

物部川水系永瀬ダム流域の長期流出特性に関する研究

松田誠祐*・今本博健・大年邦雄*・丹下英雄*

*高知大学農学部

要 旨

本研究は山地河川の長期流出特性の変化をタンクモデルの係数変化として検証したものである。大域的最適化手法である SCE-UA 法は、ノイズを含むデータを用いた場合にもモデルの最適同定を行うことができる。タンクモデルの同定において、安定した結果を得るためには約 10 年程度の同定期間のデータが必要であった。永瀬ダム流域の解析では、最近、第 1 タンクの上流出孔係数の値が小さく同定されることが認められた。

キーワード：長期流出特性，タンクモデル，大域的同定，感度分析，SCE-UA 法

1. はじめに

最近、山地河川の流量が減少したといわれている。戦後奨励されて広範に植林された人工林が 50 年を迎えたが、人手不足のため山の手入れが十分でなく、保水力が減少した、あるいは流域蒸発散量が増えたなどが原因であるといわれている。本研究は、わが国で常用されている 4 段タンクモデルを用いて、山地河川の流量に長期的な流出特性の変化が認められるかどうかを確認しようとするものである。

2. 対象流域

対象流域は、高知県の中央部に位置する物部川水系永瀬ダム流域(295.2km²)である。流域の地質は、南部が古第 3 系の堆積岩類(四万十帯)、北部は中～古生代の堆積岩類である。流域の約 60 %はスギ・ヒノキの人工林であり、北部にブナの広葉樹がある。解析は 1969～1995 年の 27 年間の日データを用いた。Fig. 1 は永瀬ダム流域図である。

雨量観測点は流域内に 8 箇所(永瀬ダム・別府・久保・笹・舞川・市宇・川口・五王堂)ある。川口・五王堂は 9 時日界の日雨量であるが、その他は時間雨量が記録されている。永瀬ダムの流入量は、ダ

ムの貯留水位変化から 1 時間ごとに求められているが、ここでは流出特性の長期変化を検討することとしているので、24 時日界の日量に換算して用いた。流出量(ダム流入量)を 24 時日界で求めたので、9 時日界の日雨量を用いて流出計算をすると、1 段タンクモデルの流出係数が 0 に近い値を示すことがある。したがって、近隣の測点間では一連雨量における日雨量の比率は同じであると仮定して、一連雨量を 24 時日界の日雨量に換算した。また、流域雨量は各観測点雨量の算術平均とした。

Table 1 は永瀬ダム流域の過去 30 年の土地利用状況の変遷を示している。1965・1975 年度および 1994 年度の調査結果でみると、人工林の総面積はあまり変わらないが、林齢が高くなっている。

Table 1 Changes of the land category in the Nagase Dam basin.

| | NF | AF | | Others | unit: km ² |
|------|-------|-----------------|-----------------|--------|-----------------------|
| | | AF ₁ | AF ₂ | | Total |
| 1965 | 124.8 | 41.1 | 91.2 | 38.1 | 295.2 |
| 1975 | 96.9 | 98.7 | 74.4 | 25.2 | 295.2 |
| 1985 | 94.6 | 75.1 | 103.8 | 21.7 | 295.2 |
| 1994 | 94.2 | 53.8 | 125.5 | 21.7 | 295.2 |

NF, natural forest

AF₁, artificial forest less equal to 20 years

AF₂, artificial forest more than 20 years

ここで対象とした 1969～1995 年の 27 年間の流域年雨量と年流出量の関係を Fig. 2 に示した。1969～1977 年の年雨量に対する年流出量（黒丸）は、それ以後の年流出量（白丸）に比べてやや多い傾向にあり、年流出量が減少しているように見える。また、水収支から求めた流域蒸発散量の経年変化は Fig. 3 のようであるが、1969～1980 年の流域蒸発散量は逆にやや増加しており、1980 年頃から安定している。流域年雨量に対する年流出量の減少は、流域蒸発散量の増加もその原因の 1 つであろう。

3. タンクモデル

長期流出の経年変化を調べる手段として、本研究ではタンクモデルを用いることとした。タンクモデル(菅原, 1972)は流出モデルとして簡明であり、データに柔軟に対応するという特長を持っている。しかし、モデル係数を試行錯誤的に決める必要があり、実測の雨量・流量・蒸発散量には相当のノイズが含まれていると思われるので、一意な解を得る工夫が必要である。わが国で標準的に用いられているタンクモデル (Fig. 4) の同定すべき係数は最大 16 個であるが、予備的計算によると、低水から低水までを同定期間に選ぶことによって第 1 段と第 2 段タンクの初期貯留量をほとんどの場合ゼロに設定できることがわかった。したがって、本研究では 14 個の係数を同定することとした。

