

清水建設 本多 眞・鈴木 誠・百田博宣
九州大学 神野健二

1. はじめに

タンクモデルは流域をいくつかの貯留型容器の結合で表現する流出解析法である。菅原らの提案している直列4段タンクモデルは、簡単な構造で非線形の挙動が表現できることから、長期流出解析に広く用いられてきている。一般に、このモデルは1つの流域流出量から16個のパラメータを推定しなければならず、モデルの同定が難しい。このように、パラメータ推定には経験が必要となることから、従来から自動化プログラムの動きがあったり、また、流域流出量の誤差が最小となるような非線形関数の最適問題に置き換え、パラメータを推定しようとする研究は古くから行われてきた。これら多くの手法は、局所的な準最適解に陥りやすいことから、大域的探索法やマルチスタートを用いた手法の研究がなされるようになってきた。近年では、GAやSimplex法にGAに類似した概念を取り入れたSCE-UA法は、概念的雨水流出モデルに適用されている²⁾。

タンクモデルのパラメータ推定は、逆問題と考えると解の一意性や連続性のない非適切問題となることが考えられる。そこで、本研究では数学的な最適解にこだわらず、工学的な利用を考えた最適解を求めることを目的とする。流域流出量の最小誤差となるような目的関数は、パラメータ数が少ない概念的雨水流出モデルでさえ、局所的な解が複数存在する多峰性の最適問題となることが示されている³⁾。そこで解析手法として、大域的探索を得意とする遺伝的アルゴリズム(GA)を用い、ブートストラップ法⁴⁾により推定パラメータの不確定性を評価し、タンクモデルの最適な段数の設定についても考察する。

2. タンクモデルとGA

解析に解析に用いる資料は、曲淵ダム流域の流域平均日降水量で解析期間は1991年から5年間とした。図1に日流出量と日降水量を示す。この日流出量に対し、図2に示す直列4段タンクモデルを適用し、初期タンク水深を含めた16個のパラメータを推定する。図中、 r : 降雨量(mm/day)、 h_i : タンク水深(mm)、 a_i : タンク側方流出孔係数(1/day)、 b_i : タンク下方浸透孔係数(1/day)、 c_i : タンク側方流出孔高さ(mm)を表わす。また、総流出量(m^3/day)の $Q(t)$ は次式で表わされる。

$$Q(t) = \sum_{i=1}^4 a_i (h_i(t) - c_i) \cdot U(h_i(t) - c_i) + a_5 h_4(t) \quad (1)$$

目的関数には、最小二乗誤差基準、対数をとった値の最小二乗誤差基準、 X^2 誤差基準、相対誤差基準などが用いられているが、流出量のようなピークを有する関数では最小二乗誤差基準より他の評価基準の方が特徴を捕えやすい。ここでは、次式で示す対数最小二乗誤差基準を用いることとする。

$$J_{LL} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\log Q_c(i) - \log Q_0(i))^2 \quad (2)$$

GAによる探索は、既往の文献²⁾より16個のパラメータを0から表1に示す範囲に設定する。推定結果を観測結果の一部と対比すると図3のようになる。

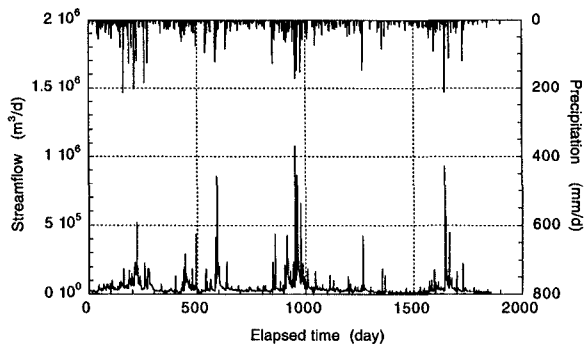


図1 流出量と降雨量

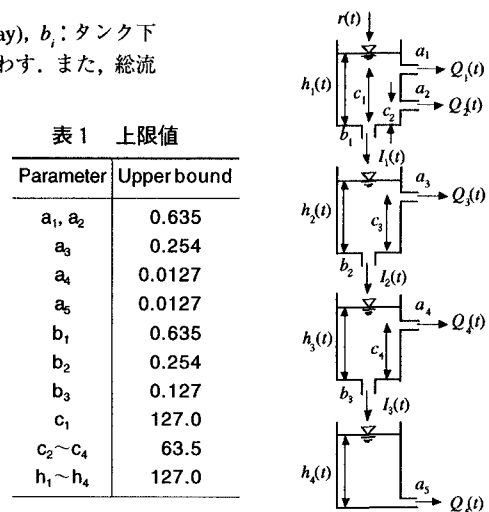


図2 直列4段タンクモデル

表1 上限値	
Parameter	Upper bound
a_1, a_2	0.635
a_3	0.254
a_4	0.0127
a_5	0.0127
b_1	0.635
b_2	0.254
b_3	0.127
c_1	127.0
$c_2 \sim c_4$	63.5
$h_1 \sim h_4$	127.0

Key Words: runoff analysis, tank model, genetic algorithm, bootstrap, extended information criterion

