

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18915

研究課題名（和文）高緯度寒冷地盤の雨慣れ度を考慮した気候変動下の豪雨災害リスク評価法の開発

研究課題名（英文）Development of risk assessment method for heavy rainfall induced disaster under climate change considering rainfall habituation in high latitude cold regions

研究代表者

石川 達也（Ishikawa, Tatsuya）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：60359479

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地盤の耐災害性の指標である雨慣れ度を介して予測する汎用性の高い斜面災害リスク評価法を開発するため、(a) 地盤の雨慣れ度指標の提案、(b) 地盤の雨慣れ度の調査方法の確立、(c) 雨慣れを考慮した豪雨災害リスクの評価方法の構築について検討した。その結果、温暖地域で過去に発生した地盤災害の事例研究をもとに、北海道や東北地方など従来豪雨の少ない高緯度寒冷地盤が気候変動に伴って集中豪雨を受ける場合に発生が予想される地盤災害の潜在的な被災危険度を検討するために、降雨履歴の異なる様々な地域に対して統一的に分析可能な斜面災害の発生予測・リスク評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来抽象概念であった「地盤の雨慣れ」を定量化することで、災害の地域性という曖昧な考え方を数値データに変換し、新たなステージに踏み入れた感のある日本各地で頻発する土砂災害に対して、より一般性を有した新しい防災・減災プラットフォームを提供するチャレンジ性の高い研究課題である。また、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、近年顕在化する新たな形態の地盤災害に対して対処療法的な対応に追われ、後追いの現象説明に甘んじてきた工学の現状を打開し、今後の気候変動を見据えた予測・事前適応に転じる契機となるものである。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a highly versatile slope disaster risk assessment method that predicts through rainfall habituation, which is an index of geodisaster resistance, this study discussed (a) proposal of rainfall habituation index for soil ground, (b) establishment of a method for investigating the degree of rainfall habituation, and (c) construction of a method for evaluating the risk of heavy rain induced geodisasters by considering rainfall habituation. As a result, in order to examine the potential risk of a geodisaster which is expected to occur when high-latitude cold regions with little heavy rainfall, such as Hokkaido and Tohoku in Japan, experience torrential rains due to climate change based on case studies of geodisasters that have occurred in the past in warm regions, this study proposed a method that can examine predicting the occurrence of slope disasters and assessing risks in a unified manner for various regions with different rainfall histories.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 豪雨災害 土砂災害 積雪寒冷地 気候変動

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繁に観測されており、地盤内浸透による斜面崩壊や地表流による表面侵食型崩壊・土石流などの土砂災害が身近な災害に変わりつつある。例えば、平成 28 年 8 月の中旬から下旬にかけて、過去に例を見ないほど複数の台風(7号,9号,11号,10号)が連続して北海道に襲来し積算雨量で観測史上 1 位となる局地的な豪雨が降り、道内各地の道路・鉄道沿いの盛土・切土斜面や河川堤防に深刻な被害をもたらされたのは記憶に新しい。国土交通省が作成した今世紀末の最大雨量の予測では、本州など温暖地域の多くで 1.1~1.3 倍程度の降水量の増加が予想されている中、北海道の多くの地域では 1.3 倍超の降水量が予想されている。予測通り気候変動が進んだ場合、国内では北海道のような高緯度地域の方が今後の気候変動の影響を受け易い上、北海道は、これまで台風や集中豪雨などの影響が少なく降雨による土砂災害が国内の温暖地域(多雨地域)と比較して少なかったことから、雨慣れ(降雨に対する斜面崩壊の慣れ)していない地盤が多い。このため、北海道では、多雨地域と比較して斜面崩壊の限界雨量が小さく、また同程度の豪雨や急激な融雪が発生した場合には斜面崩壊が生じ易く、地盤災害規模の拡大・深刻化が懸念される。しかしながら、高緯度寒冷地盤の雨慣れの程度を定量的に評価し、降雨時の斜面崩壊発生予測に組み入れた研究は申請者の知る限り国内外の地盤工学分野の研究において過去に例が無い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、北海道や東北地方など従来豪雨の少ない高緯度寒冷地盤が、気候変動や異常気象に伴って集中豪雨を受ける場合に発生が予想される地盤災害の潜在的な被災危険度、特にその主要な結果たる社会基盤インフラにおける土砂災害の発生機構を、降雨履歴の異なる温暖地域から寒冷地域に至る一連の豪雨災害の一つとして、統一的に分析可能な災害発生予測・リスク評価法を提案することである。具体的な研究目標は次の通りである。

