

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：84201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04632

研究課題名（和文）斜面における飽和不飽和浸透流の観測に基づく洪水流出モデルの開発

研究課題名（英文）Development of a storm-runoff model based on the measurements of saturated-unsaturated flow on a hillslope.

研究代表者

小島 永裕 (Kojima, Nagahiro)

滋賀県琵琶湖環境科学研究センター・総合解析部門・専門員

研究者番号：00503624

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：山地から河川までを対象とした流域総合治水対策が重要であることにかんがみ、森林斜面における土壌水分動態の観測とその動態をふまえた流出モデルの開発を行った。大雨時には斜面下部で圧力水頭の鉛直伝播が速やかに生じた一方、上部では土壌の下層部分で圧力水頭があまり上昇せず乾燥部分が残った。斜面中部から谷側における土壌層底面の圧力水頭の時間変動は斜面下部からの流出の時間変動と対応しており、洪水流出応答特性が土壌層内の鉛直浸透過程によって主に支配されると推察された。また、この結果に基づき、土壌水分動態を考慮した分布型流出モデルの開発に応用し、土壌タイプが河川流出に及ぼす影響に関する評価に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果によって、森林斜面における雨水浸透過程が鉛直不飽和浸透流をベースにした流出モデルで表されることが明らかになった。このことからこれまでの研究では得られなかった、流出応答に対する土壌物理性等の影響について評価できるものと推察された。また、実測を反映したシミュレーションモデルが得られ、森林の持つ水源涵養機能をより実態に即した評価ができる可能性が示され、さらには、山地から下流域までを対象にした流域総合治水対策に貢献できるものと考えられた。

研究成果の概要（英文）：Considering the importance of comprehensive flood control measures for watersheds from mountains to rivers, we observed soil moisture dynamics on a forested hillslope to develop a runoff model based on the dynamics. During a large storm event, the vertical propagation of pressure head occurred quickly in the downslope area, while the pressure head rise was small, remaining a dry condition, at the bottom of the soil layer in the upslope area. The temporal variations of pressure head at the layer bottom on the mid slope to lower slope corresponded to the variation of outflow rate observed at the slope toe, suggesting that the runoff response was mainly controlled by the vertical unsaturated flow process in the soil layer. This result was applied to the development of a distributed runoff model considering the soil moisture dynamics, contributing to an assessment of the effects of soil types on the river runoff.

研究分野：森林水文

キーワード：山地源流域 谷壁斜面 降雨流出応答 流出機構 鉛直浸透過程 土壌物理性 斜面モデル 流出モデル

1．研究開始当初の背景

近年、我が国では水害が多発しており、河川防災設備の増強に加えて流域総合治水対策も重要である(1)。そのため、山地源流域における流出機構に基づく斜面モデルの開発が求められている。しかし、解像度 30m での流向データを利用した河道モデルが全国で展開されている(2)が、これに比べて斜面モデルの改善が進んでいない。その理由は、降雨流出応答の普遍性と流出機構の多様性との不整合性にある。すなわち、流出モデルのパラメータの値を観測ハイドログラフに合うように調整できる経験的事実は、「流出応答の普遍性」を示唆している。一方、河川流況に地質の影響が大きいという事実(3)から、斜面地中の流出機構が重要であることは明らかに、その空間不均質性が著しく「流出機構に多様性がある」ため、モデル化が遅れている。洪水予測研究には、斜面流出機構の再検討でしか解決できない難題が残されているといえる。

2．研究の目的

(1)本研究では、上記の流出機構を吟味するため、山地小流域内の試験斜面で詳細な水流動観測を展開する。

(2)治水目的に有用な分布型流出モデル開発を念頭に、土層全体の貯留量と流出強度の関係を解析して貯留型モデルへのパラメータ化を試みる。

3．研究の方法

(1)これまでの量水観測で基礎的な水文特性が明らかにされている堆積岩山地にある信楽試験地 C 流域において、平均的な谷壁斜面（勾配 42°、水平長 80m）を選び、モデル検証に必要な観測を行う。斜面の土層厚さの空間分布を貫入試験によって調査する。その後、試験斜面の下部、中部、上部にそれぞれ 1カ所、10、30、60cm 深と土層底面にテンシオメータを設置し、降雨前の土層の乾湿状態を把握するとともに、鉛直浸透による圧力水頭の伝達を追跡する。また、これらの 10、60cm 深には、TDR センサーを設置して体積含水率も計測する。この他、斜面の 5カ所には土層底面にテンシオメータを置き、土層内における水分の移動過程を検討する。あわせて、斜面下端には量水堰を設置し、斜面からの湧水量を計測する。

