

長期流出タンクモデルの実用的同定法とその考察

永井明博・角屋 睦・中嶋章雅・鈴木克英

PRACTICAL TECHNIQUES FOR OPTIMUM IDENTIFICATION OF SERIES TANKS MODEL FOR LONG TERM RUNOFF ANALYSIS

By *Akihiro NAGAI, Mutsumi KADOYA, Akimasa NAKAJIMA*
and *Katsuhide SUZUKI*

Synopsis

Several problems have been examined to propose the practical methods for applying the mathematical optimization technique to the identification of the series tanks model with sixteen unknown parameters for the long term runoff analysis. The data used are the daily ones of precipitation and runoff for the period of 1973–1979 in the Eigenji Dam basin of 132 km² and of 1975–1976 in the Ichinotani basin of 0.13 km². On the basis of numerical experiments, the SDFP (Standardized DFP) method has been chosen as the optimum identification technique to be used here under the Chi-Square criterion of errors to be minimized.

The results of practical examination are summarized as follows:

- 1) The water balance constraint is indispensable for identifying the model, by which good accuracy is expectable in the period of prediction, too.
- 2) The data of drought years, even if their length is short, are effective for the model identification of good accuracy.
- 3) Excluding the data of runoff greater than a given level from the evaluation of errors is fairly effective if no data of drought period are available for the model identification.
- 4) Permitting the one-day shift back of observed runoff is effective for improving the model, because the influence of night rainfall cannot be negligible.
- 5) Excluding the data of runoff in snow season from the error evaluation may be permitted because of the uncertainty in the estimation of snowfall.

1. ま え が き

長期流出解析法として、わが国では菅原¹⁾の直列4段型タンクモデルが用いられることが多い。このモデルは、長期流出を対象とすると、物理的に無理のない簡単巧妙なモデルといえるが、適用上の最大の難点は、モデル定数が多いためにモデルの同定が困難なことである。この問題を解決するために小林ら²⁾はPowellの共役方向法を利用することを提案し、菅原ら³⁾は自動化プログラムの開発を試みてきている。これらはいずれも注目すべき研究であり、これによりタンクモデルの同定が行いやすくなったが、実用的同定法としてはまだ十分ではなく、検討すべきいくつかの問題点が残されていることも事実である。

われわれは、長期流出タンクモデルの数学的最適同定法の実用性を高めるために、これまで基礎的ないくつかの問題点について種々検討を重ねてきた^{4,5)}が、その成果を利用して実流域の長期流出タンクモデルの最適同定を試みたところ、さらにいくつかの新しい問題点に直面した。ここではこれら実際上の問題点を解決するために試みた、いくつかの実用的同定法についての検討結果を報告する。

2. 研究対象流域と解析資料

2.1 永源寺ダム流域

(1) 流域の概要

永源寺ダム流域は、滋賀県東部を西流する愛知川上流部に位置する。その概要を Fig. 1 に示すが、流域面積は 132 km²、主河道長は約 25 km である。この流域の大部分は頁岩・砂岩からなる古生層で、鈴鹿山脈沿いの東部や下流の一部に粗紋花崗岩、流域北東部に石灰岩からなる古生層がみられる。この流域の東南部、御在所山付近は近畿地方でも有数の多雨地帯として知られている。また冬期には流域全体に積雪がみられる。

(2) 解析資料

永源寺ダムは農林水産省愛知川農業水利事業所によって設置された農業利用水ダムであって、同事業所によって流入量、放流量資料が整理されている。ここでは昭和47年10月～54年2月の約6年間にわたる貯水池への日平均流入量資料を用いる。

またこの流域には Fig. 1 に示す地点で雨量観測が行われている。ダム地点では水位、雨量、気温などのほかに蒸発量も観測されているが、蒸発計に故障が多くて信頼性に乏しいので、止むを得ず彦根気象台の過去12年間の資料から月平均値を求め、これを日蒸発量に換算して用いることにした。用いた値を Table 1 に示す。

さて解析に用いる降水量としては、等雨量線法などの方法により推定した流域平均値を用いるのが望ましいが、Fig. 1 の雨量観

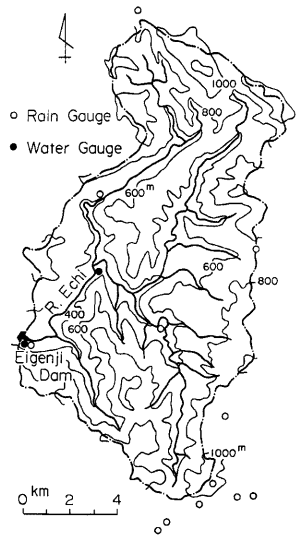


Fig. 1. Outline of the Eigenji Dam Basin.

Table 1. Evapotranspiration used for runoff analysis of the Eigenji Dam Basin (mm/day).

