

# 雪崩対策工の合理的設計手法に関する研究 (1)

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：野呂 智之、伊東 靖彦

## 【要旨】

雪崩対策工の合理的設計手法を検討するために以下の3つの項目について調査研究を行った。

### ・ 柵高と雪庇発達状況の事例調査

雪崩対策工(雪崩防止柵)の合理的設計手法を検討するために新潟県内における巻きだれ処理作業の事例調査を行った結果、処理の回数は積雪深に比例して増加することがわかった。また、現地試験により柵が積雪深より高い場合に巻きだれ雪が発達する状況を観察できた。

### ・ 数値シミュレーション手法の検討

雪崩対策工(雪崩減勢・防護工)の合理的設計手法を検討するために近年土石流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結果、連続体モデルは従来の雪崩運動モデルよりも高さの変化を詳細に計算可能であることがわかった。

### ・ 数値シミュレーションによる設計手法の検討

連続体モデルを用いて雪崩対策工(減勢・防護工)の設計諸元の算出を試みた結果、従来の手法と比べると速度は1/3、衝撃力は1/9、雪崩層厚は-2.8 m になった。これらから、連続体モデルを活用することにより、施設規模を適正な規模に縮小でき、コスト、環境負荷の軽減へ大きな効果を得られる可能性があると考えられる。

キーワード：雪崩対策施設、雪崩防護・減勢工、数値シミュレーション、巻きだれ雪

## 1. はじめに

雪崩対策工である雪崩予防施設や雪崩防護施設は大規模になることが多く、設計の合理化による施設規模の設定とコスト縮減が求められている。

雪崩発生区に設置される雪崩予防柵は、柵高を30年確率最大積雪深や既往最大積雪深などとして設計されるが、柵高が積雪より高い場合において柵の上部に雪庇（巻きだれ）が発達し、それが崩落して道路に達するおそれがある<sup>1)2)</sup>。このため巻きだれが発達すると積雪の除去を行う箇所もある。

一方、走路や堆積区に雪崩防護施設として設置される減勢工や防護工の高さは、雪崩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高さを決定している<sup>3)</sup>。つまり一次元地形で行われており、たとえば谷幅の広がりによる層厚の変化などは考慮されていない<sup>3)</sup>。このため施設規模を過剰に設定してしまう可能性もある。

さらに、雪崩予防柵では設計積雪深が小さくなると柵の数が増えるなどの課題が指摘されている<sup>4)5)</sup>。

そこで本研究では、雪崩予防柵の合理的な設計手法を検討するために

(1) 柵高と雪庇発達状況、柵間距離等の資料収集と事例調査

(2) 雪崩予防施設の比較試験

(3) 合理的な雪崩予防柵設計手法の検討

を、雪崩防護柵の合理的な設計手法を検討するために

(4) 数値シミュレーション手法の検討

(5) 数値シミュレーションによる設計手法の検討

を行った。このうちここでは雪崩・地すべり研究センターが主担当である(1)の一部と(4)、(5)とについて報告する。なお、(1)のその他の部分と(2)、(3)については「雪崩対策工の合理的設計手法に関する研究 (2)」を併せて参照頂きたい。

## 2. 柵高と雪庇発達状況、柵間距離等の資料収集と事例調査

雪崩予防柵の合理的な設計手法を検討するために「雪崩予防柵の柵高と巻きだれ発達状況の事例調査」等を実施した。本稿で示したほか文献(6)および、雪氷チームで実施した調査を「雪崩対策工の合理的設計手法に関する研究 (2)」で記している併せて参照頂きたい。

## 2.1. 雪崩予防柵の柵高と巻きだれ発達状況の事例調査

予防柵の高さと巻きだれ発達状況の関係を明らかにする目的で、実際に巻きだれを除去処理する作業がどの程度の頻度で行われているか事例調査を行った。

### 2.1.1. 研究方法

調査対象は、新潟県内の2箇所とした。1つは湯沢町内の国道17号で、平成17年度(平成18年豪雪時)から20年度までの4冬期分を、2つめは妙高市内の国道292号・妙高高原公園線・飯山斑尾新井線・飯山新井線で平成17、20年度の2冬期を対象とした。

各々資料を収集し、巻きだれ処理を実施した日付や場所、巻きだれ発達状況などを整理した。そのほか、施設台帳などから巻きだれ処理が行われた予防柵の柵高を可能な範囲で調査した。また、近傍の気象庁アメダス観測所(湯沢、関山)の積雪深データを収集・整理した。

### 2.1.2. 結果

巻きだれ処理の実施状況の例として、平成18年豪雪時に国道17号の4箇所て巻きだれ処理が行われた日付と積雪深を図-1に示す。他年度を含む傾向として積雪深が増加する時期よりも、やや減少傾向にある時期に作業が行われる場合が多い。これは作業時の安全確保や、降雪時に道路除雪が優先されることが要因と考えられる。

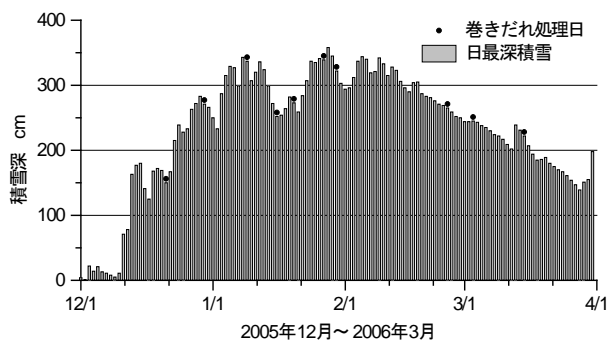


図-1 平成17年度の巻きだれ処理日(国道17号)と積雪深(湯沢)の変化

また、特に少雪であった平成18年度を除く毎冬期に巻きだれ処理作業が行われた国道17号の三俣東電前について、各年度冬期の最深積雪と巻きだれ処理回数の関係を調べたところ、最深積雪にほぼ比例して処理回数が増加していた(図-2)。

