

II-41

パソコンを用いた流出解析・予測プログラムについて

開発土木研究所	正員	渡辺和好
留萌開発建設部	正員	中村興一
開発土木研究所	正員	星清

1. はじめに

現在北海道開発局で管理を行っているダムでは、流出解析手法として貯留関数を用いられている。管理ダムでは、洪水時の洪水調節計画立案、但し書き操作移行時間の推定などを目的として流出解析を行っている。しかしながら、流出解析は計算に時間がかかるために、計算に使用する機種は計算速度を選定基準とされてきた。その結果、現在管理ダムに導入されているコンピュータの操作性は非常に悪いものとなっている。近年、計算機の機能向上はめざましく流出計算もパソコンを用いることが可能となってきている。パソコンを用いた場合の利点は、操作性が向上する点である。洪水時などの異常時において操作性は的確な操作を行う上で非常に重要な要素である。

また、上記の流出解析においては、有効降雨の取扱いが大きな問題である。現在、有効降雨は降雨に流出率を一定に乗じて求めている。流出率は、流域の状態により大きく変化するが、現状では流域の状態を取り込んで流出率を決定する方法がない。その弊害として、総降雨量が少ない降雨の流出解析の適合性が低い。

以上の問題点を踏まえ、ダム管理所で使用する目的で、操作性に優れ、流出解析・予測計算時間が短く、総降雨量の違いを考慮できる有効降雨の考え方を導入した「パソコンを用いた流出解析・予測プログラム」を開発したのでここに報告する。

2. 流出解析・予測モデルの概要

流出解析・予測プログラムに使用している有効降雨算出モデル、流出解析モデル、流出予測モデルについて以下に述べる。

1) 有効降雨算出モデル

降雨の流出率は降雨中一定ではなく、変化することは広く知られている。これは降雨初期において降雨の一部が土壌に保水されたり、地上のくぼ地に貯留されるために河川に流出しないためであり、降雨後期においては、土壌が飽和する事によって保水できずに降雨が流出することに起因する。

ここで、降雨が流出せず保水される量を保水能と呼ぶ¹⁾。

保水能は流域内で地被状態や土壌によって様々な値を持つ。一つの保水能をもつ面積が流域全体に占める割合を保水能分布と呼ぶ。

保水能を図-1に示すようなタンクに見たてて考える。流域に総雨量 R の降雨があった場合、流出に寄与するのは保水能 h が総雨量 R より小さいタンクからで、図中の斜線で示した部分である。保水能分布を $S(h)$ 、総降雨量 R 、総損失雨量 $F(R)$ の関係は次式で表される。

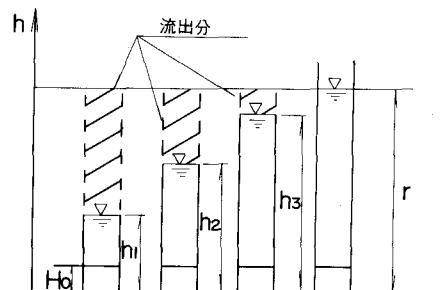


図-1 保水能の概念図

$$F(R) = R - \int_0^R (R-h) S(h) dh \quad \dots (1)$$

ここで、 $(R-h)$ とは、ある保水能 h からあふれでる量、すなわち流出成分を表し、 $S(h) \cdot \Delta h$ はある保水能 h が h_1 と h_2 の間に存在する割合を示す。本プログラムでは、総損失雨量 $F(R)$ 、総雨量 R の関係を次式で近似した。

$$F(R) = a \cdot \tanh(bR) \quad \dots (2)$$

(2) 式を(1) 式に代入して整理すると、保水能分布 $S(h)$ は次式で表される。

$$S(h) = 2ab^2 \frac{\sinh(bh)}{\cosh^3(bh)} + (1-ab) \delta(h) \quad \dots (3)$$

