

# 風および重力による降雪再分配を考慮した積雪層厚の空間分布予測と検証 Modeling snow redistribution by wind and gravity: prediction and validation of spatial snow coverage in an mountainous terrain

松四 雄騎<sup>1)</sup>, 松浦 純生<sup>1)</sup>  
Y. Matsushi<sup>1)</sup>, S. Matsuura<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>京都大学防災研究所 地盤災害研究部門  
<sup>1)</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

---

*Abstract:* Prediction of potential sites of snow avalanche requires evaluation of spatial distribution of snow cover in mountainous hillslopes. Thickness of snowpack depends on redelivery of snowfall through suspension and saltation of snow particles by wind, as well as gravitational creep along the snow surface. This study attempted to model the processes of snow redistribution on hillslopes and calculated the spatial snow accumulation using a geographic information system. Suspension and saltation of snow were modelled and calculated based on wind velocity and direction, and aspects and gradient of hillslopes. Creep of snow particles was evaluated according to the budget of gravitational movement as a function of hillslope gradient. We tested the model at a observation site of Gamahara-zawa, central Japan. The model roughly explained the actual snow thickness in the watershed measured by airborne laser scanning. A more precise prediction needs a further search for the optimal set of parameters, which should be estimated from an in-situ observation of snow transport and settlement at varying topographic and meteo-hydrological conditions.

*Key words:* saltation, creep, geographic information system, airborne laser scanning

---

## 1 はじめに

山間地における雪崩の発生場を予測し、減災を図るうえで、斜面上の積雪層厚の空間分布を予測することは極めて重要である。一般に、雪崩は、積雪層内の特定層位のせん断破壊を起点とする上載積雪の崩落・流動現象であり、発生源の拡がり（点発生あるいは面発生）、すべり面形成位置（表層破壊あるいは全層破壊）、積雪層の水分含有状態（乾雪あるいは湿雪）などによって分類される。このうち、面発生型表層雪崩は、積雪表面あるいは積雪層内での霜形成のような変質や、粗大粒径で乾いた雪の供給により形成される弱層がすべり面となる。このタイプの雪崩は前兆が少なく突発的なうえ、面的拡がりをもつ破壊が瞬時に伝搬し、大量のデブリを生じることが多いので、弱層の存在や上載層の厚みを予期しておくことが重要である。また、積雪底面をすべり面とする全層雪崩は、融雪期に特定の斜面で繰り返し発生することが多く、ある程度の前兆現象がみられるために警戒が可能である。しかし、その運動様態は積雪層の厚みと性状および底面の水理状態に依存して正確な予測は難しい。いずれにせよ、今日では山地斜面の傾斜は、細密デジタル地形情報の解析によって得られるようになっているため、任意場所・任意時点での積雪層の厚みおよびその構造を予測することが雪崩災害の被害軽減につながる。

山地斜面における降雪は、風および重力によって再分配される。そのため、風向と風速、および地形条件により、積雪層厚は空間変化に富む（図-1）。特に風衝斜面では、アブレーションによる削剥が卓越し、風背斜面では風速逓減と渦形成により堆積が生じる。こうした風による再分配は、稜線付近でより顕著に発生する。風が雪粒子を輸送するプロセスは、地表風速と粒径に依存して異なる（図-2）。小さな粒径の雪は、風速が十分に大きい場合、浮遊運動し、長距離を移動する。相対的に粒径の大きな雪は、風により浮上して風下側へ着地するような跳動により輸送される。一方、斜面の勾配が大きい場所では、雪粒子は重力に従って積雪表面を下方へと転動し、凹地へと集積する（図-1, 2）。このように山間地における積雪層は、一般的には、風背斜面の尾根付近で厚く、また凹型収束斜面で厚い。これらの場において斜面の勾配も大きいときは、特に雪崩に対する警戒が必要となる。

