

雪崩対策工の合理的設計手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 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：石井 靖雄、伊藤 陽一

【要旨】

積雪や地形などの状況によって雪崩対策工の規模を縮小するための合理的な設計手法の検討を行った。雪崩予防柵については、予防柵の高さと巻きだれ（雪庇）発達の関係性を明らかにするため、新潟県内における予防柵の除雪実施状況の事例調査を行った。また、雪崩減勢工については、地形の変化を考慮した雪崩運動シミュレーションを用いて減勢工の高さを決定する手法の提案のため、シミュレーションに用いる数式の検討のほか、雪を用いた模擬雪崩実験を行い流れの速度や厚さの変化などの検証データを取得した。

キーワード：雪崩、予防柵、巻きだれ、減勢工、シミュレーション

1. はじめに

雪崩対策工（予防施設・防護施設）は大規模な施設になることが多く、設計の合理化による施設規模の減少およびコスト縮減が求められている。

雪崩発生区に予防施設として設置される雪崩予防柵については、その柵高を 30 年確率最大積雪深や既往最大積雪深などにもとづいて設計するが、雪崩予防柵が積雪より高い場合、柵の上部に雪庇状の巻きだれが発達し、それが崩落して道路に達するおそれがあることが指摘されている^{1),2)}。そのため道路管理上、巻きだれが発達すると予防柵が設置されている斜面で巻きだれ除去作業を行う必要が生じる（図 1）。

また、走路や堆積区に防護施設として設置される雪崩減勢工や阻止工については、発生区での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するため、施設規模が大きくなりやすい。ま

た、層厚を決定する計算手法が一次元地形で行われるため、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。そこで、近年発達が著しい数値シミュレーション技術を活用し、地形の変化を考慮した設計の合理化が求められている。

本研究では、事例調査により巻きだれの発達を抑制し、かつ雪崩発生を予防できる予防柵の設計手法や、地形の変化を考慮して施設の大きさを決定するための数値シミュレーション手法について調査を行った結果を報告する。

2. 研究方法

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。調査対象は、新潟県内で道路管理を行っている国土交通省長岡国道事務所および新潟県上越地域振興局管内とした。長岡国道事務所管内については平成 17 年度（平成 18 年豪雪時）から 20 年度までの 4 冬期の湯沢町内の国道 17 号における除雪作業について、また上越地域振興局管内については平成 17、20 年度の 2 冬期の妙高市内の国道等（国道 292 号・妙高高原公園線・飯山斑尾新井線・飯山新井線）の除雪作業についての資料を収集し、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わかる範囲で調査した。また、除雪作業が行われた地点近傍の



図 1 雪崩予防柵の上に発達した巻きだれの除去作業の様子（新潟県上越地域振興局提供）

気象庁アメダス観測所（長岡国道事務所管内は湯沢、上越地域振興局管内は関山）の積雪深データを収集・整理した。

2. 2 数値シミュレーション手法の検討

2. 2. 1 シミュレーションの数式の検討

現在、日本で雪崩対策のために雪崩の到達距離や流動層厚を求めるには、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³⁾）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⁴⁾）が用いられている⁵⁾。フェルミーモデルでは雪崩の速度 v は

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

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、 ζ は乱流摩擦係数、 h は雪崩の流動層厚、 g は重力加速度である。雪崩の流動層厚は、過去の雪崩災害調査から S が100 m増加するごとに h が1 m増加するように設定されるが、雪崩防護工の高さは設計積雪深に流動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10 m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、近年スイスなどで開発がすすんでいる雪崩の速度や層厚分布の計算が可能なモデルを導入し、地形の変化に応じて雪崩の流動層厚を計算するモデルの検討を行った。

