

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06125

研究課題名（和文）山地流域の斜面土層内における水みちの空間分布に関する研究

研究課題名（英文）Study on the spatial distribution of water flow path within the soil layer in mountainous hillslopes

研究代表者

正岡 直也（Masaoka, Naoya）

京都大学・農学研究科・助教

研究者番号：90786568

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：山地斜面において高密度な土層内水流観測と土壌透水性計測を実施した結果、土層内には高透水性の水みちが存在し、降雨時の選択的な排水路となっていることが実際に確かめられた。土壌の透水性が局所的に上昇する理由として地表面や基岩面地形の影響が確認された。具体的には集水面積や勾配の大きい地点で生じる大きな土層内水流フラックスにより土壌の洗脱が起こるためと推察された。特に高透水帯が連なる水みちは流域内に不均質に存在し、過去の崩壊痕の位置と対応していることから、水みち形成には地形発達過程と密接な関係があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

山地斜面内の水みちによる排水機構について実斜面での検証が数多く行われてきたものの、観測の難しさから統一的な見解は得られていなかった。本研究では高密度の透水性計測と水流観測から局所的な水みちを特定する手法を確立したことで、水文学における降雨流出過程の研究に新たな潮流を生み出すものである。また空間的な透水性分布と地形との関係性を明らかにし、将来的に未観測流域の透水性分布予測を実現するための基礎的な知見を得た。これは既存の流出予測モデルを高精度化し、流域総合治水に大きな進化をもたらす可能性がある。

研究成果の概要（英文）：High-density observation of water flow and soil permeability within the soil layer on mountain slopes revealed that highly permeable water channels existed within the soil layer and acted as preferential drainage channels during rainfall. The surface/subsurface topography was confirmed to affect the local increase in soil permeability. Specifically, it was assumed that soil washout occurs due to large soil water fluxes that occur at locations with large catchment areas and angles. Water channels with a series of highly permeable zones existed heterogeneously within the watershed and corresponded to the locations of past landslide scars, suggesting that the formation of water channels is closely related to the topographical development process.

研究分野：森林水文学、砂防学

キーワード：水みち 排水構造 土壌透水性 ゲルフパーミアメータ法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

森林における斜面災害の発生予測、また緑のダムと称される水源涵養機能の科学的評価に向けた研究が進む中、「水みちによる排水構造」の有無が新たなトピックとなっている。従来、土層は降雨時に水位上昇して全層飽和し、地表面流が発生するという機構が認知されてきた。しかし近年の観測により、土層内に存在する水みちから素早い排水が起こり不飽和に保たれる機構の存在が報告された。これにより、従来モデルで予測される洪水流出応答と実現象とは大きく異なっている可能性がある。

水みちは流域内で空間的ばらつきを伴って分布すると考えるのが自然である。水みち分布を把握することができれば、分布型流出モデルに適切な粗度や透水性の分布を与えることが可能となり、流出予測や崩壊危険度予測の飛躍的な精度向上に繋がる。ただ、これまで実斜面での水流観測が数多く行われてきたものの、水みちについての観測事例は限られ統一的な見解は得られていない。その理由は、水みちの空間的分布を把握するための直接・間接的な手法が不足しているためである。山地斜面において水みちは空間的にどう分布しているのか、それを予測するにはどんな情報があれば可能なのかを解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、これまで前例のない流域全体での土壌透水性計測ならびに土層内水流観測により、上記の水みちの空間分布特性を明らかにする。さらに数値地形や土層厚といった地形情報と水みち分布との関係性を明らかにし、水みち分布エリアの予測手法を検討する。最後に流域内の水みち空間分布が実際の浸透流出過程に与える影響を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

野外観測は滋賀県大津市不動寺水文試験地 (F 試験地) と同県甲賀市信楽水文試験地 (S 試験地) において行った。F 試験地では過去に行った土壌圧力水頭の観測結果を解析し、追加調査として土壌透水性の計測を行った。S 試験地では流域面積 0.28 ha の流域内において約 10 m 間隔で面的に配置した 63 地点で貫入試験による土層厚計測を行い、うち 56 地点で基岩面上の土壌透水性の計測を行った。また、斜面縦断方向に約 20 m の測線を設定し、二次元断面における土壌圧力水頭の観測を行った。さらに、流域全体を再現した三次元降雨浸透シミュレーションを行い、実測の高密度透水性分布を入力した場合にどのような土層内水流が発生するかを検討した。

