

## 第II部門

## 降雨の逆推定による実時間流出予測手法の開発

京都大学大学院工学研究科 学生員 永田卓也  
 京都大学大学院工学研究科 正員 椎葉充晴  
 京都大学大学院工学研究科 正員 立川康人

**1 はじめに** 正確な流出モデルが与えられ、降雨が誤差なく観測できれば、流出量予測は降雨量予測に帰着するが、実際には降雨量は誤差なく観測できない。また流出モデルにも誤差がある。これらの誤差が複合して、流出予測の誤差が生じてくることになる。

本研究では、流出モデルの入力である降雨量系列をカルマンフィルタ理論によって時々刻々逆推定することにより降雨量系列の推定精度を高めていき、流出予測の誤差を減少させる方法を提案し、その有効性を検証する。

**2 問題の定式化** 時刻  $t$  における単位図の入力である降雨量系列をまとめた列ベクトルを入力ベクトル  $I(t)$ 、その推定値を  $\tilde{I}(t)$  とすると、時刻  $t$  における流出量の推定値  $q(t)$  は  $F(\tilde{I}(t))$  と見なせる。また、その推定誤差の共分散行列を  $\tilde{P}(t)$  とする。

降雨量観測値と観測誤差を時々刻々得て、その値を  $\tilde{I}(t)$  と  $\tilde{P}(t)$  に加えていくと、計算時間が増大してしまう。そこで、流出量の推定の対象にするのは  $\tilde{I}(t)$  の最も新しい成分  $\tilde{I}_1(t)$  から数えて  $J(t)$  個目の成分  $\tilde{I}_{J(t)}(t)$  までとする。

また、 $\tilde{I}_{J(t)}(t)$  から  $\tilde{I}_1(t)$  までの不確かさによる  $q(t)$  の分散を  $V\{q(t)\}_{J(t)}^1$  と表し、推定の対象にする  $\tilde{I}(t)$  の個数を  $J(t)$  から  $J(t)'$  に縮小するときには、 $0 < \lambda < 1$  で 0 に近い  $\lambda$  を取り、

$$V\{q(t)\}_{J(t)'}^{J(t)'} < \lambda V\{q(t)\}_{J(t)}^1 \quad (1)$$

であれば、 $J(t)$  から  $J(t)'$  に縮小するものとする。本研究では  $\lambda = 0.01$  と定める。この方法を  $\lambda$  法と呼ぶ。

本研究では、入力を与えられれば、 $q(t)$  が得られる集中型流出モデルを仮定している。その流出モデルを利用して  $q(t)$  を、

$$q(t) \doteq a_0 + \sum_{i=1}^{J(t)} a_i(I_i(t) - \tilde{I}_i(t)) \quad (2)$$

と統計的に近似して、線形式で表現する。このように線形化することにより、分布型流出モデルを用い

る場合でも、 $q(t)$  を降雨量系列の 1 次式で表現できるようになる。

時刻  $t$  の流出量の観測値  $y(t)$  が得られ、 $A = (a_1, a_2, \dots, a_{J(t)})$  とおくと、この  $y(t)$  が得られた後の  $I(t)$  の推定値  $\hat{I}(t)$  と推定誤差の共分散行列  $\hat{P}(t)$  は、カルマンフィルタ理論から、

$$\hat{I}(t) = \tilde{I}(t) + \tilde{P}(t)A^T(A\tilde{P}(t)A^T + \sigma_{w_t}^2)^{-1}(y(t) - a_0) \quad (3)$$

$$\hat{P}(t) = \tilde{P}(t) - \tilde{P}(t)A^T(A\tilde{P}(t)A^T + \sigma_{w_t}^2)^{-1}A\tilde{P}(t) \quad (4)$$

のように更新計算できる。 $\sigma_{w_t}^2$  は  $y(t)$  の観測誤差分散である。また、本研究では  $\hat{P}(t)$  の正則性を守るために UD フィルター [1] を使用している。

その後、時刻が  $\Delta t$  経過し、アルゴリズムの冒頭に回り、降雨量と流出量の観測値と観測誤差分散を得て、予測計算、更新計算を時々刻々行っていく。

**3 単位図法への適用** 本研究では流出モデルに単位図法を用いる。また 2 種類の単位図を用いて結果を比較する。その 2 種類の単位図  $\gamma$  と  $\theta$  は図 1 に記されている通りである。

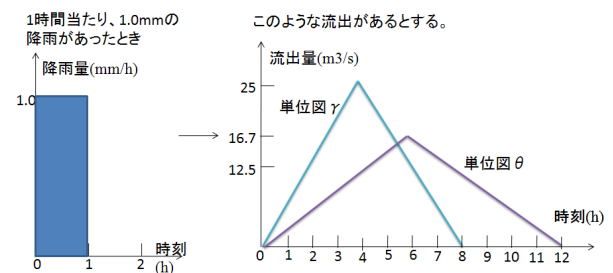


図 1 本研究で用いる 2 つの単位図

単位図法では出力である  $q(t)$  が一定の個数の降雨量にしか依存しないので、その個数を  $\alpha$  とし、 $J(t)$  が  $\alpha$  より大きくなったとき、 $J(t)$  を  $\alpha$  に縮小する方法も考える。この方法を  $\alpha$  法と呼ぶことにする。上記で定めたそれぞれの単位図に誤差のない正確な降雨量を入力として与え、流出量を求め、その降雨量と流出量をそれぞれの真値と定める。この真値に対して、降雨量の観測値と流出量の観測値を設定し、そ

