

セル分布型流出解析モデルのパラメータ最適化と山国川耶馬溪ダム流域への適用

九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲 九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山 壽一郎
九州工業大学工学部 学生会員 ○山本 峻平 九州工業大学工学部 学生会員 松本 拓磨

1. はじめに

近年、「ダムに頼らない治水対策」への転換など、「流域と一体となった治水対策」が重要になっている。その検討には、降雨外力から治水施設によって変化する流出プロセスやその結果によって生じる洪水プロセスの評価が不可欠である。本研究は、以上のような背景を踏まえ、降雨外力から流域特性を踏まえた上で流出プロセスが予測可能なセル分布型流出解析モデルのパラメータ最適化法について検討したものである。

2. モデルと最適化手法の概要

(1) セル分布型流出モデルの概要

セル分布型流出解析モデルは、メッシュ分割した流域を部分流域(セル)と考え、セルに降った雨を勾配最大方向である落水線方向に追跡することで、河道への流入流量を予測するものである。このモデルの特徴はセル毎に土地利用等を考慮することができ、流域の地形特徴や降雨などの空間的な分布を直接モデルに反映させることが可能な点である。同モデルのモデルパラメータは、流域の土地利用に応じた等価粗度係数 N 、重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比 β 、重力水が卓越する A 層内の透水係数 k_a 、マトリックス部の最大保水量を水深で表した値 d_c 、重力水を含めて表層土中に保水しうる最大水深 d_s と河道の粗度係数 n である。なお、 β 、 k_a 、 d_c 、 d_s は土地利用が森林の場合についてのみ考慮した。

(2) 最適化手法の概要

最適化には、実験計画法、応答曲面法を用いた。実験計画法は、モデルパラメータが目的関数に及ぼす影響を把握するための効率的な解析条件を設定する方法であり、応答曲面法は、モデルパラメータと目的関数との関係を応答曲面と呼ばれる 2 次の多項式で求め、目的関数を最小とする最適化パラメータを推定する方法である。最適化の概要は図-1 に示す通りであり、その手順は (1) 実験計画法による解析条件の設定、(2) 解析条件によるセル分布型流出解析の実行と目的関数の算定、(3) 解析条件のモデルパラメータと目的関数に基づく応答曲面の作成、(4) 応答曲面の最小値の探索である。最小値の探索は、まず、初期値の影響が小さい Nelder-mead 法で最小値を求め、次に、この最小値を初期値として BFGS 法を用いることで行った。ここでは、目的関数を観測値と計算結果の平均 2 乗誤差、最適化を行うモデルパラメータを土地利用別の N と β 、 k_a 、 d_c 、 d_s の 10 変数とした。

3. 最適化手法の妥当性の検討

はじめに、図-2 に示す仮想的な流域と河道を対象に、表-1 のモデルパラメータで得られた解析結果を観測値として、本手法の妥当性について検討した。解析対象流域の流域面積は 54.1km^2 で、流域の地形と土地利用は図-2 に示す通りである。降雨外力には図-2 に示す後方集中型の降雨を与えた。流量観測地点は河道の最下流端である。実験計画法により、表-2 に示すようなパラメータの範囲から、76 通りの解析条件を設定した。

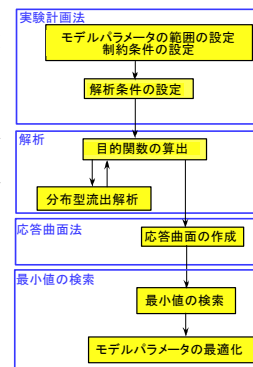


図-1 最適化の手順

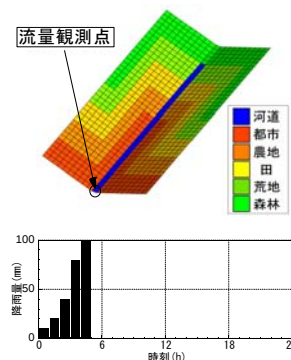


図-2 仮想流域と降雨ハイトグラフ

表-1 観測値を求めたパラメータ (仮想流域)

