

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14026

研究課題名(和文)積雪と植生変化を考慮した融雪や降雨に伴う地表流・地盤内浸透流分岐特性のモデル化

研究課題名(英文) Modeling of surface flow and infiltration branching characteristics due to snow melting and rainfall considering snow cover and vegetation change

研究代表者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)

北海道大学・公共政策学連携研究部・教授

研究者番号：60359479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：北海道は、土地利用形態や季節変化に伴う地盤の保水・浸透特性の変動が一年を通して極めて大きいため、気候変動に関連した集中豪雨時に土砂災害発生拡大要因となる可能性がある。本研究では、土砂災害発生判断基準となり得る降雨・融雪水の地盤内浸透率に着目し、その支配要因を積雪・植生状況、降雨強度・融雪速度、土質、地盤の含水・凍結状態から体系的に評価して地盤内浸透率の定量化手法を提案するとともに、積雪・植生等地表面の状態を考慮して植生・積雪を数値解析上の要素と考えた場合の地表流・地盤内浸透流特性の数値モデル化方法を開発し、積雪寒冷地特有の事象を踏まえた連成解析型積雪寒冷地斜面安定性評価手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：In Hokkaido, fluctuations in the water retention and infiltration characteristics of soil ground due to the seasonal variation of land use and weather condition are extremely large throughout the year, so there is a possibility that it may enhance the occurrence of sediment-related disasters at torrential downpours caused by climate change. This study proposed a quantification method of the infiltration rate of rainfall / snow melting water, which can be a criterion for the occurrence of sediment-related disasters, from the viewpoints of snow cover / vegetation, rainfall intensity / snow melting rate, soil property, water content of the ground and frozen state. In addition, this study developed a coupled slope stability analysis for snowy cold regions by incorporating a newly proposed mathematical model for the infiltration characteristics of surface flow in the case where snow cover and vegetation are considered as an element in numerical analysis.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 自然災害 土砂災害 土壌学 植物

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化に起因すると考えられる気候変動により、国内他地域と比較して従来豪雨が少なかった北海道においても集中豪雨が頻りに観測されており、地盤内浸透による斜面崩壊や地表流による地表面浸食・土石流などの土砂災害が身近な災害へと変わりつつある。この際、広大な北海道では、本州と比較して宅地造成や森林伐採などにより一度に開発される面積が広く、土地利用形態の変化が土砂災害の発生に多大な影響を及ぼすことが懸念される。例えば、牧草地や畑作地が全面積の約 16% を占める北海道では、一年を通じた植生変化により広域的に土地の保水能力が変動しており、土砂災害の被害を拡大させている可能性がある。一方、前述のように降雨水や融雪水は接地した後辿る経路により引き起こす土砂災害が異なるため、地盤災害に及ぼす影響を分類して考える必要がある。特に、北海道のような積雪寒冷地の場合には、植生等の土地利用形態の変化に加えて、冬期の積雪や表層地盤の凍結により、降雨や融雪水が地表水と浸透水に分離する割合が変化する影響や湧水が地盤内に封入され地下水水位が上昇する影響なども無視できない。しかしながら、積雪寒冷地を対象として降雨水や融雪水が地表流と地盤内浸透流に分岐していく過程を定量的に検討した研究はほとんど無い。今後積雪寒冷地斜面の防災・減災対策を講じるには、長期的な土地利用形態の変化、短期的な植生の変動、及び積雪や地盤表層の凍結状態等の季節変動を考慮した広域土砂災害管理が必要不可欠である。申請者らは、これまで凍結融解作用を受ける斜面の崩壊機構に関する研究を通して寒冷地地盤防災工学の体系化に貢献してきたが、これに加え、季節変化や土地利用形態変化により変動する地表流・地盤内浸透流を考慮した土砂災害対策を構築することが広域防災管理の観点から望ましいと考え、本研究課題を着想した。

