

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26750137

研究課題名(和文) 雪崩発生予測に向けた乾雪への水の浸透に関する計算手法の開発

研究課題名(英文) Development of a numerical simulation of water infiltration into dry snowpack for avalanche forecasting

研究代表者

勝島 隆史 (Katsushima, Takafumi)

国立研究開発法人 森林総合研究所・気象環境研究領域・研究員

研究者番号：00611922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：融雪や降雨によって発生する湿雪雪崩の発生予測には、積雪内の水分状態や水分移動を数値計算により予測する必要があるが、適切な計算手法は確立されていない。本研究では、乾雪へ水の浸透の室内実験を実施し、これを再現する数値計算手法の開発を行った。その結果、乾雪への浸透先端では浸透の阻害効果が生じていることが明らかとなり、この効果を数値計算に取り入れることで計算の再現性が向上すること示した。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation of water movement in snowpack is an important method for wet-snow avalanche forecasting, although it has not been established. In this study, we observed the water infiltration into dry snowpack during cold laboratory experiments, and developed the numerical method of it. The experimental results showed the limiting process of water entering into dry pore. The numerical simulation of infiltration was improved by including this effect.

研究分野：雪氷学

キーワード：積雪 水分移動 数値計算モデル MRI

### 1. 研究開始当初の背景

日本の国土面積の半分以上を占め、2,000万人が暮らす豪雪地帯では、雪崩災害が毎年発生している。雪崩災害から確実に人命を守るために、雪崩対策施設などのハード対策に加え、住民避難や道路の通行止めなどのソフト対策を適確に実施することが求められている。雪崩を確実に予測できれば、ソフト対策を適確に効率的に実施することが可能となり、被害を最小限に抑えられる。そのため、雪崩予測の実現にむけて、気象データから積雪状態を計算する積雪モデルを用いた雪崩発生予測システムの開発が、日本を含めた各国で行われている。特に国内では、多くの住民が暮らす本州山間部の標高の比較的低い地域において、融雪や降雨によって積雪強度が低下することで発生する湿雪雪崩が、主として発生している(図1)。地球温暖化の更なる進行によって冬季の降雨や融雪が増加し、湿雪雪崩のリスクが増大することが懸念されており、抜本的な湿雪雪崩の対策の実施が現在求められている。

湿雪雪崩の予測には、積雪内の水分状態や水分移動を積雪モデルで再現する必要がある。しかし、既往研究では水分移動の概略的な測定例や簡易な計算モデルがあるのみで、水分移動の適切な計算結果を得ることはできていない。そこで、積雪内の水分移動の計算手法を開発するために研究を進めてきた(図2)。まず、不飽和土壌における水分移動の物理過程を参考に、雪が持つ毛管力を測定し、計算に必要なパラメータの定式化を行うことで、水分移動の数値計算手法の開発を行った(Yamaguchi et al., 2010, 2012)。一方で、乾雪と湿雪とでは浸透先端の振る舞いが異なることを示し、乾雪への水の浸透のメカニズムを明らかにした。そして、湿雪中の水分移動の計算手法では、乾雪への浸透先端の移動を、正しく計算できないことを示した(Katsushima et al., 2013)。このように、乾雪への浸透を伴う水分移動の数値計算には、湿雪中の水分移動の計算手法のみでは不十分であることから、乾雪への浸透先端の移動速度を測定したうえで、乾雪への浸透先端の計算手法を、新しく開発する必要があると考えた。

