

第II部門

山腹斜面雨水流モデル内部の水理量の分析と鉛直準二次元地表・地中流モデルの開発

京都大学工学部

学生会員 ○普神素良

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

市川 温

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

萬 和明

京都大学大学院工学研究科

正会員 立川康人

1 研究の背景と目的 降雨流出モデルの一つであるキネマティックウェーブモデルは、山腹斜面内の雨水流を斜面方向の流れのみで表現しており、流出過程を反映していない。また、適切な予測にはパラメータの調整を必要とする。一方、詳細な雨水流動モデルは計算量が多く流域規模の計算に適用できない。

そこで本研究では、既存モデルで計算された斜面内部の水理量を比較し、その結果に基づいて斜面垂直方向の雨水流動を考慮しつつ詳細なモデルに比べて簡略化された鉛直準二次元地表・地中流モデルを開発した。

2 斜面内部の水理量の分析

2.1 計算条件 計算した斜面の条件を図1に示す。土壌の保水性・透水性はMualem-van Genuchten式^{1), 2)}で表現した。初期条件を有効飽和度 $S_e = 0.6$ で斜面全体に一様に設定し、計算開始から6時間、20mm/hの降雨を与え、24時間分の流出を計算した。

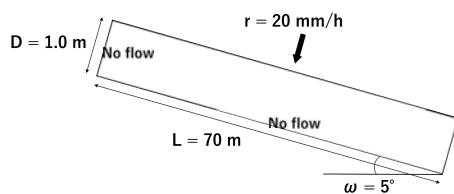


図1 計算斜面

2.2 使用したモデル 本研究では、Anら³⁾の開発した鉛直準二次元地表・地中流モデルの計算結果を真値とした。これは、地中流を三次元リチャーズ式、地表面流をSt.Venant方程式でそれぞれ定式化し、境界面における圧力水頭とフラックスの連続性を保ちながら2つの系を同時に計算する雨水流動モデルである。

キネマティックウェーブモデルは、流量・流積関係をMualem-van Genuchten式で表現したモデルを用いた。

2.3 結果と考察 図2に、ハイドログラフおよび同じ断面における透水係数と斜面方向の動水勾配の時系列変化を示す。キネマティックウェーブモデルは、地

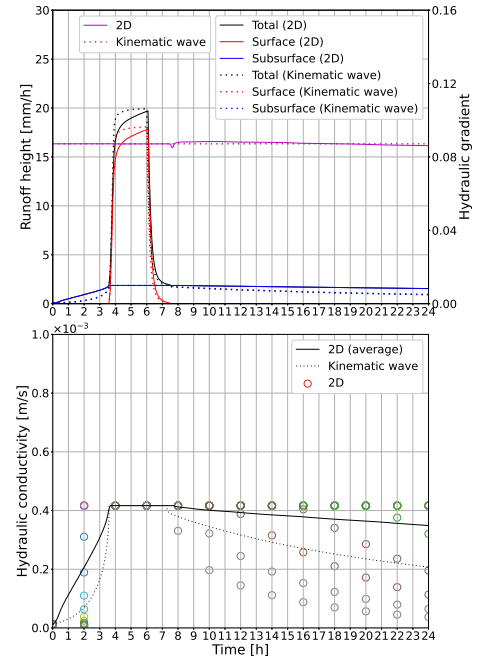


図2 ハイドログラフおよび動水勾配、透水係数の時系列変化

表面流については二次元モデルの結果をよく再現できているが、地中流の流出高は過小となった。また、ハイドログラフと断面平均透水係数とがよく対応しており、土層が不飽和であるとき二次元モデルで計算された透水係数の分布は一樣でないことがわかる。よって、斜面垂直方向の土壌水分分布のモデル化が重要であると考えられる。さらに、土層中の水が流出する過程で斜面勾配と動水勾配に差がみられたが、その大きさは2.4%とそれほど大きくないことが確認された。

3 鉛直準二次元地表・地中流モデルの開発

3.1 モデルの概要 2.3の結果を踏まえ、斜面方向の雨水流動を一次元リチャーズ式で表現し、斜面方向の動水勾配を斜面勾配で近似した、鉛直準二次元地表・地中流モデルを開発した。本モデルでは、山腹斜面における雨水流動を以下の式でモデル化する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \omega \right) \right] - \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