2. 研究の目的

本研究では、土砂災害発生の判断基準となり得る降雨・融雪水の地盤内浸透率に着目し、その支配要因を積雪状況、植生状況、降雨強度・融雪速度、土質、地盤の含水・凍結状態から体系的に評価して地盤内浸透率の定量化手法を提案するとともに、積雪・植生等地表面の状態を考慮した地表流・地盤内浸透流特性の数理モデルを開発して積雪寒冷地特有の事象を踏まえた新たな土砂災害危険度評価手法の構築を志向する。本研究の目標は、積雪・植生状況を考慮した融雪や降雨に伴う地表流・地盤内浸透流特性を明らかにし、数理モデルを構築することである。このための具体的な研究目標は以下の通りである。

- (1) 積雪・植生状況を考慮した融雪や降雨に伴う地盤内浸透水・表面流水分岐経路の把握

- (2) 積雪・植生状態を定量的評価した浸透特性(保水・透水)の数理モデル化手法の提案
- (3) 上記を考慮した地表流・地盤内浸透流解析手法の確立と土砂災害危険度評価手法の構築

3. 研究の方法

本研究では、実験・解析の両面から検討を実施する。具体的には、初年度は、積雪・植生を考慮した地盤内浸透率の支配要因及びその依存度を検討するため、カラム試験装置を製作し、実物大斜面模型試験と併せて種々の条件下での降雨浸透試験を実施する。また現有する試験機を改良して不飽和凍土透水試験機を開発し、表面凍結状態における地盤内浸透特性の評価手法を確立する。2年目は、前年度までの研究を補完するとともに、カラム、要素、模型の各試験結果を分析し、積雪・植生状態を定量的評価した浸透特性の数理モデルを提案する。最終年度は、提案した数理モデルを浸透流解析に組み込み、種々の解析条件でケーススタディを行い、積雪・植生状態を考慮した地盤内浸透に起因する土砂災害危険度評価手法を構築するとともに、成果を統合し、研究を総括する。

具体的には、以下に示す研究項目について検討を行った。

- (1) カラム試験による積雪・植生が地盤内浸透特性に及ぼす影響の検討
- (2) 要素試験による不飽和凍土の浸透特性評価手法の構築
- (3) 模型実験による積雪・植生を有する斜面の地盤内浸透率に及ぼす傾斜角の影響評価
- (4) 実物大模型実験による気象条件や雪質が地盤内浸透特性に及ぼす影響の検討
- (5) 積雪・植生の数理モデルの構築
- (6) 積雪・植生の影響を考慮した数値シミュレーションの実施

4. 研究成果

- (1) カラム試験による積雪・植生が地盤内浸透特性に及ぼす影響の検討
積雪・植生が地盤内浸透特性に及ぼす影響を検討するため、カラム試験装置(図1)及び凍結融解型不飽和透水試験装置を製作し、豊浦砂を用いて性能確認試験を実施した。その結果、不飽和透水試験・飽和透水試験・保水性試験が、凍結融解型不飽和透水試験装置を用いて短時間に精度良く実施可能であることを確認した。また、当該要素試験結果との比較により、カラム試験装置でも同様の試験が実施可能であることを確認した。積雪・植生が地盤内浸透特性に及ぼす影響を検討するため、カラム浸透試験、保水性試験、飽和・不飽和透水試験を実施した。その結果、植生、積雪とも雨水を保持して浸透を遅らせる効果と表面流

出により浸透量を減らす効果を有すること、および植生は地表面より上の茎葉部分の浸透特性だけでなく根系が存在する表層土の浸透特性にも影響を及ぼすことを示した(図2、図3)。