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1.2	1.4	2.2	3.3	3.8	4.0	4.8	5.9	3.9	2.8	1.9	1.2

測点のうち通年観測されているのは、流域の中・下流部にある3地点のみである。この3地点のうちで年間降水量が最大を示す点降水量を用い、これに後述の冬期割増係数を用い、無降雨日には蒸発散があるとして水収支を検討したところ、なお降水量が不足していることがわかった。したがって年間を通しての流域平均日降水量の推定はきわめてむずかしいことになる。そこで今回は簡単に次のようにした。

まず、6～10月の雨量としては、流域周辺の観測値も参照して流域平均的な値を示す地点を月ごとに定め、その地点雨量をそのまま採用した。また他の月については、Fig. 2 に示すように、ハイドログラフの低減傾向が類似している低水期において、流出高がほぼ等しい日を両端にもつ期間を選定して水収支のチェックを行い、水収支がほぼバランスするように、採用する代

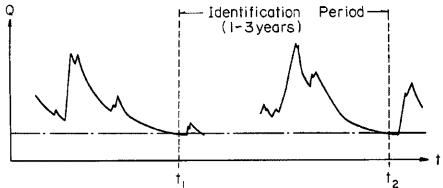


Fig. 2. A period of the water balance check and the parameter identification.

Table 2. Data and results in the Eigenji Dam Basin.

Data used for Identification		Identified Model	Water Balance	Relative Error in Each Section				
No.	Period			4.1	4.2	4.3	4.4	4.6
I	Nov. 20, 1973 — Nov. 8, 1974	E-1	0.005	0.267				
II	Nov. 8, 1974 — Jan. 20, 1976	E-2a	0.005	0.300				
		E-2b	∞	0.301				
III	Nov. 20, 1973 — Jan. 20, 1976	E-3a	0.005	0.295			(0.245)	
		E-3b	0.05	0.312				
		E-5	0.005	(0.317)			0.222	
		E-7	0.005	(0.288)		0.269		
IV	Nov. 20, 1973 — Jan. 1, 1977	E-4	0.005	0.275				
V	Jan. 20, 1977 — Jan. 16, 1979	E-6	0.005		0.260			
		E-8	0.005					0.252

Note: Relative errors are the ones obtained in the identified period.

表観測地点を定めることにした。

実流域におけるこのようなデータ中には、予期できない誤差が含まれている可能性が十分にある。そこで長期流出タンクモデルの最適同定を行う期間としては、データの中から上の条件をみたす Table 2 の期間を選び、残りの期間は流量の予測期間として、ハイドログラフの再現性を検討することとした。

(3) 積雪量・融雪量の取り扱い

積雪量・融雪量の推定には、菅原の方式¹⁾を便宜的に用いることにする。すなわち、流域を高度別に4分割し、冬の各地帯の日降水量 r_i を次式により求める。

$$r_i = r \cdot d_{ij} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 r : 代表点の日降水量、 d_{ij} : 地帯 i , 月 j の割増係数であり、ここでは Table 3 の値を採用する。

Table 3. Adjustment factor of precipitation for snow season over the Eigenji Dam Basin.

Region	Elevation (m)		Area (km ²)	Month, j				
	range	mean		1~3	4	5~10	11	12
1	280- 510	395	32.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	510- 740	625	54.8	1.4	1.2	1.0	1.2	1.4
3	740- 970	855	32.9	1.8	1.4	1.0	1.4	1.8
4	970-1240	1085	10.9	1.8	1.4	1.0	1.4	1.8

地帯ごとの日平均気温 t_i (°C) が 0°C 以下ならば r_i を雪とする。 t_i が 0°C 以上ならば雨として扱い、次式による推定融雪量 s_i を r_i に加えた値をタンクモデルへの入力とする。

$$s_i = \alpha \cdot t_i + r_i \cdot t_i / 80 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 α : 定数で $\alpha=6$ を用いる。

なお t_i は、標高による気温低減率が 0.6°C/100 m として、ダム地点の実測日平均気温を基準に地帯ごとに求める。

本来は、 d_{ij} , α も未知定数と考えた方がよいのかもしれないが、そうすると未知定数が多くなりすぎるために、タンクモデルの最適同定が困難になる。そこで本研究では、積雪・融雪のパラメータは上述の平均的な値を用い、これらの最適値の吟味は行わないことにする。

2.2 一の谷流域

(1) 流域の概要

一の谷流域は、京都市西部に所在する小畑川支川下狩川流域の上流部に位置する。Fig. 3 に下狩川流域の概要を示すが、流域面積は 0.13 km² で、そのほとんどは竹林および雑木林でおおわれている。流域の上流

部の一部は古生層となっているが、大部分は洪積層である。また前述の永源寺ダム流域とは異なり、この流域では積雪はほとんどみられない。

(2) 解析資料

下狩川流域では、われわれの手によって Fig. 3 に示す地点で雨量、水位の観測が行われている。とくに一の谷流域の下流端では三角・台形複合せきが設置されている。

解析の対象とした一の谷の実測流量としては、昭和 50・51 年の 2 年間のものを用いる。日平均流出量は次のようにして求めた。低水時は 3～6 時間ごと、洪水時は水位変化の急激な所を適時読みとり、それを線形補間して算出した。

日雨量は、流域にきわめて近い峰ヶ堂地点の実測値をそのまま流域雨量として用いた。蒸発散量は、京都大学農学部丸山教授の好意によって、同研究室ほ場で観測された計器日蒸発量記録を入手し、それを用いた。また Fig. 2 に示すような期間を抽出して水収支を検討し、これらのデータを解析に用いてよいことを確かめた。

なお後述の最適化のための同定期間を 1 年または 2 年とした場合について検討しているが、以下では 2 年間とも同定期間に選んだ場合の結果を述べる。

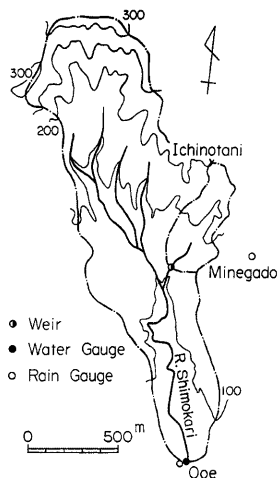


Fig. 3. Outline of the Shimokari Basin.