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.60	0.65	0.50	0.05	4.00
田	2.00				
農地	0.30				
都市	0.055	0.00	0.00		
荒地	0.30				
水域	0.0325				

表-2 パラメータの設定範囲(仮想流域)

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.4~0.8	0~1	0~1	$1.0 \times 10^{-3} \sim 0.1$	2~6
田	1~3				
農地	0.2~0.4				
都市	0.01~0.1	0.00	0.00		
荒地	0.2~0.4				
水域	0.01~0.055				

表-3 最適パラメータ値(仮想流域)

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.59	0.53	0.44	0.05	4.07
田	2.11				
農地	0.30				
都市	0.054	0.00	0.00		
荒地	0.32				
水域	0.0335				

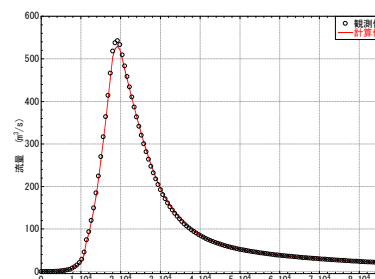


図-3 流量ハイドログラフの比較

表-3 は、本最適化法から得られた最適パラメータ値である。なお、本応答曲面は、その相関係数および危険率はそれぞれ 0.96 および 0.004 であり、統計的に有意であることが確認されている。表-1 と 3 との比較から、(1) 表面流に関するモデルパラメータで誤差が大きいものは荒地の粗度であり、その相対誤差は 6.44% であること、(2) 土壌中の流れに関するモデルパラメータで誤差が大きいものは d_s であり、その相対誤差は 18.9% であること、(3) 以上から、本最適化法は、土壌中の流れに関するモデルパラメータについては再現性に改善が必要であるが、地表面流に関するモデルパラメータについては十分な精度で予測できること、などが確認できる。図-3 は、観測値と最適パラメータ値を用いた流量ハイドログラフの解析結果との比較を行なったものである。これより、本解析結果は、ピーク流量には約 2.5% の誤差が生じるが、増水時、減水時の流量、波形ともに再現性が高いことが確認できる。このように、本最適化法は、十分な精度で流量ハイドログラフを予測できることから妥当であることがわかる。ただし、ピーク流量の誤差が生じていることから、この点については、目的関数の精度や最小値の探索法等の改善も含め、今後改善したいと考えている。

4. 山国川耶馬溪ダム流域への適用

最後に、本分布型流出解析モデルおよび最適化法を、山国川の耶馬溪ダム流域へ適用し、実流域への適用性について検討した。耶馬溪ダムは、図-4 に示すように、山国川と山移川の合流点上流に位置しており、その流域は図-4 中の赤の線で囲まれる領域である。流域面積は 90km² であり、その土地利用は森林が約 90%、田が約 1%、農地が約 1%、都市が約 0.2%、荒地が約 1%、水域が約 5% である。

まず、図-5 に示す 2012 年 7 月 2 日 23 時から 2012 年 7 月 5 日 11 時の実績降雨(降雨 1)を外力として、ダムへの流入流量の観測値に基づき耶馬溪ダム流域のモデルパラメータを推定した。次に、推定したパラメータを用い、図-5 に示す 2012 年 7 月 13 日 0 時から 2012 年 7 月 14 日 23 時の実績降雨(降雨 2)を外力として、本モデルと最適化法の妥当性について検討した。推定した最適パラメータ値は表-4 に示す通りである。図-7 は、降雨 1 および 2 のダムへの流入流量ハイドログラフの観測値と最適パラメータ値を用いた解析結果との比較を行なったものである。これより、いずれの降雨外力についても、(1) 複数の山を有する流量ハイドログラフの波形を定性的には再現できること、(2) 一方で、定量的には増水を開始する時間のずれや減水時の波形に誤差が生じること、(3) ピーク流量には、最大で約 5% の誤差があること、などが確認できる。これは、上述したように、本最適化法では、土壌中の流れに関するモデルパラメータの推定精度に課題が残るためだと考えられる。

