

令和元年6月11日現在

機関番号：82105

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12860

研究課題名（和文）MRIによる積雪内部での選択流の動態把握と数値予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of nondestructive observation method using magnetic resonance imaging and numerical simulation model of preferential flow in dry snowpack.

研究代表者

勝島 隆史（KATSUSHIMA, Takafumi）

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） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：融雪災害予測のキープロセスである積雪内部の選択流の形成過程の解明に挑戦した。本研究では、物体内部の水分分布を非破壊かつ3次的に描写が可能なMRIに高速撮像手法を適用することで、これまで不可能であった選択流の形成を3次元で連続的に可視化することに成功した。これにより、選択流の直径は数mm程度で時間変化しないこと、水の供給の継続により選択流の本数が増加すること、鉛直方向に対する間隙径の微小な差異によって側方流が形成することが明らかになった。そして、浸透現象を間隙スケールで表現する数理モデルを新規開発し、MRIによる浸透実験の結果を概ね再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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理論と技術の両面において研究基盤の萌芽に成功したと考える。これらの理論と技術を更に発展・応用することで、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が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We tried to a challenging research that unraveling a developing process of a preferential flow inside of snowpack. We succeeded to visualize a development of the preferential flow by using MRI system that implemented a three-dimensional rapid imaging method. The experimental results showed that the preferential flow path has a dimension of a several mm and its number increased through the continuing water supply. The small discontinuity of pore size and snow density in the vertical direction acted as capillary barriers and induced a lateral flow. We also succeeded to develop a new pore-scale mathematical model of the water movement into dry snow.

研究分野：雪氷学

キーワード：水みち フィンガー流 止水面 MRI X線CT インベージョン・パーコレーション

## 様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

春先の急激な融雪や積雪への降雨により、湿雪雪崩、融雪洪水、地すべりなどの様々な融雪災害が発生する。融雪や降雨による水は、多くの場合に積雪内部を選択的な水の流れ（選択流）を形成しながら不均一に下方へと流下する。選択流の形成によって、選択流の流路内では水の集中による大きな流下速度が生じるとともに、氷粒子の形状や粒径が急速に変化する。これによって積雪からの水の流出や積雪の内部構造には大きな空間的不均一性が生じるため、融雪災害の発生メカニズムは複雑性が高く、予測は困難な状況にある。

これまでに積雪内部の水の挙動を明らかにすることを目的として、野外での積雪ライシメーターを用いた底面流出の観測や、色水などのトレーサーを用いた浸透実験が実施されている。しかしながら、観測や実験が大掛かりであること、選択流の形成に伴って生じる水分移動の空間的不均一性を捉えるには多時期の多点観測が必要であることなどの理由から、いずれも報告事例が少なく限定的な知見にとどまっている。また近年、ふるい分けした人工的な雪試料を対象とした室内浸透実験により選択流の形成過程が明らかになりつつあるが、このような理想的な雪試料と、自然積雪の様な不均一性の高い複雑な雪とでは水の挙動が異なる可能性があるとともに、内部での浸透状況の確認には横断面を切り出す必要があることから、形成した選択流がどのように時間発展するか明確ではない。よって、明らかにすべき選択流の形成と発達過程は山積する。具体的には、どのような積雪状態のときに、どのような大きさを持った選択流が、どのようにして形成するのか？時間経過に伴って、形成した選択流が、どのように変化するのか？そして、選択流の形成により、積雪内部の水分移動や内部構造は、どのように変化するのか？といった点である。これらの解明には、これまでの研究手法では不可能であった、選択流の非破壊測定と、雪の微細構造に着目した緻密な解析、そして選択流の発達を3次元で表現するシミュレーションモデルの開発に、新たに挑戦する必要があると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、融雪災害の予測研究を抜本的に推し進めるために、そのキープロセスである積雪内部の選択流の形成と発達過程を明らかにすることである。

撮像対象内に含まれる水の様子を非破壊かつ3次元的に描写が可能なMRI(Magnetic Resonance Imaging:核磁気共鳴画像法)装置を用いて浸透現象による水分分布の時間変化を詳細に捉えることで、選択流の形成と発達過程を解明するとともに、どのような積雪でどのような選択流が形成されるのかを明らかにする。そして、選択流の3次元シミュレーションモデルを新たに開発し、MRIによる浸透実験の結果を検証データとしてモデルの再現性能の検証を行うことを目的として研究を実施した。具体的には、以下に示す3つのテーマに挑戦した。

