

戦ー15 豪雪時における雪崩危険度判定手法に関する研究(1)

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平18～平20

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】

平成18年豪雪では雪崩災害が多発し、社会的に大きな問題となった。そこで、豪雪時における雪崩災害の防止・軽減に向けた危険箇所点検や応急対策を体系的に実施するため、行政機関等からのヒアリングおよび現地調査を実施し、危険箇所点検・管理要領や応急対策事例集をとりまとめた。

また、リアルタイム気象情報を活用した雪崩発生危険度評価手法を検討するために、レーダー降水量および地形データを用いて、平成18年豪雪時の雪崩災害発生箇所周辺の積雪安定度の時間変化を求めたところ、雪崩発生前の多量の降雪により新雪層が崩壊したと思われる雪崩の発生を比較的良好に予測できることが示された。

さらに、雪崩の到達範囲を予測する雪崩運動シミュレーションの精度向上のため、積雪期の航空レーザー計測データをもとに、無雪期の計測データから積雪面の形状を推定する手法と、実際の雪崩発生事例をもとに適切なパラメータの設定手法を検討し、シミュレーションによる雪崩到達範囲の予測手法を提案した。

キーワード：雪崩、危険箇所点検、応急対策、解析雨量、積雪安定度、雪崩運動モデル

1. はじめに

記録的な豪雪となった平成18年豪雪では、集落・道路等への雪崩災害が頻発したほか、雪崩の危険による長期間の住民の避難、アクセス道路の寸断による集落の孤立等多発し、社会的に大きな問題となった。しかし、雪崩災害を防止するための対策工事の整備は遅れており、発生時期の予測や危険区域の設定手法の精度も必ずしも高くない現状にある。

また、雪崩に対する危険箇所点検および応急対策も必ずしも体系的に実施されていないため、広域に豪雪が発生した場合、その対処にあたり多くの課題が顕在化することになった。近年、少雪化傾向が続き、担当者の経験も少なくなり対応に苦慮する場面も出てきている。

そこで、このような課題を解決するため、既存の手法を活用して、豪雪時に直ちに対処可能な雪崩対策手法の調査・研究を、寒地土木研究所寒地道路研究グループ雪氷チームとともにに行った。本稿では、雪崩・地すべり研究センターが実施した下記の研究内容について報告する。

- ① 豪雪時の危険箇所点検および応急対策手法の検討
- ② リアルタイムな気象情報および斜面形状を考慮した危険区域設定手法の検討
- ③ 高密度DEMデータを活用し積雪状況等を考慮した危険区域設定手法の検討

2. 豪雪時の雪崩危険箇所点検および応急対策手法の検討

2.1 目的と方法

雪崩災害を未然に防ぐには、パトロール等によって事前に雪崩危険箇所での発生の兆候を察知し、対策を講じることが望ましい。しかし、具体的な点検手法は確立しておらず、近年続いた少雪傾向もあり、担当者が現場での対応に苦慮することが数多く見られた。そこで、平成19年度は、平成18年豪雪で大きな被害を受けたほか、毎年危険箇所の点検等を実施している新潟県中越地方を中心に、現状の点検状況について行政機関へのアンケート・聞き取り調査を行い、その結果にもとづき、雪崩パトロールや雪崩対策等の実績の豊富な建設会社やコンサルタントへのヒアリング・現地調査を行った。そして、先進的な取り組みや課題および収集資料、既往の文献等をもとに、効率的に巡視を行う手法を、「雪崩危険箇所点検・管理要領(案)」(以下、点検・管理要領)としてとりまとめた。また、点検者が現地へ持参し、危険な斜面状況を的確に判断・記録できるように「雪崩危険箇所点検カルテ」(以下、点検カルテ)を提案した。

平成20年度は、公表に向けて記述内容を行政機関に照会したほか、寒地土木研究所と内容の検討を行った。構成は、① 雪崩基礎編、② 点検・管理要領(案)編、

③ 雪崩パトロールの留意点に関する技術資料(案)編の3部構成とした。「雪崩基礎編」は、雪崩の定義や発生に係る基礎知識をまとめ、「雪崩パトロールの留意点に関する技術資料(案)編」は、主に北海道の道路における雪崩パトロールの留意点をまとめたものである。

一方、点検で危険と判断された斜面については、応急対策を実施することでその危険性を排除もしくは低減する必要がある。また、雪崩が発生した場合には、生活や交通を回復させるための処置や、次の雪崩発生に備えた応急対策が必要となる。しかしながら、応急対策についても体系的には実施されていないため、危険箇所点検と同様に、アンケート・聞き取り調査等によって収集した事例を分析し、対象箇所へのアクセスや作業スペース等に応じて適切な対策を選定する手法を検討した。

2.2 結果

2.2.1 雪崩危険箇所点検

地域住民の安全・安心のため雪崩危険箇所の点検を的確かつ円滑に実施するため、各地で行われている雪崩危険箇所点検の事例を収集し、集落などを対象とした雪崩危険箇所を調査点検・管理する方法を「雪崩危険箇所点検・管理要領(案)」として示した。

構成は、雪崩点検の方法、雪崩点検の内容・着眼点、雪崩危険箇所点検の出動基準、携行資器材とした。雪崩点検の種類は、無雪期点検および積雪期点検の2種類とし、無雪期点検は、降雪前点検と融雪後点検に区分した。また、積雪期点検は、通常時点検、雪崩の発生の危険性が認められた場合の緊急時点検および気象監視に区分した(図1)。

つぎに、的確に雪崩危険箇所点検を行うため、雪崩点検の内容・着眼点を記述した。雪崩は、地形や植生等の要因により発生が大きく左右され、図2に示すように植生・斜面勾配・見通し角の3条件を満たす斜面は、雪崩発生の危険性が高い。そのため、無雪期に地形や植生の状況を把握し、雪崩発生の危険性の把握に努める必要があることなどについて記述した。

斜面の点検は、表1に示した項目について行い、雪崩対策施設は、無雪期において損傷等の状況を把握し、次の冬期において雪崩への効果を発揮できるように表2の項目について点検を行い管理することを提案した。