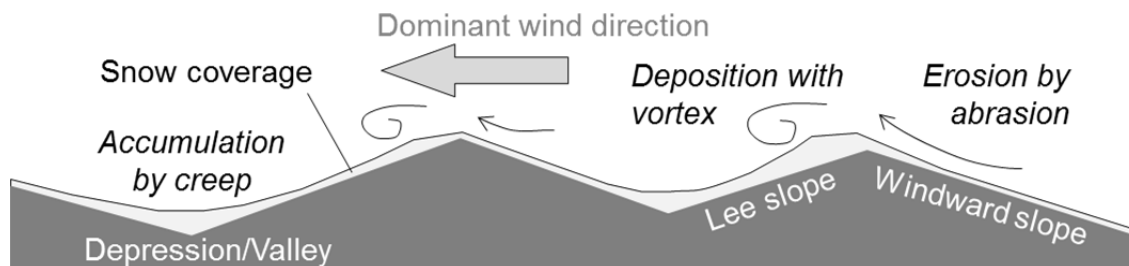


図-1 山地斜面における積雪層厚の空間分布の概念.

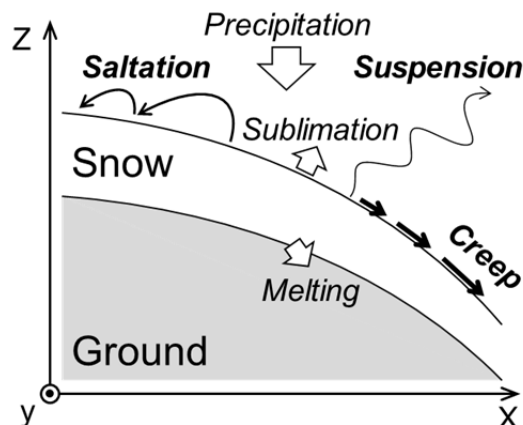


図-2 風および重力による積雪の移動と収支に影響するその他の過程

積雪層の空間分布を予測するうえでは、風および重力による輸送の過程をモデル化し、地形条件が、それらの過程にどのような影響をもつか計算可能な形にする必要がある。前述のように雪の再分配には、いくつかの様式が存在するが(図-2)、実用性を考えると、地表近傍大気の運動とそれへの雪粒子の取り込み・輸送・堆積といった素過程を全て計算するのは全く現実的ではない。また、観測点における気象観測データを入力として、空間的な計算が実行できることが望ましい。そこで、各輸送過程を想定した形ではあるものの、ある程度経験的に定式化された関数を結合させて計算するアプローチが良いように思われる。本研究では、そのような半経験的プロセスベースモデルを開発する。具体的な計算法はのちに述べることとするが、これにより、入力としての降雪を、風・地形・積雪層厚をパラメータとする関数により、地理情報システムを用いてデジタル地形モデル上に再分配する。得られた結果を、現実の積雪層厚の空間分布と定性的に比較することで、計算の妥当性を検証することにした。

## 2 検討対象地

### 2.1 場所と地形条件

モデルを用いた計算が可能となる条件が整っており、かつ積雪層の空間分布データが得られる場所として、新潟—長野県境に位置する蒲原沢を検討対象とした(図-3)。蒲原沢は、標高 400-1600 m の範囲にわたる大起伏な山岳流域である。流域の斜面は 30-40° の急勾配を呈し、地すべりやガリーなどにより起伏に富む。

### 2.2 積雪の空間分布データ

この場所では、無積雪落葉期(2004年11月23日)に航空レーザー測量が行われており、1 m メッシュのデジタル地形情報が得られている(図-3A)。また、最大積雪期の2月最後半(2003年2月26日)には雪面の形状を把握するための航空レーザー測量が行われており、この2時期のデータの差分をとることによって、積雪層厚の空間分布が得られている(図-3B)。