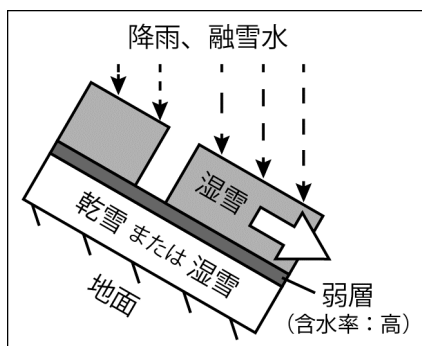


図1 湿雪雪崩の発生メカニズムの概念図

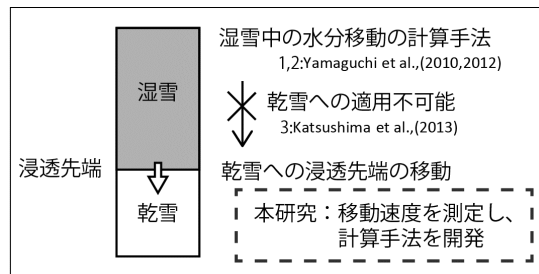


図2 既往研究の概要と本研究の目的

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、まだ解明されていない乾雪への浸透先端の移動過程を明らかにし、その計算手法の確立を図ることである。

### 3. 研究の方法

本研究では、乾雪への浸透の計算手法の確立を図るために、

- 1) 乾雪への浸透先端の移動速度の測定
- 2) 乾雪への浸透先端の移動の数値計算手法の開発

の2つの研究を実施する。

まず1)については、乾雪への浸透先端の鉛直1次元の下方への移動速度を測定する。あわせて、浸透先端の含水率や、湿雪中の平均含水率を測定した移動速度から推定する。積雪内の水分移動は、雪の粒子直径に大きく依存することが分かっている。また、積雪表面へ供給する水のフラックスの大きさは、移動速度や含水率に直接的に関係することが明白である。そこで、粒子直径や供給水フラックスに対する浸透先端の移動速度や含水率の関係式を、測定により得る。さらに、近年、雪水分野への応用研究が進められているMRI(磁気共鳴画像法)装置を用いて浸透時の含水状態を非破壊にて測定する。

そして2)については、測定により得られた乾雪への浸透先端の移動速度を適切に表現する計算モデルを開発し、乾雪への浸透の計算手法を確立する。そして、移動速度の測定結果と、既往のリチャーズ式に基づいた湿雪での水分移動のモデルによる計算結果と、新たに開発するモデルの計算結果とを比較することで、開発したモデルの予測精度や有効性を検証する。

### 4. 研究成果

- 1) 乾雪への浸透先端の移動速度の測定

図3に示す実験装置を用いて、一次元鉛直下方への浸透を低温室内において再現した。内径6mm、長さ20cmの細長いカラムに雪粒子を詰めて、そのカラム上端に一定速度で水を供給することで、鉛直下方への浸透を発生させた。そして、そのときの浸透の状況について近赤外線カメラを用いて撮影を行うことで、浸透先端の移動速度を測定すると