積雪期点検における通常時点検は、斜面状況、植生状況、雪崩対策施設の状況(表3)について点検することとした。また、表3の記載事項については、写真

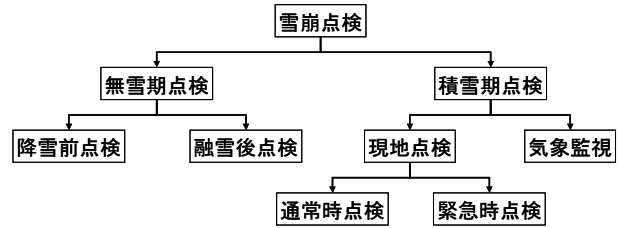


図1 雪崩点検の区分

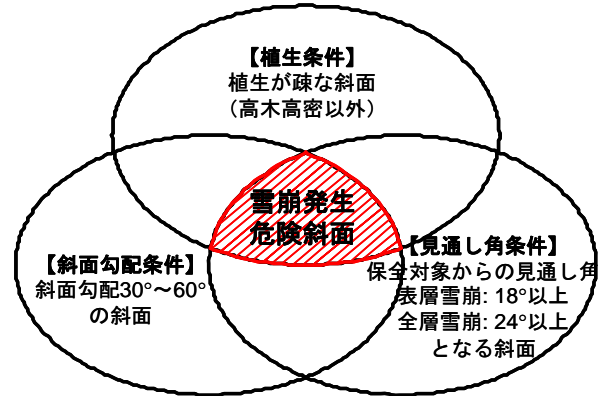


図2 雪崩発生危険斜面の抽出条件

表1 無雪期における地形・植生状況の点検項目

対象箇所	点検内容
斜面全体	植生の伐採、地形が変化していないか
発生区	発生区の植生が伐採されたか
	発生区の斜面勾配、崩壊により発生区勾配が変化したか
	稜線の植生が伐採されたか
走路	走路の植生が伐採されたか
	走路の変化にともない雪崩走路が変化したか
堆積区	雪崩により植生が被災していないか
	堆積区の植生が伐採され、雪崩に対する防護効果が消失していないか

表2 無雪期における雪崩対策施設の状況点検項目

対象箇所	点検内容
発生区 走路 堆積区	対策工が老朽化・損傷・腐食し、機能が低下していないか
	異常な変形・ゆるみ・さび等はないか
	老朽化による施設撤去により、雪崩発生抑止や防護効果に影響はないか
	基礎の亀裂・損傷・浮き上がり・沈下・洗掘等により不安定になっていないか
	アンカー・ワイヤーロープ等の破損、取付金具の異状はないか
	土砂や落石の堆積により機能が低下していないか
	その他

表3 通常時の点検内容

項目	点検内容
斜面状況	雪崩発生の有無
	雪崩が発生している場合、建物まで到達していないか
	雪庇が発達し、落ちそうな状態ではないか
	吹きだまりの発生や、吹きだまりによる雪庇(巻きだれ)が発達し、落ちそうな状態ではないか
	クラック(雪割れ)は発生していないか
	雪しわは発生していないか
	地すべりや法面崩壊等による地形変状はないか
	積雪による積雪表面がフラット化していないか
	スノーボールは発生していないか
	その他
植生状況	積雪深に対して雪上木高や雪崩抑止効果は十分か
	雪崩による被災はないか
	植生の折れ・たわみ・位置の変化はないか
雪崩対策施設の状況	その他
	施設が雪に埋没し、機能が削がれていないか
	施設天端からの雪庇(巻きだれ)が発生していないか
	施設の破損等の変状はないか

や解説図を用いて分かりやすく示し(図3)、点検マニュアルやカルテの様式の作成を行った。また、点検カルテには、点検員が共通の認識で危険な斜面状況を的確に判断するための雪崩危険斜面毎の点検シートの作成例(図4)も記載した。その他、点検の出動基準や携行資器材について、既存の例を示した。

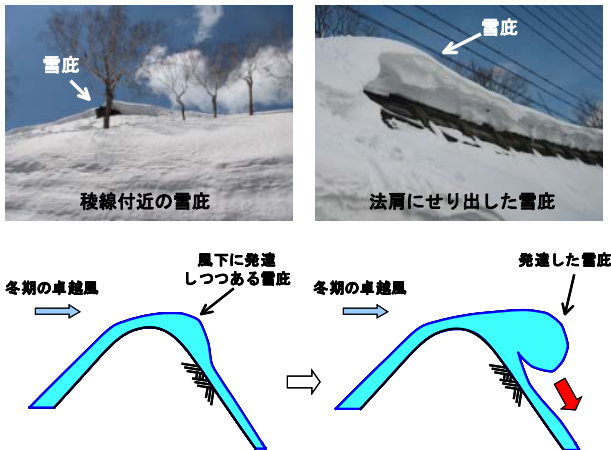


図3 写真・解説図の例(雪庇の発達状況)

主要地方道○○線 斜面No.1
△△市○○地区内

ラジコンヘリコプター写真

雪庇の発達状況
クラック、雷しわ、スノーボールの有無

斜面のフラット化

雪庇	急激に発達 徐々に発達 変化なし
吹きだまり	概ね cm
クラックの幅	概ね cm/日

住宅2棟(住民○名)、倉庫4棟

地上写真

雪崩発生履歴

① 平成17年○月○日 △時△分 表層雪崩
② 平成18年○月○日 ◇時◇分 表層雪崩

通行規制履歴

① 平成18年○月○日 △時△分 ~ 平成18年○月○日 △時△分 (片側交互通行)
② 平成18年○月○日 ◇時◇分 ~ 平成18年○月○日 ◇時◇分 (全面通行止め)

図4 雪崩危険箇所点検シートの作成例

2.2.2 雪崩応急対策手法

応急対策手法は、過去の応急対策事例について行政機関等への調査を行い、60事例を収集した結果を対処方法や施工方法などによって図5のように分類・体系化した。

60事例のほとんどは道路法面对策の事例であり、斜面や法面、雪崩対策施設の上部やトンネル・スノーシェッド坑口部等の雪庇を直接処理する方法であった。処理方法としては、人力、機械、人力・機械併用と火薬等による方法に分類された。人力処理では、高所作業車を用いて道路管理施設の雪庇を処理したり、ワイヤロープを用いて法肩部等の雪庇を処理したりする事例があった。機械処理では、斜面上部の処理のために登坂路を施工し、重機が上部へ移動して作業する例や、ホイールクレーンのワイヤ先端に鉄板を取り付け、雪を切り落とす事例などがあつた。火薬等による処理では、火薬類取締法の対象外で手続きが容易な蒸気圧破砕薬剤を用いた処理事例もあつた(図6)。

待ち受けの方法は、雪崩から防護するために設ける場合と、道路や建物等への直撃を避けるため誘導する方向に向けて設置する場合があります。山側の雪を掘って雪堤を設置する方法と、大型土のうなどの仮設資材を設置する方法があつた。雪堤の設置事例では、雪崩による二次災害の危険性から、無人重機を用いて設置した事例もあつた。雪堤の施工は、主に機械作業であるが、対象箇所への機械の搬入アクセスが困難な場合には、人力作業で施工している事例もあつた。また、仮設資材の設置による方法では、道路上にコンクリートブロックを設置して山側に堆雪ポケットを確保していた事例(図7)もあつた。

