第31回水理講演会論文集　1987年２月

# パソコンによる中小河川洪水のオンライン予測の実際
# Practice in Online Flood Prediction by a Desk-top Personal Computer

東京工業大学　正員　日野幹雄

## １．はじめに

洪水の予測方法、特に中小河川の洪水の予測法は、現在においても十分確立されているわけではない。大きな河川では、降雨の観測データが十分に得られているのが普通であり、また降雨に対する応答時間もかなり長いので、大型コンピューターを用いた種々の水文学的・水理学的洪水予測法を活用する事ができる。しかし、中小河川の場合には、降雨データも必ずしも十分でない上に、降雨と出水との遅れ時間が短いので、予測は極めて短時間の間に行うことが要請される。しかも、大河川の場合のように中央官庁の守備範囲外のことゆえ大型コンピューターの使用は望むべくもない。したがって、中小河川の洪水予測は、パソコン程度のコンピューターでも可能なあまり複雑ではない予測方法の開発が必要であり、しかも、それが予測精度の高い方法であることも不可欠である。

一般に、洪水予測法に求められるのは次の点である。

i）計算方法が単純であること。

ii）計算時間が短いこと。

iii）予測精度が高いこと。

iv）計算モデルが物理的基礎の上に構築されていること。

本論文では上記の要請を満たす流出モデルの一つである”フィルター分離AR法”を取り挙げる。さて、ここ数年著者は協力者らと共に”フィルター分離AR法”（俗称”逆探法”）による流出解析法およびそれを拡張した洪水予測法の研究を行って来た。今回は、降雨の逆算法および降雨の予測法に改良を加え、予測の精度を非常に高めることができ、しかもパソコン（NEC PC9801）で非専門家でも操作しうるようできたのでここに発表する。

なお、プログラムは総行数 500インストラクション程度であり、データ入力、結果の CRT上への図化等は自動化されている。

## ２．洪水計算　ー降雨データのみが与えられる場合の洪水計算の降雨分離則ー

従来の洪水流量の予測問題は、系への入力である降雨のデータが与えられる場合に、系からの出力である洪水流量の時系列を求めるものである。しかし、これには実際上２つの問題点がある。まず第１に、流域内の降雨が時間的にも空間的にも確率性が高く、必ずしも精度が高くないという点である。

第２に、仮に精度の高い降雨データが得られるとしても、それが直ちに降雨ー流出のサブシステムへの有効

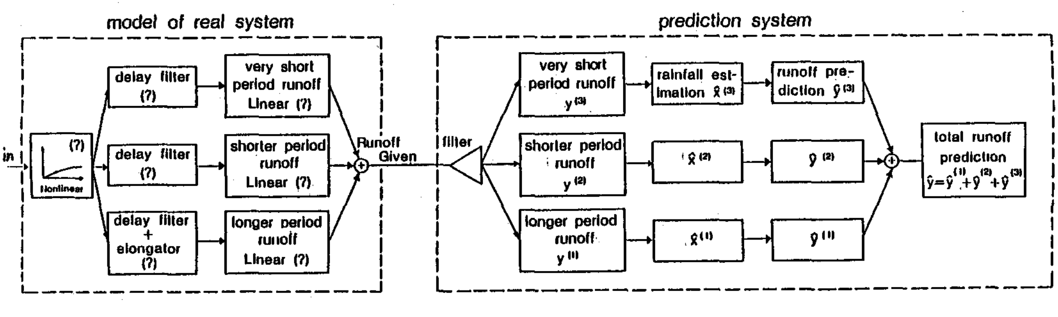



Fig.1

成分降雨となるのではないという点である。そこで、ここではこれまでの研究（日野、長谷部 1985）を基にして、後の洪水予測でも必要となる実際雨の有効成分への変換法についてのべる。

i）<u>降雨の分離則</u>

降雨は次の分離則により、二つのサブシステムへの入力に配分される。

（a）初期損失：降雨の積算総量がある値$L_0$に達するまでは、流出への寄与はない。

$$x_i^{(\ell)} = 0 \quad (\ell=1,2) \quad (\Sigma X_i < L_0) \tag{1}$$

（b）地下水成分降雨：降雨の積算総量が初期損失$L_0$に達すると、以後の降雨はまず地下水成分降雨となる。

$$x_i^{(1)} \begin{cases} = x_i^{(1)} & (X_i \leq X_G) \quad \text{(2a)} \\ = X_G & (X_i > X_G) \quad \text{(2b)} \end{cases}$$