土壌透水性の測定には原位置透水試験法であるゲルフパーミアメータ (GP) 法を用いた。本研究では GP 法装置の構造を改良し、礫を含む細長い孔への挿入が容易になるよう細径・強靱化、また斜面での運搬が容易になるよう軽量化し、全て自作した。作成法は研究代表者の研究室ホームページに公開されている。土壌圧力水頭の観測に用いたテンシオメータの記録には、汎用のマイコン IC チップと電子部品を利用した安価な自作データロガーを用いた。

4. 研究成果

F 試験地において土壌圧力水頭の観測結果から、降雨時の飽和維持時間の短い地点が斜面内で連続的に繋がっていることが明らかになり、水みちの存在が推察された。また全水頭や土層内温度の解析からも、解析対象の飽和帯はすべて降雨浸透により一時的に形成されたものであると分かった。GP 法による透水性計測の結果、降雨時の飽和維持時間が短い地点ほど飽和透水係数 K_s が大きい傾向が明確にみられた。さらに基岩面地形の集水性を計算したところ、 K_s が大きい地点ほど集水性も大きい傾向がみられた。これは、長期間選択的に水が集まることによって細かい土壌の洗脱が起こり、水みちが形成された可能性を示唆している。以上から、山地斜面土層内の透水性は空間的に不均質で、連続的に透水性の高い部分が排水能力の高い水みちとなっていることが観測により明らかとなった。

S 試験地において二次元断面における土壌圧力水頭と K_s の分布に着目すると、斜面上部では土壌深部ほど K_s が小さい傾向がみられた一方、下部では深部の基岩面上でも K_s が大きい特徴がみられた。これは斜面下部において雨水を素早く排水する構造が発達していることを示唆していた。さらに同地点において圧力水頭の降雨応答をみると、降雨ピーク時には上昇して飽和に達するものの、降雨終了後は速やかに下降し不飽和に戻っていた。これは排水効果を裏付けるものと考えられる。降雨が多く集まる斜面下部では透水性が向上することで、崩壊危険度を低下させているメカニズムの存在が示唆された。

次に流域全体の基岩面上 K_s 分布 (図 1) に注目すると、全体的な傾向として、勾配が急かつ集水面積の大きい地点ほど K_s が高くなっていた (図 2)。これは大きな土層内水流フラックスが発生しやすい地点ほど細かい土壌の洗脱が起こりやすいことを示唆している。ただし K_s 分布に

は空間的な不均質性が大きく、流域内の一部の斜面で流下方向に連続的な高 K_s 帯 (図 1: a1 ~ a4) が存在しており、降雨時に選択的な排水路となる水みちが存在することを示していた。この水みちは傾斜や集水面積とは明瞭な関係がみられなかったが、過去の崩壊痕の位置と大まかに対応していることから、微地形データの詳細な解析から水みち分布を予測できる可能性が示された。また K_s 分布を再現した数値シミュレーションにより、降雨時に水みちの部分で周辺より数オーダー大きな土層内水流フラックスが発生することが確認された。

以上の結果から、山地斜面土層内には高透水性の水みちが実際に存在し、選択的な排水路となっていることが観測から確かめられた。土壌の透水性が局所的に上昇する理由として地表面や基岩面地形の影響が確認された。具体的には集水性や勾配の大きい地点で生じる大きな土層内水流フラックスにより土壌の洗脱が起こるためと推察された。特に高透水帯が連なる水みちは流域内に不均質に存在し、過去の崩壊痕の位置と対応していることから、水みち形成には地形発達過程と密接な関係があることが示唆された。今後、水流によって土壌透水性が実際に上昇していく機構を明らかにすることが、水みち分布の予測精度を向上させることに繋がるであろう。また、土壌の透水性だけでなく保水性 (水分特性曲線) も同様の空間的不均質性を示すことが予想され、これの効率的な測定手法についても今後開発を進める必要があるであろう。

