

斜面垂直方向の不飽和浸透を考慮した流量流積関係式の開発
 Development of a Lateral Storage-Runoff Relationship
 Considering Perpendicular Unsaturated Infiltration in Hillslopes

○菅原快斗・佐山敬洋

○Yoshito SUGAWARA, Takahiro SAYAMA

Many rainfall-runoff models applied to Japanese river basins have been developed on the concept that saturated subsurface flow on bedrock is important for flood simulations. On the other hand, unsaturated infiltration along perpendicular direction to the bedrock significantly affects flood runoff when drainage mechanism such as pipes exists. This study proposes a new lateral flow model that considers the perpendicular unsaturated infiltration. From comparisons with a numerical solution of the Richards equation and the new model, this study confirm that the new model can reproduce storage effects of delaying runoff and reducing peak discharge. The new model allows to analyze the effects of perpendicular unsaturated infiltration with low computational cost (110 words).

1. はじめに

日本の降雨流出モデルの多くは、基岩上に発生する飽和側方流が洪水時の流出の主成分であるとみなし、構築されてきた。これは、大規模出水時には飽和帯の発達に伴い不飽和領域が縮小するため、その影響が小さくなるという考えに基づく。一方で、最近の知見から、パイプ流の排水によって飽和帯の発達が抑制される場合には、洪水時であっても鉛直方向の不飽和浸透が流出に大きな影響を与えることが明らかになっている。

不飽和浸透は一般的に Richards 式を数値的に解くことで解析される。しかし、広域を対象とした分布型流出モデルにおいては、3次元の離散化を伴う Richards 式の数値計算は計算量が膨大になる。一方で、計算量が少ない側方流モデルでは斜面垂直方向の水分量分布を集中化するため、不飽和浸透の影響を考慮できない。そこで、本研究では、斜面垂直方向の離散化を行わずに、不飽和浸透流の影響を考慮できる新しい側方流モデルを開発する。また、単一斜面を対象として、新モデルと既往の側方流モデルならびに Richards 式の比較計算を行い、その適用性を議論する。

2. 手法

本研究では、菅原・佐山(2021)の研究において斜面垂直方向の平衡状態を仮定したものを、非平衡状態にまで拡張することでモデルを構築する。具

体的には、ダルシー則から得られる平衡状態での圧力水頭分布 $\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\cos \varphi$ の右辺を変数 a に置き換えることで、様々な水分量分布を考慮できるようにする。ここで、 ψ は圧力水頭であり、 z は斜面垂直方向の座標である。また、不飽和浸透に伴う a の変化を追跡するために、次の線形駆動モデルを適用する。

$$\frac{da}{dt} = -\frac{a + \cos \varphi}{\tau} \quad (1)$$

τ は緩和時間である。

3. 計算条件

構築したモデル(1D-New)を評価するために、菅原・佐山(2021)により提案されたモデル(1D-Equil.)ならびに2次元 Richards 式(2D-RE)との比較を行う。計算領域は斜面長 100 m、土層厚 2 m 斜面角 30°の長方形斜面とし、斜面の幅は単位長さとする。降雨は地表面から浸透し、基岩は不透水であるものとする。上流境界条件は流入なし、下流境界条件は重力流れを設定した。土壌パラメータは Richards 式の数値計算ソフトウェアである Hydrus-1D のものを用いた。ただし、飽和透水係数は透水性の良い山腹斜面を想定して 0.001 m/sec とした。また、式(1)で用いられる τ は Richards 式を用いた数値実験から決定し、降雨イベントは総降雨量 239 mm のものを入力とした。

