

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04960

研究課題名（和文）MRIによる積雪内選択流の形成理論に基づく新しい浸透計算スキームの開発

研究課題名（英文）Development of a new infiltration calculation scheme based on the theory of the formation of preferential flow in snowpack revealed by using MRI

研究代表者

勝島 隆史（Takafumi, Katsushima）

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：00611922

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：融雪災害予測技術の高度化のために、降雨や融雪により積雪内部に生じる選択流の形成過程の解明とモデル化に取り組んだ。MRIによる非破壊測定技術を用いて、選択流の形成と発達、雪試料の変形の一連の様子を可視化した。積雪層内に鉛直方向に毛管力の差異が存在する場合には、差異が大きいほど、選択流が水平方向に広がる傾向があった。また、多孔質体中の流体が別の流体に置換する過程をモデル化したインベーションパーコレーションに基づいて、間隙スケールの浸透現象を直接計算する手法を開発した。MRIを用いた浸透実験により観察された選択流の形成や、選択流の広がりや、計算により概ね再現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪内部の浸透現象と、それによりもたらされる積雪の内部構造の急激な変化は、積雪研究の実解決問題の一つである。積雪内部の選択流の物理過程を解明し、選択流の可視化技術、シミュレーション技術を開発したことは、積雪内部の浸透現象の全体像を示す可能性のある成果であり、融雪期の積雪現象の理解を大きく前進させる。これらの成果は、これまで予測が困難であった春先の急激な融雪や積雪への降雨による湿雪雪崩、融雪洪水、地すべりなどの融雪災害の予測精度の向上に資するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We have investigated and modeled the formation process of preferential flow inside snowpacks caused by rainfall or snowmelt to improve prediction technology on hazards caused by melting snow. Non-destructive measurement technique by using MRI visualized the formation and development of the preferential flow and the deformation of the snow due to infiltrated water. When differences in capillary forces existed in the vertical direction within the snow layer, the significant differences of it tended to produce a wider horizontal spread of the preferential flow. We have developed a method to directly simulate pore-scale infiltration phenomena based on invasion percolation, which models the fluid replacement process by another fluid in a porous material. The formation of preferential flow and the spread of it observed in MRI-based infiltration experiments were reproduced approximately by the simulation.

研究分野：雪氷学

キーワード：MRI 選択流 フィンガー流 積雪モデル 浸透計算 Invasion percolation

1 . 研究開始当初の背景

融雪や積雪への降雨は、予測が困難な融雪災害をもたらす。

春先の急激な融雪や積雪への降雨による雪崩や融雪洪水、地すべりなどの融雪災害が、近年の気候変動に伴って増加していることが指摘されている。積雪内部の浸透水は選択的な水の流路（選択流）を形成しながら不均一に下方へと流下する。この選択流の形成によって水の集中流下が生じることから、積雪の内部構造や、積雪底面からの流出の量およびタイミングが重要となる。融雪災害の予測には、積雪内部の選択流の予測が重要となる。

様々なスケールの浸透現象により、積雪の内部構造はダイナミックに変化する。

積雪内部への水の浸透により、フィンガー流と呼ばれる直径数 mm の小さな選択流や、積雪層の変形を伴った直径十～数十 cm 程度の大きな選択流が形成することが知られている。積雪を構成する氷粒子が水を含んだ場合には、粒径の増大と粒子間の結合の減少、そして、それらに伴う力学的な強度の減少と積雪の変形が、急速に進行する。そのため、選択流の形成によって積雪の内部構造には様々なスケールの空間的不均一性が生じる。スケールの異なる選択流は、それぞれの形成に対して相互に作用しあうと推測されるが、選択流の形成状況の観測には横断面を切り出す必要があることから時間変化を連続的に捉えられないという課題があり、積雪内部の浸透過程の全体像は依然として不明確である。これらの解明には、その動態を非破壊的に計測する必要がある。

積雪内部での選択流の動態を、適確に表現する浸透計算スキームの開発が望まれている。

融雪災害の発生予測やリスク評価を効果的に実施するために、気象データから積雪の内部構造や積雪からの底面流出を数値再現する積雪モデルは、有効な手法であると期待される。しかし、選択流を取り扱わない従来の一次元の積雪モデルは、積雪構造や流出の再現性能が低いという問題が指摘されている。これを改善するために選択流の計算手法がいくつか提案されているが、選択流の形成過程の詳細が不明確であることに起因して、既存の手法では現象の表現を簡便にしすぎているか、あるいは複雑にしすぎているかの両極端な状況にある。融雪災害の発生予測でのモデル利用を主目的とした場合、計算コストを下げながらも、選択流の挙動を合理的に表現する計算手法が必要とされている。

2 . 研究の目的

本研究では、独自開発した最新の MRI による非破壊測定技術を用いて、選択流の形成と、それに伴う積雪の内部構造や変形の時間変化の関係を明らかにするとともに、積雪モデルでこれらを統合的に取り扱う新しい浸透計算スキームの開発を目的とする。具体的には、以下に示す 2 つのテーマを実施した。

