

# フィルター分離 AR 法による流出予測と他の流出モデルとの比較評価について

## REAL TIME FORECASTING BY FILTER SEPARATION AR METHOD AND COMPARISON OF THE MODELING EFFICIENCIES OF SOME OTHER RAINFALL-RUNOFF MODELS

長谷部正彦\*・日野幹雄\*\*・星 清\*\*\*

By Masahiko HASEBE, Mikio HINO and Kiyoshi HOSHI

The flood prediction problem is especially difficult because of the nonlinearity of a hydrologic system and the stochasticity of rainfall runoff phenomena. In this paper,

(1) We apply the filter separation AR method for real time forecasting. That is, at each time step, the runoff time series sampled at equal time intervals are separated through a numerical filter into the shorter- and longer-period components. Each subsystem is linear and expressible by the ARX model.

(2) We calculated and compared the modeling efficiencies of real time forecasting by the extended filter separation AR method with the generalized storage function method with Kalman filter theory and the tank model on data sets from the Ishikari river, the Sagami river, the Kokai river and the Sakou river.

*Keywords*: real time forecasting, filter separation AR method, generalized storage function, Kalman filter, tank model

### 1. ま え が き

洪水の流出予測の問題は、情報制御理論やパーソナルコンピュータを含む電子計算機の発達に伴い、多くの人々によって研究され予測精度の向上について努力がなされている。しかしながら、降雨-流出系の強い非線形性や入力となる降雨の強い変動性のために、いまだに研究の余地が残っているようである。

さて、このように非線形が強いと考えられる水文現象でも、流出の物理機構が、十分に考慮されていれば、すなわち長期流出成分、短期流出成分というようなサブシステムからの流出成分に分離すれば、各サブシステムが線形系で表わせる<sup>1)</sup>。次に流出分離された成分系は、線形モデル (ARX モデル) によって表現できるから、それぞれの流出成分系について流出予測を行った後に、それらの成分予測流出量を合算し、洪水流量を精度よく予測する手法が可能であると考えられる<sup>2)</sup>。

本論文は、上記の考え方をもとに、フィルター分離

AR 法を拡張した洪水予測システムを提案することと、さらに他の洪水予測システムである星<sup>3)</sup>によるカルマンフィルター理論を応用した一般化貯留関数法および菅原<sup>4)</sup>によるタンクモデル法とも比較して、流出予測の精度の比較検討を試みた。なお、適用河川および水文資料は、酒匂川 ( $A=158.5 \text{ km}^2$ )、小貝川 ( $A=224.9 \text{ km}^2$ )、相模川 ( $A=1201.3 \text{ km}^2$ )、石狩川 ( $A=3558 \text{ km}^2$ ) の時間単位の降雨量と流量資料である。

### 2. 成分分離 AR 法による流出解析

一般の流出解析法 (貯留関数、タンクモデル) と同様に、過去の水文資料つまり観測降雨量と流出量から、フィルター分離 AR 法により流出解析をし、流出予測を行うための流域固有と考えられるパラメーターを同定する。パラメーターとしては、

① 流出量を地下水流出、表面・中間流出成分 (降雨強度の強い場合つまり比流量の大きいときは、表面・中間流出成分はさらに中間流出と表面流出成分に分離される) に成分分離するための分離時定数 ( $T_c$ )。

② 観測降雨から有効降雨を求めるための初期損失量 ( $I_{\text{loss}}$ )。

③ 降水の地下への浸透速度 ( $R_{cv}$ )。

④ 流出率 (固定) ( $f$ ) あるいは貯留量から推定さ

\* 正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科  
(〒321 宇都宮市石井町 2753)

\*\* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科  
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

\*\*\* 正会員 工博 北海道開発局局長官房技術開発室長  
(〒060 札幌市中央区北 3 条西 4 丁目)

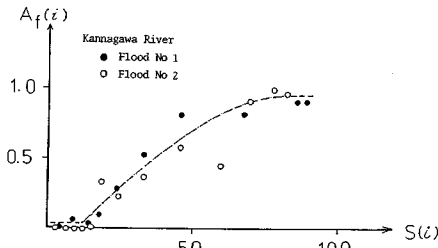


図-1 流出寄与率と流域貯留量の関係

れる流出寄与率（短期流出成分の流出率）（ $A_f$ ）。

⑤ 降雨の分離則

があり、流出予測を行うためには、これらのパラメーターを流出解析により同定する必要がある。

時間とともに変化する流出寄与率（部分流出寄与率）つまり短期流出成分の流出率は、流域貯留量から次式で求まる<sup>5)</sup>。

$$A_f(i) = 1 - \exp\{-S(i)/S_0\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $A_f(i)$  :  $i$  時間での部分流出寄与率、 $S(i)$  :  $i$  時間の流域貯留量、 $S_0$  : 飽和貯留量。上式より短期流出成分の有効降雨量は、次式で推定する。

$$\hat{x}_i^{(2)} = A_f(i) \cdot \{X_i - \hat{x}_i^{(1)}\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\hat{x}_i^{(2)}$  :  $i$  時間の短期流出に寄与する降雨量、 $\hat{x}_i^{(1)}$  :  $i$  時間の長期流出に寄与する降雨量、 $X_i$  :  $i$  時間の観測降雨量。なお、流出予測を行う場合の飽和貯留量は、過去の洪水の流出寄与率と流域貯留量の関係（たとえば神流川の例（図-1））あるいは過去の洪水規模と貯留量の関係から推定する。

相模川および酒匂川のフィルター分離 AR 法による流出解析の結果（図-2, 3）と同定したパラメーターを表-1 に示す。図-3 の酒匂川の例では、各流出成分を合算した河川流量を示した。

3. 種々の洪水予測システム

(1) フィルター分離 AR 法

流出量の予測は、下記の順序で時々刻々に行う。

a) 流出量の成分分離

流量時系列の逓減部の対数プロットの勾配から分離時定数 ( $T_c$ ) を決める。この分離時定数から、流量時系列を長期、短期流出成分に分離する。その結果、流出分離された各成分系は線形形で表現される<sup>1)</sup>。

b) 各成分系の単位関（応答関数）

流出分離された成分流量時系列に ARX モデルを適用する。このモデルの AR 係数から単位関（応答関数）を推定する<sup>1)</sup>。

c) 逆推定有効降雨

各成分系の逆推定有効降雨は、単位関から求める方法と AR 係数から求める方法の 2 通りがある。

単位関からは、次式となり、

$$\hat{x}_i = y_i / [A(h_0 + h_1 B + h_2 B^2 + \dots) / 3.6] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $B$  : 後進演算子 ( $By_i = y_{i-1}$ )、 $A$  : 流域面積 ( $\text{km}^2$ )、 $h_i$  : 応答関数

