

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01347

研究課題名（和文）不飽和浸透による空間的に不均一な水分移動を再現可能な積雪変質モデルの開発

研究課題名（英文）Development of numerical snowpack model considering heterogeneous liquid water movement by unsaturated infiltration

研究代表者

平島 寛行（Hirashima, Hiroyuki）

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・主任研究員

研究者番号：00425513

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）：本研究では、水みちを再現可能な3次元水分移動モデルと積雪変質モデルの双方の長所をもつモデルの開発に向けて、実験結果を検証に用いて双方のモデルの比較及び改良を行った。1次元に単純化された積雪変質モデルでの水みち過程は3次元モデルと同様の形態で水が浸透することが確認された一方で、積雪変質モデルに必要な改良点も比較結果から提起された。また3次元水分移動モデルに新たに凍結過程を導入して水みちの凍結が再現可能となり、実験結果とも良い整合性を示した。さらに、3次元水分移動モデルを応用した解析により、水みちの本数の増加による湿雪が卓越した状態への変化過程において、湿雪変質が重要であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川流出や全層雪崩、融雪災害等、湿雪に関連した災害を予測する際に、積雪中を浸透する水分移動過程を再現可能にするモデルの構築は重要である。積雪中を水が浸透する際には、状況によって均一に浸透するケースや水みちのような優先路を通して浸透するケースがある。そのような複雑な現象を再現可能なモデルとして、再現性の高い3次元水分移動モデルや、計算の速い積雪変質モデルがあり、それぞれ一長一短である。本研究では室内実験や3次元水分移動モデルとの比較結果を用いて積雪変質モデルの改良につなげた。本成果は湿雪災害や水資源等をより正確に予測するツールを提供する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is the development of a numerical snowpack model to simulate preferential flow accurately. To achieve it, we compared the three-dimensional water transport model (3D model) and the numerical snowpack model SNOWPACK. Both models can simulate the preferential flow process. The comparison was performed using the result of laboratory experiments. Although both models showed similar infiltration processes, the 3D model could simulate accurately. It suggested several points to improve water infiltration process of the SNOWPACK model. Also, thermal conduction and freezing processes were introduced in the 3D model. The improved model simulated the phenomena for freezing of preferential flow path. It was validated using the result of the laboratory experiment. Furthermore, we applied a 3D model to analyze the transition process from dry to wet snow predominant condition. We found that wet snow metamorphism plays an important role in this transition.

研究分野：雪氷学

キーワード：積雪中の水分移動 積雪変質モデル 3次元水分移動モデル 水みち 積雪内部での水の凍結

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

雪崩等の雪氷災害や水資源の予測に用いられる積雪変質モデル(SNOWPACK)は、気象データを入力して、積雪内部における熱収支や圧密、変質等の過程を物理的に計算し、積雪の層構造や温度、密度、含水率のプロファイル、底面からの流出量等を出力するモデルである。積雪中の不飽和浸透における水分移動過程には、均一に流れる毛管流と、不均一に流れる選択流(水みち)がある。毛管流に関してはリチャーズ式を用いて計算されており、室内実験に基づいた積雪の粒径と密度に依存した近似式を組み込んだことで、精度良く再現できた事が確認され、雪崩予測等で活用されている。一方で、不飽和浸透による水みちに関しては水平方向の不均一性に関係した過程であるため、1次元の積雪変質モデルで物理的手法にのっとって表現することは不可能である。そのため、流出のタイミングに遅れが生じ、湿雪雪崩や融雪災害を高い精度で予測することは困難であった。

そのような不均一に流れる水みちを表現するために2つの手法が開発されている。一つは、研究代表者が開発した3次元の水分移動モデルで、水みちの形成やそれを伝える流れを物理的に計算し、不均一な水の流れを考慮することができる。室内実験の結果を正確に再現できることが確認されているが、計算時間がかかるため、広範囲の水分移動過程を短時間で計算するのは困難で、災害予測の運用には不向きである。もう一つは積雪変質モデルに組み込まれた dual domain approach で、1次元で水みちを含む過程を近似する手法で、領域を毛管流と水みち部分に分けて各々で異なる水分移動を計算する。災害予測に運用可能である一方で、水みちの発生やそれを伝えた浸透のモデルは単純なパラメータとして組み込まれており、十分な検証が必要とされる。このように、双方のモデルには長所、短所があり、双方の長所を生かしたモデルを開発することがより正確に湿雪災害を予測するのに重要である。

