土木学会第45回年次学術講演会（平成2年9月）

II-55　洪水予測システムにおける次元と計算時間の限界について

京都大学工学部　正　員　椎葉　充晴　京都大学工学部　正　員　高棹　琢馬
京都大学大学院　学生員　劉　春燕　河川情報センター　正　員　上林　好之

1　はじめに　著者らは，降雨と流量の予測情報を実際に使われ易い形で与える問題について考察し，そのための新しい実時間予測のアルゴリズムを提案して，その有効性を示した[1]．しかし，その計算には大型計算機を用いており，大型計算機が利用できないような河川管理の現場でも有効であるかについては検討していない．そこで，本研究では，パーソナルコンピュータ（PC-98XL）とワークステーション（Tektronix 4132）を用いて，計算の現実性を調査した．

降雨の空間的分布や雨水の貯留量の空間的分布を考慮すると，流域が大きくなると集中型の流出モデルを用いることには問題がでてくる．そうした場合，流域を分割して，集中型のモデルを連結した形のモデルを考えることになろう．こうした分割によるメモリーの消費，計算時間の増大が，精度の要求との関連でどの程度の重要性をもつか，パーソナルコンピュータやワークステーションで対応できる程度であるかを調査することも重要であると考え，多段非線形貯水池モデルを用いた解析を行った．

2　貯留関数法を用いたシステムの表現　流域の流出高と貯留高との関係について，永井ら[2]は次のような経験式

$$q = ks^m, \qquad k = (1/5.5A^{0.14})^m, \quad m = 5/3 \tag{1}$$

を導いている．ただし，s は貯留高(mm)，q は流出高(mm/h)，A は流域面積(km^2)である．永井らは，遅滞時間 T_L についても，流域の面積とピーク流量の有効降雨強度換算値で表現する経験式を導いているが，簡単のため，$T_L = 0$ に固定する．

さらに，モデルの誤差や観測誤差を表現するノイズ項を導入して，流出システムを確率過程的に表現すると

$$ds(t)/dt = -ks^m + r(t) + p(t) \tag{2}$$

$$y(t) = \frac{A}{3.6}ks^m + w(t) \tag{3}$$

が得られる．ただし，$r(t)$（mm/h）は降雨強度，$p(t)$, $w(t)$ はモデル誤差や観測誤差を表現するために導入したノイズベクトル，$y(t)$（m^3/s）は流域の下流端の流出量である．

もし，流域が矩形であると想定し，n 等分割すれば，次のような連立方程式が成り立つ．

$$\begin{aligned} ds_1(t)/dt &= -k_1 s_1{}^m + r(t) + p_1(t) \\ ds_2(t)/dt &= -k_2 s_2{}^m + k_1 s_1{}^m + r(t) + p_2(t) \\ &\vdots \\ ds_n(t)/dt &= -k_n s_n{}^m + k_{n-1} s_{n-1}{}^m + r(t) + p_n(t) \end{aligned} \tag{4}$$

ただし，$p_i(t)$ はノイズ項，$k_i = ik/n^m((i/n)^a - ((i-1)/n)^a)^m$，$a=1+1/m$ である．流域の下流端の流量 y は次式によって表される．

$$y(t) = \frac{A}{3.6n}k_n s_n{}^m + w(t) \tag{5}$$

3　流出量系列の確率的予測手法　流出量系列の確率的特性を予測する手法として，著者らがすでに提案している方法(フィルタリングによる方法と呼ぶ)とモンテカルロシミュレーションによる方法の２つを採用して比較する．

フィルタリングによる方法とは次のような方法である．流出量の系列 $y(1), \ldots, y(M)$（M は流出量の系列を考える長さ）の同時確率分布を得るために，予測計算の最終段階で，$y(1), \ldots, y(M)$ の推定値系列と推定誤差共分散行列が求められるようにする．そのために,流出システムの本来の状態量ベクトル，ノイズベクトル，降雨ベクトルからなる拡張された状態量ベクトル $x(t)$ を更に拡張して次のように定義する．

$$X(t)^T = (x(t)^T, y(1), \ldots, y(j))^T, \quad j \le t < j+1 \tag{6}$$

$X(M+)$ の推定値 $\tilde{X}(M+)$ と推定誤差の共分散行列 $\mathrm{Var}\{X(M+) - \tilde{X}(M+)\}$ が求められるまで予測計算を繰り返し，$\tilde{X}(M+)$ の後半の M 次ベクトル，$\mathrm{Var}\{X(M+) - \tilde{X}(M+)\}$ の右下 M 次の行列を取り出して，$y(1), \ldots, y(M)$ の推定値系列と推定誤差共分散行列を得る．正規分布仮定をおいて，これらのパラメタから流量系列に関する統計的諸量を計算する．