3. 最適化手法と適用条件

3.1 流出モデルと制約条件

長期流出解析のためのモデルとしては、Fig. 4 の直列 4 段型のタンクモデルを基準とする。このモデルの未知定数は、流出孔の係数 $a_1 \sim a_5$ 、その高さ $c_1 \sim c_4$ (タンクの底からの値)、浸透孔の係数 $b_1 \sim b_3$ 、および初期水深 $h_1 \sim h_4$ の合計 16 個である。

この流出モデルのパラメータ最適値の探索に際しては次のような制約条件を付与する。

- 1) モデル定数は非負である：

$$(a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_3, c_1 \sim c_4, h_1 \sim h_4) \geq 0 \quad (3)$$

- 2) 流出孔高の上下は逆転しない：

$$c_1 - c_2 \geq 0 \quad (4)$$

- 3) 各タンクの流出孔および浸透孔の係数の和が 1 をこえない：

$$\begin{aligned} 1 - (a_1 + a_2 + b_1) &\geq 0, & 1 - (a_3 + b_2) &\geq 0, \\ 1 - (a_4 + b_3) &\geq 0, & 1 - a_5 &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

- 4) 水収支条件：

$$\frac{|\sum Q_o - \sum Q_c|}{\sum Q_o} < \epsilon \quad (6)$$

ここに、 Q_o ：実測流量、 Q_c ：計算流量、 ϵ ：許容限界を表わす小さい正数。

これらの条件のうち、条件 4) は、実は 4.1 の検討の結果得られたものであるが、これも 4 のすべての項の検討に用いるべきと判断されたので、ここでとりあげた。

3.2 最適化手法と適用条件

実用モデルの同定に採用する最適化手法としては、Powell 法⁶⁾ および DFP 法⁷⁾、ならびにわれわれの提

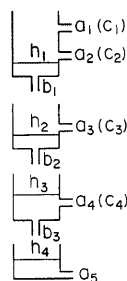


Fig. 4. Unknown parameters of the series tanks model.

案している SP 法（基準化 Powell 法）および SDFP 法（基準化 DFP 法）⁴⁾ のうちの、どれか一つの方法としその選定は数値実験の結果を参照して定める。いずれにしても、最適化手法の適用に際し用いる評価基準としては次の最小 χ^2 基準を採用する。

$$F = \frac{1}{N} \sum \frac{(Q_o - Q_e)^2}{Q_o} \longrightarrow \min. \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 N : データ数。

なお DFP 法では、評価基準の変化こう配を次の中央差分で近似する。

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} \doteq \frac{F(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta x_i, x_{i+1}, \dots, x_{16}) - F(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i - \Delta x_i, x_{i+1}, \dots, x_{16})}{2 \cdot \Delta x_i} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $x_1, \dots, x_{16}$: Fig. 4 のタンクモデル定数に対応する変数、 Δx_i : x_i の増分で $\Delta x_i = 0.01$ とする。

さて上述の方法はいずれもモデル定数に制約がない場合の最適化手法であるが、これに前項で示したモデルとしての制約条件を付与するため、次のようなペナルティ関数 F_P を用いることにする。たとえば、条件 2) ($c_1 - c_2 \geq 0$) の条件については次のようにする。

$$F_P = \begin{cases} 0 & \text{for } c_1 \geq c_2 \\ (c_1 - c_2)^2 & \text{for } c_1 < c_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

条件 1), 3) についてもこれと同様の 2 乗形式のペナルティ関数を用いるが、条件 4) については次のようにする。

$$F_P = \begin{cases} 0 & \text{for } |\Sigma Q_o - \Sigma Q_e| / \Sigma Q_o < \varepsilon \\ \frac{1}{N} |\Sigma Q_o - \Sigma Q_e| & \text{for } |\Sigma Q_o - \Sigma Q_e| / \Sigma Q_o \geq \varepsilon \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

制約条件をこのように処理すると、最終的な評価基準 F は次のようになる。

$$F = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum \frac{(Q_o - Q_e)^2}{Q_o}, & \text{when constraints are satisfied} \\ \beta \cdot F_0 + \sum_{i=1}^m F_{P,i}, & \text{when constraints are not satisfied} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 F_0 : すぐ前のステップでの評価基準の値、 F_P : ペナルティ関数、 m : 制約条件を満足しない条件数、 β : 係数、ここでは $\beta = 1.0 \sim 1.1$ 。

3.3 最適化手法の決定

最適同定に用いる手法を定めるため、次のような数値実験を行った。

まず、あるモデルを想定してこれを真のモデルとみなす。これに永源寺ダム流域の日降水量を適用して流量を算定しこれを観測流量とみなす。ある適当なモデル初期値を定め、上述日降水量、流出量資料を用いて、モデル定数真値を探索する。

この計算では、同定期間を $N=200, 400, 600, 800$ とした 4 ケース、および $N=400$ の同定期間の最初、中央、最後のうちのどれかの連続 50 日間を無降雨期間と置き換える 3 ケースについて検討した。

この数値実験による検討の結果次のことがわかった。

- i) 基準化方式はすぐれている。
- ii) 最適化手法としては SDFP 法がすぐれている。
- iii) もとの日雨量データ中に連続無降雨期間を中央あるいは最後に挿入すると、タンクモデルの真値が求まりや

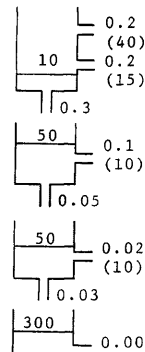


Fig. 5. Initial approximations of the series tanks model for long term runoff analysis in the Eigenji Dam Basin (mm-day).

