

II - 7

損失を考慮した貯留関数のパラメータ総合化

(財)北海道河川防災研究センター 正会員 平澤 陽一  
 開発土木研究所環境水工部河川研究室 正会員 馬場 仁志  
 開発土木研究所 正会員 星 清

1. はじめに

従来的一般化貯留関数法による流出解析では、基底流出の分離およびそれに伴う流出率の算定が必要である。一方、貯留関数法に損失機構を考慮し、流出率を使わないモデルの研究が行われており、実データへの適合性が高まっている<sup>1,2,3)</sup>。

貯留関数のパラメータ最適値は、基底流出分離の影響を受けるため、この作業が省略されているモデルを用いることにより、パラメータ総合化がより客観的に行えると考えられる。

本論は、損失を考慮した貯留関数モデルによる適合性の検討と、その際得られるモデルパラメータの総合化を目的として、最適化されたパラメータの性質を調べた。ここで用いる貯留関数モデル<sup>1)</sup>は、入力系に実績雨量を直接使い、貯留量～流量の二価性を考慮しており、さらに損失機構を加味したものである。

2. 損失機構を取り入れた貯留関数モデル

損失機構を扱わない貯留関数としては、以下の非線型二価関数モデルが実現象との適合性において優れていることが明らかにされている<sup>4)</sup>。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \quad \dots (1) \quad \frac{ds}{dt} = r_e - q \quad \dots (2)$$

ここに、 $s$ :貯留高(mm)、 $q$ :流出高(mm/h)、 $r_e$ :有効雨量( $r_e = r \times f$ 、 $f$ :流出率、 $r$ :観測雨量)、 $k_1, k_2, p_1, p_2$ :モデルパラメータである。

(2)式において、 $r_e$ に代えて、 $r$ を直接用いるとともに損失項 $p$ を加えると、(3)と(4)式で表現される。

$$\frac{ds}{dt} = r - q - p \quad \dots (3) \quad p = \alpha q \quad \dots (4)$$

これを(2)式と比較すると、貯留に対する調整を、インプット側からアウトプット側に変更したのとも言える。 $p$  (損失高、mm/h)については、実現象において蒸発散、浸透、森林内の葉面貯留などが含まれているため、正確な物理モデルとしてはきわめて複雑な形式となる必要があるが、今回は、単純な線形項を導入した上で、当モデルの有用性について検討することとした。

モデルパラメータについては、 $k_1, k_2, p_1, p_2$ に $\alpha$ を加えて、5個の同定が必要であるが、(1)、(2)式において、表面流にマニング則を想定する場合、 $p_1=0.6, p_2=0.465$ となることが知られている。 $k_1, k_2$ は等価粗度、流域勾配および平均雨量強度の関数と考えられるが、実測水文資料による同定の結果では、これらのパラメータがハイドログラフごとに変動が大きい。以上のことから、 $k_1, k_2, \alpha$ の3個を総合化パラメータの対象とする。

### 3. 実測データへの適用

モデルの適用性を確認するために、北海道内の流域規模の異なる以下の4河川による76個の実測データを用いて流出解析を行った。モデルパラメータの最適化はニュートン法による。

- 石狩川（大流域）の各観測所：昭和56年8月上旬洪水
- 鶴川（中流域）：平成4年夏期洪水
- 輪厚川（小流域）：昭和47年～61年の出水
- 豊平川上流（山地森林域）：平成6年～8年の出水

