

連続体モデルを用いた雪崩運動シミュレーションによる事例解析（その2）

奥山ボーリング株式会社

○田中頼博，林一成，張馳，高堂陶子，森屋洋

独立行政法人土木研究所雪崩・地すべり研究センター

伊東靖彦，池田慎二，野呂智之

1. はじめに

雪崩防護工の設計には、雪崩の到達範囲や雪崩層厚・速度を精度良く予測する必要がある、これらを求める解析手法が数多く提案されている。著者らにおいても、雪崩防護施設の合理的な設計手法を確立するために、準三次元連続体モデルの雪崩に対する適用性を検討している最中である。本報告では、連続体モデルの適用性に関して、実際に発生した湿雪雪崩を対象として、連続体モデルによる雪崩層厚および速度と、一般的な設計手法である Voellmy モデルによる雪崩層厚および速度の検討結果の比較について報告する。

2. 連続体モデルによる雪崩シミュレーション結果

本検討では張ら(2004)¹⁾が提案している崩壊土砂に関する連続体モデルを、雪崩速度を算出できるよう改良したものを適用した。解析の対象とした湿雪雪崩は、2011 年 2 月に道路脇斜面で発生した雪崩とした。この雪崩シミュレーション結果について、雪崩運動中の最大速度分布を図-1 に、最大雪崩層厚分布を図-2 に、実雪崩との比較について表-1 に示す。なお、本検討は雪崩速度を求めるために既報告を再解析したものである。したがって、解析条件や詳細な解析結果については既報告²⁾を参照されたい。

表-1 連続体モデルによる解析結果のまとめ

項目	実際の雪崩（推定）	連続体モデル
最大到達範囲	178m	172m
堆積区での堆積高	約 10m	9.2m
堆積区での堆積幅	47m	79m
平均速度	(不明)	31km/h

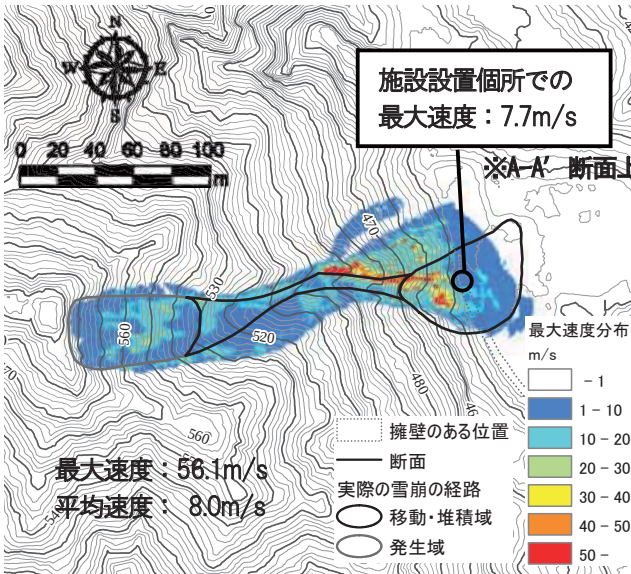


図-1 雪崩運動中の最大雪崩速度分布

3. Voellmy モデルによる雪崩シミュレーション条件

本検討での Voellmy 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。

Voellmy モデルは、開水路流れの理論を応用した単純な 1 次元流体モデルであり、その雪崩速度 v は式(1)で求められる。

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

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 は雪崩の雪崩層厚、 g は重力加速度である。Voellmy モデルでは、経験的な知見にもとづき雪崩走路を決定する必要があるが、本検討では連続体モデルを用いた解析において比較的雪崩層厚が厚い部分を選定した。Voellmy モデルによる解析に用いた各パラメータを表-2 に示す。表-2 に示すように、乱流摩擦係数および動摩擦係数も上記の指針案に従い、一般的な値を採用した。なお、両解析法にはそれぞれで雪崩現象の再現を可能とするパラメータ値を採用している。これは、計算方法や想定が異なるため、同一パラメータであってもその意味する内容が異なると考えたためである。

表-2 Voellmy モデルに用いたパラメータ

項目	パラメータ値
地形データ	図-3 参照（無雪期 DEM より）
雪崩発生層厚 h_0	2.5m（計測値の中間値）
雪崩流下層厚 h	$h=h_0+S/100$ S ：斜距離(m)
乱流摩擦係数 ζ	500m/s ² （一般値の中間値）
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)

