タンクパラメータの最適化における安定性の改善

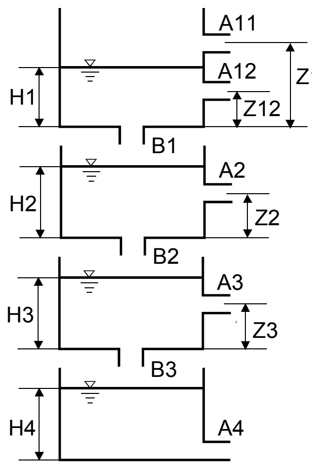
防衛大学校建設環境工学科　正会員　○多田　毅
東京大学生産技術研究所　正会員　横尾善之
防衛大学校建設環境工学科　正会員　重村利幸

1. はじめに

代表的な集中型流出モデルであるタンクモデルは，構造および計算が簡単でありながら再現性が高いことから広く利用されている．一方でモデル定数の決定が難しいという面もあったが，計算機の目覚しい発達により最適なモデル定数の探索を非線形関数の最適化問題に置き換えて決定する方法が提案され，精度の高いモデル定数を決定することは困難なことではなくなった．しかし，探索条件を変えるだけで得られる定数は大きく変動し，一意性のある定数を決定することは困難であることが知られている．一般に，モデルの自由度を上げると精度は向上するが不安定になることが知られており，この自由度の高さがタンク定数の不安定さの原因となっていると考えられる．そこで本研究では，良質な制約条件と新たな誤差評価基準を導入することで，モデルの自由度を減らしつつ物理的忠実度を向上させ，安定性の向上をはかりつつ精度の低下を最小限度に抑えることを目的とする．

2. 使用モデルおよび最適化手法

本研究では**図－1**に示す典型的な4段タンクを用いた．最上段タンクに降雨を入力し，タンク側方からの流出量を流域出口での流量とする．蒸発散量等の損失の扱いは次章にて解説する．計算は全て日単位で行い，雨量および流量の単位は(mm/day)である．モデル中の A11～A4, B1～B3 はそれぞれの流出孔の大きさを，Z11～Z3 は側方の流出孔の高さを，H1～H4 はそれぞれのタンクの初期水深を表す定数である．これらの定数は未知であり，モデルからの出力と観測流量との誤差を最小化する最適化計算により同定する．最適化において誤差を評価するために次式で示す誤差評価基準(対数二乗誤差基準)を用いた．ここで Qo，Qc はそれぞれ観測流量と計算流量，N は観測日数である．



図－1 タンクモデル

$$J = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\log\left(Qo_i\right) - \log\left(Qc_i\right)\right\}^2 \qquad (1)$$

最適化の際，物理的に無意味な定数を排除するめ，一般に次の制約条件が用いられる．

$$A11 + A12 + B1 < 1$$
$$A2 + B2 < 1$$
$$A3 + B3 < 1$$

本研究では J を最小にする定数を探索するために，タンクモデルの大きな自由度に対応可能であると考えられる大域的探索法である遺伝的アルゴリズム(GA)を採用した．最適化の効率を追求することが目的ではなく，タンク定数の広範囲な値を網羅することが目的であることから，最も古典的かつ単純な単純 GA(SGA)を採用した．GA アルゴリズムの詳細を**表－1** に示す． なお，これらのパラメータは試行錯誤により決定した．

表－1　GA アルゴリズムの詳細

量子化	24bit×16 パラメータ
コーディング	グレイコーディング
適合度スケーリング	線形スケーリング
選択手法	ルーレット選択・エリート保存
交叉	1 点交叉
突然変異	1bit 反転
世代数 T	2,000
個体数 M	5,000
交叉確立 Pc	0.5
突然変異確率 Pm	0.1

キーワード　タンクモデル，パラメータ最適化，安定化，遺伝的アルゴリズム

連絡先　〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL 046-841-3810(内 3520) E-mail:tada@nda.ac.jp

3. タンク定数の安定化

対象流域として，最上流部のダム流域であり，かつ雪の影響が少ないような日本国内の 14 流域を選択した．流域面積は約 100～800 km^2 である．計算に用いたデータは 1990 年から 1992 年までの 3 年間の日雨量および日流量である．GA を用いて一般的な制約条件の下で最適化した場合，探索条件を変化させる度に異なる定数が得られ，かついずれも高い精度を示す事例が多く発生する．同一流域の同一データで得られた 2 組の異なる定数による流出計算の結果を図－2 に示す．上段は両定数によるハイドログラフ，中段・下段はそれぞれの定数によるタンク内水深の変化を表す．流出量はいずれの定数の結果も完全に観測値と一致しているが，タンク内水深は異なる挙動を示し，より長期の計算では下段の定数が最も良好な結果を与えることが確認された．