AR 係数からは、次式となる。

$$\hat{x}_i = (1 - a_1 B - a_2 B^2 - \dots) y_i / [3.6(1 - a_1 - a_2 - \dots - a_p) / A] \dots\dots\dots (3 \cdot a)$$

ここに、 $a_i$  : 自己回帰係数、 $y_i$  : 流出分離された流出量

d) 降雨予測<sup>2)</sup>

この節からは、入力となる未来降雨量を推定し、この未来降雨がフィルター分離 AR モデルの入力となって、流出予測を行い、従来の逆探法を拡張した洪水予測システムとなる。

① 長期流出成分の降雨予測

現時点  $k$  から  $k_p$  ステップ先の時点での流出成分に対する洪水予測をするには、それより先の時点の降雨を予測しなければならない。本論文では、実データによる検討の結果、長期流出成分に関しては、平滑化された降雨の変化は、きわめて緩やかであるので、現時点より先の降雨量（予測降雨）は、現時点の有効降雨成分とほぼ同じ量と仮定する。なお、今後、逆推定有効降雨は、 $\hat{x}$  とし、予測値は、 $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  と表示する。

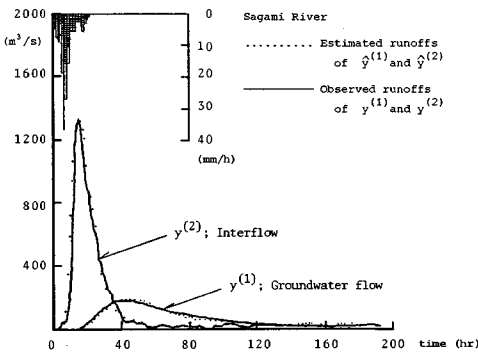


図-2 相模川の流出解析

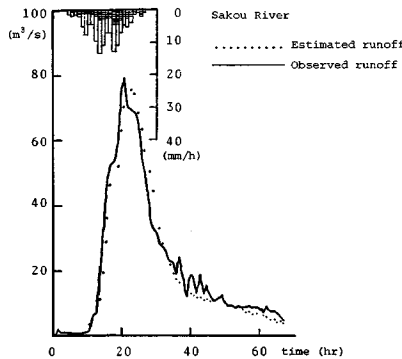


図-3 酒匂川の流出解析

表-1 パラメーター

	酒匂川	相模川
$T_c$	12.1 h	29.6 h
$I_{loss}$	5 mm	4 mm
$R_{\sigma_0}$	0.5 mm	2.4 mm
AR 次数		
短期流出	2	4
長期流出	5	8
$S_0$	210 mm	150 mm
$A$	158.5	1201.3
データ数	67	193

$$\hat{x}_{k+k_p}^{(1)} = \rho \hat{x}_k^{(1)} \quad (k_p > 0) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\rho$  : 重み係数 (=0.8)

② 短期流出成分の降雨予測

短期流出成分に対する降雨予測は、観測降雨量を用いる場合と逆推定有効降雨量を用いる場合との2通りについて考える。

i) 観測降雨資料を用いる場合

観測降雨量から長期流出成分より逆推定した有効降雨量を減じた降雨量に流出率 ( $f$ ) あるいは流出寄与率と考えられる短期流出成分の降雨の時間とともに変化する流出率  $A_r(k)$  を乗じたものを現時点までの短期流出に寄与する有効降雨とし、それ以降の予測降雨量は、降雨が、流出に有効に働くまでには一般に遅れ時間があるので、この遅れ時間だけ先の降雨資料を用いて次式より求める。

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{k+k_p}^{(2)} &= fX_{k+k_p-lag} - \hat{x}_{k+k_p}^{(1)} \\ \text{あるいは} \\ \hat{x}_{k+k_p}^{(2)} &= A_r(k)X_{k+k_p-lag} - \hat{x}_{k+k_p}^{(1)} \end{aligned} \right\} (k_p \leq lag) \dots\dots (4 \cdot a)$$

ここに、 $f$  : 流出率、 $lag$  : 遅れ時間

この遅れ時間以上の予測ステップでは、後に述べるが、降雨量の移動平均から求める。

ii) 逆推定有効降雨を用いる場合

先の長期流出成分の場合と同じように短期流出成分時系列から上記の式 (3)、(3・a) より流量から逆推定された有効降雨を求め、現時点以降は、現時点までの雨量からの移動平均より降雨予測を行う。

以上のように推定された有効成分降雨は、現時点より実際にはステップ  $lag$  だけ過去の降雨に相当する。これは水文系を集中定数系で表現する際に必要となるもので、逆に、現実の予測にはこの時間ステップ分だけの予測時間を稼ぐことができる。

e) 流出予測

流出解析により流域固有のパラメーターが同定され、また降雨予測により入力となる降雨量が推定されたので、流出予測は、以下に示す2通りで行う。

単位図による流出予測は、次式となり

$$\hat{y}_{k+k_p} = \frac{A}{3.6} (h_0 \hat{x}_{k+k_p} + h_1 \hat{x}_{k+k_p-1} + \dots + h_{k_p} \hat{x}_k + \dots) \dots\dots\dots (5)$$

AR 式による流出予測は、次式となる。

$$\hat{y}_{k+k_p} = a_1 \hat{y}_{k+k_p-1} + a_2 \hat{y}_{k+k_p-2} + \dots + a_{k_p+1} \hat{y}_{k-1} + \dots + \frac{A}{3.6} (1 - a_1 - a_2 - \dots - a_p) \hat{x}_{k+k_p} \dots\dots (5 \cdot a)$$

(2) 一般化貯留関数法

この方法による流出予測するにあたっての基本的な考え方は、以下のとおりである。

① 一般化貯留関数法を用いる。

② モデル定数を固定する。ただし、降雨の項が入る定数は、過去の移動平均雨量を用いる。定数固定に伴う流出予測の不確定性を誤差共分散でもたせる。

③ 予測手法にカルマンフィルターを用いる。

a) 採用貯留関数<sup>3),6)</sup>

本論文では、以下に示す2通りの貯留構造をもつ貯留型流出モデルを採用する。モデルⅠおよびモデルⅡは、下記の構造である。

$$\text{モデルⅠ} \quad s = k_1 q^p + k_2 \frac{dq}{dt} + k_3 \frac{d^2 q}{dt^2} \dots\dots\dots (6 \cdot a)$$

$$\text{モデルⅡ} \quad s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \dots\dots\dots (6 \cdot b)$$