次に、推定したパラメータを用い、図-5 に示す 2012 年 7 月 13 日 0 時から 2012 年 7 月 14 日 23 時の実績降雨(降雨 2)を外力として、本モデルと最適化法の妥当性について検討した。推定した最適パラメータ値は表-4 に示す通りである。図-7 は、降雨 1 および 2 のダムへの流入流量ハイドログラフの観測値と最適パラメータ値を用いた解析結果との比較を行なったものである。これより、いずれの降雨外力についても、(1) 複数の山を有する流量ハイドログラフの波形を定性的には再現できること、(2) 一方で、定量的には増水を開始する時間のずれや減水時の波形に誤差が生じること、(3) ピーク流量には、最大で約 5% の誤差があること、などが確認できる。これは、上述したように、本最適化法では、土壌中の流れに関するモデルパラメータの推定精度に課題が残るためだと考えられる。

5. おわりに

本研究から、本分布型流出解析モデルと最適化手法を用いることで、流量ハイドログラフをある程度の精度で再現可能であることが確認された。ただし、土層厚の予測精度には課題が残るため、減水時の波形等の再現性については課題が残った。この改善方法については今後の課題である。

参考文献：1) 立川康人ら：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係の開発，水工学論文集，第 48 巻，pp.7-12，2004.
2) 佐藤紘志ら，土と基礎-実用数式・図表の解説(土質工学会)，1987.，3) Common MP，水文水質データ (<http://framework.nilim.go.jp/>)，2014.

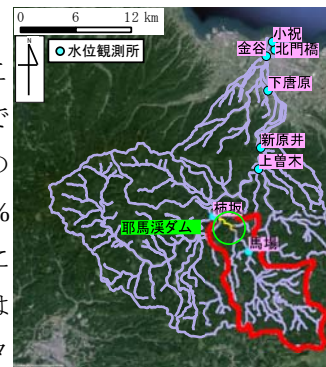


図-4 耶馬溪ダム流域

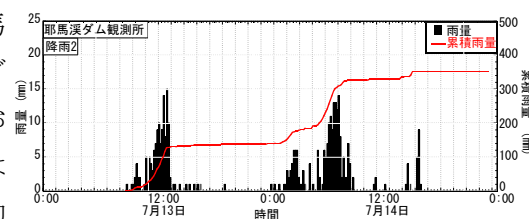
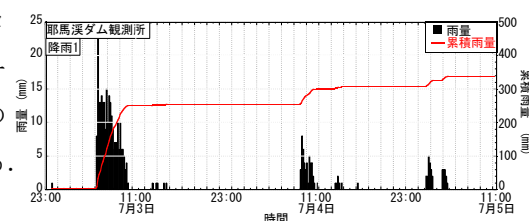


図-5 降雨ハイトグラフ

表-4 最適パラメータ値 (耶馬溪ダム流域)

	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$d_s(m)$	$d_r(m)$	$k_s(m/s)$	β
森林	0.40	0.04	0.01	0.02	5.89
田	2.22				
農地	0.37				
都市	0.071	0.00	0.00		
荒地	0.34				
水域	0.0426				

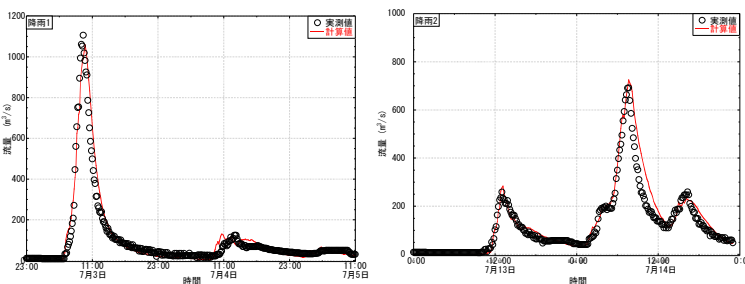


図-6 耶馬溪ダムへの流入流量ハイドログラフの比較