

実験計画法と応答曲面を用いた 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータ最適化法

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 石川知弘 九州工業大学大学院 学生会員 野村心平

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、降雨外力から流域と河道特性を踏まえた上で流出・洪水プロセスの予測が可能な分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータの最適化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) 分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの概要

分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルは、降雨を入力条件として河道での水位ハイドログラフ等を予測できるモデルであり、流域の雨水の挙動を予測する「セル分布型流出解析モデル」と洪水追跡を行う「平面2次元洪水追跡モデル」とで構成される。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

分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの特徴を踏まえ、観測所が多くかつ精度が高い水位ハイドログラフに基づきモデルパラメータの最適化を行う。最適化手法には、実験計画法と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) 解析条件による分布型流出・平面2次元洪水追跡の実行と誤差の算定、(3) 解析結果に基づく応答曲面の作成と目的関数を最小とするパラメータの推定である。ここでは、目的関数を観測水位と解析水位を用いたカイ2乗基準とし、最適化を行うモデルパラメータは、5つの土地利用別の N 、 β 、 k_a 、 d_c 、 d_s の9つとした。なお、河道の粗度係数は最適化を行うパラメータには含まれていない。これは、河道の縦横断面形状、平面形状および非定常性に起因して起こる貯留現象を取り扱うことができる平面2次元モデルであれば、樹木繁茂状況や河床材料や状態に応じた適切なパラメータ値を設定することで、水位ハイドログラフを予測できるためである。

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、仮定したパラメータ値より得られる解析結果を観測水位として、本手法の最適パラメータ値の妥当性について検討した。解析対象流域の流域面積は 5.2km^2 で流域の地形と土

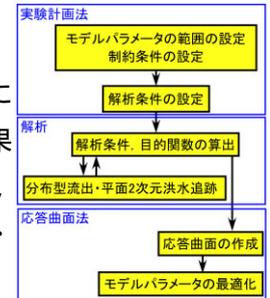


図-1 最適化の手順

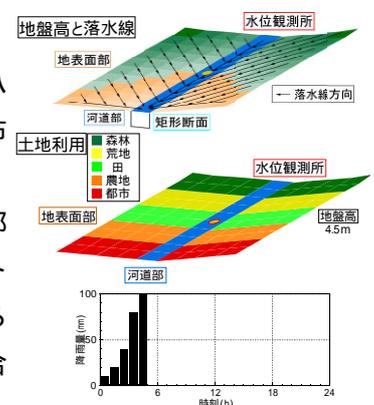


図-2 仮想流域と降雨ハイトグラフ

表-1 観測結果としたパラメータ

$N(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$	$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
森林	0.60	0.20	0.15	5.00
荒地	0.30			
田	2.0			
農地	0.30	0.00	0.00	
都市	0.055			
水域	0.035			

表-2 パラメータの設定範囲

$N(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$	$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
森林	0.4-0.8	0-0.3	0-0.3	$3.5 \times 10^{-5} - 0.03$
荒地	0.2-0.4			4-6
田	1-3			
農地	0.2-0.4	0.00	0.00	
都市	0.01-0.1			
水域	0.035			

表-3 最適パラメータ値(仮想流域)

$N(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$	$d_s(\text{m})$	$d_c(\text{m})$	$k_a(\text{m/s})$	β
森林	0.62	0.23	0.12	5.11
荒地	0.30			
田	1.87			
農地	0.28	0.00	0.00	
都市	0.053			
水域	0.035			

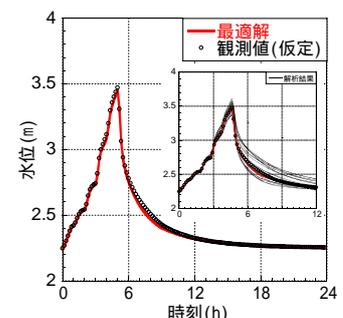


図-3 水位ハイドログラフの比較

地利用は図-2に示す通りである。河道は矩形断面で延長2300m、河幅25m、勾配を9/4600、粗度係数 $n=0.035$ とした。降雨外力には図-2に示す後方集中型の降雨を与えた。水位観測地点は河道中央で、観測値とした解析結果のモデルパラメータは表-1とした。実験計画法により、表-2に示す範囲のパラメータから72通りの解析条件を設定した。この解析条件で分布型流出解析・平面2次元洪水追跡を行い、応答曲面を算定した。表-3は、応答曲面より得られる最適パラメータ値を示したものである。これより、マトリックス部の層厚 d_c 、全空隙に相当する層厚 d_s で15~20%程度の誤差があるが、本最適化手法は比較的良好な精度でモデルパラメータを再現できることがわかる。図-3は、最適パラメータにより求めた水位ハイドログラフの解析結果を示したものである。図中には他のパラメータを用いた結果も示している。これより、減水の部分で若干の誤差があるが、増水時、ピーク時の水位とともに再現性が高いことが確認できる。このように、最適パラメータ値を用いることで十分な精度で水位ハイドログラフを予測可能であることから、本最適化手法は妥当であることがわかる。ただし、減水時に誤差があることから土層水の流れに関するパラメータには検討の余地が残る。この点については、今後検討したいと考えている。