タンクモデルの基礎式は (1)～(3) 式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= r - q_1 - q_2 - i_1 \\ \frac{dS_2}{dt} &= i_1 - q_3 - i_2 \\ \frac{dS_3}{dt} &= i_2 - q_4 - i_3 \\ \frac{dS_4}{dt} &= i_3 - q_5 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= a_1(S_1 - z_1) \\ q_2 &= a_2(S_1 - z_2) \\ q_3 &= a_3(S_2 - z_3) \\ q_4 &= a_4(S_2 - z_4) \\ q_5 &= a_5 \cdot S_3 \\ i_1 &= b_1 \cdot S_1 \\ i_2 &= b_2 \cdot S_2 \\ i_3 &= b_3 \cdot S_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

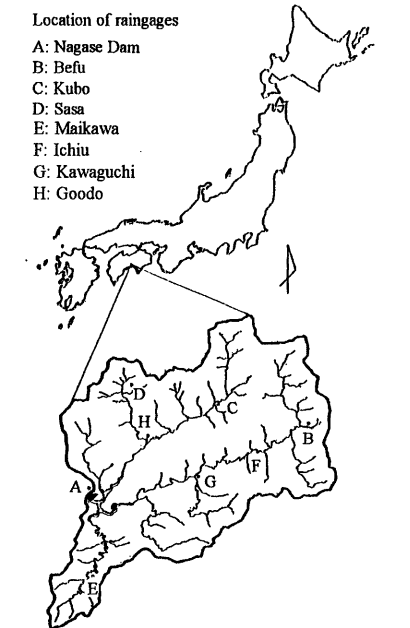


Fig. 1 The Nagase Dam basin of Monobe river.

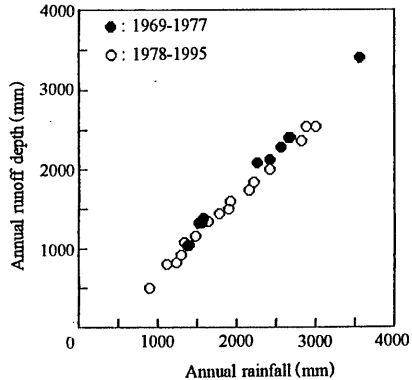


Fig. 2 Relationship between annual rainfall and runoff depth.

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (3)$$

ここに、 q はタンクの全流出高 (mm/day)、 $q_1 \sim q_5$ はそれぞれ 1 段～4 段タンクの流出高 (mm/day)、 $a_1 \sim a_5$ は流出係数 (1/day)、 $i_1 \sim i_3$ はそれぞれ 1 段～3 段の浸透高 (mm/day)、 $b_1 \sim b_3$ は浸透係数

(1 / day), $S_1 \sim S_4$ は貯留高 (mm), $z_1 \sim z_4$ は流出孔の高さ (mm) である。

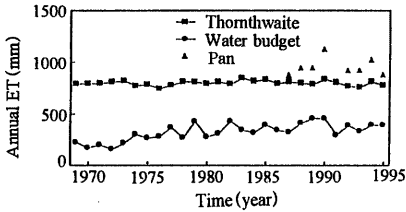


Fig. 3 The secular change of annual evapo-transpiration in the Nagase Dam basin.

4. SCE-UA法によるタンクモデル係数の同定

SCE-UA 法 (Shuffled Complex Evolution method at the University Arizona) は Duan et al. (1992,1994) によって提案された大域的モデル探索手法である。わが国では最近田中丸 (1995) によってタンクモデルへの適用が試みられ、有用であることが報告されている。この手法では、係数の大域的探索にランダム発生・競争進化・集団混合などの概念が導入され、局所探索においては反射・拡大・収縮・縮小などの概念が使われている。また、微係数を計算しないのでノイズを含むデータに対してもそれなりに流量を再現すること、係数の組を用いて探索を行うので係数の探索順序を考える必要がないことなどの特長を持っている。アルゴリズムは文献 (Duan et al., 1992, 1994) に詳しく述べられているので省略する。

SCE-UA 法をタンクモデルの同定に用いる場合、いくつかの設定すべき定数が必要である。探索すべきモデル係数の数を n (=次元数) とすると、集団の個数 p , 各集団に含まれる点の数 m , 部分集団に含まれる点の数 v , 部分集団において発生させる点の数 α , 集合の中で進化させる点の数 β などである。これらの内、Dean et al. (1994) によって推奨されている $m = 2n + 1$, $v = n + 1$, $\beta = 2n + 1$ を除く p , α について、丹下 (1997) は 16 変数の場合に Table 2 を得た。ただし、ペナルティ関数の設定が不十分であったため、設定した係数の上限値をとる場合があるなどの問題が生じていた。しかし、タンクモデルの同定では、 $p = 16$ (または $p = n + 1$), $\alpha = 4$ 程度が適当であろう。

