

第II部門

山地斜面雨水流動の鉛直準二次元的モデリング手法の改良

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

京都大学防災研究所 正会員 萬 和明
 忠南大学地域環境土木学科 非会員 安 賢旭
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 立川康人

1 研究の背景と目的 山地域からの出水を精度よく予測するため、これまでに様々な降雨流出モデルが開発されてきた。しかし、実用的なモデルの多くは実際の現象を簡略化して表現しており、適用する条件や洪水の規模によって予測精度が低下する場合がある。一方、リチャーズ式に基づくモデルは、土壌中の水分移動を物理的に表現するが、その膨大な計算量のために河川流域規模の流出予測に活用することは難しい。

以上の背景を踏まえて筆者らは、鉛直二次元のリチャーズ式において斜面傾斜方向の動水勾配を斜面勾配で近似することでモデリングの簡略化を図る、鉛直準二次元地表・地中流モデル（以下、準二次元モデル）を開発した¹⁾。しかし、この近似の精度は適用する斜面角度に影響され、特に緩斜面において誤差が大きくなることがわかっている。そこで本研究では、傾斜方向の圧力勾配を考慮した動水勾配の算定方法について検討する。

2 鉛直準二次元地表・地中流モデルの概要 本モデルでは、図1のように斜面に計算セルを設定し、上流から順に1カラムずつ計算をおこなう。

地中流は、鉛直二次元のリチャーズ式で表現する。

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

ここで、 θ は体積含水率、 K は透水係数、 ψ は圧力水頭、 ω は斜面角度、 t は時間、 x 、 z はそれぞれ斜面傾斜方向、斜面垂直方向の座標、 u は x 方向のダルシー流速である。

地表流は、キネマティックウェーブ式で表現する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f_{in}, \quad q(h) = ah^m \quad (2)$$

ここで、 h は地表流水深、 q は傾斜方向の単位幅流量、 r は降雨強度、 f_{in} は土層への浸透強度、 $a = \sqrt{\sin \omega} / n_M$ (n_M はマンニングの粗度係数)、 $m = 5/3$ である。

地中流と地表流は個別に計算する。地表面には、地表流が生じていないときには降雨強度で与えられるフラックス境界条件、地表流が生じているときには地表流水深で与えられる圧力境界条件がそれぞれ適用される。

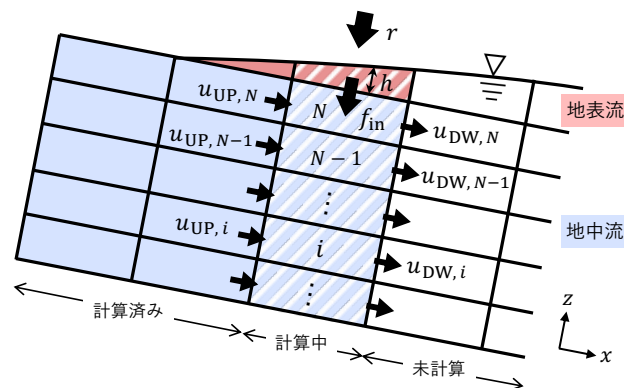


図1 準二次元モデルの概略図

3 斜面傾斜方向の動水勾配の算定方法 これまでの準二次元モデルでは、傾斜方向の動水勾配を斜面勾配で与えていた。すなわち、各計算セルから流下方向へ流出する水のダルシー流速 u_{DW} は以下の式で表される。

$$u_{DW,i}^{n+1} = K_i^{n+1} \sin \omega \quad (3)$$

ここで、 i は垂直方向の位置、 n は時間ステップを表す。

本研究で提案する手法では、地中流の計算において計算中カラムとそのひとつ下流のカラムの間の圧力勾配を考慮して動水勾配を算定し、次式より u_{DW} を求める。

$$u_{DW,i}^{n+1} = K_i^{n+1} \left(\frac{\psi_{up,i}^{n+1} - \psi_{dw,i}^n}{\Delta x} + \sin \omega \right) \quad (4)$$

ここで、 $\psi_{up,i}^{n+1}$ は計算中カラムの各セルにおける圧力水頭（未知）、 $\psi_{dw,i}^n$ はひとつ下流のカラムの各セルにおける1ステップ前の時刻の圧力水頭（既知）である。この方法では、未知の圧力水頭を用いることで上流からの流入を反映し、下流カラムの既知の圧力水頭を用いることで下流側の水分状態を簡易的に考慮しながらも、地中流計算を簡略化することができる。

4 計算条件 上記の動水勾配の算定方法を用いた準二次元モデルを、図2に示す単一斜面に適用した。初期条件は一様な水分状態（有効飽和度0.5）とし、20 mm/hの雨を計算開始から12時間与えた。土壌特性はMualem-van Genuchten式^{2),3)}で表現し、残留体積含水率 $\theta_r = 0.28$ 、飽和体積含水率 $\theta_s = 0.475$ 、飽和透水係数 $K_s = 9.72 \times 10^{-4}$ m/s、パラメータ $\alpha = 4$ /m、 $n_v = 2$ とした⁴⁾。