2. 研究の目的

本研究では、河川流出や全層雪崩、融雪災害等の予測精度向上への貢献にむけて、3次元水分移動モデルや dual domain approach といった水みちを再現するモデルの長所を融合し、災害予測に運用可能で、かつ物理的根拠や十分な精度をもたせた、空間的に不均一な水分移動を再現可能な積雪変質モデルを開発することを目的としている。本研究では、水みち形成過程に関する計算について、dual domain approach と3次元水分移動モデルとの比較を行い、実験や観測のデータを使って精度検証し、積雪変質モデルの改良につなぐ。また、氷点下における水分浸透に関しても積雪変質モデルと比較可能にするため、3次元水分移動モデルに熱伝導や再凍結の過程を組み込み、3次元モデルで氷点下中の積雪内部における凍結過程を再現可能にする。

3. 研究の方法

3-1 3次元水分移動モデルと積雪変質モデルの比較

本研究の開始時において、dual domain approach を組み込んだ SNOWPACK を研究協力者である Nander Wever 氏の協力を得て導入し、本研究で使用可能な環境に整備した。その上で、3次元水分移動モデル(以降、3D モデル)と SNOWPACK の比較を行なった。比較の際には研究協力者の Avanzi et al. (2016)が行った、毛管障壁が形成される条件での積雪カラム中への水分浸透実験の結果を検証に用いた。比較は3D モデル(3D)(Hirashima et al,2014), SNOWPACK で水みちを考慮しない Richards Equation モデル (RE) (Wever et al,2014), 及び水みちを考慮した SNOWPACK の Dual Domain Approach (DDA) (Wever et al,2016)で行った。

また、自然積雪中の水分移動に関しても比較を行うため、石井ら(2014)の行った散水実験のデータを用いて3D モデルと DDA モデルの比較を行った。この散水実験では水分浸透の記録や実験後の含水率測定は行われていないため含水率プロファイル等を用いた比較はできないが、自然界の複雑な層境界での浸透パターンを比較することでモデル間の相違をより詳しく検出することができた。

3-2 積雪中の再凍結過程の組み込みと実験

3D モデルでこれまで組み込まれていなかった凍結過程を再現可能にするため、モデルに温度のパラメータ、熱伝導式、及び凍結過程のプロセスを導入した。また、このモデルの再現計算のために、分担者の三重大学を中心に氷点下の多孔質体内部における水分凍結実験を行った。この実験においては多孔質体として鳥取砂丘砂及びフレークアイスを用いて低温室で行い、上下端に温度制御装置を取り付けて-5°Cにコントロールして氷点下の多孔質体を作成し、その上で上部から異なる給水量や頻度で水を供給して実験を行った。浸透時においては、含水率及び温度のプロファイルを測定した。

3-3 乾き雪卓越からぬれ雪卓越への遷移過程の研究

研究協力者との打ち合わせのもとで、乾き雪から湿雪が卓越する状態への遷移過程においては、水みちの本数の増加や幅の拡大が影響しており、そのような過程を組み込むことが積雪変質モデルの改良につながるといった議論があった。3D モデルを用いることでその過程が再現可能であることから、その再現計算を行った。この遷移過程を再現するためには、実験室より自然に近い水分供給量とより長期間における実測のデータが必要となる。本課題の研究協力者である Avanzi et al. (2017)が行った融解水の浸透と湿雪変質実験において、2週間に及ぶ連続した実験データを得ていたため、それを検証データに用いた。また、本モデルにおいては、湿雪変質による粒径の粗大化過程を組み込み、水みちにおける水分特性の時間変化も考慮できるように改良を加えて再現計算を行った。