（c）中間流・表面流出成分降雨：地下水成分降雨が飽和状態に達すると、余分な降雨の一部はv.s.a.から直接流出（中間流・表面流出成分）となり、残りの降雨は土壌中に貯留される。

$$x_i^{(2)} \begin{cases} = 0 & (X_i \leq X_G) \quad \text{(3a)} \\ = a(s)(X_i - X_G) & (X_i > X_G) \quad \text{(3b)} \end{cases}$$

ここに、$a(s)$は全流域面積に対する partial source area率で、流域貯留$s$の関数である。$s$は次の式より求める。

$$ds/dt = X(t) - Y(t') \tag{4}$$

関数$a(s)$の形は、例えば

$$a(s) = s/s_0; \quad a(s) = 1 \quad (s > s_0) \quad (s_0：飽和貯留量) \tag{5}$$

あるいは、

$$a(s) = 1 - \exp(-s/s_0) \tag{6}$$

ii）<u>洪水計算</u>：降雨の分離則より成分降雨が与えられるからこれを用いて、後に述べる式(18)により洪水計算を行う。

## 3．洪水予測　ー流量データが得られる場合ー

時々刻々の流量データが得られる場合に、現時点よりも数時間先までの洪水流量を予測する。

この場合には、単純に流量データに予測理論を適用するよりは、流量時系列より、逆に有効成分降雨を逆算する方が高い予測性が期待しうる。

本方法は、”フィルター分離AR法”の流出解析を洪水流量データの入手時刻ごとに繰り返し適用し、その結果求められる逆推定降雨データを用いて将来降雨の予測を行い、これらの降雨データから洪水流量の予測を次のプロセスで刻々行うものである（図-１）。

i）<u>流量の成分分離</u>

流出がいくつかの流出系からの成分から成ることは、概念的には久しい以前から受け入れられている考えである。最近に到り、試験流域など現場における観測からも、また地球化学的流出成分データの解析からも、この考え方の妥当性は確かめられている。しかし、その内容や成分分離の機構については、Horton流の考え方は大きな修正や訂正を求められている。また流量データが得られた場合、このデータをいかに成分に分離するかは大きな問題である。もちろん、地球化学的分析データがあれば、それは可能であるが現在のところオンライン予測に利用しうる程迅速に化学成分分析を行うことはできない。

著者は、既応の洪水の逓減曲線より特性の決まる数値フィルターにより流量データを成分分離する方法を提案したが、その後地球化学的データの得られているものについて、フィルター法と地球化学的法による成分分離の結果を比較して、フィルター分離法が地球化学的方法による結果と良く一致すること、したがって、フィルター分離法が十分信頼性のあることを示した[2]。

流量時系列 $y_i$ は次式により時々刻々成分 $y_i^{(1)}$（地下水流出）、$y_i^{(2)}$（中間表面流出）に分離される。

$$y_i^{(1)} = \alpha \Sigma w_i y_{i-i} \tag{7}$$

$$y_i^{(2)} = y_i - y_i^{(1)} \tag{8}$$

もし、必要ならば第2成分 $y_i^{(2)}$ を更に2つの成分に分離すれば良い。

ii) 成分系への有効降雨の逆算

実降雨は土壌中を浸透しながら変形し、流出系への有効降雨成分となる。この降雨の各流出系への分離は非線型であるが、流出系そのものは線型系として取り扱えることは、種々の証拠から認めることができる。そこで、一つの応答系が線型であり、系の動特性（今の場合には各系の応答特性は、　unit graph、AR係数等）が既知であれば、入力（降雨）から出力（流量）の推定はもちろん、逆に出力（流出）から入力（降雨）を逆算することも同様に可能である。

では、各成分系の特性はどのようにして求めたら良いのであろうか。普通ならば、入出力データから系の動特性は容易に求められる。しかし、降雨流出系の場合には、出力である成分流量時系列は上述のようにフィルター分離法で求められるが、有効成分降雨を直接的に分離することは残念ながら出来ないので、通常の同定方法は適用し得ない。

