実時間流出予測手法に関する2，3の考察

京都大学工学部　正員　高棹琢馬
京都大学工学部　正員　椎葉充晴
京都大学工学部　正員○宝　　馨

1. はじめに

“予測”というものは，それがどの程度の信頼性（精度）をもつのかを明らかにするべきである。このことは流出予測においても例外ではない。特に洪水予報やダム操作等の実時間対応を合理的に行なうためには，予測精度を定量的に把握することができれば便利である。本研究では，流出予測のモデルと手法についてこのような観点から検討し，降雨予測の不確定性を考慮しつつ流出予測精度をも明らかにする実時間予測手法を提示する。

2. 流出モデルについて

単純な時系列モデルでは流出システムの動特性を十分に表現できないが，モデルの不十分さを有色ノイズの導入によって補償してモデルの精度を向上させることができる[1)]。しかし，このようなモデルを用いたとしても，リードタイムが長く（数百 km^2 の流域で2時間以上）なると流出予測精度は著しく悪化する。これは，降雨流出という物理現象を単にブラックボックス的に扱うことの不合理性を端的に示すものであると言える。

流出予測においては水文事象の物理性と不確定性を考慮できるようなモデルを用いることが肝要である。流出システムは本来分布型モデルで記述されるべきであるが，数理的取扱いの便宜上集中型の物理モデルを考えて，部分系内の貯留高を状態量とし流量を観測値とする非線形連続－離散型の状態空間モデルを構成する方が都合がよい（(1)，(2)式）。

$$\dot{x} = f(x, r_k), \quad t_{k-1} \leqq t < t_k \tag{1}$$

$$y = g(x) \quad , \quad t = t_k \tag{2}$$

ここに，x：状態量ベクトル，r_k：確定値入力（降雨），y：（流量）観測値，t：時間，f，g は一般に非線形関数で，t_i（$i = 1, 2, \cdots$）は流量観測時刻を表わす。

3. 現象の不確定性の考慮

水文事象の不確定性を考えるため，(1)，(2)式の x，y，r_k を確率変量として，さらにモデル誤差・観測誤差を補償するノイズを付加する。連続－離散システムの取扱いの詳細は高棹らが既に発表している[2)]が，一般に加算的ノイズが離散時間で付加される。ここでは，

$$x_i(t_k) = x_i(t_k^-)(1 + v_i(t_k)) \tag{3}$$

$$y(t_k) = g(x(t_k))(1 + w(t_k)) \tag{4}$$

のような乗算的ノイズを考えた。ここに，x_i は x の第 i 成分で v_i はそれにかかるノイズ，w は観測ノイズである。状態ベクトルの次元拡大によって，これらのノイズの有色性を考慮できる。乗算的ノイズは，状態量の値が大きい時には相対的にノイズの絶対値も大きいという水文量の特性を表現しうるものと思われる。

Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA, Kaoru TAKARA

また，流出予測においては降雨予測が必要となるので，乱数発生手法によって，降雨予測値の期待値が観測値と一致し，分散がリードタイムと観測値の2乗に比例するように降雨予測値をシミュレートすることにする。

4. 実時間流出予測手法

(1)，(3)，(4)式で表わされる確率過程的状態空間モデルを用い，カルマンフィルター理論を応用して流出予測を行なう。このとき，モデルパラメタは逐次更新(update)せず，状態量（各部分システム内の雨水貯留高）を推定してゆく方法をとる。というのはモデルパラメタは当該流域固有の定数であって，それを便宜的に変動させるやり方は流出システムの本質的な理解に立脚したものとは言えないからである。予測手順を以下に示す。

① 時点 $k-1$ で状態ベクトルの期待値 $\hat{X}(k-1)$ と共分散行列 $P(k-1)$ が求められている。

② 後続の時間ステップにおける降雨の予測値と分散の系列 $\{\hat{r}_{k+i-1}, R_{k+i-1}\}$, $i=1, \cdots, m+1$ が時点 $k-1$ において（降雨予測シミュレーションによって）与えられる。

③ 状態ベクトルの期待値 $\hat{X}(k-1)$ と共分散 $P(k-1)$ を次元拡大して，システム入力である降雨を状態量に組み込み $\hat{\mathbf{X}}(k-1)$, $\mathbf{P}(k-1)$ とする。

④ 与えられた予測降雨に基づいて系の推移を（局所的に統計的線形化しつつ）求めてゆき，$\{\hat{\mathbf{X}}(k+i-1), \mathbf{P}(k+i-1)\}$, $i=1, \cdots, m+1$ を得る。これより流量の予測値とその分散 $\{E[y(k+i-1)], V[y(k+i-1)]\}$, $i=1,\cdots,m+1$ が求められる［流出予測］。

⑤ 時間が経過して時点 k になると直前の時間ステップ $(k-1, k)$ の間の降雨観測値 r_k と時刻 k の流量観測値 $y(k)$ が得られる。

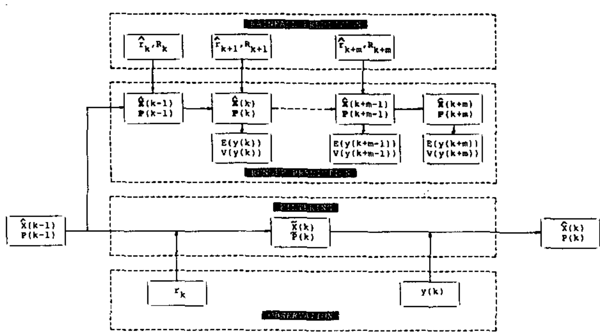
⑥ $\hat{X}(k-1)$, $P(k-1)$ と確定降雨 r_k に基づいて状態の推移を求め直し，時点 k^- における状態 $\tilde{X}(k)$, $\tilde{P}(k)$ を得る。

⑦ 流量観測値 $y(k)$ を用いてフィルタリング計算を実行し，時点 k における状態の推定値 $\hat{X}(k)$，共分散 $P(k)$ を求める。

⑧ $k=k+1$ として①へ戻る。

5. おわりに

本研究で提示した stochastic なモデルと手法はかなり実際的なものである。実流域への適用例は本講演会の別の講演[3] において述べることにする。



降雨予測の不確定性を考慮した流出予測のフロー

〈参　考　文　献〉

1) 高棹・椎葉・宝：確率論的な流出予測に関する研究，京都大学防災研究所年報，1981.

2) 高棹・椎葉：状態空間法による流出予測，京都大学防災研究所年報，1980.

3) 高棹・宝・今村・杉岡：実時間流出予測のモデルと適用例，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，1982.