つぎに柵高を把握した箇所について、巻きだれ処理日の積雪深と柵高の関係(一例)を図-3に示す。巻きだれ処理の履歴なども考慮する必要があるが、柵高と積雪深が比例しない箇所があり、柵高が積雪深に比べて十分に

高くても巻きだれ処理が必要な事例が生じているものと考えられる。

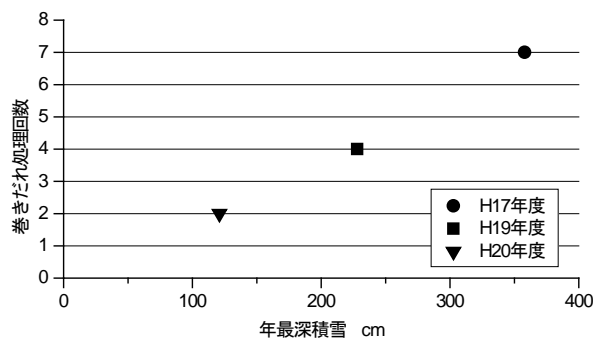


図-2 年最深積雪(湯沢)と巻きだれ処理回数の関係(国道17号三俣東電前)

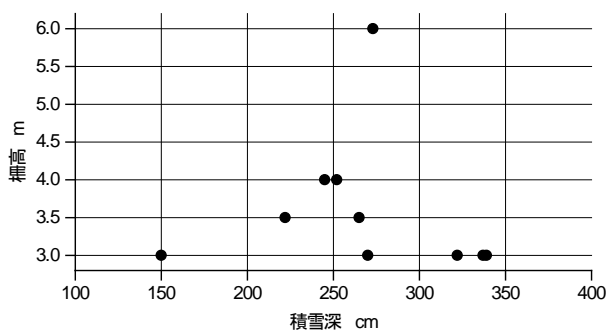


図-3 巻きだれ処理日の積雪深と柵高の関係(平成17年・国道17号)

## 2.2. 雪崩予防柵の巻きだれ発達状況および積雪移動量の調査

巻きだれの防止には、予防柵の高さを積雪深にくらべて十分に高くする方法と、逆に高さをやや低くし柵の上流側と下流側の積雪を一体化させる方法が考えられる。後者は景観やコストで有利であるが、雪崩防止効果を低減させる場合も考えられる。そこで、予防柵の柵高を変化させて、巻きだれ発達状況を定期的に調査した。

### 2.2.1. 調査箇所

調査箇所は、新潟県十日町市大倉地区の旧道で、南東向き斜面に高さ約4m、幅8.0mの予防柵が設置されている。ここで平成23年1~3月にかけて、一部の予防柵の横バーを上から2本分(-0.9m)または4本分(-1.7m)取りはずし、ほぼ1週間おきに巻きだれの発達状況を調査した(写真-1)。

さらに予防柵の高さと柵付近の積雪移動を調査するため、2月上旬に柵の上側約1mで積雪および表土に鉛直に内径50mmの縦穴を開け、もみがらを充填した。3月に

もみがら充填箇所の積雪を掘りかえし、積雪の移動量を測定した。調査は、正規の高さ、バー2本分低い箇所、4本分低い箇所の3箇所で行った（写真-1）。



写真-1 横バーをはずした予防柵  
（●印はもみがらの充填箇所）

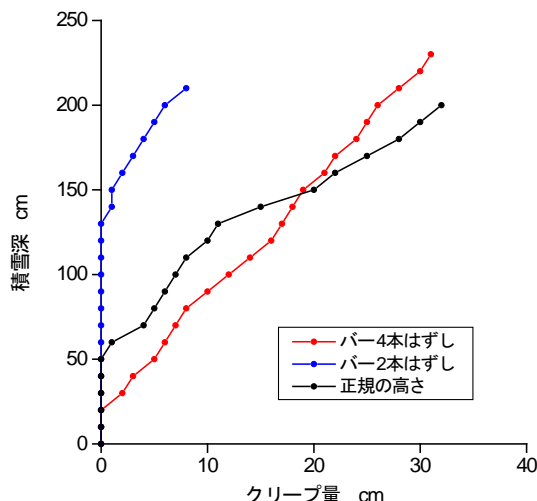


図-4 積雪移動量  
（十日町市大倉地区、2月8日～3月10、11日）

### 2.2.2. 結果

写真-2に、十日町市大倉地区における巻きだれ発達状況の変化を示す（1月19日、2月1日、2月8日）。2月8日以降は斜面上部から全層雪崩が発生し、予防柵周辺の積雪が乱されてしまったが、2月1日の時点では、横バーを4本分はずした箇所で柵の上流と下流側の積雪がつながっている一方、2本分はずした箇所では巻きだれが発達している様子がわかる。2月1日の付近の積雪深は325 cmで、バーを2本分はずした高さとはほぼ同等である。

図-4は、2月8日～3月10日頃の約1箇月間の積雪の移動量である。3箇所とも地表面での移動（グライド）は観測されなかった。また、積雪上部の移動（クリープ）も少なく、また柵の高さによる違いも明瞭ではなかった。これは、柵間の斜面傾斜角が大きく（60°以上）、斜面に積雪がつかずに落下してしまったためと考えられる。

### 2.3. まとめ

雪崩予防柵の柵高と巻きだれ処理の実態を明らかにするため、新潟県内における巻きだれ処理作業の事例調査を行った。その結果、巻きだれ処理の回数は積雪深に比例して増加するものの、柵高が積雪深より高い時点でも巻きだれ処理が行われている場合があり、巻きだれ処理が必要な状況が生じていると道路管理者が何らかの判断を下しているものと推測された。

