II－37

河道網系グリッドモデルによる実時間洪水予測手法

京都大学大学院・防災研究所　正員　椎葉充晴、堀 智晴、立川康人、田中賢治、市川温
京都大学大学院　学生員　小糸勇三、ローレンソンザビエル

1 はじめに

筆者らが展開してきた実時間洪水流出予測手法 [1] は，洪水流出モデルを記述する式にモデル誤差や観測誤差を表す項を追加して，モデルを確率過程的なモデルとして，これに Kalman やその他の研究者が開発したフィルタリング・予測理論を適用して，時々刻々得られる降雨や流量の観測値を使って，現在の流域の状態の推定と将来予測を繰り返していくというものである。

この場合，基礎とする洪水流出モデルは，集中型のモデル，例えば，貯留関数モデルやタンクモデルなどを考えることが多かった。これらの集中型の流出モデルは，実際の河川管理の現場で慣用されているものであるので，フィルタリング・予測理論を使わない予測方式から，フィルタリング・予測理論を使う方式に移行するのは，比較的容易であるという利点もあったのである。

しかしながら，一方で，レーダ雨量計に見られるように，水文量の一部については，空間的な分布が時々刻々入手できるようになってきており，流域内の標高の分布，河川の位置なども詳細に分かるようになってきているので，これまでに良く使われてきた集中型モデルではなくて，流域内の雨水の流動を追跡するような分布型のモデルを使う条件が整ってきている。

分布型のモデルによる方が集中型モデルによるより流出ハイドログラフをよく再現できると言い切ることはできないが，分布型のモデルは，流域内部のさまざまな要素のモデルを改良し，関連する物理量を観測していくことによって，モデル構成やモデル同定の方法を改良・発展させていくことができるという利点を持っている。これからは，分布型モデルがますます発展していくものと予想される。

したがって，集中型モデルにフィルタリング・予測理論を適用したのと同様に，分布型のモデルにフィルタリング・予測理論を適用した実時間予測手法を開発することを考えていくべきであろう。一般に，分布型のモデルは，水理学的な基礎を持つモデルから構成されるので，このような方向をとることによって，水理学的な基礎ををもった予測理論が展開されることになるであろう。本報告では，フィルタリング・予測理論の適用を意図して，河川流域の分布型のモデルをどのように組み立てていくかを議論し，実時間予測方式の基本的構想を提示する。

2 分布型モデルへのノイズ項の導入–基本形

フィルタリング・予測理論を適用するには，モデル誤差や入力の観測誤差を表す確率過程的なモデルを導入して，確率過程的なモデルとするのが基本となる。すなわち，元のモデルが，

$$\mathcal{L}(\partial\phi/\partial t, \partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y, \ldots) = 0 \tag{1}$$

と表されるとき，これに，確率的なノイズ $w(x,y,t)$ を導入して，

$$\mathcal{L}(\partial\phi/\partial t, \partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y, \ldots) = w(x,y,t) \tag{2}$$

の形に変換する。ただし，ϕ は，状態量ベクトルであり，t は時間，x, y は空間座標，$\mathcal{L}$ は，状態ベクトルϕ の変動を記述する式を形式的に表したものである。

3 時間的空間的に相関をもつノイズモデルの導入

空間的に分布する確率的なノイズのモデルとして，例えば，つぎのようなモデルが考えられる。

まず，$\xi(\boldsymbol{x},t)$ は，平均 0 分散 $\sigma_\xi{}^2$ の正規白色雑音であって，

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\{\xi(\boldsymbol{x}_1,t_1)\xi(\boldsymbol{x}_2,t_2)\}\\&\quad=\sigma_\xi{}^2\exp\{-\alpha|\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2|\}\delta(t_1-t_2)\end{aligned} \tag{3}$$

で表されるような相関構造を持つとする。ただし，$\boldsymbol{x}$ は，位置 (x,y) を表す。$\delta(t)$ は Dirac のデルタ関数である。

これを用いて，地点 $\boldsymbol{x}$, 時刻 t でのノイズ $p(\boldsymbol{x},t)$ を

$$\partial p/\partial t = -\beta t + \xi(\boldsymbol{x},t) \tag{4}$$

の解とすると，これは，期待値は 0 で，時間的空間的には，

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\{p(\boldsymbol{x}_1,t_1)p(\boldsymbol{x}_2,t_2)\}\\&\quad=\sigma_p{}^2\exp\{-\alpha|\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2|\}\exp\{-\beta|t_1-t_2|\}\end{aligned} \tag{5}$$