しかし、幸いなことに時間単位の降雨は白色雑音という性質を持つので、これの性質を利用すれば系の特性を推定することが可能である。すなわち、成分流量 $y^{(\ell)}$ は、自己回帰式（AR式）により次のように表される。（簡単化のために、成分を表す上付き記号を省く）。

$$y_i = a_i\, y_{i-1} + a_i\, y_{i-2} + \cdots\cdots + n_i \tag{9}$$

時系列 $y_i$ (i=0,1,2,・・・)が与えられると、白色雑音 $n_i$ はわからなくとも、AR係数はYule-Walker法、Burg法などにより推定することができる[1)3)]。

iii) 有効成分降雨の逆推定

洪水の予測は、予測時間が短い場合（同時刻とか1- 2ステップ先の予測）には流量時系列のみのフイルタ一リングによる予測も一応は可能である。しかし、これとても多くの場合急激に上昇する洪水流量の増加に追い付けず、ましてや洪水ピークの予測は無理で多くの場合予測値が実測値をオーバーシュートしてしまう。

ある程度長い予測時間に対して、洪水予測を正確に行うにはやはり入力である降雨の予測が必要である。しかし、それに先立って、実降雨を各成分系に分離すること、ないしは成分降雨を何らかの方法で推定することが必要である。ここでは、白色雑音 $n_i$ が降雨に相当することから式(9) を書き替えて次式により成分降雨を逆推定する。

$$x_{i-1} = (y_i - a_1 y_{i-1} - a_2 y_{i-2} - \cdots\cdots) / \lambda b \tag{10}$$

$$i = (1, 2, \cdots\cdots, n)$$

ここに、成分系を表す上付き添字$(\ell)$ は省略してある。また、係数bは降雨一流出の連続関係から次式で決まる係数，λは単位変換係数である。

$$b = 1 - a_1 - a_2 - \cdots\cdots \tag{11}$$

式 (10)から成分降雨を逆推定するには、式 (10)を各時間ステップごとに逐一的に解く (i)直接法と、現時刻までの (i =1,2,・・・,n)すべての単位図形応答関係式(12)を連立させて解く方法がある[4)]。

$$y_i = h_1 x_{i-1} + h_2 x_{i-2} + \cdots \qquad (12)$$

ここに、$h_j$はAR係数$a_i$の変換から求められる。

後者は更に(ii)平滑化最小二乗法（SLQ)と、降雨が負値を採らないことの条件のもとに誤差を最小にする最適問題

$$x_i > 0 \qquad (i = 1, 2, \cdots, n) \qquad (13)$$

$$\Sigma \mid \varepsilon_i \mid \rightarrow \min \qquad (14)$$

として解く（iii)線型計画法(LP)がある。

理論的に考えて最も合理的なものは（iii)LP法である。しかし、計算時間がやや長く（といっても一時間ぐらいのオンライン予測では問題とならない短い時間であるが）、計算結果も（i)直接法とほとんど変わらない。逆に言えば直接法の信頼度はかなり高いということになる。（i)直接法では負の降雨が算出される場合があり、この場合には行きすぎを補償するために直後に正・負の大きすぎる降雨推定が交互に算出されるので、すぐにそれとわかる。このような場合には、実際は降雨は終了しているのであり、むしろ成分降雨の逆推定を打ち切ると良い。

(ii) SLQ法では、逆推定降雨列が平滑化され過ぎる傾向があり、平滑化係数を小さくすると負値降雨が算出されるという欠点がある。

iv) 降雨予測

さて、こうして求められた逆推定降雨は実際降雨そのものではない。というのは、逆推定降雨は実降雨が土壌浸透過程で（i)遅れと(ii)変形を受けたあとの成分有効降雨だからである。しかし、われわれの目的は降雨予測ではなく、洪水予測であるから、遅れと変形を受けた後の有効成分の予測ができれば十分なのである。もし、実降雨を知りたければ、逆算降雨をそれが受けた遅れと変形を元に戻せば良い。成分降雨の予測には次の方法が考えられる。