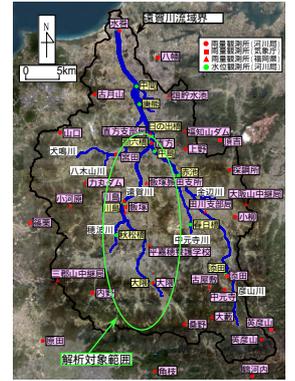


図-4 遠賀川流域の概要と解析対象区間

4. 遠賀川流域への適用

遠賀川は幹川流路延長61km、流域面積1,026km²の一級河川であり、流域の土地利用は、森林が約52%、水田や果樹園等の農地が約19%、宅地等市街地が約18%、荒地が約6%を占める。図-4に遠賀川流域の航空写真と雨量・水位観測所を示す。

表-4 最適パラメータ値(遠賀川)

	$N(m^{-1/3}, s)$	$d_s(m)$	$d_c(m)$	$k_a(m/s)$	β
森林	0.63	0.133	0.127	0.015	5.09
荒地	0.30				
田	2.53				
農地	0.29	0.00	0.00		
都市	0.055				
水域	0.035				

平面2次元洪水追跡の解析対象区間は、図-4に示す勘六橋観測所より上流とした。降雨には2003年(パターンA)、2009年(パターンB)、2010年(パターンC)の3つの降雨パターンを用い、パターンAの降雨でパラメータの最適化を行った後、そのパラメータ値を用いてパターンBとCでの解析を行った。各豪雨の降雨分布を図-5に示す。下流端水位は勘六橋観測所の実測水位を境界条件とした。実験計画法により72通りの解析条件を設定し、分布型流出・平面2次元洪水追跡の解析結果に基づき応答曲面を求めた。表-4に応答曲面より得られるパラメータ値を示す。図-6は、2003、2009、2010年豪雨について、最適パラメータ値を用いた水位ハイドログラフの解析結果を示したものである。これより、(1) いずれの観測所についても、若干のずれがあるものの、水位ハイドログラフの波形やピーク値などを再現できること、(2) 特に、パターンBとCでは2山の波形を持つ複雑な水位ハイドログラフとなるが、これらも再現していること、などがわかる。このように、本最適化手法は、モデルパラメータを十分な精度で推定できることがわかる。しかしながら、(3) パターンAでは減水が早いこと、(4) パターンB、Cでは2波目のピークが早く減水も早いことなどがわかる。これは、仮想領域での検討結果を踏まえると、本最適化手法では土層水のパラメータの推定が十分ではなく土層厚などのパラメータが現実とは異なる可能性があるためと考えられる。

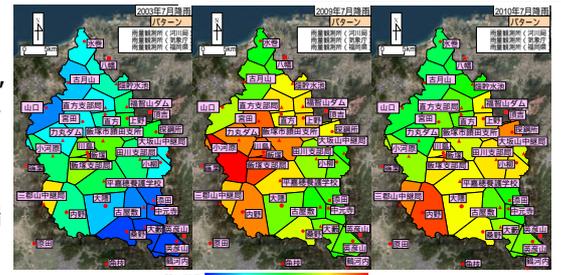


図-5 降雨量の空間分布

5. おわりに

本研究から、実験計画法と応答曲面法による分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルの最適パラメータの推定が可能となった。ただし、森林の貯水効果等の取り扱いについては課題が残るため、実験計画法による解析条件の追加など、その改善方法については今後の課題としたい。

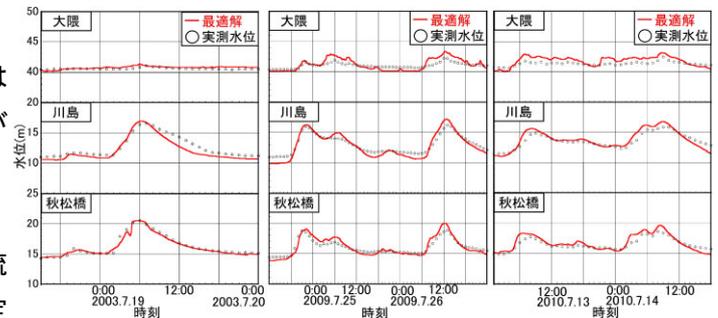


図-6 各観測所での水位ハイドログラフの比較
(左: パターンA, 中: パターンB, 右: パターンC)

謝辞: 遠賀川河川事務所の関係各位にはデータの提供など多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

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)