すくなる。すなわち、同定には豊水年のデータよりも渇水年のデータを用いる方がよい。

この結論のうち i), iii) はこれまでの検討結果^{4,5)}を裏づけるものであるが, ii) は別報⁵⁾での実験結果と一致しない。そこで改めて検討したところ, 変数の順序づけをかえれば SP 法の効率 SDFP 法とほぼ同程度にまで向上することがわかったが, 最良の変数順序づけは依然として不明であった。そこで実流域における長期流出タンクモデルの最適同定には SDFP 法を用いることにした。

なお次節の検討では, 反復計算回数 k は 20 回を基準とする。タンクモデル定数の初期値の一例として, 永源寺ダム流域での解析に用いた値を Fig. 5 に示す。

4. 実用的同定法の検討

4.1 水収支条件を考慮する方法

この問題に関連して, 永源寺ダム流域ではいくつかの場合についてタンクモデルの最適同定を試みた。その概要を Table 2 にまとめて示す。

まず水収支条件を考慮することなく, そのまま最適同定を行って Model E-2b を得た。このモデルによる計算結果を Fig. 6 に示すが, 同定期間内で $\Sigma Q_o > \Sigma Q_c$ となり, その差約 320 mm (ΣQ_c に対する比率: 11.4%) が 4 段目のタンクに貯留されていることがわかった。このために予測期間の流量, とくにその低水流量の再現性が悪い結果となった。さらに他の同定期間についてもタンクモデルの最適同定を行ったが, 上述の欠点を解消することはできなかった。そこで前述の水収支条件を制約条件に加えることにした。

一応 $\varepsilon = 0.005$ を用いて Model E-2a を得た。このモデルによる結果を Fig. 7 に示すが, 同定期間内で $\Sigma Q_o \approx \Sigma Q_c$ となるのは当然としても, 予測期間でもこの関係がほぼ満足されていることが注目される。さらに Fig. 8 に予測期間における流量の再現結果の一部を例示するが, 水収支条件を $\varepsilon = 0.005$ とすることによって, 予測時の流量とくにその低水流量の再現性を著しく改善するモデルが同定されることが了察できるよう。

また同定期間を 1~3 年と変えて得た Model E-1~E-4 による再現性を相対誤差で表示したものを Fig. 9 に示すが, Model E-2a, E-3a, E-4 間に大差はなく, いずれのモデルも良好な結果を与えているとみてよい。

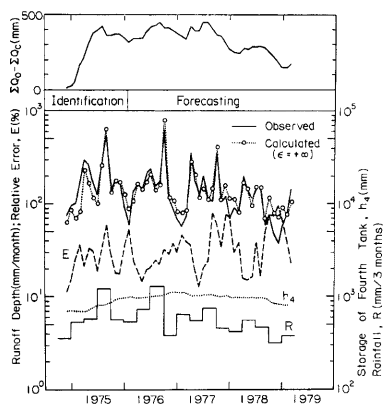


Fig. 6. A macroscopic illustration of the data and the results obtained without the water balance constraint in the Eigenji Dam Basin (Model E-2b).

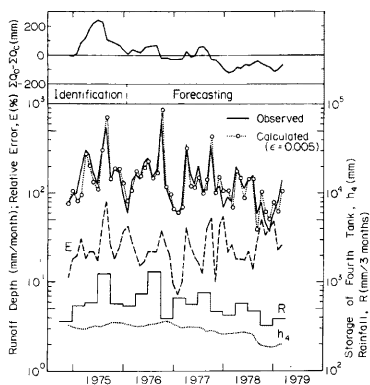


Fig. 7. A macroscopic illustration of the data and the results obtained under the water balance constraint in the Eigenji Dam Basin (Model E-2a).

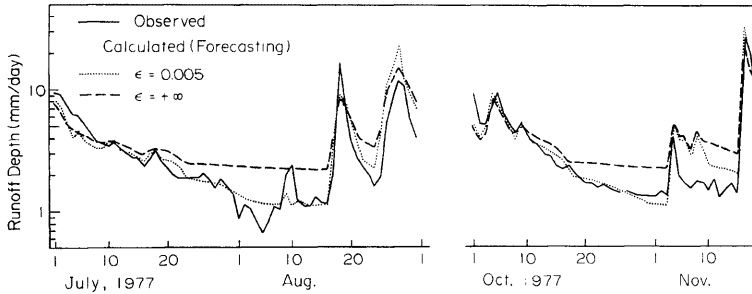


Fig. 8. An example of simulated hydrographs in the Eigenji Dam Basin.

