

## 第II部門 降雨流出過程のモデル化に内在する不確実性の分析

京都大学工学部 学生会員 ○加藤嵩史 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 京都大学大学院地球環境学堂 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 序論 様々な水文予測に利用されている降雨流出モデルには、少なからず不確実性が内在している。降雨流出モデルでは各出水に対してパラメータ同定を行うことにより出水を再現できるが、出水を再現できるパラメータの組合せはただ一つに決まるのではなく、異なるパラメータの組合せを用いても出水を再現できる“等結果性”(Equifinality)という現象がある。同定によって得られるパラメータの値が出水毎に異なるという不確実性もある。水文モデルで利用されるパラメータはモデルの構造によって決まるものであり、このような不確実性はモデル化そのものにおける不確実性であるといえる。本研究では降雨流出モデルのうち、RRIモデル<sup>1)</sup>を用いた淀川水系桂川の日吉ダム流域での7つの出水を対象とした再現計算を通して、等結果性に起因する単一出水におけるモデルの不確実性、ならびに、複数出水間でのモデルの不確実性についての分析を行った。

## 2 不確実性分析手法

2.1 分析の枠組み 単一出水におけるモデルの不確実性として各出水それぞれについて再現性の高い流量計算結果を示すパラメータ値を分析し、等結果性に起因するモデルの不確実性を分析した。複数出水間でのモデルの不確実性として対象地域での複数の出水間でのパラメータ値を、雨量・流量の観測データに含まれる観測誤差を考慮し、パラメータに幅をもたせた上で比較した。

2.2 対象とする降雨流出モデル 本研究では(1)式の連続式と(2)式の流量流積関係式<sup>2)</sup>に基づく降雨流出モデルを対象とした。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - p \quad (1)$$

ここで、 $q_x, q_y$ :  $x, y$ 方向の単位幅流量、 $h$ : 水深、 $r$ : 降雨強度、 $p$ : 表土層からの浸透強度である。ただし本研

表1 パラメータ探索範囲

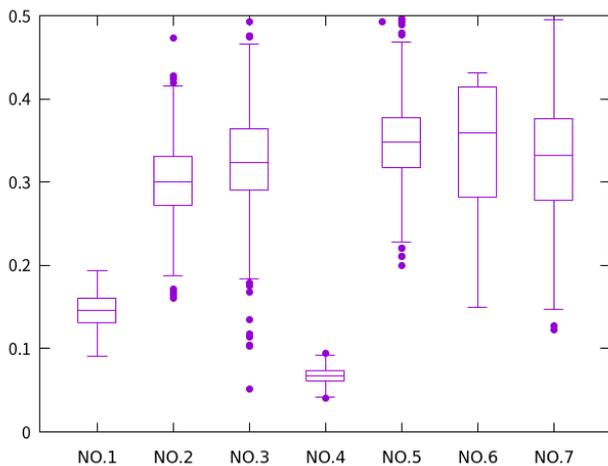
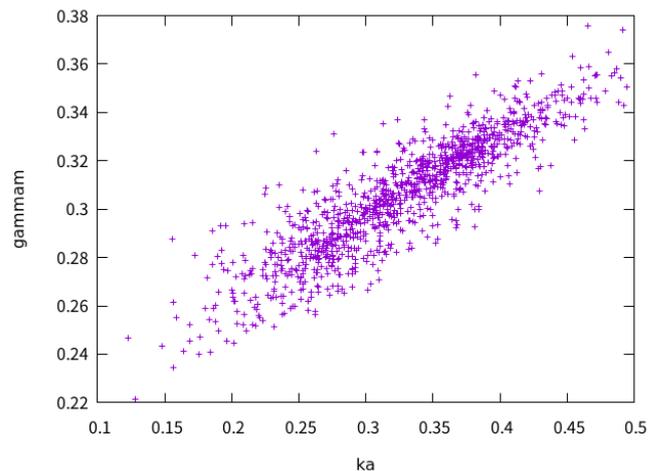
パラメータ	下限値	上限値	初期値
$n$ ( $m^{-1/3}s$ )	0.03	1.0	0.3
$\gamma_p$	0.0	0.4	0.2
$k_a$ (m/s)	0.001	0.5	0.1
$\gamma_m$	0.0	0.4	0.05
$\beta$	1.0	10.0	4.0