(3) 式中の $(1-ab)$ は保水能 = 0、すなわち不浸透部分（正確には川とその周辺などを含む）の面積率を表している。

次に、保水能分布の概念を用いて有効降雨を算出する方法を示す。 t 時刻までの累加雨量を $R(t)$ とすると、保水能分布の考え方より流出に寄与するのは流域に降った雨のうち、保水能 h が $R(t)$ よりも小さい部分である。保水能が $R(t)$ 以下の面積割合は、保水能分布 $S(h)$ を $0 \sim R(t)$ の範囲で積分することによって求めることができる。したがって、 t 時刻における有効降雨を $u(t)$ 、実測雨量を $r(t)$ とすると、有効降雨は次式のようになる。

$$u(t) = r(t) \int_0^{R(t)} S(h) dh \quad \dots (4)$$

ただし、(4) 式は流域が乾燥状態にある場合にのみ適用可能である。多くの場合、流域は大なり小なり湿润状態にあるので、これを考慮して保水能の初期水分量を H_0 とすると(4) 式は次式のように書き改める。

$$u(t) = r(t) \int_0^{H_0+R(t)} S(h) dh \quad \dots (5)$$

(5) 式を整理すると(6) 式が得られる。

$$u(t) = r(t) [ab \cdot \tanh^2(b(H_0+R(t))) + (1-ab)] \quad \dots (6)$$

ここで、(6) 式を用いて有効降雨を算出すると、流出率の下限値は $(1-ab)$ となる。そのために実際の流出率が $(1-ab)$ 以下の場合に不都合が生じる。本プログラムでは、上記の点を考慮し有効降雨の算出にあたっては、 $ab=1$ としている。

2) 流出モデル

流出解析モデルで問題となるのは、モデルに含まれるパラメータの物理的根拠である。従来の流出解析モデルではこの点が不明確となっていた。星らは、等価粗度法による解から貯留量～流量の関係を次式で表現するのが最適であるとしている²⁾。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \quad \dots (7)$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q \quad \dots (8)$$

$$p_1 = 0.6 \quad \dots (9)$$

$$p_2 = 0.4648 \quad \dots (10)$$

$$k_1 = 2.823 f_c A^{0.24} \quad \dots (11)$$

$$k_2 = 0.2835 k_1^2 \bar{r}^{-0.2648} \quad \dots (12)$$

ここで、 s :貯留高(mm)、 q :流出高(mm/hr)、 r :有効雨量(mm/hr)、 $\bar{r}$:平均有効雨量(mm/hr)、 t :時間(hr)、 k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 :モデルパラメータ、 n :等価粗度、 i :斜面勾配、 A :流域面積(km²)、 $f_c: (n/\sqrt{i})^{0.6}$ で表される未知定数

(11)式で与えられる k_1 は木村によって提案された総合貯留関数法の貯留係数に対応する。なお、ファクター $f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6}$ の値に関しては、 f_c の値が減少するにつれてピーク流量が増大し、ピーク生起時刻が早まる。

また、本モデルは全道小流域洪水例99ケースに適用し、実用上十分な精度を持つことが確認されている。

3) 流出予測モデル³⁾

流出予測モデルは、前節の流出解析モデルを用いる。

(7)、(8)式を線形化するため、次式のように変数変換する。

$$x_1 = q^{p_2} \quad x_2 = \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \quad \dots (13)$$

(13)式を(7)、(8)式に代入し、これをテイラー展開によって線形化し、かつ差分化すると次式が得られる。

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + \Gamma_k B_k \quad \dots (14)$$

(14)式を用いることにより、 $k+1$ 時刻の状態量 X_{k+1} を数値的に求めることができ、かつカルマン・フィルター理論を適用し、状態量の更新及び状態量の有する誤差を計算することができる。ただし、(14)式ではモデル定数の誤差を状態量の誤差に反映させることはできない。よって形式上、モデル定数を状態量に加えシステム方程式を拡大する。すなわち、

$$X_1^T = [x_1 \quad x_2] \quad \dots (15)$$

$$X_2^T = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad f] \quad \dots (16)$$

ここで、 f :流出率、 I は行列の置換を表す

このように状態量を拡大すると(14)式は次式のように書き換えられる。

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ O_1 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ O_2 \end{bmatrix} (d_2)_k \quad \dots (17)$$

この時、状態量の誤差分散、共分散は次式で表される。

$$P_k = E \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 & \tilde{X}_2 \end{bmatrix}_k \right\} = \begin{bmatrix} P_{1,k} & P_{2,k} \\ P_{2,k}^T & U_k \end{bmatrix} \quad \dots (18)$$

ここで、 $\tilde{X}_k$: 状態変量の推定誤差、 $P_{1,k}$: X_1 に関する (2×2) の分散・共分散行列、 $P_{2,k}$: X_1 と X_2 に関する (2×5) の共分散、 U_k : X_2 に関する (5×5) の分散・共分散行列