雪崩検知センサーを設置した事例では、雪崩が再び発生する危険性がある場合に、ワイヤセンサーを設置し、通行車両等に注意喚起を行った事例があつた。

上記の事例について、対象箇所へのアクセスや作業スペース、対象斜面の規模などに応じた対策手法の選

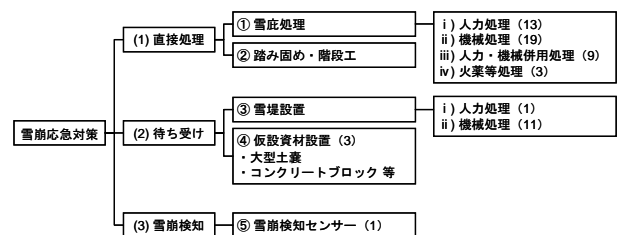


図5 応急対策事例の分類・体系化(括弧内は収集事例数)

3. 2 結果

3. 2. 1 積雪安定度と雪崩災害発生状況との比較

平成 18 年豪雪時に発生した 6 件の雪崩災害事例(表 4) について、雪崩発生箇所周辺約 30 km 四方を対象に積雪安定度の分布や時間変化を求め、雪崩発生状況との比較を行った。

雪崩発生箇所周辺の積雪安定度を求めるために、1 時間毎の解析雨量データを新雪の安定度 SI (Stability Index) と降雪強度の関係を求める既往の式に入力し、雪崩発生箇所周辺における SI の時間変化を計算した。

ここで、 SI は

$$SI = \frac{\sigma}{W \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

と定義され、積雪のせん断強度 σ と、積雪荷重 W および斜面傾斜角 θ で表されるせん断応力との比である。よって、 SI は弱層の形成によるせん断強度の減少や、多量の降雪による積雪荷重の増加などにより、値が小さくなるほど雪崩発生の危険が増すことになり、一般に $SI < 1.5$ を雪崩発生基準として用いるケースが多い¹⁾。

式 1 は圧密による積雪密度の時間変化式およびせん断強度と積雪密度の関係式を用いて

$$SI_i = \frac{B \left(\frac{n}{C} \cos^2 \theta \int W_i dt + \rho_0^n \right)^{\frac{m}{n}}}{W_i \sin \theta \cos \theta} \quad (2)$$

と表すことができる¹⁾。ここで、 B, C, m, n は定数であり、 SI_i は積雪 i 層の安定度、 W_i は i 層上の積雪荷重、 ρ_0 は積雪の初期密度 (新雪密度) である。

表 4 検討を行った雪崩災害事例

雪崩発生箇所	発生日	概要
新潟県津南町 秋山郷前倉地区	2005.12.24	通行車両 1 台巻き込まれる
新潟県湯沢町 土樽	2005.12.28	流下距離約 1.5 km 道路埋塞・電柱倒壊
長野県栄村 秋山郷屋敷地区	2006.1.3	家屋一部損壊
	2006.2.5	家屋一部損壊
新潟県魚沼市 上折立・大湯温泉	2006.1.12	道路通行止め
	2006.1.28	道路通行止め、未明～ 早朝に 3 箇所発生

ρ_0 を 50 kg/m^3 と仮定すると、積雪荷重 W は $1.0 \text{ kg/m}^2\text{-hr}$ (積雪荷重) = 20 mm/hr (積雪深) = 1 mm/hr (降水量) と換算できるので、1 時間毎の解析雨量に対応した新雪層を順次積み重ねた積雪層を設定し、各層の密度およびせん断強度の変化を計算することで、各層の安定度 SI_i の時間変化が求められる。このとき、 SI_i の最小値が 1.5 に近づくと、雪崩危険度が高まっていると判断できることになる。

また、式 2 に含まれる斜面傾斜角 θ は、国土地理院刊行の 50 m メッシュの数値標高データを用いることで、地形を考慮した広域にわたる積雪安定度の分布を求めることが可能となる。すなわち、平坦な市街地に降雪が集中しても雪崩の危険性は少ないが、急峻な山岳域ではある程度の降雪でも雪崩の危険性が高まることを表現できることになる。メッシュ毎の θ を求めるには、北側と南側に隣接するメッシュの標高から南北方向の傾斜 θ_n を、同様に東西方向の傾斜 θ_e を算出し、これらの合成勾配 ($\sqrt{\theta_n^2 + \theta_e^2}$) を対象メッシュの θ とした²⁾。また、その他の定数や計算方法も水津 (2002) を参考にした。

図 9 は、平成 17 年 12 月 28 日に新潟県湯沢町土樽で発生した雪崩について、雪崩発生時の SI 分布を求めたものである。中央●印の雪崩発生箇所では SI が小さくなっており、雪崩発生の危険性が高かったことが示された。また、発生前 72 時間累加解析雨量 (図 10 左) および周辺の斜面傾斜角分布 (図 10 右) と比較すると、累加雨量が大きくても斜面傾斜が緩い箇所では SI は大きくなっており、危険箇所がより絞り込まれていることがわかる。

つぎに、雪崩発生の 48 時間前から 12 時間後までの SI の計算結果を、秋山郷屋敷地区について 2 例示す (図 11)。1 月 3 日に発生した雪崩では、発生前に降雪が連続したことにより、発生時に $SI < 1.5$ の雪崩発生基準を満たしていた (図 11 上)。一方、2 月 5 日の場合は、降雪があると SI は減少するものの、降雪量自体が少ないため発生基準には至らなかった。(図 11 下)。発生の理由としては、なんらかの弱層が形成されたために、比較的少ない降雪量で発生したことが考えられる。

よって、本研究で行った手法は、雪崩発生前に多量の降雪が続いて新雪層自体が崩壊するような、いわゆる「ドカ雪型」雪崩に適用可能であり、弱層が原因となる雪崩や、融雪が関与する全層雪崩などには向かないと考えられる。また、発生基準にいたらない場合でも、発生前にいったん SI が減少し、発生後に増加する傾向がみられ、現場での防災対応を取る上で参考とな

る情報と考えられる。

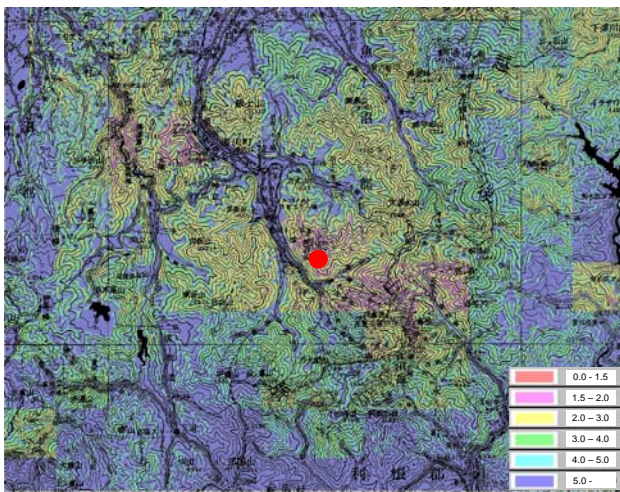


図9 土樽雪崩発生時の積雪安定度分布 (●: 雪崩発生箇所)