以上より，タンク内水深の変化が安定する定数がより好ましいと判断し，タンク内水深を安定化させる傾向を持つ制約条件を新たに導入した．

$$A2 = A3 = Z2 = H2 = 0 \quad (B1 = 0 \text{のとき})$$

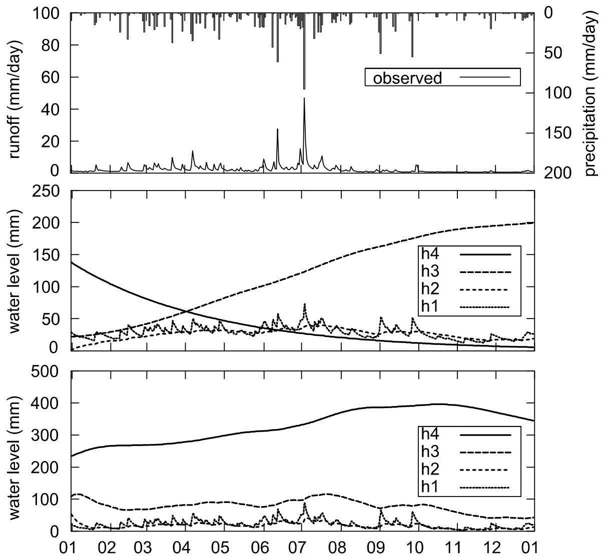
$$\left.\begin{array}{l} A3 = B3 = Z3 = H3 = 0 \\ A4 = H4 = 0 \end{array}\right\} (B1 = 0 \text{または} B2 = 0 \text{のとき})$$

$$H11 < h1_{\max}, \quad H2 < h2_{\max}, \quad H3 < h3_{\max}$$

$$h4_{\max} < h3_{\max}$$

ここで $h1_{\max}$～$h4_{\max}$ は各タンク内水深の全観測期間内の最大水深である．これらの制約条件は，上段から流下しても下段からの流出が無い「無限の sink」，上段からの流下が無いのに下段からの流出がある「無限の source」などを排除する．さらに，式(1)では評価しにくい水の過剰な蓄積や過剰な湧き出しを防ぐため，観測流量と計算流量との誤差を含む誤差評価基準 J_Q を導入した．

$$J_Q = \left(1 + a\frac{\left|\sum Qo - \sum Qc\right|}{\sum Qo}\right) J$$



図－2 異なる定数による流出計算結果とタンク内水深の時間変化

ここで，J は式(1)で表される対数二乗誤差評価基準，a は総流量の条件の強さを表す定数で，本研究では a=5 とした．さらに，蒸発散などの損失の扱いは，一般に最上段タンクから除去する手法が用いられるが，本研究では際下段から除去こととした．その物理的意味付けは困難であるが，簡便でかつ高い精度を示すことから採用した．

表－2 定数および精度の安定性

	C_1	C_2
v_p	0.31	0.30
n_p(個)	1.9	0.8
S_c(%)	-14	-12
S_{10}(%)	-13	-5

C_1：従来の制約条件
C_2：新しい制約条件
v_p：定数のばらつき(変動係数)
n_p：無意味な定数の数
S_c：交差確認時の精度低下
S_{10}：長期再現計算時の精度低下

以上の新しい条件を用いて，1 年分の観測データから定数を同定する作業を全流域，全期間(全 42 組)で行い，流域固有の定数に収束すること確認するため，定数の値のばらつきと無意味な定数（値を変更しても結果に影響が出ない定数）の数を算定した．さらに，同定に用いた期間以外のデータならびに 10 年間の長期データを用いた交差確認法も行った．その結果，定数の値のばらつきは改善されなかったが，無意味な定数が減少した．また，同定に用いたデータ以外に対する適応度が向上し，特に 1 年間のデータで同定された定数を用いて 10 年間の再現計算を行っても良好な精度を保つことが確認された．

4. まとめ

本研究では，遺伝的アルゴリズムを用いたタンク定数の大域的探索において，新たな制約条件と新たな誤差評価基準を導入した．その結果，流出に関与しない無意味な定数の数を減少させることができた．また，短期間のデータで同定された定数を用いて長期間の再現計算を行う際の安定性を大幅に向上させることができた．