連続式は、

$$\frac{ds}{dt} = f \cdot r - q \dots\dots\dots (6 \cdot c)$$

ここで、 $s$  : 貯留高 (mm)、 $q$  : 流出高 (mm/h)、 $r$  : 雨量強度 (mm/h)、 $f$  : 流出率、 $k_1, k_2, k_3, p, p_1, p_2$  : モデル定数。

(3) 一般化貯留関数の数値解法<sup>3),6)</sup>

ここでは、モデルⅡを中心にして、この貯留構造をもつ非線形方程式の数値解法を述べる。モデルⅡのパラメーターは、表面流モデルにマニング則を適用して次式となる<sup>7)</sup>。

$$\begin{aligned} k_1 &= 2.823(n/\sqrt{i})^{0.6} A^{0.24} \\ k_2 &= 0.2835 \cdot k_1^2 \cdot \bar{r}^{-0.2648} \\ p_1 &= 0.6, \quad p_2 = 0.4648 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで、 $A$  : 流域面積、 $\bar{r}$  : 移動平均有効雨量強度、 $n$  : 等価粗度、 $i$  : 斜面勾配

式 (7) のモデル定数  $k_2$  には、移動平均有効雨量強度  $\bar{r}$  が入っている。そこで、1時間ごとに雨量情報が入るとして、 $\bar{r}$  には現時刻における過去の雨量の移動平均値を用いる。

$$\bar{r} = f \sum_{i=t_N-m+1}^{t_N} r_i / m \quad (m = R_{mean}) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\bar{r}$  :  $m$  次の移動平均雨量、 $t_N$  : 現時点の時刻。なお、 $m = t_N$  にとれば、過去の累加雨量の平均値すなわち平均有効雨量強度になり、また式 (8) は、1ステップ先の有効降雨量を求める式である。このステップ以上の降雨の予測値は、1ステップまでの降雨予測値を用いて順次、式 (8) で求めればよい。式 (6・b) の貯留関数モデルは非線形であるので数値解法によって解かざるを得ない。式 (6・b) を下記の式に変換する。

$$x_1 = q^{p_2}, \quad x_2 = \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \dots\dots\dots (9)$$

式 (6・b) と式 (9) から、下記の非線形連立常微分方程式が得られる。

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{k_1}{k_2} \frac{p_1}{p_2} x_1^{p_1/p_2-1} x_2 - \frac{1}{k_2} x_1^{1/p_2} + \frac{r}{k_2} \dots\dots\dots(10)$$

ここで流出量の計算の際には、次の初期条件を設定する。

$$x_1|_{t=0} = 0, \quad x_2|_{t=0} = 0 \dots\dots\dots(10 \cdot a)$$

非線形常微分方程式の数値解法にはいろいろあるが、本計算では、式(10)の線形化による近似解法を試みる。

式(10)をベクトル表示すると次式が得られる。

$$\frac{dX}{dt} = F(X) \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{ここに、} X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad F(X) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2) \\ f_2(x_1, x_2) \end{bmatrix}$$

$$f_1(x_1, x_2) = x_2 \dots\dots\dots(11 \cdot a)$$

$$f_2(x_1, x_2) = -\frac{k_1}{k_2} \frac{p_1}{p_2} x_1^{p_1/p_2-1} x_2 - \frac{1}{k_2} x_1^{1/p_2} + \frac{r}{k_2}$$

$F(X)$  が十分に滑らかな関数として、 $F(X)$  をあらかじめ既知な  $X = X^*$  において1次の項までテイラー展開する。

$$F(X) = F(X^*) + A(X^*)(X - X^*) \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 $A(X^*)$  は、次式で定義される。

$$A(X^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{x=X^*} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(12 \cdot a)$$

式(12・a)の行列要素  $a_1, a_2$  は次式となる。

$$a_1 = -\frac{k_1}{k_2} \frac{p_1}{p_2} \left( \frac{p_1}{p_2} - 1 \right) (x_1^*)^{p_1/p_2-2} (x_2^*) - \frac{1}{k_2} \frac{1}{p_2} (x_1^*)^{1/p_2-1} \dots\dots\dots(12 \cdot b)$$

$$a_2 = -\frac{k_1}{k_2} \frac{p_1}{p_2} (x_1^*)^{p_1/p_2-1}$$

式(12)を式(11)に代入すると、次式が得られる。

$$\frac{dX}{dt} = A(X^*)X + B(X^*) \dots\dots\dots(13)$$

ここで、

$$B(X^*) = F(X^*) - A(X^*)X^* = \begin{bmatrix} f_1(x_1^*, x_2^*) \\ f_2(x_1^*, x_2^*) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

ここに、 $b_1 = 0$

$$b_2 = \frac{k_1}{k_2} \frac{p_1}{p_2} \left( \frac{p_1}{p_2} - 1 \right) (x_1^*)^{p_1/p_2-1} (x_2^*) + \frac{1}{k_2} \left( \frac{1}{p_2} - 1 \right) (x_1^*)^{1/p_2} + \frac{r}{k_2} \dots\dots\dots(13 \cdot a)$$

上式は、線形常微分方程式であり、 $A(X^*)$  と  $B(X^*)$  が定係数行列であるとき、その理論式は次式の差分方程式に変換できる。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ \Phi_3 & \Phi_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \gamma_1 \gamma_2 \\ \gamma_3 \gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix}_k \dots\dots\dots(14)$$

ここで、

$$\Phi_1 = 1 + \frac{1}{2} a_1 T^2 + \frac{1}{6} a_1 a_2 T^3 + \frac{1}{24} a_1 a_3 T^4$$

$$\Phi_2 = T \left( 1 + \frac{1}{2} a_2 T + \frac{1}{6} a_3 T^2 + \frac{1}{24} a_2 a_4 T^3 \right)$$

$$\Phi_3 = a_1 T \left( 1 + \frac{1}{2} a_2 T + \frac{1}{6} a_3 T^2 + \frac{1}{24} a_2 a_4 T^3 \right)$$

$$\Phi_4 = 1 + a_2 T + \frac{1}{2} a_3 T^2 + \frac{1}{6} a_2 a_4 T^3 + \frac{1}{24} (a_1 a_3 + a_2^2 a_4) T^4$$

$$\gamma_1 = T \left( 1 + \frac{1}{6} a_1 T^2 + \frac{1}{24} a_1 a_2 T^3 \right)$$

$$\gamma_2 = T^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{6} a_2 T + \frac{1}{24} a_3 T^2 \right)$$

$$\gamma_3 = a_1 T^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{6} a_2 T + \frac{1}{24} a_3 T^2 \right)$$

$$\gamma_4 = T \left( 1 + \frac{1}{2} a_2 T + \frac{1}{6} a_3 T^2 + \frac{1}{24} a_2 a_4 T^3 \right)$$

