

## 鉛直準二次元地表・地中流モデルの開発および既存モデルとの比較

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○普神素良  
 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 萬 和明

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 Kim Sunmin  
 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、鉛直方向の雨水流動を考慮していない。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、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計算量を削減した、鉛直準二次元地表・地中流モデルの開発を目的とした。

**2 モデルの概要** 本モデルでは、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することにより、山腹斜面内の雨水流動を以下の式でモデル化する。

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

ここで、 $\theta$ : 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、 $\psi$ : 圧力水頭、 $\omega$ : 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1参照)。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、 $\Delta z$ : 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

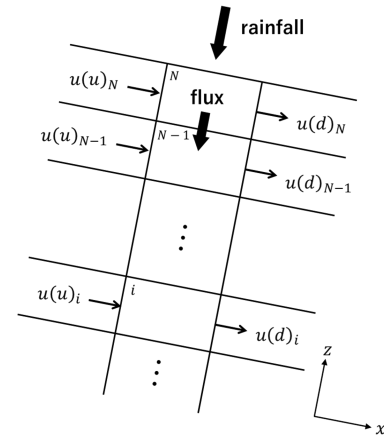


図1 鉛直準二次元地表・地中流モデルの概略図

とを繰り返す。また、浸透でき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。

### 3 モデルによる降雨流出計算

**3.1 計算条件** 計算した斜面の条件を図2に示す。土壌の保水性・透水性は Mualem-van Genuchten 式<sup>1), 2)</sup> で表現した。初期条件を有効飽和度  $S_e$  により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時間分の流出計算をおこなった。

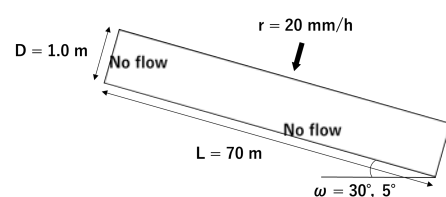


図2 計算斜面

**3.2 比較対象としたモデル** 本研究では、Anら<sup>3)</sup>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。

キーワード 準二次元モデル, 地表・地中流モデル, リチャーズ式, 山地斜面

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂CクラスターC1棟, E-mail: fugami.sora.44z@st.kyoto-u.ac.jp

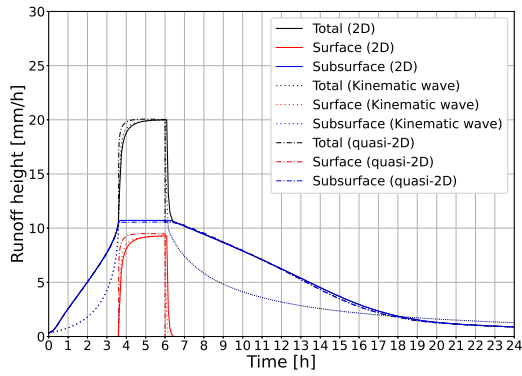


図3 斜面角度  $\omega = 30^\circ$ ，ハイドログラフの比較

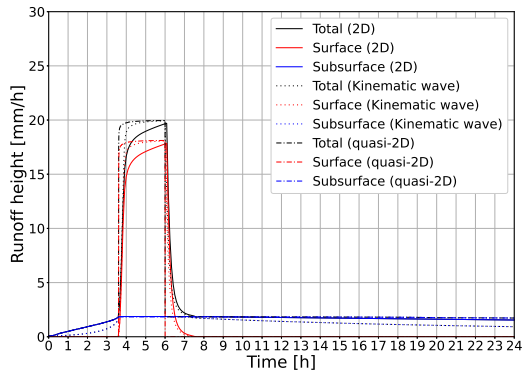


図4 斜面角度  $\omega = 5^\circ$ ，ハイドログラフの比較

**3.3 結果と考察** 図3, 図4に3つのモデルで計算された結果のハイドログラフを示す。地中流については、開発した準二次元モデルでは二次元モデル（真値）の結果を非常によく再現できたが、キネマティックウェーブモデルでは流出高が過小となった。これは、 $K-\theta$ 関係の非線形性のためと考えられ、斜面垂直方向の土壤水分分布の重要性が確認された。地表面流については、各モデルで生起時刻は一致したが、斜面角度  $\omega = 5^\circ$  において準二次元モデルとキネマティックウェーブモデルの流出高が真値に比べて過大となった。図5, 図6に示した土層内の有効飽和度の分布図から、特に  $\omega = 5^\circ$  の条件において二次元モデルと準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、土層中の水が流出しにくい緩斜面においてそのことが顕著に表れたと考えられる。

また、準二次元モデルでは浸透能以上の雨水を斜面下端における地表面流出としているため地表面流発生時および降雨終了時の流出高の変化が真値に比べて急激になっており、地表面流の状態量を計算するといっ

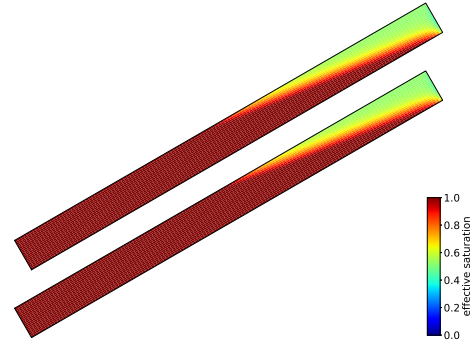


図5 斜面角度  $\omega = 30^\circ$ ，土壤水分分布の比較（計算開始から6時間後，上：準二次元モデル，下：二次元モデル（真値））

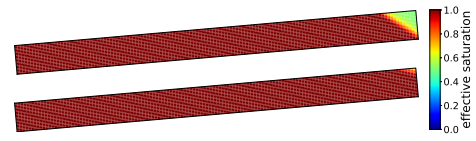


図6 斜面角度  $\omega = 5^\circ$ ，土壤水分分布の比較（計算開始から6時間後，上：準二次元モデル，下：二次元モデル（真値））

たモデルの改善が必要であると考えられる。

開発した準二次元モデルの計算時間は、二次元モデルの半分以下であった。よって、二次元の雨水流動を2方向の一次元流で表現することにより、計算コストを削減することができたといえる。

**4 結論** 本研究では、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、既存モデルとの比較をおこなった。準二次元モデルでは、地中流について詳細なモデルの結果を再現でき、計算時間は詳細なモデルの半分以下に短縮された。また、流出形態に差を生じる要因が明らかになった。地表面流の計算方法の検討をはじめとするモデルの改良を今後の課題とする。

**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.