MRIによる積雪内部の水分分布の非破壊高速3次元測定技術の開発  
MRIを用いた室内浸透実験による積雪内部の選択流の形成と発達過程の解明  
選択流の3次元シミュレーションモデルの開発

### 3. 研究の方法

#### MRIによる積雪内部の水分分布の非破壊高速3次元測定技術の開発

まずは、本研究の成功の可否を大きく左右する最重要ツールである雪氷用MRIの非破壊高速3次元測定技術の開発に挑戦した。

MRIは、核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance: NMR)現象を利用して撮像対象の内部情報を3次元的に取得する方法である。一般的なMRIでは液体の水の水素原子からNMR信号を取得し画像化する。MRIで湿雪を撮像すると、雪粒子や空隙からはNMR信号は取得されず、試料に含まれる液体の水からのみNMR信号が検出され描画されるMRI装置に使用される磁器回路は、超電導磁石と永久磁石がある。超電導磁石は永久磁石に比べて、静磁場強度が高く、静磁場の均一性も高いといった利点がある。しかし、超電導磁石では液体窒素や液体ヘリウムなどの低温寒剤を使用する必要があるが、これを高い気密性を保持する低温室に設置した場合には、使用中に徐々に低温寒剤が漏れ出した際には実験者が窒息する恐れがある。そのため、雪氷用MRIでは永久磁石を採用している。

積雪内部の選択流の形成と発達を捉え、その後のモデル検証に撮像データを使用するには、高空間分解能、高速撮像、低画像歪みの3つの要素を同時に達成する必要がある。しかし、永久磁石による雪氷用MRIでは上記のように静磁場強度や静磁場の均一性の制約があり、これを全て満たす撮像手法の開発は難しい。そのため、撮像目的に合わせて、ハードおよびソフトの両方面から手法の最適化を図る必要がある。

高空間分解能を達成するために、取得する信号強度の点から有利な高い静磁場強度を持つ1.5Tの永久磁石を用いたMRIを使用した。そして、高速撮像を達成するために、超電導磁石を用いたMRIでの高速撮像に頻繁に使用されるグラジエントエコー(GE)法を用いた手法を試みた。一般に永久磁石は超電導磁石に比べ静磁場が不均一であるため、永久磁石を用いた雪氷用MRI装置では、静磁場の不均一性の影響を受けにくいスピンエコー(SE)法が用いられることが多い。しかし、SE法では長時間の撮像時間となるため、本研究のような現象速度が早い積雪内部での水の動きを可視化するには時間分解能が十分ではない。また開発段階の撮像試験において、GE法を使用した撮像でも時間分解能が十分ではないことが判明した。そこで、GE法に加

えて、近年新たに開発された圧縮センシング(Compressed sensing: CS)を使用することで撮像時間の短縮を図った。GE法はSE法よりも撮像時間を大幅に短縮可能である反面、SE法よりも静磁場の不均一性の影響を受け画像歪みが生じる撮像シーケンスである。そこで、低画像歪みを達成するために、画像再構成プログラムに画像歪み補正プログラムを組み込むことにより、画像歪み補正を行った。

#### MRIを用いた室内浸透実験による積雪内部の選択流の形成と発達過程の解明

本研究で新たに開発したMRIによる非破壊高速3次元測定技術を用いて積雪内部の水の挙動を詳細に可視化することで、積雪内部の選択流の形成と発達過程の解明に挑戦した。

室内浸透実験は、雪氷用MRIのRFコイルの中にカラムに充填した乾雪の試料を入れて、その試料上部にペリスタポンプを用いて一定速度で硫酸銅水溶液を点源にて供給して実施した。先端部を鋭利に加工した内径36mm、長さ100mmの両端が開放した筒状のアクリル製カラムを用いて、自然積雪のこしまり雪およびしまり雪の積雪層から鉛直方向に雪を採取し、雪の採取に使用したカラムごとMRI内部に試料を設置した。試料の採取にあたっては、鉛直方向に顕著な層の違いを持たない、出来る限り均一な積雪層を選択した。MRIによる撮像は、上記に示した静磁場強度1.5Tの永久磁石を用いた雪氷用MRIを使用してGE法とCSを用いた3次元高速撮像手法により2.5分間隔で行い、空間分解能0.4mmで128×128×128の画素数の画像を取得した。