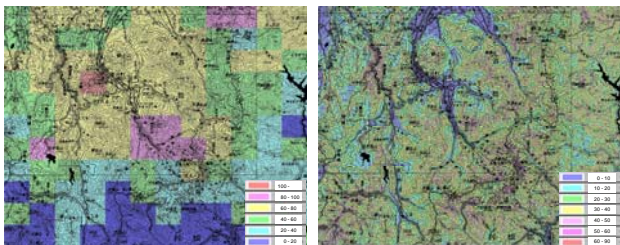


図10 土樽周辺の雪崩発生前72時間累加解析雨量(左、単位mm)と斜面傾斜角(右、単位°)の分布

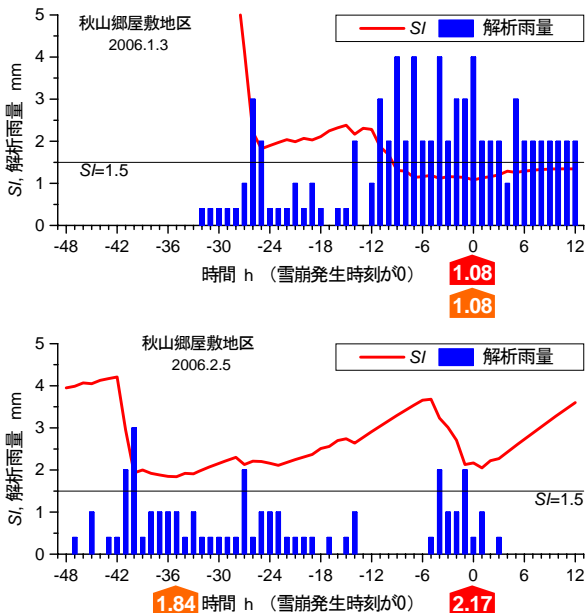


図11 雪崩発生48時間前~12時間後におけるSIおよび解析雨量の変化(上: 秋山郷屋敷地区(1月3日)、下: 秋山郷屋敷地区(2月5日)、0時間が雪崩発生時刻、●: 雪崩発生時のSI、■: 期間中最小のSI)

3.2.2 なだれ注意報との比較

本研究の手法の雪崩発生予測への適用性を検討するために、気象庁のなだれ注意報との精度の比較を行った。表4に示す雪崩発生箇所は、新潟県魚沼南部地域・十日町地域と長野県中野飯山地域に含まれる。表5に新潟県および長野県のなだれ注意報発令基準を示すが、平成18年豪雪時には積雪・降雪ともに多い期間が連続したほか、実際に雪崩災害が頻発したため、魚沼南部および十日町地域は2005年12月22日から、中野飯山地域は12月21日から注意報が長期間にわたり発令され、2006年5月まで継続した。

一方、表4の魚沼市を除く地域についてSIを12月初めから2月末まで計算した結果は図12のようになる。雪崩発生基準である $SI < 1.5$ に達した日数は、最小で90日間で5日(秋山郷前倉地区)、最大で17日間であった(湯沢町土樽)。よって、ドカ雪型の表層雪崩の警戒上は、なだれ注意報よりも少ない空振り率で予測が可能になるといえる。図13、14にはSIが全体的に低下した1月3日と14日の分布図を示すが、1月3日(図13)は山岳域を中心にSIが低下しており、秋山郷屋敷地区(図中●印)で雪崩が発生したほか、新潟県湯沢町のスキー場(図中▲印)などでも小規模な雪崩が多発した。屋敷地区の雪崩発生箇所付近ではSIが1.5以下(赤色)の危険な部分が多い一方、スキー場付近のSIは2~3程度(黄色)で発生基準には達しない部分が多いが、局所的にSIの小さい箇所も点在しており、小規模な雪崩発生の危険性があったことが確認できる。また、1月14日(図14)は平地の近くでもSIが低下しているが、図中の範囲では雪崩災害の報告はなかった。ただし、新潟・富山・岐阜県など広範囲にわたり道路や鉄道など市街地に近い場所での雪崩災害事例があったことから、雪崩発生の危険を予測し警戒体制を事前にとる上では有効な情報と考えられる。

以上のことから、本研究で用いた雪崩発生予測手法は、雪崩発生危険箇所を絞り込みでき、多量の降雪が

表5 新潟県・長野県のなだれ注意報発令基準

区域	発令基準
新潟県	① 降雪の深さが50cm以上で気温の変化が大きい場合 ② 積雪が50cm以上で最高気温が8℃以上になるか、日降水量20mm以上の降雨がある場合
長野県	表層なだれ: 積雪が50cm以上あって降雪の深さが20cm以上で、風速10m/s以上または、積雪が70cm以上あって降雪の深さが30cm以上 全層なだれ: 積雪が70cm以上あって最高気温が平年より5℃以上、または日降水量が15mm以上

集中する豪雪時に、なだれ注意報より時間的かつ空間的にも雪崩発生危険度の高い箇所を予測することが可能であるものといえる。

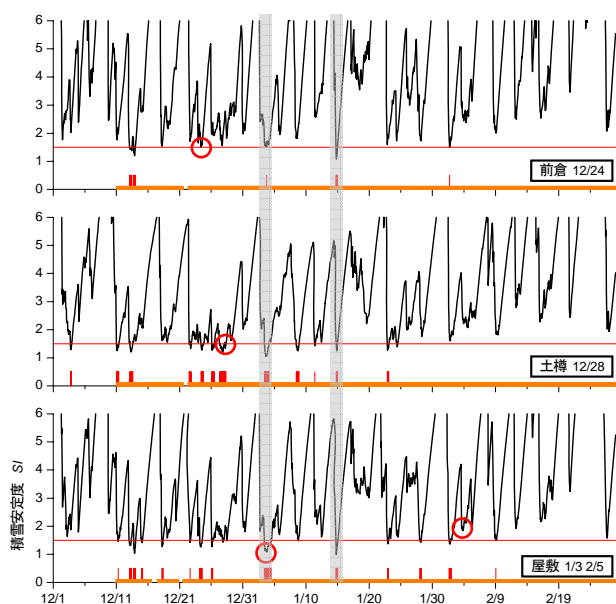


図12 秋山郷前倉地区(上)、湯沢町土樽(中)、秋山郷屋敷地区(下)の長期SI変動(○:実際の雪崩発生日、■:SI<1.5の期間、■:広域積雪安定度分布(図13、14)を作成した日、—:なだれ注意報発令期間:秋山郷前倉一十日町地域、湯沢町土樽一魚沼南部地域、秋山郷屋敷一中野飯山地域)



図13 1月3日19時の広域積雪安定度分布(●:秋山郷屋敷地区の雪崩発生箇所、▲:雪崩が自然発生したスキー場)



図14 1月14日19時の広域積雪安定度分布

4. 高密度 DEM データを活用し積雪状況等を考慮した危険区域設定手法の検討

4.1 目的と方法

危険箇所点検や気象情報等から雪崩発生の危険性が予測された場合、早急に危険区域を設定し、警戒避難につなげることが必要となる。危険区域の設定手法としては、保全対象からの見通し角による経験則³⁾を用いて最大到達距離を求めることが一般的であるが、過大となる場合も考えられる。そこで、本研究では雪崩運動シミュレーションにより到達範囲を予測する手法を、平成18年豪雪時に発生した雪崩事例を用いて検討した。