(2) 斜面観測データの解析結果から得られる流出機構を、河川の洪水流出予測に用いる実用的な流出モデルに活かすパラメータ化研究を行う。土層厚さ、土壌水分量、水みちの透水能力等の諸条件の反映を検討する。

4．研究成果

(1)図 1 には総降雨量 168mm の降水に伴う、斜面下端からの湧水と本流のハイドログラフを示した。この降雨前の無降雨期間が長かったことから、湧水は降雨開始 4 時間後から観測された。降雨の継続とともに湧水は急速に増加し、本流の流出状況と似てきており、湧水の流出ピークは降雨のピークから約 2 時間遅れて観測された。降雨終了後から湧水の流出状況は、C 溪流のそれとほぼ同じでなだらかな減衰曲線を描いた。これらのことから、斜面下端からの流出特性は流域全体のそれと類似しており、流域の流出特性をほぼ代表しているといえる(4)。

図2には、同出水における斜面下部、中部、上部の圧力水頭と体積含水率の変化を示した。斜面下部では、圧力水頭は深さ10cmの箇所が、深さ60cmの箇所よりも若干早く上昇をはじめ、その深さ10cmの箇所では60cmの箇所よりも急激に上昇した。降雨継続中、圧力水頭は降雨量の変化に伴って速やかに変化していた。体積含水率の変化も深さ10cm、60cmとも降雨の変化に対する時間的な遅れはほとんど見られなかった。一方、斜面上部では、圧力水頭は深さ10cmについて、降雨が継続する中徐々に上昇し、降雨ピークに30分程度遅れてピークに達した。深さ60cmではさらに12時間程度遅れてピークに達した(4)。また、斜面方向に土壌層の底面に設置した圧力水頭の変化については、前述に対応して、おおむね降雨前の土壌が湿潤な斜面の下部ほど圧力水頭の伝播が速やかであった。

これらのことから、斜面下部では速やかに流出寄与域になり、それが中部に広がっていった流出ピークを作り出すが、斜面上部はピーク付近の流量変動には貢献していないと推察された。

(2)森林斜面での観測結果を、河川の洪水流出予測に広く用いられている分布型モデルへの適用を検討した(5)、(6)。森林流域での実験・観測結果から流出モデルのパラメータを決定できるようにするため、水分保持曲線を反映できる流量流積関係式