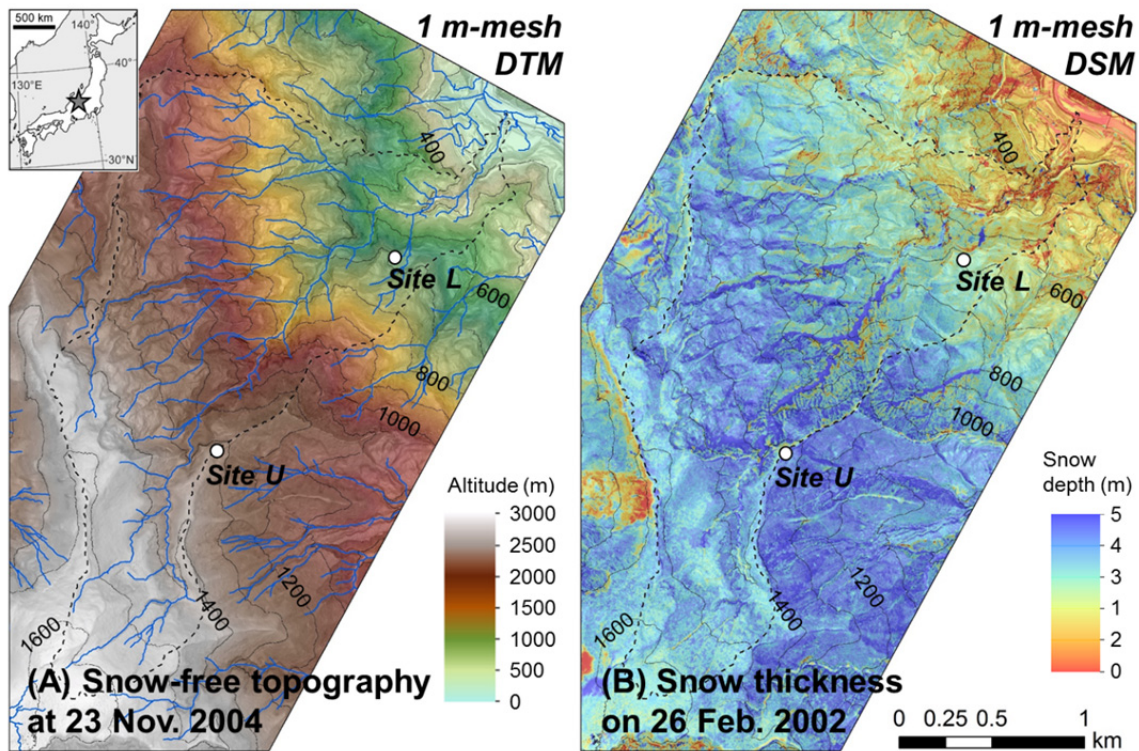


図-3 検討対象地域とした蒲原沢の地形と積雪特性。

積雪層厚は標高に依存して空間変化していることがみてとれる。標高 100 m おきに積雪データを抽出し、標高と積雪層厚の関係をプロットすると、図-4 のような傾向が得られる。積雪深は、標高 300 m から 1000 m の区間では線型的に増大し、4 m 程度にまで達する。しかし、標高 1100 m 以上では、ほぼ横ばいになり、1400 m 以上ではむしろ高標高地ほど減少する傾向がみてとれる。一般に、標高が高くなるにつれ、気温低下に伴う飽和水蒸気量の減少と凝結量の増大により、降雪量は増大すると考えられる。しかし、線型的増大を示す区間での、標高と積雪量の増分の傾きは  $4.4 \times 10^{-3}$  である。これは明らかに、単純な降雪量増加の考え方では説明しにくい大きな増大傾向といえる。この全体として非線形的な積雪分布は、風背斜面の稜線近傍での風衝斜面側からの尾根を越えた雪の輸送と、斜面上方からの重力による雪の再配分が少なくなることの両方を反映したものと考えることができるだろう。