シミュレーションを行う際には雪崩走路の地形データを入力する必要があるが、一般に豪雪時には雪崩斜面は大量の積雪により平滑化され、雪崩が発生すると無雪期の地形条件より遠くまで到達しやすい傾向にあると考えられる。よって、シミュレーションを行う際には積雪による斜面形状の変化を考慮した地形データの設定が必要であるが、豪雪時に斜面の測量を行うことは困難である。そこで、本研究では平成18年豪雪時に、大規模雪崩(流下距離500m以上)の発生箇所であって航空レーザプロファイラ計測により作成された高密度DEM(Digital Elevation Model)データを用いて、無雪期の地形データから豪雪時の斜面形状を推定する手法を検討した。

また、現在雪崩の到達範囲予測に用いられるシミュレーションでは、経験則により求められた最大到達距離まで雪崩が到達することを前提にパラメータが設定されているため、このパラメータを用いてどこまで到達するかを求めることは困難である。そこで、平成18年豪雪時に発生した雪崩事例のデータを用いて、危険区域設定に適切なパラメータの設定手法を検討した。

4.2 結果

4.2.1 積雪期と無雪期の斜面形状の違い

一般に豪雪時には地形の凹凸や植生が積雪に覆われて斜面が平滑化し、雪崩発生の危険性が高まるほか、雪崩が発生するとより遠くまで流下する危険性も考えられる。このため、斜面の平滑化(フラット化)は雪崩危険箇所点検における項目の一つとなっている(表3)。

豪雪時に多量の雪が堆積した斜面を測量することは困難であるが、近年になって航空機搭載型レーザプロファイラにより広範囲の測量を空中から精度良く行うことが可能となってきている。そこで、平成18年豪雪

で大規模な雪崩が発生した新潟県湯沢町土樽周辺および新潟県津南町～長野県栄村の秋山郷周辺(表4)で、積雪期および無雪期に測定された以下のデータを用いて、地表面と積雪面の形状の違いについて検討した。

- ① 積雪期(2006年2月25日)の斜面形状—航空レーザープロファイラにより計測した2mメッシュのDEM(Digital Elevation Model)データ

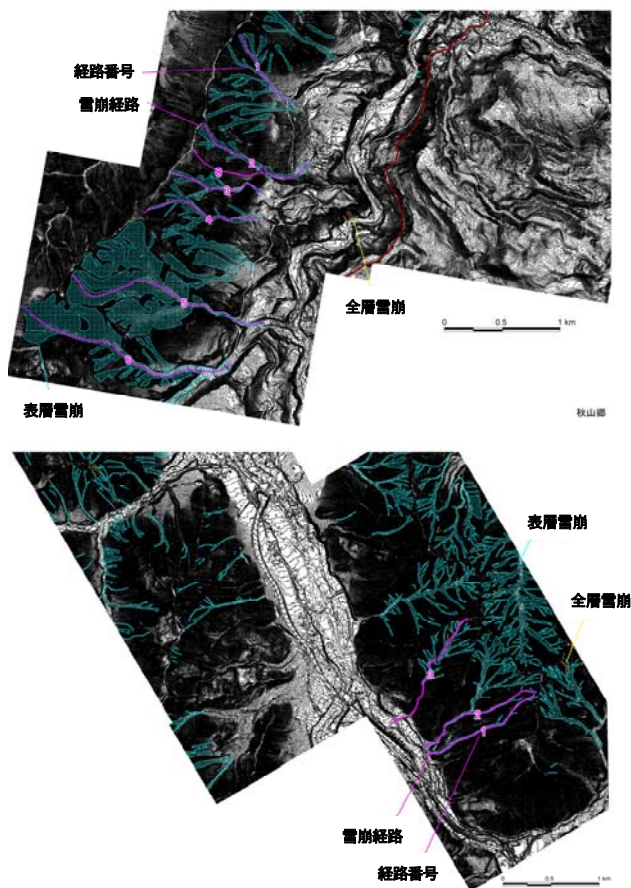


図15 積雪期のDEMデータと雪崩の経路(上:秋山郷地区、下:土樽地区、□:空中写真判読による表層雪崩発生箇所、—:解析を行った大規模雪崩の経路)

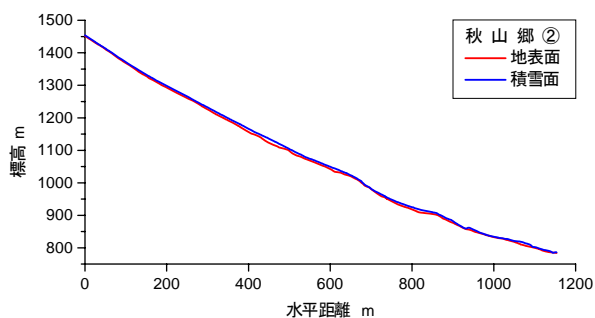


図16 地表面(無雪期)と積雪面の計測例(図15秋山郷地区の経路②)

- ② 雪崩の経路—2006年3月4日に撮影された空中写真から判読した流下痕跡
- ③ 無雪期(2006年11月)の斜面形状—空中写真から作成された2mメッシュのDEMデータ

図15に積雪期の斜面形状(①)と雪崩の経路(②)を重ね合わせたものを示す。雪崩経路のうち、到達距離500m以上の大規模なものを土樽地区から3経路、秋山郷地区から6経路抽出して比較検討を行った(図15中の—線)。図16は雪崩経路に沿った地表面と積雪面のDEMデータを縦断面図にしたものの1例であるが、積雪面は地表面より滑らかであることが確認できる。

そこで、雪崩が実際の積雪面上を流下する場合と、地表面上を流下すると仮定した場合で、どの程度雪崩の到達距離が異なるかシミュレーションにより検討を行った。シミュレーションには、集落雪崩対策⁴⁾に用いられている

$$v = \sqrt{\xi h (\sin \theta - \mu \cos \theta) - e^{-\frac{2gS}{\xi h}} \left[\xi h (\sin \theta - \mu \cos \theta) - v_0^2 \right]} \quad (3)$$

と表される雪崩速度を求める式⁵⁾を用いた。ここで、

- ξ : 乱流減衰係数 [m/s²]
- h : 雪崩流下深 [m]
- μ : 動摩擦係数
- θ : 斜面傾斜角 [°]
- v : 雪崩の速度 [m/s]
- v_0 : 雪崩の初速度 [m/s]
- S : 斜距離 [m]
- g : 重力加速度 [m/s²]

である。ただし、動摩擦係数 μ は経験式⁶⁾などから

$$\mu = \begin{cases} -0.01v + 0.6 & (0 \leq v < 10) \\ 5/v & (10 \leq v) \end{cases} \quad (4)$$

