

カルマンフィルターによる 都市貯留関数モデルの実時間洪水流出予測特性

REAL-TIME RUNOFF FORECASTING CHARACTERISTICS OF URBAN STORAGE FUNCTION MODEL USING KALMAN FILTER

高崎忠勝¹・河村明²・天口英雄³・石原成幸⁴

Tadakatsu TAKASAKI, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI and Shigeyuki ISHIHARA

¹正会員 博(工) 東京都土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目9-15)

²正会員 工博 首都大学東京 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

³正会員 博(工) 首都大学東京 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

⁴正会員 修(学) 東京都土木技術支援・人材育成センター (〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目9-15)

The Kalman filter (KF) is a mathematical power tool that is used for real-time forecasting. In this paper, we implement KF on Urban Storage Function (USF) model which is a nonlinear lumped model considering urban runoff process. USF model using KF is applied to a virtual catchment where rainfall-runoff characteristics are known. The model parameters are updated with 1-minute river discharge data by KF. The characteristics of real-time forecasting of the model using KF is discussed by comparison with the model using a particle filter. The results show that KF forecasted in a very short computation time with performs comparable to the particle filter.

Key Words : urban storage function model, kalman filter, particle filter, virtual catchment

1. はじめに

東京都内には地下鉄, 地下街, ビルや個人住宅の地下室等の地下空間が多く存在しており, 毎年, こうした地下空間において浸水被害が発生している¹⁾. また, 都市域を流れる中小河川においては大雨時に極めて短時間に増水するため, 河川溢水が生じた場合には地下空間への浸水による人的被害の発生が危惧される. このため, 早期の水防活動や避難に資する都市中小河川の洪水予測が期待されている.

実時間洪水予測が既に運用されている河川もあり, 北海道の事例ではカルマンフィルターを用いることで予測精度の向上が図られている²⁾. また, 近年では計算速度の向上に伴い, 粒子フィルターを導入した事例³⁾⁴⁾も報告されている.

時系列フィルターの一種であるカルマンフィルターと粒子フィルターを比較すると, 線形, ガウス型分布のカルマンフィルターに対して非線形, 非ガウス型分布の粒子フィルターの方が高い予測精度を期待できる反面, 計算機資源の限られた環境下においては実時間処理において計算量が少ないカルマンフィルターが有利な場合がある⁵⁾. また, 計算にカルマンフィルターと粒子フィル

ターの双方を用いた事例⁶⁾も報告されており, これらのフィルターを適用した場合の計算量のみならず予測特性の違いを明らかにすることによって, 洪水予測の精度向上を図ることが可能になると考えられる.

著者らは都市中小河川の洪水予測に適した特性を有する都市貯留関数モデル (Urban Storage Function model : 以下, USFモデル)⁷⁾を提案し, 実流域への適用性やパラメータ特性について検討し, さらに, 実時間予測における粒子フィルターの特性について検証を行っている⁸⁾⁹⁾. しかし, これまでにUSFモデルにカルマンフィルターの適用は行われていない.

本論文は都市中小河川の実時間洪水予測の高精度化に向けてカルマンフィルターを組み込んだUSFモデルの実時間予測特性を明らかにすることを目的としている. まず, USFモデルによるカルマンフィルターの定式化を具体的に示す. 定式化においてはカルマンフィルターによって推定すべき状態量に1変数を加えることにより, 全ての未知パラメータを取り扱うことを可能にしている. 次に, 都市中小河川の洪水予測に適したカルマンフィルターの設定を検討する. ここでは観測データに含まれる各種誤差の影響を排除するため降雨流出特性が既知の仮想流域を対象とする. さらに, リードタイム別の予測精