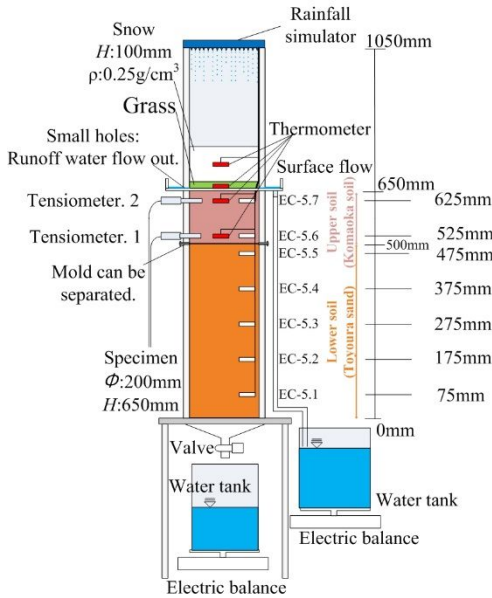


図1 カラム試験装置

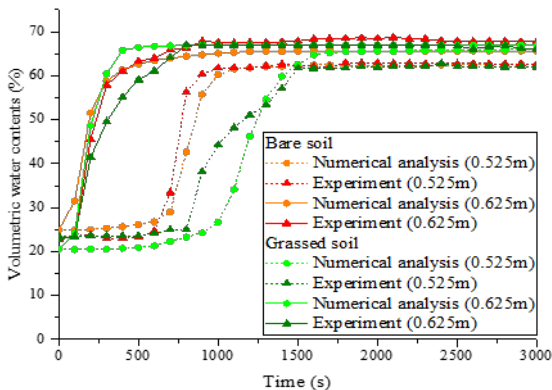


図2 カラム試験の体積含水率の経時変化

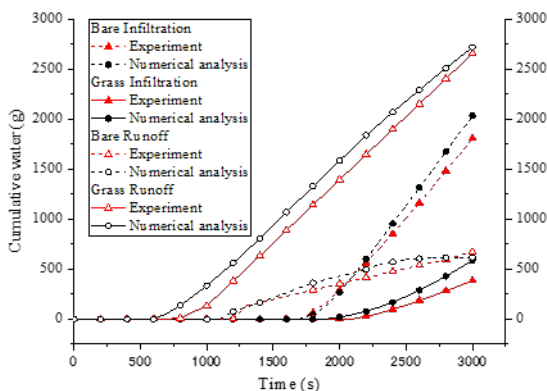


図3 カラム試験の表面流量と浸透流量の比較
積雪と植生の相互作用が地盤内浸透特性に及ぼす影響を検討するため、植生の有無に違いのあるカラム試験供試体に堆雪後、降雨実験を行った。この結果、植生は、雨水・融雪水の地盤浸透を妨げ含水比上昇を遅延させること、および植

生が地盤表層に低温の融雪水を保持するため、積雪底面からの融雪を遅らせ融雪水の急激な浸透を防ぐことを示した(図4)。

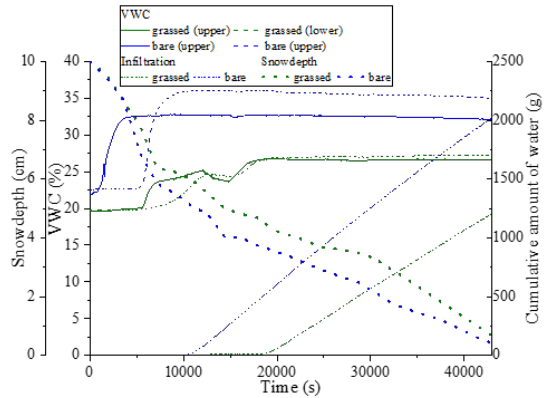


図4 体積含水率・積雪深・浸透流量の比較

(2) 要素試験による不飽和凍土の浸透特性評価手法の構築

現有する飽和凍土透水試験装置を利用して、種々の試験条件で飽和凍土の透水試験を行い、飽和凍土の浸透特性評価手法を確立した。また、不飽和凍土の浸透特性を把握するため、飽和凍土透水試験装置の改良方法について検討し、必要な機材の設計・調達を行った。その結果、凍土透水係数は、間隙中に存在する不凍水の存在比(有効間隙比)に依存することを示した(図5)。また、不飽和凍土透水係数～飽和度関係は熱伝導率、電気比抵抗～飽和度関係と相関があるため、比較的容易な試験で取得できる熱伝導率や比抵抗から不飽和凍土透水係数を推定できることを示した。