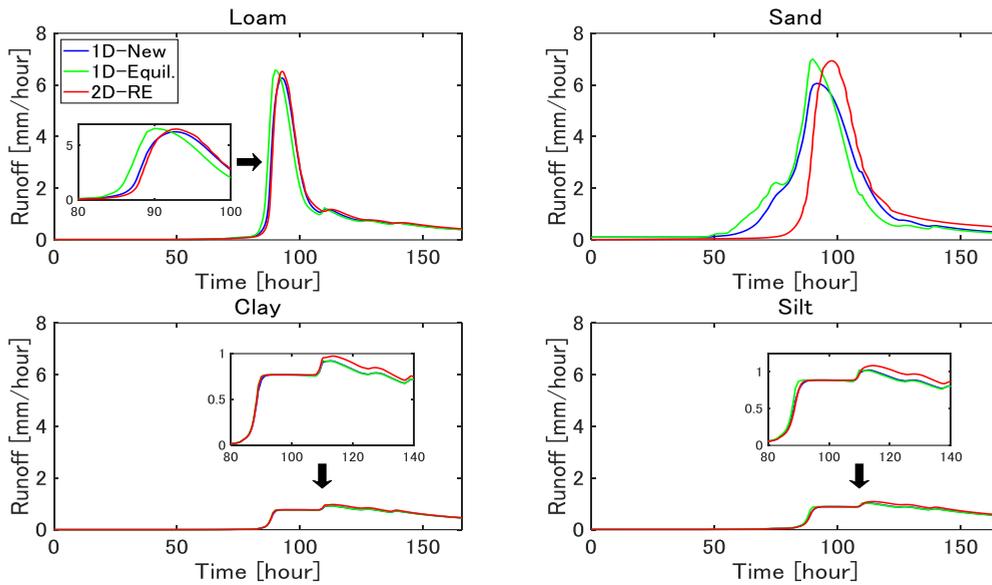


図1 4つの Soil type を用いた時の斜面下端におけるハイドログラフ

4. 結果と考察

図1に4つの Soil type を用いた時の斜面下端におけるハイドログラフを示す。Loamにおいて、斜面垂直方向の不飽和浸透の影響で 2D-RE の波形は 1D-Equil.よりも時間的に遅れて緩やかな変化を示す。新しく開発した 1D-New は斜面垂直方向の離散化を行わない側方流モデルであるが、同様の貯留効果を示している。Sand において、2D-RE は 1D-NEW よりもピーク時刻前に多くの雨水を貯留する一方で、ピーク流量はより大きい値を示している。Sand は不飽和透水係数の非線形性が弱いため、湿潤状態でも緩和時間 τ の変動が大きいことと、保水性が低く湿潤時でも土層上部が乾燥しやすく圧力水頭分布が非線形になりやすいことが、この差異の原因と考えられる。Clay と Silt においては、流出が小さく、3つのモデルでほとんど差異が見られない。これは飽和帯が発生せず、不飽和側方流のみが流出の成分となったために、斜面垂直方向の水分量分布が流出にほとんど影響しなかったためだと考えられる。

本研究で開発した側方流モデルにおいて、斜面垂直方向の不飽和浸透が流出に与える影響の強さはパラメータ τ によって決まる。図2に τ を変化させたときのハイドログラフを示す。 τ が小さい時は、1D-New と 1D-Equil.はほとんど同じ変化を示すが、 τ が大きくなるとハイドログラフは時間的に遅れて、ピーク流量は小さくなる。これは τ が大きくなると、斜面垂直方向の不飽和浸透が遅くなり、

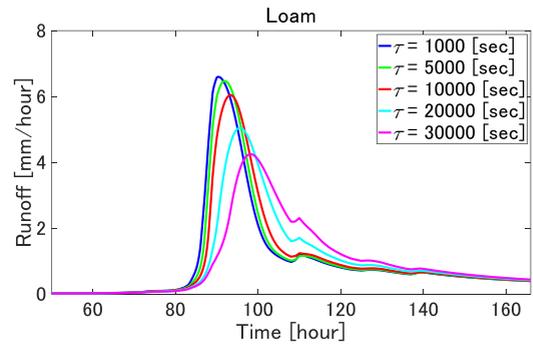


図2 τ を変化させたときのハイドログラフ

基岩上に雨水が貯まりにくくなるためである。このように新しいモデルは、適切な τ を用いることで Richards 式と同様の貯留効果を再現できる。

5. 結論

本研究で新たに開発した側方流モデルは、斜面垂直方向の離散化を行うことなく不飽和浸透効果を反映することが可能である。これにより、計算量を抑えながら分布型流出モデルに不飽和浸透プロセスを組み込むことが可能になる。今後は観測との比較からモデルの適用性を議論する予定である。

参考文献

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.