表 1. 面積の異なる3流域，異なる分割数，2種類のコンピュータでの予測計算時間の比較

計算機の種類			Personal Computer NEC PC-98XL				WorkStation Tektronix 4132			
流域の分割数			1	5	10	15	1	5	10	15
流域 A 1000 km²	M	計算時間	9:32	128:09	／	／	7:57	38:39	182:30	／
		期待値	1421	1276	／	／	1428	1286	1244	／
	F	計算時間	0:31	0:58	2:24	5:38	0:23	0:30	1:08	1:49
		期待値	1403	1265	1224	1200	1431	1294	1256	1231
流域 B 500km²	M	計算時間	9:14	／	／	／	7:55	40:07	／	／
		期待値	779	／	／	／	782	733	／	／
	F	計算時間	0:31	0:59	2:24	5:40	0:17	0:25	0:52	1:49
		期待値	770	722	711	704	785	738	728	722
流域 C 100km²	M	計算時間	9:31	／	／	／	8:00	39:30	／	／
		期待値	186	／	／	／	187	189	／	／
	F	計算時間	0:30	0:57	2:30	5:49	0:17	0:25	0:56	1:53
		期待値	184	188	193	194	188	192	196	197

モンテカルロシミュレーションによる方法とは，元の方程式のノイズ項に対応する乱数を多数発生させて対応する分布を統計的に求めるものである．

4 適用 面積の異なる3つの流域を例に15時間先までの流出を予測し，主要な結果を表に示す．表中，Mはモンテカルロシミュレーションによる方法を，Fはフィルタリングによる方法を，"期待値"はピーク流量の平均値を表している．"計算時間"の欄で，例えば，9:32とあるのは，9分32秒であることを表している．

貯留高の初期分布は空間的に無相関で，状態方程式のノイズ項は，空間的には無相関，時間的には指数関数的相関を持つものとして取り扱った．

PC-98XL（i80286，i80287登載）では，フィルタリングによる方法の計算時間は，流域を分割しない時，モンテカルロシミュレーションによる方法の計算時間の1/19であるが，流域の分割数が増えるにつれて，計算時間の比は小さくなっていく．モンテカルロシミュレーションによる方法では，計算時間は，流域を分割しない場合でも5分，5分割では2時間にもなる．流域を10個以上に分割する場合には，計算時間はもっと容認できない程度になる．しかし，フィルタリングによる方法では，流域を15個まで分割しても，計算時間は6分までに収まっている．

Tektronix 4132（NS32016登載）を用いる場合，全般的に計算時間がPC-98XLの計算時間より短いが，フィルタリングによる方法とモンテカルロシミュレーションによる方法との関係はPC-98XLでの関係とおなじである．モンテカルロシミュレーションによる方法で，計算時間は，流域を5つに分割する場合，8分以内であるが，分割数が10になると3時間にもなるので，現実的ではない．

流域を分割することの予測値に対する影響は，流域の面積が大きくなればなるほど大きくなる．流域面積1000 km² のケースAでは分割しない結果と5分割の結果が10%ずれているが，5分割の結果と10分割の結果とのずれは3%に収められる．分割の数が増えると同時に，ずれが小さくなってくることが分かる．しかし，流域面積が100 km² と小さいケースCでは，流域を分割しても結果はさほど変わらない．

したがって，通常考えられる貯留関数の定数のもとでは，流域の分割数としては，5～10程度で十分であるようであり，その程度であれば，フィルタリングによる方法を用いれば，パソコンやワークステーションでも対応できることが明らかになった．

5 結論 PC-98XLとTektronix 4132での数値実験により，フィルタリングによる方法が大型コンピュータの利用できない河川管理現場でも十分に利用できる有効な方法であることが示された．

参考文献：

1) 高棹琢馬・椎葉充晴・劉春燕・上林好之：降雨流出の実時間予測情報の形式について，第34回水工学論文集，pp.79-84，1990．

2) 永井明博・角屋睦・杉山博信・鈴木克英：貯留関数法の総合化，京大防災研年報，第25号B-2，pp.207-220．

3) 高棹琢馬・椎葉充晴：雨水流モデルの集中化に関する基礎的研究，京大防災研年報，第28号B-2，pp.213-220．