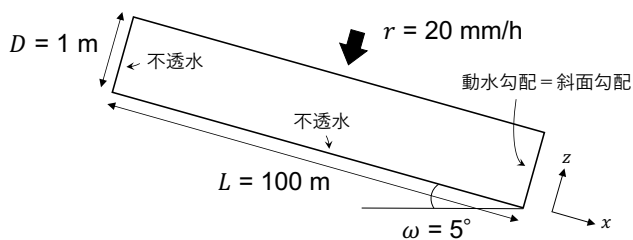


図2 計算条件

また本研究では、An ら⁵⁾の開発した、鉛直二次元のリチャーズ式を簡略化せずに解くモデル（以下、二次元モデル）による結果を真値とした。計算結果をモデル間で比較し、準二次元モデルの計算精度を検証した。

5 結果と考察 図3に、真値とする二次元モデルおよび3節に述べた動水勾配の算定方法を用いた2種類の準二次元モデルで計算された、斜面下端におけるハイドログラフを示す。斜面傾斜方向の動水勾配を斜面勾配で近似した準二次元モデルでも二次元モデルに近い結果が得られているが、傾斜方向の圧力勾配を考慮して動水勾配を算定する準二次元モデルではさらに精度が向上し、二次元モデルの結果とほとんど一致している。

図4に、各モデルで計算された斜面全体の土壌水分分布図を示す。図4(a)の斜面勾配近似を用いた準二次元モデルでは、(c)の二次元モデルでみられるような斜面最上流部における飽和帯の拡大が再現できておらず、また降雨終了後にも飽和帯の形状に違いがみられる。これに対し、(b)に示す傾斜方向の圧力勾配を考慮した準二次元モデルでは、飽和帯の拡大から排水過程まで二次元モデルの結果をよく再現できている。これは、斜面の各位置の計算においてそのひとつ下流のカラムの圧力水頭を用いて傾斜方向の動水勾配を算定することで、下流の水分状態を考慮して土壌水分量および下流へ流出する水量が決定されるためと考えられる。

また、傾斜方向の動水勾配の算定において圧力勾配を考慮した準二次元モデルの計算時間は、二次元モデルの1/10以下であり、斜面勾配近似を用いたモデル同様、飽和不飽和流計算のコストを削減できるといえる。

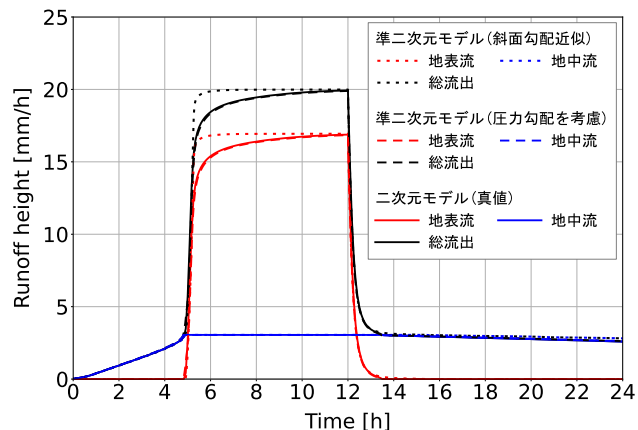


図3 ハイドログラフの比較

6 結論 本研究では、鉛直二次元のリチャーズ式において斜面傾斜方向の動水勾配に関する近似を用いることでモデリングの簡略化を図る鉛直準二次元地表・地中流モデルに対し、傾斜方向の圧力勾配を用いた動水勾配の算定方法を導入した。この手法では、地中流の計算において下流側の水分状態を考慮することができ、準二次元モデルが有する計算コストの優位性を保ちつつ、動水勾配の斜面勾配近似を用いたモデルでは誤差が顕著であった緩斜面においても非常に高い計算精度が得られることが確認された。

今後は、この準二次元モデルを流域に展開し、河川流域規模の流出計算への適用を目指す。

参考文献

- 1) Fugami S., Ichikawa Y., Yorozu K., An H., Tachikawa Y.: Developing a vertical quasi-two-dimensional surface-subsurface flow model using an approximation for hydraulic gradient, *Hydrological Research Letters*, Vol.17(2), pp.36-41, 2023.
- 2) Mualem Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 3) van Genuchten M.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 4) Hopp L., McDonnell J.J.: Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth, *Journal of Hydrology*, Vol.376, pp.378-391, 2009.
- 5) An H., Yu S.: Finite volume integrated surface-subsurface flow modeling on nonorthogonal grids, *Water Resources Research*, Vol.50, pp.2312-2328, 2014.

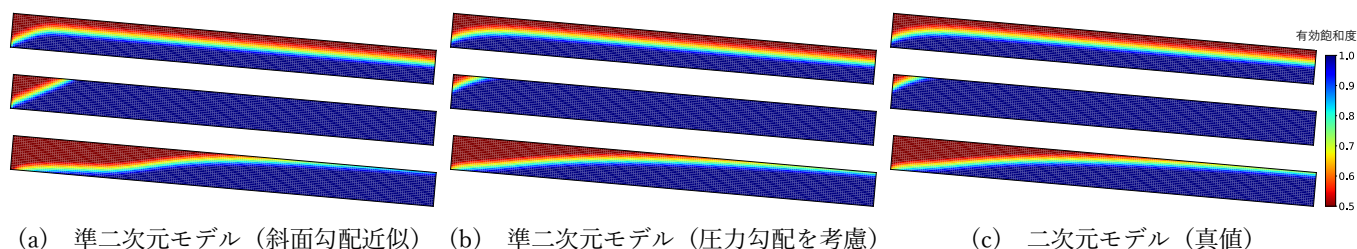


図4 土壌水分分布の比較（上から、計算開始3, 12, 24時間後）