

# 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

池田慎二\* 伊東靖彦\*\* 野呂智之\*\*\* 田中頼博\*\*\*\* 林 一成\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

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、雪崩の流下経路や幅、厚さといった走路・堆積区における雪崩対策施設の計画における重要な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するため、対策施設の規模が大きくなりやすい(図-1)。また、雪崩の層厚を決定する計算手法が一次元地形で行われるため、例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等の問題点がある。このように、適切な設計諸元を設定することが難しいため、走路・堆積区における雪崩対策施設の選定事例が少なく、大規模斜面への雪崩対策が進まない原因の一つになっている。

このような問題に対処するため、雪崩・地すべり研究センターでは、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ている。ここでは、全層雪崩事例の解析結果について報告する。

## 2. 解析方法

雪崩防護施設を設計するにあたって雪崩の経路における雪崩速度を求める際には、一般にVoellmy<sup>2)</sup>の流体モデルやPerla-Cheng<sup>3)</sup>の剛体モデルが用いられている。これらの手法では、流下経路や流下中の雪崩層厚をパラメータとして与えねばならず、実際の雪崩のデータが限られている現状で与条件の挿入とその評価が難しい。近年の計算機の発達もあり、雪の性状に応じて準3次元の数値解析モデルが提案されている。例えば、重力密度流に基づき提案された福嶋ら<sup>4)</sup>の数値モデルや雪崩を粒状体(非圧縮・非付着)と仮定し、傾斜流に対する運動方程式を連続体の方程式から導く連続体モデル(Savage-Hutter)<sup>5)</sup>などがある。

本報告では、張ら<sup>6)</sup>によって提案された崩壊土砂に関する連続体モデルを雪崩に適用することを試みた。Savage-Hutterの連続体モデル(クローン摩擦モデル)は、粒状体の傾斜流に関する基礎的なモデルのため、雪崩中の内部応力散逸を考慮できない。つまり、形を全く変えずに運動を続けるという特徴があり、無限斜面上では速度が無限に増加するなどの問題点がある。このため、張らは、応力の内部散逸を考慮できないSavage-Hutterのクローン摩擦モデルに代えて、土の内部クローン摩擦と間隙流体のせん断応力および粘性を内部散逸損失として評価できるIversonら<sup>7)</sup>によるクローン混合モデルをもとに、深度平均理論を用いて適切な粘性を再現するための三次精度風上スキームを導入した定式化を行っている。その構成則について式(1)~(3)に示す。

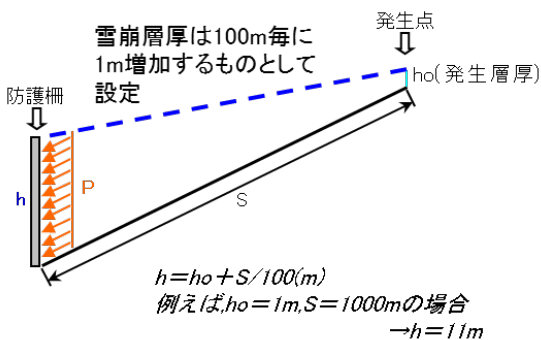


図-1 従来の対策施設の高さの設定方法(集落雪崩対策指針(案)<sup>1)</sup>を基に作成)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{C_f \cdot w(t)}{\rho} \sqrt{p_{i(x,t)} \cdot \rho_0} \quad \text{式(1)}$$

$$C_f^2 = \rho_1 / (\rho_1 - \rho_0), p_i = c_i \cdot \rho \cdot U^2, U = u^2 + v^2 \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $h$  : 雪崩の層厚、 $\rho$  : 雪崩の密度、 $\rho_0$  : 衝撃前の雪崩の密度、 $\rho_1$  : 衝撃後の雪崩の密度、 $w(t)$  : 雪崩の幅、 $C_f$  : 洗掘係数、 $c_i$  : 衝

撃係数、 $p_i$  : 衝撃圧力、 $u, v$  : 雪崩の  $x, y$  方向の速度である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5k_{ap}g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y}$$

$$= g_x h - \frac{v_x}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[ g_z + \frac{u^2}{\kappa_x} \right] h \tan \phi_{bed} \quad \text{式(3)}$$

$$- \text{sgn} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin \phi_{int}$$