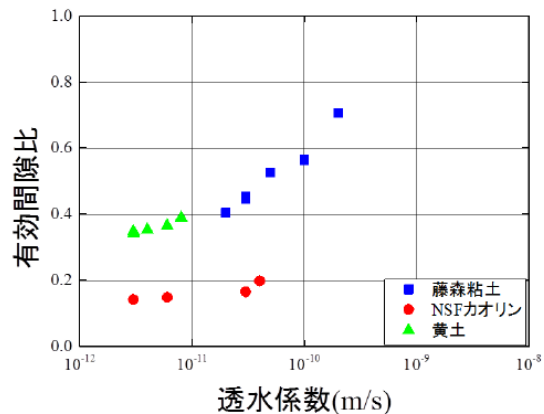


図5 有効間隙比～透水係数関係

(3) 模型実験による模型実験による積雪・植生を有する斜面の地盤内浸透率に及ぼす傾斜角の影響評価

積雪・植生が地表面に存在する斜面の地盤内浸透率に及ぼす傾斜角の影響を検討するため、積雪・融雪、地表面の凍結融解、地表面からの蒸発などの影響を考慮したFEM解析を用いて、斜面傾斜角

を変えた降雨浸透数値実験を実施し、地盤内浸透特性に及ぼす傾斜角の影響を把握した。

自然環境下での気象条件（気温、降雨形態）や雪質の違いが地盤内浸透率に及ぼす影響を検討するため、実物大模型実験や長期現地計測を行うとともに、実際の気象条件における実物大模型斜面の浸透挙動を熱伝導・飽和・不飽和浸透連成 FEM 解析手法で解析した。その結果、前述の積雪・植生の浸透特性を組み込んだ熱伝導・浸透連成 FEM 解析で、実物大模型斜面の地温や土壌水分の経時変化を再現可能なことを示し、当該解析手法の実用性を検証した（図 6）。

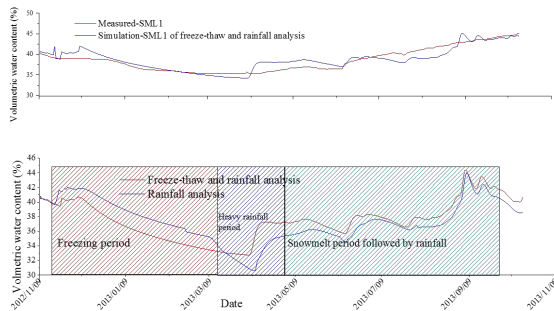
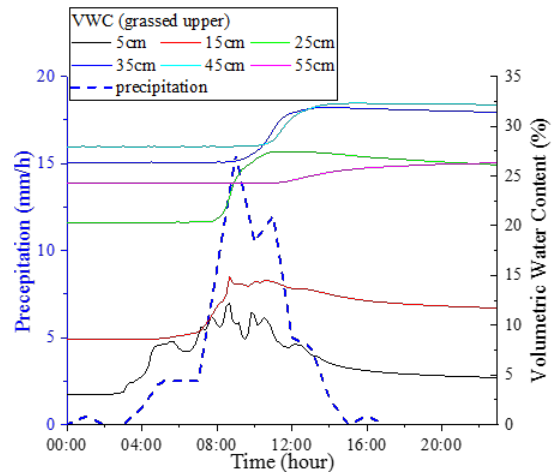
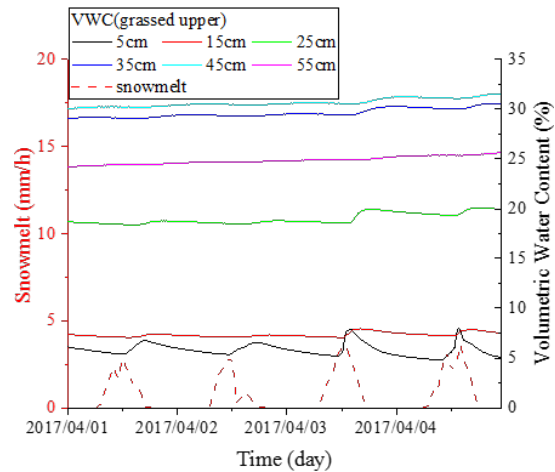


図 6 凍結融解が含水率の時間変化に及ぼす影響
室内土槽試験に基づき、斜面に沿って下部浸潤が抑制される範囲（領域）である「限界長」が、浸潤フラックス量、斜面傾斜角及び構成土の飽和・不飽和浸透特性に依存することを明らかにした。

