

## ベイズ最適化を用いたセル分布型流出解析モデルのパラメータ最適化

九州工業大学大学院 学生会員 林 泰史      九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲

### 1. はじめに

近年、気候変動により、豪雨災害が頻発化・激甚化している。その対応として、ハード・ソフト対策や治水計画の見直し、流域治水への転換が進められている。これらを検討する上では、流域での降雨量、流域での貯留量、流域から河道への流出流量を把握することが不可欠である。これらを評価するためには、土層厚や粗度係数等の流域での流れに影響を与えるパラメータを観測値から推定する必要がある。近年、その推定方法として、機械学習の分野で注目されているベイズ最適化がある。同手法は、目的関数の応答曲面を作成・更新し、誤差を推定しながら最適化を行う手法であるため、少ない計算回数で最適なパラメータを推定できることが期待される。本研究は、以上のような背景から、仮想的な流域と河道を対象に、ベイズ最適化を用いたセル分布型流出解析のパラメータ最適化を実施したものである。

### 2. セル分布型流出解析モデルと最適化手法の概要

#### (1) セル分布型流出解析モデルの概要

本研究では、セル分布型流出解析モデルのパラメータ最適化を実施した。セル分布型流出モデルは、矩形格子で標高や土地利用などの流域特性を表現し、kinematic wave法により流域の雨水の挙動の予測を行うモデルである。同モデルのモデルパラメータは、土地利用ごとの粗度係数  $N$ 、重力水が卓越する A 層内の飽和透水係数  $k_a$ 、不飽和水部の水深  $d_c$ 、水が表層土中に存在しうる最大の水深  $d_s$ 、重力水部と不飽和水部の透水係数比  $\beta$  である。また、 $d_s > d_c$  となる。なお、今回は河道も同モデルで取り扱っている。

#### (2) 最適化手法の概要

ベイズ最適化は、目的関数の最大・最小値を求める手法である。最適化の概要は図-1 に示すとおりであり、その手順は、(1)目的関数をガウス過程などの統計モデルにより表す、(2)その統計モデルより得られる目的関数の予測値の平均値、分散から獲得関数と呼ばれる次の点を探すための関数を評価し、その値が最大値となる点を次の計算点として算出する、(3)求められた点で解析を実行し、目的関数を求め、それらに基づき統計モデルを更新する。獲得関数は、目的関数の予測値の平均値、分散を基に、既存の最大・最小値を改善する確率の大きさや改善量の期待値を数学的に関数で表したものである。本研究では、改善量の期待値を表す EI(Expected Improvement)を用いた。目的関数には、観測値と計算結果の平均絶対誤差を用いた。最適化の終了条件は、目的関数の評価値の最大・最小値を有意に改善する最小の量として単位量(地表面流量:  $1(m^3/s)$ 、地中流量:  $0.1(m^3/s)$ )を設定し、EI の最大値が単位量の 1%を下回った場合<sup>1)</sup>とした。また、最適

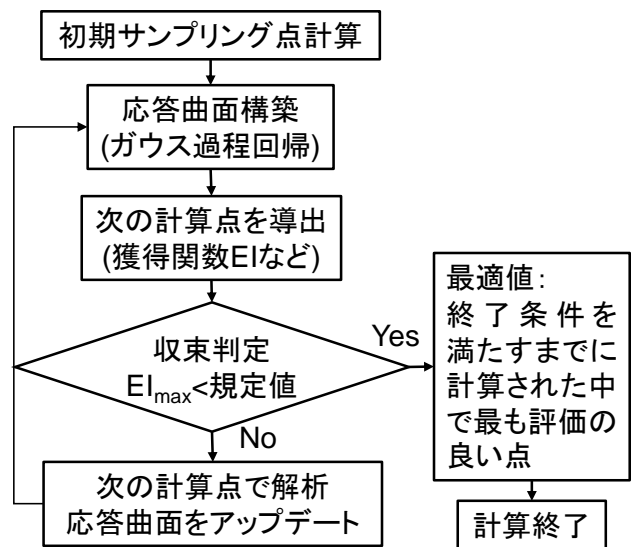


図-1 最適化手法概要

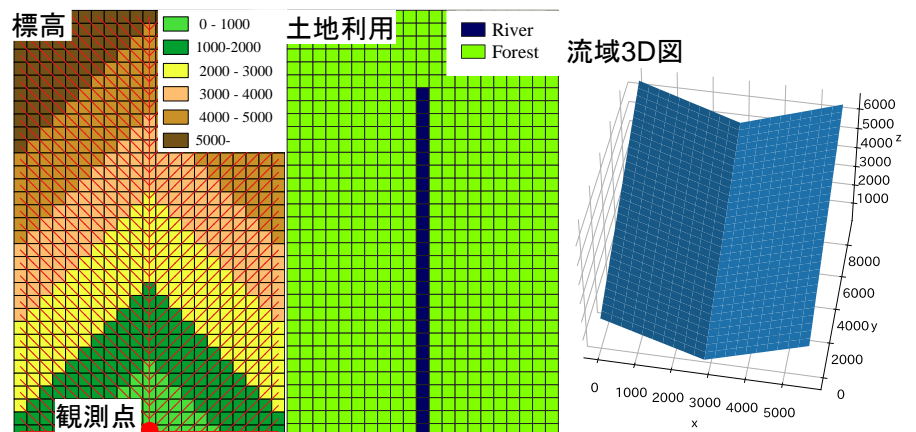


図-2 仮想流域の概要

パラメータ値は終了条件を満たすまでに計算された中で、目的関数の評価が最小となる点とした。

3. 最適化手法の妥当性の検討

本研究では、図-2 に示す仮想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。解析対象流域は流域面積 54.1km<sup>2</sup> で、流域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-3 に示す後方集中型の降雨を与え、観測地点は河道の最下流端とした。モデルパラメータの範囲は表-1