(1) 地盤の雨慣れ度指標の提案

凍結融解・降雨履歴に伴う侵食作用による地盤・土要素の水理特性・力学特性の変化を定量的に評価する地盤の「雨慣れ度指標」の提案

(2) 地盤の雨慣れ度の調査方法の確立

原位置地盤の雨慣れ度を長期気象データ(降雨履歴等)や原位置試験(透水試験・貫入試験)結果をもとに同定する調査方法の確立

(3) 雨慣れを考慮した豪雨災害リスク評価法の構築

温暖・寒冷地域を問わず斜面の豪雨災害危険度を雨慣れ度の導入により統一的に解釈する災害発生予測・リスク評価法の構築

これにより本研究では、図 1 に示すように、温暖地域のような強い降雨強度の豪雨の際に豪雨履歴の少ない高緯度寒冷地盤で発生が予想される大規模深層斜面崩壊や、温暖地域では土砂災害が発生しない弱い降雨の際に高緯度寒冷地盤で発生する表層斜面崩壊を、地盤の耐災害性の指標である雨慣れ度を介して予測する汎用性の高い斜面災害リスク評価法を開発する。

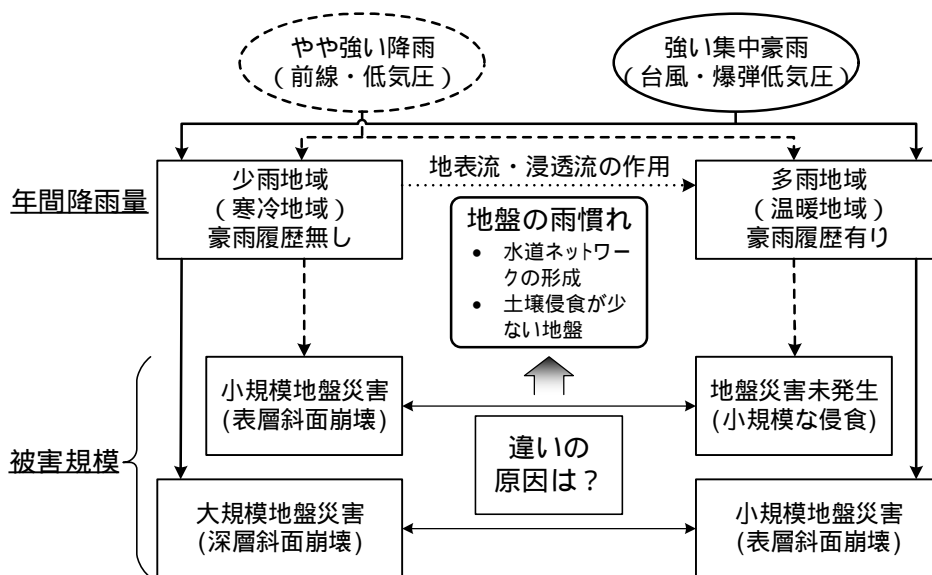


図 1 本研究課題の背景と構想

3. 研究の方法

本研究では、前述の研究目標達成のため、まず種々の条件下で要素試験・模型試験及びその数値解析を行い、降雨や融雪に伴う地表流や浸透流が土の水理特性・力学特性に及ぼす影響を定量化して、地盤の雨慣れ度指標を提案する。次に、温暖地域と寒冷地域の気象データや原位置試験結果をもとに、気象条件の違いが地盤の材料特性に及ぼす影響を評価して、実地盤の雨慣れ度の調査方法を確立する。最後に、雨慣れ度指標を降雨流出解析や熱伝導・浸透連成解析と組み合わせた力学的安定解析に組み込み、実地盤を想定したパラメトリックスタディを実施して、地盤の雨慣れ度を考慮した土砂災害危険度評価手法を構築する。具体的な研究計画は次の通りである。