と設定される⁴⁾ことが多く、雪崩の経路をあらかじめ設定しておけば、速度を計算する際に使用するパラメータは乱流減衰係数 ξ および雪崩の厚さ h の2つとなる。式3からわかるように ξ が大きければ h は小、また逆に h が大きければ ξ は小となり、両者の適切な組み合わせを用いることが重要である。

乱流減衰係数 ξ の数値は大きいほど雪崩は流れやすく、遠くまで到達するようになる。計算の際には、実際の積雪面上で雪崩の停止位置が一致する(実際の停止位置で $v=0$ となる)ような ξ を逆算して求め、その値を使用することにした。

表6 積雪期の斜面形状を用いて逆算した乱流減衰係数 ξ

地区	ξ (h 増加の場合)	ξ (h 一定の場合)
秋山郷①	265	1904
秋山郷②	164	1802
秋山郷③	222	3485
秋山郷④	291	4658
土樽①	249	2999
土樽②	338	4077
土樽③	188	997

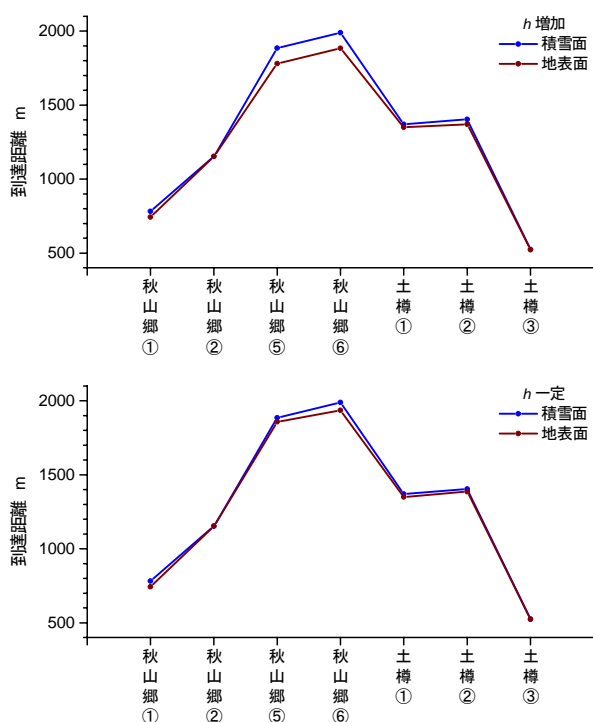


図17 積雪面にもとづくパラメータによる雪崩の到達距離の計算結果(上:雪崩の厚さ h が増加する場合、下:雪崩の厚さ h が一定の場合)

また、 h は

$$h = h_0 + S/100 \quad (5)$$

とし、雪崩の発生層厚 h_0 から100m流下するごとに1m増加すると設定されることが多い⁴⁾。 h_0 は、一般的な値として1~2m⁴⁾が用いられており、ここでは1mと設定した。また、 h が $h_0 = 1$ mのまま流下すると設定した場合についても計算を行った。

逆算により求められた ξ の値を表6に示す。なお、秋山郷地区の経路③、④では実際の停止位置と一致する

パラメータが見つからなかったため除外している。雪崩の厚さ h が増加する場合と一定の場合では乱流減衰係数 ξ の逆算値が大きく異なることがわかる。これは、 h が増加すると設定した場合、雪崩の到達距離が長い場合に h が徐々に大きくなり、相対的に ξ が小さく計算されるためである。

つぎに、表6のパラメータを使用して、地表面(無雪期)と積雪面の上でシミュレーションを行い、両者の到達距離を比較した(図17)。全体に地表面における到達距離は積雪面に比べやや小さく計算される結果が多く、積雪により平滑化された斜面では雪崩の到達距離が大きくなりやすいことがわかる。両者の差は最大で105m(秋山郷5、 h が増加する場合)に達した。なお、 h が一定の場合(図17下)には全体に差は小さくなっており、これは積雪面より斜面傾斜角の緩い地表面地形などがあつた場合、 ξ が大きければ斜面傾斜角や凹凸等の変動にほとんど左右されずに速度が維持される一方、 h が増加する場合は ξ が小さいため速度が減少してしまう(式3参照)のが原因と考えられる。

4.2.2 積雪期の斜面形状を推定する方法の検討

シミュレーションにより雪崩の到達距離を推定する際、無雪期の地形データを用いるとパラメータおよび経路によっては誤差が大きくなることが示されたが、積雪期の地形データが常に入手できるとはかぎらない。よって、豪雪の緊急時には既存の無雪期のデータから積雪期の斜面形状を推定するなどして対応することが考えられる。ここでは、積雪期の斜面形状を推定する際に、どのような方法が適当か検討を行った。

前節と同様に、新潟県湯沢町土樽周辺および新潟県津南町~長野県栄村の秋山郷周辺で計測された無雪期および積雪期のDEMデータを使用して検討を行った。実際の雪崩経路の地形データ(無雪期)を下記の方法で平滑化処理を行うことにより積雪面を推定し、実際の積雪面との形状が一致し、標高誤差が最も小さくなる方法を最適な推定方法として選定することとした。

方法① 標高約10m間隔のデータ

方法② ①のデータに解析対象地区の積雪深の標高依存性(+10cm/標高100m)を加えたもの

方法③ 10, 20, 30, 50m毎のメッシュの標高データ

方法④ 10, 30, 50mにわたるメッシュの標高データを平均したもの

方法⑤ 4m四方の領域の平均標高データから接峰面(谷部分を埋めた標高データ)を作成したもの

ここで接峰面とは、ある窓領域の平均標高と、窓領域

中央メッシュの標高データを比較し、標高の高い方の値をもとのメッシュに代入していくものであり、谷・沢などの地形の凹部を埋める効果を持つものである。

図18は、図16に示した斜面において解析を行った結果の一部を拡大したものである。積雪面と各方法による推定積雪面を比較すると、以下のような傾向がある。

- ・方法①、②：地表面とほぼ同一であり、積雪面の推定には向かない
- ・方法③、④(30mの場合)：地表面と積雪面のほぼ中間付近に位置しており、やや精度が向上している。
- ・方法⑤：一部誤差が大きい部分があるものの、積雪面と同様に斜面が平滑化している様子をよく表している。

また、定量的に各推定結果の違いを評価するために、積雪面と各推定結果の標高の誤差を求めた(図19)。図19上に示す平均誤差は、全体にマイナスの値となっている。これは、地形データに積雪深を加えた標高までは推定できていない方法が多いためと考えられる。全体としては、図19下に示す二乗平均平方根誤差と合わせてみると、接峰面を作成する方法⑤が全体に誤差が小さい結果となった。この方法は、周囲の標高の高い部分に合わせて地形を平滑化するため、他の方法に比べて積雪深分の標高の増加を考慮でき、沢などの凹部が雪で埋まり地形が平坦化する現象を表現できるためと考えられる。