度と計算時間について粒子フィルターを適用した場合と比較を行い、カルマンフィルターの有用性を考察する。

2. カルマンフィルターの定式化

式(1)~(4)で表されるUSFモデルによる河川流出量 Q の計算は次のように行う。式(5), (6)の変数変換によって式(1)~(3)から得られる連立常微分方程式を数値的に解くことで Q と q_R の合計値を算定し、式(4)より q_R を求め Q を得る。

$$s = k_1(Q + q_R)^{p_1} + k_2(d/dt)(Q + q_R)^{p_2} \quad (1)$$

$$ds/dt = R + I - E - O - Q - q_R - q_l \quad (2)$$

$$q_l = \begin{cases} k_3(s - z) & (s \geq z) \\ 0 & (s < z) \end{cases} \quad (3)$$

$$q_R = \begin{cases} \alpha(Q + q_R - Q_o) & (\alpha(Q + q_R - Q_o) < q_{R\max}) \\ q_R = q_{R\max} & (\alpha(Q + q_R - Q_o) \geq q_{R\max}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 s : 総貯留高(mm), t : 時間(min), R : 降水量(mm/min), Q : 河川流出量(mm/min), q_R : 合流式下水道による流域外への雨水排水量(mm/min), $q_{R\max}$: 最大雨水排水量(mm/min), q_l : 地下水関連損失量(mm/min), I : 都市特有の流入量・流域外からの地下水流入(mm/min), E : 蒸発散量(mm/min), O : 取水量(mm/min), Q_o : 初期河川流出量(mm/min), α : 下水道排出係数, z : 浸透孔高(mm), k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 : モデルパラメータ。

式(5), (6)の変数変換を行うことで、 x_2 に関する一階の常微分方程式が式(7a)のように得られる。なお、 $s < z$ のときは式(7b)となる。

$$x_1 = (Q + q_R)^{p_2} \quad (5)$$

$$x_2 = (d/dt)(Q + q_R)^{p_2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} dx_2/dt = -(k_1/k_2)(p_1/p_2)x_1^{(p_1/p_2-1)}x_2 - (1/k_2)x_1^{(1/p_2)} \\ \quad - (k_1k_3/k_2)x_1^{(p_1/p_2)} - k_3x_2 \\ \quad + (1/k_2)(R + I - E - O + k_3z) \end{cases} \quad (7a)$$

$$\begin{cases} dx_2/dt = -(k_1/k_2)(p_1/p_2)x_1^{(p_1/p_2-1)}x_2 - (1/k_2)x_1^{(1/p_2)} \\ \quad + (1/k_2)(R + I - E - O) \end{cases} \quad (7b)$$

カルマンフィルターの基礎式であるシステム方程式は式(8)、観測方程式は式(9)で表される。

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \alpha(k) + u(k) \quad (8)$$

$$y(k) = \Gamma(k)x(k) + \beta(k) + w(k) \quad (9)$$

ここに、 k : 時点, x : システムの状態量ベクトル, Φ : 既知の状態遷移ベクトル, α : 既知のシステム定数ベクトル, u : システム雑音, y : 観測量ベクトル, Γ : 既知の観測行列, β : 既知の観測定数ベクトル, w : 観測雑音。

USFモデルを用いたカルマンフィルターによる洪水流出の実時間予測では、推定すべき状態量として式(5), (6)の x_1, x_2 , USFモデル未知パラメータの $k_1, k_2, p_1, p_2, k_3, z, \alpha$ の他に q_R を加えることで、全ての未知パラメータを組み込むことが可能になる。

$x_3=k_1, x_4=1/k_2, x_5=p_1, x_6=1/p_2, x_7=k_3, x_8=z, x_9=\alpha, x_{10}=q_R$ とおくと、 $\alpha(Q + q_R - Q_o) < q_{R\max}$ の場合に q_R は式