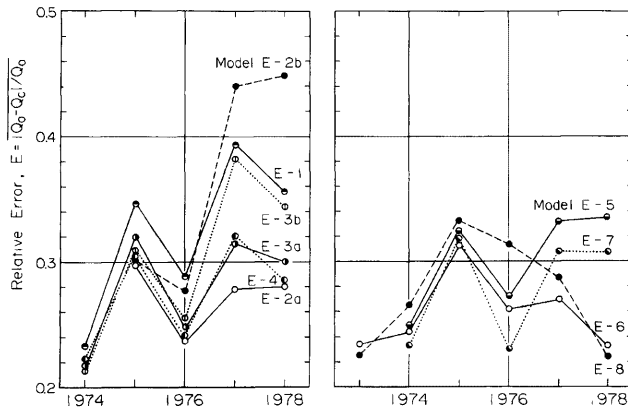


Fig. 9. Relative errors of simulated hydrographs by several models in the Eigenji Dam Basin.

であろう。一例として、Model E-2a による全期間の計算結果を Fig. 10 に示す。これより水収支条件を採用すれば、同定期間が1年程度であっても実用上十分満足できるモデルの得られることがわかる。

流量あるいは雨量の精度から判断すると、 $\epsilon=0.005$ は厳しすぎると考えられる。そこで水収支条件を $\epsilon=0.05$ に緩めて Model E-3b を得た。Fig. 9 に示されるようにこのモデルによる相対誤差は、 $\epsilon=0.005$ を採用した Model E-3a の値よりも大きい。すなわち、 $\epsilon=0.05$ よりも $\epsilon=0.005$ の方がよいという結果になった。一方、一の谷流域についても同様な検討を行ったところ、水収支条件は必要であるが、 $\epsilon=0.05$ としてもよいことがわかった。両流域における許容限界 ϵ の相違の示唆するところは次の2点にあると解釈できる。

まず第1の点は誤差総量の点である。年間の総流出高が約2500 mmもある水源寺ダム流域では、 $\epsilon=0.005$ の条件を緩和すると、タンクに貯留される余分の水量 ($\Sigma Q_o - \Sigma Q_c$) をかなりの量まで許容してしまうところに問題がある。すなわち絶対量 $\epsilon \cdot \Sigma Q_o$ でもって水収支条件に限界を設ける必要がある。これは同定期間を長くとしたときに特に考慮すべき問題となろう。第2の点は資料の精度の問題である。数値実験では実測値に誤差がないために水収支条件にこだわる必要がなかったことから推論すると、一の谷流域では、流量と雨量の精度がよいために、水源寺ダム流域におけるほど厳しい ϵ の値を採用しなくてよかった、ということになるように思われる。

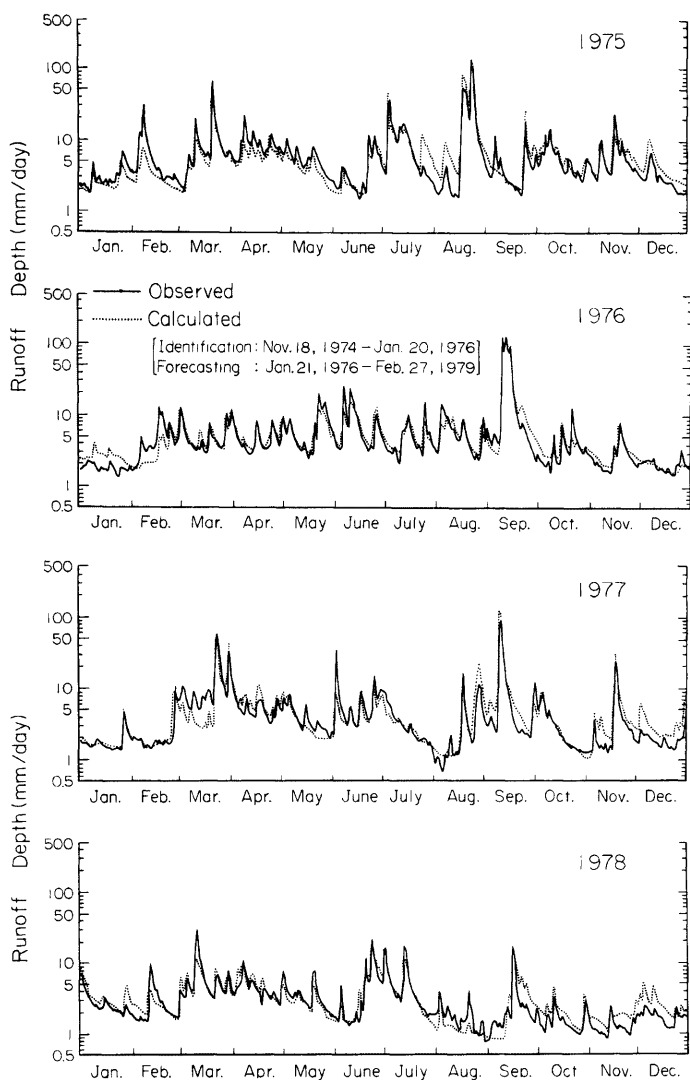


Fig. 10. An example of simulated hydrograph in the Eigenji Dam Basin (Model E-2a).