また現地試験の結果、柵が積雪深より高い場合に巻きだれ雪が発達する状況を観察できたが、具体的な発達条件を見いだすことはできなかった。



写真-2 巻きだれ状況（十日町市大倉地区）  
上から1月19日、2月1日、2月8日

### 3. 数値シミュレーション手法の検討

#### 3.1. 研究の背景

大規模な斜面においては、雪崩対策にあたって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状況も多い。しかし、現在日本で雪崩対策のために雪崩の到達距離や雪崩層厚を求めるには、最大到達距離を与える見通し角を経験則から求める手法(高橋の18度法則<sup>7)</sup>)や、開水路流れの理論を応用した単純な1次元流体モデル(フェルミー(Voellmy)モデル<sup>8)</sup>)が用いられている<sup>9)</sup>。フェルミーモデルでは雪崩の速度 $v$ は

$$v = \sqrt{v_f^2 - (v_f^2 - v_0^2)e^{-2gS/\xi h}} \quad (1)$$

と求められ、 $v_f$ および $v_0$ はそれぞれ雪崩の終端速度と初速度、 $S$ は斜距離、 $\xi$ は乱流摩擦係数、 $h$ は雪崩の雪崩層厚、 $g$ は重力加速度である。雪崩の雪崩層厚は、過去の雪崩災害調査から図-5に示したように $S$ が100m増加するごとに $h$ が1m増加するように設定される<sup>9)</sup>が、雪崩防護工の高さは設計積雪深に雪崩層厚を足して設計されるため、走路の長い斜面に位置する既存の施設で高さ10m以上の非常に大規模なものになる場合があり、コストの増大が懸念されている。また、地形による層厚の変化(開けた地形と谷状地形の違いなど)も考慮されていないため、現実よりも過大な層厚にもとづいた設計になっている場合もあることが予想される。そこで、雪崩の速度や層厚分布の計算が可能なモデルについて、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。

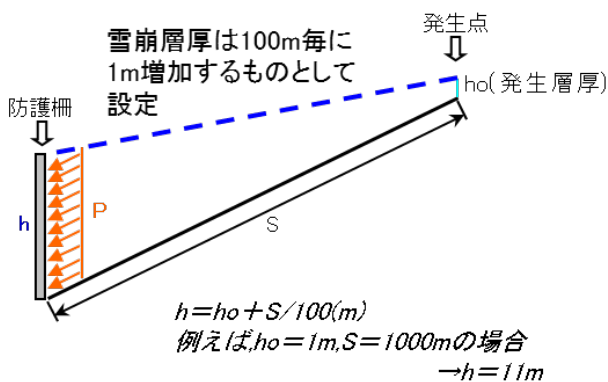


図-5 従来の対策施設の高さの設定方法(集落雪崩対策指針(案)<sup>9)</sup>を基に作成)

#### 3.2. シミュレーションの数式の検討

現在、雪崩の運動の数値シミュレーション手法が数多く提案されているが、これらは大きく流体モデル・剛体モデル・連続体モデル・粒子流モデルに分類することができる<sup>6)</sup>。

表-1にそれぞれのモデルの利点と欠点を示すが、現段階で精度よく雪崩の雪崩層厚の変化を求めるには、連続体モデルが適当と考えられる。最近ではスイスで雪崩のほか土石流にも対応した連続体モデル(RAMMS)が提案されている<sup>10)</sup>。また、溶岩流のために開発された連続体モデル(TITAN2D)を雪崩に適用する試みも報告されている<sup>11)</sup>。

表-1 従来の雪崩運動モデルの分類と長短

モデル	利点	欠点
流体モデル	計算が比較的簡単	地形に応じた層厚変化や堆積範囲は求められない
剛体モデル	計算が比較的簡単	地形に応じた層厚変化や堆積範囲は求められない
連続体モデル	雪崩の速度や層厚の変化を精度よく再現可能	プログラムの作成が比較的難しい(計算の安定性など)
粒子流モデル	雪崩の速度や層厚の変化を精度よく再現可能	高性能の計算機が必要、パラメータや停止条件の設定が困難

そこで、本研究では日本で開発された崩壊土砂に関する連続体モデル<sup>12)</sup>を雪崩に適用することを試みた。このモデルは計算の安定性を重視しており、さまざまな地形の雪崩斜面に適用する場合に適当なものと考えられる。

従来の計算手法では、計算時間の縮小のために時間ステップを大きくすると流れが速い場合などに流れの厚さ(雪崩層厚)が負の値をとり計算が不安定になる場合があるため、時間ステップを短くしなければならないという計算上の障害が生じることがある。本モデルでは、負の厚さが生じた場合、厚さを0にするように計算格子間のフラックスを修正し、質量保存を厳密に守るようにした点(格子流出修正法)が大きな特長である。

また、停止条件は土塊の底面摩擦応力の変化を考慮した手法<sup>13)</sup>にもとづき、底面摩擦応力が流れと反対方向(通常の流下時)から逆方向に変化する計算ステップで停止することを明示している。さらに、近年雪崩の質量変化の実測例が報告されている<sup>14)</sup>ことから、雪崩が流下する際の積雪の取り込みも計算することとした。以上の点を考慮したシミュレーションの数式は以下のように示される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = S_e - S_d \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5k_{ap}g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} \\ & = g_x h - \frac{v_x}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[ g_z + \frac{1}{\kappa_x} u^2 \right] h \tan \phi_{bed} \quad (3) \\ & - \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin \phi_{int} \end{aligned}$$

ここで、(2)式は連続の式を表し、 $t$ は時間、 $x$ および $u$ はそれぞれ流れの流下方向の座標と速度、 $y$ および $v$ はそれぞれ流れの横断方向の座標と速度、 $h$ は雪崩層厚、 $S_e$ と $S_d$ はそれぞれ雪の取り込みと堆積の量[m<sup>2</sup>/s]である。 $S_e$ は

$$S_e(x, t) = u_f(x, t) \frac{\rho_0}{\rho} w(x) \quad (4)$$

と表され、 $u_f$ は先端速度、 $\rho_0$ は積雪密度、 $\rho$ は雪崩の密度、 $w$ は雪崩の幅である。また、 $S_d$ は

$$\begin{aligned} S_d(x, t) &= 0 && \text{for } u(x, t) \geq u_c \\ S_d(x, t) &= C_d A(x, t) && \text{for } u(x, t) < u_c \end{aligned} \quad (5)$$

と表され、雪崩の速度が臨界速度 $u_c$ 以下になると、雪崩の横断面積 $A(w(x) \cdot h(x, t))$ 内の雪が堆積することを示している( $C_d$ は堆積係数で0~1の値をとる)。