MRI による選択流の室内浸透実験

浸透計算スキームの開発と検証

3 . 研究の方法

MRI による選択流の室内浸透実験

自然積雪から採取した雪を対象として、MRI の筐体内で浸透実験を行った。両端が開放した円筒形のカラムに、自然の積雪層構造をできる限り維持した状態で雪を充填し、一定の速度で水を雪試料の上端に供給することで人為的な浸透を生じさせた。このときカラム内で生じる間隙スケールの小さな選択流の形成と発達、そして、これらがきっかけとなって発生する雪試料の変形の一連の様子を、MRI を用いて非破壊的に可視化した。

また、間隙スケールの浸透現象を解明し、その計算スキームを開発するために、X 線 μ CT を用いて雪試料の 3 次元データを取得し、雪の間隙構造の 3 次元解析を行った。近年の 3 次元画像処理技術の開発とコンピュータ性能の向上により、X 線 μ CT により取得した多孔質体の 3 次元データに対して、内部の粒子や間隙を個々に自動分割することで、粒子や間隙の大きさや形状、繋がりなどを直接測定する技術が実用化されている。この 3 次元画像処理技術を積雪中の雪粒子や間隙の計測に応用し、X 線 μ CT データから雪粒子の粒径や間隙径を計測した。

浸透計算スキームの開発と検証

多孔質体中の流体が別の流体に置換する過程をモデル化したインベーションパーコレーションに基づいて、間隙スケールの浸透現象を直接計算する手法の開発を行った。この手法は、流体の動態を数理モデルにより表現する手法であるため、大きな計算コストを要しない。Glass et al., (2003) は、巨視的に見た間隙の集合体を 1 つの計算要素と定義し、水ポテンシャルが最小となる要素から順に水が浸入すると仮定したモデルを提案し、土壌中のフィンガー流の発達の再現に成功した。本研究では、これを拡張して個々の間隙の大きさや接続関係を計算に直接使用する "Pore-scale" modified invasion percolation model (以下、PMIP モデル)を開発した。そして、開発したモデルを用いて、自然積雪から採取した試料を対象として X 線 μ CT により取得した雪の 3 次元構造データに対して浸透のシミュレーションを行った。

また、ダルシースケールでの浸透計算の性能向上のために、新たに開発した X 線 μ CT データから間隙径を計測する手法を用いて、自然積雪の間隙の解析を実施し、個々の間隙の持つ毛管力を直接計算により求めることで、計算に必要な雪が持つ毛管力の関数である水分特性曲線の導出を行った。

4. 研究成果

MRI による選択流の室内浸透実験

・湿雪を MRI により撮影するための最適な撮像手法の選択法の提案

MRI により良質な画像を取得するには長時間の撮像時間を要する。一方で、水分を含んだ雪の粒子は時々刻々と変化するため、撮像を短時間で行う必要がある。これらは相反する要求であることから、計測目的に応じて撮像手法を選択する必要がある。MRI による浸透実験に先立って、撮像の高速化を図ったときの撮像時間と画質の劣化を評価し、そのときの撮像対象の雪粒子の時間変化とを比較することで、雪氷用 MRI を用いて湿雪試料中の水分分布を計測する際に計測目的に応じて最適な撮像法を選択するための指針を提案した。

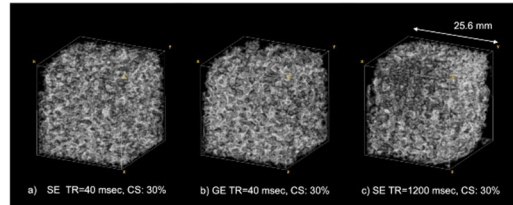


図 1 撮像手法による雪氷試料内の真水の MRI 画像の変化 (安達および勝島, 2021)

・自然積雪内の止水面上における選択流の広がりの解明

選択流が積雪内を流下する際に積雪層の不連続面が存在する場合には、水の流下が阻害され選択流が水平方向に広がる。このような不連続面のことを止水面という。止水面での選択流の広がりはマクロスケールでの積雪層の変形をもたらすことで以後の浸透現象に影響を及ぼすことから、積雪モデルで取り扱い可能な 1 次元のマクロスケールの浸透計算モデルで 3 次元の不均一な浸透現象を取り扱うには、止水面上における選択流の広がりのメカニズムを解明し、その効果をパラメタライゼーションモデルなどの手法によって間接的な形で表現する必要がある。MRI を用いた自然積雪の浸透実験と、X 線 μ CT による間隙構造の 3 次元解析とを組み合わせることで、不均一な浸透現象を取り扱う浸透計算モデルを開発する際に重要となる、選択流の広がりと上下の積雪層の毛管力差異の関係を明らかにする解析を行った。その結果、選択流の広がりには上下の積雪層の毛管力差異に関係し、間隙径の大きな雪ほど層内に生じる毛管力差異が小さいことが明らかになった。