(1) 平成30年度の研究計画：

降雨や融雪に伴う表流水や地盤内浸透（鉛直方向・水平方向）が地盤・土要素の水理特性・力学特性に及ぼす影響を定量的に評価するため、加圧給水機能付供試体作製土槽や模型土槽用流水試験装置を製作し、種々の条件下での室内要素試験・室内模型試験を実施する。また、降雨流出解析や熱伝導・飽和/不飽和浸透連成解析と組み合わせた力学的安定解析（極限平衡法）を用いて、室内要素試験や室内模型試験を想定した解析条件でケーススタディを行い、降雨・融雪時の斜面崩壊現象の支配要因（素因・誘因）の特定及びその依存度を定量化し、地盤の雨慣れ度指標を提案する。加えて、種々の模型地盤で現位置透水試験装置と貫入試験機を用いて計測データの収集を行い、計測方法の確立と計測精度の向上を図る。

(2) 令和元年度の研究計画：

前年度に性能確認を実施した原位置透水試験装置と貫入試験機を用いて、温暖地域と寒冷地域の双方で原位置試験（透水試験・貫入試験）を行い、現地長期計測データとの比較によりその妥当性を検証するとともに、気象条件の違いが実地盤の水理特性・力学特性に及ぼす影響を定量的に評価して、長期気象データ（降雨履歴等）や原位置試験結果をもとに、実地盤の雨慣れ度を調査する方法を確立する。また、前年度に引き続き、種々の条件下での室内要素試験・室内模型試験を実施する。加えて、現地長期計測や原位置試験を想定した解析条件で数値シミュレーションを行い、実問題に対する数値解析手法の適用性と信頼性の検証を行う。

(3) 令和2年度の研究計画：

前年度までの研究をそれぞれ補完するとともに、提案した地盤の雨慣れ度指標を前述の連成解析型積雪寒冷地斜面安定性評価手法（連成解析+安定解析）に組み込み、実地盤を想定した種々の解析条件下でパラメトリックスタディを実施して、地盤の雨慣れ度を考慮した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。

4. 研究成果

(1) 平成30年度は、降雨や融雪に伴う表流水や地盤内浸透（鉛直方向・水平方向）が地盤・土要素の水理特性・力学特性に及ぼす影響を定量的に評価するため、加圧給水機能付供試体作製土槽や模型土槽用流水試験装置を新規製作し、当該試験装置の性能確認試験を行い、次年度より実施する室内要素試験・室内模型試験の試験条件について検討した。また、気象条件の違いが地盤の材料特性に及ぼす影響を評価するために、原位置試験を実施する温暖地域の試験箇所として鹿児島市内のシラス斜面を選定し、新たに切土した現地斜面において、試料採取、簡易貫入試験、現場透水試験を実施した。さらに、現地で採取した土について、含水比、土粒子密度、粒度などの土の基本的物理量に関する土質試験を実施し、温暖地域と寒冷地域で各種データの収集を行った。得られた主な知見は以下のとおりである。

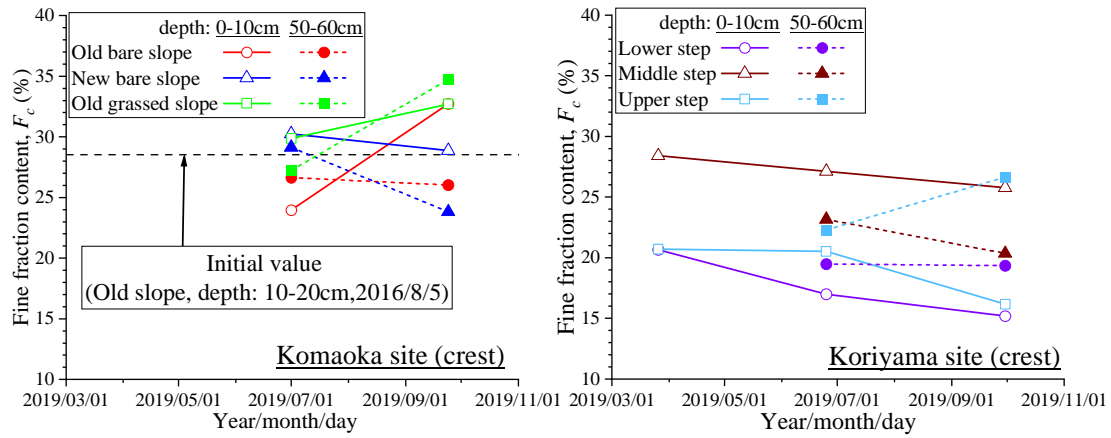
温暖地域と寒冷地域の気象データや原位置試験結果から、降雨履歴および表流水が斜面表層の粒度など物理特性変化に強く影響することが明らかになった。また、各種透水試験結果の比較により、原位置における透水係数などの簡易計測方法の確立と計測精度の向上を図った。