Fig. 11 は、永源寺ダム流域において同定された各モデルの流出孔および浸透孔の係数を示している。水収支条件を採用しない Model E-2b の a_4 は他のモデルの値に比べてかなり小さいこと、予測期間の流量の再現性のあまりよくない Model E-1, E-2b, E-3b はいずれも 4 段目の定数 a_5 が他のモデルの値よりも小さめになっていることがわかる。これから、流量を精度よく予測するには 4 段目の定数 a_5 の値の推定が重要

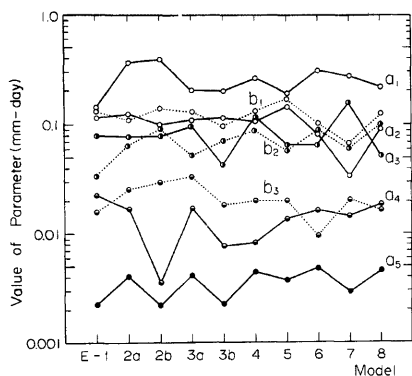


Fig. 11. Parameters of the series tanks models identified in the Eigenji Dam Basin.

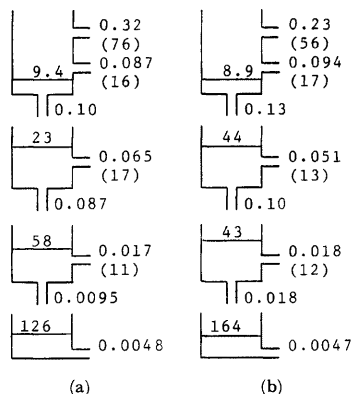


Fig. 12. Parameters of the series tanks model identified by the data of (a) the drought years and (b) the no-snow season, in the Eigenji Dam Basin.

であること、このためには適切な ε を水収支条件に用いるべきことがわかる。

そこで以下の検討では、永源寺ダム流域ではすべて $\varepsilon=0.005$ 、一の谷流域では $\varepsilon=0.05$ を採用することにした。

4.2 渇水年のデータを用いて同定する方法

昭和53年が渇水年であったことは Fig. 7 からうかがえるが、この年を含んだ期間、Table 2 V, を同定期間として、Fig. 12(a) の Model E-6 を得た。同定および予測を含めた全期間の再現性をみると、このモデルによる結果が最良となっている。このことは、渇水年のデータを用いるとタンクモデルの真値が求まりやすいという前述の数値実験結果、あるいは別報⁵⁾で述べたことを実証するものと判断してよい。

またこれらのことから単純に推論するならば、Fig. 12(a) のモデルは、永源寺ダム流域を対象に検討したものの中で一番真値に近いモデルといえる。なおこのモデルは昭和52・53年のデータを同定に用いたものであるが、Fig. 9 の誤差は Fig. 12(a) の初期水深をそのまま昭和47年10月1日に用いて全期間を計算し、その結果のうち、水深安定に必要と思われる最初の2カ月を除外したものを示している。

4.3 高水部の流量を誤差評価の対象外とする方法

同定に利用できるデータ中には、永源寺ダム流域の場合のように渇水年のものが常に含まれているとは限らない。そこでこれに代わるものとして、高水部の流量を誤差評価の対象外とする方法を検討してみた。なお高水部とは流量を大きい順に並べた場合の上位1/4までの順位に入っている流量とする。このため同定に用いるデータ数は全体の3/4に減少することになる。

一の谷流域では Model I-4 を得た。このモデルによる計算結果の一部を、水収支条件のみを考慮して同定された Model I-1 による結果とともに、Fig. 13 に例示する。この方式を採用することにより、高水部の流量波形がシャープになりやすいが、低水流量の再現性が向上することがわかる。

永源寺ダム流域でも同様にして、同定期間 III について Model E-7 を得た。Fig. 9 からこのモデルは、同定の対象外とした高水部の流量も含めると、渇水年のデータで同定された Model E-6 よりも再現性は若干劣るが、それでも同定期間 III で水収支条件のみを考慮して得られた Model E-3a よりも良好な結果を与えていることが注目される。すなわち、この方法の実用性は十分であると評価できる。

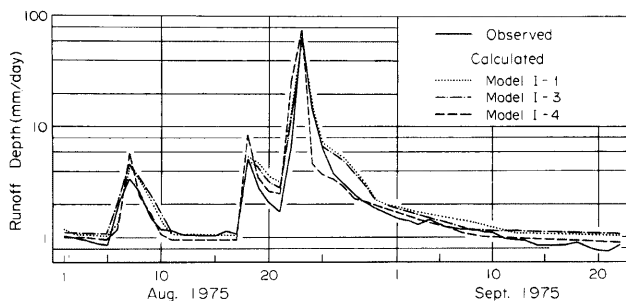


Fig. 13. Part of simulated hydrographs in the Ichinotani Basin.