(13)式より流量は次式で求められる。

$$q = x_1^{1/p_2} \quad \dots (19)$$

したがって、観測方程式は次式ようになる。

$$z_k = x_1^{1/p_2} (1 + V_k) \quad \dots (20)$$

ここで、 z_k : サンプル時刻 k における流量観測値、 V_k : 観測誤差
カルマンゲインは(21)式、状態量の更新は(22)式で計算される。

$$K_k = P_k (-) H_k^T [H_k P_k (-) H_k^T + R]^{-1} \quad \dots (21)$$

$$\hat{X}_{1,k} (+) = \hat{X}_{1,k} (-) + K_k [z_k - \hat{X}_{1,k} (-)^{1/p_2}] \quad \dots (22)$$

ここで、 $(-)$ 、 $(+)$ の記号はそれぞれ、流量観測値情報入手直前と直後を意味する。

3. プログラムの概要

1) 機器構成

本プログラムはMS-DOSフォーマットのコピーディスク2枚に納めてあり、プログラムを使用するためのコンピュータ及び周辺機器の機種構成として環境研究室で使用している機器構成を紹介する。本体はPC-9801DA/U7 (計算速度を早めるために数値演算プロセッサを付加した)、ディスプレイは15インチカラー、3.5インチフロッピーディスク2ドライブ、プリンタはカシオのページプリンター、マウス。

2) プログラムの概要

流出解析・予測プログラムの概要を図-2に示した。

本システムでは、

- ・洪水データの読み込み・入力・削除
- ・保水能曲線の作成
- ・流出モデルの定数解析
- ・流出予測精度の検証
- ・実洪水の流出予測計算

を行うことができる。

また、本システムの大きな特徴は、

- ・操作性に優れている
- ・流出計算・予測計算時間が短い

の2点である。具体的には、コンピュータに関して初心者の使用を可能とするために、電源を入れると、プログラムが起動し、起動後は数値データを入力する場合を除いてマウスのみで使用できるものとした。

プログラムはメインメニュー上で各種作業を選択し、マウスでクリックすると画面が切り替わって目的の作業がおこなえる。以下に各作業画面毎の説明を述べる。

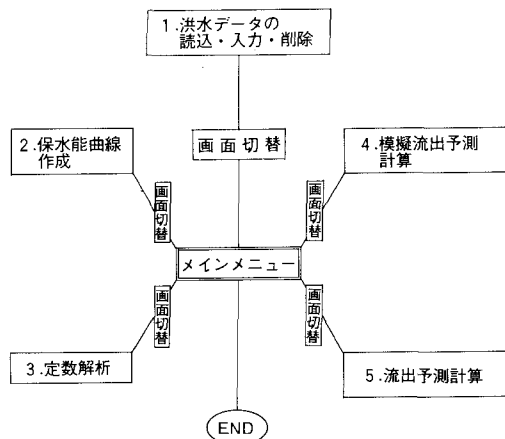


図-2 システムの概要図

①洪水データの読み込み・入力・削除

この画面では、既往洪水データの読み込み・修正、削除、新規洪水データの入力、を行う。図-3に洪水データ入力画面を示す。また、読み込んだデータの直接流出成分の分離が図-4に示した画面上のグラフを見ながら行うことができる。分離が終了した時点で初期損失雨量、直接流出高、流出率が自動的に計算され洪水データと一緒に保存される。

②保水能曲線の計算

この画面では、保存されている洪水データを用いて保水能曲線を計算し、計算結果として図-5に示すように定数 a 、 b および保水能曲線図が表示される。

③流出モデルの定数解析

この画面では、流出モデルの定数解析を行う。定数解析では、有効降雨算出方法として一定流出率を用いる場合、保水能理論を用いる場合を任意に選択できる。これは、洪水データ数が少なく保水能曲線の計算ができない場合があるためである。 fc の初期値、きざみ幅を入力すると定数解析を実行する。解析結果として、図-6に示すように実測のハイドログラフ、計算ハイドログラフ、 fc 値毎の誤差（実測流量と計算流量の誤差2乗和平方根）が表示される。

④流出予測精度の検証

この画面では、既往洪水データを用いた流出予測計算を行う。検証したい洪水データを選択し、有効降雨算出方法、定数を設定し実行する。計算結果は実測のハイドログラフ、計算のハイドログラフが表示される。

