

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04614

研究課題名（和文）土壌の不均質性を考慮した山地斜面雨水流動モデルの開発と水理特性スケール構造分析

研究課題名（英文）Developing a hillslope water flow model considering soil heterogeneity and analysis of hydraulic scaling structures

研究代表者

市川 温（Ichikawa, Yutaka）

京都大学・経営管理研究部・教授

研究者番号：30293963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果は以下のようである。まず、山地土壌の小空隙部と大空隙部を考慮した雨水流動モデルを開発した。つぎに、このモデルに様々な条件を与えてシミュレーションを行い、その計算結果から得られる流量流積関係と表土層中の土壌水分プロファイルの関係について分析した。その結果、斜面垂直方向の土壌水分量の分布が斜面傾斜方向の雨水流動に強く影響することが明らかとなった。このことから、降雨流出のモデル化において、斜面垂直方向の雨水流動を陽に考慮することの重要性が示唆された。この知見をベースに、斜面表土層中の雨水流動を準二次元的に計算するモデルを作成し、二次元モデルの計算結果と比較したところ、両者はよく一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌の不均質性は山地域の雨水流動に大きく影響するが、土壌の不均質性の効果を織り込みつつ河川流域全体に適用可能な降雨流出モデルは開発されていない。本研究では、土壌の不均質性を考慮して山地斜面の雨水流動を計算する詳細なモデルを開発し、このモデルの計算結果に基づいて、山地斜面の水深と流出量の関係について分析した。その結果、土壌水分が表土層の深さ方向にどのように分布するかが斜面からの流出量に強く影響することが明らかとなった。この知見に基づいて、山地域からの流出量を効率よく計算するモデルを開発した。このモデルは山地域での雨水の動きをよく表現するものであり、洪水や土砂災害の予測に貢献できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The results of this study are as follows. First, a rainwater flow model was developed that takes into account both small and large pore spaces in mountain soils. Then, the model was simulated under various conditions, and the relationship between the depth-discharge relationships obtained from the simulation results and the soil moisture profile in the topsoil layer was analyzed. The results revealed that the vertical soil moisture profile has a strong influence on the water flow in the slope direction. This suggests the importance of explicitly considering vertical rainwater movement in rainfall-runoff modeling. Based on this finding, a quasi-two-dimensional hillslope water model was developed and compared with the results of a two-dimensional model, which showed good agreement between the two.

研究分野：土木工学

キーワード：土壌特性 スケール構造 マイクロスケール メソスケール 流量流積関係式 準二次元モデル

1. 研究開始当初の背景

降雨流出は人間社会に大きな影響を与える自然現象であり、長らく水文学・水工学などの中心の課題の一つとなっている。我が国の多くの地域のように、上流域は山地部で、下流域の平野部に都市域が広がるような構造の流域では、山地域からの流出量を精度よく推定・予測することが、洪水などの災害を防止軽減し、人間活動に必要な水資源を確保するうえで重要となる。

このような現実的要請に応えるために、土木分野や農業分野を中心に、数多くの降雨流出モデルが開発されてきた。よく知られているように、最初は降雨流出現象を概念的にモデル化した、タンクモデル、貯留関数法といった概念的モデルが提案され、その後、山地斜面の雨水流動をモデル化したキネマティックウェーブモデルに代表されるような物理的モデルが開発された。物理的モデルは、計算機の発展や各種の地理・気象データの整備と歩調をあわせて発展し、昨今では山地域だけでなく低平地も含めて数万 km² から数十万 km² の流域に適用される事例も珍しくない。

物理的モデルに関する研究は多大な成果をあげたが、その一方で、モデルが観測事実と乖離しているという批判もある。たとえば谷(2016)は、近年の観測研究によって、土壤の不均質性が山地斜面の雨水流動に大きな影響を与えていることが明らかになってきているにもかかわらず、現在の降雨流出モデルではそれが考慮されていないと指摘している。土壤の不均質性が山地斜面の雨水流動に大きな影響を与えるという観測事実は、いくつかの詳細な数値計算によっても確認されている。たとえば筆者らの研究グループでは、山地斜面表土層の小空隙部の流れを飽和・不飽和流れのモデルで計算するとともに、パイプ状の大空隙部の流れをプライスマンスロットモデルで計算するモデルを開発し、大空隙部の有無で山地斜面の雨水流動形態が大きく異なることを明らかにしている(An et al., 2008)。しかし、山地斜面表土層の土壤特性と、降雨流出モデルが対象とする河川流域という空間的広がりとの間にはスケールの大きな隔りがあることから、土壤の不均質性の効果を織り込みつつ河川流域全体に適用可能な物理的降雨流出モデルはいまだ開発されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の二点である。