で表される相関構造を持つ。

キーワード：流出予測、分布型モデル　連絡先: 京都市左京区吉田本町, TEL:075-753-5094, FAX 4907

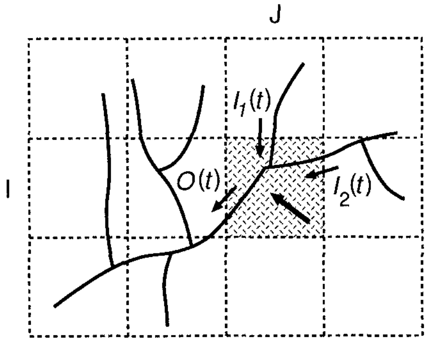

図 1: 河道網グリッドモデル

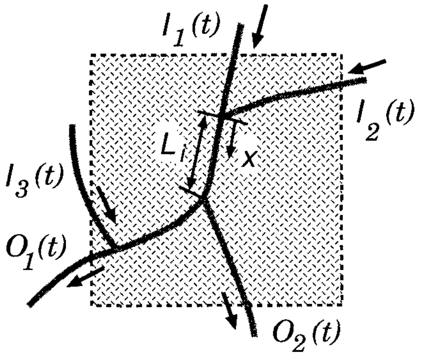

図 2: 集中化 kinematic wave model の説明図

4　水文流出系分布型モデルに予測理論を適用するための工夫

一般に，水文流出系モデルの分布型モデルの全てが，(1) 式に示したように 2 次元座標 (x, y) を使って表されるわけではない。

例えば，河道網系のモデルでは，各河道区分に沿った距離座標 x_i をとって，

$$\mathcal{L}(\partial\phi/\partial t, \partial\phi/\partial x_i, \ldots) = 0 \tag{6}$$

の形の一次元モデルをネットワーク状に接続したもので表されることが多い。

そこで，河川流域に，図 1 に示すように格子をかけて，例えば，格子 (I, J) の中心座標を (x_I, y_J) とするとき，

$$\mathcal{L}(\partial\phi/\partial t, \partial\phi/\partial x_i, \ldots) = p(x_I, y_J, t) \tag{7}$$

の形の確率モデルを構成することを考えることを提案する。ここで，p は，第 3 節で示した時間的空間的に指数関数的相関を持つノイズである。

5　dynamic wave model でモデル化する場合の工夫

河道網系モデルとして dynamic wave model を用いる場合は，preismann スキームを適用して差分化し，それを準線形化すれば，形式的には，フィルタリング・予測理論を適用することができる形になる。河道に沿って設ける差分格子点での河道流の通水断面積と流量が状態量になる。

実際には，差分格子点の個数が非常に多くなるので，全ての差分格子点での河道流の通水断面積と流量の推定誤差の共分散行列を求めるという方法をとることは難しい。したがって，例えば，河道網が格子を横切る地点の河道流の通水断面積と流量との推定誤差の共分散行列だけを記憶することにして，その他の差分格子点での通水断面積と流量の推定誤差は，河道網が格子を横切る地点での通水断面積と流量との推定誤差の線形和で近似することにすることが考えられる。もちろん，このような近似が妥当かどうかを検討していかなければならない。

6　kinematic wave model でモデル化する場合

河道網系モデルとして，kinematic wave model を用いる場合も，dynamic wave model の場合と同様に差分スキームを適用する方法も考えられるが，定常状態を仮定して導かれる河道内貯留量と河道流量との関係式を用いれば，格子毎に集中化された状態方程式を導くことが可能であり，こちらの方が，計算量が少ない。

この場合，格子 (I, J) 内の部分河道網 N について，

$$dS_N/dt = \sum I_i(t) - \sum O_j() + p(x_I, y_J, t) \tag{8}$$

$$O_j(t) = \alpha_j {S_N}^m \tag{9}$$

の形に表されるので，各グリッド内の部分河道網内の貯水量を状態量とする状態方程式を用いることになる。

7　おわりに

河道網系モデルの具体的な取り扱いについては，講演時に示す。分布型モデルを用いた実時間流出予測については，まだ基本的な構想を組み立てたところであり，具体的なシステム構成 (プログラムの作成) と実流域への適用は，今後の課題である。

参考文献

[1] Takasao, T. and Shiiba, M.: Developmwnt of Techniques for On-line Forecasting of Rainfall And Flood Runoff, Natural Disaster Science, 1984, Vol. 6, No. 2, pp. 83–112.