降雨量および融雪量の積雪浸透による流出の時間的遅れを考慮した積雪浸透モデルを提案した。また、降雨・融雪時の斜面崩壊現象の支配要因（素因・誘因）の特定及びその依存度を定量化するため、実物大模型斜面における地温・含水比分布等の長期計測結果を、提案する積雪浸透モデルを導入した熱伝導・飽和/不飽和浸透連成解析を用いて解析した。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雨水・融雪水の浸透挙動を再現可能なことを示した。

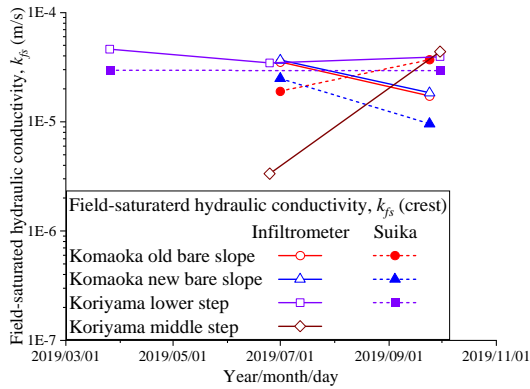
(2) 令和元年度は、地盤の雨慣れ度を定量的に評価すべく、年降水量の異なる寒冷地域（北海道）と温暖地域（鹿児島）の2か所でそれぞれ作製した実物大切土模型斜面にて原位置試験（サンプリング、土壌硬度測定、原位置透水試験、ベンコンセン断試験、簡易動的コーン貫入試験）を実施し、気象条件の違いが表層地盤の物理特性・水理特性・力学特性（粒度分布、透水係数、強度定数）に及ぼす影響を調査した。また、原位置試験結果および室内要素試験結果をもとに、斜面表層の細粒分流出を考慮した2次元飽和/不飽和浸透流・斜面安定解析モデルを作成し、降雨履歴による斜面表層の細粒分流出および先行降雨による豪雨前の斜面内含水量の増加が斜面安定性に及ぼす影響を評価した。得られた主な知見は以下のとおりである。

年降水量の異なる寒冷地域および温暖地域の双方で降雨による斜面内の細粒分流出およびそれに伴う透水性の上昇が確認されたが、細粒分流出の程度は降雨強度の大きい温暖地域でより顕著であった。ただし、降雨履歴の影響は斜面表層に限定された。（図2）

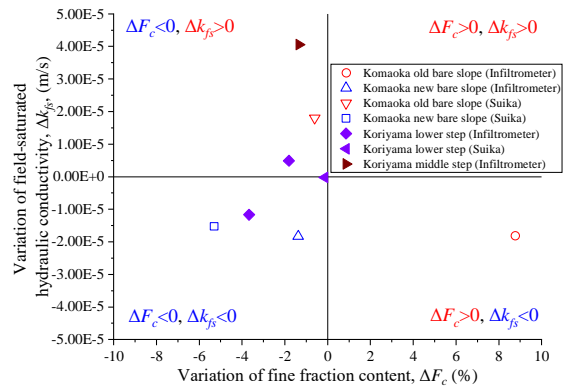
斜面表層の細粒分が減少することで斜面内間隙水圧のピーク値および上昇速度は早まる。それと同時に斜面の安全率の低下速度も早まり、斜面崩壊時のすべり面の位置は浅くなる。この傾向は先行降雨が無い場合、より顕著に見られた。（図3）