ここに、 $u, v$  : 雪崩の  $x, y$  方向の速度、 $g_x, g_y, g_z$  : 重力加速度の  $x, y, z$  方向成分、 $k_{ap}$  : 主動もしくは受動土圧係数、 $\kappa_x, \kappa_y$  : 地形曲率の  $x, y$  方向の半径、 $\phi_{bed}$  : 底面摩擦角、 $\phi_{int}$  : 内部摩擦角である (式(3)は  $x$  軸方向の運動量保存式。  $y$  軸も同様に評価する)。式(1)と式(2)は連続の式、式(3)は運動量保存式である。定式化の詳細については文献<sup>9)</sup>を参考されたい。

また、従来の連続体モデルの計算手法では、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雪崩層厚が負の値を取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。本報告で使用するモデルでは、負の流れ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質量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、雪崩の停止条件は土塊の底面摩擦応力の変化を考慮した手法 (道上ほか)<sup>9)</sup>にもとづき、底面摩擦応力が流れに対して反対方向 (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としている。

## 2. 解析事例

### 2.1 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-2)。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の日前に計測されたものである (図-3(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-3(b))。このは約4,845m<sup>3</sup>となり、図-2に示した想定崩落雪量5,000m<sup>3</sup>とほぼ合致する結果である。

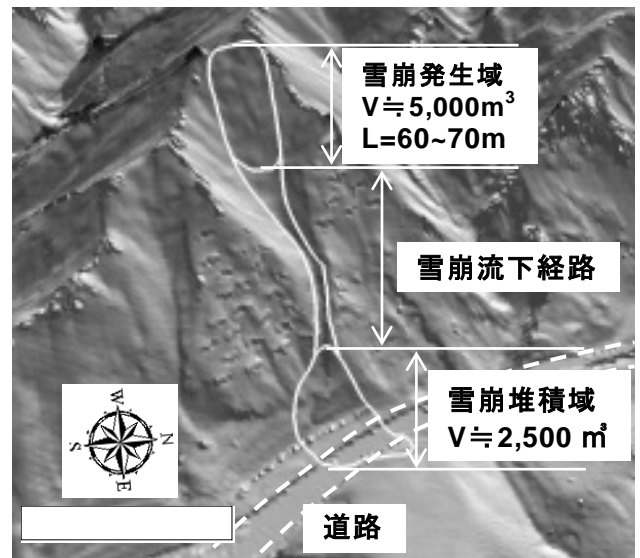


図-2 解析の対象とした雪崩事例の概要

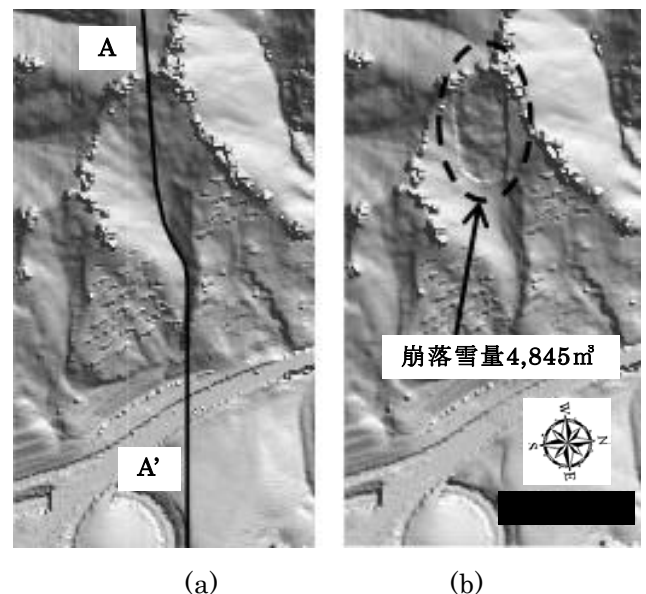


図-3 積雪状況(a)と無雪期DEMとの差分(b)

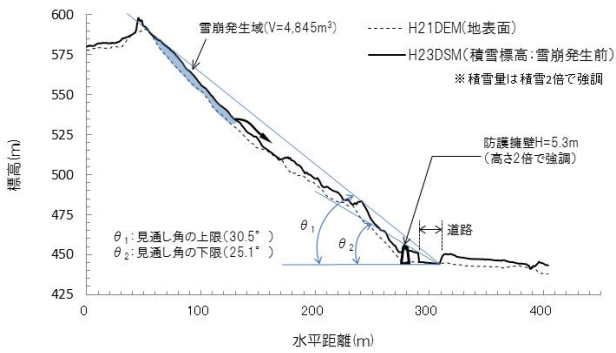


図-4 雪崩発生前の経路断面図

雪崩の密度は、ざらめ雪の一般的密度である  $300 \sim 500 \text{kg/m}^3$  (前野・福岡, 1999)<sup>9)</sup> の中心値を採用した。また、内部摩擦角  $\phi_{int}$  および底面摩擦角  $\phi_{bed}$  は、図-3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-4は図-3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り込みは考慮していない。

