

流域土壌パラメータを反映可能な流量流積関係式の開発と分布型流出モデルへの適用
Development of a Storage-Discharge Relationship to Reflect Soil Parameters
and its Application to a Distributed Runoff Model

○菅原快斗・佐山敬洋

○Yoshito SUGAWARA, Takahiro SAYAMA

We developed a new storage-discharge relationship that can consider realistic soil parameters to obtain experiments and observations. It is consisted of Brooks Corey water retention curve and hydraulic conductivity function based on Mualem's theory, and derived to assume vertical equilibrium distribution of pressure head. We applied it to a distributed runoff model, and simulated based on sandy loam soil parameters of Hydrus-1D. In some basins, mean of Nash Sutcliffe coefficient in 7 events were over 0.8. However, peak values of simulation were trend to overestimate in some basins that mean of Nash Sutcliffe coefficient in 7 events were under 0.7. (99 words).

1. 背景

日本の森林流域においては、基岩上に発生する側方流が流出の主たる成分であると考えられてきた。それに伴い、側方流の流量流積関係をダルシー則で表現し、連続式と連立することで流出を追跡するという手法が広く用いられている。また、降雨イベント初期における流域への貯留や低水時の流出を表現するために、不飽和の効果を考慮した流量流積関係式も提案されている¹⁾。上記の流量流積関係式は、不飽和ダルシー則をもとに導出されているが、どのように不飽和流れが生じているのかについては物理的に述べられていない。加えて、水分保持のパラメータを含んでいないため、実験等から得られる現実の土壌パラメータをそのまま反映できないという問題もある。一方、Kong et al. (2016)は、鉛直方向の圧力水頭分布を平衡分布であると仮定することで、飽和帯の上方に発生する不飽和側方流を考慮した流量流積関係式を提案している²⁾。水分保持曲線には修正 Van Genuchten モデルを用い、不飽和透水係数は水分保持曲線と同様の関数系であると仮定して導出を行っている。これにより、不飽和流れの物理的な機構が明確であり、水分保持のパラメータを考慮できるようになっている。ただし、水分保持曲線から不飽和透水係数を導出しているわけではないので、パラメータ数は増加しており、Mualem et al. (1976)のような物理的な不飽和透水係数の導出³⁾は行われていない。そこで本研究では、水分保持曲線に Brooks Corey 式を用いることで、

Mualem の理論から得られる不飽和透水係数から流量流積関係式を導出する。また、得られた流量流積関係式を分布型流出モデルに適用し、その結果を分析することを目的とする。

2. 手法

Brooks Corey の水分保持曲線及び、そこから Mualem の理論を用いて導出される不飽和透水係数は次式で表される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_e}{\psi}\right)^\lambda & (\psi < \psi_e) \\ 1 & (\psi \geq \psi_e) \end{cases}$$

$$K = k_s \cdot S_e^n \quad \left(n = 2 + l + \frac{2}{\lambda}\right)$$

S_e :有効飽和度, θ :体積含水率, θ_s :飽和体積含水率, θ_r :残留体積含水率, ψ :圧力水頭, ψ_e :空気侵入圧, λ :水分保持曲線の形状を決めるパラメータ, K :不飽和透水係数, k_s :飽和透水係数, l :間隙結合係数. 鉛直方向に平衡分布を仮定すると、ダルシー則から直線の圧力水頭分布が得られる。その圧力水頭分布と上記の関係式から鉛直方向の透水係数分布を導出し、積分すると、次式の流量流積関係式が得られる。

$S \leq \theta_r L$ 流れなし

$$\forall S \quad q_x = 0$$

$\theta_r L < S \leq S_{thre}$ 不飽和側方流

$$S = \theta_r L + (\theta_s - \theta_r) \frac{\psi_e}{1 - \lambda} \left\{ \left(\frac{\psi_s}{\psi_e}\right)^{1-\lambda} - \left(\frac{\psi_s - L}{\psi_e}\right)^{1-\lambda} \right\}$$

$$q_u = \frac{k_s i \psi_e}{1 - n\lambda} \left\{ \left(\frac{\psi_s}{\psi_e} \right)^{1-n\lambda} - \left(\frac{\psi_s - L}{\psi_e} \right)^{1-n\lambda} \right\}$$

$S_{thre} < S \leq \theta_s L$ 飽和+不飽和側方流

$$S = \theta_s h + \theta_r (L - h) + (\theta_s - \theta_r) \frac{\psi_e}{1 - \lambda} \left\{ 1 - \left(\frac{h + \psi_e - L}{\psi_e} \right)^{1-\lambda} \right\}$$

$$q_x = k_s i h + \frac{k_s i \psi_e}{1 - \lambda} \left\{ 1 - \left(\frac{h + \psi_e - L}{\psi_e} \right)^{1-\lambda} \right\}$$