(a) 細粒分含有率の深度分布の経時変化

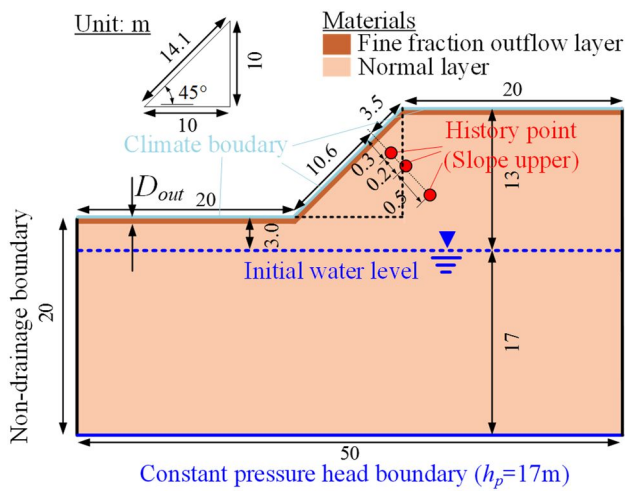


(b) 現場飽和透水係数の経時変化

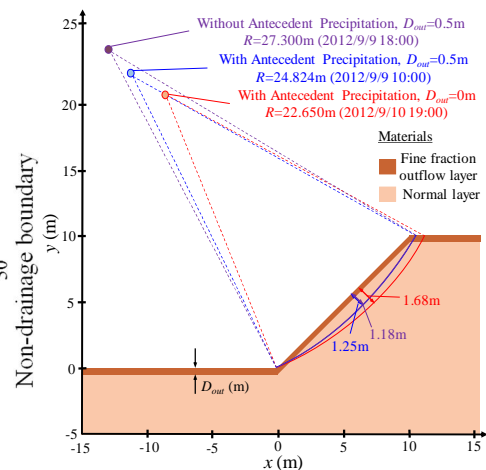


(c) 細粒分含有率と現場飽和透水係数の関係

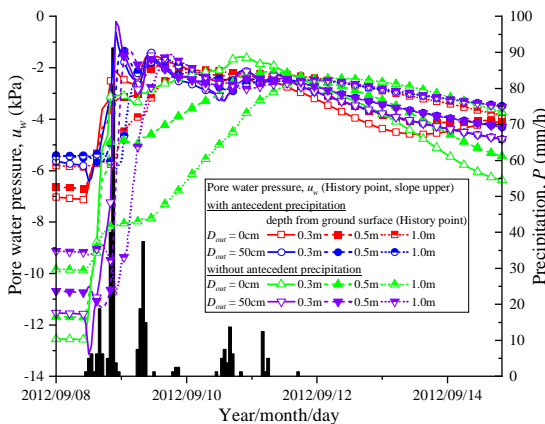
図2 寒冷地域（札幌駒岡）および温暖地域（鹿児島郡山）の原位置試験結果の比較



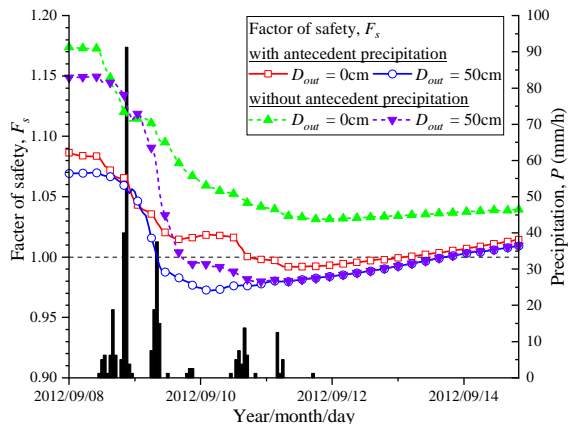
(a) 細粒分流出を考慮した FEA モデル



(b) 先行降雨と細粒分流出の影響



(c) 間隙水圧の深度分布の経時変化



(d) 安全率の経時変化

図3 細粒分流出を考慮した2次元飽和/不飽和浸透流・斜面安定解析結果

以上より、雨慣れの一形態である降雨履歴に起因する斜面表層の細粒分流出は、地盤の保水性の低下および透水性の上昇を招き、斜面崩壊の時期と規模を変化させる可能性のあることが明らかになった。