⑤実洪水の流出予測計算

この画面では、実洪水において流出予測を行う。予測に際しては、任意に選択した既往洪水の定数の平均値を初期値とすることができる。次に予測降雨を入力し、予測計算を実行する。計算結果は、図-7のように現在時刻までの実測流量と計算流量、今後の予測流量が示される。現在時刻までの実測流量と計算流量の適合具合から予測の精度が推定され、必要に応じて定数を変えて再計算が行える。

4. おわりに

現在用いられている流出解析プログラム、流出予測プログラムは、使用するコンピュータの制約から、使用者の立場に立った開発が行われていなかった。近年のハードウェアの進歩は、制約をなくし、操作性を考慮したプログラムの開発が行える環境を実現した。

本プログラムでは洪水データの管理、流出解析、洪水予測が一つのプログラムで行うことができ、従来のプログラムと比較して操作性を向上させ、かつ計算時間も短縮する事ができた。

今後はダム管理所で実際に使用し、問題が生じた段階で改良を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 山田 正、山崎 幸二：流域における保水能の分布が流出に与える影響について、第27回水理講演会論文集、pp. 385～392、1983
- 2) 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
- 3) 星 清：流出予測法の実例、1988年(24回)水工学に関する夏期研修会講義集Aコース、pp. A-3-1～A-3-20、1988

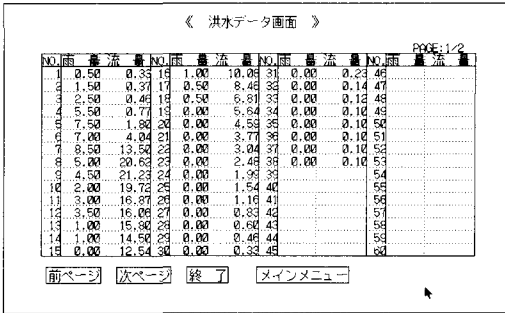


図-3 洪水データ画面

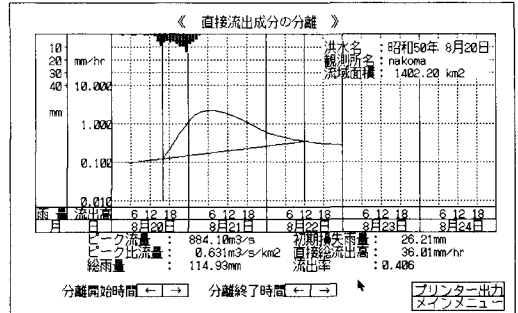


図-4 直接流出成分の分離画面

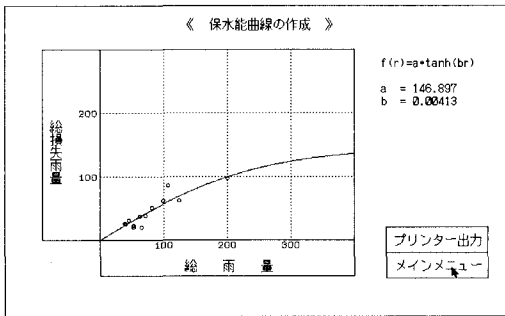


図-5 保水能曲線の作成画面

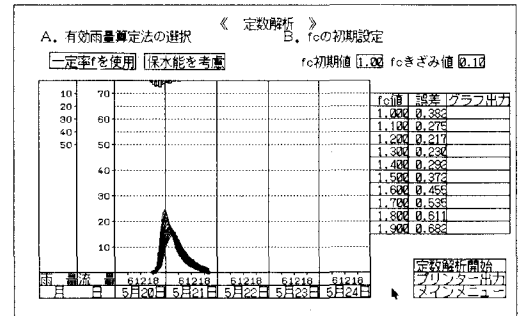


図-6 定数解析画面

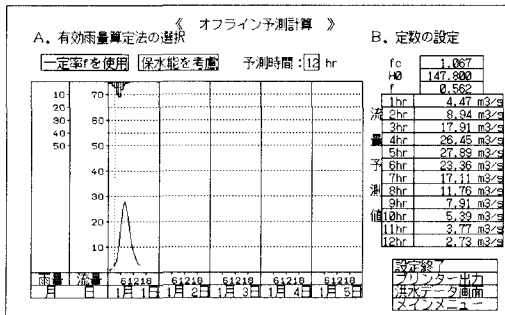


図-7 オフライン予測画面