(a) 逆算有効降雨の外挿： 逆算降雨が推定しうるのも現時点までであって、洪水予測に必要な将来の降雨時系列はわからない。しかし、地下水成分降雨は、土壌中への浸透過程で平滑化されなだらかな変化をする。したがって、単純外挿により将来の有効降雨が求められる。

$$x^{(\ell)}_{i+i_p} = (\rho^{(\ell)})^{i_p} x_i^{(\ell)} \qquad (15)$$

ここに、外挿の荷重$\rho$はこの例では$\rho$=0.8とした。

一方、直接流出への有効成分降雨は、実際降雨の不規則性に応じて不規則に変化する。そのため、単純外挿は意味がない。過去数時間に亘って平滑化した降雨$x^{(2)}(t)$を外挿する。

(b) 降雨データからの降雨予測（推定）

現時点t=tまでの降雨データが得られる場合でも、それらの降雨データがそのまま有効成分降雨となるわけではないので、現時点までの有効成分降雨は実際流量データからの逆算法による値を用いる。 現時点以後は実測流量データがないので、逆算有効降雨を求めることはできない。しかし、降雨データがある場合に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、この時間(lag2)だけ先の降雨データがあることになる。そこで、単純な流出率によるか、または先に述べた分離則とv.s.a.の考え方を用いて成分降雨を予測する。しかし予測時間が、流出までの遅れ時間を超過すると、前と同様に平滑化外挿により成分降雨を予測する。

中間表面流出成分の予測は、現時点までの降雨の内、遅れ時間に対応する数時間分の降雨は未だ流出系には作用していないこと、地下水成分降雨の変化は極めてゆるやかであることから、次式により行う。

$$x^{(2)}_{i+i_p} = f \cdot X_{i+i_p-lag2} - x_i^{(1)} \qquad (16)$$

もしくは

$$x^{(2)} = a(s) \{ X_{i+i_p} - x_i^{(1)} \} \qquad (17)$$

ここに、ip：予測時間ステップ、$lag_2$：降雨の作用の遅れ時間、$f$：流出率、a(s)：流出寄与率。ただし、上式は$ip < lag_2$の範囲で適用する。この範囲を越える予測時間については (a)の方法による。一般に$lag_2$は 2-3時間であるので、2-3 時間先の予測ならば、この方法を採れる。

(c) 予測可能性の上限を知るために、将来の実降雨もわかったとした仮想的な場合を考え、(ii)の方法で降雨予測を行う。

vi) <u>洪水予測</u>

洪水流量の予測はもう簡単で、これらの成分降雨の予測値を用いて、式(18) あるいはAR係数を変換して得られる成分単位図hi式(19) により行われる。

$$y_{i+ip} = a_1 y_{i+ip-1} + a_2 y_{i+ip-2} \cdots\cdots + b x_{i+ip-1} \qquad (18)$$

あるいは

$$y_{i+ip-1} = h_1 x_{i+ip-1} + h_2 x_{i+ip-2} + \cdots\cdots \qquad (19)$$

式(18)のAR式の yに予測値を次々に代入して行くとき、AR式による予測値は不安定な挙動を示すことがあるので、式(19)のMA式すなわち単位図法による方が良いであろう。ただし、一般にAR式表現は項数が少なくてすむが、これをMA式に変換すると項数は多くなる。

## 3. 結果：

神流川データを用いた予測結果の一例を示す。これらの図より、2-3 時間予測ならどの方法の組み合わせでも十分の精度があり、5-6 時間先の予測なら(b)の降雨予測でも十分信頼しうると云える。

i)予測誤差の評価：予測誤差については、次の二つの評価法を行った。

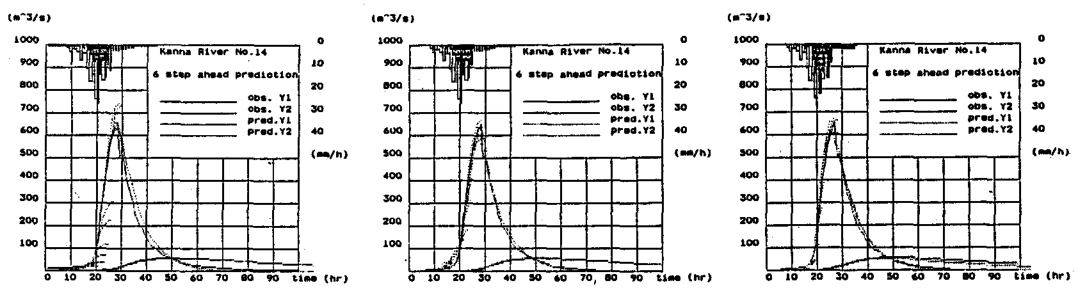
a)各時刻での相対誤差

$$\varepsilon(t) = [\,Y(t) - (\,y^{(1)}(t) + y^{(2)}(t)\,)\,] \qquad (20)$$

b)予測時点までの予測誤差の r.m.s. (21)