(10a)のように表され、 $\alpha(Q + q_R - Q_o) \geq q_{R\max}$ の場合は式(10b)のように表される。

$$q_R = x_{10} = x_9(x_1^{x_6} - Q_o) \quad (10a)$$

$$q_R = x_{10} = q_{R\max} \quad (10b)$$

ベクトル $X=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}]^T$ (T : 行列の転置を表す)とおくと、式(7)の微分方程式は式(11)のように拡張される。

$$dX(t)/dt = F(X) \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{10} \end{bmatrix}^T$$

$$f_1 = x_2$$

$$f_2 = -x_2x_3x_4x_5x_6x_1^{x_5x_6-1} - x_4x_1^{x_6} - x_3x_4x_7x_1^{x_5x_6} \\ - x_2x_7 + x_4(R + I - E - O) + x_4x_7x_8 \quad (s \geq z)$$

$$f_2 = -x_2x_3x_4x_5x_6x_1^{x_5x_6-1} - x_4x_1^{x_6} + x_4(R + I - E - O) \\ (s < z)$$

$$f_{10} = x_2x_6x_1^{x_6-1} - x_2x_6x_9x_1^{x_6-1}$$

$$(\alpha(Q + q_R - Q_o) < q_{R\max})$$

$$f_{10} = x_2x_6x_1^{x_6-1}$$

$$(\alpha(Q + q_R - Q_o) \geq q_{R\max})$$

ここで、カルマンフィルターの適用に便利のように式(11)を線形化方程式に変換する。 $F(X)$ をあらかじめ既知な $X=X^*$ を中心とするTaylor展開を行い、二次項以下を無視して線形化すると式(12)となる。

$$F(X) = A(X^*)X + B(X^*) \quad (12)$$

ここに、行列 $A(X^*)$ はJacobianであり、行列 $B(X^*)$ は式(13)で表される。

$$B(X^*) = F(X^*) - A(X^*)X^* \quad (13)$$

コンピュータを用いた計算が容易に行えるように式(13)を式(14)の差分方程式に変換する。

$$X(k+1) = \Psi(k)X(k) + A(k)B(k) \quad (14)$$

ここに、 k は離散化された計算時点であり、行列 $\Psi(k)$ は式(15)、 $A(k)$ は式(16)で計算される。

$$\Psi(k) = \exp(A\Delta t) \quad (15)$$

$$\Rightarrow I + A\Delta t + (A\Delta t)^2/2! + (A\Delta t)^3/3! + (A\Delta t)^4/4! + \dots$$

$$A(k) = [\exp(A\Delta t) - I]A^{-1} \quad (16)$$

$$= \Delta t [I + (A\Delta t)/2! + (A\Delta t)^2/3! + (A\Delta t)^3/4! + \dots]$$

ここに、 Δt : 計算時間間隔

以上により、カルマンフィルターのシステム方程式(8)の状態量ベクトル x , 遷移行列 $\Phi(k)$, 定数ベクトル $\alpha(k)$ は、それぞれ式(14)のベクトル X , $\Psi(k)$, $A(k)B(k)$ に対応する。

$\alpha(Q + q_R - Q_o) < q_{R\max}$ の場合、カルマンフィルターの観測方程式(9)中の観測量ベクトル $y(k)$ は次式で表される。

$$y(k) = x_1^{x_6} - x_9x_1^{x_6} + x_9Q_o \quad (17a)$$

ここで、非線型関数 $g(X) = y(k)$ で定義し、システム方程式を定式化した場合と同様に線形化すると次式となる。

$$g(X) = C(X^*)X + D(X^*) \quad (18)$$

ただし、

$$C(X^*) = [c_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ c_6 \ 0 \ 0 \ c_9 \ 0]^T_{X=X^*} \quad (19a)$$

$$c_1 = x_6 x_1^{x_6-1} - x_6 x_9 x_1^{x_6-1}$$

$$c_6 = x_1^{x_6} \log x_1 - x_9 x_1^{x_6} \log x_1$$

$$c_9 = -x_1^{x_6} + Q_o$$

$$D(X) = [x_1^{x_6} - x_6 x_1^{x_6} + x_6 x_9 x_1^{x_6} - x_6 x_1^{x_6} \log x_1 + x_6 x_9 x_1^{x_6} \log x_1]_{X=X^*} \quad (20a)$$

