した。池田ら<sup>6)</sup>は図-10に示す標高1030m付近((a)~(d))や標高1000m付近((e))において樹木の雪崩による枝折れ高さを計測している。そのデータに、図-10に示すB-B'断面での雪崩の層厚が最も高くなる時刻(雪崩始動時から130秒後にB-B'断面内で最大層厚7.74mが算出)の層厚を図-11に並べて比較した。図-11から分かるように、解析から求められた雪崩の高さは、計測された枝折れ高さまで達しておらず、半分程度の高さであった。この檜枝岐湯出の沢の雪崩は乾雪表層雪崩のため、雪崩断面の上部付近に雪煙り層を伴っていたものと考えられる。しかし、本検討に用いている解析法では、密度変化を考慮できない連続体モデルであるため雪煙り層は考慮できないことが影響している可能性があり、今後これらを検討する必要がある。なお、標高1000m付近の堆積域における枝折れ高さ観測点(e)では、枝折れ高さ8.4mに対し、解析結果は7.9m(図-8参照)であり、概ね一致している。

大規模乾雪表層雪崩を対象とした場合においても、連続体モデルを用いた手法によって、現在一般的に使用されている手法では表現できない谷幅の変化や屈曲等に伴う雪崩高さの変化が再現できる可能性があることが明らかになった。しかし、走路上の雪崩高さの絶対値に関しては過小評価される傾向がみられた。これは、雪崩が流下する過程での雪の取り込み量を考慮していないこと、雪崩の密度を均一として扱っていること、流下中の雪崩の密度変化を考慮していないこと等によるものであると考えられる。今後、合理的な雪崩防護施設設計諸元の設定手法を検討する場合には、これらの点を考慮する必要がある。

### 3. 雪崩対策施設の配置および設計諸元の設定手法の提案

ここでは、開発した雪崩数値シミュレーションを用いた雪崩防護施設設計諸元の設定手法について提案を行う。

#### 3.1. 雪崩高さの適正化

前章の結果のとおり、本研究で開発した雪崩数値シミュレーションは、地形変化による雪崩高さの変化を再現することはできるが、高さの絶対値は過小評価してしまう。この原因は、流下する過程での雪の取り込み量を考慮していないこと、雪崩の密度を均一として扱っていること、流下中の雪崩の密度変化を考慮していないことである。しかし、これらについては、現在、信頼性の高い研究成果は得られておらず、現存する他の雪崩シミュレーション技術においても共通の課題となっている<sup>7)8)</sup>。

そこで、ここでは、これらの課題については、後の研究成果に期待することとし、単純に不足分を加算する方法をとることとする。

#### 3.2. 従来手法との比較

図-12 に本研究で開発したシミュレーションにより算出された雪崩高さと従来手法により算出された雪崩高さの比較を示す。なお、雪崩の高さの不足分は、ここでは、樹木の破損高さにより得られた値から求めた。従来手法においては、この破損樹木の位置における高さとの整合が取れるように雪崩発生層厚から一定の割合で増加するように設定してある。

図-12 から、従来手法では、谷幅の変化による雪崩高さの増加を表現できないことや、沢を流下する際の高さを過小評価する一方で雪崩堆積区付近の雪崩高さを過大評価してしまうことがわかる。これに対して、本研究によって開発した雪崩数値シミュレーションを用いると、これらの課題を解消できる可能性があることがわかる。

例えば、雪崩防護施設を設置するには、雪崩の幅が狭く、高さが低い箇所が適しているため、従来手法であれば、沢の中間あたりが適することになるが、本研究によって提案する手法を用いれば、幅も狭く雪崩高さも低い沢の末端付近が適していることがわかる。

このように、本研究によって提案する手法を用いることによって、従来手法とは雪崩防護施設の設計が大きく変化することになる。

#### 3.3. 今後の課題

本研究によって提案する手法を用いることによって従来手法とは雪崩防護施設の設計が大きく変化することが

明らかになったが、雪崩の高さの絶対値をより適切に再現するには、流下する過程での雪の取り込み量、雪崩の密度分布、流下中の雪崩の密度変化等の検討すべき重要な課題が残されている。一方、上記のような物理的な観測データが得られなくとも、より多くの雪崩事例を解析することによって、雪崩高さの不足分を統計的に求めることも可能であると考えられる。これらは、今後の課題である。

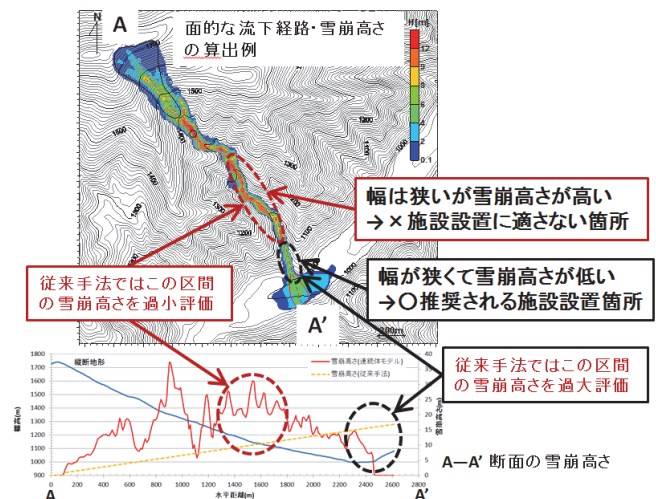


図-12 雪崩数値シミュレーションを用いた雪崩防護工設計諸元の設定手法

## 4. まとめ

雪崩数値シミュレーションを用いた合理的な雪崩防護施設設計諸元の設定手法について検討を行った。結果は次のとおりである。

### 4.1. 雪崩数値シミュレーションの開発

雪崩の層厚や流下経路を推定することができる数値シミュレーションを開発するために「雪崩対策工の合理的な設計に関する研究」(平成 21~23 年度)において、共同研究により開発した連続体モデルをベースとした雪崩数値シミュレーションの大規模乾雪表層雪崩への適用性について検討した。