実験により得られた浸透現象と積雪状態を関連付けるために、X線 $\mu$ CTを用いて雪試料を撮影して雪の内部構造の3次元データを取得し、得られた3次元データに対して雪の3次元微細構造の解析を実施した。X線 $\mu$ CTによる撮影では、解像度20 $\mu$ mで500×500×3016の画素数の3次元データを取得した。雪の3次元微細構造の解析では、雪の内部構造の3次元データから個々の雪粒子と間隙の直径と接続関係を直接計算する新しい手法の適用を図った。解析では、ノイズ処理をした3次元データに対して雪粒子と間隙の二値化処理を行った上で、3D Distance Transform Watershed Segmentation法を用いて個々の粒子と間隙に分割し、雪粒子の直径は等体積球相当径を、間隙の直径は間隙に内接する最大の球の半径を求めた。個々の雪粒子や間隙の接続関係は、分割の計算結果から求めた。

#### 選択流の3次元シミュレーションモデルの開発

選択流の形成と発達過程の詳細を解明するために、MRIを用いた浸透実験により得られた選択流の形成と発達を再現する3次元シミュレーションモデルの開発に挑戦した。

MRIを用いた浸透実験の結果から、浸透により積雪内部に形成する選択流は直径数mmと非常に小さいことが明らかになった。そのため、計算格子がある間隙分布を持つことを仮定したダルシースケールの計算手法である従来のリチャーズ式による不飽和浸透計算手法を、選択流による浸透現象に適用することが困難であると考えた。そこで本研究では、個々の間隙を直接計算に使用する間隙スケールでの水分移動の計算手法の開発を試みた。

具体的には、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数理モデルであるインベーシオンパーコレーションに基づいて計算手法の開発を行った。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、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)を新たに開発した。このモデルでは計算アルゴリズムにいくつかの仮定を置いており、1.含水した間隙に接続する乾いた間隙のうち、最小の水ポテンシャルを持つ間隙へ水が瞬時に侵入する。2.周囲を水で囲まれた乾いた間隙へは、水は侵入できない。3.含水した間隙間の水分移動は計算で扱わない。の3つを仮定した。この最小の水ポテンシャルを持つ間隙の探索と、水の侵入の操作を繰り返すことで、浸潤前線が前進する状態を表現した。

浸透実験に使用した雪試料を対象として計算を試行した。実験で取得したX線 $\mu$ CTによる雪の内部構造の3次元データから求めた個々の間隙直径と、間隙の接続関係のデータを使用して、間隙直径からJurin's lawにより間隙の持つ毛管ポテンシャルを、間隙に内接する球の高さ方向の中心位置から重力ポテンシャルを求め、この2つの和を個々の間隙が持つ水ポテンシャルとした。

## 4. 研究成果

#### MRIによる積雪内部の水分分布の非破壊高速3次元測定技術の開発

図1に、凍結したざらめ雪を粉砕し、ふるい分けにより粒径を調整した乾いた雪試料を対象として浸透実験を行ったときの選択流の成長の様子を示した。実験では、ふるいの目が1.0mmと1.4mmのふるいを使用してふるい分けを行った後の1.0mmのふるいに残った雪を、内径36mm、高さ100mmのアクリルカラムに充填して雪試料を作成した。雪試料の上部にペリスタポンプを用いて一定速度で硫酸銅水溶液(5mmol/l)を供給し、人工的な降雨による浸透を再現した。

図1に示すように、GE法とCSを用いた3次元高速撮像手法を雪氷用MRIに導入することにより、2.5分間隔で雪試料内部の選択流の成長の様子を3次元で連続的に可視化することに成功した。比較のためにSE法やGE法で同様の撮像を行ったところ、SE法では27分、GE法では11分の撮像時間を要したことから、撮像時間の大幅な短縮に成功した。また信号とノイズの比

率である SNR を計算したところ 形状把握に必要な SNR の目標値が 5 以上であることに対して、SE 法では 11、GE 法では 13、GE 法と CS では 8 であり、どの撮像手法においても十分な SNR を有していることが確認された。