$\alpha(Q + q_R - Q_o) \geq q_{Rmax}$ の場合、観測量ベクトル $y(k), C(X^*), D(X)$ は次式で表される。

$$y(k) = x_1^{x_6} - q_{Rmax} \quad (17b)$$

$$C(X^*) = [c_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ c_6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T_{X=X^*} \quad (19b)$$

$$c_1 = x_6 x_1^{x_6-1}$$

$$c_6 = x_1^{x_6} \log x_1$$

$$D(X) = [x_1^{x_6} - q_{Rmax} - x_6 x_1^{x_6} - x_6 x_1^{x_6} \log x_1]_{X=X^*} \quad (20b)$$

以上により、カルマンフィルターのシステム方程式(9)の観測量ベクトル $y(k)$ 、観測行列 $\Gamma(k)$ 、定数ベクトル $\beta(k)$ は、それぞれ式(18)の $g(X), C(X^*), D(X^*)$ に対応する。

3. 仮想流域における検証

(1) 計算条件

実時間予測特性を明らかにするため降雨流出特性がUSFモデルによるパラメータによって与えられる仮想流域を対象とする。東京の都市中小河川、神田川における検討事例⁷⁾を参考にモデルパラメータの真値は $k_1=50$, $k_2=500$, $k_3=0.005$, $p_1=0.5$, $p_2=0.5$, $z=5$, $\alpha=0.5$, $q_{Rmax}=0.05\text{mm/min}$ とする。

模擬発生させる雨量は、式(21)の降雨強度式を用いて180分まで1分毎に降雨継続時間 T (分)に対応する雨量を算出し、これを2つ接続し360分間の降雨波形とする。

$$r = 700 / (T^{2/3} + 8.0) \quad (21)$$

模擬発生させる流出量は、USFモデルに模擬発生雨量を入力してパラメータ真値を用いて流出量を算出したものとする。USFモデルによる流出量の計算においては初期河川流出量 Q_0 を 0.01mm/min とし、雨量以外の流入成分および蒸発散量はないものとする。また、実時間予測計算で参照する流出量は真値流出量に観測雑音 $N(0, 0.01^2)$ を付加したものとし、これを観測流出量とする。

(2) カルマンフィルターの適用

USFモデルにカルマンフィルターを適用して実時間予測特性を確認する。実際の洪水予測ではパラメータ真値を知ることはできないので、ここでは表-1に示す4ケースの値を初期パラメータ値とする。表中のパラメータ値を固定して計算した場合の hidrograph を模擬発生雨

量ハイエトグラフと共に図-1に示す。図中には各ケースの計算流出量について観測流出量に対するNash-Sutcliffe指標(NSE)の値を記している。なお、予測流出量との比較のため、1分前から60分先までの予測値がある降雨開始後61~360分をNSEの計算期間としており、以降に示すNSEも同じ計算期間としている。

1分毎に観測流出量と雨量を参照しながらカルマンフィルターによってUSFモデルパラメータ ($k_1, k_2, p_1, p_2, k_3, z, \alpha$) の値を更新しながら各時点において60分先までの流出量を計算する。

カルマンフィルターによる実時間洪水流出予測に際しては、推定すべき状態量の初期推定値 $\hat{x}(0|0)$ とその推定誤差共分散行列 $P(0|0)$ 、システム雑音の共分散行列 $U(k)$ および観測雑音の共分散行列 $W(k)$ を設定する必要がある¹⁰⁾、 $U(k)$ の設定において $P(0|0)$ の対角要素に対する倍率であるSNPERを入力し、 $W(k)$ の設定において観測雑音の標準偏差 SDW の入力を行う。これらの設定は以下のように行う。 $\hat{x}(0|0)$ については、 x_1 を Q_o^{1/p_2} , x_2 を0, $x_3 \sim x_9$ を表-1より設定し、 x_{10} を0とする。 $U(k)$ については、非対角要素を0とし対角要素は $P(0|0)$ をSNPER倍したものとす。また、 $W(k)$ は SDW^2 とする。 $P(0|0)$ の $x_1 \sim x_{10}$, SNPER, SDW の12項目(以下、KF設定値)は、リードタイム10分、30分、60分(以下、LT10, LT30, LT60)の各々に対してより観測値に近い予測値を出力する設定値を求める。また、KF設定値は、表-1に示したケース1~4の各々に対するものと全てのケースに対するものを求めることとし、その値の探索には大域的探索法であるSCE-UA法¹¹⁾を用いる。SCE-UA法はモデルパラメータの自動最適化において強力かつ効率的な手法であることが示されている¹²⁾。SCE-UA法の探索において誤差評価関数はNSEとし、各項目の探索範囲は0.001~1とする。