一方、係数の組をランダムに発生させるやり方は、モデルの合理性を損なう結果を招くこともある。たとえば、1 段タンクの上流出孔の高さが下流出孔の高さより低い値に設定される場合、あるいは上段タ

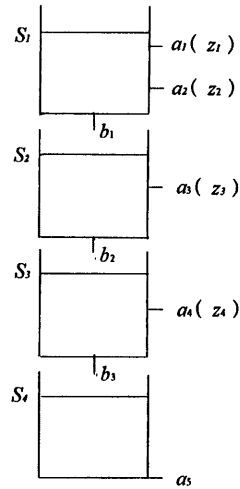


Fig. 4 A tank model by Sugawara (1972).

Table 2 Test results on the selection of v and α . (the number of test runs = 20)

| α | | 1 | 2 | 4 | 8 |
|----------|----|-------|-------|-------|-------|
| $v = 4$ | NS | 2 | 4 | 0 | 0 |
| | NR | 46 | 34 | 50 | 50 |
| | NE | 8210 | 11937 | 0 | 0 |
| $v = 8$ | NS | 16 | 15 | 16 | 16 |
| | NR | 38 | 19 | 11 | 8 |
| | NE | 14130 | 14001 | 16267 | 23240 |
| $v = 16$ | NS | 18 | 19 | 20 | 20 |
| | NR | 32 | 15 | 7 | 5 |
| | NE | 23901 | 22993 | 22974 | 29393 |
| $v = 20$ | NS | 20 | 20 | 19 | 19 |
| | NR | 30 | 13 | 7 | 4 |
| | NE | 28175 | 26373 | 27394 | 34391 |

NS, the number of successful runs
NR, the number of repeated times through a run
NE, the number of evaluations for the tank model through a run

クンの貯留高がゼロになる前に、下段タンクの貯留高がゼロになるような係数が求められるなどである。これらの問題は、角屋・永井 (1973) が行っているように、ペナルティ関数を用いて解決されるのが通常であるが、この手法においても適切なペナルティ関数の設定が極めて重要である。ここで用いたペナルティ関数 J_p は次のようである。

①各タンクの係数の和は 1 より小さい。たとえば、 $a_1 + a_2 + b_1 > 1$ のとき、

$$J_p = a_1 + a_2 + b_1 - 1 \quad (4)$$

② 1 段タンクの上流出孔は下流出孔より高い位置に

ある。たとえば、 $z_1 < z_2$ のとき、

$$J_1 = (z_2 - z_1) / z_1 \quad (5)$$

③各段タンクの浸透孔係数の値は、それぞれの直下段タンクの流出孔係数+浸透孔係数の値より大きい。たとえば、 $b_1 < a_1 + b_1$ のとき、

$$J_1 = (a_1 + b_1 - b_1) / b_1 \quad (6)$$

④同期期間の水収支を合わせる。

$$J_4 = (\sum R - \sum ET - \sum Q) / (\sum R - \sum ET) \quad (7)$$

ここに、 $\sum R$ 、 $\sum ET$ 、 $\sum Q$ はそれぞれ同期期間の雨量、蒸発散量、推定流量の合計である。

評価基準には平均相対誤差を用いた。また、モデル係数の探索において、係数はすべて最大設定値を用いて基準化されている。ここで用いた各係数の最大設定値を Table 3 に示した。

Table 3 The parameter space used for the present model.

| parameter | space (1/day) | parameter | space (mm) |
|-----------|---------------|-----------|------------|
| a_1 | 0 ~ 0.7 | z_1 | 0 ~ 200 |
| a_2 | 0 ~ 0.5 | z_2 | 0 ~ 100 |
| a_3 | 0 ~ 0.5 | z_3 | 0 ~ 100 |
| a_4 | 0 ~ 0.2 | z_4 | 0 ~ 500 |
| a_5 | 0 ~ 0.005 | S_1 | 0 |
| b_1 | 0 ~ 0.6 | S_2 | 0 |
| b_2 | 0 ~ 0.5 | S_3 | 0 ~ 500 |
| b_3 | 0 ~ 0.05 | S_4 | 0 ~ 4000 |