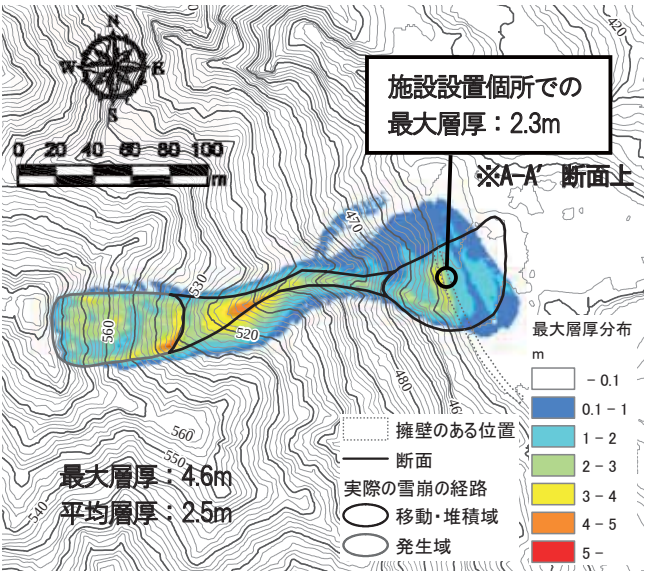


図-2 雪崩運動中の最大雪崩層厚分布

4. 連続体モデルと Voellmy モデルの解析結果の比較

雪崩速度については、表-3 および図-3 に示すように、双方の解析結果において雪崩速度のピークの位置や値は異なるものの、両解析ともにお椀型の分布形状を示し、雪崩初期の立ち上がりから一定の速度を保った後、速度が増して減速・停止に至っており、全体的な速度の変化傾向は類似している。また、Voellmy 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比較的頻繁に、か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雪崩防護施設の設置が想定される個所の雪崩速度の計算結果は 7.7 m/s であり、Voellmy モデルの 23.6 m/s の 1/3 であった。これは雪崩防護施設を設計する上では大きな差異といえる。

雪崩層厚については、表-4 および図-3 に示すように、Voellmy モデル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 Voellmy モデル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、Voellmy モデルの 5.1 m よりも 2.8 m 小さく、約 1/2 となる。これは、仮に雪崩発生時の積雪深 4.1 m を設計積雪深とした場合、防護施設の高さを設計積雪深+雪崩層厚とすると、Voellmy モデルでは 9.2 m となるのに対し、連続体モデルでは、6.9 m となり防護施設の高さを約 25% 低く設計できる可能性を示している。

表-3 雪崩速度の解析結果

	Voellmy 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

	Voellmy 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

5. まとめ

4 章に示したように、本検討で採用している連続体モデルは従来のモデルよりも、勾配および谷幅の変化による雪崩層厚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ため、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る。つまり、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。

しかし、本連続体モデルでは雪崩の密度変化を考慮できていない課題等があり、モデルの精度・信頼性向上について更なる検討を進めてゆきたい。

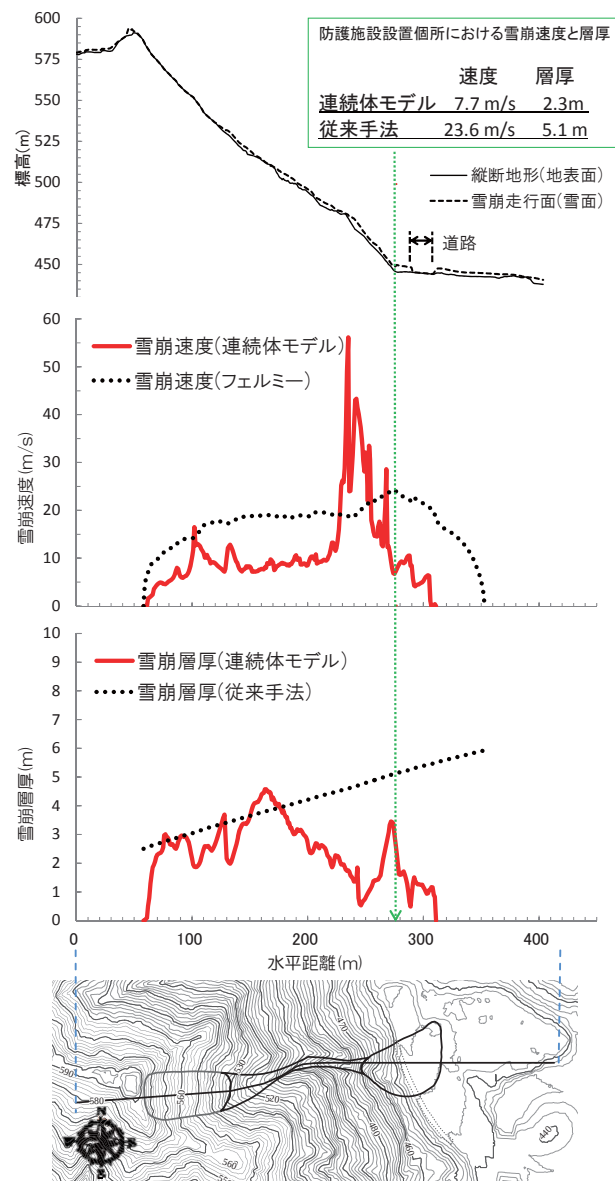


図-3 雪崩運動解析結果：速度と雪崩層厚
(連続体モデルと Voellmy モデルによる比較)

<参考文献>

- 1) 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，Vol.41，No.1，pp.9-17.
- 2) 林一成・張馳・田中頼博・藤井登・阿部真郎・伊東靖彦・池田慎二・野呂智之・石井靖雄・伊藤陽一(2012)：連続体モデルを用いた雪崩運動シミュレーションによる事例解析，平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.374-375.
- 3) 建設省河川局砂防部・社団法人雪センター（1996）：「集落雪崩対策工事技術指針（案）本編」，pp.27-34.