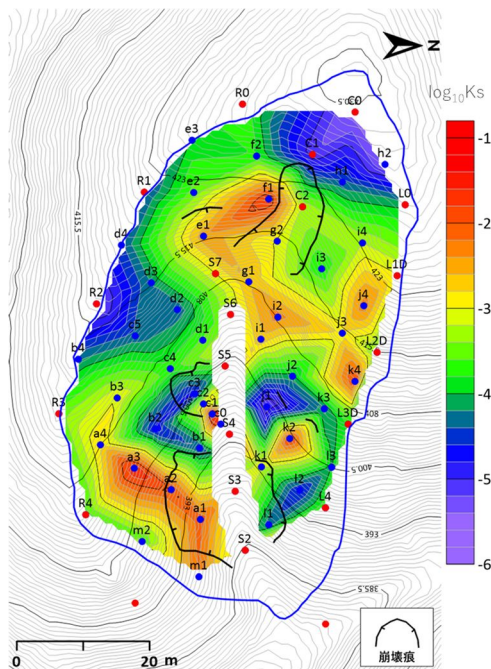


図 1 基岩面上の飽和透水性係数 K_s 分布

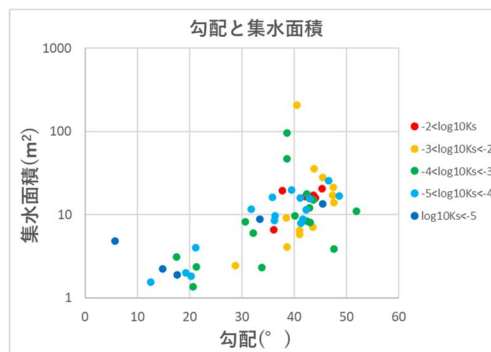


図 2 勾配と集水面積と K_s の関係

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 0件）

1. 著者名 Masaoka N., Kosugi K., Fujimoto M.	4. 巻 57
2. 論文標題 Bedrock Groundwater Catchment Area Unveils Rainfall Runoff Processes in Headwater Basins	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021WR029888	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 -

1. 著者名 Inaoka Jun, Kosugi Ken'ichirou, Masaoka Naoya, Itokazu Tetsushi, Nakamura Kimihito, Fujimoto Masamitsu	4. 巻 16
2. 論文標題 Effects of geological differences on rainfall runoff characteristics based on field measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters	6. 最初と最後の頁 80 ~ 86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3178/hrl.16.80	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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 正岡直也、小杉賢一朗
2. 発表標題 山地流域における基岩内地下水流出機構の解明 数値シミュレーションを用いて
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 正岡直也、青野友哉、岡本相大、小杉賢一朗
2. 発表標題 堆積岩山地における基岩の透水性および保水性についての考察
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 法利祐香、正岡直也、小杉賢一朗
2. 発表標題 野外土壌の体積含水率と圧力水頭を同時計測するT-TDRセンサーの開発と適用
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 柳井鴻太郎、正岡直也、小杉賢一朗
2. 発表標題 森林における土壌透水性分布が斜面の水文過程に及ぼす影響
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 正岡直也、柳井鴻太郎、小杉賢一朗
2. 発表標題 森林斜面における原位置透水試験へのゲルフパーミアメータ法の適用
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 正岡直也、小杉賢一朗
2. 発表標題 連続流出蒸発法(COFEM)を用いた森林土壌の水分特性・透水性の計測
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 柳井鴻太郎、正岡直也、小杉賢一朗、藤本将光
2. 発表標題 山地斜面における不均質な土壌透水性分布が排水能力に及ぼす影響
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Dingkang Xu, Naoya Masaoka, Tomoya Murakami, Ken'ichirou Kosugi, Yoshiko Kosugi
2. 発表標題 Comparison of forest soil hydraulic properties between different types of forests
3. 学会等名 水文・水資源学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 正岡直也、小杉賢一朗、谷知幸、松四雄騎、山川陽祐
2. 発表標題 断層構造をもつ付加体山地における基岩内地下水の流動特性
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 正岡直也、小杉賢一朗、藤本将光
2. 発表標題 花崗岩山地源流域における基岩内地下水集水域と流出特性
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 正岡直也、小杉賢一朗
2. 発表標題 連続流出蒸発法 (COFEM) を用いた森林土壌の水分特性・透水性の計測
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 柳井鴻太郎、正岡直也、小杉賢一朗
2. 発表標題 山地斜面における不均質な土壌透水性分布が排水能力に及ぼす影響
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2021年～2022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
---------------------------	-----------------------	----

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