図-2にLT10, LT30, LT60のKF設定値を示す。LT30・ケース1の x_8 やLT60・ケース4の x_6, x_{10} のように同

表-1 初期パラメータ

	k_1	k_2	p_1	p_2	k_3	z	α
ケース1	30	300	0.3	0.3	0.003	3	0.3
ケース2	40	400	0.4	0.4	0.004	4	0.4
ケース3	60	600	0.6	0.6	0.006	6	0.6
ケース4	70	700	0.7	0.7	0.007	7	0.7

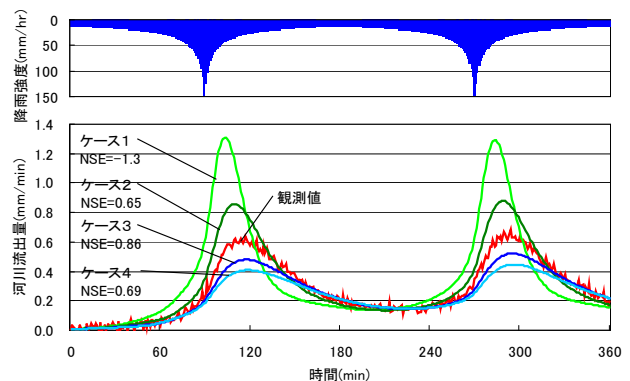


図-1 初期パラメータ固定による河川流出量

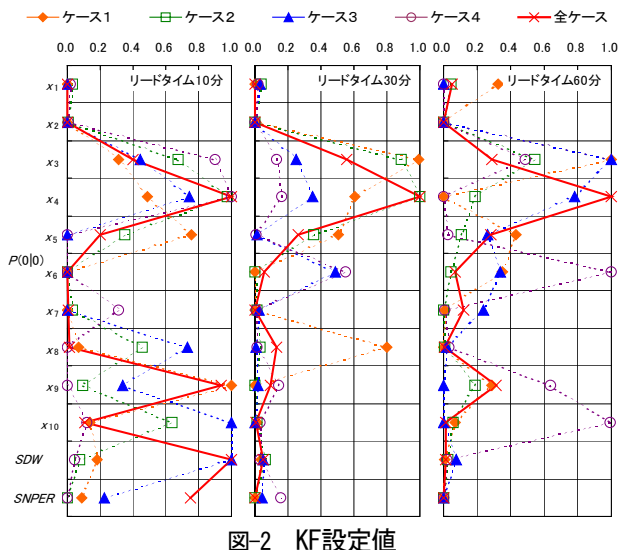


図-2 KF設定値

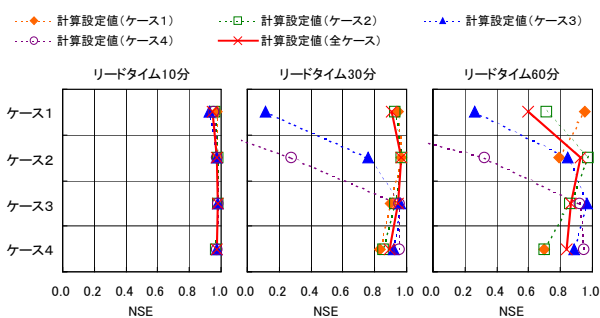


図-3 KF設定値に対するNSE

じリードタイムであってもケースによって値が大きく異なる項目がある。また、全ケースに対するKF設定値は4ケースの平均値とは大きく異なっており、例えば、LT10のSNPERやLT60における x_4 はケース1~4の最大値よりさらに大きな値となっている。