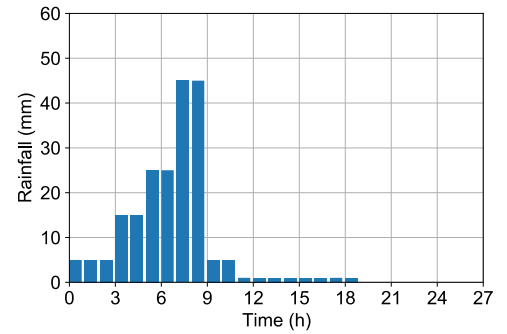


図-3 降雨条件

表-1 パラメータ範囲と観測値を求めたパラメータ

	森林					水域
	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$k_a(m/s)$	$d_c(m)$	$d_s(m)$	$\beta$	$N(m^{-1/3} \cdot s)$
パラメータ範囲	0.4~0.8	$10^{-7} \sim 0.05$	0~0.4	0~0.4	2~6	0.01~0.05
観測値を求めたパラメータ	0.46	0.04	0.052	0.12	4.1	0.033

に示す通りとした。最適化は、土壌と河道の流れを決定するパラメータ( $k_a$ ,  $d_c$ ,  $\beta$ , 河道の粗度係数)と表面流の発生を規定するパラメータ( $d_s$ , 森林の粗度係数)とに分けて実施した<sup>2)</sup>。

表-2 パラメータの比較

	森林					水域
	$N(m^{-1/3} \cdot s)$	$k_a(m/s)$	$d_c(m)$	$d_s(m)$	$\beta$	$N(m^{-1/3} \cdot s)$
観測値を求めたパラメータ	0.46	0.04	0.052	0.12	4.1	0.033
最適パラメータ値	0.488	0.033	0.045	0.118	3.427	0.034
相対誤差	0.060	-0.168	-0.142	-0.021	-0.164	0.033

RUN1 では土壌と河道の流れを決定するパラメータを、RUN2 では表面流の発生を規定するパラメータの最適化を行った。

RUN1, 2, それぞれ、最適パラメータ値での目的関数の値が 0.087, 1.47, 初期計算回数 8, 7 回, 終了条件を満たしたときの計算回数が 122, 98 回, 最適値が得られたときの計算回数が 87, 97 回であった。

表-2 は、観測値を求めたパラメータと本最適化手法から得られた最適パラメータ値、それらの相対誤差を示したものである。この表から、(1)相対誤差が比較的小さかったパラメータは、土地利用ごとの粗度係数、層厚  $d_s$  であること、(2)相対誤差が大きいパラメータは、透水係数、層厚  $d_c$ 、透水係数比  $\beta$  であることが分かる。相対誤差が大きいパラメータは主に、土壌の流れを支配するパラメータであり、単位

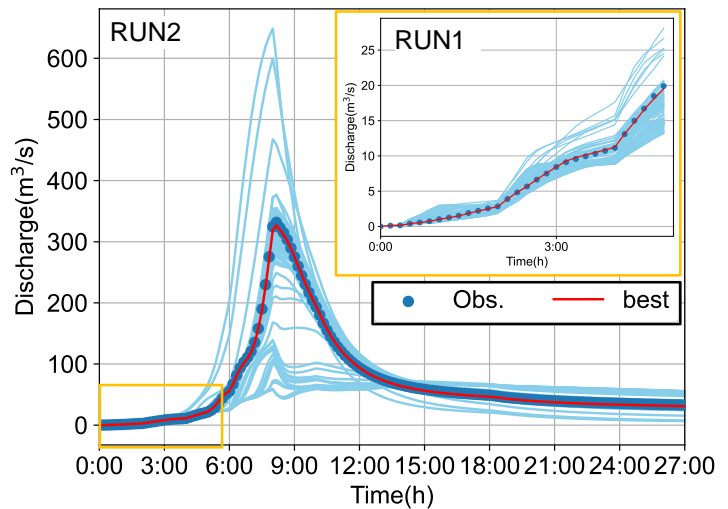


図-4 流量ハイドログラフの比較

量を小さくすると再現精度が高くなったことから、同パラメータが目的関数に与える影響がシビアであり、最適値の探索が困難であったと考えられる。また、図-3 に、観測値と最適パラメータ値より得られた流量ハイドログラフを示す。これより、ピーク流量で相対誤差が-1.45%であるものの、流量波形を概ね再現できていることが分かる。このように、本最適化手法は、土壌のパラメータの評価には課題は残るものの、その他のパラメータと流量ハイドログラフの再現性は高いことが確認された。

4. おわりに

本研究から、ベイズ最適化を用いた最適化手法は流量ハイドログラフの再現性は高く、土壌の流れを規定するパラメータの探索に課題が残るものの、パラメータ推定的手法として有用であることが確認された。

参考文献: 1) Bokyoom Kim *et al.*: Bayesian Optimization of MOSFET Devices Using Effective Stopping Condition, *IEEE Access*, Vol.9, pp.108480-108494, 2021. 2) 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式の開発, *水工学論文集*, 第 48 巻, pp.7-12, 2004