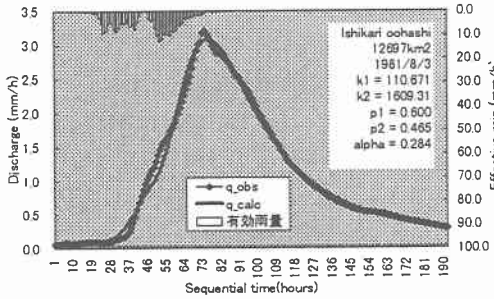


図1 流出解析例（石狩川）

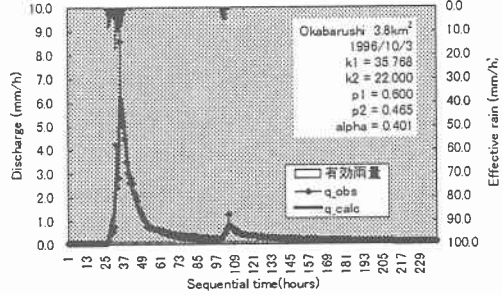


図2 流出解析例（オカバルシ川）

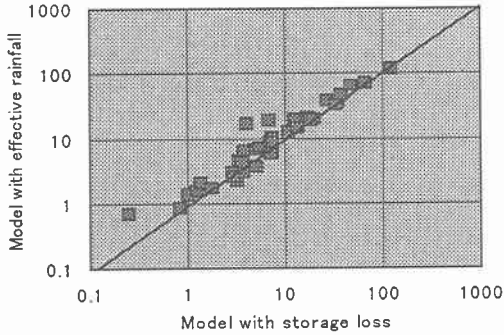


図3 モデルの違いによる最小二乗誤差の比較

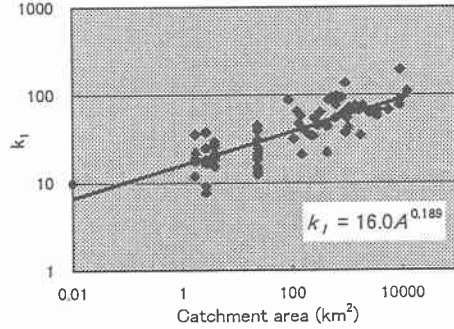


図4 最適化された $k_1$ の分布

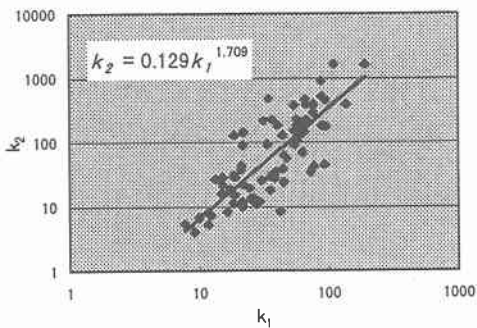


図5  $k_1, k_2$ の最適値分布

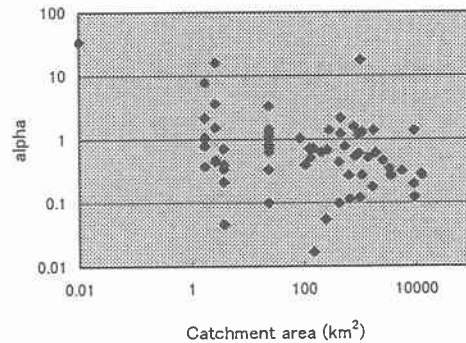


図6 流域面積 $A$ と $\alpha$ の関係

図 1 および図 2 には、損失を考慮した貯留関数モデルによる流出解析の結果から、石狩川本流の石狩大橋地点と、豊平川支流のオカバルシ川について例示した。この例を含む 76 ハイドログラフに関して従来法による解析結果と比較したところ、特にハイドロ立ち上がり部分と低減部が改良され、実現象により近い結果が得られている。

石狩川の各観測所のデータを用い、基底流出を分離して流出率を求めた従来の方法と、損失機構を考慮した今回のモデルによる実測値と計算値の最小二乗誤差を比較したものが図 3 である。それぞれの最小二乗誤差の平均は、流出率によるモデルが 16.98、損出機構を考慮したモデルが 14.50 となり、後者の方が実データへの適合性が高まったと言える。

損出を考慮したモデルにより、上記 4 河川の実測データの解析を行って得られたモデルパラメータ  $k_1$  を流域面積に対してプロットした (図 4)。これをもとに、近似関数を求めると  $k_1 = 16.0A^{0.189}$  となる。また、 $k_2$  について  $k_1$  との相関を求めると、関係式  $k_2 = 0.129k_1^{1.709}$  が求められた (図 5)。さらに、図 6 は流域面積  $A$  ( $\text{km}^2$ ) と  $\alpha$  との関係であるが、 $\alpha$  のばらつきが大きいため一般化した関係は得られていない。

次に、降雨中におけるモデルパラメータの時間変動を、図 1 に示した石狩川のデータ (1981 年 8 月洪水) を用いて検討した。これは、1 回の降雨データの開始から 48 時間分の連続データを抽出して流出解析を行い、これを 1 時間ずつずらしてデータの最後まで繰り返し、1 時間ごとのモデルパラメータの変動を見たものである。この作業を抽出時間=72 時間および 96 時間についても同様に行い、これを比較した。図 7~9 は 48、72、96 時間で求められたパラメータ  $k_1, \alpha$  の関係を示したものである。この図よりデータの抽出時間が長いものほど変動が少なくなると同時に、 $k_1$  と  $\alpha$  の変動に類似性が見られた。

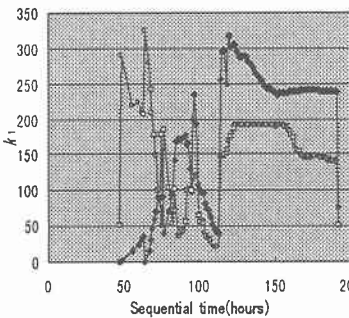


図 7  $k_1$  と  $\alpha$  の関係 (48hr)

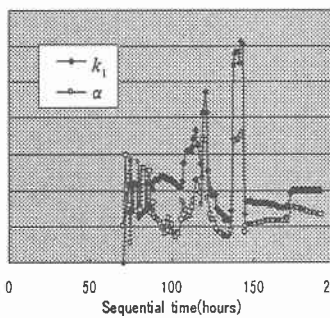


図 8  $k_1$  と  $\alpha$  の関係 (72hr)