目的1: 土壤の不均質な水理特性(マイクロスケール水理特性)を直接的に考慮した詳細な雨水流動モデルを開発すること。

目的2: このモデルを用いて様々な条件の山地斜面に対するシミュレーションを行い、その結果から、マイクロスケール水理特性が流量流積関係などのメソスケール水理特性に影響を与える構造を分析すること。

土壤の不均質性の効果を河川流域に適用可能な降雨流出モデルに織り込むためには、マイクロスケール水理特性がメソスケール水理特性に影響を与える構造を分析する必要がある(目的2)。その分析を実現するためのツールとして、マイクロスケール水理特性を直接的に考慮した詳細な雨水流動モデルを開発する(目的1)。

3. 研究の方法

地中流と地表面流を統合的に計算するモデルに、大きな空隙が連続するパイプ部での流れを表す機構を導入することで、土壤の不均質性を考慮して山地斜面の雨水流動を計算する詳細なモデルを開発した。また、このモデルの計算結果から得られる流量流積関係を、既存の分布型降雨流出モデルで用いられている流量流積関係式で適切に表現することができるか検討した。

4. 研究成果

(1) 土壤の不均質性を考慮して山地斜面の雨水流動を計算する詳細なモデルの開発

土壤の不均質性を考慮して山地斜面の雨水流動を計算するモデルを開発した。当初は、格子ボルトマン法を用いて土壤中の小空隙部と大空隙部を考慮した雨水流動モデルを開発することを想定していたが、テスト段階で思ったようなシミュレーションを実施することができなかったため方針を転換した。具体的には、表土層中の飽和・不飽和流を表現するリチャーズ式に則った数値モデルに、大きな空隙が連続するパイプ部の雨水流れを表す機構を導入することで、土壤の小空隙部と大空隙部を考慮したモデルを開発した。

(2) 山地斜面における流量流積関係の分析

一般に、キネマティックウェーブモデルのような物理的降雨流出モデルでは、連続的に流量と流積(ある断面に存在する水量)の関係式(流量流積関係式)を組み合わせて雨水流れの計算を行うことが多い。この流量流積関係式こそが現在多用されている物理的降雨流出モデルの根幹を成している。物理的降雨流出モデルの流量流積関係式が実際の山地斜面における流量流積関係を適切に表現したものとっていれば、そのモデルは妥当であると判断できる。

流量流積関係は、地形や土壤の水理学的特性など様々な要因が組み合わさった結果立ち現れ

る集約的な特性である。この関係を各種水文量の現地計測に基づいて推定し、物理的降雨流出モデルで用いられている流量流積関係式の適合性を検証することが理想的である。しかし現実には、山地斜面の流量流積関係を明らかにできるほど空間的に詳細に計測を行うことには様々な障害が予想される。本研究では、(1)で開発した山地斜面雨水流動の詳細なモデルを用いて数値シミュレーションを行い、計算結果を現地水文観測の代替として、山地斜面における典型的な流量流積関係を導出した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 山地斜面表土層の厚さが大きいなど、斜面鉛直方向の雨水浸透過程が卓越する状況では、流量流積関係が多価になること(ある断面に存在する水量、すなわち流積が同一であっても、斜面傾斜方向の流量が異なる場合があること)。
- 斜面傾斜方向の動水勾配の値は、おおよそ斜面勾配の値で近似できること。
- 同一の斜面であっても、降雨の時間的パターンや先行土壌水分状態によって、流量流積関係が異なる場合があること。
- 現在よく使用されているキネマティックウェーブモデルでも、ある程度、流量流積関係を表すことはできるが、流量流積関係の多価性が強い状況では、キネマティックウェーブモデルによる流出計算結果の誤差が大きくなること。

(3) 鉛直準二次元飽和不飽和地中流モデルの開発

上述の研究成果から、ある断面に存在する水量が同一であっても、斜面傾斜方向の流量が異なる場合があることが明らかとなった。これはおもに、表土層内で雨水が鉛直方向に流動し、土壌水分が場所的に偏在することが原因である。土壌水分量と透水係数の関係は非線形性が強いいため、斜面に垂直な方向の土壌水分分布を適切に表現しなければ、斜面傾斜方向の雨水流動を適切に計算することができない、ということになる。その一方で、斜面傾斜方向の動水勾配の値は、おおよそ斜面勾配の値で近似できる。これらのことから、斜面に垂直な方向の土壌水分状態を精度よく表現しつつ、斜面傾斜方向の動水勾配を斜面勾配で近似することで、山地斜面表土層中の雨水流動を鉛直準二次元的に計算するモデルを開発した。