大規模乾雪表層雪崩を対象とした場合においても、連続体モデルをベースとした雪崩数値シミュレーションを用いることによって、現在一般的に使用されている手法では表現できない谷幅の変化や屈曲等に伴う雪崩高さの変化が再現できる可能性が示された。しかし、走路上の雪崩高さの絶対値に関しては過小評価される傾向がみられた。これは、雪崩が流下する過程での雪の取り込み量を考慮していないこと、雪崩の密度を均一として扱っていること、流下中の雪崩の密度変化を考慮していないこ

と等によるものであると考えられ、雪崩防護施設設計諸元の設定手法を検討する場合には、これらの点を考慮する必要があることが明らかになった。

#### 4.2. 雪崩対策施設の配置および設計諸元の設定手法の提案

本研究で開発した雪崩数値シミュレーションを用いると、従来手法では、再現できない地形変化による雪崩の高さの変化や雪崩末端付近における雪崩高さの変化を再現できることがわかった。これにより従来手法とは雪崩防護施設の設計が大きく変化し、施設規模が小さくなる雪崩の幅が狭くて高さが低い箇所を検討に、この雪崩数値シミュレーションを活用できる可能性があることが明らかになった。

#### 4.3. 今後の課題

雪崩の高さの絶対値をより適切に再現するには、流下する過程での雪の取り込み量、雪崩の密度分布、流下中の雪崩の密度変化等の検討すべき重要な課題が残されている。一方、上記のような物理的な観測データが得られなくとも、より多くの雪崩事例を解析することによって、雪崩高さの不足分を統計的に求めることも可能であると考えられるため、今後も継続的に事例解析を実施し信頼性を高める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 伊東靖彦・池田慎二・松下拓樹 (2013) : 2013 年 2 月に栃木県で発生した地震による雪崩, 寒地技術論文・報告集, 29, pp. 147-152.
- 2) 松澤勝・加治屋安彦・伊東靖彦 (2007) : 地震発生時の斜面積雪の安全性評価に関する一考察, 北海道の雪氷, 26, pp. 95-98, (社) 日本雪氷学会北海道支部.
- 3) 張馳, 伊東靖彦, 池田慎二, 田中頼博, 林一成, 野呂智之, 藤井登, 阿部真郎, 石井靖雄, 伊藤陽一 (2011) : 連続体モデルによるシミュレーション技術の雪崩に対する適用性の検討, 寒地技術論文・報告集, 27, pp. 230-233.
- 4) 張馳・吉松弘行・岩堀康希・阿部真郎 (2004) : 数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測, 日本地すべり学会誌, 41 (1), pp. 9-17.
- 5) 前野紀一・福田正巳 (編) (2000) : 基礎雪氷学講座III 雪崩と吹雪, 古今書院, pp. 86-88.
- 6) 池田慎二・伊東靖彦・畠田和弘・上石勲・安達聖・秋山一弥 (2013) : 福島県檜枝岐村で発生した大規模雪崩による枝折れ高について, 雪氷研究大会 (2013, 北見),

pp. 221

- 7) 加藤宏隆・大槻政哉・斎藤佳彦・清水康行・木村一郎 (2009) : MPS 法を用いた雪崩シミュレーションモデル構築に向けての検討, 寒地技術論文・報告集, 25, pp. 399-402.
- 8) 西村浩一. "雪崩の発生予測とダイナミクス." *混相流= Japanese journal of multiphase flow* 22.4 (2008): 348-356.

## Research on a Rational Design Method for Avalanche Protection Structures using Numerical Simulation

**Budget:** Grants for operating expenses General account  
**Research Period:** FY 2012-2014  
**Research Team:** Erosion and Sediment Control Research Group  
(Snow Avalanche and Landslide Research Center)  
**Authors:** AKIYAMA Kazuya  
MATSUSHITA Hiroki  
IKEDA Shinji

**Abstract:** In this study, a rational design method for avalanche protection structures using numerical simulation was developed in two steps.

(1) Development of avalanche numerical simulation

A case study was conducted to confirm the adaptability of the avalanche numerical simulation developed in our previous study for large-scale dry snow avalanches. The results showed that our numerical simulation can represent the change in avalanche height related against the terrain of the avalanche path. However, it was found that our simulation tends to underestimate the absolute avalanche height value in some cases, because the density profile and the changes in density and avalanche mass in motion are neglected. Hence, we proposed a simple way to correctly estimate the avalanche height.

(2) Proposal of the rational design method for avalanche protection structures using numerical simulation.

Our method can estimate the change in avalanche height related against terrain and the decrease in avalanche height near the run out zone. This estimation is not possible using existing method. Our method makes it possible to examine the rational protection structure size for comparison with existing method. Therefore, the results suggest that our method can be used to rationally design avalanche protection structures.

**Keywords:** avalanche, protecting structure, numerical simulation