

連続体モデルを用いた雪崩層厚と速度の算出 ～連続体モデルとフェルミーモデルの比較～

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、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¹⁾）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²⁾）が用いられているため、以下の懸案が生じている。

フェルミーモデルでは雪崩の速度 v は

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

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、 ξ は乱流摩擦係数、 h は雪崩層厚、 g は重力加速度である。ここで、雪崩の層厚は、過去の雪崩災害調査から 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³⁾。雪崩防護工の高さは設計積雪深に雪崩層厚を加えて設計されるため、走路の長い斜面においては施設高が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ている。張ら⁴⁾によって提案された崩壊土砂に関する連続体モデルを用い雪崩シミュレーションを開発し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た⁵⁾。本報告では、連続体モデルを用いた雪崩対策施設の設計手法について検討するために、同一

の雪崩事例について連続体モデルを用いた手法とフェルミーモデルを用いた手法の双方で解析を行いそれらの結果を比較する。

2. 解析方法

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-1)。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約35m、長さ60～70m、積雪2～3m、崩落雪量は約5,000m³、道路への堆雪量は約2,500m³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4日前に計測されたものである（図-2(a)）。

ここでは、この雪崩斜面に対して雪崩防護施設を設置すると想定し、設計に必要な雪崩諸元を算出する。このため、道路脇に設置されている防護擁壁を仮想的に取り除いた状態で雪崩の運動を再現することとした。

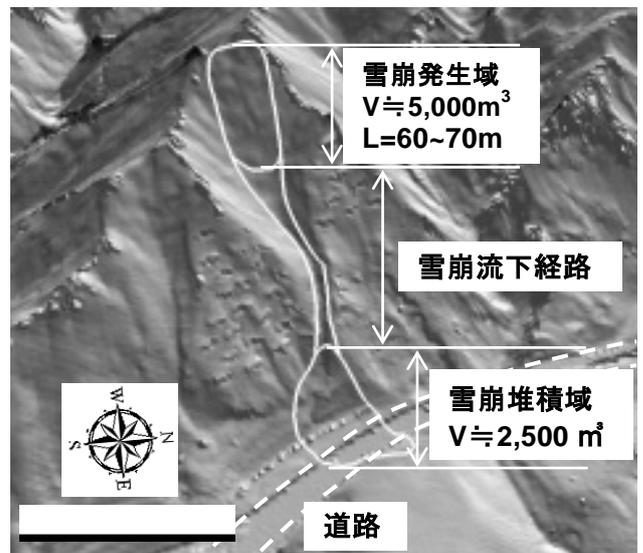


図-1 解析の対象とした雪崩事例の概要

2.2 連続体モデルによる解析方法

張ら⁵⁾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した。このモデルは、応力の内部散逸を考慮できないSavage-Hutterのクーロン摩擦モデル⁶⁾に代えて、土の内部クーロ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⁷⁾によるクーロン混合モデルをもとにしている。また、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(2)~(4)に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{C_f \cdot w(t)}{\rho} \sqrt{p_{i(x,t)} \cdot \rho_0} \quad \text{式(2)}$$

$$C_f^2 = \rho_1 / (\rho_1 - \rho_0), p_i = c_i \cdot \rho \cdot U^2, U = u^2 + v^2 \quad \text{式(3)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5k_{ap}g_z h^2)}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} \\ = g_x h - \frac{v_x}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left[g_z + \frac{u^2}{\kappa_x} \right] h \tan \phi_{bed} \quad \text{式(4)} \\ - \text{sgn} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) h k_{ap} \frac{\partial h g_z}{\partial y} \sin \phi_{int} \end{aligned}$$

ここに、 h ：雪崩の層厚、 ρ ：雪崩の密度、 ρ_0 ：衝撃前の雪崩の密度、 ρ_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、 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、 κ_x, κ_y ：地形曲率の x, y 方向の半径、 ϕ_{bed} ：底面摩擦角、 ϕ_{int} ：内部摩擦角である。式(2)と式(3)は連続の式、式(4)は運動量保存式である。定式化の詳細については張ら⁵⁾を参照されたい。

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)⁸⁾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。

