

幾つかのモデルによる洪水のオンライン予測 Real Time Forecasting by Some Rainfall-Runoff Models

宇都宮大学 工学部 正 員 長谷部 正 彦
東京工業大学工学部 正 員 日 野 幹 雄

1. はじめに

水文量の短時間の実時間の予測は、洪水予報や洪水調節等に適応されつつある。従来、特に水文量の流出に関しての流出予測の方法には、カルマン・フィルター⁽¹⁾あるいは拡張カルマン・フィルター⁽²⁾等幾つかの流出予測モデルが提案されている。本解析では、K.M.Loague and R.A.Freeze⁽³⁾(1985)による論文で発表された流出予測モデルすなわち回帰モデル、単位図法そして準物理モデル(quasi-physically-based-model)とフィルター分離AR法を同一水文資料に適用して流出解析を行い流出構造を明らかにして、これらの結果を基礎として流出予測を行い上記のモデルと予測の精度を比較検討する。なお、本研究における洪水予測計算は、Basic のプログラムによりパーソナルコンピュータ (PC-9801 VM2)により行うものである。

2. 水文資料及び特性

本研究に用いた水文資料は、オクラホマ州 Washita川の流出試験地の降雨量、流出量であり、用いた期間は、1966～1974年の9年間の洪水である。また流域面積は、 $A = 0.04 \text{ mile}^2 (0.1 \text{ km}^2)$ である。この流域内の気候は、亜湿潤気候で、土地利用形態は、放牧区域であり、そして土地の地質は主にシルトローム（透水係数は $4.9 \times 10^{-4} \sim 7.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ）である。流域の勾配は、緩く3%である。

3. 従来の流出予測モデル による検討

フィルター分離AR法による流出解析を行う前に、文献(3)の論文により解析された予測結果を紹介する。

3.1 線形回帰モデル

この研究では、総雨量(P_D)と総流出高(Q_D)、ピーク降雨量(P_{MX})とピーク流出量(Q_{PK})及びピークまで達する降雨時間(t_{MX})と流出時間(t_{PK})との間に線形回帰式を適用している。

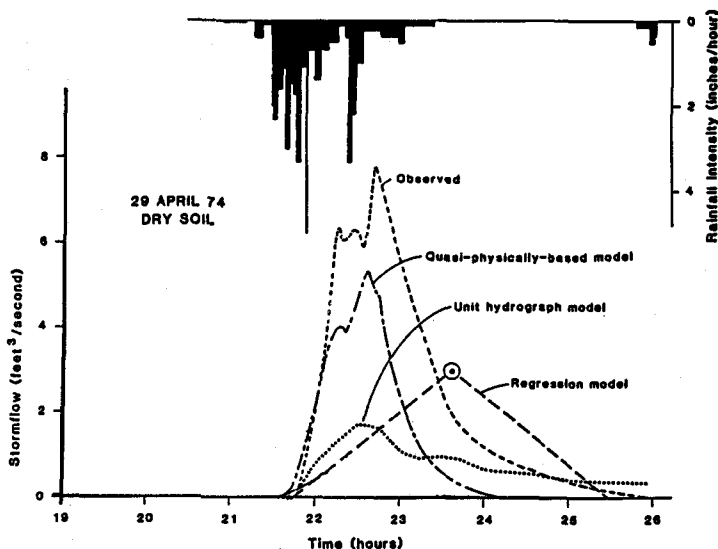


図-1 ワシタ川の実資料と従来の解析による流出予測

$$\begin{aligned} Q_D &= a_1 P_D + a_2 \\ Q_{PK} &= a_3 P_{MX} + a_4 \dots\dots\dots (1) \\ t_{PK} &= a_5 t_{MX} + a_6 \end{aligned}$$