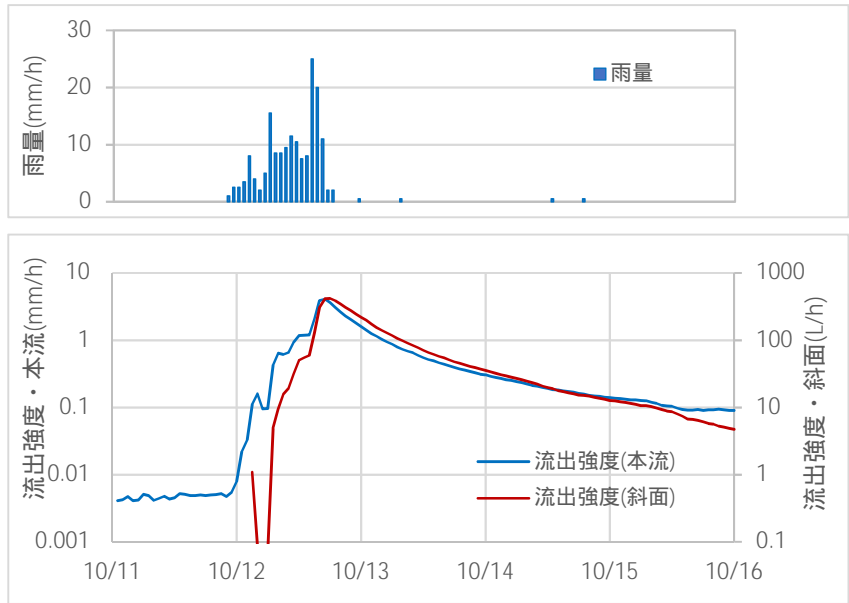


図1 大雨時のハイトグラフと本流・湧水のハイドログラフ

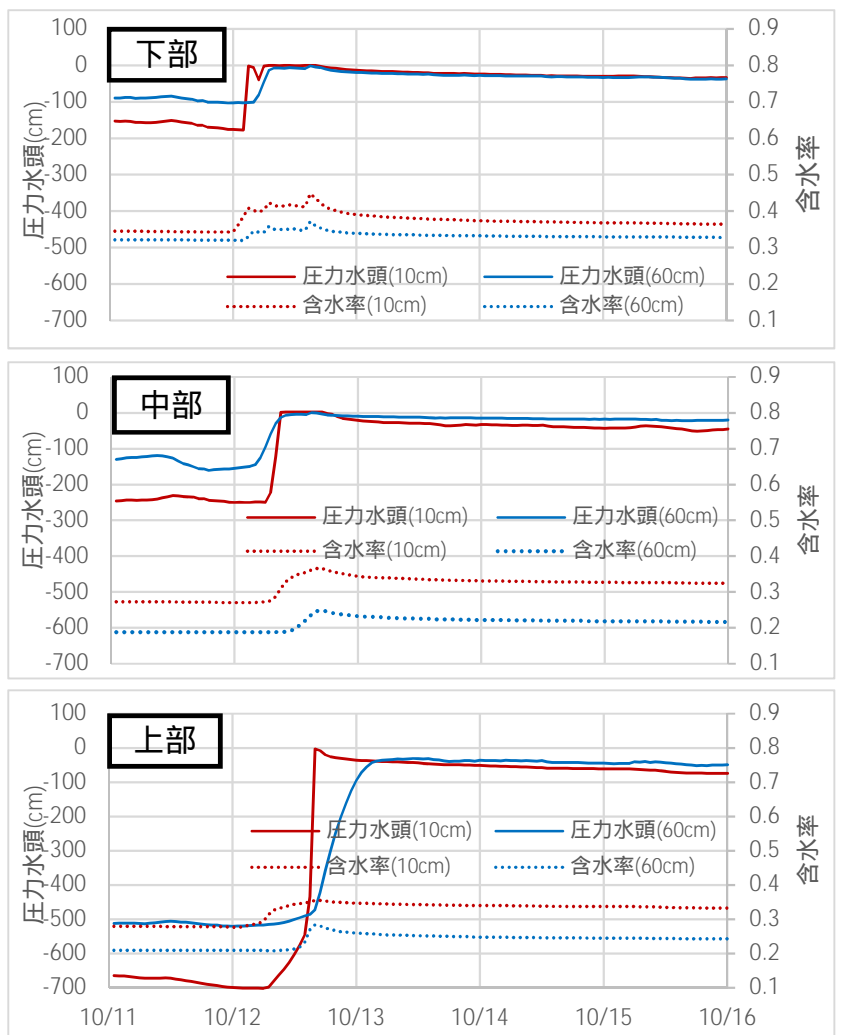


図2 大雨時の圧力水頭と体積含水率の変化

を新たに導出した。この際、水分保持曲線と不飽和透水係数の関係式として Brooks-Corey Mualem モデルを用いることで不飽和・飽和側方流を解析的に求めた(図3)。得られた流量流積関係式を分布型流出モデルの RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) モデルに適用し、4つの土壌タイプを表す一般的なパラメータを用い、降雨イベント前の無降雨期間を変えて流出計算を行った。その結果、開発したモデルは観測流量を適切に再現できることを確認し、観測から得られる森林土壌の透水性や水分状態を反映でき、かつ、大面積の河川流域での流出予測に利用できる可能性が高いものになったといえる。

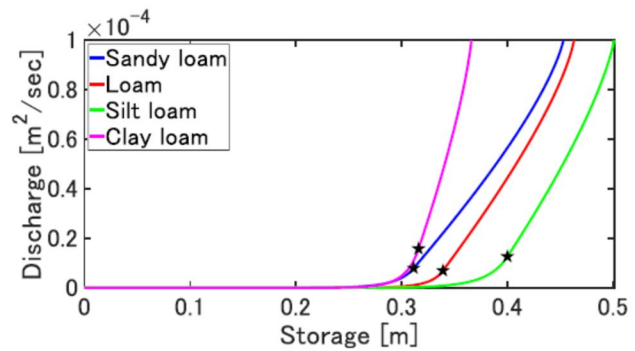


図3 土壌タイプ毎の流量流積関係(6)
より右側の貯留量では飽和帯が発生する。

今回の一連の研究を通じて、これまでの研究では得られなかった、流出応答に対する土壌層の厚さや土壌物理性の影響について、評価できる可能性が示されるとともに、集水域の最上流に当たる森林斜面での流出機構を踏まえた河川の洪水予測への展開も可能性が高まったといえる。