(3)式は $x$ 方向の運動量保存式を表し、 $k_{ap}$ は主動(a)または受動(p)土圧、 $\kappa$ は斜面の粗度、 $\phi_{bed}$ は底面摩擦角、 $\phi_{int}$ は内部摩擦角、 $g$ は重力加速度であり、 $x$ と $y$ を入れ替えて $y$ 方向の運動量保存式を作成し、2次元的な広がり方を計算することができる。

### 3.3. 連続体モデルを使用した数値シミュレーションによる全層雪崩事例の運動解析

3.1において検討したシミュレーションについて雪崩への適応性を検討するために雪崩事例の解析を行った。

#### 3.3.1. 解析の対象とした雪崩

対象とした雪崩は2011年2月に発生した湿雪全層雪崩である(図-6)。この雪崩は斜面末端部の防護擁壁を乗り越えて道路に到達し、幅約20m、長さ約30m、最大高さ約5mの規模で道路周辺に堆積した。雪崩発生区での崩落規模は幅35m程度、長さ60~70m程度、積雪2~3m、崩落雪量は約5,000m<sup>3</sup>、道路への堆雪量は約2,500m<sup>3</sup>と推定されている。

地形データおよび積雪深については、該当地域の無雪

期と積雪期に計測されたレーザプロファイラ(LP)データを採用した(メッシュサイズは1m×1m)。積雪期のデータは雪崩発生前の4日前に計測されたものである(図-7(a))。ここでは、積雪期のDSM(数値表層モデル:雪面)から無雪期のDEM(数値地形モデル:地面)の差分をとり崩落雪量とした(図-7(b))。これは4,845m<sup>3</sup>となり、現地検分による想定崩落雪量5,000m<sup>3</sup>(図-6)とほぼ合致する結果である。

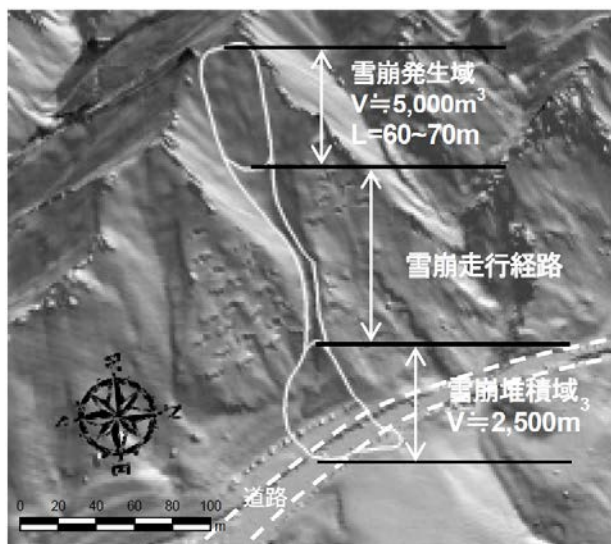


図-6 解析の対象とした雪崩事例の概要

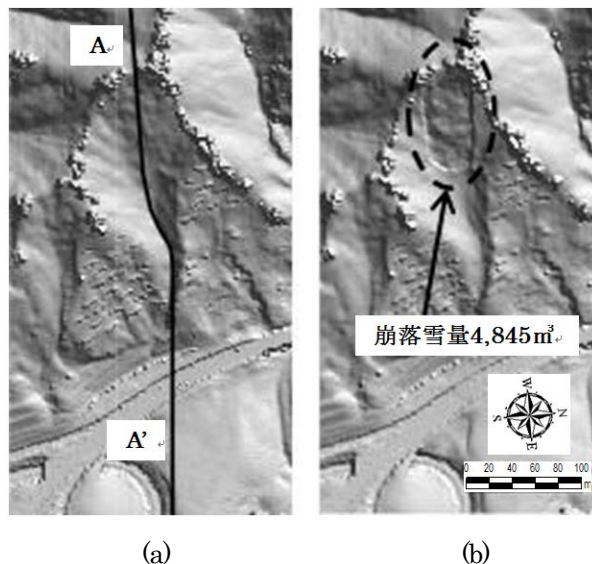


図-7 積雪状況(a)と無雪期DEMとの差分(b)

雪崩の密度は、ざらめ雪の一般的密度<sup>15)</sup>である400kg/m<sup>3</sup>を採用した。また式(3)における内部摩擦角 $\phi_{int}$ および底面摩擦角 $\phi_{bed}$ は、図-8に示す地形の見通

し角の上限値および下限値から想定した。図-8は図-7内のA-A'側線の断面図である。なお、本解析では、流下経路上に堆積している積雪の取込は考慮していない。

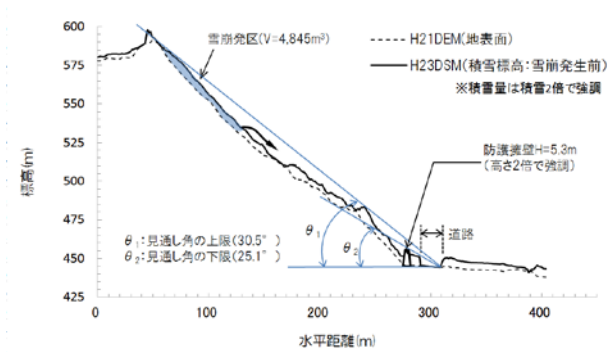


図-8 雪崩発生前の経路断面図

解析に用いたパラメータ等の解析条件を表-2にとりまとめた。

表-2 本検討に用いたパラメータ等

項目	パラメータ等
地形データ	積雪期 DSM(H23.2.23 撮影)
積雪深	積雪期 DSMと無雪期 DEMの差分
雪崩のすべり面	発生区の積雪深と一致(全層雪崩)
雪崩の密度 $\rho$	400kg/m <sup>3</sup>
内部摩擦角 $\phi_{int}$	30° (見通し角の上限)
底面摩擦角 $\phi_{bed}$	25° (見通し角の下限)