(3) 令和2年度は、前年度までの研究成果を補完するために、年降水量の異なる寒冷地域(北海道)と温暖地域(鹿児島)の実物大切土模型斜面にて原位置試験(サンプリング, 土壌硬度測定, 原位置透水試験, ペーンコーンせん断試験, 簡易動的コーン貫入試験)を継続実施し、気象条件の違いが表層地盤の物理特性・水理特性・力学特性(粒度分布, 透水係数, 強度定数)に及ぼす影響を調査した。また、寒冷地斜面の表面侵食抵抗性に及ぼす雨慣れの影響を評価するため、凍結融解履歴を与えた縮小模型斜面に対して降雨強度の違いを模擬して流量を変えた表面流水試験を実施した。さらに、北海道と九州の土砂災害発生危険基準線(CL)を比較して地盤の雨慣れ度を定量化するとともに、実地盤を想定した種々の解析条件下でパラメトリックスタディを実施して、地盤の雨慣れ度を考慮した土砂災害危険度評価手法を構築した。最後に、成果を統合し、研究を総括した。得られた主な知見は以下のとおりである。

凍結融解履歴を受けていない斜面では強雨後の弱雨で土砂流出が生じなかったのに対し、凍結融解履歴を受けた斜面では侵食が確認された。これは、凍結融解履歴を受けた斜面表面の土壌硬度が凍結前と比較して低下し、斜面表層が脆弱となったためである。温暖地域では雨慣れにより表面の耐侵食性は一般に増すが、寒冷地域では雨慣れした地盤も一冬越すとその効果が減少することが明らかになった。

北海道土砂災害警戒情報システムのCLと連成解析型積雪寒冷地斜面安定性評価手法を用いたパラメトリックスタディ結果をもとに、地形・地質条件等が異なる種々の自然斜面・法面に対して降雨・融雪時を対象とした土砂災害発生危険度判定法を提案した(図4)。また、道内各地の土砂災害事例を検討した結果、提案した土砂災害発生危険度判定法が積雪寒冷地斜面の土砂災害リスク評価法として従来基準と比べ十分な実用性を有することを検証した。