ここに、 $a_1 \sim a_6$ はパラメーターである。これらの $a_1 \sim a_6$ のパラメーターを検証期間と予測期間に区別して、検証期間の水文資料により決定する。このようにして、 $a_1 \sim a_6$ までのパラメーターにより流出予測して、予測区間の実資料と比較した結果を図-1に示す。

3.2 単位図法

ここでは瞬間単位図 $u(t)$ を用いて流出量 $Q'(t)$ を次式で求める。

$$Q'(t) = \int_0^t u(t-\tau) r'(\tau) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $r'(t), Q'(t)$: 余乗降雨量、有効(直接)流出量であり、 $r'(t), Q'(t)$ は(3)式で与えられる。

$$\begin{aligned} r'(t) &= r(t) - \phi \\ Q'(t) &= Q(t) - Q_b(t) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $r(t)$: 観測降雨量、 $Q_b(t)$: 基底流出量、 ϕ : 指数であり、それぞれ $Q_b(t), \phi$ は、(4)式で与えられる。

$$\begin{aligned} \phi &= a_7 P_D + a_8 P_{MX} \\ Q_b(t) &= Q_0 + a_9 t \quad (Q_b(t) < Q(t)) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 Q_0 : 初期流量、 $a_7 \sim a_9$: パラメーターである。 $a_7 \sim a_9$ のパラメーターを検証区間の水文資料により同定する。なお単位図は、検証区間の n 洪水により n 個の瞬間単位図が推定されるが、予測区間に用いる単位図は、 n 個の単位図の平均のそれを用いる。流出予測の結果を図-1に示す。

3.3 準物理モデル(quasi-phsically based model)

この流出モデルは、a) 降雨の浸透のアルゴリズム、b) 斜面から河道に流入する地表流と、c) 河道の流れをkinematic-routing アルゴリズムから成り立っている。浸透のアルゴリズムは、次式で与えられている。

$$v = S t^{-1/2} / 2 + K_0 / 2 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 S : 吸収能、 K_0 : 飽和透水係数、吸収能 S は、Parlange'sの式から求める。

地表流及び河道流の Kinematic-routingのアルゴリズムでは、一次元の浅い流れの Kinematic theory法を適用して、パラメータとしては勾配 S_0 マニングの粗度係数 n_0 を用いている。以上の様にして、各アルゴリズムでのパラメータを同定して流出予測した結果を図-1に示す。