- (4) 実物大模型実験による気象条件や雪質が地盤内浸透特性に及ぼす影響の検討
自然環境下での気象条件（気温、降雨形態）や雪質の違いが地盤内浸透率に及ぼす影響を検討するため、屋外で実物大模型実験を実施し可能な、実物大模型斜面（高さ 4 m × 幅 8 m、半分に植生工設置）を製作した。また、実物大模型斜面の降雨浸透シミュレーションを FEM 解析で行い、効率的な現地計測に必要な計器の配置を検討した。
実物大模型実験や長期現地計測を行い、植生の有無による融雪水・雨水の地盤浸透機構の違いについて検討した。この結果、融雪期は常に融雪水が供給され高含水状態が維持されるため、融雪期の降雨は夏期の豪雨に比べて地盤災害リスクを高めること、及び植生は地盤への融雪水・雨水の浸透を抑制するため、融雪期の地盤災害対策に有用であることを示した（図 7）。



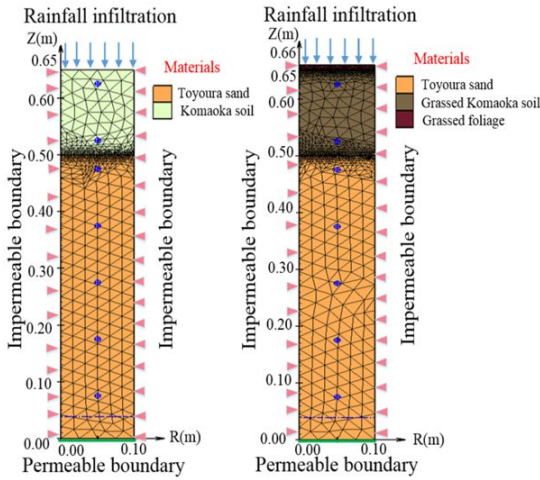
(a) 夏期の推移



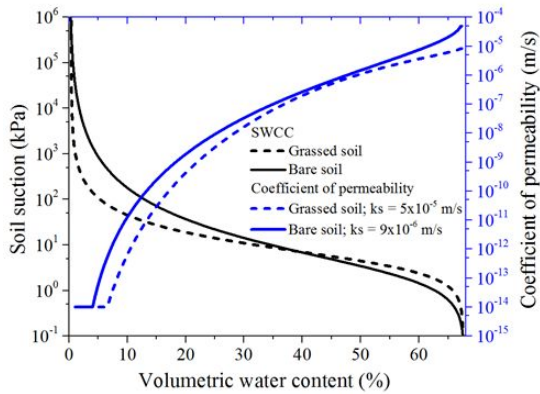
(b) 融雪期の推移

図 7 体積含水率の経時変化

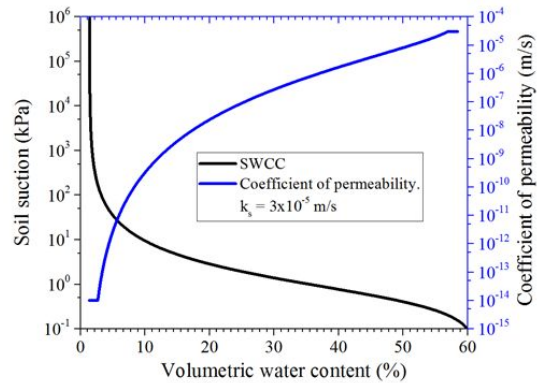
- (5) 積雪・植生の数値モデルの構築
積雪・植生の影響を考慮し地表流・浸透流の分岐を組み込んだ浸透流解析手法を提案するため、カラム試験の浸透流解析を実施して試験結果との比較により、植生・積雪を数値解析上の要素と考えた場合のモデル化方法について検討した。その結果、茎葉を模した植生要素と根系が存在する表層土要素の水分特性曲線と不飽和透水係数を VG モデルにより表現することで、カラム試験の浸透流・表面流の経時変化を定量的に評価可能であることを示した（図 8、図 9）。