さらに、推定積雪面を用いてシミュレーションを行い到達距離を計算した結果と、実際の到達距離を比較し、推定方法が妥当であるか検討した。シミュレーションのパラメータは、積雪面と地表面で差異が大きかった雪崩の厚さ h が増加する場合(図17上)で、乱流減衰係数 ξ は表6の左側を用いている。なお、誤差の大きい方法①、②では計算を行わなかった。

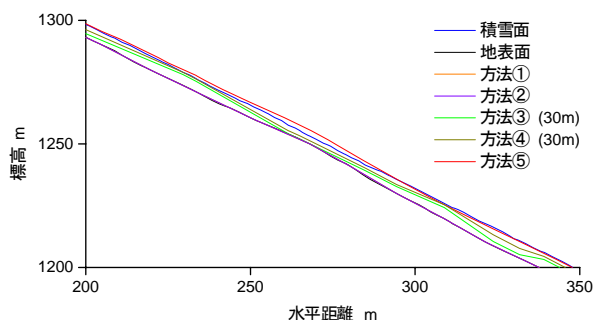


図18 斜面形状推定結果の例(経路：秋山郷②、図16の斜面の一部を拡大)

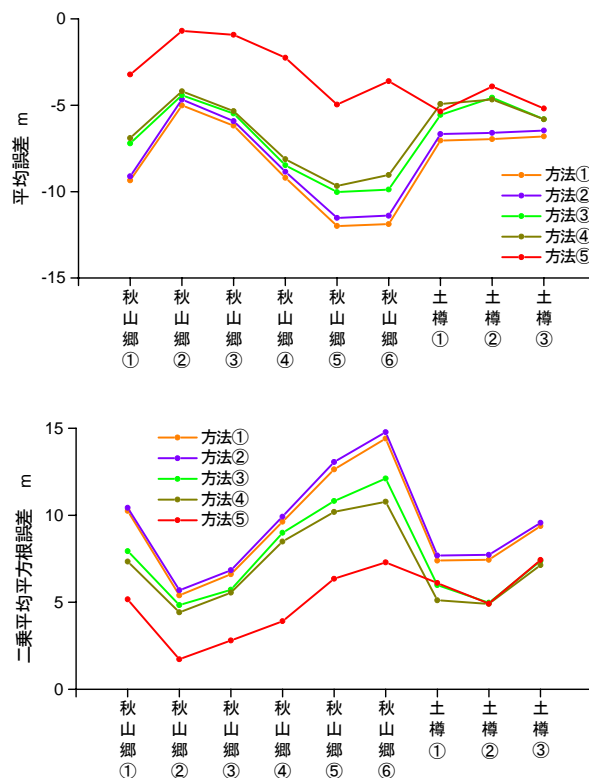


図19 各推定積雪面と積雪面との標高誤差(上：平均誤差、下：二乗平均平方根誤差)

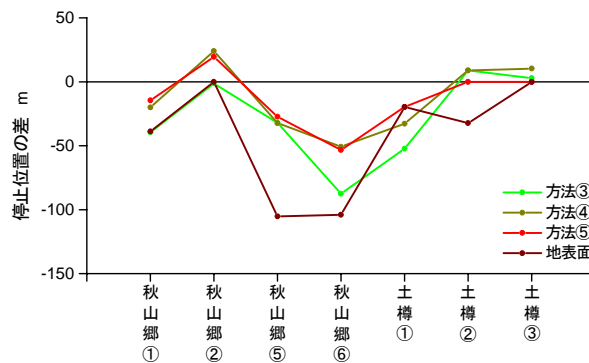


図20 地表面および推定積雪面上における停止位置の計算結果と実際の停止位置の差

各推定積雪面で雪崩の到達距離を計算し、実際に雪崩が停止した位置からの差を求めた結果を図20に示す。シミュレーション結果は、全体に実際の停止位置よりも手前(マイナス側)で停止する計算結果となっているが、地表面の場合と比べるとその差は減少しており、積雪面の推定が有効であることがわかる。また、図20においても接峰面を作成する方法⑤が全体に誤差が小さい結果となっている。

以上の結果から、地形データから積雪面を推定して

シミュレーションを行う際には、接峰面を作成する方法が最適と考えられる。また、計算方法の簡便さを考慮すると、方法④(30m)も比較的誤差が小さい結果を示している。

4.2.3 豪雪時の雪崩発生状況を考慮した雪崩運動モデルのパラメータの検討

豪雪時に警戒避難等の対策を講じる必要が生じたとき、雪崩到達範囲の予測が重要となる。保全対象からの見通し角により最大到達距離を求める経験則³⁾もあるが、図21のように平成18年豪雪の雪崩災害事例と比較すると、過大なものとなる場合があることがわかる。そこで、前節のように雪崩経路の斜面形状を適切に設定し、さらに適切なパラメータによりシミュレーションを行うことが重要となるが、既往の雪崩事例が無い場合には表6のような逆算によるパラメータの目安が存在しないため、緊急時の対応に苦慮することが考えられる。そこで、様々なパラメータを用いてシミュレーションを行い、実際の雪崩到達範囲をよく再現できるパラメータを選定することとした。

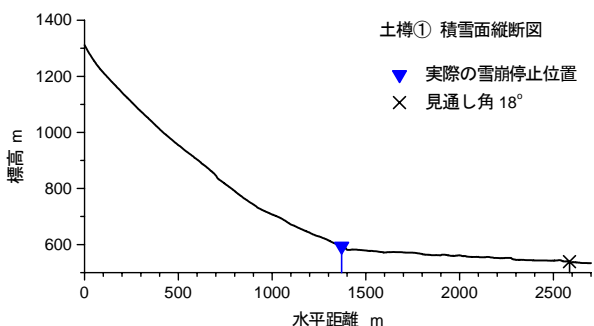


図21 実際の雪崩到達地点(▼)と発生点までの見通し角18°による表層雪崩の最大到達地点(x)(図15土樽地区の経路①)

表7 パラメータ検討のためのパラメータの組み合わせ

設定	ξ	h
①	秋山郷・土樽地区の平均値 (秋山郷:236、土樽:258)	$h_0 = 1\text{ m}$ から 100 m 毎に 1 m 増
②	秋山郷・土樽地区の最大値 (秋山郷:291、土樽:338)	$h_0 = 1\text{ m}$ から 100 m 毎に 1 m 増
③	1000	一定 (1 m)
④	2000	一定 (1 m)
⑤	3000	一定 (1 m)

シミュレーションは前節と同様に新潟県湯沢町土樽周辺および新潟県津南町～長野県栄村の秋山郷周辺における雪崩経路の積雪面データを用いておこなった。シミュレーションに用いる乱流減衰係数 ξ および雪崩の厚さ h の組み合わせの設定は表7のとおりである。まず表7の設定①、②については、雪崩履歴からパラメータを逆算した場合について表6の値(h 増加の場合)を使用するものとし、土樽・秋山郷地区それぞれについて ξ の平均値および最大値(危険側)を採用した。一方、表6の h 一定の場合については、集落雪崩対策で用いられている $\xi = 1000 \sim 3000$ (表層雪崩の場合)⁴⁾と範囲がほぼ一致していることから、設定③～⑤のように、3ケースに分割して計算を行うこととした。

