

地中水の浸透解析と分布型水文モデル

大気水圏ダイナミクス研究室
指導教官

猪野 祐一
早川 典生

1 はじめに

降雨 河川流量変換系の最新技術である分布型水文モデルでは、表面流出、地下水流出をモデル化する新安江モデル⁵⁾のような貯水槽モデルが組み込まれている。新安江モデルでは、降雨または浸透水を貯水層に貯留し、流出または浸透させる。しかしながら、これらのモデルのパラメータが実際の土層中の水分輸送と対応しているかどうかは明確ではない。そこで、本研究では雨水の地中への浸透過程を、不飽和浸透流の基礎方程式を解くことにより解明した浸透モデルを構築する。その上で、浸透モデルによる結果から新安江モデルにおけるパラメータを算出し、それらのパラメータの意義を明らかにしようとするものである。

2 浸透モデル概要

本浸透モデルでの土壌中における不飽和浸透流の計算方法は Richards (1931) の方程式を採用した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(\theta) \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(\theta) \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\theta) \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial z} \right\} + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、毛管ポテンシャル $\phi(\theta)$ と透水係数 $k(\theta)$ は含水率 θ に依存して決まり、Brooks and Corey モデル²⁾を用いると、

$$\phi(\theta) = \phi_b S_e^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

$$k(\theta) = k_s S_e^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (3)$$

となる。また、検討ケース2でのみ次式のような van Genuchten モデル⁴⁾を用いた。

$$\phi(\theta) = \frac{\left(S_e^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (4)$$

$$k(\theta) = k_s S_e^{\frac{1}{2}} \left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (5)$$

ここで ϕ_b は空気侵入圧、 k_s は飽和透水係数であり、 α 、 n 、 m はパラメータである。また、 S_e は有効飽和度であり、次式より与えられる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

ここで、 θ_r は残留含水率、 θ_s は飽和含水率である²⁾。これらはそれぞれ土壌によって変わるパラメータである。

浸透モデルでは、まず流域をメッシュ分割し、各メッシュ間の流量を式(1)を差分化して計算する。また、時刻 t と時刻 $t + \Delta t$ の含水率の平均を使用して流量を計算し、時刻 $t + \Delta t$ の含水率を implicit 的に算出した。

3 検討ケース

3.1 ケース1

本モデルの検証を目的として、浅沼ら⁶⁾による観測結果との比較を行った。これは特に、屋外におけるモデルの適用性を検証するものである。

観測圃場は、東京大学生産技術研究所千葉実験所(千葉県千葉市)構内の一画、約 30m 四方の裸地面の平坦地である。元来草地であったものを、地表面から約 20cm 程度の草を剥ぎ、その上に成田砂を 30cm 程客土したものである。そのため、圃場の地盤条件は、

表層 ~ 35cm	・・・	均質な成田砂
35cm ~ 50cm	・・・	黒色腐食土
50cm 以深	・・・	関東ローム土

となっている。観測期間は 1990 年 7~9 月の 3 ヶ月間である。使用した観測データは、深さ 3m までのテンシオメーターによる 1 時間毎の含水率と時間雨量である。

各層の土壌物理パラメータとしては、pF 試験および透水試験結果に Brooks and Corey モデルを Levenberg-Marquardt 法によって当てはめを行って決定した。

浸透モデルでは蒸発散を考慮していないため、昼間のような蒸発が活発に起こっている場合に、適用するのは難しい。すなわち、含水率の変化を再現する場合に、計算開始日時は夕方から降雨が開始するような日時がふさわしい。そこで、そのような条件を満たしている 9 月 13 日 16:00 から計算を開始するとし、これ以降の雨量を地表面の境界条件として設定した。9 月 13

日 16:00 前後の雨量を図 1 に示す .

よって , 初期含水率も同時刻の観測値を使用した .

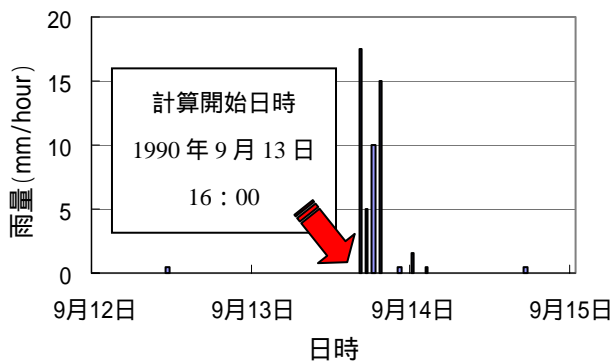


図 1 9月13日16:00 前後の雨量

3.2 ケース 2

Brooks and Corey 以外のモデルを適用した場合の検証として Boulier¹⁾ の実験結果と比較を行った .