2. 2. 2 シミュレーション検証のための実験

新しい雪崩運動シミュレーションの計算結果の検証データを取得するために、雪崩・地すべり研究センターの低温実験室内で模擬なだれ実験を行った。実験室

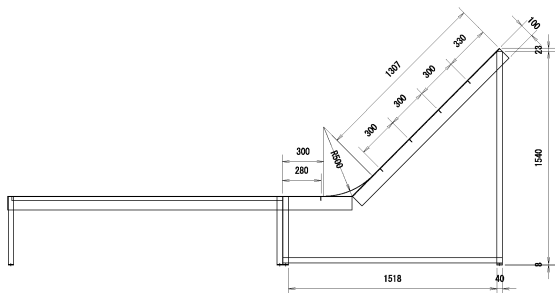


図2 模擬なだれの実験斜面（側面図、単位はmm）
（約18 m²）内部にステンレス鋼板製の実験斜面を設

置し、斜面に雪を流して人工的に小規模の模擬なだれを発生させ、始動から停止までの速度や厚さの変化を測定した。

図2に、低温実験室内に設置した雪崩実験斜面の側面図を示す。斜面の全長は4 mで、それぞれ長さ2 mの斜面部と水平部で構成され、斜面部は幅0.8 mで最大傾斜角45°、水平部は幅1.5 mである。実験用の試料として積雪からざらめ雪を採取し、目開き3.35 mmと5.60 mmのふるいに通して残ったもの（平均粒径約4.5 mm）を使用した。試験的に斜面の最上部から雪を流したところ、速度が大きく水平部で停止しなかったため、斜面上部から129 cm下方（屈曲部のやや上）から雪を流すこととした。また、雪の量が多くても同様に水平部で停止しなかったため、雪の量は重量200 g（体積約450 m³）とした。雪は斜面にふせた状態にして設置した円柱状のプラスチック製カップ（直径13.8 cm、高さ9.5 cm）に流し込み、カップ前部につけた糸を勢いよく上方に引っ張ることで流れを発生させた。

3. 研究結果

3. 1 雪崩予防柵の柵高と巻きだれ発達状況の事例調査結果

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箇所巻きだれ処理が行われた日付と、アメダス湯沢の積雪深との関係を図3に示す。他年度をふくむ全体的な傾向として、積雪深が増加傾向のときよりも、やや減少傾向にある時期に作業が行われる場合が多かった。これは、作業時の安全確保や、降雪時は道路の除雪が優先されることなどが要因と考えられる。また、非常に少雪であった平成18年度をのぞく毎冬期にわたって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、積雪深に

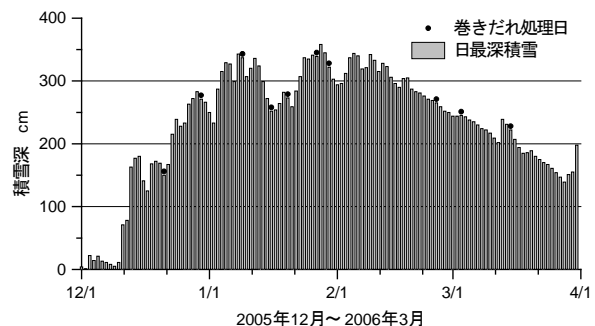


図3 平成17年度の巻きだれ処理日（国道17号）と積雪深の変化（湯沢）

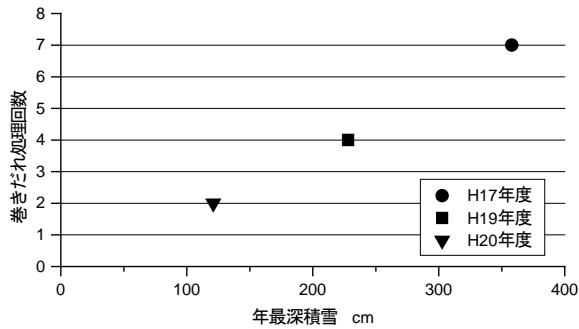


図4 年最深積雪（湯沢）と巻きだれ処理回数の関係（国道17号三俣東電前）

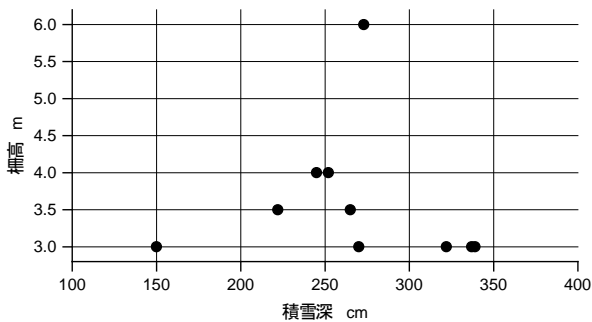


図5 巻きだれ処理日の積雪深（平成17年度・湯沢）と柵高の関係（国道17号）

ほぼ比例して処理回数が増加していた（図4）。

つぎに、柵高がわかっている箇所について、巻きだれ処理が行われた日のアメダス積雪深と柵高の関係を求めた例（平成17年度・国道17号）を図5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。