その他の地形特性と積雪層厚の関係をみてみよう。まず斜面方位に関しては、後述するように卓越風向である西風の風背側となる東向き斜面で、積雪層厚が大きいことが期待されるわけであるが、標高の影響の陰に隠れてはっきりした傾向はみえない(図-5A)。むしろ、東向き斜面で積雪層厚が小さい傾向があるようにもみえる。次に、斜面傾斜角と積雪層厚では、解釈可能な傾向があるようにみえる(図-5B)。傾斜  $30^\circ$  以下では一定の層厚を保っている場所が多いが、傾斜  $30^\circ$  以上では、削剥の影響がみられ、積雪層厚がゼロとなる場所が多くなる。そして傾斜が  $50^\circ$  以上の場所では、厚い積雪に覆われるケースが減少する。斜面の地形曲率との比較では、曲率が正の値をとる凸部よりも、曲率が負の値をとる凹地で積雪層厚が大きい傾向にある(図-5C)。こうした地形と積雪との関係は、いずれも風や重力による雪の再配分と関係すると思われるが、どの地形パラメータをとっても単純には積雪層厚が予測できないことに注目すべきである。このことは、風向・風速と地形とが相互作用し、複雑な条件で、積雪層厚が規定されていることを意味しており、本研究で追及するような再配分過程を考慮したモデリングの必要性を示している。

### 2.3 気象観測データ

蒲原沢では、図 3 に示す L 地点で通年での気象観測が実施されている。積雪層厚の空間分布の航空レーザー測量を実施した 2002-2003 年の冬季のデータを図-6 に示す。この地域では西風が卓越し、1 時間平均風速はおおむね 5 m/s 以下である。このシーズンでは 2002/12/9 以降に

根雪の蓄積が始まり、12/25以降は融雪浸透水量がほぼ一定となって積雪層が安定的に発達し、翌3月初旬をピークに、4/29に消雪している。本研究では、積雪の生じはじめる12/5以降を解析の対象とした。

なお、航空レーザー測量の取得された2003/2/26時点での積雪層厚を、地点標高を用いて図4にプロットすると、地点Lについては、おおよそ平均的な厚みを持つ場所での計測となっていることがわかる。一方、もう一つ、高標高部（地点U）でも積雪深の実測データがあるが、これは、地点標高の平均よりも大幅に低い値となっている（図-4）。この地点は稜線上に位置しており、相対的には削剥の卓越する場であったことがわかる。