5. 観測ノイズの有無がタンクモデル係数の同定結果に与える影響

タンクモデルは、データに多少のノイズを含んでも、流量をそれなりにうまく再現することが多く、優れたモデルである。しかし、係数間に相当の関連性があるため、ノイズを含んだデータを用いて同定を行うと、用いるデータごとに違った同定結果を示す。流域に固有なモデルを求めたい場合には、そのことが逆に得られたモデルの一意性に問題を残すことになる。

SCE-UA 法の係数探索性能と同定されたタンクモデルの一意性を調べるため、次のような数値実験を行った。すなわち、永瀬ダム流域の 27 年間の雨量・流量・蒸発散量を用いてタンクモデルを同定した後、同定された係数（真値とみなす）を用いて 27 年間の流量を再現（ノイズのない流量）した。再現計算に用いた雨量・蒸発散量と再現流量にランダム

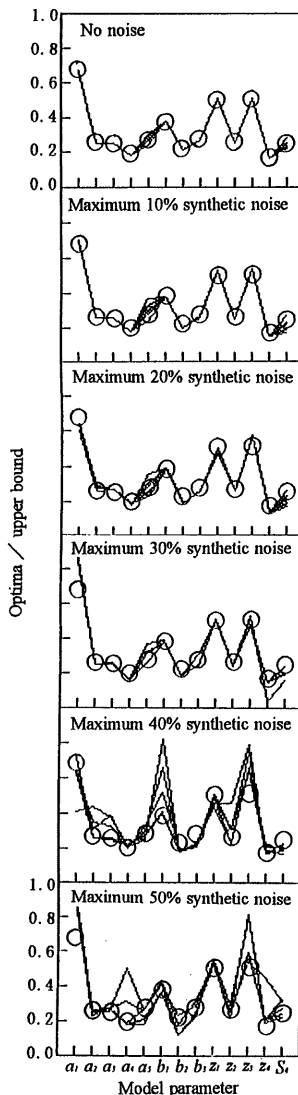


Fig. 5 Optima of the cases in which the synthetic noise data are used.

にノイズを加えたものを観測値とみなして、再び同定を行った。

$$\left. \begin{aligned} R &= R + \gamma \cdot G \cdot R \\ ET &= ET + \gamma \cdot G \cdot ET \\ Q &= Q + \gamma \cdot G \cdot Q \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 $R \cdot ET \cdot Q$ はそれぞれ雨量・蒸発散量・流量、 γ は0~1のランダム変数、 G はノイズの大きさを決める定数で0~0.5の範囲を与えた。

Fig. 5 は1980年の流量にノイズを含んでいる場合の同定結果であり、次のことがいえる。同図に示したノイズを含まない場合のモデル係数の同定値はかなり安定した結果を示している。すなわち、含まれているノイズが小さければ、タンクモデルは流域固有の安定したモデルとして求められる。SCE-UA法は、ノイズを含んだデータに対しても、困難なく係数探索を行うことができる。最大流量ノイズが20%程度なら一部を除いてほぼ真値に近い係数を同定するといえる。しかし、ノイズが大きくなるにつれて同定された係数にはかなりのばらつきがみられる。

Fig. 6 は雨量・蒸発散量・流量にノイズを含んだ場合における真値と観測値の平均相対誤差の変化を示したものである。雨量・蒸発散量に含まれるノイズは、最大50%の場合においても、平均相対誤差が5%より小さく、流量ノイズに比べてモデルの平均相対誤差にあまり影響しないことが伺える。

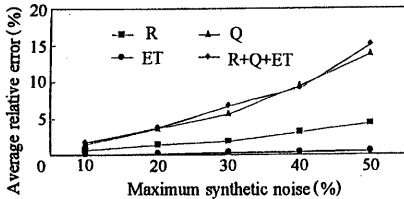


Fig. 6 Average relative error which are tested with the synthetic noise data.

6. タンクモデル係数の感度

ノイズを含んだデータを用いてタンクモデルの同定を行うと、必然的にモデル係数がデータごとに違って求められるので、これを避けたい。そこでタンクモデル係数の感度を計算してみる。