解析に用いたパラメータ等の解析条件を表-1にとりまとめた。

表-1 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	発生域の積雪深と一致(全層雪崩)
雪崩の密度 $\rho$	$400 \text{kg/m}^3$
内部摩擦角 $\phi_{int}$	$30^\circ$ (見通し角の上限)
底面摩擦角 $\phi_{bed}$	$25^\circ$ (見通し角の下限)

## 2.2 解析結果

図-5に示したように、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。擁壁部での堆積雪高さは約10m前後と推定されているが、本解析結果は9.2mであった。雪崩の流下経路および到達範囲に関しては、概ね再現できているが、解析結果では尾根を乗り越え実際の雪崩とは異なる流下経路が形成され、結果として堆積幅が広がっている(図-6)。このように小規模な尾根を雪崩が乗り越えるか乗り越えないかというのは、僅かな速度の違いによって左右されることであり、今回の事例ではたまたま乗り越えなかったが、対策を検討する際には、その可能性を考慮するべきであると考えられ

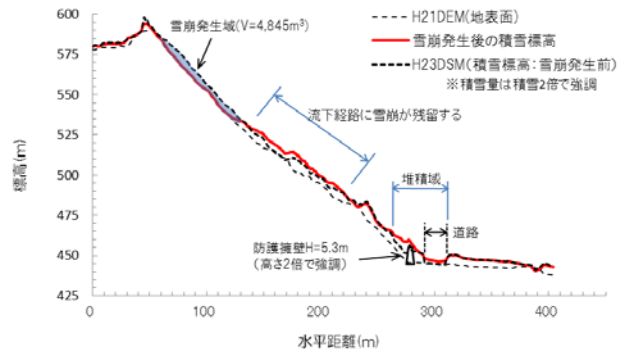


図-5 解析によって再現された雪崩の経路断面図

る。図-7に本解析による雪崩の運動を時系列で示す。解析結果から雪崩の平均速度は約72km/hとなった。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( $40 \sim 80 \text{km/h}$ )<sup>10)</sup>の範疇である。

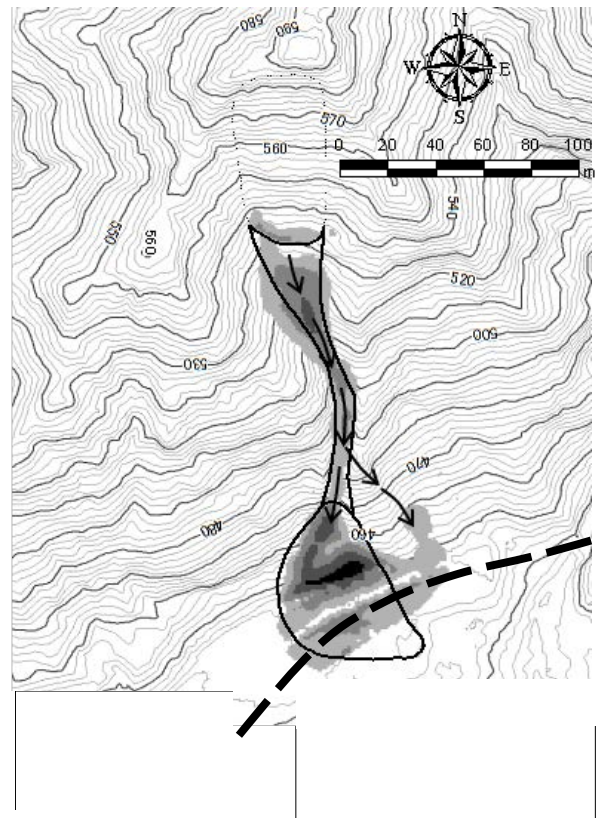


図-6 雪崩の流下経路と到達範囲の比較

表-2 解析結果のまとめ

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

### 3. おわりに

本数値シミュレーションでは、地形データと積雪深を基に雪崩の流下経路、速度、幅、高さ、堆積量を算出することができる。今回の事例解析においては、概ね雪崩の状況を再現できた上、僅かな速度の違いによっては、雪崩が尾根を越えて流下する可能性があることも示すことができた。今後も、雪崩対策施設的设计への活用に向けて多様な事例による検証を進めたい。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、模型実験なども取り入れモデルの検証と改善を行う予定である。