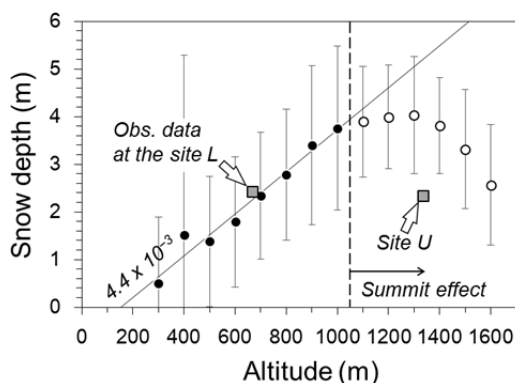


図-4 蒲原沢における標高と積雪層厚の関係。エラーバーは1標準偏差。

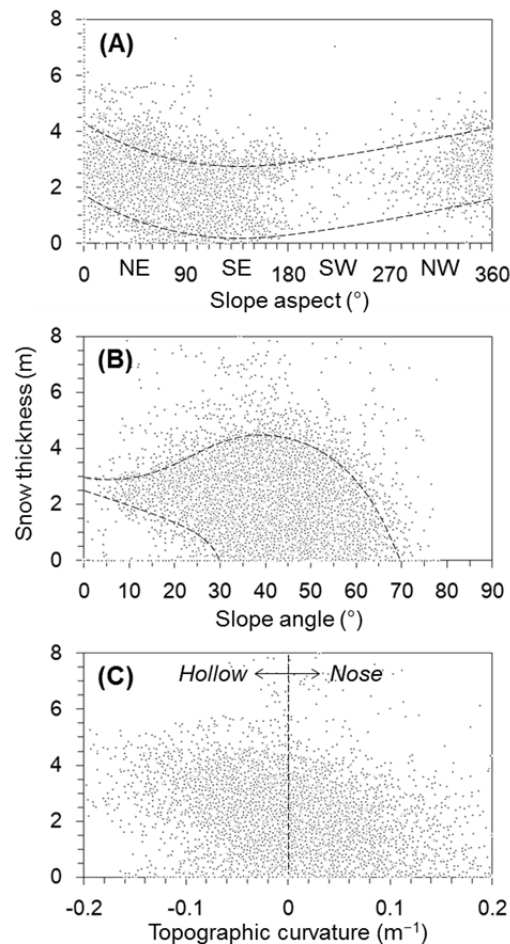


図-5 積雪層厚と地形特性の関係

### 3 モデル化と計算および検証

#### 3.1 風による降雪再分配のモデル化

雪が風によって輸送される時、その輸送量は風速の3乗にほぼ比例することが知られているが、山間地のように給源と堆積域が輸送経路に沿って繰り返し出現する場での、正味の削剥と堆積量の推定は、難しい問題となる。ここでは、風が斜面表面にもたらした積分的な仕事量として、斜面の傾斜ベクトルと風向ベクトルの内積を考えることとする。この指標は風衝斜面で正の値を、風背斜面で負の値をとる。この指標に比例するものとしてあらわされる量は、跳動によって輸送される雪の削剥と堆積である。

ただし、方向的には風衝斜面に相当しても、谷底では、風が当たらないために堆積がより促進され、稜線付近では逆に削剥が強化されるはずである。これを定量化するため、吹送距離を半径とする円窓領域を用いた地形の近傍解析により、 $-\pi$  (凹部) から  $+\pi$  (凸部) の値をとる地表開度を定義し、双曲線正接関数を用いて、削剥強化指数 (0~2) と堆積強化指数 (0~-2) を定義し、計算した。この指数は、平板斜面で1となり、その場合は削剥・堆積のいずれも強

