

サブグリッド河道および水分保持曲線を導入した新しい RRI モデルの 土壤パラメータに対する感度分析

Sensitivity Analysis to Soil Parameters of a New RRI Model Incorporating Sub-Grid River Channel and Water Retention Curves

○中村 菜々子・菅原 快斗・田中 智大・佐山 敬洋

○Nanako NAKAMURA, Yoshito SUGAWARA, Tomohiro TANAKA, Takahiro SAYAMA

We introduced a sub-grid river channel and a water retention curve into the RRI model. This improvement made it possible to reflect the observed soil physical properties in the model. In this study, the parameter optimization method PEST was applied to the new RRI, and sensitivity analysis to soil parameters was performed to comprehensively investigate the parameters that are highly sensitive to the output. From the perspective of the Nash-Sutcliffe coefficient and the relative error of the peak runoff, it was found that the soil depth distribution and hydraulic conductivity greatly contributed to the improvement of flood prediction accuracy, while the soil parameters related to water retention curve did not contribute much to the flood prediction accuracy.

1. 研究の背景と目的

流出モデルは、降雨流出過程などの物理プロセスを方程式によって表現したものであり、モデルパラメータは流域特性を概念的に表現した値となる場合が多い。そのため、モデル出力を実際の観測値にできるだけ一致させるためにはパラメータ同定が不可欠であり、モデル出力に対して感度の高いパラメータを把握することが重要である。

流出モデルの一つである RRI モデルに対して、著者らはサブグリッド河道と水分保持曲線の導入を主とする改良を行った。これにより、水分保持曲線に関する土壤の物性情報をパラメータとして直接利用できる¹⁾。そこで本研究では、新しい RRI モデルの出力に対して感度の高いパラメータを網羅的に調べるため、RRI モデルにパラメータ最適化手法 PEST を適用して、流出計算への入力条件による再現精度の感度分析を行った。

2. 使用したモデル

流出モデルには、RRI v2¹⁾に水分保持曲線を導入した RRI v2.2.1 を用いた。その特徴は降雨流出、河道追跡、氾濫解析の 3 層の構造を持つこと、Brooks-Corey Mualem の水分保持曲線に基づく流量流積関係式²⁾が導入されていること、サブグリッド河道を持ち全てのグリッドセルにおいて河道追跡を行うことである。

パラメータ最適化アルゴリズムには PEST³⁾を用いた。PEST は、非線形最小二乗法に基づくパラメ

ータ推定手法であり、モデル出力と観測値の差の二乗和を目的関数としている。本研究では、一般化線形モデルを用いた PESTPP-GLM を使用した。

3. 方法

(1) 対象流域と対象降雨

本研究では、三重県の二級河川である安濃川を対象とする。2012 年台風第 17 号、2013 年台風第 18 号、2014 年台風第 11 号の解析雨量をモデルに入力し、ダムへの流入量を解析する。

(2) パラメータ

最適化の対象としたパラメータは、Brooks-Corey Mualem の水分保持曲線²⁾に関するパラメータ(飽和体積含水率 θ_s 、残留体積含水率 θ_r 、水分保持曲線の非線形性を表す λ 、空気侵入圧 ψ_e)、に加えて、飽和透水係数 k_s 、土層厚 L 、初期貯留量 θ_i である。PESTPP-GLM を用いて、3 つの降雨イベントの Nash-Sutcliffe 係数が最も 1 に近づくように、まとめてパラメータを決定した。

また、安濃ダム流域の 1 地点で一定深度毎にサンプリングした試料に対する pF 試験と変水位透水試験の結果から、土壤パラメータのサンプル値を求めた(表-1)。実験データは、防災研究所 松四雄騎教授より提供いただいた。

(3) 計算条件

土壤パラメータの設定について、全てのパラメ

ータを最適化したとき, 透水係数以外の土壤パラメータにサンプル値を入れたとき (サンプル深さ 4 種類), 透水係数を含む土壤パラメータにサンプル値を入れたとき (サンプル深さ 4 種類)の 9 パターン用意した. ただし, サンプル値を入れないパラメータは最適化した. さらに, それぞれの場合に対して, 斜面勾配に応じて流域を 3 分割したうえで, 各区分の土層厚を最適化した場合と, 土層厚を一様と仮定して最適化した場合の 2 種類を考え, 計 18 パターンの計算を行った.