### 3.3.2. 解析結果

シミュレーションによる解析結果について表-3にとりまとめた。表に示すように、概ね対象とした雪崩事例の状況を再現することができた。

堆積範囲では雪崩が擁壁部を乗り越えて道路対岸部の雪山部まで達している状況が再現されている(図-9)。擁壁部での堆積雪高さは約10mと推定されていたが、本解析結果は9.2m(擁壁高さ5.3m+堆積雪層厚3.9m)であった。また、雪崩発生区直下の斜面の積雪量が増加していることから、斜面上に取り残される雪塊があった。図-10に雪崩の走行経路および到達範囲の比較を示す。図に示すように、雪崩の走行経路および到達範囲は概ね一致している。発生区下端からの直線での雪崩到達距離は、現地の想定が178mに対し解析では172m、堆積区での最大幅が現地の想定が47mに対し解析では79mであった。また、一部雪崩が経路側面の尾根を乗り越え分派した。なお、斜面末端部の堆積区における雪崩体積を比較すると現地では約2,500m<sup>3</sup>と推定されるが、本解析結果では3,166m<sup>3</sup>となった。

表-3 シミュレーションによる解析結果

項目	解析結果	実際の雪崩
堆積区で堆積高さ	9.2m	約10m
最大到達範囲(発生区下端からの直線距離)	172m	178m
堆積区での堆積幅	79m	47m
堆積区の雪体積	3,166m <sup>3</sup>	約2,500m <sup>3</sup>
平均速度	72km/h	不明

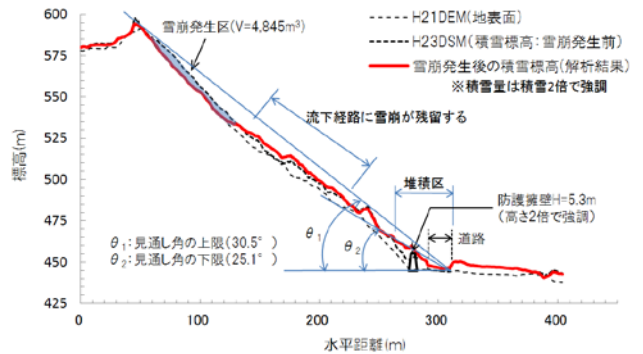


図-9 解析によって再現された雪崩の経路断面図

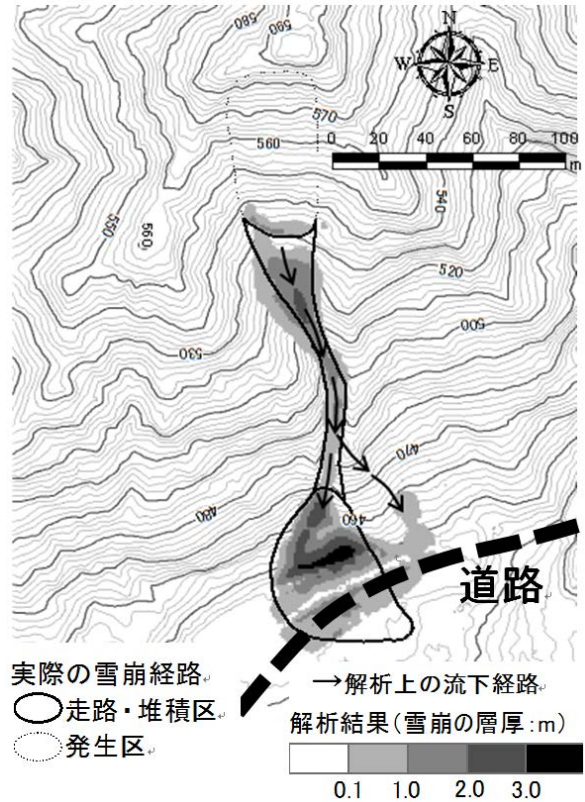
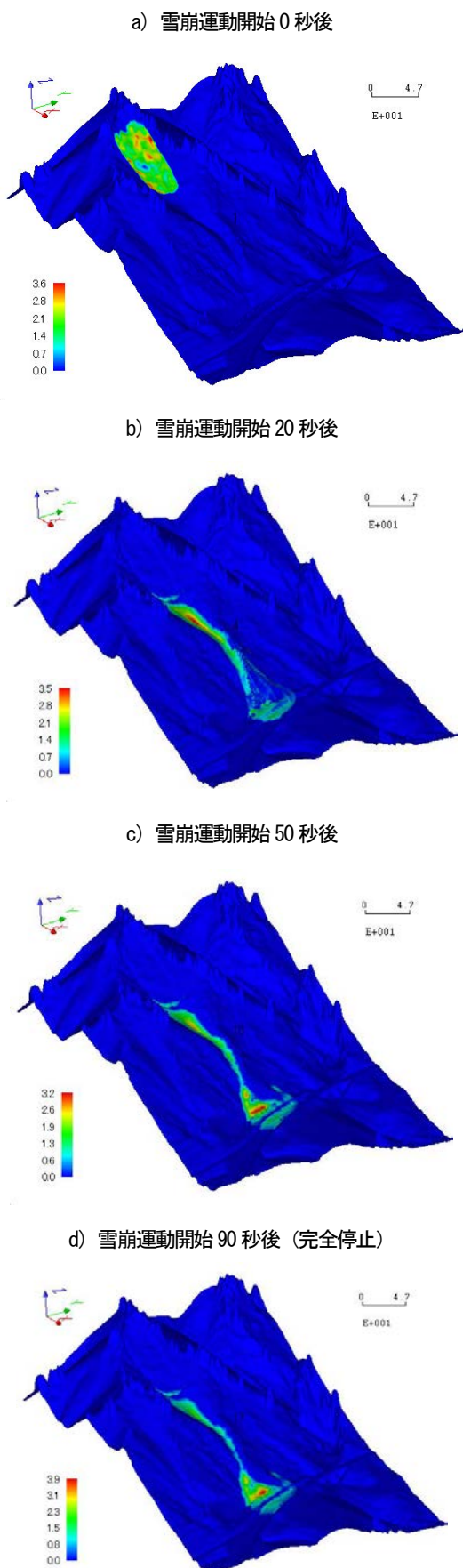