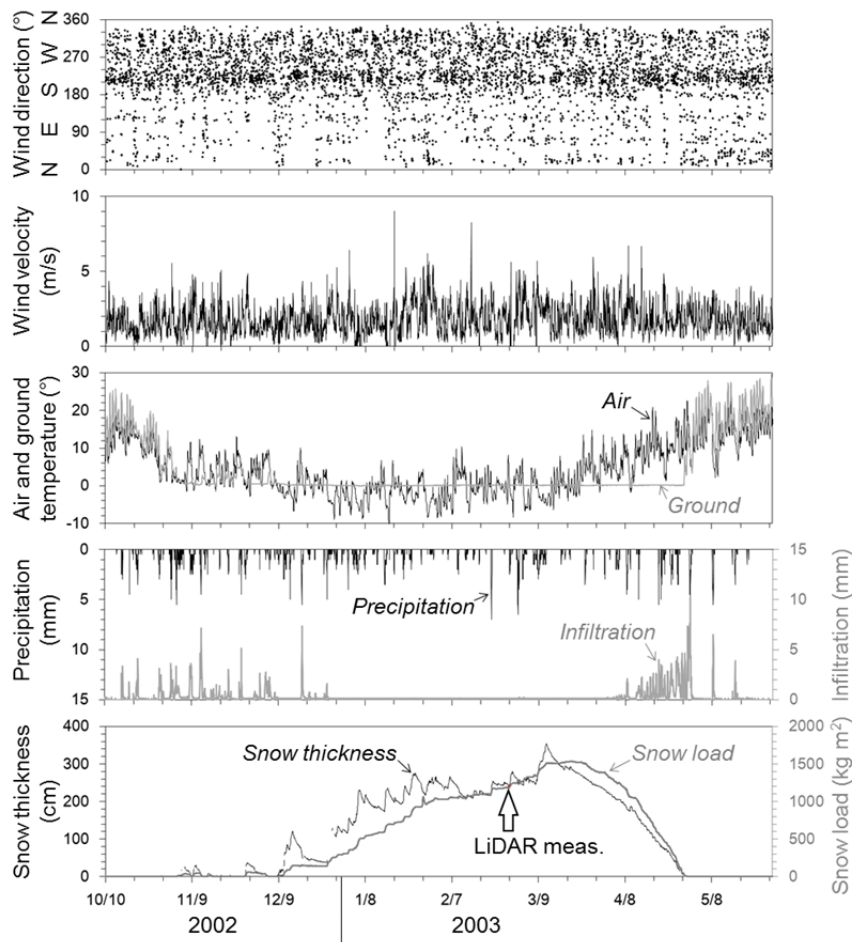


図-6 蒲原沢における 2002-2003 年冬季の気象観測データ

調されない。周囲の開けた尾根では、削剥が最大 2 倍強調され、周囲を斜面に囲まれた谷底では、堆積が最大 2 倍強調される。ここでは吹送距離は、積雪分布の傾向から 50 m とした。

風によって輸送されてくる雪は、当然系外からも供給されるはずであるから、この過程については、計算領域内での物質収支は成立せずともよい。本研究では、最終的に、風向・風速・斜面方位・斜面勾配・地形開度とそれらにかかる係数により、風による降雪再分配を考えることになる。浮遊過程による雪の輸送は明示的には組み込まれていないが、ここで設定された地形効果の中に含まれるものとみなされる。

### 3.2 重力による降雪再分配のモデル化

次に、重力による降雪再分配を考える。降雪直後の新雪は低密度で軟らかく、急勾配斜面では重力に従って斜面下方に匍行するものと考えられる。この過程は、ある集水域の中で収支が閉じるはずであるので、保存則に従うものとする。雪粒子の輸送量が斜面の勾配に比例するものとして連続の式を立て、地理情報システム上で、セルベースの輸送計算を行った。このとき、移動層の厚みは、その計算サイクルで付加された新雪相当の値とした。この過程は、凹地や谷底への雪の集積および尾根部での緩やかな積雪層の削剥を表現するものである。

### 3.3 計算結果の例

本研究では、蒲原沢を対象に、気象観測露場で得られた降水量、風向、風速を入力として、デジタル地形モデル上での、降雪再分配を計算した。新雪の密度は  $0.2 \text{ g/cm}^3$  とし、12/5 から 2/26 までの時系列データを、風向はベクトル積算により、降雪は算術積算により、12 時間ごとにまとめて入力とした。そのうえで、モデル上での雪の移動性を支配する削剥/堆積係数や拡散係数を変えて計算を行い、実際の積雪分布と比較した。