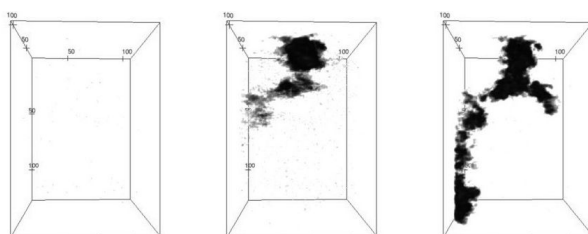


図 1 粒径 1.0-1.4mm の乾雪試料中での選択流の成長の様子。  
左)実験開始から 6 分 30 秒，中)9 分 25 秒，右)12 分 25 秒。

### MRI を用いた室内浸透実験による積雪内部の選択流の形成と発達過程の解明

図 2 に、自然積雪から採取したこしまり雪を対象とした浸透実験による水分分布の撮像結果を示す。図は、磁場中心部の高さ約 51.2mm の範囲における最大値投影法による 2 次元の水分分布を示しており、白いピクセルが水分の高い箇所を示している。図 2 の a) に選択流が形成した事例、b) には選択流とキャピラリーバリアーが形成した事例における、浸透が撮像領域下端に到達した時点でのスナップショットを示した。

図 2 の a) では、撮像領域上部に毛管力の差異に伴うキャピラリーバリアーによって供給した水が帯水する様子が確認された。帯水が生じた後、選択流が形成し、速やかに撮像領域下部に至った。選択流は、蛇行しながら下方へと成長しており、所々で側方流を形成していた。撮像領域中央部では、弱いキャピラリーバリアーの効果によって側方流が形成し、選択流は 2 つに分岐したが、片方の選択流の成長は途中で停止した。その後、実験の継続により、撮像領域上部から別の選択流が形成し、水分分布は複雑なものになっていた。撮像領域の中心部の横断面における選択流の直径を測定したところ、直径は 4 mm 程度であり、時間経過とともに直径が変化の様子は確認されなかった。図 2 の b) では、撮像領域の至る所で、キャピラリーバリアーによる帯水層の形成が確認された。実験開始から時間経過とともに撮像領域の上部から順に帯水層が形成しており、上部の帯水層の成長が停止した後に、選択流が形成して下方へと浸潤前線が前進し、次の下部に存在する帯水層が形成していた。これらのキャピラリーバリアーの形成を考察するために、X 線  $\mu$ CT により取得した雪の内部構造の 3 次元データから得た 3 次元微細構造の解析結果と比較したところ、目視では確認できなかった間隙直径や密度の微小な差異が雪試料中に存在しており、間隙直径や密度の小さい層が、これらの大きい層に上載する層構造が、キャピラリーバリアーが形成した箇所において確認された。

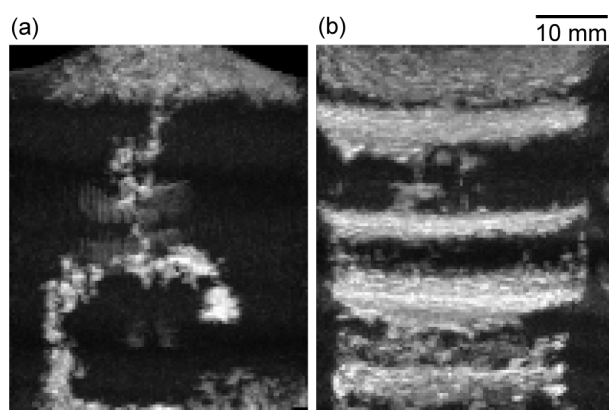


図 2 自然積雪を用いた浸透実験による選択流と帯水層の形成の様子。  
a) 選択流の事例 b) 選択流とキャピラリーバリアーの事例

### 選択流の 3 次元シミュレーションモデルの開発

図 3 に、浸透実験に使用した雪試料を対象として、開発した PMIP モデルによる浸透計算を施行した。図 3 の a) に選択流が形成した事例、b) には選択流とキャピラリーバリアーが形成した事例を対象とした計算結果を示した。図 2 と同様に、最大値投影法による 2 次元の水分分布を示しており、浸透が MRI の撮像領域の下端に到達した時点でのスナップショットを示した。

図 3 の a) および b) に示した 2 つの事例ともに、選択流やキャピラリーバリアーの形成を計算により再現することに成功した。選択流の直径やキャピラリーバリアーが形成した積雪層の位置は、MRI による実験結果と概ね一致していた。計算により再現された選択流の横断面を確認したところ、隣接する数個の間隙に水が浸入した小さなクラスター状の集合体が複数個散在することにより、1 本の選択流を形成していた。選択流の形成初期においては、選択流の直径が