4.4 流量の時間ズレを許容する方法

一般に雨は夜間に降ることが多いが、このような雨による出水は当日ではなく翌日に現れることになる。したがって日単位データを用いる限り、計算流量が実測流量よりも1日早く現れる可能性の大きいのはやむを得ない。本来はこのような時間ズレを誤差として扱うかどうか、許容するとした場合には評価方式をどのようにするかが問題となる。しかしここでは単純に計算値と当日実測値または翌日実測値との差のうち小さい方の誤差を(7)式に用いることにした。

このようにして、永源寺ダム流域では同定期間 III について Model E-5 を得た。この評価はむずかしいが、このモデルによる計算結果を、ズレを許容する場合と許容しない場合について比較すると、同定期間内の相対誤差に10%もの差を生じている。

一の谷流域でも同様にして Model I-3 を得た。このモデルによる計算結果の一部を Fig. 13 に併示しているが、水収支条件のみを採用した Model I-1 の結果と比較して、高水部でも大差のない良好な再現性を与えていることがわかる。また Fig. 14 は、実測流量を大きさの順に並べて、4 個の流量段階に区分し、それぞれの領域における相対誤差平均値を各モデルについて示したものである。流量の時間ズレを許容することにより、高水部の相対誤差が大幅に減少し、低水部の相対誤差とほとんど同程度になることが注目される。

一般に高水部の流量は日単位データでは表現しきれない、もっと短時間単位の雨量波形に左右されると考えられるから、時間ズレを許容することによってこの影響が減殺されるとみることができ、Fig. 14 はこのようなことを示唆しているものとみられよう。またタンクモデルによって長期流出特性がよく表現できるものとすれば、上述のような評価法を用いることにより、より真値に近いモデルが同定できるものと期待されよう。

4.5 高水部流量を除外し、時間ズレを許容する方法

高水部を誤差評価の対象外とする 4.3 の方法と、時間ズレを許容する 4.4 の方法を組合わせた方式を検討し、一の谷流域で Model I-5 を得た。

Fig. 14 では同定対象外とした高水部の誤差も評価して示してあるが、Model I-4 との比較で時間ズレを許容する効果がみられ、また高水部を除くと、このモデルによる結果は

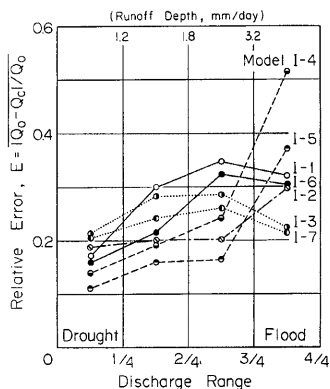


Fig. 14. Comparison of the error in every frequency domain of discharge, in the Ichinotani Basin.

検討したもののうちで最良となっている。また日雨量が少ない場合のわずかな流量の変動もかなりよく再現していた。

なお、ハイドログラフの高水部に対する再現性は、4.3 で得た Model I-4 と同様にシャープな波形を与えることとなり、これを問題にするならば、ここに若干の問題があるといえよう。

4.6 積雪・融雪期を同定期間からはずす方法

前に断ったように、この研究では積雪・融雪に関するパラメータの最適値の吟味は行っていない。すなわち積雪・融雪期（1～4, 11, 12月）の資料にはかなりのあいまいさが含まれている。そこでこの期間を同定期間から除くと、これまでに得られたモデルと大幅に異なったモデルが同定されるかどうかを、永源寺ダム流域のデータに基づいて検討してみた。同定期間 V で得られた Model E-8 を Fig. 12(b) に示す。真値に一番近いのではないかと目される Fig. 12(a) のモデルと大差のない定数が同定されており、同定期間内の誤差は Model E-6 をわずかに改善した形になっている。Model E-8 による全期間の流量の再現性は、積雪期のウェイトが大きいため他の場合に比べて若干劣るが、そう悪くはない (Fig. 9)。

永源寺ダム流域における上述の結果は、解析に先立って行った水収支の吟味の中に、すでに雪の影響が加味されていたためであるかも知れないが、不確かな雪の期間を同定期間から外す方法は一顧の価値があると考えられる。

4.7 モデル構造の改良と制約条件の検討

(1) モデル構造の改良

計算ハイドログラフの再現性を更に向上させるために、一の谷流域を対象として、上で得たモデル定数の最適性を保ちつつ、モデル構造を改善する方式について検討した。水収支条件のみを用いて同定された Model I-1 を基準として、これの1段目のタンクの最上位に流出孔を1個、4段目のタンクに浸透孔を新たに付加し、これを初期値に用いた。 $\epsilon=0.05$ の下で同定した結果 Model I-6 を、さらに時間ズレを許容する方式で Model I-7 を得た。これらのモデルを Fig. 15 に、同定期間の誤差を Fig. 14 に示す。また Model I-6 による全期間の計算結果を Fig. 16 に示す。

両モデルとも4段目の浸透孔の係数はきわめて小さく、実用上大きな意味を持たない結果となっている。

次に1段目のタンクの流出孔についてみる。Model I-6 では、計算上生じた1段目のタンクの最大水深は175 mmであったから、最上位にある流出孔は流出計算には無関係という結果となっている。すなわちこのモデルは最上位にある流出孔のないモデルと全く同じとなっている。一方 Model I-7 の最上位の流出孔は計算流量の改善に寄与していた。

これらのことからここに用いた SDFP 法の利点は、新しく付加した流出孔が不必要ならばそれを実用上無意味なものとし、また必要ならばそれを組み込んだモデル構造で最適化を行うことができるという2段階の点にあるといえる。

(2) 制約条件の検討

1段目のタンクの流出孔を3個とする上述のモデルには、(5) 式の条件は厳しすぎると判断された。そこで Model I-6, I-7 の同定では、次の条件を採用した。

$$5) \quad 1 - (a_0 + a_1 + a_2 + b_1) + \frac{a_0 c_0 + a_1 c_1 + a_2 c_2}{(r \cdot Q_{\max} + a_0 c_0 + a_1 c_1 + a_2 c_2) / (a_0 + a_1 + a_2)} \geq 0 \quad (12)$$