(a) 植生有 (b) 植生無
図8 カラム試験の解析モデル



(a) 根茎の有無による差異



(b) 茎葉の浸透特性

図9 植生の浸透特性のモデル化

(6) 積雪・植生の影響を考慮した数値シミュレーションの実施

実物大模型斜面の浸透・崩壊挙動や実道路で発生した融雪期の斜面崩壊現象を、積雪や植生の浸透特性を考慮可能な連成解析型積雪寒冷地斜面安定性評価手法を用いて解析した。この結果、当該解析手法で、斜面内の地温・土壌水分の経時変化や排水溝の閉塞に伴う雨水・融雪水の越流が引き起こした実道路の斜面崩壊現象を再現可能なことを示し、その実用性を検証した(図10、図11)。

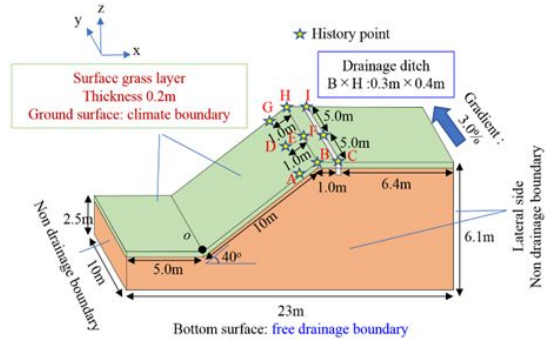


図10 実斜面の斜面崩壊再現解析モデル

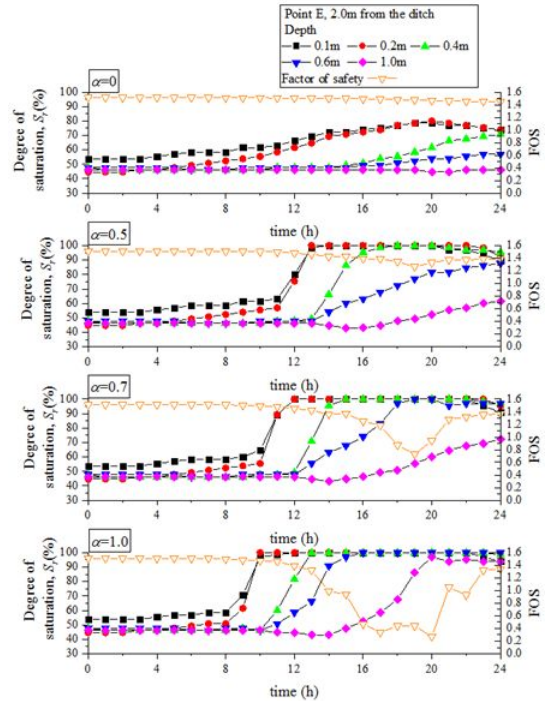


図11 斜面表層の飽和度と安全率の関係

(7) 研究の総括

本研究は、今後の気候変動に伴い問題の顕在化が予想される積雪寒冷地の新しい地盤災害形態に対応した防災・減災対策の一環として、積雪や植生の保水性・透水性を考慮した積雪寒冷地における融雪水・降雨水の地表流・地盤内浸透流特性の数値モデルを開発した。本研究で得られる積雪や植生を擬似地盤要素化して考える独創的な浸透特性の概念は、近年日本各地で観測されている局所的な集中豪雨や台風の大型化により頻発している土砂災害に対する防災、減災対策及び発生予測に新たな方向性を与える実用的で革新的な研究成果となり得る。また、植生環境は一年を通して目まぐるしく変動するため、同一斜面においても季節によって斜面崩壊危険度は異なるとともに、土地利用形態の変化により、それまで安全であった斜面も警戒対象になる可能性がある。このため、本研究は、季節変化、土地利用形態の変化を考慮したハザードマップの作成や危険個所の抽出等に寄与し、安全・安心な国土づくりに活用が期待される成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Srikrishnan Siva Subramanian, 石川達也, 所哲也: Stability assessment approach for soil slopes in seasonal cold regions, Engineering Geology, 査読有, 221: pp.154-169, 2017.4. (10.1016/j.enggeo.2017.03.008)
Srikrishnan Siva Subramanian, 石川達也, 横濱勝司, 所哲也: Numerical simulation of volcanic soil slope failure under coupled freeze-thaw and rainfall infiltration effects, Japanese Geotechnical Society Special Publication (6th Japan-China Geotechnical Symposium), 査読有, Vol. 1, No. 7, pp.5-10, 2015.9. (10.3208/jgssp.JPN-23)