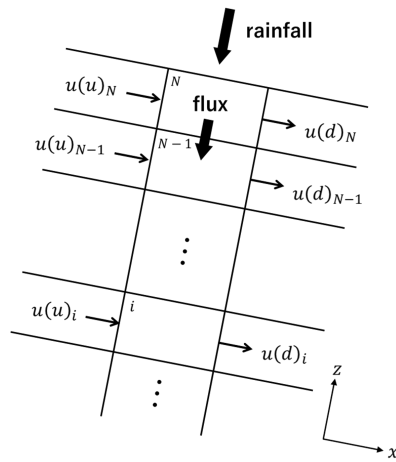


図3 鉛直準二次元地表・地中流モデルの概略図

ここで、 θ : 体積含水率, t : 時間, z : 斜面垂直方向の空間座標, K : 透水係数, ψ : 圧力水頭, ω : 斜面角度, x : 斜面方向の空間座標, u : 斜面方向のダルシー流速である。

(1) 式を離散化し、反復計算により数値解を求める。斜面には格子状の計算セルを設定し、上流カラムから順に計算をおこなう(図3参照)。上流側の計算結果より上流から流入する水のダルシー流速 $u(u)_i$ (i : 斜面垂直方向の位置を表す添字) を境界条件として与え、流出する水のダルシー流速 $u(d)_i$ は以下の式で与える。

$$u(d)_i = K_i \sin \omega \quad (2)$$

地表の状態量を計算しないため最上層のセルを飽和しているとして仮計算をおこない、地表付近のフラックス f を次式により算出する。

$$f = -K_{N-\frac{1}{2}} \left(\frac{\psi_N - \psi_{N-1}}{\Delta z} + \cos \omega \right) \quad (3)$$

ここで、 N : 最上層のセルを表す添字, Δz : 斜面垂直方向の空間差分間隔である。フラックス f を浸透能とみなし、浸透能と降雨強度のうち小さい方を土層上端における雨水の流入強度として本計算をおこなう。計算が収束しない場合は流入強度を半分にして計算することを繰り返す。また、浸透しない雨水はその計算時刻での斜面下端からの表面流による流出となる。

4 結果と考察 図4に3つのモデルのハイドログラフを示す。開発した準二次元モデルでは、地中流については真値とした二次元モデルの結果をよく再現でき、斜面垂直方向の土壤水分分布の重要性が確認された。この分布を一様とするキネマティックウェーブモデルでは、 K - θ 関係の非線形性のために流出高が過小になったと考えられる。また、図4に示した土層内の

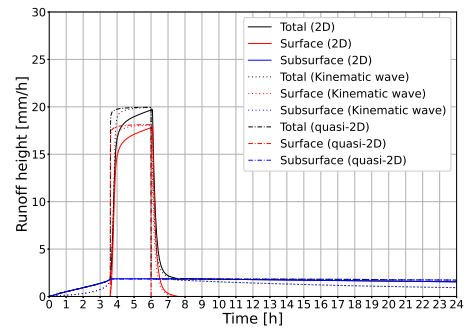


図4 3つのモデルのハイドログラフ

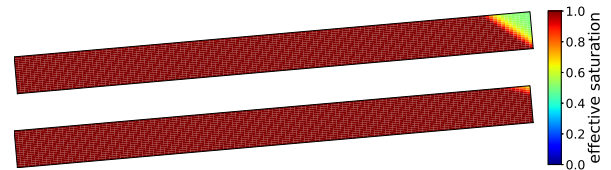


図5 土壤水分分布の比較(計算開始から6時間後, 上: 準二次元モデル, 下: 二次元モデル(真値))

有効飽和度の分布図より、準二次元モデルと二次元モデルとで斜面上流部の飽和帯の形状が異なることがわかる。上流から計算を進めるというモデル化では下流の水分状態が上流側の雨水流動に与える影響を考慮できず、このことが地表面流の流出高に差をもたらしたと考えられる。

5 結論 本研究ではまず、モデルで計算された斜面内部の水理量の比較により、斜面垂直方向の土壤水分分布の重要性と斜面方向の動水勾配に対して斜面勾配による近似が概ね成り立つことを確認した。そしてこの結果に基づき、山腹斜面の雨水流動を鉛直一次元リチャーズ式と動水勾配を斜面勾配で近似したダルシー則で表現した鉛直準二次元地表・地中流モデルを開発した。準二次元モデルでは地中流については詳細なモデルを再現でき、また、地表面流の流出高に差を生じる要因が明らかになった。

参考文献

- 1) Mualem, Y.: A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 2) 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.
- 3) An, H., and S.Yu: Finite volume integrated surface-subsurface flow modeling on nonorthogonal grids, *Water Resources Research*, Vol.50, pp.2312-2328, 2014.