本検討で使用したレーザープロファイラデータは国土交通省新庄河川事務所よりご提供頂いた。ここに謝辞を申し上げる。

#### 参考文献

- 1) (社) 雪センター：集落雪崩対策工事技術指針(案)本編、1996.
- 2) Voellmy, A.: Über die Zerstörungskraft von Lawine. Schweiz. Bauztg. 73, 1955.
- 3) Perla, R.I.: Avalanche release, motion, and impact. Dynamics of snow and ice masses, academic Press, pp.397-462, 1980.
- 4) 福嶋祐介、早川典生、山口武俊：重力密度流による煙型雪崩の流動シミュレーションモデルの検討、雪氷、第58巻、第3号、pp.205~214、1996.
- 5) Savage, S. B. and Hutter, K.: The motion of a finite mass of granular materials down a rough incline. J. Fluid Mech., 199, pp.177-215, 1989.
- 6) 張馳、吉松弘行、岩堀康希、阿部真郎：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、Vol.41、No.1、pp.9~17、2004.
- 7) Iverson, R. M. and Denlinger, R. P.: Flow of variably fluidized granular masses across three dimensional terrain, I Coulomb mixture theory. Jour. of Geophysical Research, Vol.106, No.B1, pp.537-552, 2001.
- 8) 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、pp.925~930、1998.

- 9) 前野紀一、福岡正巳：基礎雪氷学講座第I巻、雪氷の構造と物性、古今書院、160p、1999.
- 10) 国土交通省HP：砂防の役割、雪崩とその対策 <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h17nadare/kaisetsu.pdf>

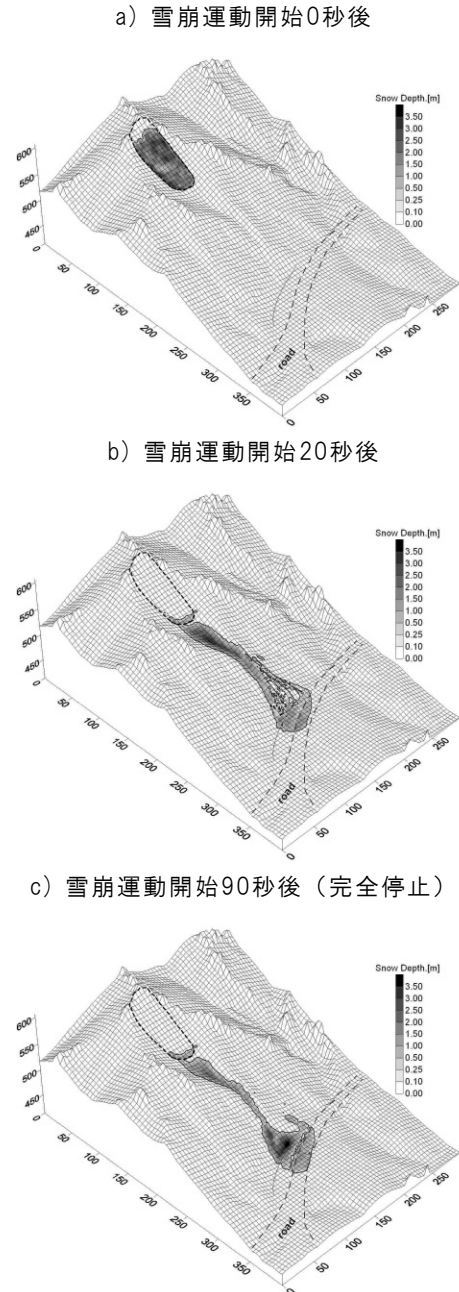


図-7 雪崩運動解析結果の時系列図

池田慎二\*



独立行政法人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 専門研究員、博(理)  
Dr. Shinji IKEDA

伊東靖彦\*\*



独立行政法人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  
Yasuhiko ITO

野呂智之\*\*\*



独立行政法人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  
Tomoyuki NORO

田中頼博\*\*\*\*



奥山ボーリング株式会社技術開発室 東京事務所課長  
Norihiro TANAKA

林 一成\*\*\*\*\*



奥山ボーリング株式会社技術開発室 東京事務所主任  
Kazunori HAYASHI