本モデルを単一斜面に適用し、(1)で開発した詳細なモデルと計算結果を比較したところ、非常によく一致した。図1, 2はそれぞれ30°と5°の斜面を想定して得られたハイドログラフである。それぞれ三種類の土壌タイプを想定した。いずれの斜面・土壌においても、詳細なモデルの結果(実線)と準二次元モデルの結果(一点鎖線)はよく一致しており、本モデルの妥当性が示されている。

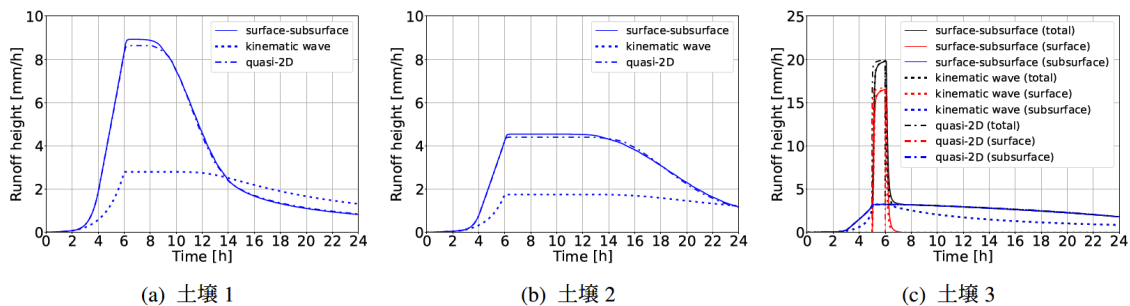


図1 斜面角度30°の計算結果

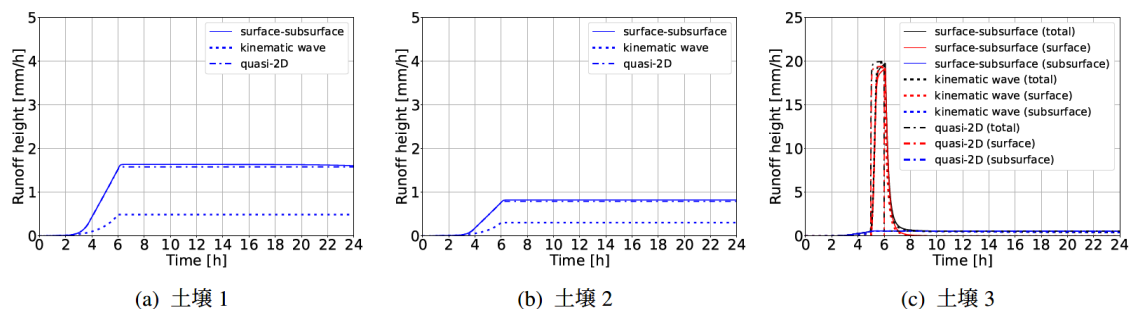


図2 斜面角度5°の計算結果

<引用文献>

- 谷誠 (2016): 複雑な斜面流出機構が単純な降雨流出応答を産み出す根拠, 地形, 37, 531{557}.
- An, H., Ichikawa, Y., Tachikawa, Y., Shiiba, M. (2008): Developing a three-dimensional coupled model of pipe-matrix subsurface flow, Hydrological Research Letters, 2, 52{55}.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yutaka Ichikawa, Hyunuk An and Yasuto Tachikawa	4. 巻 15
2. 論文標題 A methodology to examine a depth-discharge constitutive equation for rainfall-runoff modelling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters	6. 最初と最後の頁 44,49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3178/hrl.15.44	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yutaka Ichikawa
2. 発表標題 Linking micro scale hillslope properties and a meso scale constitutive equation used in rainfall-runoff modeling
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年度オンライン大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Ichikawa, Yuusuke Mori and Yasuto Tachikawa
2. 発表標題 Investigating the validity of a meso scale constitutive equation using micro scale water dynamics Simulations for hillslope rainfall-runoff processes
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年度オンライン大会（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森優介・市川温・田中智大・萬和明・Kim Sunmin・立川康人
2. 発表標題 雨水流動モデルを用いた山地斜面表土層の土壤水分プロファイルと流量流積関係に関する分析
3. 学会等名 水文・水資源学会 日本水文学会2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 普神素良・市川温・萬和明・田中智大・Kim Sunmin・立川康人
2. 発表標題 山腹斜面雨水流モデル内部の水量の分析と鉛直準二次元地表・地中流モデルの開発
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 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		
韓国	Chungnam National University		