〔学会発表〕(計15件)

森井俊廣, 石川達也, 小林薫, 花田義徳, 武藤健太: Water diversion in shallow land waste repository constructed using capillary barrier of soil, The 7th China-Japan Geotechnical Symposium, 2018.3.

森 瑛, 石川達也, Srikrishnan Siva Subramanian, Nguyen Binh Thanh: 積雪寒冷地における雨水・融雪水の地盤内浸透流挙動予測, 地盤工学会北海道支部第58回年次技術報告会, 2018.1.

石川達也, Srikrishnan Siva Subramanian, 所哲也: Soil slope instabilities in snowy cold regions under changing climate – stability assessment and prediction methods, The 3rd Indo-Japan Workshop on Geotechnics for Natural Disaster Mitigation and Management, 2017.12.

Nguyen, Binh Thanh, 石川達也, Srikrishnan Siva Subramanian: Rainfall infiltration and runoff characteristics of an unsaturated volcanic soil under grass cover, The 2nd Pan-American Conference on Unsaturated Soils (Unsaturated Soil Mechanics for Sustainable Geotechnics: PanAm-UNSAT 2017), 2017.11.

Srikrishnan Siva Subramanian, 石川達也, 所哲也: Climatic effects on the stability of unsaturated soil slope in cold region, The 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017.9.

花田義徳, 宇都野真人, 戸谷翼, 森井俊廣: 土のキャピラリーバリアを用いた盛土式廃棄物貯蔵施設の遮水機能, 平成29年農業農村工学会大会講演会, 2017.8.

石川達也: Coupled analysis for freeze-thaw of soil ground and its application to transportation infrastructures in cold regions, Keynote presentation, The 3rd International Symposium on Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOIL COLD2017), 2017.7.

森瑛, Nguyen Binh Thanh, 石川達也, 村

山陽: 降雨時における融雪水の地盤内浸透挙動に及ぼす気象条件の影響, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.7.

森瑛, Srikrishnan Siva Subramanian, 石川達也, 小松正宏: A case study of a cut slope failure influenced by snowmelt and rainfall, Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG 2017), 2017.5.

木村洸太, 所哲也, 石川達也: 凍土の透水性に及ぼす間隙比の影響, 地盤工学会北海道支部第57回年次技術報告会, 2017.2.

Nguyen, Binh Thanh, 石川達也, 森瑛: Influence of grass cover on the infiltration of unsaturated volcanic soil, The 3rd International Conference on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development (GEOTEC HANOI 2016), 2016.11.

森瑛, 石川達也, Nguyen Binh Thanh, 所哲也: 水分分布近似法を用いた不飽和透水試験装置の開発, 第51回地盤工学研究発表会, 2016.9.

木村洸太, 所哲也, 石川達也: 凍土の透水性に及ぼす不凍水量の影響, 第51回地盤工学研究発表会講演集, 2016.9.

石川達也, Srikrishnan Siva Subramanian, 所哲也: 連成解析手法を用いた積雪寒冷地斜面の安定性評価法, 平成28年度日本地すべり学会北海道支部研究発表会, 2016.4.

Binh Thanh Nguyen, 石川達也, Srikrishnan Siva Subramanian, 横濱勝司, 所哲也: Applicability of three dimensional coupled seepage and thermal analysis to soil slope stability in cold region, 地盤工学会北海道支部第56回年次技術報告会, 2016.1.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)

北海道大学・大学院公共政策学連携研究部・教授

研究者番号: 60359479

(2) 研究分担者

森井 俊廣 (MORII, Toshihiro)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 30231640

所 哲也 (TOKORO, Tetsuya)

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号: 40610457