図-10 雪崩の流下経路と到達範囲の比較



図一 11 雪崩運動の時刻歴(解析)

図一 11 に解析による雪崩運動の時刻歴を示す。解析結果から雪崩の平均速度を算出する。雪崩発生区下端から最大到達範囲までの 172m を解析上では 20 秒で流下していることから、雪崩先端部の平均速度は 31km/h となる。実際の雪崩速度は計測されていないため比較はできないが、一般的な湿雪雪崩の運動速度 (40~80km/h)<sup>20)</sup> の範疇だと考えられる。

### 3.4. まとめ

雪崩対策工の合理的設計手法のため、数値シミュレーション手法について検討を行った。

この結果、連続体モデルは従来のモデルよりも高さの変化を詳細に計算可能であり、地形データと積雪深が分かれば、雪崩の流下経路、堆積区や流下層厚を表現できることから雪崩対策工の合理的設計において有用であることがわかった。

また解析の結果、対象とした事例においては概ね雪崩の状況を再現できた。

ただし本項に記載したものは一事例の解析であり、雪崩対策施設の設計へ活用するには多様な事例による検証が必要である。また、流下中の雪崩の幅や高さの変化などについて実際の雪崩との比較が行われていないため、模型実験などの活用も含め、モデルの検証と改善を行う必要があると考えている。

## 4. 数値シミュレーションによる設計手法の検討

3.1 および 3.2 において検討した結果、連続体モデルを利用することによって雪崩の流下範囲、経路、速度等を概ね再現できること、また流下層厚も表現できることがわかった。

ここでは、連続体モデルを活用して、雪崩対策施設の設計に必要な諸元を算出することを試みた。

なお、比較対象として現在一般的に雪崩対策施設の設計諸元の算出に使用されているフェルミー (Voellmy) モデル<sup>8)</sup>による諸元の算出も行った。

なお、対象とした事例は 3.2 において事例解析を行った全層雪崩であるが、ここでは仮想的に道路脇に設置された防護擁壁を取り除いた状態で雪崩の運動を再現した。

### 4.1. 解析方法

連続体モデルによる解析方法は 3.2 に示した。フェルミーモデルについては、「集落雪崩対策工事技術指針(案本編)」<sup>6)</sup>に記載された方法に従った。フェルミーモデル自体では雪崩層厚を算出できないので上記の指針案にしたがい流下距離 100m に対し雪崩層厚が 1 m の割合で増加

することとした(以降この手法を従来手法と呼ぶ)。なお、フェルミーモデルによる解析に用いた各パラメータは表-4に示した通りである。

表-4 フェルミーモデルによる解析に用いたパラメータ

項目	パラメータ等
地形データ	積雪期 DSM(H23.2.23 撮影)を基に作成した縦断地形(図-7、図-8 参照)
雪崩発生層厚 $h_0$ (m)	2.5 m (積雪期 DSM と無雪期 DEM の差分 2~3m の中間値に設定)
雪崩流下層厚 $h$ (m)	$h=h_0+S/100$ S: 斜距離(m)
乱流摩擦係数 $\zeta$	500(m/s <sup>2</sup> ) (全層雪崩の一般的な値である 400~600(m/s <sup>2</sup> ) <sup>6)</sup> の中間値)
動摩擦係数 $\mu$	初期値: 0.6 $\mu=0.01V+0.6$ ( $0 \leq V < 10$ ) $\mu=5/V$ ( $V \geq 10$ ) V: 雪崩速度(m/s)

## 4.2. 結果

ここでは、雪崩防護施設の設計諸元として重要な雪崩速度、雪崩層厚、雪崩流下範囲の解析結果について述べる。また道路近傍(実際に防護擁壁が設置されている箇所)に防護施設を設置することを想定し、設計諸元を算定することとした。

### 4.2.1. 雪崩速度

雪崩速度の解析結果を表-5 および図-12 に示す。

双方の解析結果において速度のピークの位置や絶対値は異なるものの、全体的な速度の変化傾向は類似していることがわかる。

しかし、フェルミーモデルによる解析結果では、速度の変化は斜面勾配の変化に伴って緩やかに変化しているのに対し、連続体モデルによる解析結果では、勾配の変化のみでなく谷幅の変化の影響を受けて頻繁且つ急激に変化していることがわかる。

連続体モデルによる施設設置個所の雪崩速度の計算結果は 7.7 m/s であり、フェルミーモデルの 23.6 m/s の 1/3 であった。これは衝撃力に換算すると 1/9 となり施設を設計する上では著しく大きな差異であるといえる。

表-5 速度の解析結果

	フェルミーモデル	連続体モデル
最大速度	24.3 m/s	56.1 m/s
平均速度	15.5m/s	8.0 m/s
施設設置個所速度	23.6 m/s	7.7 m/s