ここに、 $T$  は計算時間間隔であり、 $a_3, a_4$  は次式

$$a_3 = a_1 + a_2^2, \quad a_4 = a_1 + a_3$$

である。

式(14)の漸化式を用いれば、任意の離散時刻  $k$  における  $x_1, x_2$  の値を計算できる点で計算機演算に最適な方法といえよう。最後に、任意の離散時刻  $k$  における流量も式(9)の逆変換、 $q = x_1^{1/p_2}$  によって求まる。

#### (4) タンクモデル法

一般にタンクモデルの諸係数(タンクの流出孔の高さ、孔の径等)は、試行錯誤によって決定される。本論文では、ハイドログラフの流量の逓減部の情報をもとにした菅原<sup>8)</sup>によるタンクモデルのパラメーターの同定法を参考にしながらタンクモデルの構造を決定した。なお、モデルの最適の評価は、実測流量とモデルから推定される流量の差の2乗和が最少になるところを選ぶ。

図-4に石狩川の納内橋地点をタンクモデル法により流出解析(計算上、対数に変換している)の結果を示し、このときのタンクモデルの構造を図-5に示す。

以上、流出解析の結果から、最適なモデルパラメーターを推定し、このパラメーターを固定して流出予測を行う。なお、フィルター分離AR法では、パラメーター同定のための洪水資料としては、本論文での洪水例をも含めた3, 4の洪水例で流出解析して予測のためのパラメーターを推定している。他の河川についても同様である。

#### 4. 実流域への洪水予測システムの適用

実例としては、小流域から大流域に至るまでの4種類の流域すなわち酒匂川の三保地点(1987.5)、小貝川の三谷地点(1986.8)、相模川の城山地点(1986.9)、石狩川の納内橋地点(1981.8)を解析対象とする。

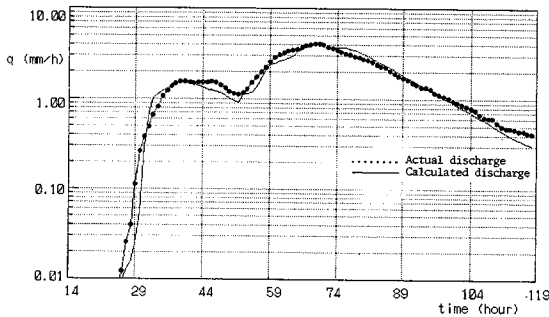


図-4 タンクモデルによる流出解析 (石狩川)

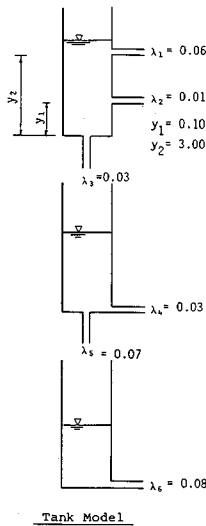


図-5 タンクモデルの構造

a) フィルター分離 AR 法による流出予測

① 観測降雨量を用いる場合

観測降雨量から長期流出成分の逆推定降雨を減じた降雨に式 (1) から得られる短期流出成分の流出率を乗じて現時点までの短期流出成分の有効降雨を、現時点より先の有効降雨量は、遅れ時間を考慮して、式 (4・a), あるいは式 (8) (遅れ時間を越えた場合) から時々刻々求める。長期流出成分については、式 (3), (3・a), (4) から有効降雨量を求め予測する。

小貝川, 相模川の 1 ステップから 3 ステップまでの流出予測の例を図-6~10 に示す。

② 逆推定有効降雨量を用いる場合

流域面積が大流域の場合で観測降雨地点が少ないために入力となる降雨が、その流域の降雨の代表性を表わしていない場合、あるいは小流域の場合でも上流域で雨量観測所が存在しないときには、観測降雨が、そのまま有効降雨となるわけではないので、このときには、流量から逆推定した有効降雨量を用いて洪水の流出予測を行う必要が生じる。長期流出成分に関しては、降雨の予測法は

①と同じであるが、短期流出成分の降雨予測は、逆推定降雨量を式 (3), (3・a) から求め、現時点より先の時点の降雨は、式 (8) で推定する。また、式 (8) の移動平均時間 ( $R_{mean}$ ) は、実データによる検討結果から  $R_{mean}=3$  時間とする。図-11~20 に酒匂川, 小貝川, 相模川, 石狩川の 1 ステップから 3 ステップまでの流出予測の例を示す。

b) 一般化貯留関数法による流出予測

この方法に関しては、文献<sup>3),6)</sup> に詳細に述べてあるのでここでは簡単にパラメーターを表示する程度に説明する。

① モデル I の場合

ここでのパラメーターのうち未知数は、 $(n/\sqrt{i})^{0.6}$  だけであり、一般に、この値は山地河川流域において 1~2 のオーダーをとるとされているので、ここでは、この値を 0.4 から 0.2 刻みで変化させ最適値を求めた。また、この値を初期値として数学的最適化を行った。カルマンフィルター理論の適用にあたっては、パラメーター  $k_2$  と  $k_3$  を状態変量として、オンライン同定している。小貝川, 石狩川の 1 ステップから 3 ステップまでの流出予測に用いたパラメーターを表-2 に示し、予測図を図-21~26 に示す。