〒100 千代田区内幸町 2-2-2 フコク生命ビル TEL 03(3508)8101 FAX 03(3508)2196

3. ブートストラップ法によるパラメータの不確定性

推定されたタンクモデルの誤差は、流出量から定義された目的関数で評価される。ここでは、この誤差を $N(0.0, \sigma_e^2)$ の正規分布と仮定し、GAにより推定されたモデルパラメータの不確定性をパラメトリック・ブートストラップ法により算定する。ブートストラップ法は、モンテカルロ法により推定された流出量の経時変化にモデル誤差を付加したブートストラップ標本を作成し、GAによるパラメータ推定から、そのばらつきを評価することができる。

図4に結果の一部のヒストグラムを示す。タンク水深の初期値は均一にばらついており、どこでも最適パラメータになりえる。また、パラメータ間の相関特性を検討したが、強い相関をもつパラメータは見つからなかった。結論としては、多くのパラメータは探索範囲の影響を強く受けており、推定されたパラメータが一意性のない解であることがわかる。今回の推定では対数最小二乗誤差は $\sigma_e=0.3105$ であり、GAの設定パラメータにも改善の余地は残るものの、大きな傾向は変わらないと考えられる。

4. モデル選択基準

モデルの選択基準でよく知られているAICは、最大対数尤度をパラメータ数から補正した平均対数尤度を用いる評価指標であり、これを最小とするモデルが適切であると判断する。しかし、AICは最尤推定量に基づいた指標であることから、それ以外の手法では使えないという問題がある。これを拡張したEIC(Extended Information Criteria)はブートストラップ法により、データによる対数尤度の偏りを補正する評価指標であり、計算時間は必要であるが適用性は広い⁵⁾。式で表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{EIC} = & -2 \log f(X|\hat{\theta}) \\ & + 2E_x \left\{ \log f(X^*|\hat{\theta}^*) - \log f(X|\hat{\theta}^*) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 X^* はブートストラップ標本を、 $\hat{\theta}^*$ は推定されたパラメータベクトルを示している。

EICを用い、図1で示した4段タンクモデルと3段目のタンクをはずしたパラメータ数12の直列3段タンクモデルの比較を試みる。推定された3段モデルを観測結果は4段モデルより式(3)右辺第1項の推定誤差が多くなった。また、式(3)右辺第2項の補正項は、パラメータ数が少ない3段モデルの方が小さくなった。最終的に、EICでは4段モデルが978.3に対し、3段モデルは1367.3と大きくなり、4段モデルが適切であると選択された。

5. おわりに

曲測ダム流域を対象にGAを用いた流出解析モデル同定とその不確定性の評価を行った。今後は各種のタンクモデルについて目的関数と誤差を検討するとともに、他の流域についても適用していく所存である。

参考文献

- 1) 菅原正巳ら：タンクモデルの構造を自動的に定める計算機プログラムの開発(第2報), 国立防災センター研究報告, Vol.20, pp.157-216, 1978.
- 2) 田中丸治哉：タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, Vol.178, pp.103-112, 1995.
- 3) Duan, Q. etc.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, WRR, Vol.28, No.4, pp.1015-1031, 1992.
- 4) Efron, B.: Bootstrap methods: Another look at the jackknife, Annals of Statistics, Vol.7, No.1, pp.1-26, 1979.
- 5) 北川源四郎ら：情報量基準AICとEIC, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.92, No.503, pp.49-62, 1993.

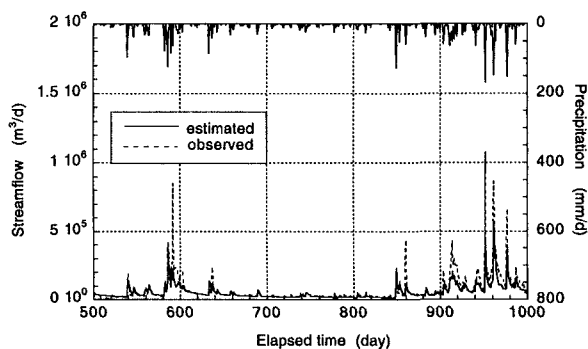


図3 推定値と観測値（4段タンクモデル）

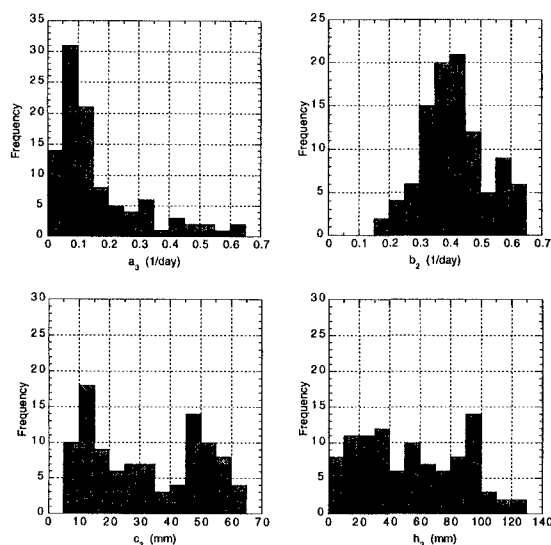


図4 パラメータのばらつき（2段目タンク）