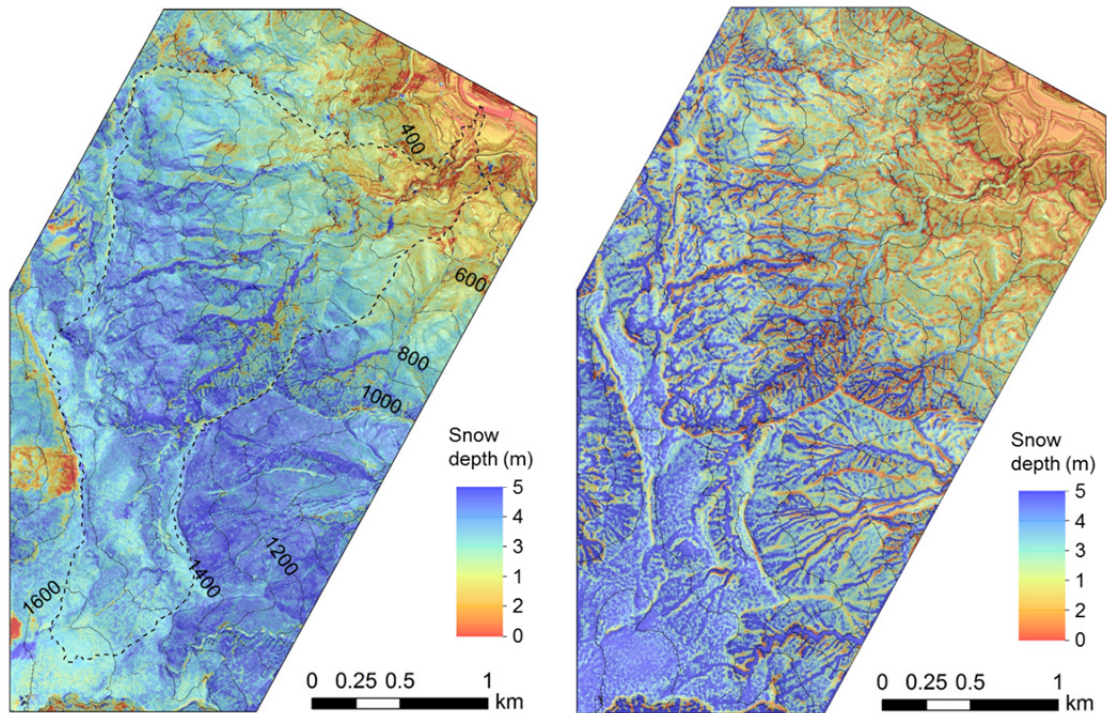


図7 航空レーザー測量された積雪層厚分布（左）と計算結果（右）との比較例

図-7に計算結果と実測データを比較した例を示す。移動性パラメータを大きく設定すると、尾根部で削剥が進行しすぎたり、凹地部への堆積が過度に生じる。計算は実際の積雪層厚分布の大まかな傾向を再現することがわかった。ただし、完全なパラメータチューニングはしておらず、何をもって妥当な再現といえるかという点も含めて今後の課題となっている。本モデリングによって再現できていない点は多くある。例えば忠実に地形に従って重力性の移動が生じれば、図7右の計算結果のように尾根部で積雪層厚が小さくなるはずであるが、実際は、比較的等厚で尾根を覆っていることが多い。それを再現しようと、移動性を抑えると、凹地での集積が再現されなくなる。これは、現在定数として扱っている移動をつかさどる係数が経時的に変化していることを示唆している。雪粒子の可動性は雪の乾湿にも強く影響を受けているであろう。そうしたパラメータを精緻に推定してゆくことは困難であるが、予測精度を高めるうえでは避けて通れないと考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では、雪崩の発生場予測を最終目的として、山間斜面における積雪層厚の空間分布を予測するための半経験的数理モデルを構築した。雪の再分配は、風によるものと、重力によるものに分けてそれぞれモデル化した。風による再分配は雪粒子の跳動を主たる対象とし、風向・風速による風ベクトルと、斜面方位・斜面勾配による斜面ベクトル、および風の効果の強化/遮減を表現するための地形開度指数から、跳動による削剥/堆積のポテンシャルを定量化した。また重力に従う雪粒子の転動による輸送・集積は、斜面勾配と新雪堆積厚に比例して物質が輸送される拡散的モデルにより計算した。

このモデルを、気象観測データおよび積雪空間分布の得られている、蒲原沢流域に適用して予測計算を行ったところ、全体の傾向は再現されたが、細部の積雪層厚を説明するには至らなかった。異なる気象・地形環境下における積雪層発達過程を調べ、パラメータの値およびモデリングの妥当性をより詳細に検討してゆく必要がある。また、本モデルでは、雪堆積過程における弱層の形成やその位置を推定することができないため、積雪層の力学的不安定性を評価するには至らなかった。特定の層準がどのような深度に埋没するか、また削剥により失われるかどうか、つた鉛直方向への層厚・物性の変化を計算するための項を組み入れていくこともまた残された課題といえる。