究では  $p$  をゼロに固定している。

$$q_x = \begin{cases} v_c d_c \left(\frac{h}{d_c}\right)^\beta & (0 \leq h < d_c) \\ v_c d_c + a(h - d_c) & (d_c \leq h < d) \\ v_c d_c + a(h - d_c) + \alpha(h - d)^m & (d \leq h) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $v_c$ : マトリクス部が飽和した時の流速 ( $v_c = k_c i$ ,  $k_c$ : マトリクス部の飽和透水係数),  $d_c$ : マトリクス部の最大含水量に対応する水深高さ ( $d_c = \gamma_c D$ ,  $\gamma_c$ : マトリクス部の最大含水率,  $D$ : 層厚)  $\beta$ : マトリクス部の含水率低下に伴う透水係数の減少程度の大きさを表すパラメータ,  $a$ : 大空隙部の流速 ( $a = k_s i$ ,  $k_s$ : 飽和透水係数),  $d$ : 土層の最大含水量に対応する水深高さ ( $d = \gamma D$ ,  $\gamma$ : 空隙率),  $\alpha$ : パラメータ ( $\alpha = \sqrt{i}/n$ ,  $i$ : 勾配,  $n$ : 粗度係数),  $m$ : 定数 (=5/3) である。ここでは  $x$  方向のみ記載したが、 $y$  方向も同様の式となる。

2.3 用いるモデルパラメータ同定手法 パラメータ同定には RMSE を目的関数とした SCE-UA 法<sup>3)</sup>を用いた。気象庁解析雨量を入力降雨とし、日吉ダムで観測された流入量データを RMSE 算出の基準値とした。同定を行うパラメータは、マニングの粗度係数  $n$ 、土層の大空隙部の空隙率  $\gamma_p$ 、大空隙部の実質の透水係数  $k_a$ 、マトリクス部の空隙率  $\gamma_m$ 、マトリクス部の含水率低下に伴う透水係数の減少程度の大きさを表すパラメータ  $\beta$  とした。また  $\gamma_a = \gamma_p + \gamma_m$ 、 $k = k_a \gamma_p$  により、土層全体の空隙率  $\gamma_a$ 、大空隙部の透水係数  $k$  を別途求めた。RRIモデルによる流量計算を2500回繰り返し、表1の範囲で最適なパラメータセットを探索した。

図1 箱ひげ図の例： $k_a$ 図2  $k_a$  と  $\gamma_m$  の相関関係 (出水7)

**3 単一出水におけるモデル不確実性の分析** 同定計算の結果、RMSEの値が最小に近い値をとるパラメータセットが複数存在し、それらを次のような基準に基づいて取り出し各パラメータの値のばらつきを検証した。RMSEが最小のパラメータセットと各パラメータセットのRMSEの差を $\Delta Q$ 、出水期間(約1週間)の流量の平均値を $Q_m$ とし、(3)式を満たすパラメータセットを取り出した。

$$\frac{\Delta Q}{Q_m} < 1.0\% \quad (3)$$

図1のような箱ひげ図を各パラメータについて作成し、ばらつきを検証した。斜面の粗度係数 $n$ 、マトリクス部の空隙率 $\gamma_m$ 、土層全体の空隙率 $\gamma_a$ 、マトリクス部の含水率低下に伴う透水係数の減少程度の大きさを表すパラメータ $\beta$ のばらつきは小さく、大空隙部の実質の透水係数 $k_a$ 、大空隙部の空隙率 $\gamma_p$ 、大空隙部の透水係数 $k$ についてはばらつきがみられた。次にパラメータの変動係数に着目し、比較的大きな変動係数の値を示した $k_a$ について他のパラメータとの相関関係を調べたところ、図2のように $\gamma_m$ との強い正の相関関係がみられた。 $k_a$ 、 $\gamma_m$ の値がともに大きなパラメータセット、値がともに小さなパラメータセットとの間で等結果性による不確実性が存在することがわかった。

**4 複数出水に基づくモデル不確実性の分析** 雨量・流量の観測データをそれぞれ5%ずつ増減させたデータを用いた9パターンのパラメータ同定を各出水に対して行い、各パラメータのばらつきを検証した。 $\gamma_m$ に関してはばらつきが小さかったが、その他のパラメータについてはばらつきがみられた。 $\beta$ については変動

係数が小さかったものの、パラメータ探索範囲の上限値付近の値をとるパラメータセットが多数みられたため、ばらつきが小さいとは言い切れない。複数出水間で比較した場合にはマトリクス部に関するモデル化には不確実性が小さく、大空隙部や地表面部に関するモデル化には不確実性があるといえる。

**5 結論** 単一出水におけるモデルの不確実性として、大空隙部の実質の透水係数 $k_a$ とマトリクス部の空隙率 $\gamma_m$ の値の大小関係による等結果性が確認された。このような不確実性を小さくするには土壌特性の計測などパラメータ同定以外の方法を用いて $k_a$ や $\gamma_m$ の値を決定するなど、パラメータ同定を補完する形でパラメータ決定をすることが必要であるといえる。また複数出水間でのモデルの不確実性として、マトリクス部に関するモデル化には不確実性が小さく、大空隙部や地表面部に関するモデル化には不確実性があるといえる。

#### 参考文献

- 1) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., and Fukami, K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, Hydrological Sciences Journal, 57(2), pp.298-312, 2012.
- 2) 立川康人, 永谷言, 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, pp.7-12, 2004.
- 3) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, Vol.158, pp.265-284, 1994.