② モデル II の場合

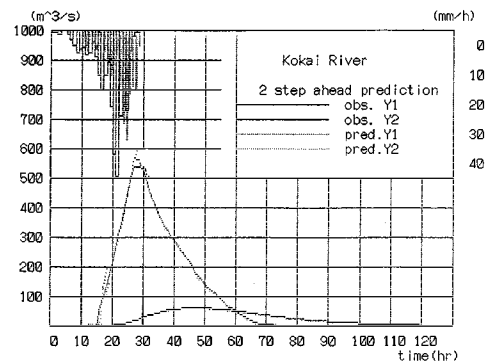
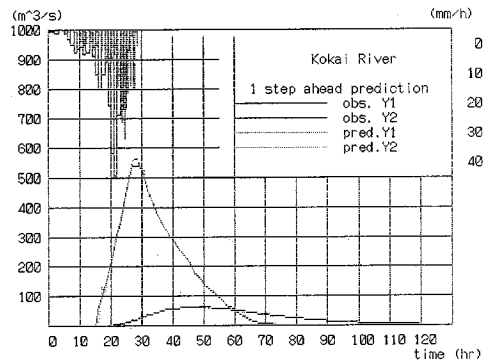
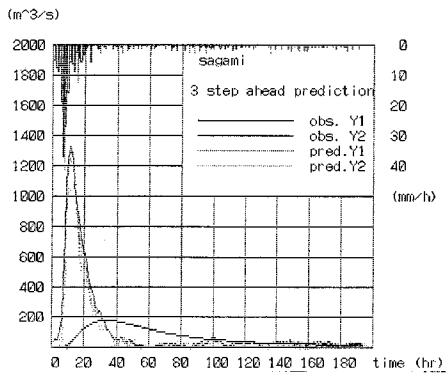
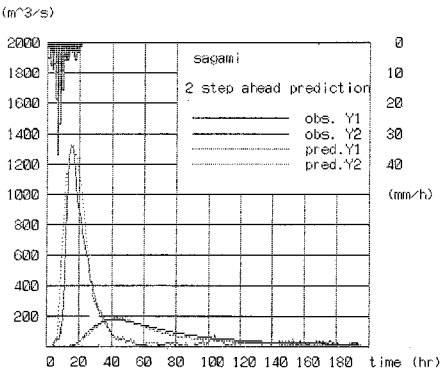
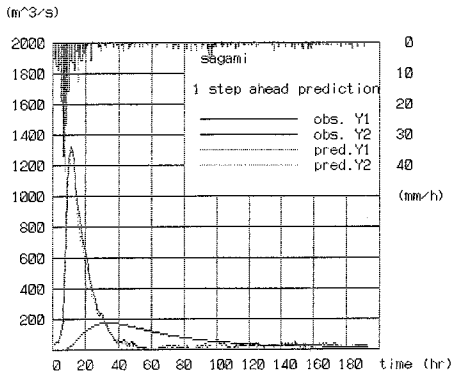
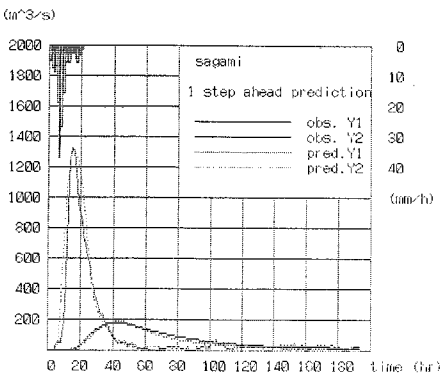


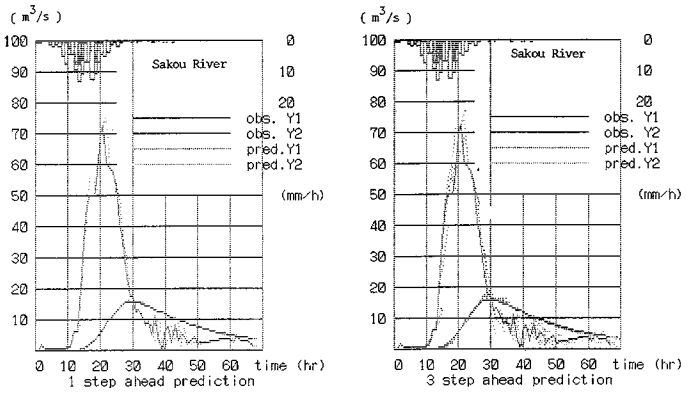
図-6, 7 小貝川の流出予測 (観測降雨)



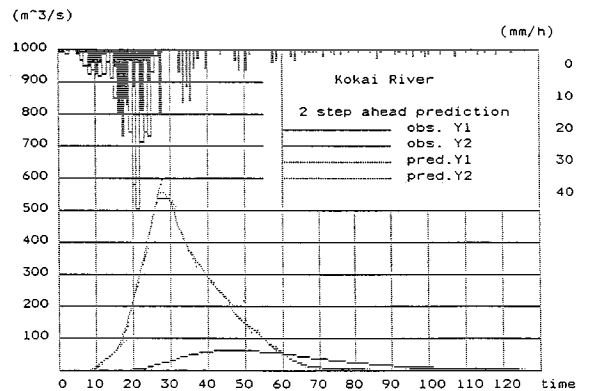
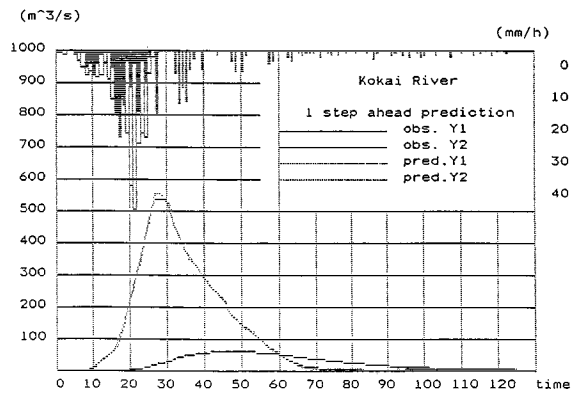
図—8, 9, 10 相模川の流出予測 (観測降雨)



図—15 相模川の流出予測 (逆推定降雨)



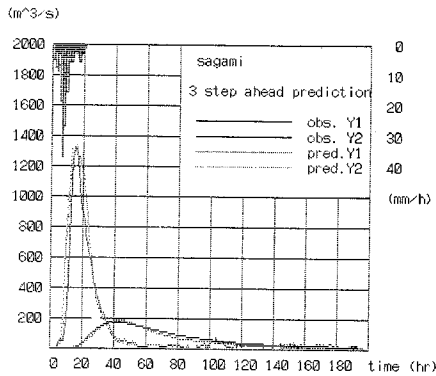
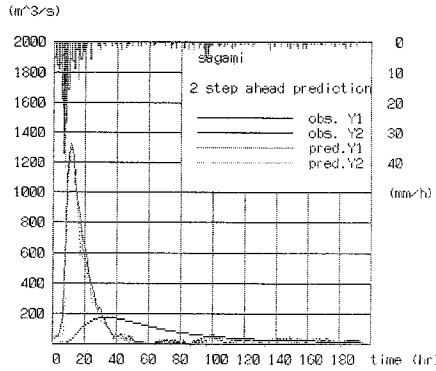
図—11, 12 酒匂川の流出予測 (逆推定降雨)