タンクモデル係数の感度は渡辺ら(1989)によって次のように与えられている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial a_1} &= S_1 + (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - z_1 + a_1 \frac{\partial S_2}{\partial a_1} + a_2 \frac{\partial S_3}{\partial a_1} + a_3 \frac{\partial S_4}{\partial a_1} \\ \frac{\partial q}{\partial a_2} &= S_1 + (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial a_2} - z_1 + a_2 \frac{\partial S_2}{\partial a_2} + a_1 \frac{\partial S_3}{\partial a_2} + a_3 \frac{\partial S_4}{\partial a_2} \\ \frac{\partial q}{\partial a_3} &= S_1 + a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_3} - z_1 + a_1 \frac{\partial S_2}{\partial a_3} + a_2 \frac{\partial S_3}{\partial a_3} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial a_4} &= S_1 + a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_4} - z_1 + a_1 \frac{\partial S_2}{\partial a_4} \\ \frac{\partial q}{\partial a_5} &= S_1 + a_1 \frac{\partial S_1}{\partial a_5} \\ \frac{\partial q}{\partial b_1} &= (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial b_1} + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial b_1} + a_1 \frac{\partial S_3}{\partial b_1} + a_2 \frac{\partial S_4}{\partial b_1} \\ \frac{\partial q}{\partial b_2} &= a_2 \frac{\partial S_2}{\partial b_2} + a_1 \frac{\partial S_3}{\partial b_2} + a_3 \frac{\partial S_4}{\partial b_2} \\ \frac{\partial q}{\partial b_3} &= a_1 \frac{\partial S_2}{\partial b_3} + a_2 \frac{\partial S_3}{\partial b_3} \\ \frac{\partial q}{\partial z_1} &= (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial z_1} - a_1 + a_1 \frac{\partial S_2}{\partial z_1} + a_2 \frac{\partial S_3}{\partial z_1} + a_3 \frac{\partial S_4}{\partial z_1} \\ \frac{\partial q}{\partial z_2} &= (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial z_2} - a_2 + a_2 \frac{\partial S_2}{\partial z_2} + a_1 \frac{\partial S_3}{\partial z_2} + a_3 \frac{\partial S_4}{\partial z_2} \\ \frac{\partial q}{\partial z_3} &= a_3 \frac{\partial S_2}{\partial z_3} - a_3 + a_1 \frac{\partial S_3}{\partial z_3} + a_2 \frac{\partial S_4}{\partial z_3} \\ \frac{\partial q}{\partial z_4} &= a_4 \frac{\partial S_2}{\partial z_4} - a_4 + a_1 \frac{\partial S_3}{\partial z_4} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{u}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(a_1 + a_2 + b_1)I & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & -(a_1 + b_2)I & 0 & 0 \\ 0 & b_2 I & -(a_1 + b_3)I & 0 \\ 0 & 0 & b_3 I & -a_1 I \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{u}_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \\ \bar{D}_3 \\ \bar{D}_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで、 I は4 x 4の単位行列。

$$\bar{u}_1 = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_1}{\partial a_2} \\ \frac{\partial S_1}{\partial a_3} \\ \frac{\partial S_1}{\partial z_1} \end{pmatrix}, \quad \bar{u}_2 = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_2}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_2}{\partial a_2} \\ \frac{\partial S_2}{\partial z_1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\bar{u}_3 = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_3}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_3}{\partial a_2} \\ \frac{\partial S_3}{\partial z_1} \end{pmatrix}, \quad \bar{u}_4 = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_4}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_4}{\partial a_2} \\ \frac{\partial S_4}{\partial z_1} \end{pmatrix}$$

$$\vec{D}_1 = \begin{pmatrix} -S_1+z_1 \\ -S_1+z_2 \\ 0 \\ 0 \\ -S_1 \\ 0 \\ 0 \\ a_1 \\ a_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{D}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -S_1+z_3 \\ 0 \\ S_1 \\ -S_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{D}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_1+z_4 \\ 0 \\ S_2 \\ -S_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_4 \end{pmatrix}, \vec{D}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_1 \\ 0 \\ S_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

これらの感度係数は式 (10) を差分計算することによって求められるが、詳細は省略する。

Fig. 7 は 1980 年のデータを用いてタンクモデル係数の感度を計算した結果である。この図において、各係数は感度が計算されている日のみ流量に関わっており、感度がゼロの日には流量に関与しない。すなわち、1980 年の場合、第 1 段タンクの上流出孔が流量に関与している日数は、1 年間でわずか 13 日のみである。

このことは、タンクモデルの同定期間の取り方にきわめて重要な問題を提起していると考えられる。タンクモデルの各係数は、互いに関連し合っていて係数間の相関はかなり高い。もし、第 1 段タンクの上流出孔がたまたま誤って設定されてしまうと、その影響は他の係数に相当の影響を与えることになる。したがって、流量等に相当のノイズが見込まれる場合には、ノイズの影響が平均的に打ち消し合う程度の長い同定期間を設定することが必要であるといえよう。

一方、感度微分方程式を解く方法は、計算回数が少ないなど多くの利点もあるが、微係数を計算する必要があるため、ノイズを含んでいるデータを用いた場合には解を求められないことも多く、モデル同定法としては適していないように思われる。