3. 2 数値シミュレーション手法の検討結果

3. 2. 1 シミュレーションの数式の検討結果

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。なお、雪崩の上部に発達する雪煙層の運動に関しては別のモデルも存在するが、本研究の対象は底面付近の高密度で衝撃力が大きい層（流れ層）であるため、除外した。

流体モデルは、雪崩の運動を開水路流れの理論を応用して取り扱うもので、フェルミーモデルに代表されるようにChézy公式と類似した雪崩の速度を求める式が得られる (§2.2.1 参照)。フェルミーモデルでは流れの速度が0になった場所を雪崩の最大到達地点とみな

すだけで堆積範囲は求められないが、雪崩の流量や幅を設定することで堆積厚さを計算できるように改良したモデルがその後提案され、スイスの雪崩ハザードマップ作成に使われた⁶⁾。

剛体モデルは、雪崩を剛体とみなしてその運動を記述するもの⁷⁾で、速度や流下距離などに比例して積雪を取り込んで雪崩の質量が増加すると仮定することも可能⁸⁾であるが、正確な堆積範囲の再現や、地形に応じた流動層厚の変化などは再現できない。なお、多くの流体モデルは簡便化のために雪崩を密度や流速が一樣なある厚さをもつ剛体のようなものと仮定する場合が多く、結果的に流体モデルと剛体モデルの計算手法はよく類似している⁹⁾。

連続体モデルは、雪崩を雪粒子の集合体としてとらえ、粒子間の摩擦や粘性のほか、土圧と同様の考えを導入することで、流れ内部の圧縮・引張による速度や層厚の変化のほか、堆積範囲なども計算することが可能である¹⁰⁾。数式化の際には、雪崩を連続体として浅水方程式などを用いて表現するため、流体モデルに粒子間摩擦などの項が加味された形で表現されることが多い。

粒子流モデルは、連続体モデルと同様に雪崩を雪粒子の集合体として考えるが、個々の粒子間や粒子-雪面間の衝突・摩擦過程をすべて計算して全体の速度や層厚の変化を求める点が異なっている¹¹⁾。計算機の進歩によってこのような手法が可能になってきているが、粒子数が多くなると非常に高性能の計算機が要求される。また、雪粒子の衝突などに関する測定データが不足しているほか、雪崩に適用した場合に停止条件の設定が困難なことが報告されている¹²⁾。

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流動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¹³⁾。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¹⁴⁾。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¹⁵⁾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モデルと考えられる。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

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

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¹⁶⁾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¹⁷⁾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。

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

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

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 は流動層厚、 S_e と S_d はそれぞれ雪の取り込みと堆積の量[m²/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、 ρ_0 は積雪密度、 ρ 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、 κ は斜面の粗度、 ϕ_{bed} は底面摩擦角、 ϕ_{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次元的な広がり計算することができる。

3. 2. 2. シミュレーション検証のための実験結果

模擬なだれの厚さ変化を測定するために、レーザ変位計（キーエンス LB-300・LB-1200）を斜面中央線上縦断方向に10 cm 間隔で10台設置し、出力を16チャンネルデジタルデータレコーダ（TEAC DR-M3）にサンプリング周波数2 kHzで同時収録した。図6は模擬なだれのスタート地点からそれぞれ1, 11, 21, 31, 51, 61, 71, 81, 91, 101 cm 下流側における厚さ変化の測定例であるが、流れの厚さは始動後に縦横に広がりながら流れるため、徐々に減少していく様子が見られる。同様の測定をレーザ変位計の位置を変えながら繰り返し行い、スタート地点から水平部端までの厚さ変化を求めた。

また、模擬なだれの速度は、縦断方向に並べたレーザ変位計の出力が、流れが到達した際に最初に変動するときの時間差と変位計間の距離から求められる。図7は変位計の位置を変えながら9回実施した実験について、上記の手法で求めた先端速度の変化であるが、始動後に速度が急速に増加した後、水平部で徐々に減