試験土柱は , 高さ 0.935m , 内径 0.06m の円柱に密度 $1670 \pm 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 平均空隙率 $0.37 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ の一様な砂が敷き詰められている . 下端にはステンレスの穴あきプレートがあり , その穴はピエゾメーターにつながっている . 上端には金属の格子が置かれている . 含水率の測定にはガンマ線の減衰率による測定 (誤差範囲 $\pm 0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) が用いられている . 含水率の測定間隔は , 360, 720, 1080, 1800, 2700, 3600, 4500sec となっている .

土壌物理パラメータは , boulier が決定したものを使用する . これについては , van Genuchten モデルのものが与えられている (表 1).

表 1 土壌物理パラメータ (ケース 2)

パラメータ	値
s	0.312
r	0.0265
k_s (ms^{-1})	$4.28 \text{e-}5$
(m^{-1})	4.37
n	2.2223

この土柱の上端に一定の降雨 P を与えた 実験では $P = 0.535 k_s$ を与えたとしているので , 浸透モデルでは $P = 82.4$ ($\text{mm} \cdot \text{hour}$) を与えた .

初期含水率については , 初期含水率曲線が示されているので , それを使用した .

3.3 ケース 3

本研究の目的である貯水槽モデル (新安江モデル) のパラメータの意義を , 浸透モデルによる結果と対応させることによって明らかにすることを目的として , 三次元小流域において浸透モデルを構築し , 流出解析を行った . これについては , 平面モデルなど複数のケースについて行ったが , ここではより実流域に近い地形である斜面地形についてのみ記す . 使用した DEM としては関川上流域における適当な DEM を切り出し , 使用した (図 2). 三次元的に表すと図 3 のようになる .

115	121	137	166
81	93	120	147
50	66	104	131
10	46	81	122

図 2 使用した DEM

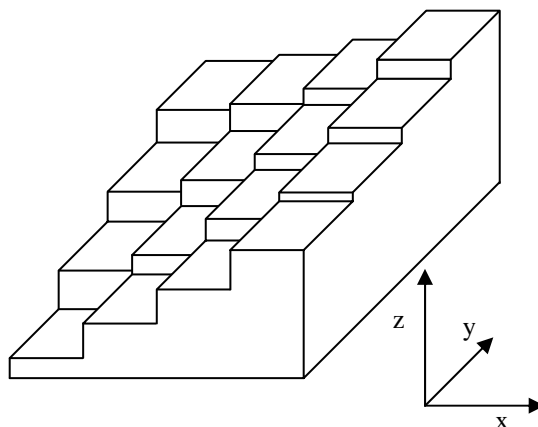


図 3 斜面地層略図

土壌による流出特性の違いをみるために , 透水性の良い土壌として成田砂 , 透水性の悪い土壌として関東ロームの 2 種類の土壌を用いることとした . 各土壌の一般的な土壌物理パラメータを表 2 に示す . この値は , 乾燥過程 , 湿潤過程の平均として算出された値である .

表 2 土壌物理パラメータ (ケース 3)

パラメータ	成田砂	関東ローム
s	0.400	0.772
r	0.077	0.589
k_s (ms^{-1})	$2.0 \text{e-}4$	$5.0 \text{e-}6$
b (m)	-0.4	-0.4
	0.286	0.250

境界条件は、 y 方向の両端を不透水層、 x 方向の始端を空気、終端を標高 112m まで地下水層それより上は不透水層とした。降雨については、10mm/hour を計算終了まで与え、 x 方向始端から発生する地下水流出をモデルの出力値とした。

初期含水率は、計算により作成した。まず、初期の地下水面位置を斜面モデルでは全メッシュとも標高 112m と設定し、含水率は地下水面より下では飽和含水率 s_s 、地下水面より上では水分特性曲線に従う含水率として設定した。次にこの状態から 300 時間、降雨を与えずに計算を行い、境界からの流入出量を収束させ、その時の含水率分布を初期含水率として設定した。

4 結果と考察

4.1 ケース 1

ケース 1 の観測結果と計算結果を図 4 に示す。深さ 0.5 ~ 0.75m で浸潤線位置を比較すると、計算値と観測値はよく一致した。深部において微妙にずれているが、これはパラメータの誤差のほか、計算では 1 時間内に均一な降雨を与えているが実際はそうでないことも、この浸潤線形状の違いにあらわれていると考えられる。