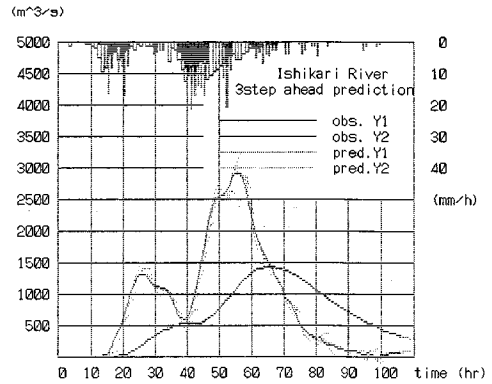
図—13, 14 小貝川の流出予測 (逆推定降雨)

カルマンフィルター理論を適用するにあたって、状態変量は、式 (10) の  $x_1$  と  $x_2$  のみとする。状態変量  $x_1$  と  $x_2$  は、前に述べた式 (14) を解けばよい。式 (14) を新しい流量情報が入手されるまで解く。また、式 (14) は、カルマンフィルター理論における状態変量の伝達方程式である。

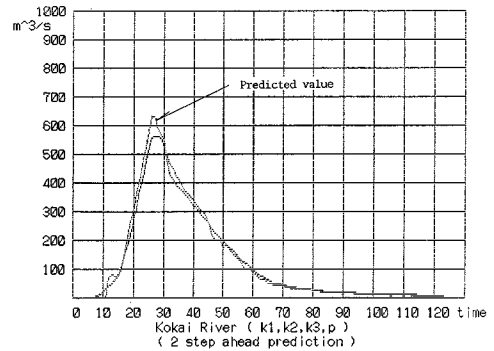
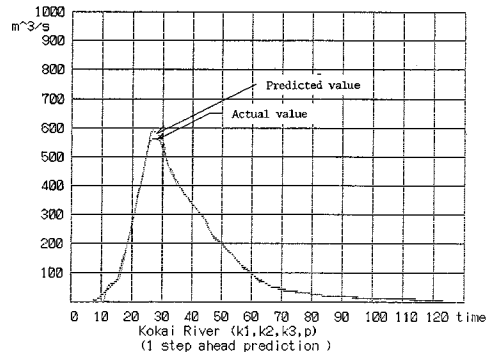
石狩川の1ステップから3ステップまでの流出予測を図—27~29に示し、このときのモデル定数を表—2に示す。



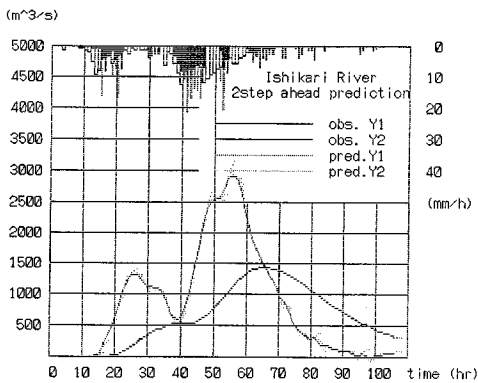
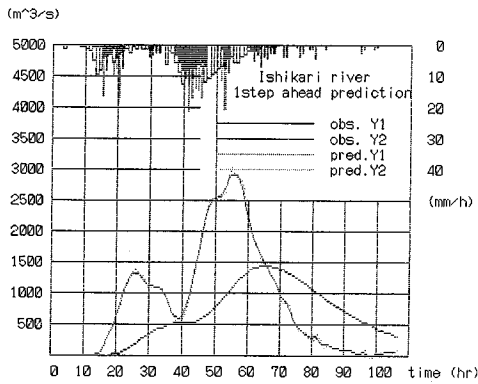
図一16, 17 相模川の流出予測 (逆推定降雨)



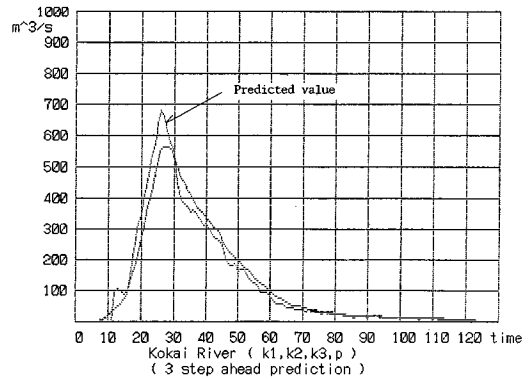
図一20 石狩川の流出予測 (逆推定降雨)



図一21, 22 モデル I による流出予測 (小貝川)



図一18, 19 石狩川の流出予測 (逆推定降雨)



図一23 モデル I による流出予測 (小貝川)

表-2 モデル I, II のパラメーター

	Model	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$p_1$	$p_2$
石狩川	I	27.806	130.343	1.5	0.6	
	II	27.81	130.34		0.6	0.4648
小貝川	I	8.566	1.989	2.0	0.6	0.4648

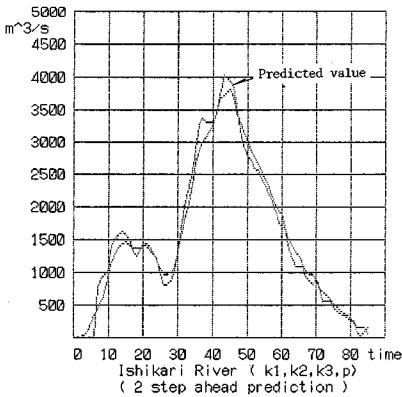
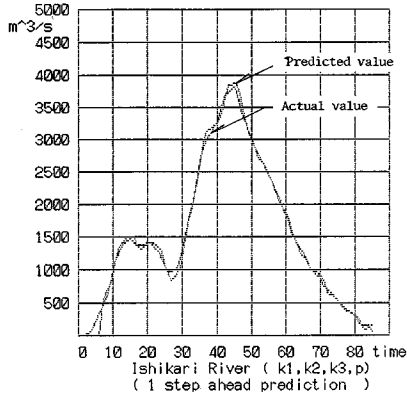


図-24, 25 モデル I による流出予測 (石狩川)

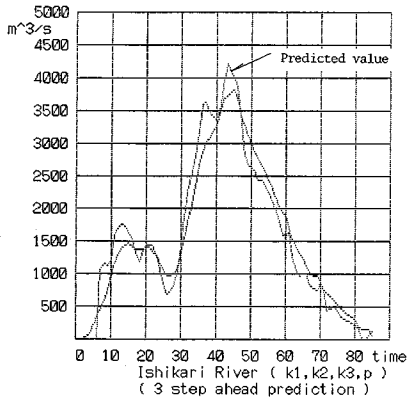


図-26 モデル I による流出予測 (石狩川)