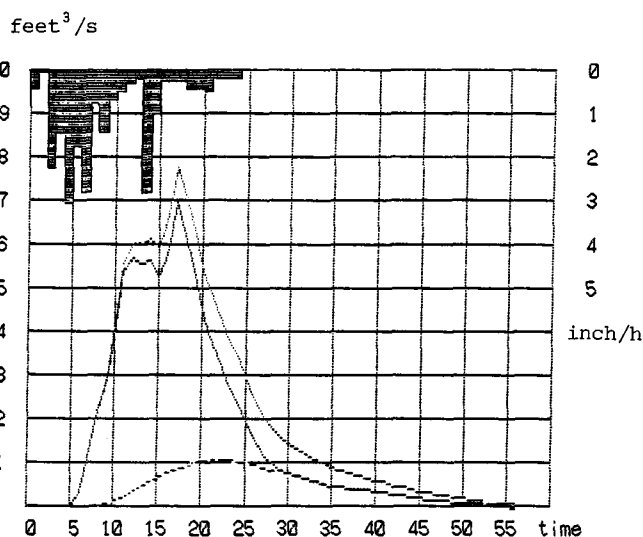


図-2 流出分離

4. フィルター分離AR法による流出解析

フィルター分離AR法による流出解析は、以下の様な手順で解析する。この論文では、詳細なことは、他の文献⁽⁴⁾等に譲り、ここでは簡単な説明と、その結果を示す。

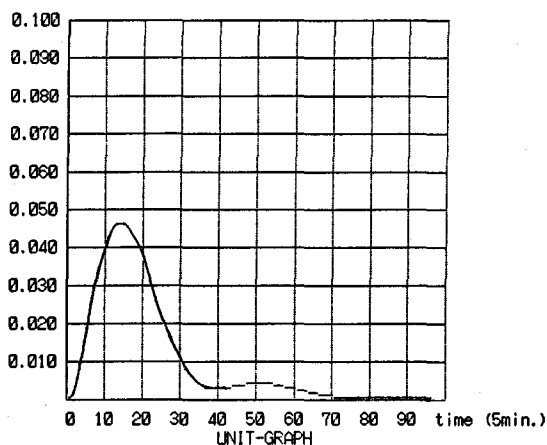


図-3 長周期成分の応答関数

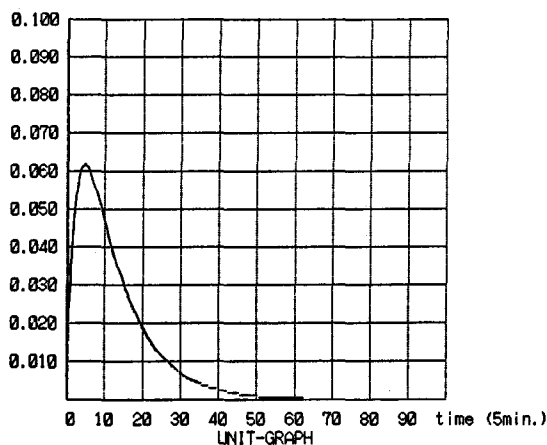


図-4 短周期成分の応答関数

(a) 流出分離

流出量（ハイドログラフ）を短周期成分と長周期成分とに流出分離する。ハイドログラフの逓減部の時定数を用い（本解析では $T_c = 7$ ）、数値フィルター $w(\tau)$ により流出分離する。

$$y^{(1)}(t) = \alpha \sum w(\tau) y(t-\tau) \quad \dots\dots (6)$$

α : 重み係数、 $y^{(1)}(t)$: 長周期成分、
 $w(\tau)$: 数値フィルター、 $y(t)$: 全流出量。1.0
 流出分離の結果を図-2に示す。

(b) 単位図

各流出成分の応答特性を示す単位図は、各流出成分の逓減部あるいは降雨終了後の流出量にAR過程を適用して、AR係数から(7)

式により求める。本解析では、長周期成分は、7次のAR係数、短周期成分は、2次のAR係数である。

$$h_m^{(1)} = \sum_{j=0}^m h_{m-j} a_j \quad (m > 2) \quad (1=1,2) \quad \dots\dots (7)$$