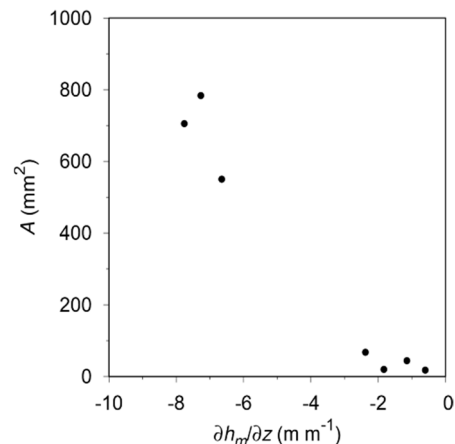


図 2 選択流の広がりとは上下の積雪層の毛管力差異の関係 (勝島ら, 2020)

浸透計算スキームの開発と検証

・間隙スケールの浸透計算スキームの開発

MRI を用いた浸透実験により選択流と止水面が形成した事例を対象として、開発した PMIP モデルにより浸透計算を実施したところ、実験により観察された選択流や止水面、止水面上の側方流の形成を、計算により概ね再現できることが確認された。

・間隙の直接解析に基づいた雪の水分特性曲線の導出

X 線 μ CT データから計測した間隙径の累積分布関数による水分特性曲線を、MRI により計測した水分特性曲線と比較したところ、概ね良好な推定精度を得られることが確認された。これによって、雪試料を濡らすことでしか計測することが出来なかった水分特性曲線を、X 線 μ CT を用いることで雪を濡らすことなく精度良く推定することが可能になるとともに、これまで得ることが出来なかった自然積雪が持つ水分特性曲線を推定することが可能になった。

そのほか、当初予定していなかった成果

・形状指数による積雪粒子の形状の指標化

積雪内部の浸透現象は透水性や水分保持特性によって特徴付けられ、それらは積雪粒子の大きさや形状に関係する。そのため、積雪モデルおよび積雪内浸透モデルの高精度化を図るには、モデル内での粒径と粒子形状の表現についても精緻化する必要がある。多くの場合に、雪を構成する氷粒子は球形ではなく複雑な形状を持つ。また氷粒子間が結合しているため、1 つの粒子を正確に判別することは難しい。そのため、X 線 μ CT による雪の内部構造のデータから粒径を測定する場合には、雪粒子を球形であると仮定して比表面積から求めた球相当粒径が使用されることが多い。X 線 μ CT データから積雪粒子の粒径や間隙径を計測する手法を応用することで、積雪粒子の形状を直接的に表す形状指数により雪質ごとの形状の差異を定量的に示す手法を新たに開発した。これにより、これまで人間の目視により定性的に示していた粒子形状を客観的な手法により定量化することが可能になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 安達聖、勝島隆史	4. 巻 83
2. 論文標題 雪氷用MRI高速撮像法を用いた湿雪試料の最適な撮像法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 569 ~ 578
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5331/seppyo.83.6_569	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katsushima Takafumi, Adachi Satoru, Yamaguchi Satoru, Ozeki Toshihiro, Kumakura Toshiro	4. 巻 170
2. 論文標題 Nondestructive three-dimensional observations of flow finger and lateral flow development in dry snow using magnetic resonance imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cold Regions Science and Technology	6. 最初と最後の頁 102956 ~ 102956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coldregions.2019.102956	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 勝島隆史、安達聖、尾関俊浩
2. 発表標題 X線マイクロCTを用いた3次元形状指数による積雪粒子の形状記述
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達聖、勝島隆史
2. 発表標題 圧縮センシングを用いた雪氷用MRIによる湿雪試料の撮像法の比較
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝島隆史、安達聖、山口悟、尾関俊浩、熊倉俊郎
2. 発表標題 積雪内部のキャピラリーバリアがフィンガー流の広がりにも与える影響
3. 学会等名 雪氷北信越
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝島隆史、安達聖、山口悟、尾関俊浩、熊倉俊郎
2. 発表標題 自然積雪の3次元間隙構造に基づくフィンガー流の数値計算の試み
3. 学会等名 雪氷北信越
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達聖、勝島隆史、山口悟、尾関俊浩
2. 発表標題 3DWSを用いた間隙径計測に基づく雪の水分特性曲線の導出
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 勝島隆史、安達聖、山口悟、尾関俊浩、熊倉俊郎
2. 発表標題 自然積雪の3次元間隙構造に基づくフィンガー流と止水面の数値計算手法の開発
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達聖、勝島隆史
2. 発表標題 X線μCTデータの3DWSを用いた粒径計測手法の提案
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

季刊森林総研 No.47 雪の研究 https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kikan/kikan-47.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	安達 聖 (Adachi Satoru) (80719146)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・特別研究員 (82102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------