4. 研究成果

4-1 3次元水分移動モデルと積雪変質モデルの比較による成果

乾いた積雪層構造中に水を浸透させる再現計算に関して3DモデルとSNOWPACK(RE, DDA)を比較した結果、3D及びDDAモデルは上層で水みちが形成され、上下の層境界で滞水し、一定の滞水後下層に水みちを形成して流下するといったプロセスが再現された。底面到達までの時間に関する実測と計算の比較を図1に示す。REモデルでは滞水は再現されたものの水みちが考慮されていないため積雪全体に水が浸透し、底面到達までの時間に大きな遅れが見られた。一方、3DモデルやDDAモデルではより実験に近い底面到達時間となった。比較では3Dモデルの方が底面到達時間はより実測に近く(図1)、含水率プロファイルにおいても3Dモデルが最も実測と一致していた。これらの結果は、3Dモデルの結果を参考としてSNOWPACKにおける水みちに関するパラメータを最適化することで、より正確な水分浸透過程に改良できる可能性を示唆するものとなった。この成果は、Hydraulic Earth System Sciences に投稿し、受理、掲載された(Hirashima et al, 2017)。

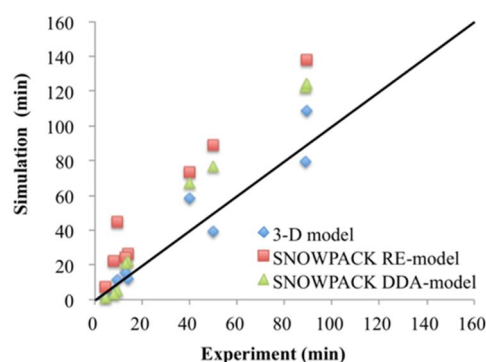


図1 底面到達時間の比較。3Dモデルが実験と計算の1対1直線に最も近い。

また、自然積雪中の比較では、3DとDDAモデルのパターンの主な違いとして、現在のDDAモデルでは水みちが細いこと、水みちによる水の局所的な集中の影響は3Dモデルでのみきいてくることが、またそれにより滞水する場所が若干異なってくることが比較結果から示された。この成果は、上記のカラム実験の再現計算の結果とあわせてオーストリアのInnsbruckにおいて行われた国際学会「International Snow Science Workshop」において発表した。

4-2 水分凍結実験及び再現計算

本研究における凍結実験において、測定に用いたセンサの値を解析した結果から、浸透の最中に水が凍結して氷と水が共存した状態となったこと、またそのときは凍結しない条件の時に比べ浸透の速度が遅くなっていたことが確認された。また、浸潤前線先端部で浸潤水の2割程度が凍結することで、土中の温度が0°Cまで上昇していたことや、形成された温度や水分分布は供給速度等にはあまり依存せず、主に供給量に依存していたことが確認された。フレークアイスにおいては定性的には同様の浸透を示したが、凍土と比べて多孔質体中の水分保持量が少ない傾向が見られた。この実験結果をベースに融解凍結過程を組み込んだ3Dモデルで再現計算を行った。図2に示すように水みちを形成しながら浸透が進むとともに、水みち周辺では温度が高くなることが再現されている。実験結果と比較したところ浸潤過程は定性的に一致し、また-5°Cの条件下では15%ほどの供給水が浸透中に凍結するといった結果となり、実験結果との良い整合性を示した。