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)⁸⁾の中心値を採用した。また、内部摩擦角 ϕ_{int} および底面摩擦角 ϕ_{bed} は、図-2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-3は図-2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。

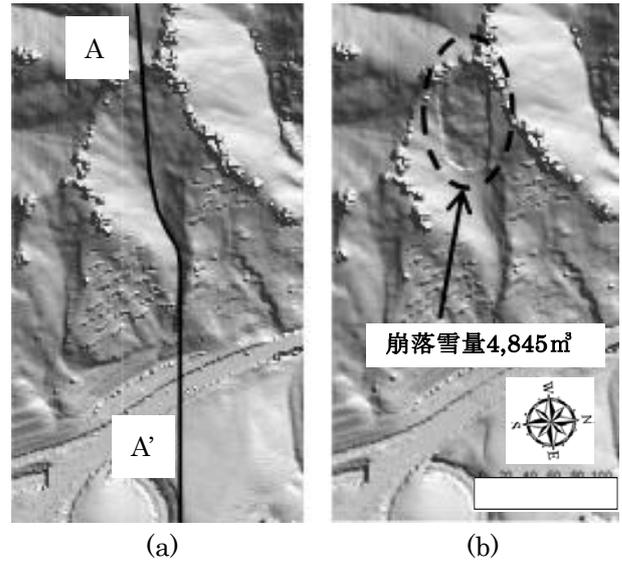


図-2 積雪期DSM(a)と無雪期DEMとの差分(b)

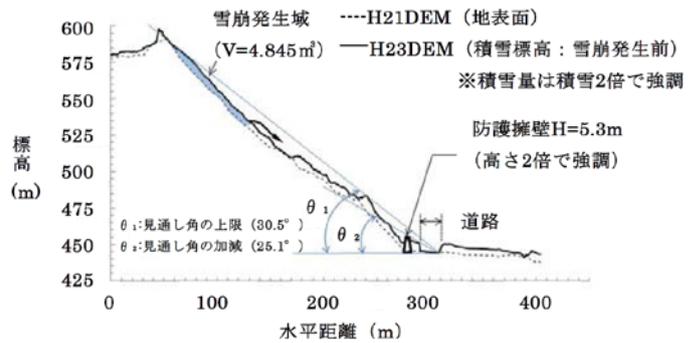


図-3 雪崩発生前の経路断面図

表-1 連続体による解析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 ρ	400kg/m^3
内部摩擦角 ϕ_{int}	30° (見通し角の上限)
底面摩擦角 ϕ_{bed}	25° (見通し角の下限)

2.3 フェルミーモデルによる解析方法

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」³⁾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1m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-2に示した通りである。

表-2 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を基に作成した縦断地形
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 ξ	500(m/s ²) (全層雪崩の一般的な値である400~600(m/s ²) ^① の中間値)
動摩擦係数 μ	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)

3. 解析結果

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。

3.1 雪崩速度

雪崩速度の解析結果を図-3および表-3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。

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7.7m/sであり、フェルミーモデルの23.6m/sの1/3であった。これは施設を設計する上では大きな差異といえる。

3.2 雪崩層厚

雪崩層厚の解析結果を図-3および表-4に示す。従来手法では地形とは全く関係なく100mの流下距離に対して1m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0m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2.3mであり、従来手法の5.1mよりも2.8m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9.2mとなるのに対し、連続体モデルでは、6.9mとなる(ここでは仮に雪崩発生時の積雪深4.1mを設計積雪深とした)。