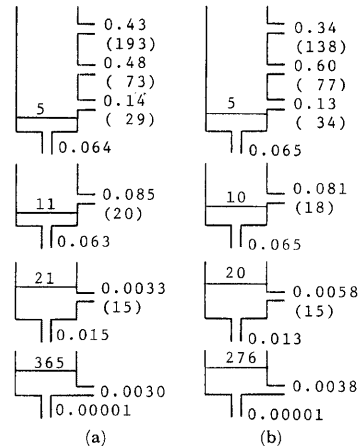


Fig. 15. Identified parameters of the modified series tanks model, (a) Model I-6 and (b) Model I-7.

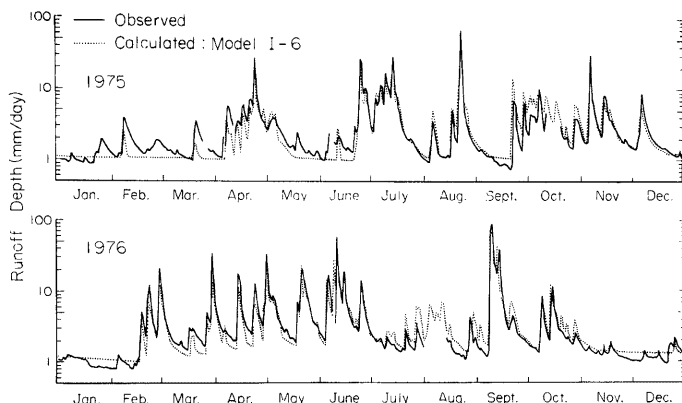


Fig. 16. An example of simulated hydrograph in the Ichinotani Basin.

$$6) \quad a_0 \leq 1, \quad a_1 \leq 1, \quad a_2 \leq 1, \quad b_1 \leq 1 \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 a_0, c_0 : 1 段目のタンクの流出孔を 3 個としたモデルの最上位の孔の係数とその高さ。 $Q_{\max}$: 実測流出高の最大値、 γ : 係数、ここでは $\gamma=1.1$ 。

(12) 式の条件は、計算上生じる 1 段目のタンクの最大水深 $h_{1\max}$ よりも多くこのタンクからは出ていけないという条件を若干変形したものである。すなわち、 $\gamma \cdot Q_{\max}$ が 1 段目のタンクのみで表現されるときに水深を $h_{1\max}$ の代わりに用いている。

当初、(13) 式の条件は不必要と考えていた。しかしその後の検討で、流出孔の係数が 1 をこえることを経験した。ほとんどの場合 (13) 式の条件をつけなくても、これを満足するモデルが得られるが、(12) 式の条件を用いる場合には (13) 式の条件も同時に採用するのが望ましいと考えている。

5. む す び

永源寺ダム流域および一の谷流域を対象に、数学的最適化手法のひとつである SDFP 法を用いて、長期流出タンクモデルの実用的同定法をいくつか検討した。その結果、水収支条件を考慮すること、渇水年のデータで同定すること、高水部の流量を評差評価の対象外とすること、実測値と観測値の時間ズレを許容すること、モデル構造を改良することなどにより、モデル同定方式の実用性を向上させることができた。この中でとくに、水収支条件はタンクモデルの最適同定には必要不可欠と考えられることを強調した。

上記 2 流域の他にも、一の谷流域に近接するカマ谷流域 (0.24 km^2 , 古生層) を対象として、同様な解析を行ったが、一の谷流域と類似した結果が得られているので、本文ではあえて述べなかった。

また上述の同定法の実用性を更に高めるには、今後の検討の必要な点もいくつかある。たとえば、永源寺ダム流域における流域平均降水量の取扱い、あるいは積雪・融雪のパラメータの最適値の吟味などの問題点が残されているが、これらについては別の機会に検討したいと考えている。

末尾ながら、永源寺ダム流域の資料の供与その他いろいろとお世話になった農林水産省愛知川農業水利事業所、貴重な計器蒸発量の記録を心よく提供して頂いた京都大学農学部丸山利輔教授、永源寺ダム流域周辺部の雨量記録の利用を快諾頂いた京都大学防災研究所防災資料センター後町幸雄助教授の方々に謝意を表す。

なお計算には京都大学化学研究所 FACOM M-160 AD を用いた。

参 考 文 献

- 1) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972.
- 2) 小林慎太郎・丸山利輔：Powell の共役方向法によるタンクモデル定数の探索，農業土木学会論文集，第65号，1976, pp. 42-47.
- 3) 菅原正巳：続・流出解析法，共立出版，1979.
- 4) 永井明博・角屋 睦：流出モデル定数の最適化手法，京都大学防災研究所年報，第22号 B 2, 1979, pp. 209-224.
- 5) 永井明博・角屋 睦：タンクモデルの最適同定法に関する基礎的検討，京都大学防災研究所年報，第23号 B 2, 1980, pp. 239-247.
- 6) Powell, M. J. D.: An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives, The Computer Journal, Vol. 7, 1964, pp. 155-162.
- 7) Fletcher, R. and Powell, M. J. D.: A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization, The Computer Journal, vol. 6, 1963, pp. 163-168.