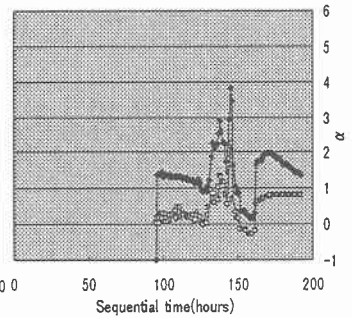


図 9  $k_1$  と  $\alpha$  の関係 (96hr)

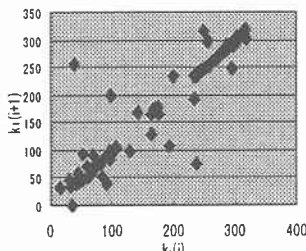


図 10  $k_1$  のカオス判定

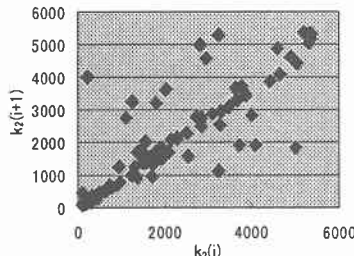


図 11  $k_2$  のカオス判定

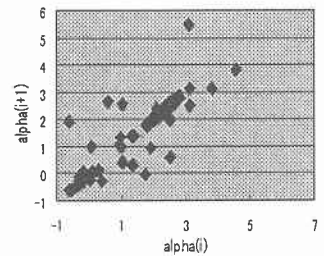


図 12  $\alpha$  のカオス判定

また、変動の大きい 48 時間抽出データから得られたパラメータ  $k_1, k_2, \alpha$  について、パラメータの背後に存在する非線型性を識別するためカオス判定を行う。これは、ある系列  $p(i)$  において  $p(i)$  対

$p(t+1)$  をプロットして二次元のグラフで表す。もし  $p(t)$  がランダムな集合であればプロットもランダムになるが、何らかの規則性が見られた場合、予測可能な現象が存在することを意味している。判定の結果を図 10～12 に示すと、いずれの結果もランダムなノイズのほかにも明らかな直線形の集合が見られ、変動に規則性が認められることから、これらのパラメータには継続性があると言える。

#### 4. 結果と考察

- 1) 損失機構を考慮した総合貯留関数モデルと従来法を、実データとの最小二乗誤差による比較をした結果、損失を考慮したモデルでは誤差が減り、実データとの適合性が高まった。
- 2) 損失機構を考慮した総合貯留関数モデルを用いて、流域規模の異なる 4 河川において流出解析を行いモデルパラメータの総合化を図った結果、以下のような関係が得られた。

$$k_1 = 16.0A^{0.189} \quad \dots (5)$$

$$k_2 = 0.129k_1^{1.709} \quad \dots (6)$$

$$p_1 = 0.6 \quad \dots (7)$$

$$p_2 = 0.465 \quad \dots (8)$$

ただし、損出高を規定する  $\alpha$  については、降雨ごとの変動が大きく、一定の規則性を見いだすことはできなかった。これは、 $k_1, k_2$  が流域の規模および植生などの特性に対応した静的なパラメータであるのに対し、 $\alpha$  は降雨時の流域の湿潤・乾燥状態や他の気象条件に左右される動的なパラメータであることに起因すると考えられる。

- 3) 石狩大橋における 1981 年 8 月洪水のデータを用いて、降雨中におけるモデルパラメータの時間変動を調べた結果、データの抽出時間が長いものほど、 $k_1$  と  $\alpha$  の変動が類似したものとなった。また、パラメータのカオス判定を行った結果、パラメータの継続性が見られることから、実時間における流出解析において、逐次決定したパラメータの有効性がある程度継続すると思われる。したがって洪水予測などの実時間流出解析においては、当モデルを用いたシステムを作成することが有効であると考えられる。また、損出高の逐次同定においては、データ数が多くなるに従い  $k_1$  との相関性が高まることが予想される。

#### 5. おわりに

今回のモデルは、損失項を単純な線形一価の関数としたが、損出高が中間流出として貯留および再流出に分離されることをモデル化することも考えられる。嵯峨は、2 段タンクモデルの貯留高を非線型とした検討によって、これらの有効性を実証している<sup>3)</sup>。今後の課題として、物理的なパラメータの意味の解明が残されている。

#### 参考文献

- 1) 馬場仁志、星 清：損失機構を取り入れた総合貯留関数法の試み、第 52 回年次学術講演会講演概要集、第 2 部、pp.316～317, 1997
- 2) 田中敦、藤田睦博、清水康行：損失機構を含む貯留関数法に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、第 53 号(B)、pp.54～59, 1997
- 3) Hiroshi Saga, Kiyoshi Hoshi, Norihide Hashimoto : Runoff Analysis by the Quasi-Tank Model, Proceedings of The Second Japan-South Korea Bilateral Seminar on Water Resources and Environmental Research, pp.67～70, 1997
- 4) 星 清、山岡勲：雨水流法と貯留関数法との相互関係、第 26 回水理講演会論文集、pp.273～278, 1982