もに、MRI 装置内において浸透実験を実施することによって浸透時の含水状態の測定を実施した（図 4）。

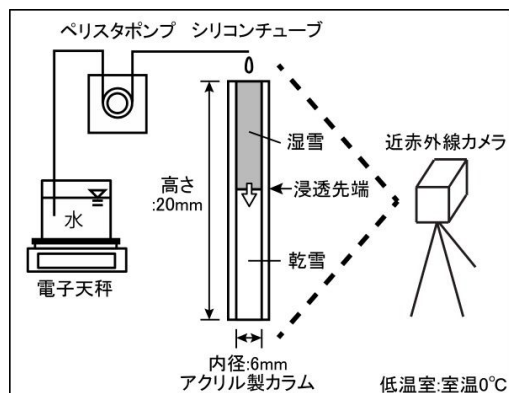


図 3 1次元浸透実験の装置概念図

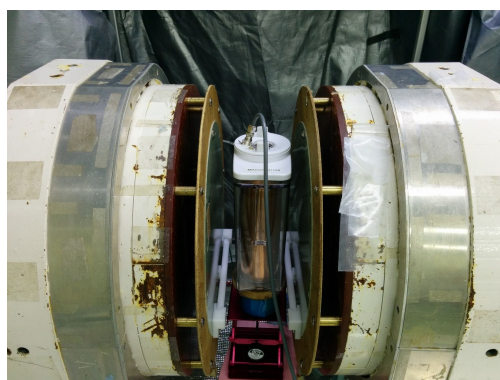


図 4 MRI 装置を用いた 1次元浸透実験

従来の土壌における不飽和浸透の理論では、一定の速度で単一の積雪層に水が供給されたときには浸透先端が一定の速度で移動するとともに、そのときの高さ方向の含水状態も一定となるとされてきていた。しかしながら図 5 に示す実験の結果のように、乾雪への浸透では初期における浸透先端の移動速度が浸透後半よりも遅くなることが確認された。そして、このような浸透速度の振る舞いが形成されるには、浸透先端の含水率が上部後面と比較して高くなる含水率プロファイルとなる必要があることを確認するとともに、粒径の大きな雪において、このような振る舞いが顕著に現れることを確認した。そして、MRI 装置を用いた含水状態の非破壊測定の結果から実際に浸透先端の含水率が高くなっていることを直接的に確認した。

このような振る舞いは、乾雪への浸透時に発生する毛管圧の測定をした過去の自身の研究の中で指摘された現象であり（Katsushima et al., 2013）水侵入圧と呼んでいる浸透の阻害過程が存在することによって発生する現象であると考えている（図 6）。そのため本研究の実験結果は、この理論を強く裏付ける結果が得られたと考えている。

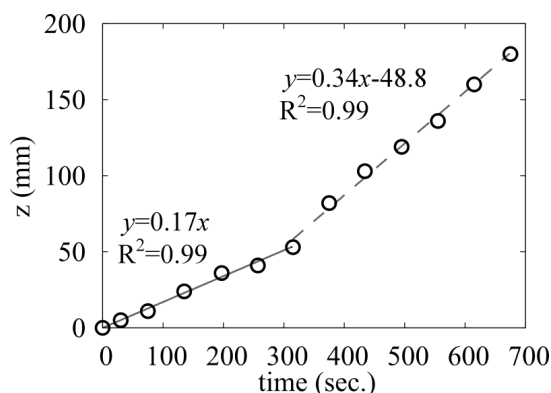


図 5 近赤外写真により得られた浸透先端の位置の時間変化（勝島ほか，2015 より引用）

Increasing  $P_c$   $dP_c/dz > 0$   
 Decreasing  $P_w$   $dP_w/dz < 0$

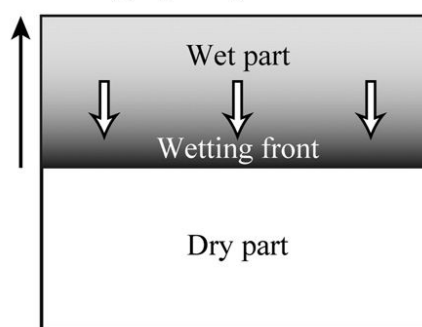


図 6 乾雪への浸透時の毛管圧、間隙水圧の鉛直プロファイルに対する振る舞い（Katsushima et al., 2013 より引用）

## 2) 乾雪への浸透先端の移動の数値計算手法の開発

実験で得られた浸透の実験結果に対して、従来の土壌における不飽和浸透の理論であるリチャーズ式にもとづいた水分移動モデルを用いて実験条件に対する浸透のシミュレーションを行うとともに、乾雪への水の浸透を阻害する水侵入圧の効果を取り入れた水分移動モデルを構築してシミュレーションを行い、実験結果と計算結果とを比較した。

その結果図 7 に示すように、浸透先端の移動に対して従来の手法では実際の現象よりも早い移動速度が評価されており、適切な計算結果を得ることが出来なかった。一方で、浸透後半においては、概ね良好な計算結果が得られていた。この浸透初期の浸透速度の過大評価を改善するために、乾雪への水の浸透を阻害する効果を計算手法に取り入れることによって、浸透先端の移動速度や含水状態の再現性が向上することに成功した。そして、粒径や供給水フラックスを変えた実験結果に対して、この手法を用いて再現実験を行うことで、開発した水分移動モデルが実用的な再現精度を持つことを示した。