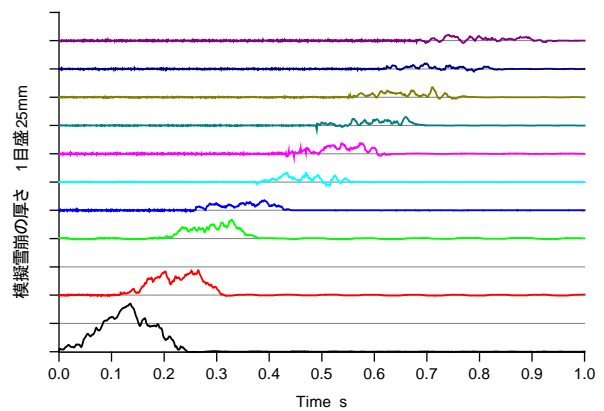


図 6 模擬なだれの厚さの時間変化の測定例（流れのスタート地点から1, 11, 21, 31, 51, 61, 71, 81, 91, 101 cm 下方の測定結果を下から順番に示したもの）

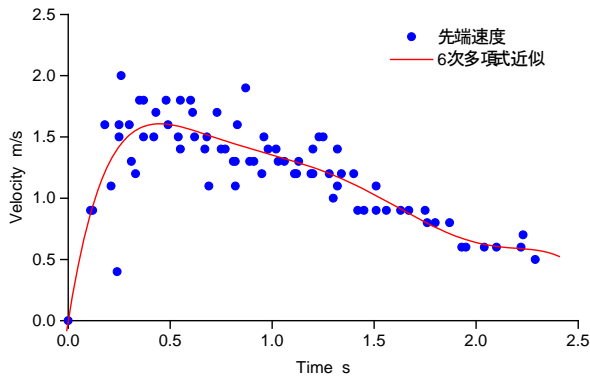


図7 模擬なだれの先端速度の時間変化

少していく様子がわかる。

今後は、実験に用いた雪と斜面の摩擦係数などのパラメータを求めてシミュレーションを行い、これらの実験結果の再現性を検討していく予定である。

4. まとめ

雪崩対策工の合理的設計手法のため、予防柵と減勢工について調査や実験を行った。

予防柵については、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。

減勢工については、高さを決める際のシミュレーション手法について、従来のモデルより高さの変化を詳細に計算可能な連続体モデルを検討することとし、モデル計算結果の検証データとして低温実験室内において雪を用いた模擬なだれ実験を行い、流れの速度や厚さの変化に関する実験データを取得した。

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) 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
- 4) Voellmy, A.: “Über 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)

- 5) 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
- 6) Salm, B.: “Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches”, Annals of Glaciology, 18, 221-226, 1993
- 7) Perla, R., T. T. Cheng and D. M. McClung: “A two-parameter model of snow-avalanche motion”, Journal of Glaciology, 26(94), 197-207, 1980
- 8) 前野紀一、西村浩一：「三次元地形における雪崩運動の数値計算」、低温科学 物理篇、46、99-110、1987
- 9) 前野紀一、遠藤八十一、秋田谷英次、小林俊一、竹内政夫：「雪崩と吹雪（前野紀一・福田正己編 基礎雪氷学講座Ⅲ）」、古今書院、236pp、2000
- 10) Pudasaini, S. P. and K. Hutter: “Avalanche dynamics”, Springer, 602pp, 2007
- 11) 越塚誠一：「粒子法（日本計算工学会編 計算力学レクチャーシリーズ⑤）」、丸善、144pp、2005
- 12) 大塚達也、大槻政哉、齋藤佳彦、清水康行、木村一郎：「MPS法の雪崩への適用に向けての二、三の検討」、419-424、2008
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) Sovilla, B., F. Somavilla and A. Tomaselli: “Measurements of mass balance in dense snow avalanche events”, Annals of Glaciology, 32, 230-236, 2001

Research on a Rational Method of Design for Avalanche Countermeasure Structures

Rational method is investigated to reduce a scale of avalanche countermeasure structures depending on snow and terrain conditions. For supporting structures, case study was carried out for removal of snow cornice to clarify the relation between the height of fence and snow depth. For defense structure, new equations for avalanche dynamics calculation was investigated to propose new method for deciding the height of the defense structure using avalanche dynamics simulation taking into account the change of terrain. In addition, small-scale avalanche experiments were carried out and the velocity and thickness fluctuation was measured to obtain verification data of simulation.

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