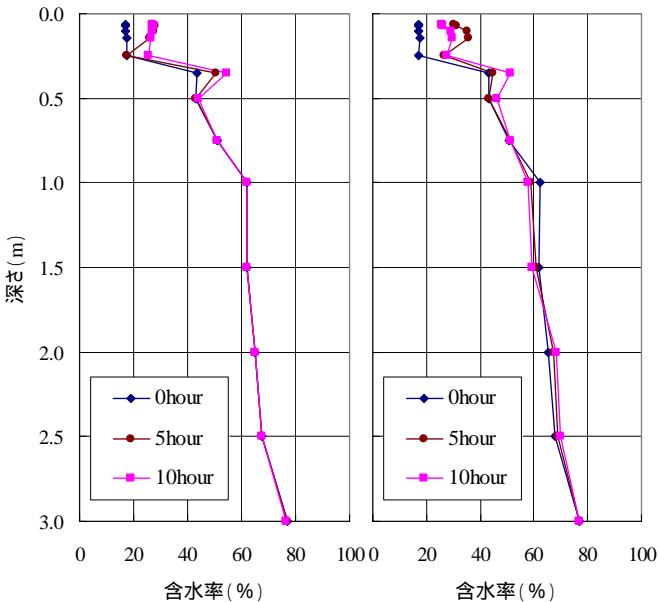


図 4 ケース 1 の観測値 (左) と計算値 (右)

4.2 ケース 2

ケース 2 の実験結果と計算結果を図 5 に示す。実験結果と計算結果はよく一致した。

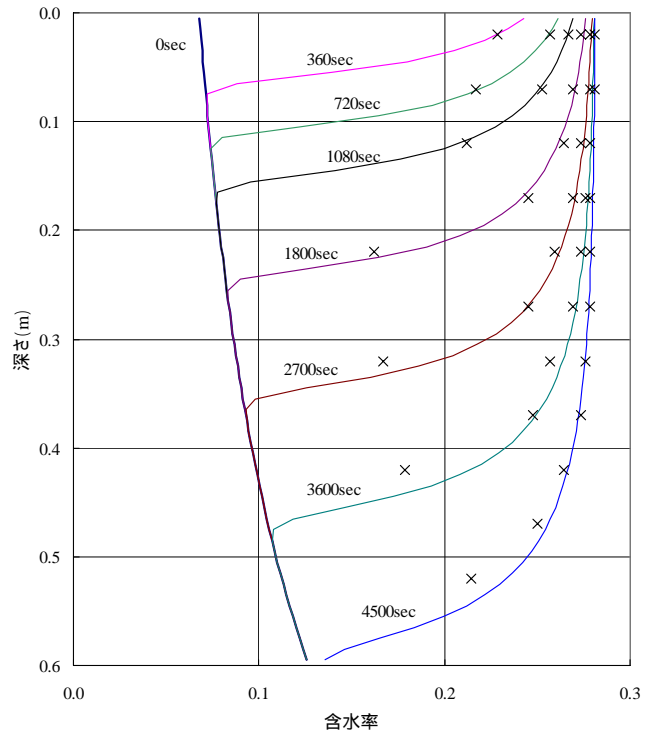


図 5 ケース 2 の実験値 (x) と計算値 (線)

4.3 ケース 3

ケース 3 の計算結果を図 6 に示す。降雨開始から徐々に地下水流出が増加し、収束する様子が表れた。

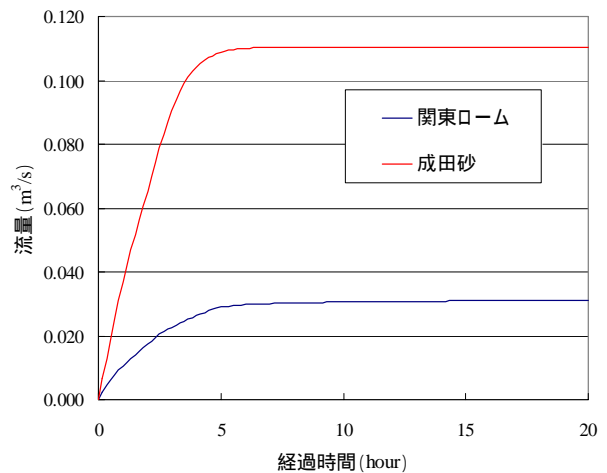


図 6 地下水流出量の経時変化

この試験地層について、新安江モデルのパラメータ算出を試みた。これについては、地下水流出が深く関わっている地下水減衰係数 C_g および最終浸透能 F_c について行った。

地下水減衰係数は主要降雨後において、河谷や流域に貯留された水の減衰状況を示している。 C_g は時間単位によって変わる値であるため、ここでは貯留係数 K について算出する。具体的には、地下水流出量の経時

変化に、次式を当てはめ、決定した。

$$Q = Q_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{K}}\right) \quad (7)$$

ここで、 Q は地下水流出量、 Q_{max} は地下水流出量の最大値である。

図 7 に当てはめ結果を示す。当てはめには *Levenberg-Marquardt* 法を用いた。これによると、貯留係数 K は、関東ロームで 2.27hour、成田砂で 1.91hour という結果となった。透水性の悪い土壌では、貯留している時間も長くなり、このような違いがあらわれたと考えられる。