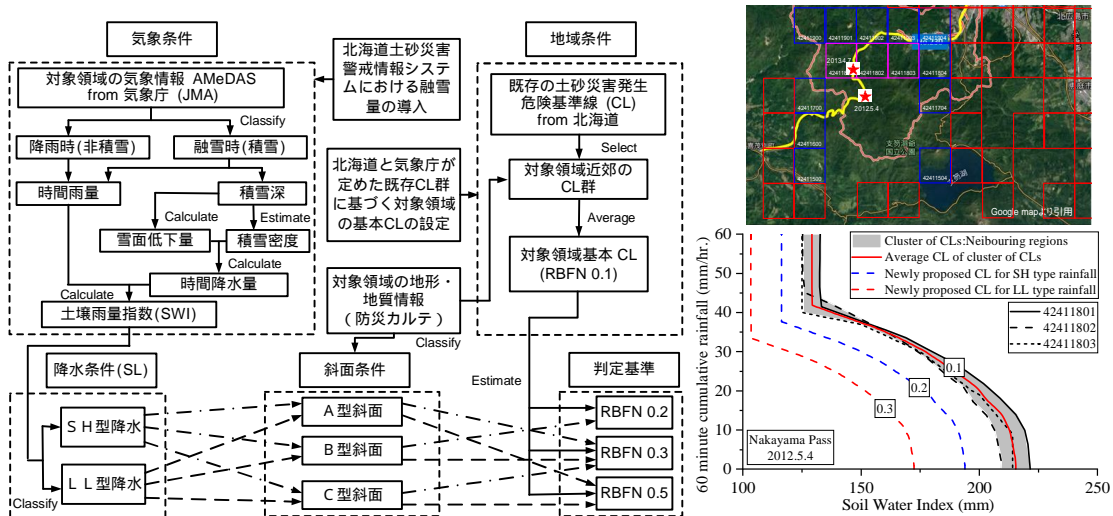


図4 降雨・融雪時を対象とする土砂災害発生危険度判定法

以上より、前年度明らかにした雨慣れの一形態である降雨履歴に起因する斜面表層の細粒分流出が地盤の浸透特性及び強度変形特性に及ぼす影響を、連成解析型積雪寒冷地斜面安定性評価手法(連成解析+安定解析)に組み込むことで、地盤の雨慣れ度を考慮した土砂災害警戒情報システムのCLに基づく土砂災害危険度評価手法を構築した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Zhu Yulong, Ishikawa Tatsuya, Siva Subramanian Srikrishnan, Luo Bin	4. 巻 275
2. 論文標題 Simultaneous analysis of slope instabilities on a small catchment-scale using coupled surface and subsurface flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 105750 ~ 105750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2020.105750	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 Nguyen Binh T., Ishikawa Tatsuya, Murakami Takumi	4. 巻 25
2. 論文標題 Effects evaluation of grass age on hydraulic properties of coarse-grained soil	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Geotechnics	6. 最初と最後の頁 100401 ~ 100401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trgeo.2020.100401	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 Zhu Yulong, Ishikawa Tatsuya, Siva Subramanian Srikrishnan, Luo Bin	4. 巻 61
2. 論文標題 Early warning system for rainfall- and snowmelt-induced slope failure in seasonally cold regions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 198 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2020.11.009	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 Zhu Yulong, Ishikawa Tatsuya, Subramanian Srikrishnan Siva	4. 巻 8
2. 論文標題 Simulation of runoff and infiltration using iterative cross-coupled surface and subsurface flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication	6. 最初と最後の頁 41 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgssp.v08.j13	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 小川大輝、酒匂一成、伊藤真一	4. 巻 10
2. 論文標題 携帯型ミニディスクインフィルトロメータによる現場透水係数の推定に関する一考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 97～102
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 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 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 村上卓生、石川達也、酒匂一成、所哲也
2. 発表標題 降雨履歴が斜面表層の物性変化に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川達也、朱玉龍、Srikrishnan Siva Subramanian、羅斌
2. 発表標題 降雨・融雪に起因する積雪寒冷地斜面の広域土砂災害リスク評価
3. 学会等名 令和2年度日本地すべり学会北海道支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上卓生、石川達也、酒匂一成、所哲也
2. 発表標題 降雨履歴に起因する表層の細粒分流出が斜面安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 第61回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 He Wentao、石川達也
2. 発表標題 Catchment-scale slope stability analysis of typhoon 10 induced slope failure based on digital elevation modeling
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川大輝、酒匂一成、伊藤真一
2. 発表標題 携帯型ミニディスクインフィルトロメータから算出される現場飽和透水係数の精度向上に関する検討
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石大地、中島亮輔、高田雄大、酒匂一成、伊藤真一
2. 発表標題 土の保水性試験装置の改良および連続加圧型加圧板法の妥当性検討
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen, B.T., Ishikawa, T., Murakami, T.
2. 発表標題 Numerical analysis of in-situ water content and temperature variations due to effects of grass
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上卓生, 石川達也, Nguyen Binh Thanh, 横田聖哉, 蝦名浩二
2. 発表標題 融雪期の地盤内浸透に及ぼす積雪と植生の影響評価
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上卓生, 石川達也, 西村聡, 笹原啓佑
2. 発表標題 斜面内浸透に対する飽和積雪浸透モデルの適用性評価
3. 学会等名 第60回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川達也
2. 発表標題 気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価の検討課題
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和元年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川大輝, 酒匂一成, 伊藤真一
2. 発表標題 インフィルトロメータの計測結果に与える地表面の含水状態の影響に関する考察
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村上卓生, 石川達也, Nguyen Binh Thanh, 横田聖哉, 蝦名浩二
2. 発表標題 融雪期の地盤内浸透に及ぼす積雪と植生の影響評価
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	酒匂 一成 (Sako Kazunari) (20388143)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	
研究分担者	所 哲也 (Tokoro Tetsuya) (40610457)	北海学園大学・工学部・准教授 (30107)	

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
---------	---------