図-3、4に各流出成分の単位図を示す。

(c) 降雨の逆推定

各流出成分のAR次数が推定されたので、下記の式により各流出成分の流量時系列から有効降雨が推定される。

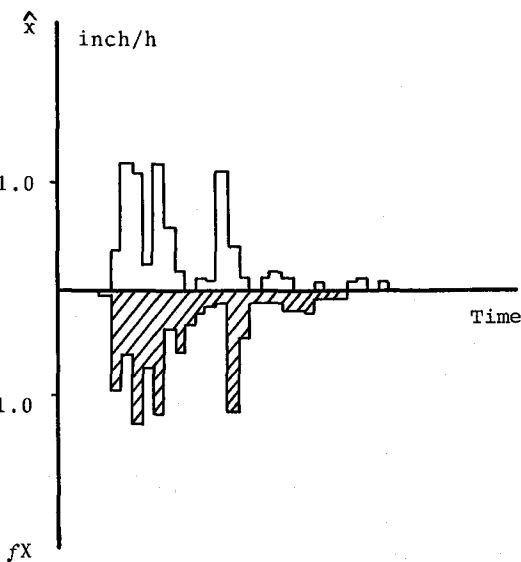


図-5 逆推定降雨と実測の有効降雨

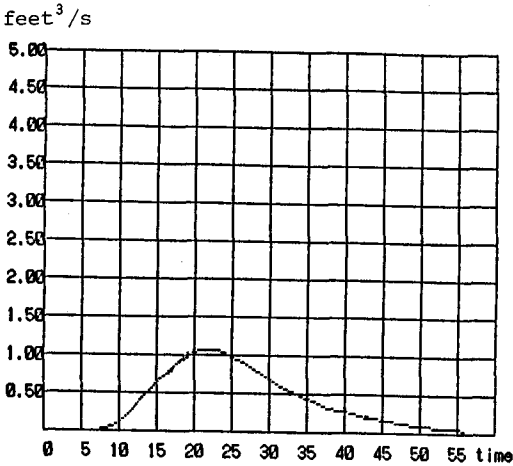


図-6 長周期成分のモデルの検証

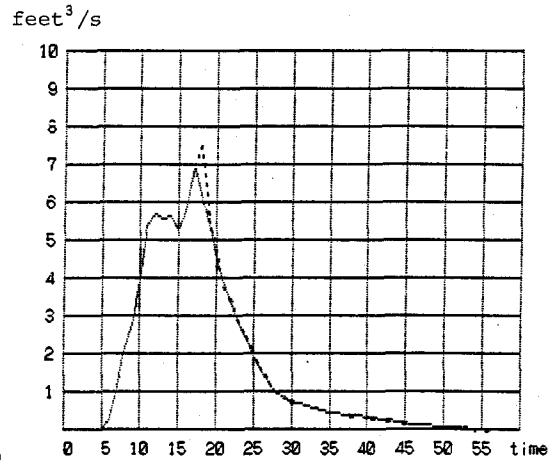


図-7 短周期成分のモデルの検証

$$\hat{x}_i^{(1)} = \gamma^{(1)} (y_i^{(1)} - a_1^{(1)} y_{i-1}^{(1)} - \dots - a_p^{(1)} y_{i-p}^{(1)} - \epsilon_i^{(1)}) \quad \dots (8)$$

ここに、 $\gamma^{(1)}$ は単位換算係数。

各流出成分の逆推定降雨が推定されたので長周期成分の逆推定降雨に、遅延フィルターと伸長効果を考慮して短周期成分の逆推定を加えると逆推定降雨が推定される。図-5に、逆推定降雨と観測降雨に流出率（本解析では $f=0.4$ ）を乗じて得られた有効降雨との比較結果を示す。これから有効降雨と推定有効降雨は、ほぼ一致していることがわかる。

(d) 各流出モデルの検証

前節(c)により有効降雨と逆推定降雨とが、ほぼ一致しているが、ここでは、各流出成分の流出量から逆推定された有効降雨と先の(b)で求めた単位図から、各成分の流出量を(9)式で計算して、もとの流出分離された成分とを比較する。

$$\hat{y}^{(1)}(t) = \sum_{\tau=0}^m h^{(1)}(\tau) \hat{x}(t-\tau) \quad (1=1,2) \quad \dots (9)$$

ここに、 $\hat{y}^{(1)}(t)$ ：単位図と逆推定降雨とから計算された1成分の流出量、 $\hat{x}^{(1)}(t)$ ：1成分の逆推定降雨、 $h^{(1)}$ ：1成分の応答関数。

図-6、7に、 $\hat{y}^{(1)}(t)$ ともとの流出量 $y^{(1)}(t)$ とを比較した結果を示す。良く一致していることがわかりこのモデルの妥当性が示された。