全ケースに対するKF設定値において1に近い項目は、LT10では x_4 , x_9 , SDW, SNPERの4項目であり、LT30とLT60では x_4 の1項目となっている。また、LT60の x_1 はLT10やLT30のものより大きな値となっている。リードタイムによって探索されたKF設定値が異なっており、リードタイムに応じて適切なKF設定値を設定することでリードタイムに拘らず予測精度の向上を図ることが可能である。

図-3に図-2に示したKF設定値を用いて各ケースを計算した時のNSEを示す。各々のケースに対するKF設定値によるNSEは、LT10が0.97~0.98、LT30が0.94~0.97、LT60が0.95~0.97といずれも1に極めて近い。各々の計算に適したKF設定値を与えることが可能であれば60分先までの流出量を極めて高精度に算定することができる。

LT10のNSEは図-2のいずれのKF設定値を選択しても大きな違いはみられない。一方、LT30とLT60についてはKF設定値によってNSEに違いがみられる。LT30ではケース1と2および全ケースに対するKF設定値を選択した場合の4ケースのNSEは0.8以上であるが、他を選択した場合にはケース1と2のNSEが0.8を大きく下回る。また、LT60ではLT30と同様の傾向が見られるが、いずれのKF

設定値を選択してもNSEが0.8を下回るケースがある。

リードタイムが10分程度の場合には良好な予測値を得られるKF設定値の範囲が広いが、リードタイムが30分程度になるとその範囲が限られるのでKF設定値の設定に際しては十分に検討を行うことが必要である。

図-4に全ケースに対するKF設定値による計算ハイドログラフを示す。1つ目のピーク周辺の予測値はリードタイムによる違いがみられるが、2つ目のピーク周辺ではリードタイムに拘らず観測値に極めて近い予測値が得られている。また、1つ目のピークについても初期パラメータ固定による計算と比べて予測精度が改善されており、NSEが0.8を下回るケース1のLT60についてもピーク流出量が大幅に改善されている。カルマンフィルターを適用した計算では予測値が短時間に大きく変化する傾向がみられ、特にケース1のLT60の2つ目のピーク付近では大きな変化がみられる。