次に、各モデル係数の変化が平均相対誤差に及ぼす直接的な影響を見るため、それぞれの係数を最適同定値から単独に 2 倍および 0.5 倍変化させた場合の平均相対誤差を求めた (Fig. 8)。この図から、1 段タンクの各係数および 4 段タンクの流出孔係数

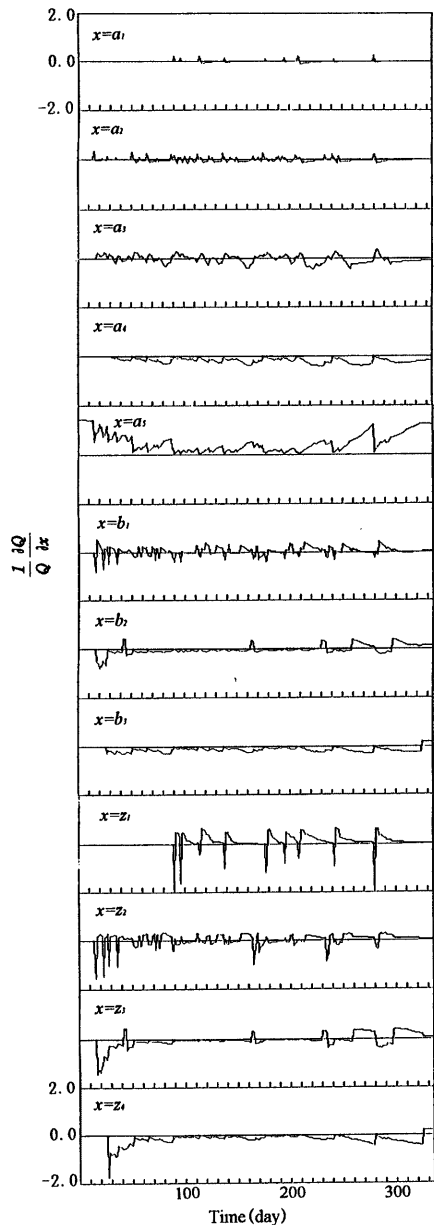


Fig. 7 Test results of the sensitivity analysis for the observed data in 1980.

は敏感に効くこと、3 段目タンクの浸透孔係数および 2・3 段目タンクの流出孔高の変化はほとんど効かないことがわかる。

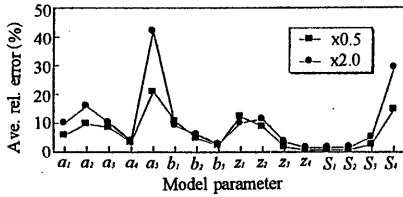


Fig. 8 Average relative error of the cases in which test runs used optimal parameters except only one.

7. 同定期間の長さを変化させた場合におけるタンクモデル係数の変動

1 段および 2 段タンクの貯留高を除く 14 係数について、開始年 (1969 年) の同定を行った後、その年の最後の各段の貯留高を求め、それらの貯留高を次の年の初期貯留高として用いる。これを連続的に繰り返して各年ごとのモデル係数 (12 係数) の探索を行った。各年最後の各タンクの貯留高および平均相対誤差の変化を Fig. 9 に示している。各段タンクの貯留高は長期的にはほぼ安定している。また、1970 年、1980 年および 1990 年のハイトグラフとハイドログラフを取り出して Fig. 10 に示したが、平均相対誤差はいずれの年も 20 % より小さく、実測値を良好に再現している。

しかし、Fig. 11 にみられるように、各年ごとに同定された 12 係数はかなり変動しており、流域固有の係数としてどの年のものを用いばよいかを決め

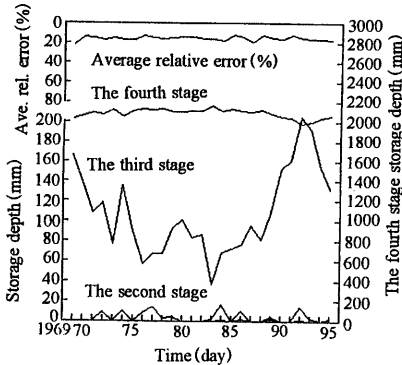


Fig. 9 The secular changes of tank storage depth and average relative error at the end of each year.

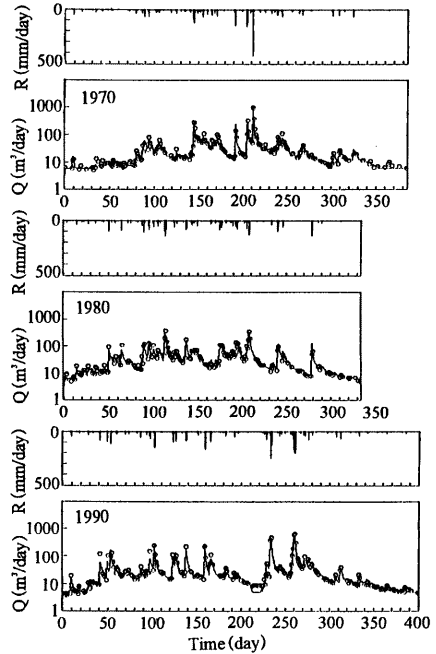


Fig. 10 Simulation results used observed data for one year duration.