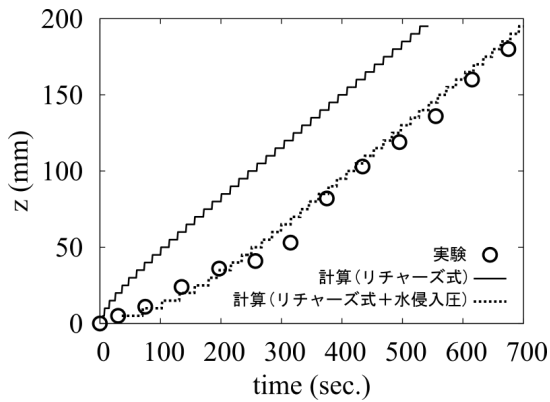


図7 浸透先端の位置の時間変化の実験結果と数値計算結果 (勝島ほか, 2015 より引用)

以上から本研究では、2年間の短い研究期間の中で、湿雪雪崩の発生予測において重要となる積雪内の水分移動に対して、その物理過程を明らかにするとともに、数値計算を可能にする重要な研究成果が得られたと考えている。現在、これらの研究成果を取りまとめており、近日中に論文の投稿・公開を予定している。

また本研究の研究成果は、湿雪雪崩の発生予測研究はもとより、融雪や積雪面への降雨が起因して発生する地すべりや融雪出水などの融雪期災害に対する発生予測研究の高度化に繋がるものであり、幅広い研究分野に対して影響を与えるものと考えられる。近年の地球温暖化に伴う積雪地域における融雪や降雨の増加が世界的に危惧されていることから、これらの融雪期災害に対して各国の研究対応が始まっており、今回の研究成果は今後の融雪期災害の予測研究をリードするものと考えている。

また実際の自然積雪においては、不均一な選択流による水分移動が卓越する。そのため、どのような雪でどのような選択流が形成するのかを明らかにする必要がある。この内容に対して、今回の研究成果による計算手法を用いて選択流の挙動を3次元で再現する研究を、2016年度に新たに採択された挑戦的萌芽研究の中で実施する予定となっている。この研究の中では、本研究で実用化を図った乾雪への浸透のシミュレーションモデルとMRI装置を用いた高速非破壊測定を用いて、乾雪内において形成される選択流の全容を明らかにする予定である。今後は、本研究で実施した研究内容を更に深めることで、湿雪雪崩や地すべり、融雪出水などの融雪期災害の発生予測研究を大幅に加速し、国土面積の半分以上を占め2,000万人が暮らす豪雪地域の未来を切り開きたい。

#### <引用文献>

Yamaguchi, S., Katsushima, T., Kumakura, T., and Sato, A., Water retention curve of snow with different grain sizes. Cold Reg. Sci. Technol., 64(2), 87-93, 2010.

Yamaguchi, S., Watanabe, K., Katsushima, T., Sato, A., and Kumakura, T., Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. Ann. Glaciol., 53(61), 6-12, 2012

Katsushima, T., S. Yamaguchi, T. Kumakura, A. Sato, Experimental analysis of preferential flow in dry snowpack. Cold Reg. Sci. Technol., 85, 206-216, 2013.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

勝島隆史, 安達聖, 山口悟, 平島寛行, 熊倉俊郎, 乾いた雪への鉛直1次元浸透実験と数値シミュレーション, 雪氷研究大会(2015・松本), 2015年9月13日-16日, 信州大学理学部(長野県松本市)

勝島隆史, 安達聖, 山口悟, 平島寛行, 熊倉俊郎, 乾いた雪への水分移動モデルの適応性の検証, 2015年度日本雪氷学会北信越支部研究発表会, 2015年6月6日, 信州大学理学部(長野県松本市)

勝島隆史, 山口悟, 平島寛行, 熊倉俊郎, しまり雪層内における水みちの持続, 雪氷研究大会(2014・八戸), 2014年9月20日-22日, 八戸工業大学(青森県八戸市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

勝島 隆史 (KATSUSHIMA, Takafumi)

国立研究開発法人 森林総合研究所・気象環境研究領域・研究員

研究者番号: 00611922