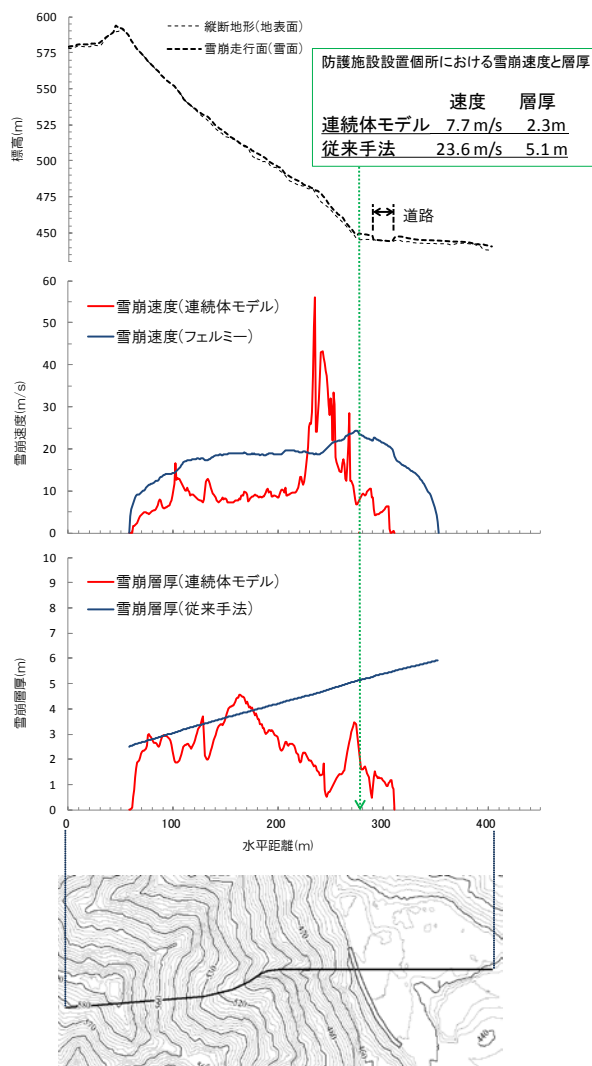


図-12 雪崩運動解析結果(速度と雪崩層厚)

### 4.2.1. 雪崩層厚

雪崩層厚の解析結果を表-6 および図-12 に示す。従来手法では地形とは全く関係なく 100 m の流下距離に対して 1 m の割合で層厚が一定に変化しているのに対し、連続体モデルでは、谷幅の変化に合わせて層厚が変化していることがわかる。また、雪崩末端付近においても従来手法では雪崩層厚が増加し続けるのに対し、連続体モデルでは、谷の広がりに伴う雪崩の幅の増加や流下途中の堆積による雪崩量の減少を再現しているため、雪崩層厚は徐々に減少し最終的には 0 m となる。

連続体モデルによる施設設置個所の雪崩層厚の計算結果は 2.3 m であり、従来手法の 5.1 m よりも 2.8 m 小さい。これは、防護施設の高さを設計積雪深 + 雪崩層厚とした場合、従来手法では 9.2 m となるのに対し連続体モ



デルでは、6.9 mとなる(ここでは仮に雪崩発生時の積雪深4.1 mを設計積雪深とした)。

表-6 雪崩層厚の解析結果

	フェルミーモデル	連続体モデル
最大層厚	5.9 m/s	4.6 m
平均層厚	4.2 m/s	2.5 m
施設設置箇所層厚	5.1m	2.3 m/s

#### 4.2.2. 雪崩流下範囲

流下範囲については、フェルミーモデルにおいては、モデル自体で流下範囲を算出することはできない。谷の広がりや尾根の高さ地形状況、あるいは、樹木に残った雪崩の痕跡等を基に経験的に設定することになる。

これに対し連続体モデルでは、図-13、図-14に示した通り平面図上に雪崩速度と層厚を再現することができる。これらを基に保全対象が許容可能な雪崩衝撃力や層厚を勘案して防護施設の幅と位置を決定することが可能である。

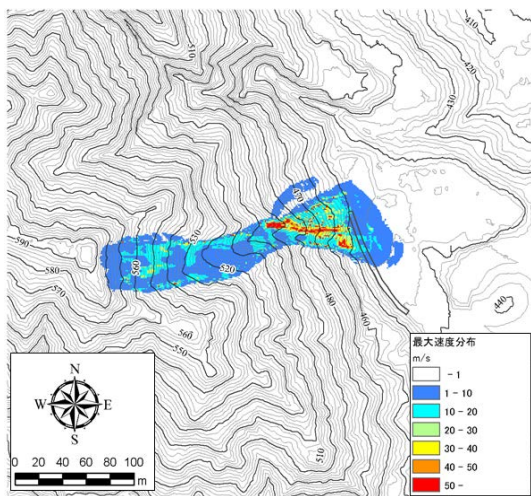


図-13 雪崩最大層厚分布図

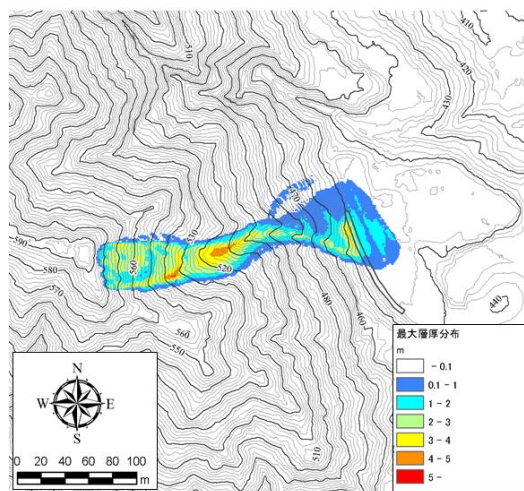


図-14 雪崩最大速度分布図

#### 4.3. まとめ

本研究において検討した連続体モデルと現在一般的に使用されているフェルミーモデルを用いて雪崩対策施設的设计諸元の算出を試みた。

連続体モデルによる計算結果は、フェルミーモデルの計算結果と比べると速度は1/3、衝撃力は1/9、雪崩層厚は-2.8 m という結果となった。これらの差異は、施設的设计条件設定において著しく大きいため、連続体モデルを用いて設計諸元を算出することにより、施設規模を適正な規模に縮小でき、コスト、環境負荷の軽減へ大きな効果を得られる可能性があると考えられる。

ただし、施設規模を縮小するという事は、安全性という面では慎重になるべきであり、このような手法を用いるにあたっては、モデルの精度・信頼性について更なる検証が必要と考える。

#### 5. まとめ

雪崩対策工の合理的設計手法を検討するために調査研究を行った。結果は次のとおりである。

##### 5.1.1. 柵高と雪庇発達状況、柵間距離等の資料収集と事例調査

雪崩予防柵の柵高と巻きだれ処理の実態を明らかにするため、新潟県内における巻きだれ処理作業の事例調査を行った。その結果、巻きだれ処理の回数は積雪深に比例して増加するものの、柵高が積雪深より高い時点でも巻きだれ処理が行われている場合があり、巻きだれ処理が必要な状況が生じていると道路管理者が何らかの判断を下しているものと推測された。