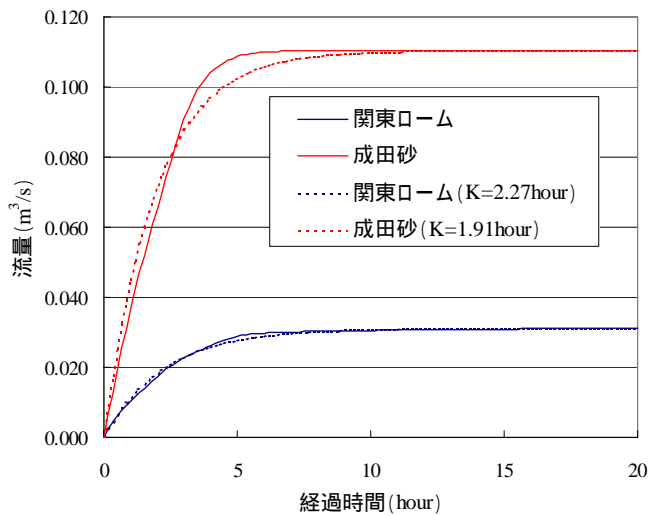


図 7 貯留係数 K の当てはめ結果

最終浸透能 F_c は流域全体に十分に大きな降雨 (1000mm/hour) を与えた場合の、地表面における最終的な浸透能として算出した。

図 8 に浸透能の経時変化を示す。これによると、最終浸透能 F_c は関東ロームで 3.52mm/hour、成田砂で 667mm/hour という結果となった。ここでも透水性による違いが大きくあらわれたと言える。

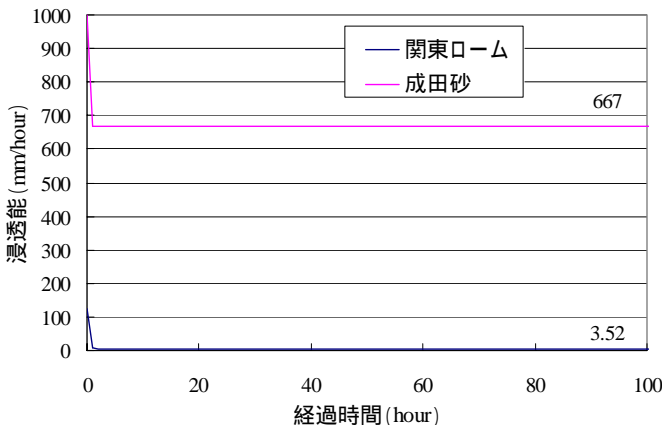


図 8 浸透能の経時変化

5 結論

本研究では *Richards* の方程式を解き、三次元試験地層における土壌水分輸送および地下水流出量、表面流出量を算出する浸透モデルを構築し、いくつかのケースにおいて数値解析を行った。

本モデルを浅沼らの屋外での成田砂圃場における観測と、*Boulier* の実験室内での砂質土における実験において検証を行ったところ、浸潤線の降下位置における比較で、よい一致を得た。

実流域に近い地形を想定した試験地層において、透水性の違う 2 種類の土壌を対象として、新安江モデルにおけるパラメータの妥当性の検討を試みた。これにより、土壌による特性をみることはできたが、具体的な数値でのパラメータ比較には、さらに実流域における計算が必要である。

6 参考文献

- 1) Boulier, J. F., J. Touma, and M. Vauclin : "Flux-Concentration Relation-Based Solution of Constant -Flux Infiltration Equation : I. Infiltration into Nonuniform Initial Moisture Profiles", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 245-251, 1984.
- 2) Bras, R. L. : "Flow in unsaturated porous media", *Hydrology An Introduction to Hydrologic Science*, 350-388, 1990.
- 3) Brooks, R. H., and A. T. Corey, M. ASCE : "Properties of porous media affecting fluid flow", *Journal of the irrigation and drainage division proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 61-88, 1966.
- 4) van Genuchten, M. T., and D. R. Nielsen : "On Describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils", *Ann. Geophys.*, 3(5), 615-628, 1985.
- 5) Zhao R.-J. : "The Xinanjiang model applied in China", *J. Hydrol.*, 135, 371-381, 1992.
- 6) 浅沼 順, 虫明 功臣, 沖 大幹, 小池 雅洋, 弘中 貞之, 吉永 貴行 : "裸地面蒸発に関する熱収支・水収支同時観測(I)", 第 3 回陸域水循環ワークショップ予稿集, 1990.
- 7) 半沢 倫子 : "レーダ雨量計データを用いた洪水流出予測手法の開発に関する研究", 長岡技術科学大学修士論文, 2001.