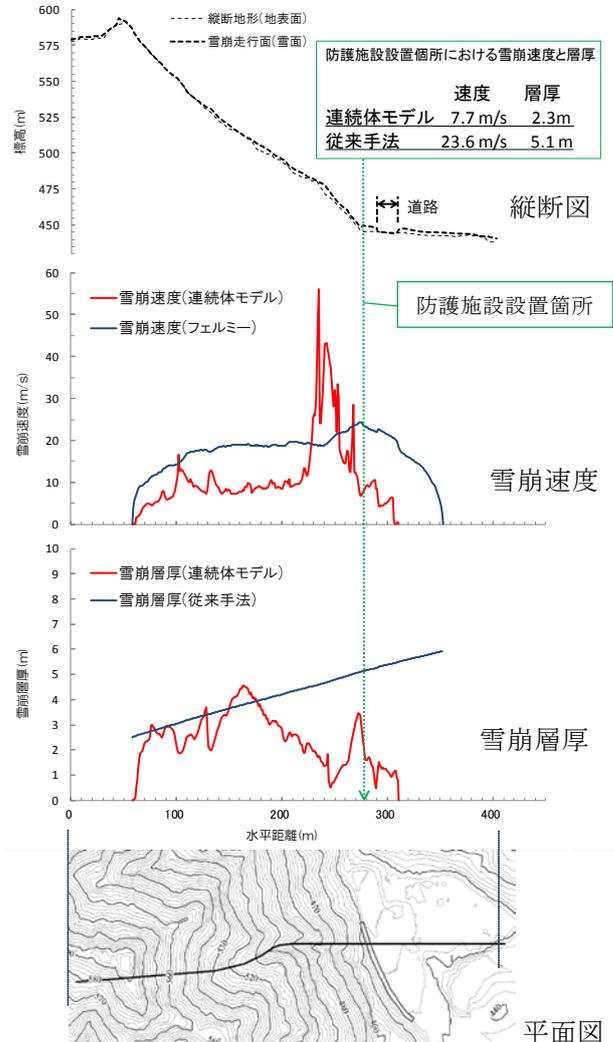


図-4 雪崩運動解析結果(速度と雪崩層厚)

表-3 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	15.5 m/s	8.0 m/s
施設設置個所速度	23.6 m/s	7.7 m/s

表-4 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	4.6 m
平均層厚	4.2 m	2.5 m
施設設置個所層厚	5.1 m	2.3 m

3.3 雪崩流下範囲

フェルミーモデルにおいては、流下範囲を算出することはできないため地形状況や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-4、図-5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できる可能性がある。

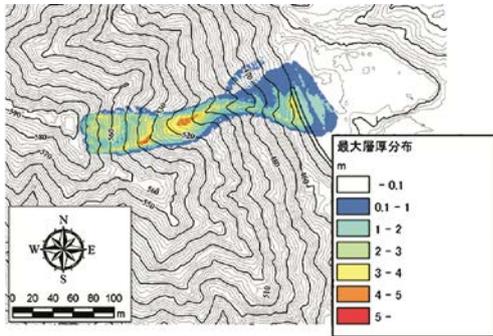


図-5 雪崩最大層厚分布図

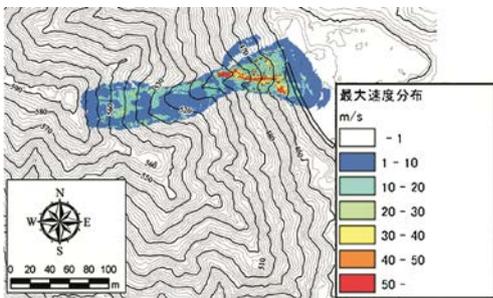


図-6 雪崩最大速度分布図

4. まとめと今後の課題

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、連続体モデルと現在日本において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の設計諸元の算出を試みた。

解析した事例において、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33%、雪崩層厚は60%となった。これらの差異は、施設の設計条件設定においては大きなものであり、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、環境負荷の軽減へ大きな効果

を得られ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る。このため、今後複数の事例解析を行うと共に模型実験等の活用も含め、モデルの精度・信頼性について更なる検証と改善を行う必要がある。また、運動中の雪崩が雪面から取り込む雪の量や運動中に堆積する雪の量と流下中の雪崩の密度変化の再現は重要な課題であるが、これらを解決するにはフィールドでの雪崩観測の高度化に取り組んでいく必要がある。

参考文献

- 1) 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)、pp.7～9、1960
- 2) Voellmy,A. : Uber die Zerstörungskraft von Lawine.Schweiz. Bauztg. 73, 1955.
- 3) (社) 雪センター：集落雪崩対策工事技術指針（案）本編、1996.
- 4) 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.
- 5) 張馳、伊東晴彦、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：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、第27回寒地技術シンポジウム、寒地技術論文・報告集(CD-ROM)、2011.
- 6) 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.
- 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.

池田慎二*



独立行政法人土木研究所つくば中央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つくば中央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つくば中央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