また現地試験の結果、柵が積雪深より高い場合に巻き

だれ雪が発達する状況を観察できたが、具体的な発達条件を見いだすことはできなかった。

### 5.1.2. 数値シミュレーション手法の検討

雪崩対策工(減勢・防護工)の合理的設計のため、既存の雪崩運動数値シミュレーション手法について既往モデルの整理と検討を行った。この結果、連続体モデルは従来のモデルよりも高さの変化を詳細に計算可能であり、地形データと積雪深から雪崩の流下経路、堆積区や流下層厚を表現できる雪崩対策工の合理的設計において有用であると考えられた。そこで、土砂分野で用いられている連続体モデルをベースにシミュレーションを構築した。

また解析の結果、対象とした雪崩事例においては概ね雪崩の状況を再現できた。

### 5.1.3. 数値シミュレーションによる設計手法の検討

雪崩対策工(減勢・防護工)の合理的設計手法を検討するために本研究において検討した連続体モデルと一般的に使用されているフェルミーモデルを用いて雪崩対策施設的设计諸元の算出を試みた。

連続体モデルによる計算結果は、フェルミーモデルの計算結果と比べると速度は1/3、衝撃力は1/9、雪崩層厚は-2.8 mとなった。

これらの差異は、施設的设计条件設定において著しく大きいと、連続体モデルを用いて設計諸元を算出することにより、施設規模を縮小でき、コスト、環境負荷の軽減へ大きな効果を得られる可能性があると考えられる。

### 5.1.4. 今後の課題

連続体モデルによる計算結果を基に、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る。このシミュレーション手法を実用化するにあたっては、モデルの精度・信頼性について更なる検証が必要と考える。

このために、今後別の事例解析を行うと共に模型実験等の活用も含め、モデルの検証と改善を行う必要がある。

## 6. 参考文献

- 1) 竹内政夫、小林昭彦：「雪崩予防柵にできる雪庇と柵高」、北海道の雪氷、27、21-24、2008
- 2) 金田安弘、竹内政夫：「新しい雪崩予防柵の提案～雪崩予防柵が抱える課題とその対応策について～」、北海道の雪氷、27、25-28、2008
- 3) (社)日本建設機械化協会・(社)雪センター(2005)：除雪・防雪ハンドブック(防雪編)、p.417

- 4) 松澤勝：「設計積雪深が小さくなるとなぜ雪崩柵の数が増えるのか」、コンサルタンツ北海道、115、pp45-47、2008
- 5) 大槻政哉：「雪崩対策施設的设计に関する課題～雪崩予防柵の列間斜距離に着目して～」、日本雪工学会誌、25、pp270-275、2009
- 6) 石井靖雄・伊藤陽一：平成21年度戦略研究報告書「雪崩対策工の合理的設計に関する研究」、(独)土木研究所雪崩・地すべり研究センター、2010  
http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2010/pdf/sen-37.pdf
- 7) 高橋喜平：「雪崩の被害(雪崩に関するシンポジウム講演と討論 [2])」、雪氷、22(1)、7-9、1960
- 8) Voellmy, A.: “Uber die Zerstörungskraft von Lawinen”, 1955 (in English: “On the destructive force of avalanches”, Alta Avalanche Study Center, Wasatch National Forest, USFS, Translation No. 2, 64pp, 1964)
- 9) 建設省河川局砂防部・社団法人雪センター：「集落雪崩対策工事技術指針(案)本編」、170pp、1996
- 10) Christen, M., P. Bartelt, J. Kowalski and L. Stoffel: “Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS”, In: Proceedings of the International Snow Science Workshop 2008, Whistler, Canada, 709-716, 2008
- 11) 西村浩一：「雪崩の連続体モデルの開発」、社団法人雪センター 平成20年度TC研究助成成果報告書、1-7、2009
- 12) 張馳、吉松弘行、岩堀康希、阿部真郎：「数値解析による崩壊土砂の到達範囲予測」、日本地すべり学会誌、41(1)、9-17、2004
- 13) 道上正規、宮本邦明、片嶋啓介、植村慎：「土塊の運動機構と1次元数値計算法」、水工学論文集、42、925-930、1998
- 14) Sovilla, B., F. Sommariva and A. Tomaselli: “Measurements of mass balance in dense snow avalanche events”, Annals of Glaciology, 32, 230-236, 2001
- 15) 11) 前野紀一・福岡正巳(1999)：基礎雪氷学講座第I巻、雪氷の構造と物性、古今書院、p.160.
- 16) 国土交通省砂防HP、砂防のやくわり、雪崩とその対策、http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h17nadare/kaise tsu.pdf

## Research on a Rational Method of Design for Avalanche Countermeasure Structures(1)

**Budget:** Grants for operating expenses General account  
**Research Period:** FY 2009-2011  
**Research Team:** Erosion and Sediment Control Research Group  
(Snow Avalanche and Landslide Research Center)  
**Authors:** Tomoyuki NORO and Yasuhiko ITO

**Abstract:** Following three subjects were researched to develop the rational design method of the avalanche countermeasure structures.

-Case study of development of snow cornice on snow fence

Case study of development of snow cornice at Niigata pref. was carried out. As a result, it is clarified that the frequency of snow removal of snow cornice has a positive correlation with the height of fence and snow depth. Further it was observed that the snow cornice developed when snow depth exceeded the fence height.

- Investigations of existing avalanche dynamics models.

Existing avalanche dynamics models were investigated to propose new method for estimating the height of the defense structure using avalanche dynamics simulation. As a result, it suggests that the continuum model is suitable to design for avalanche defensive measures, because it can estimate the transition of avalanche height in more details than other models.

- Investigations of the design method using the numerical simulation

Avalanche speed and height on an avalanche pass were estimated to examine the usefulness of continuum model. As results, avalanche speed and height estimated using continuum model were one-third and -2.8m respectively of them estimated by using an existing method. These results suggest that the design method using continuum model proposed by us has effectiveness to reduce cost and environmental load.

**keywords:** avalanche, supporting structure, snow cornice, retarding structure, numerical simulation