$\theta_s L < S$ 表面流

$$S = \theta_s L + (h - L)$$

$$q_x = k_s i L + \frac{\sqrt{i}}{n_s} (h - L)^{5/3} + \frac{nk_s i}{\theta_s - \theta_r} (h - L)$$

ただし、

$$S_{thre} = \theta_r (L - h) + (\theta_s - \theta_r) \frac{\psi_e}{1 - \lambda} \left\{ 1 - \left(\frac{h + \psi_e - L}{\psi_e} \right)^{1-\lambda} \right\}$$

q_x :側方方向の流量、 S :貯留量、 h :水深、 L :土層の長さ、 i :斜面勾配である。

得られた流量流積関係式を分布型流出モデルの RRI モデルに適用し、流出計算を行った。対象流域は関東地方の 10 のダム流域、イベントは各流域で 7 つを対象とした。土壌パラメータは、リチャーズ式を数値的に解いて鉛直不飽和浸透を解析する Hydrus-1D⁴⁾における sandy loam のパラメータを使用した。ただし、飽和透水係数については、そのままでは日本の森林域に適用するには低い値であったため、0.001[m/s]へと変更した。

3. 結果

各流域 7 イベントの Nash 指標の平均値を表 1 に示す。Nash 指標の平均値が 0.85 以上の流域においては、どのイベントでも良好な結果が得られた(図 1)。Nash 指標の平均値が 0.7~0.85 程度の流域については、おおむね Nash 指標が高いものの、一部のイベントでピーク流量を過大・過少評価し、平均値が下がるという傾向が強かった。Nash 指標の平均値が 0.7 以下の流域については、イベント全体でピーク流量が観測より低く、観測と合っていないという傾向が強かった(図 2)。

4. まとめ

本研究では、観測・実験から得られる現実的な土壌パラメータを含む流量流積関係式を導出した。また、得られた流量流積関係式を分布型流出モデルへと適用し、現実的な土壌パラメータを用いた流出計算を行った。一部の流域では、現実的な土壌パラメータを用いた計算でも十分な再現性が得られることが分かった。

表 1. 各流域における 7 イベントの Nash 指標の平均値

流域	矢木沢	奈良俣	相俣	團原	草木	下久保	川俣	浦山	二瀬	宮ヶ瀬
Nash指標	0.42	0.57	0.10	0.85	0.79	0.76	0.81	0.83	0.89	0.59

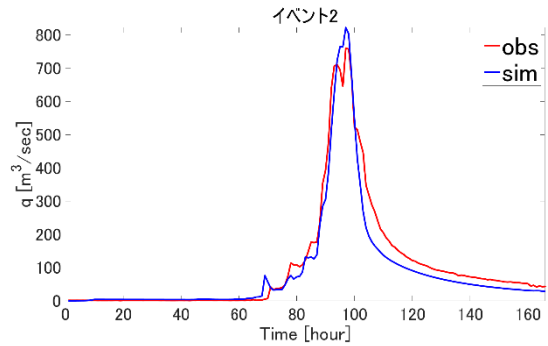


図 1. Nash 指標の高いハイドログラフの例(二瀬ダム)

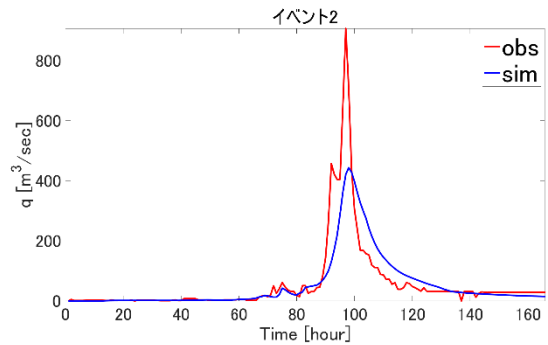


図 2. Nash 指標の低いハイドログラフの例(宮ヶ瀬ダム)

参考文献

- 1)立川康人, 永谷言, and 寶馨. "飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発." 水工学論文集 48 (2004): 7-12.
- 2) Kong, Jun, et al. "Improvement of the hillslope-storage Boussinesq model by considering lateral flow in the unsaturated zone." Water Resources Research 52.4 (2016): 2965-2984.
- 3)Mualem, Yechezkel. "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." Water resources research 12.3 (1976): 513-522.
- 4)Šimůnek, Jirí, Martinus Th van Genuchten, and Miroslav Šejna. "Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes." Vadose Zone Journal 7.2 (2008): 587-600.