$$\Delta = [\,\Sigma\,\{Y(t) - (\,y^{(1)}(t) + y^{(2)}(t)\,)\,\}^2\,]^{1/2}$$

一時間ステップの予測をすすめるのに必要な計算時間は、降雨の逆算を直接法 ·平滑化最小二乗法(SLQ)·LP（線型計算法）のいずれで行うかにより異なる。計算時間はこの順序に増大する。直接法はほぼ瞬時に計算を完了するが、SLQ法やLP法では 5-10 分程度と長くなる。また、降雨の逆推定精度は直接法とLP法はほぼ




( a ) ( b ) ( c )

Fig.2

同程度で実降雨に近いが、 SLQ法では逆算結果が実降雨を平滑化しすぎる傾向がある。LP法では逆探降雨には負値が生じることはないという利点があるものの、逆算時間が長い上に、逆算降雨の精度は直接法とほぼ同程度である。というよりは直接法による結果が例外的に数個の負降雨値を算出する以外には、特別の場合を除いて直接法による逆算降雨で十分である。

表－1　６時間先予測の計算例（Fig.2）の説明

| 図番号 | 現時点までの降雨 | $x^{(2)}$ 降雨の予測（lag2＝２hr） | |
|---|---|---|---|
| | | $i_{p}$＝＜lag2 | $i_{p}$＝＞lag2 |
| Fig.2(a) | 逆算（直接法） | 外挿 | 外挿 |
| Fig.2(b) | 逆算（ＬＰ法） | 分離則 | 外挿 |
| Fig.2(c) | 分離則 | 分離則 | 分離則 |

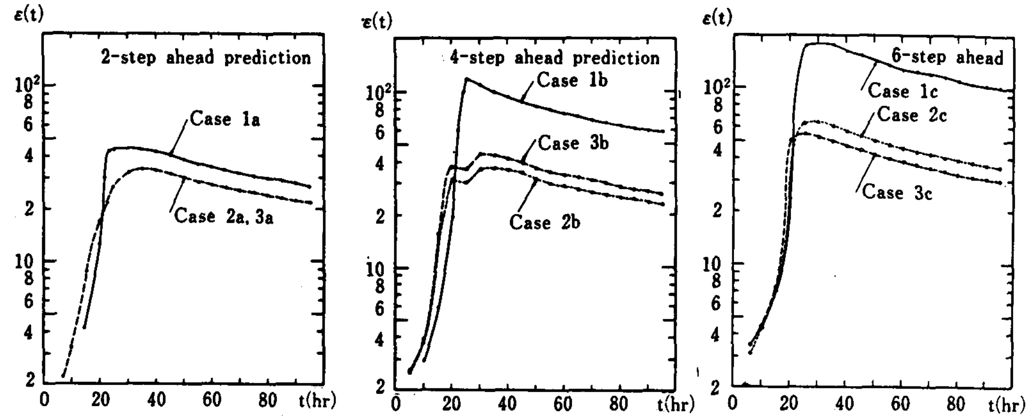



Fig.3

**参考文献**


１）日野幹雄・長谷部正彦(1982)：フィルター分離AR法による非線型流出系の同定と予測（時間単位）、土学会論文報告集、第 319号

２）日野幹雄・長谷部正彦(1984)：地球化学的データ（$\delta^{18}$Ｏ）とフィルター分離AR法による流出成分分離について、第28回水理講演会論文集、553-556.

３）日野幹雄・長谷部正彦(1985)：水文流出解析、森北出版

４）Hino, M. (1986)：Improvements in the inverse estimation method of effective rainfall from runoff, J. of Hydrology, vol.83., 137-147

５）日野幹雄・金治弘(1984)：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に関する研究、土木学会論文集、第351号、155-162.

６）Hino,M. and Kim,C.-H.(1986)：Nonlinear flood forecasting by the filter separation AR method, J. of Hydrology (to be published).