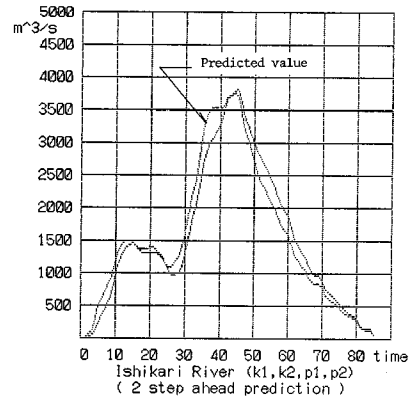
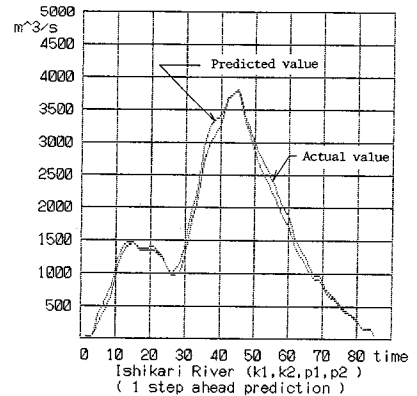


図-27, 28 モデル II による流出予測 (石狩川)

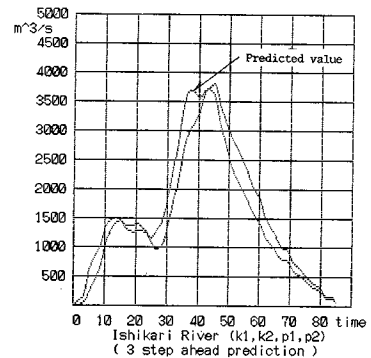


図-29 モデル II による流出予測 (石狩川)

c) タンクモデルによる流出予測

前述した図-4 に示すような構造をもつタンクモデルにより流出予測を行う。なお、現時点より先の降雨予測は、他の洪水予測システムと同様に式 (8) で行う。石狩川の2ステップまでの予測結果を図-30, 31 に示す。

5. 流出予測の結果の精度の検討

4種類の洪水予測システムにより流出予測を行って、その結果の精度を検討するが、この精度は、予測の目的



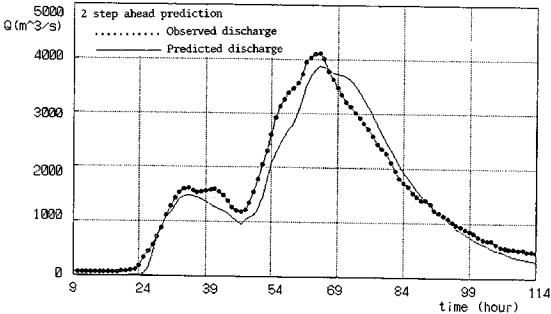
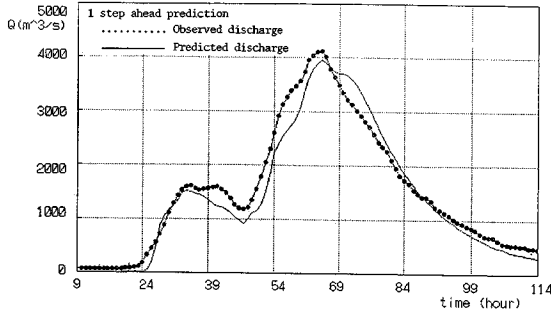


図-30, 31 タンクモデルによる流出予測 (石狩川)

つまり予測の評価基準 (この基準をどのように設定するかは難しい問題ではあるが) によって異なると考えられる。ここでは、予測した流量と実測流量のハイドログラフの比較、それぞれのピーク流出量に関する比較を行い、予測の精度を検討した。なお、フィルター分離 AR 法は、他の洪水予測システムと比較するために、降雨予測に式 (8) を用いた場合の逆推定有効降雨により流出予測を行った場合である。

a) 予測値と観測値のハイドログラフでの比較

予測流量と実測流量の差の二乗誤差の分散すなわち予測誤差は次式により求める。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^T (\hat{y}_{i+k} - y_T)^2 / T \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $\sigma$ : 予測誤差、 $\hat{y}_{i+k}$ : 現時刻  $i$  より  $k$  ステップ後の予測流量、 $y_T$ : 時刻  $T (= i+k)$  の実測流量

小貝川について、一般化貯留関数法のモデル I とフィルター分離 AR 法による流出予測の予測誤差を図-32 に示す。この結果、予測ステップの大きいときの予測誤差は、小さいときに比べて大きい。また、各ステップごとにみると予測誤差は、フィルター分離 AR 法の方が小さい。石狩川に関しては、4 種類で流出予測を行った結果の予測誤差とハイドログラフの実測値と予測値の比較 (3 ステップ) を図-33, 34 に示す。この結果、予測誤差の精度は、小さい順から、フィルター分離 AR 法、一般化貯留関数法、タンクモデル法となっている。ハイドログラフの比較でも実測値と予測値との相関係数は、高い順にフィルター分離 AR 法、モデル I、モデル II