ることは困難である。すなわち、とくに 1 段タンクの上流出孔係数を決定するためには、1 年の同定期間ではデータ数が少なすぎると思われる (Fig. 7)。

Fig. 11 は、同定期間の長さを変化させた場合にお

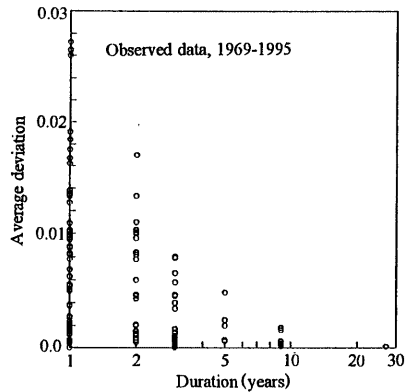


Fig. 11 Average deviation calculated from that of each parameter against to durations using observed data.

ける各係数の同定結果が、どの程度ばらついて求められているかを示すために、5回の同定を行って各係数の同定値の平均値からの分散を求め、さらに各係数の分散の平均値を同定期間に対してプロットしたものである。観測流量では5年の同定期間でも分散はかなり大きいことが認められる。

Fig.12は、27年間を3等分し、同定期間を9年とした場合の観測流量に対する各係数の同定結果を示している。同定期間を9年とした場合の各係数の同定結果は比較的安定しており、約10年程度の同定期間があれば、安定した係数が求められることを示唆している。

Fig.13は、最大流量ノイズ40%を加えた流量に

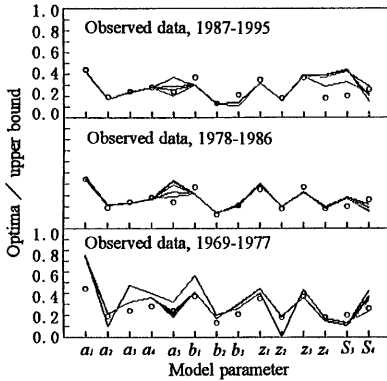


Fig.12 Normalized optima of model parameters using the observed data. (white circles represent for 27 years duration and lines for 9 years)

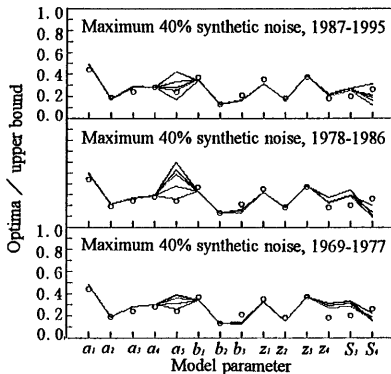


Fig.13 Normalized optima of model parameters using the synthetic noise data. (white circles represent for 27 years duration and lines for 9 years)

に対する同様の同定期間における同定結果のばらつきを示している。Fig.12とFig.13の同定結果を比較することによって、観測流量を用いた同定による第1段タンクの上流出口の値が、1969～1977年の期間で大きく、それ以後の期間における値が小さくなっているのが注目される。これは、長期流出特性の変化が第1段タンクの上流出口係数の値が明らかに小さくなるという変化として検出されたと推定される。

Fig.12の1987～1995年の同定結果のうち、3段目タンクの流出孔高および貯留高にもかなりの変化が認められる。しかし、Fig.8に示したように3段目タンクの流出孔高の平均相対誤差に及ぼす感度は極めて鈍く、この変化を有意なものとは認め難い。貯留高の変化も同様に、流出孔高の変化に伴って起こった変化である。

Fig.14は、5年の同定期間で同定した場合におけるモデル係数の同定結果を、それぞれの同定期間ごとに示したものであるが、5年程度の長さでは9年の同定期間の場合に現れた第1段タンクの上流出口係数の値が小さくなるという変化は明瞭には検出されていない。