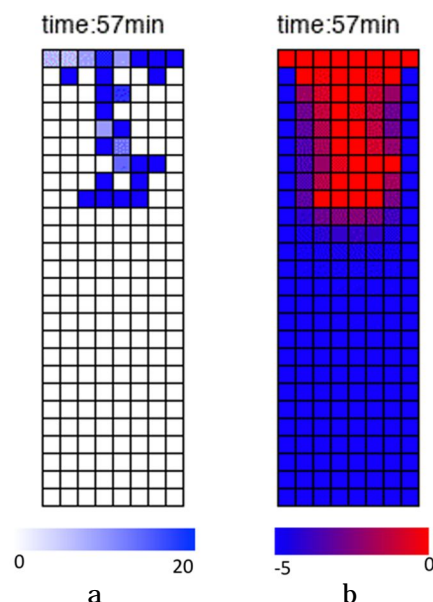


図2 氷点下の積雪への浸透の計算。(a)含水率 (b)温度の分布

本研究で行った土壌中における水分浸透の凍結実験に関しては、分担者の学生の修士論文としてまとめられた(佐藤, 2020)。

4-3 乾き雪卓越からぬれ雪卓越への遷移過程

Avanzi et al.(2017)の実験においては、積雪上にヒーターを設置して低温室で7時間加熱融解させ、その後17時間ヒーターを止めるサイクルを2週間継続した。なお、低温室環境は0°Cに調整されていたためヒーター停止時には融解も再凍結も起こらないことを前提としている。ヒーターのサイクルは昼夜の温度条件の差を想定したものである。この再現計算の際には、実験で用いた積雪と同じ密度、粒径のものを用いて、実験で測定された雪面低下量から推定される融解量を再現計算の水の供給量として与えた。

実験中に行われたX線断層撮影の結果から得られた積雪粒子の粗大化の情報と、本計算で行った不均一な粒径成長の比較を行ったところ、実験で測定された粗大化と矛盾のない範囲での再現性が見られた。その上で含水率の分布や底面からの流出量の変化を解析した。再現計算で得られた含水率の分布の例を図3に示す。aは2日目の含水率分布で、初日に形成された水みち(青部分)に加え、新たに形成されている水みち(赤部分)が見られる。水みちが新たに形成される部分は水みちの先端部分で、高い含水率をもつ。日数が進むにつれて水みちが増加し、13日目(b)ではほとんどの領域でぬれ雪となった。

本計算では粒径の粗大化が起こらない場合や、より高密度な雪に当てはめた計算も行い、粒径の粗大化がない場合は水みち領域が拡大していかないこと、またしまり雪のような高密度の雪では水みちの拡大はより緩やかになること等が結果から得られた。この成果は英文誌であるGeophysical Research Lettersに投稿して受理、掲載された。

