

第II部門

雨水流動モデルを用いた山地斜面表土層の土壌水分プロファイルと流量流積関係に関する分析

京都大学工学部

学生員 ○森 優介

京都大学大学院工学研究科 正会員

市川 温

京都大学大学院工学研究科

正会員 田中 智大

京都大学大学院工学研究科 正会員

萬 和明

京都大学大学院工学研究科

正会員 Kim Sunmin

京都大学大学院工学研究科 正会員

立川 康人

1 序論 降雨流出の予測は水文学の重要な課題の一つであり、今までにキネマティックウェーブモデルをはじめとする様々なモデルが開発されてきた。一方で、キネマティックウェーブモデルは、土が乾いているときや斜面が緩やかなとき、降水量が少ないときに出水を適切に表せないということが指摘されている¹⁾。

しかし、なぜこれらの条件下で適用性が低くなるのか、山地斜面の内部で何が起きているのかは明らかにされていない。そこで本研究は、キネマティックウェーブモデルの適用性の良否を、流量流積関係と土壌水分プロファイルの観点から明らかにすることを目的とした。

2 雨水流動モデルを用いた分析手法

2.1 分析手法 本研究では、以下の要領で分析を行った。

1. 雨水流動モデルをもとに作成された計算プログラムを使用して各条件の斜面全体の計算を行う。

2. 計算結果をもとにある断面における流量 q と水深 h の関係をプロットし、それぞれの流量流積関係を調べる。

3. 各条件ごとの土壌水分プロファイルを出力し、それらがどのように流量流積関係へ影響を与えているかを調べる。

2.2 雨水流動モデル まず、飽和不飽和流は以下のリチャーズ式²⁾で表される。

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} - \nabla \cdot (K(\psi) \nabla (\psi + z)) - q - q_e = 0 \quad (1)$$

ここで、 θ : 体積含水率、 ψ : 圧力水頭、 t : 時間、 K : 透水係数、 z : 空間座標、 q : 飽和不飽和流の一般ソース項、 q_e : 地表との交換率である。なお本研究では、土壌の保水特性と透水特性として以下の Van Genuchten 式³⁾と Mualem 式⁴⁾を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha|\psi|)^n} \right\}^{1-1/n} \quad (2)$$

$$K = K_s S_e^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{n/(n-1)})^{1-1/n} \right\}^2 \quad (3)$$

ここで、 θ_r : 残留体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 α, n : Van Genuchten 係数である。

次に、地表面流は以下の拡散波式⁵⁾で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot \left\{ \frac{h^{5/3}}{n_{man} \sqrt{S}} \nabla (h + z) \right\} - q_{sur} - q_{sur,e} = 0 \quad (4)$$

ここで、 n_{man} : マニングの粗度係数、 S : 平均局所勾配 ($S = \sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}$) である。ただし、水深勾配は地表面勾配よりも十分に小さいと仮定する。

以上の式を有限体積法で離散化し、収束許容誤差以下になるまで反復計算を行った。

3 斜面条件と総降水量が流量流積関係と土壌水分プロファイルに与える影響の分析

3.1 計算条件 本研究では、図1(a)のような斜面長 L が100mの山地斜面を想定し、土層厚、斜面角度、総降雨量および初期条件を表1に示すように変化させて雨水流動計算を行なった。

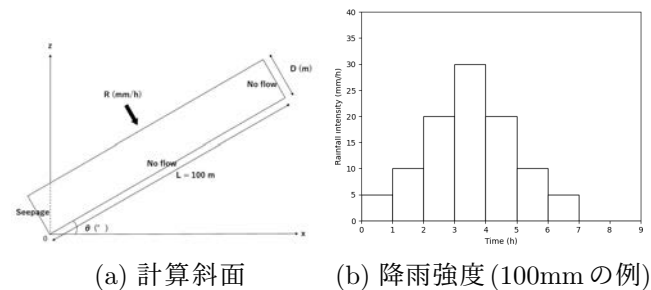


図1 計算斜面と降雨強度

表1 計算条件

土層厚 (D)	1.0, 2.0m
斜面角度 (θ)	5, 20, 35°
総降水量 (R)	40, 100mm
初期条件	Wet, Dry

3.2 計算結果 図2から図3は、各条件における下端から10m(青)、50m(緑)、90m(黄)の断面での30分毎の単位幅流量 q と水深 h の関係を表したものである。NSEの値は、An et al.の論文¹⁾の図を参考に目測で読み取ったものである。図4、図5は、各条件における下