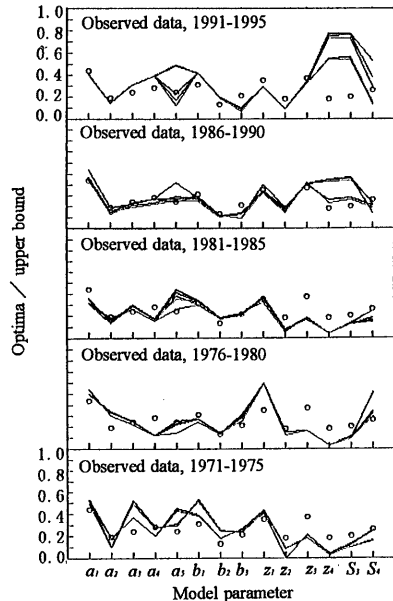


Fig.14 Normalized optima of model parameters using the synthetic noise data. (white circles represent for 27 years duration and lines for 5 years)

Fig.15 は、最大流量ノイズ 20 %および 40 %を加えた流量に対する同定結果のばらつきを示したものである。最大流量ノイズが 20 %程度であれば、5 年の期間に対する同定結果の平均分散は、観測流量の 9 年に対するそれと同じ程度であり、5 年程度の同定期間でも比較的安定した同定結果が得られそうである。

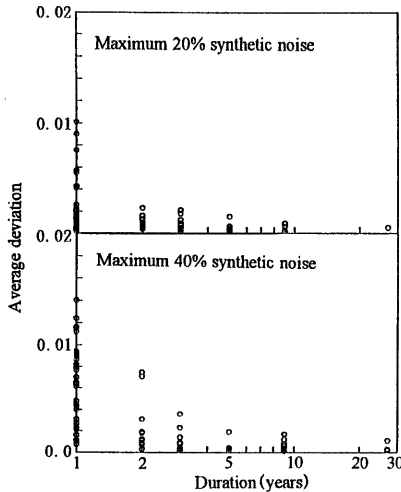


Fig.15 Average deviation calculated from that of each parameter against to durations using the synthetic noise data.

8. おわりに

本研究の成果をまとめると次のようである。

- 1) 大域的最適化手法である SCE-UA 法は、タンクモデルの同定法として優れた結果を示し、かなりのノイズを含んだデータに対しても、それなりによい同定結果を求めることができる。また、適切なペナルティ関数が必要である。
- 2) 永瀬ダム流域の長期流出特性の解析結果として、1969 ~ 1978 年の年蒸発散量に比べて、現在の年蒸発散量はやや増加している。逆に、年雨量に対する年流出量はやや減少している。
- 3) ノイズを含むデータを用いてタンクモデルの同定を行う場合には、5 ~ 10 年の長さの同定期間が必要である。ノイズが小さければ、より短い同定期間のデータを用いることも可能であろう。
- 4) 永瀬ダム流域の 9 年ごとの同定期間のデータを用いることによって、年雨量に対する年流出量のお

ずかな減少が、4 段タンクモデルの第 1 段タンクの上流出係数の値が小さく同定される、という結果として検出された。

謝辞

本研究を行うにあたって、建設省高知工事事務所、高知県河川課および永瀬ダム管理事務所から資料を提供して頂いた。記して深謝の意を表す。

参考文献

- 角屋 睦・永井明博(1973)：流出解析法(その 12) -タンクモデルと SP 法による最適同定-, 農業土木学会誌 48(12), pp.935-943.
- 菅原正巳(1972)：流出解析法, 共立出版.
- 田中丸治哉(1995)：タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集 178 号, pp.103-112.
- 丹下英雄(1997)：タンクモデルに基づく山地河川の長期流出特性に関する研究-物部川水系永瀬ダム流域の事例研究-, 高知大学大学院農学研究科修士論文, p.22.
- 渡辺和好・館谷 清・松木賢治・星 清(1989)：タンクモデル定数の最適化手法の改良, 第 33 回水理講演会論文集, pp.55-60.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp.1015-1031.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta V.K. (1994): Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. of Hydrology*, 158, pp.265-284.

Study on the long-term runoff characteristics in the Nagase dam basin of Monobe river

Seisuke MATSUDA*, Hirotake IMAMOTO, Kunio OHTOSHI*, Hideo TANGE*

* Faculty of Agriculture, Kochi University

Synopsis

In this paper, daily streamflow data of a mountainous river was examined to get the change of long-term runoff characteristics as that of runoff model parameters. The SCE-UA which is a global optimization method is the robust tool against to measurement noises and it is capable of solving the tank model efficiently and steadily. To get stable parameters of tank model, it was necessary to use the data for about 10 years duration. Through the present analysis for the daily data in the Nagase Dam basin of monobe river, it was indicated that the upper runoff coefficient of the first stage of a standard tank model was estimated smaller than ever. That seems to correspond to the increase in the evapo-transpiration of the watershed.

Keywords: long-term runoff characteristic; tank model; global optimization; sensitivity analysis; SCE-UA method