図22は実際の雪崩停止位置と、表7の各パラメータ設定を用いて計算された停止位置を縦断面上で比較したものである。パラメータによっては最大1km程度まで実際の停止位置との差が生じる場合もあったが、見通し角18°を用いて設定された最大到達距離よりは明らかに実際の雪崩停止位置に近づいている。このことから、見通し角を用いた従来の危険区域設定手法をシミュレーションにより改善可能と期待できる。

また、最適なパラメータを検討するために、実際の停止位置と、各パラメータによる停止位置の計算結果の差を図23にまとめた。設定②による、既往の雪崩事

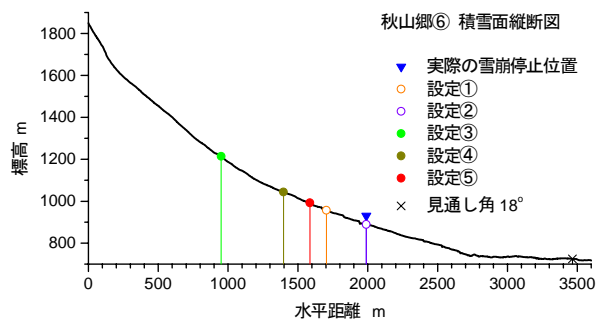
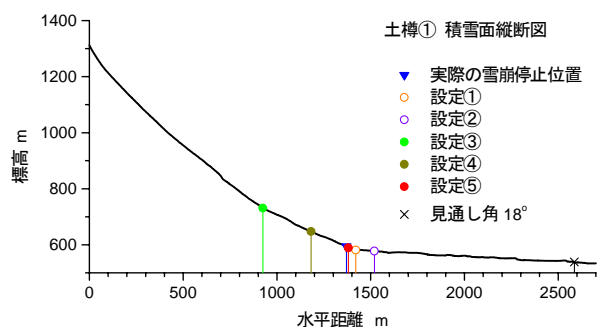


図22 各パラメータによる到達距離の変化(上:土樽①、下:秋山郷⑥)

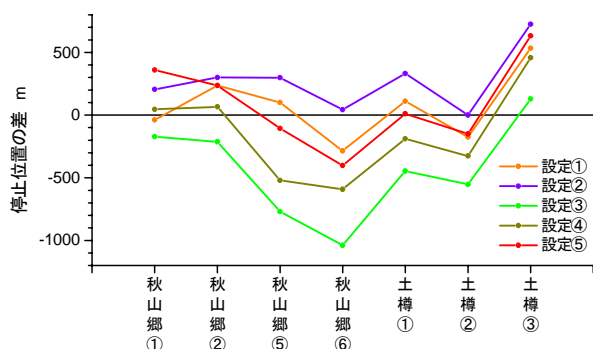


図 23 実際の停止位置と各パラメータによる停止位置の計算結果との差

例から逆算したパラメータのうち最大値を使用した場合の結果はすべて安全側に計算されており、危険箇所設定を行う上では最も実用的といえる。また、雪崩事例がない場合には、設定⑤ ($\xi = 3000$) を用いた場合も、比較的誤差が少ない結果となっている。

よって、過去の雪崩履歴が判明している地域ではパラメータを逆算した中から最大値を、また履歴が存在しない場合は $\xi = 3000$ 程度に設定することが考えられる。

また、秋山郷⑥や土樽③ではどのパラメータ設定においても停止位置の誤差が大きくなっており、上記の推奨パラメータを使用しても最大で ± 500 m 程度の誤差が生じる可能性があることを示している。これは、本研究で使用したシミュレーションは縦断地形しか設定せず、上記の経路にみられる谷幅の広がり (図 15) 等の要素は考慮していないことが関連していると考えられる。より精度の高い危険区域設定手法を確立するには、本研究のような経路地形やパラメータの設定手法の高度化に加えて、シミュレーション自体の高度化 (2次元化など) も必要になると考えられる。

5. まとめ

豪雪時の雪崩災害を防止・軽減するための手法について検討し、以下のような結果が得られた。

- 雪崩危険箇所点検について、行政機関等からのヒアリングおよび現地調査を実施し、点検手法や内容を体系的にとりまとめ、「雪崩危険箇所点検・管理要領 (案)」を作成した。また、応急対策についても同様に調査を行い、施工方法などによって分類して対象斜面の規模等に応じて最適な手法を選択するためのフローを作成し、「雪崩応急対策手法事例集」としてとりまとめた。これらは寒地土研雪氷チームの作成する「道路管理上のパトロール要領」と合わせて土研資料として

公表する予定である。

- 解析雨量および地形データを組みあわせて広域の積雪安定度の変化を計算することで、平成 18 年豪雪時に多量の降雪により発生した雪崩について、雪崩発生の危険度を時間および地域を絞り込んで示すことができた。

- 雪崩の到達距離をシミュレーションで予測する手法について、精度向上のために積雪期の斜面形状を接峰面により推定する手法を提案し、それをを用いることでより合理的に危険区域の設定を行えることを示した。

参考文献

- 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 (基礎雪氷学講座第Ⅲ巻)」、古今書院、pp.236、2000.2
- 水津重雄：「激しい降雪による乾雪表層雪崩危険度モデル」、雪氷、64(1)、pp.15-24、2002.1
- 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、1960.1
- 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、pp.170、1996.2
- 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, pp.64, 1964.3)
- Schaerer, P.A. : “Friction coefficients and speed of flowing avalanches”, IAHS-AISH Publication, No.114, pp.425-432, 1975

RESEARCH ON AVALANCHE RISK ASSESSMENT METHOD IN HEAVY SNOW

A number of snow avalanche hazards caused serious social problems in the Heisei 18 heavy snow. To overcome these problems, we collected examples of inspection and emergency measures from the administrative offices and published “Guidelines for Inspection of Avalanche Danger Slope (draft)” and “Case Study Book of Emergency Measures for Avalanche” for systematic inspection and emergency measures.

Additionally we investigated avalanche risk evaluation method of calculating stability index of the snowpack by use of radar rain gauge and digital elevation model. We suggested the avalanches during snowstorm can be predicted since the time series of the stability index in Heisei 18 heavy snow decreased below dangerous level in the storm.

Furthermore, we proposed methods of estimating snowy avalanche track from digital elevation model in non-snow season and setting parameters of avalanche dynamics model verified by runout data in the Heisei 18 heavy snow, for accurate numerical simulation of avalanche runout.

Keyword: snow avalanche, inspection, emergency measure, radar rain gauge, stability index, avalanche dynamics model