< 引用文献 >

- (1) 佐山敬洋・田中茂信・寶馨(2017)：分布型流出モデルと時空間起源追跡法による鬼怒川洪水の流出解析、水文・水資源学会誌 30、161-172。
- (2) 富樫冨佳・佐山敬洋・山崎大・寶馨(2018)：30m空間分解能落水線データの全国整備に関する研究、水文・水資源学会 2019 年度研究発表会集要旨、178-179。
- (3) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久(1981)：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果、土木学会論文報告集 309、51-62。
- (4) 小島永裕・正岡直也・谷誠(2020)：谷壁急斜面における土壌水分動態の観測に基づく洪水流出機構の再検討、第 131 回日本森林学会大会。
- (5) 菅原快斗・佐山敬洋・寶馨(2019)：分布型モデルへの適用を目的とした鉛直浸透流の観測とリチャーズ式の解析解による再現計算、土木学会論文集 B1(水工学)75(2)、I_1243-I_1248。
- (6) 菅原 快斗，佐山 敬洋(2021)：水分保持曲線を反映する流量流積関係式の導出と分布型流出モデルへの適用、土木学会論文集 B1(水工学)77(1)、124-135。

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 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 菅原快斗、佐山敬洋、實 馨	4. 巻 75
2. 論文標題 分布型モデルへの適用を目的とした鉛直浸透流の観測とリチャーズ式の解析解による再現計算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1243 ~ I_1248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_I_1243	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 -

1. 著者名 Tani Makoto, Matsushi Yuki, Sayama Takahiro, Sidle Roy C., Kojima Nagahiro	4. 巻 588
2. 論文標題 Characterization of vertical unsaturated flow reveals why storm runoff responses can be simulated by simple runoff-storage relationship models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124982 ~ 124982
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydrol.2020.124982	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 谷 誠、藤本 将光、勝山 正則、小島 永裕、細田 育広、小杉 賢一朗、小杉 緑子、中村 正	4. 巻 64
2. 論文標題 土壌喪失をともなう森林攪乱が降雨流出応答に及ぼす影響に関する地質ごとの流出機構に基づく評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 水利科学	6. 最初と最後の頁 105 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20820/suirikagaku.64.6_105	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 -

1. 著者名 谷 誠	4. 巻 34
2. 論文標題 貯留関数法は斜面方向流ではなく鉛直不飽和浸透流をパラメータ化している	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 水文・水資源学会誌	6. 最初と最後の頁 115 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.34.115	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 -

1. 著者名 菅原 快斗、佐山 敬洋	4. 巻 77
2. 論文標題 水分保持曲線を反映する流量流積関係式の導出と分布型流出モデルへの適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 124 ~ 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.1_124	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5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 谷 誠、松四雄騎、佐山敬洋、小島永裕
2. 発表標題 斜面の洪水流出・崩壊発生統合的予測に向けた鉛直不飽和浸透流の特性解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 地形セッション
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷 誠
2. 発表標題 学際・超学際からみた洪水流量に関する研究の方向性
3. 学会等名 水文・水資源学会 2019年度研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島永裕、正岡直也、谷 誠
2. 発表標題 谷壁急斜面における土壌水分動態の観測に基づく洪水流出機構の再検討
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷 誠
2. 発表標題 森林の生存戦略の普遍性に基づく洪水渇水緩和機能評価方法の批判
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tani Makoto, Matsushi Yuki, Sayama Takahiro, Sidle Roy C., Kojima Nagahiro
2. 発表標題 Effects of small-scale vertical unsaturated flow on the exponent of a runoff-storage power-law relationship in catchment storm runoff models
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual
4. 発表年 2020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	谷 誠 (Tani Makoto) (00314245)	人間環境大学・人間環境学部・特任教授 (33936)	
研究分担者	佐山 敬洋 (Sayama Takahiro) (70402930)	京都大学・防災研究所・准教授 (14301)	
研究分担者	正岡 直也 (Masaoka Naoya) (90786568)	京都大学・農学研究科・特定助教 (14301)	

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