以上のように(a)～(d)の手順により流出解析を行ってきた結果、この流域の降雨から流出に変換する過程を考えると図-8に示されるようなシステムが考えられる。

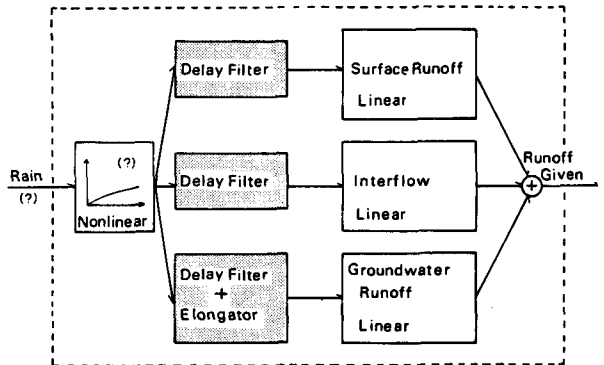


図-8 降雨-流出系のシステム

5. 流出予測

図-8に示す様なシステムが明らかになったので、このシステムに入力（降雨）を作用させて流出予測を行う。流出予測を行うには⁽⁵⁾、降雨の逆算を、直接法、平滑化最小二乗法及び線形計算法の三つの方法を用いるが、本解析の場合には直接法で流出予測を行う。予測は、観測時点までの降雨データを使って、0,1,2 step先の流出予測をパソコンにより行う。結果を図-9、10、11に示す。

(feet³/s)

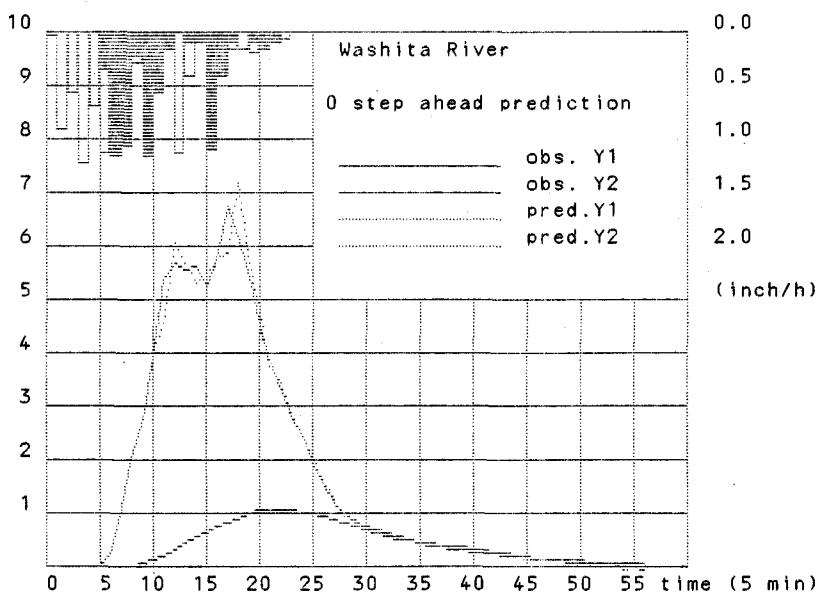


図-9 流出予測図 (0 step)

(feet³/s)