の真値との差の2乗をそれぞれの観測誤差分散とする。これらの観測値と観測誤差分散を時々刻々得て、予測計算、更新計算を時々刻々行っていく、降雨量の逆推定値が真値に近づいていくか確かめる。

**3.1 逆推定された降雨量の推定値の考察** 図2、図3は初期時刻から39時間経過時点の逆推定された降雨量の推定値を、真値や観測値と比較したものである。

カルマンフィルタ理論では降雨量を逆推定する際は、多くの過去の情報を用いて推定した方が、推定精度が高くなるので、 $\alpha$ 法の方が推定精度が高い。 $\alpha$ 法では推定に使われる $\tilde{I}(t)$ の次元が単位図 $\gamma$ の場合で最大で8個、単位図 $\theta$ の場合で最大で12個だが、 $\lambda$ 法において、本研究の $\lambda$ を0.01という条件では、推定に使われる $\tilde{I}(t)$ の次元が、単位図 $\gamma$ の場合で最大でも7個、単位図 $\theta$ の場合で最大でも11個までしか大きくならないことが確認できた。

このときの計算時間を表したものが表1である。 $\lambda$ 法の方が、 $\alpha$ 法よりも計算時間は短く、単位図 $\theta$ の場合よりも単位図 $\gamma$ の場合の方が計算時間が短い。

表1 計算時間の比較

|              | $\lambda$ 法 | $\alpha$ 法 |
|--------------|-------------|------------|
| 単位図 $\gamma$ | 2秒          | 11秒        |
| 単位図 $\theta$ | 203秒        | 1477秒      |

**3.2 1時間先予測流出量の考察** 1時間先予測流出量は、逆推定された入力ベクトルに1時間先の降雨量の観測値を加えたものを単位図の入力として算定した。図4、図5において、 $\alpha$ 法の方が予測精度は高い。これは入力の一部である降雨量の逆推定値の精度が、 $\alpha$ 法の方が高いことに起因する。

また単位図 $\gamma$ の場合は、入力である8時間分の降雨量のうち、1時間分が不確かな降雨量なのに対して、単位図 $\theta$ の場合は、12時間分のうち、1時間分が不確かなので、入力全体に占める不確かな降雨量の割合が単位図 $\theta$ の場合の方が小さいので、予測精度は高くなる。

すなわち、入力となる降雨量系列がより過去のものまで使われる単位図に対して、計算処理時間が将来の流出予測に影響を及ぼさない範囲内に限定して、より多くの降雨量系列を入力として与えると、予測精度が高くなることが分かった。

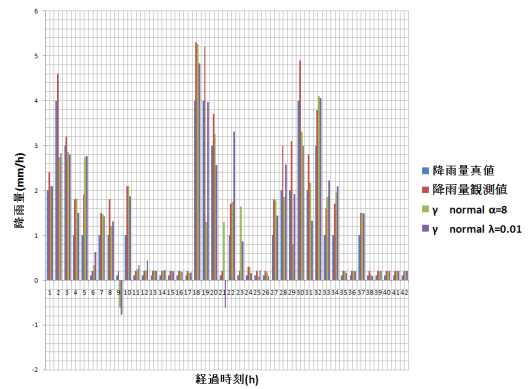


図2 単位図 $\gamma$ により逆推定した降雨量の比較

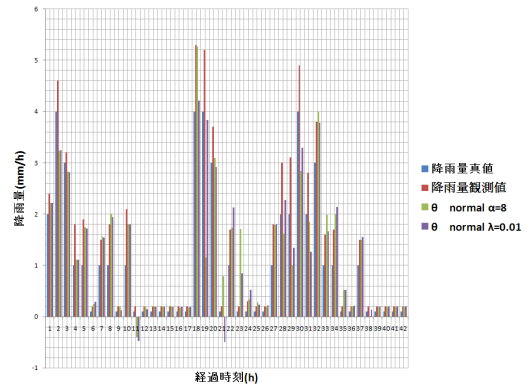


図3 単位図 $\theta$ により逆推定した降雨量の比較

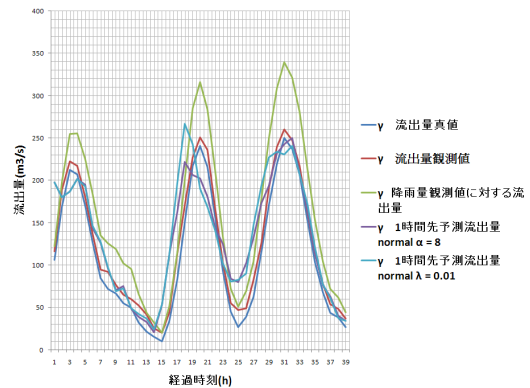


図4 単位図 $\gamma$ による1時間先予測流出量の比較

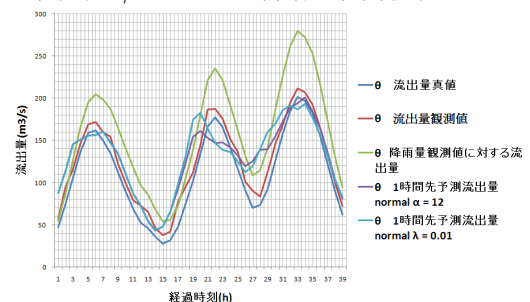


図5 単位図 $\theta$ による1時間先予測流出量の比較

## 参考文献

- [1] Bierman, G. J.: Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation, Academic Press, New York, 1977.