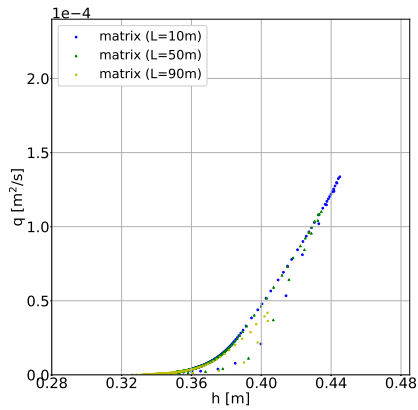


図2 D=1m, $\theta=20^\circ$, R=100mm,
Dry 条件 (NSE : 0.9 以上)

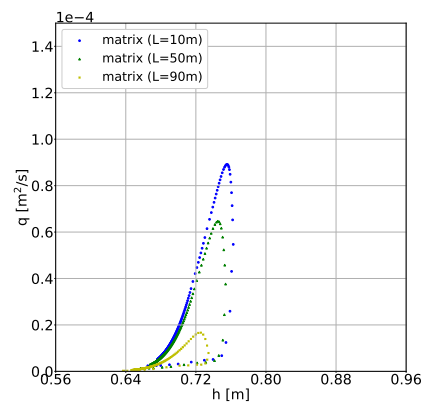


図3 D=2m, $\theta=20^\circ$, R=100mm,
Dry 条件 (NSE : 0.85)

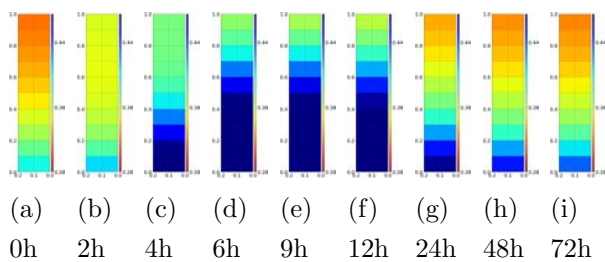


図4 D=1m, $\theta=20^\circ$, R=100mm, Dry 条件の下端から10mの断面における体積含水率(時間)

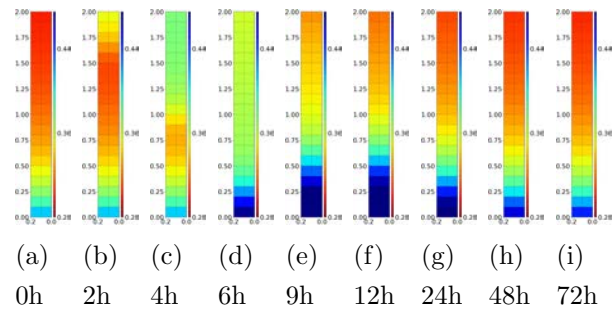


図5 D=2m, $\theta=20^\circ$, R=100mm, Dry 条件の下端から10mの断面における体積含水率(時間)

端から10m地点での斜面に垂直な断面の体積含水率の時間変化を表したものである。赤色に近いほど体積含水率が低く、青色に近いほど体積含水率が高いことを表している。

まず、流量流積関係の図より、土層厚が1mの条件下では比較的一価の式で描けるような流量流積関係が存在するのに対して、2mの条件下では大きくループを描くように各点が存在しており二価の関係になっていることがわかる。ただ、斜面角度や総降水量によって流量流積関係に大きな差は生まれなかった。また、初期条件がDry条件の場合は、Wet条件と比べて縦方向に圧縮されたようなループを描くことがわかった。

次に、土壤水分プロファイルの図より、土層厚が1mの条件下ではすぐに雨水が浸透して飽和帯を形成しているが、2mの条件下では鉛直方向の浸透流が卓越していることがうかがえる。

4 結論 以上のことより、雨が浸透するときに流量流積関係にはループが発生すること、土壤水分プロファイルによって流量が大きく左右されることが明らかとなった。そして、それらを併せて考えると、雨が

降り出した直後は鉛直方向の浸透流が卓越して斜面方向の流れは小さいが、浸透流が土層底面まで到達すると飽和帯を形成し流量が急激に増えていく、という一連の過程がループとして現れているということが明らかとなった。

参考文献

- 1) An, H., Y., Ichikawa, K., Yoroze, Y., Tachikawa and M., Shiiba: Validity assessment of integrated kinematic wave equations for hillslope rainfall-runoff modeling, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.54, pp.505-510, 2010.
- 2) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, Vol.1, No.6, pp.318-333, 1931.
- 3) Van Genuchten, M.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 4) Mualem, Y.: A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 5) Weill, S., E. Mouche, and J.Patin: A generalized Richards equation for surface/subsurface flow modeling, *Journal of Hydrology*, Vol.366, pp.9-20, 2009.