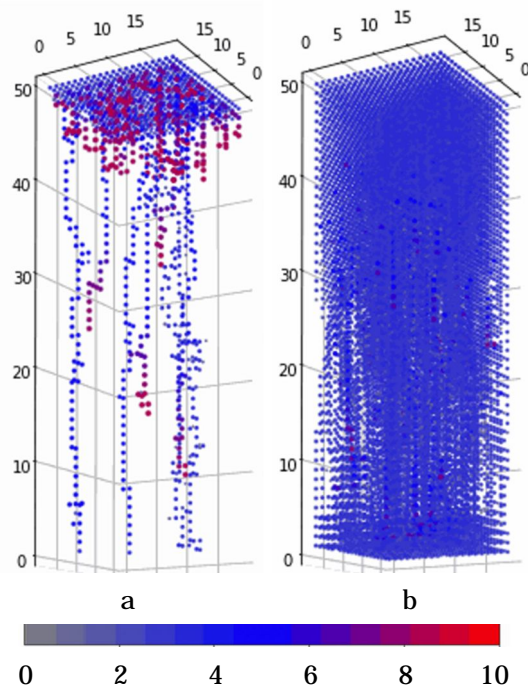


図3 3Dモデルで計算した水みちの発達過程の図。色は堆積含水率(%)。(a)2日目の含水率分布。(b)13日目の含水率分布。

参考文献

Avanzi et al., 2016: The Cryosphere, 10(5), 2013–2026.
Avanzi et al., 2017: Water Resources Research, 53, 3713-3729.
石井ら 2014: 北海道の雪氷 32 104-107
Wever et al, 2014: The Cryosphere, 8(1), 257-274.
Wever et al, 2016: The Cryosphere, 10(6), 2731-2744.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hiroyuki Hirashima, Francesco Avanzi, Nander Wever	4. 巻 46
2. 論文標題 Wet Snow Metamorphism Drives the Transition From Preferential to Matrix Flow in Snow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 14548-14557
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1029/2019GL084152	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 該当する
1. 著者名 Francesco Avanzi, Ryan Curtis Johnson, Carlos A. Oroza, Hiroyuki Hirashima, Tessa Maurer, Satoru Yamaguchi	4. 巻 55
2. 論文標題 Insights Into Preferential Flow Snowpack Runoff Using Random Forest	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 10727-10746
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1029/2019WR024828	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 該当する
1. 著者名 Hiroyuki Hirashima, Nander Wever, Francesco Avanzi, Satoru Yamaguchi, Yoshiyuki Ishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulating liquid water infiltration-comparison between a three-dimensionnal water transport model and a dual-domain approach using SNOWPACK	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings, International Snow Science Workshop	6. 最初と最後の頁 474-478
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 該当する
1. 著者名 Hiroyuki Hirashima, Francesco Avanzi, Satoru Yamaguchi	4. 巻 21
2. 論文標題 Liquid water infiltration into a layered snowpack: evaluation of a 3-D water transport model with laboratory experiments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Hydrological and Earth System Sciences	6. 最初と最後の頁 5503-5515
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/hess-21-5503-2017	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 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 佐藤郁弥・渡辺晋生
2. 発表標題 浸潤に伴う凍土中の浸潤速度と水分量の変化
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤郁弥・渡辺晋生
2. 発表標題 成層凍土中の水分・温度分布に水の浸潤が与える影響
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤郁弥・渡辺晋生
2. 発表標題 乾いた凍土中での浸潤水の凍結が浸潤や地温分布に与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤郁弥・渡辺晋生
2. 発表標題 断続的な浸潤にともなう凍土中の水分量と地温の変化
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平島寛行・渡辺晋生・Francesco Avanzi
2. 発表標題 凍結過程を考慮した3次元水分移動モデルの開発
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥・渡辺晋生・平島寛行
2. 発表標題 融解浸潤にともなう凍土中の水分・温度の再分布過程観察
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumiya Sato and Kunio Watanabe
2. 発表標題 Observation of water and temperature redistribution in initially frozen sand during intermittent infiltration
3. 学会等名 ASA-CSSA-SSSA Annual Meetings (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥・渡辺晋生
2. 発表標題 凍土中での浸潤水の凍結融解と給水速度や頻度の関係
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunio Watanabe and Fumiya Sato
2. 発表標題 Temperature and water redistribution in a frozen dry soil during infiltration
3. 学会等名 Symposium on Freezing and Cold Region Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平島寛行・Francesco Avanzi・Nander Wever
2. 発表標題 積雪中への水分浸透における水みちから毛管流卓越への遷移過程 - モデルを用いた数値実験 -
3. 学会等名 日本雪氷学会北信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平島寛行・Nander Wever・Francesco Avanzi・山口悟・石井吉之
2. 発表標題 積雪中の水分浸透過程における3次元水分移動モデルと積雪変質モデルの比較
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Hirashima, Nander Wever, Francesco Avanzi, Satoru Yamaguchi, Yoshiyuki Ishii
2. 発表標題 Simulating liquid water infiltration-comparison between a three-dimensionnal water transport model and a dual-domain approach using SNOWPACK
3. 学会等名 International Snow Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平島寛行・Nander Wever・Francesco Avanzi・山口悟
2. 発表標題 3次元水分移動モデルと積雪変質モデルの融合に向けた水分浸透計算
3. 学会等名 日本雪氷学会北信越支部大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平島寛行・Nander Wever・Francesco Avanzi・山口悟
2. 発表標題 水みちの形成過程における3次元水分移動モデルと積雪変質モデルの比較
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

佐藤郁弥 2020: 乾いた凍土中の凍結・融解に関する研究, 令和元年度三重大学修士論文, 97pp.

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	渡辺 晋生 (Watanabe Kunio) (10335151)	三重大学・生物資源学研究科・教授 (14101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	A v a n z i F r a n c e s c o (Avanzi Francesco)	国際環境モニタリングセンター・Hydrology group・ Researcher	2019年7月までカリフォルニア大学バークレー校所属
研究協力者	W e v e r N a n d e r (Wever Nander)	コロラド大学ボルダー校・Researcher	