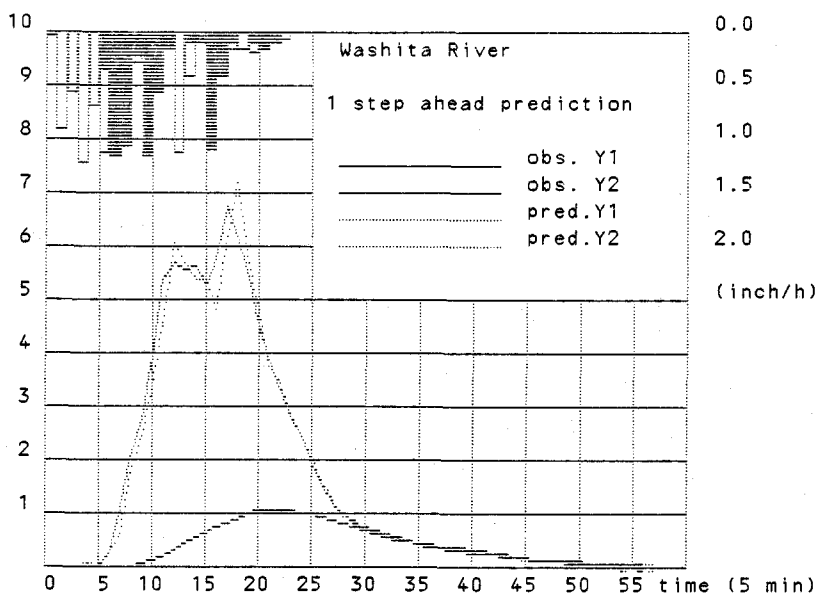


図-10 流出予測図 (1 step)

(f^3/s)

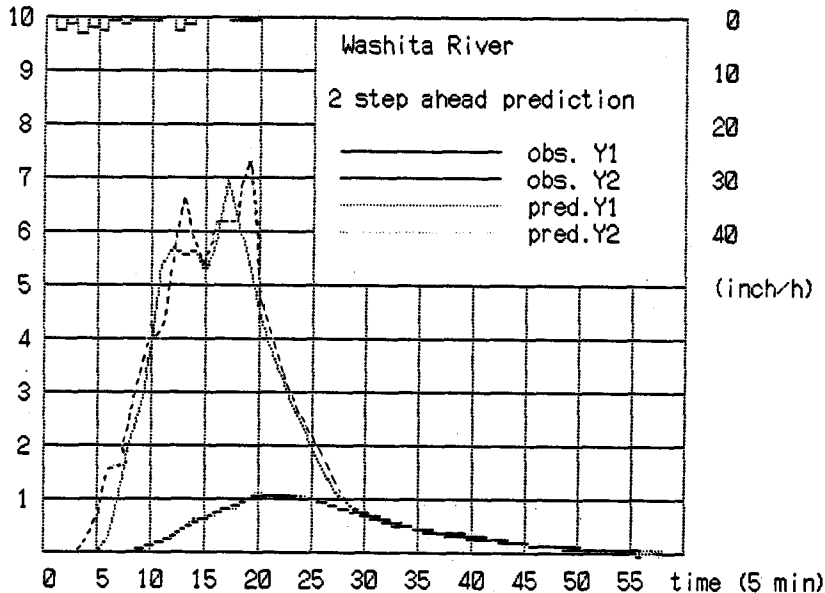


図-11 流出予測図 (2 step)

6. あとがき

幾つかのモデル（回帰モデル、単位図法、準物理モデル）とフィルター分離AR法とで流出予測を行った。その結果、論文⁽³⁾ による予測結果については、検証区間と予測区間との通用データの期間がわからないので判断はしかねるが、あまり良い予測結果が得られていないと思われる。一方、フィルター分離AR法での予測では、ほぼ十分な予測精度が得られたように思われる。今後、他の水文資料への適用や、直接法以外の予測法をも検討していきたい。なお、この研究は、自然災害特別研究(1)『中小河川系を対象とした小型コンピュータによる降雨および洪水のオンライン予測』、代表、東京工業大学工学部・日野幹雄教授の補助を受けました。

7. 参 考 文 献

- (1) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用、土木学会論文報告集、第221号、1974
- (2) 高俣琢馬・椎葉充晴：状態空間法による流出予測、京大防災研年報、第23号、B-2、1980
- (3) Loague, K. M and R. A. Freeze: A Comparison of Rainfall-Runoff Modeling Techniques on Small Upland Catchments, Water Resources Research, Vol21, No.2, 1985
- (4) 日野幹雄・長谷部正彦：水文流出解析、森北出版、1985
- (5) 日野幹雄：パソコンによる中小河川洪水のオンライン予測：第5回自然災害科学会学術講演会要旨集、1986
- (6) 長谷部正彦・荻田利一・日野幹雄：洪水のオンライン予測について：第5回自然災害科学会学術講演会要旨集、1986