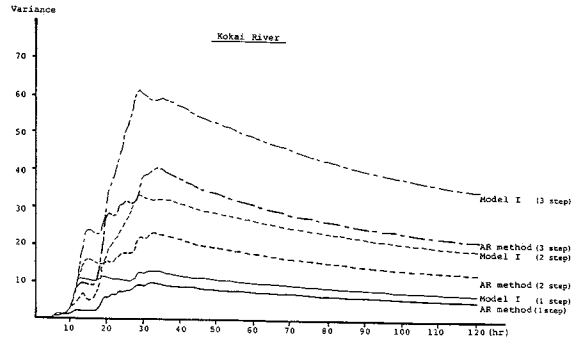


図-32 小貝川の予測誤差

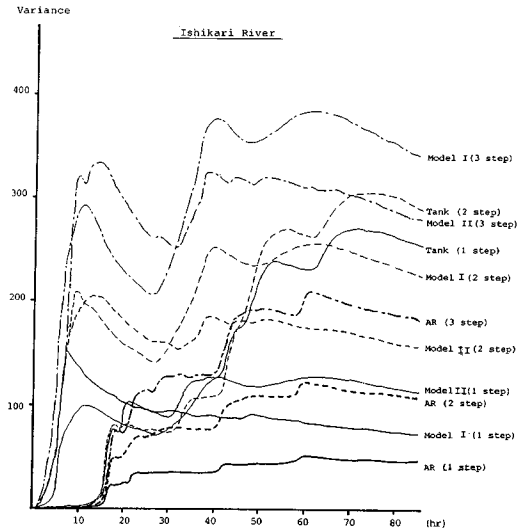


図-33 石狩川の予測誤差

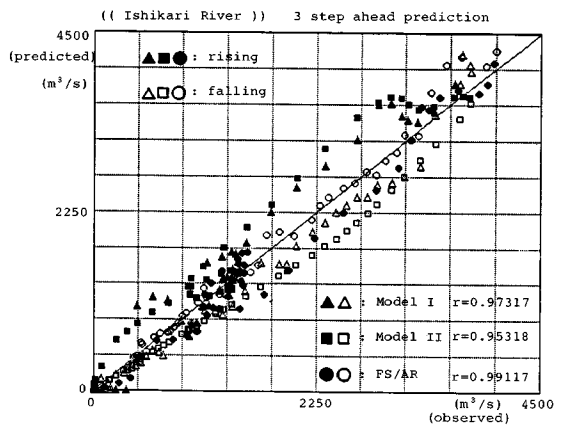
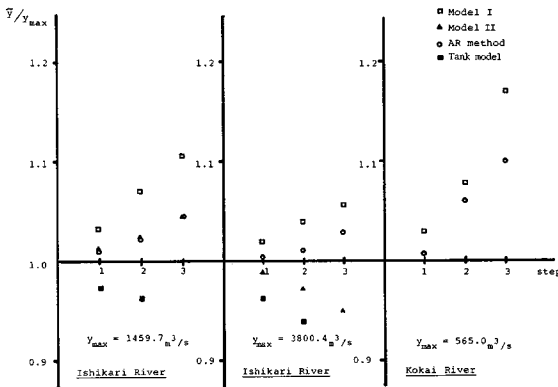
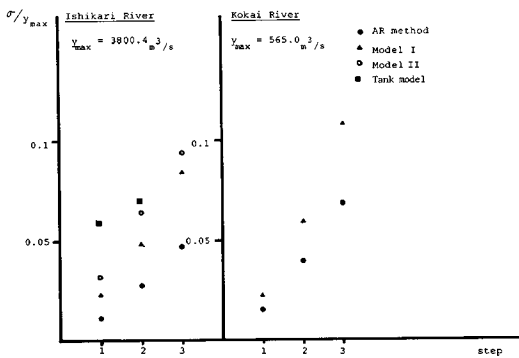


図-34 実測値と予測値の比較 (石狩川)

となり、一般化貯留関数では洪水流量の上昇部と逓減部ではループ曲線となり、一方、フィルター分離 AR 法では、それは直線となっている。この傾向は 1, 2 ステップの予測でも同様である。この理由として考えられるのは、貯留関数法では一成分系であり、逆探法では多成分



図一35 予測値と実測値のピーク流量の比の比較



図一36 予測誤差と実測最大流量の比の比較

系で扱っているためであると推察される。貯留関数法に関しては、1ステップの予測では、モデルⅡの方がハイドログラフの約30時間までの前半部分の予測精度がよく、それ以降の部分ではモデルⅠの方が精度がよくなっている。一方、2ステップ以降の予測では、逆に、30時間くらいまでの前半部分までは、モデルⅠが良い。

**b) 予測値と観測値のピーク流出量に関する比較**

まず、流量ハイドログラフの予測ピーク流量と実測ピーク流量の比とピーク流量の予測誤差を実測ピーク流量で割った値を各予測ステップごとに求めて比較した。

石狩川の例を示す。石狩川の流量ハイドログラフは、2山のピークをもっているのので図一35には前半と後半部分のピーク流量の比を示している。この結果、フィルター分離AR法が、他に比べて良い精度であり、モデルⅡでは、最大ピーク流量は、実測のそれよりも小さく予測されている。次に図一36にはピークでの予測誤差と実測最大ピーク流量の比を示す。やはり、予測ステップが大きくなるとともに予測精度が悪くなることがわかる。ステップごとにみるとフィルター分離法が良い結果を示している。小貝川についても石狩川と同様な整理をし、図一35、36に示す。この流域でも、図から理解

できるように、ピーク流量の予測精度に関して、フィルター分離法が、石狩川と同じようにモデルⅠに比べて良い予測結果を示している。

**6. あとがき**

以上の結果から、フィルター分離AR法が、この論文での評価基準では、一般化貯留関数法、タンクモデル法に比べて、やや予測精度が優れていたと思われる。この理由としては、河川流量を流出分離し、それぞれのサブシステムにより流出予測を行ったためであると思われる。このように、フィルター分離AR法は、ここに論じた他の手法に比較して精度の高い洪水予測システムを構成していると考えられる。また、一般化貯留関数法では、モデルⅠ、Ⅱのシステムを考えたが、予測精度の差は、あまり明確にはでなかった。しかし、モデルⅠでは、 $k_3$ のパラメーターを同定するときには試行錯誤で求めるので計算時間がある程度かかるのに比べて、モデルⅡでは、等価粗度法とs-q曲線から考えて最適な貯留構造と思われるが、これらの両者の比較については今後の問題とする。タンクモデル法については、非常に簡単な構造でこの程度の流出予測が可能であることと、計算時間が他の手法に比べて速い利点がある。しかし、現実の予測には、ここでは、扱わなかったが、入力となる正確な降雨予測が必要であることはいうまでもない。最後に、貴重な水文資料を提供して下さいました北海道開発局河川研究室および神奈川県企業庁の皆様には謝意を表します。

**参考文献**

- 1) 日野幹雄・長谷部正彦：フィルター分離AR法による非線形流出系の同定と予測（時間単位），土木学会論文報告集，第324号，pp.83~94，1982.
- 2) 日野幹雄・金 治弘：フィルター分離AR法とカルマン・フィルターによる洪水予測法に関する研究，土木学会論文集，第351号/Ⅱ-2，pp.155~162，1984.
- 3) 星 清：洪水予測システムの基礎的検討（1），（2），北海道開発局土木試験所月報，No.385，No.386，1985.
- 4) たとえば，菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972.
- 5) 日野幹雄・長谷部正彦：流出成分への降雨分離則および部分流出域と流域貯留の関係について，土木学会論文集，第357号/Ⅱ-3，pp.133~140，1985.
- 6) 星 清：実用的な洪水流出計算法，北海道開発局土木試験所，河川研究室，1987.
- 7) 高棹琢馬・宝 馨・楠橋康広：貯留関数型洪水流出モデルの比較評価，第29回水理講演会論文集，1985.
- 8) Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyama, Y.: Tank model with snow component, Research notes of the national research center for disaster prevention, No.65, 1984.