拡大する様子が見られたが、選択流の先端が下部へと前進した際には、拡大は停止し、MRI の実験結果と同様に選択流の直径は時間変化しなかった。

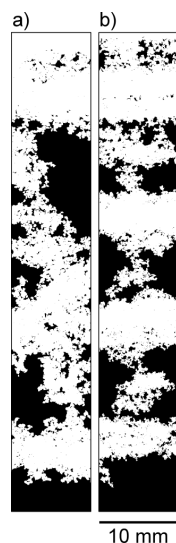


図3 MRIによる浸透実験と同一試料を対象としたPMIPモデルによる計算結果。  
a) 選択流の事例 b) 選択流とキャピラリーバリアーの事例

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 3 件)

勝島隆史, 安達聖, 山口悟, 平島寛之, 熊倉俊郎, 乾雪への水の浸潤速度の測定と数値計算, 雪氷, 査読有, 79(6), 511-523, 2017

安達聖, 山口悟, 尾関俊浩, 巨瀬勝美, 雪氷用MRIを用いた湿雪試料測定技術の現状と課題について, 雪氷, 査読有, 79(6), 497-509, 2017

平島寛行, 勝島隆史, 積雪中における水分移動のモデル化の現状と課題, 雪氷, 査読有, 79(6), 483-495, 2017

### [学会発表](計 12 件)

Takafumi Katsushima, Satoru Adachi, Satoru Yamaguchi, Toshihiko Ozeki and Toshiro Kumakura, Observation of fingering flow and lateral flow development in layered dry snowpack by using MRI, International symposium on snow and avalanche in Niseko, Workshops on "Snow physics", "blowing snow" and "avalanche", 2019

Takafumi Katsushima, Satoru Adachi, Satoru Yamaguchi, Toshihiko Ozeki and Toshiro Kumakura, Observation of fingering flow and lateral flow development in layered dry snowpack by using MRI, International Snow Science Workshop 2018, 2018

勝島隆史, 安達聖, 山口悟, 尾関俊浩, 熊倉俊郎, どの程度の積雪の微細構造の差異がキャピラリーバリアーを形成しうるのか?, 雪氷研究大会(2018・札幌), 2018

安達聖, 勝島隆史, 山口悟, 尾関俊浩, 雪氷用MRIによる積雪内部の選択流の可視化 その3, 雪氷研究大会(2018・札幌), 2018

勝島隆史, 安達聖, 山口悟, 尾関俊浩, 熊倉俊郎, MRIを用いた乾雪中のフィンガー流の成長の観察, 2017年度(公社)日本雪氷学会北信越支部研究発表会, 2017

勝島隆史, 安達聖, 山口悟, 尾関俊浩, 熊倉俊郎, 乾雪中における水みちの成長を捉える -フィンガー流は増えるけど, 幅は広がらない-, 雪氷研究大会(2017・十日町), 2017

安達聖, 勝島隆史, 山口悟, 尾関俊浩, 雪氷用MRIによる積雪内部の選択流の可視化 その2, 雪氷研究大会(2017・十日町), 2017

安達聖, 勝島隆史, 山口悟, 雪氷用X線CT装置を用いた湿雪試料中の水分分布の可視化, 2017年度(公社)日本雪氷学会東北支部大会, 2017

安達聖, 勝島隆史, 山口悟, 尾関俊浩, MRIの雪氷研究への応用 -乾雪内の水みちの可視化-, 第21回NMRマイクロイメージング研究会, 2017

山田祐太, 尾関俊浩, 安達聖, プライニクルの形成実験-MRIによる中空氷柱の内壁の観察-, 第21回NMRマイクロイメージング研究会, 2017

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次元浸透における浸潤速度の数値再現, 雪氷研究大会(2016・名古屋), 2016

安達聖, 勝島隆史, 山口悟, 尾関俊浩, 雪氷用MRIによる積雪内部の選択流の可視化, 雪氷研究大会(2016・名古屋), 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：安達 聖

ローマ字氏名：(ADACHI, Satoru)

所属研究機関名：国立研究開発法人防災科学技術研究所

部局名：雪氷防災研究部門

職名：特別研究員

研究者番号(8桁)：80719146

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：山口 悟

ローマ字氏名：(Yamaguchi, Satoru)

研究協力者氏名：熊倉 俊郎

ローマ字氏名：(KUMAKURA, Toshiro)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。