図-4の計算をした時のパラメータの時系列変化を図-5に示す。 k_1 , k_2 , p_1 は3種類のリードタイムに対して計

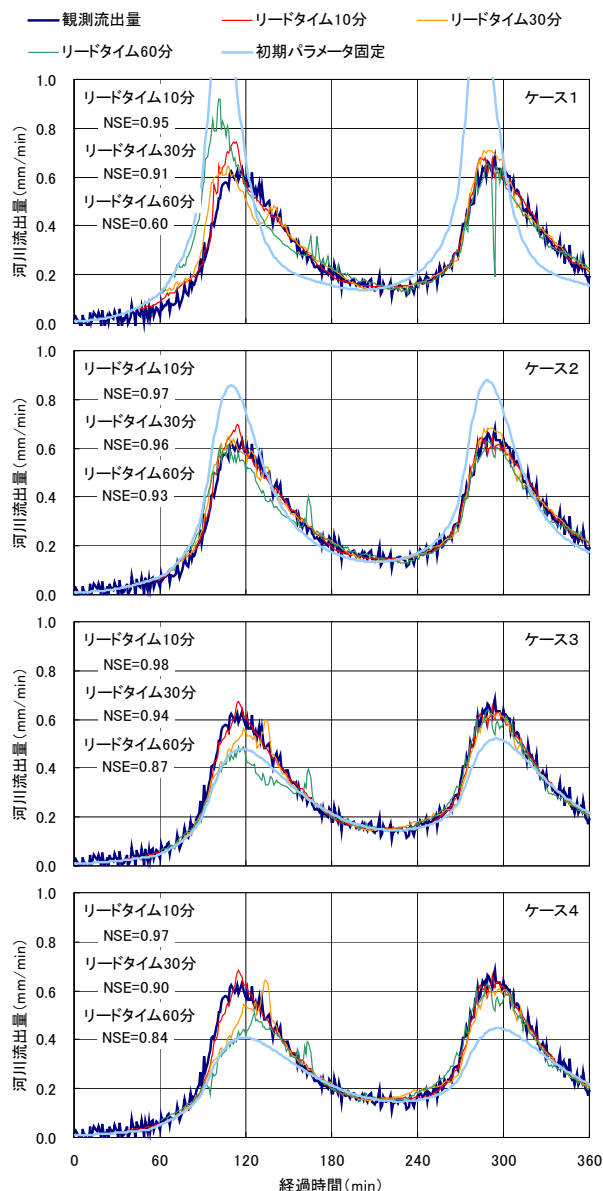


図-4 カルマンフィルターによるハイドログラフ

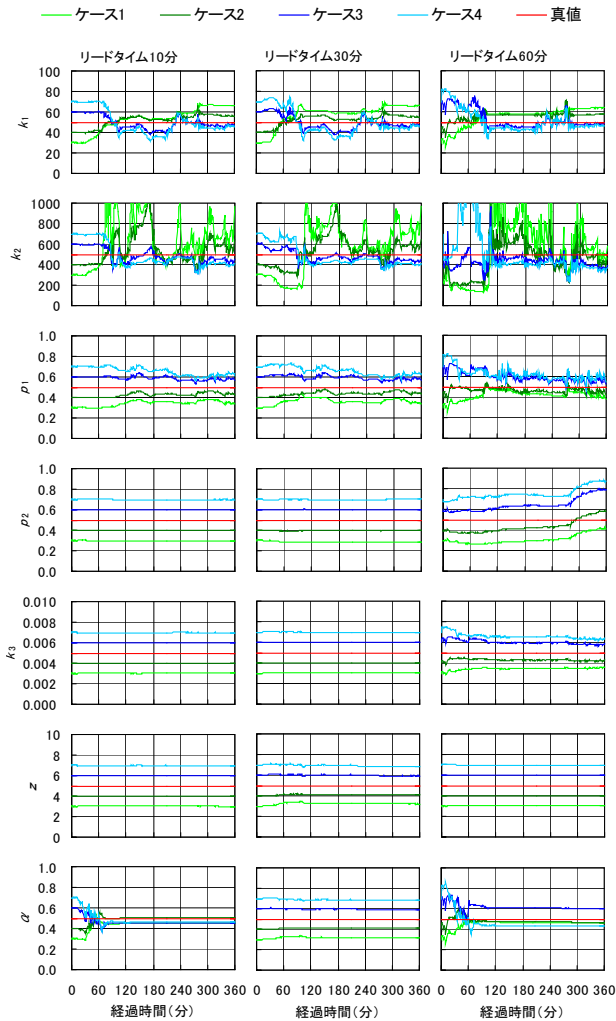


図-5 カルマンフィルターによるパラメータの変化

算期間を通じて変化がみられる。これらのパラメータはリードタイムが長くなると、パラメータ値の変化量が大きくなる傾向がみられ、また、これらのパラメータ値が大きく変化を始める時刻が早くなる。 p_2 , k_3 の値に大きな変化がみられるのは $LT60$ のみである。 z の値はリードタイムに拘らず大きな変化をしていない。これは z が都市流域の河川流出量について降雨終了後の低減部の再現を目的として導入されたパラメータであり、本検討においては流出量が比較的大きい状況で計算期間が終了しているため、 z が流出量の計算に大きな影響を及ぼさなかったものと考えられる。 $LT10$ と $LT60$ の α の変化は計算開始から120分経過時より前までとなっている。これは α が流出量の計算に寄与するのが式(4)より q_R が q_{Rmax} より小さい期間のみであり、 q_R が120分経過時点で q_{Rmax} に達していることがその原因であると考えられる。

(3) カルマンフィルターと粒子フィルターの比較

カルマンフィルターと粒子フィルターの実時間予測特性を比較する。粒子フィルターの計算は、カルマンフィルターと同様に1分毎に観測流出量と雨量を参照しながらUSFモデルの未知パラメータ k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , z , α の値を更新しながら各時点において60分先までの流出量を計