表-1 pF 試験と変水位透水試験から求めた各パラメータのサンプル値

サンプル深さ	20 cm	65 cm	95 cm	125 cm
θs	0.63	0.45	0.49	0.56
θr	0.30	0.27	0.026	0.23
λ	0.26	0.25	0.16	0.53
$\psi e [m]$	-0.011	-0.017	-0.010	-0.015
$k_s [m/s]$	1.90×10^{-5}	2.61×10^{-7}	5.70×10^{-6}	2.69×10^{-5}

4. 結果と考察

計 18 パターンの計算結果に対して求めた Nash-Sutcliffe 係数 (NSE) とピーク流量の相対誤差 (RPD) を図-1 と図-2 に示す. ただし, 横軸の数字はサンプル深さを表し, 青い棒グラフは土層厚を 3 区分に分けて最適化した場合, 赤い棒グラフは土層厚を一様として最適化した場合を表す. 図-1 と図-2 を見ると, 土層厚を 3 区分に分けたとき, 土層厚を一様とするよりも, NSE が 1 に近く, RPD は 0 に近づく. ここで, 透水係数以外の土壤パラメータを入れた場合の 2014 年台風の計算結果を図-3 と図-4 に示す. 図-3 と図-4 を比較しても, 土層厚を区分することによって, ハイドログラフの形状を精度良く表現できることがわかる. 以上の結果から, 土層厚分布はハイドログラフの再現性に大きく寄与することが明らかになった.

次に, 図-1 と図-2 を見ると, サンプル深さ 95cm の透水係数 $k_s = 5.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ では, 土層厚を区分することで精度が改善するが, サンプル深さ 65cm の透水係数 $k_s = 2.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ では, ハイドログラフの再現性は土層厚の区分の有無によらず, 18 パターンの中で低い値となる. 透水係数もハイドログラフの再現性に大きく寄与するといえる.

さらに, 図-3 と図-4 を比較すると, 土層厚を 3 区分し, 透水係数, 初期貯留量とともに最適化す

ることによって, 透水係数以外の土壤パラメータを変更した影響を補完できることがわかる. 透水係数以外の土壤パラメータはそれほどハイドログラフの再現性に寄与していないと考えられる.

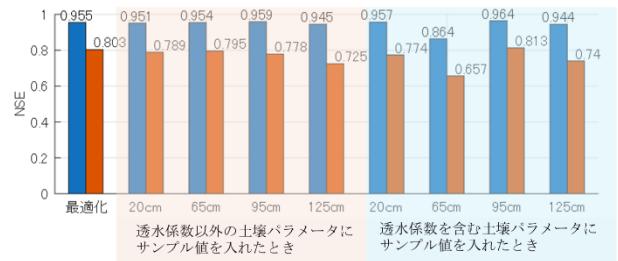


図-1 Nash-Sutcliffe 係数

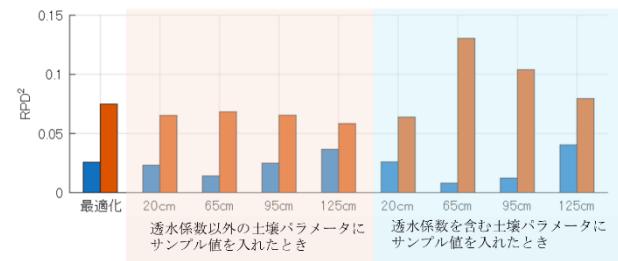


図-2 ピーク流量の相対誤差

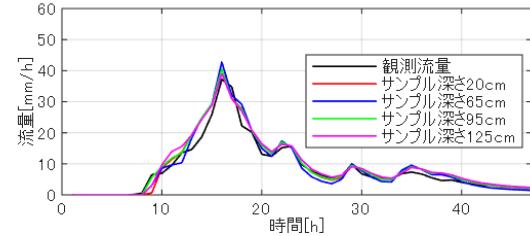


図-3 透水係数以外の土壤パラメータを入れた場合
(土層厚を 3 区分に分けて最適化)

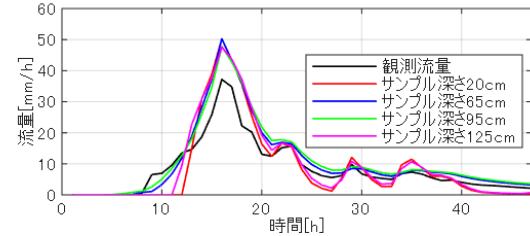


図-4 透水係数以外の土壤パラメータを入れた場合
(土層厚を一様として最適化)

REFERENCES

- 1) 中村菜々子: 中小河川における洪水予測改善に向けた RRI モデルへの サブグリッド河道の導入と精度検証, 京都大学工学部卒業論文, 2025.
- 2) 菅原快斗, 佐山敬洋. 水分保持曲線を反映する流量流積関係式の導出と分布型流出モデルへの適用. 土木学会論文集 B1(水工学). 2021, Vol. 77, No. 1, 124-135.
- 3) Doherty, J.: PEST: a unique computer program for model-independent parameter optimisation. Proceedings of the Water Down Under 1994 Conference (IE, Australia), pp. 551-554. 1994.