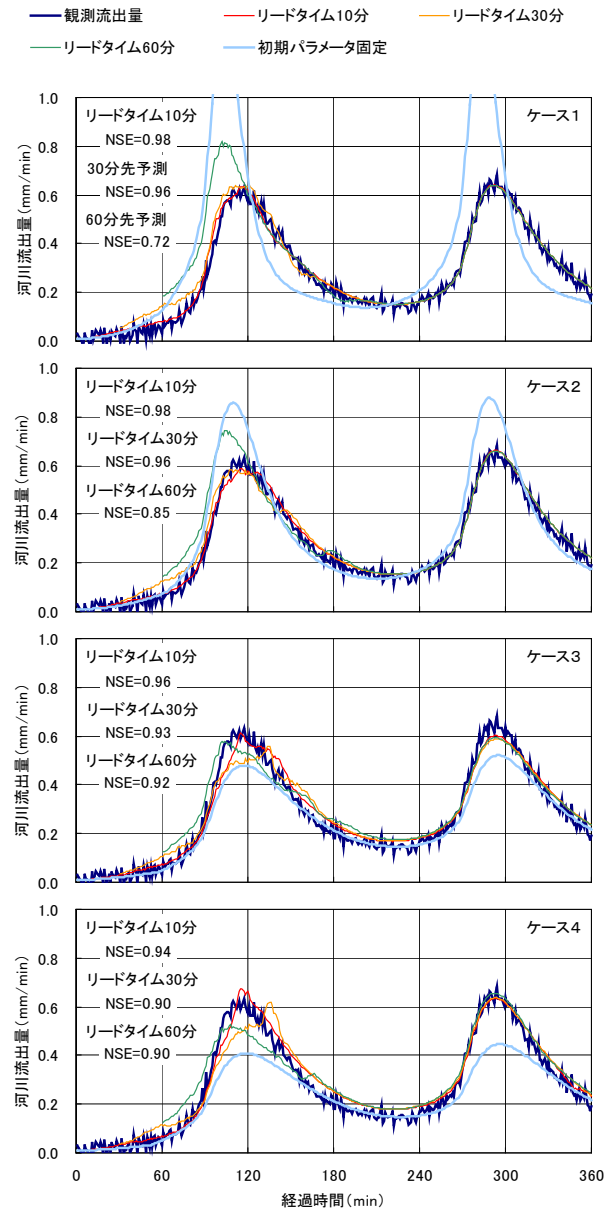


図-6 粒子フィルターによるハイドログラフ

算する。USFモデルへの粒子フィルターの適用については既に検討しており⁸⁾、良好な予測結果を得られる以下の設定によって計算を行う。粒子が保持する情報はUSFモデルパラメータに状態量 x_1, x_2 を加えた状態量ベクトル $X=[k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, z, \alpha, x_1, x_2]$ とする。粒子数は10000個とし、各粒子が保持するパラメータは、表-1に示した初期パラメータ値 μ に対して $N(\mu, \mu^2)$ によって発生させたものとし、 x_1 は Q_0^{1/p_2} とし、 x_2 は0とする。システムノイズは各粒子が保持するパラメータの0.1%とする。なお、粒子フィルターの設定はリードタイムに拘らず1種類とする。

粒子フィルターによって河川流出量を計算した結果を図-6に示す。図-4に示したカルマンフィルターによるハイドログラフと似たものとなっている。カルマンフィルターにみられた予測値が短時間に大きく変化する傾向がみられなくなっている。NSEを比べるとリードタイムやケースによってカルマンフィルターが良好な場合と粒子

表-2 計算時間

	1ケースの計算時間		1時点あたりの計算時間		比率
	カルマンフィルター	粒子フィルター	カルマンフィルター	粒子フィルター	
PC1	0.639秒	1377.966秒	0.002秒	4.59秒	2156
PC2	0.422秒	1332.453秒	0.001秒	4.44秒	3157

PC1: CPU Intel Core i5 M520 2.4GHz, RAM3.4GB

PC2: CPU AMD PhenomII X6 1090T 3.2GHz, RAM2.7GB

フィルターが良好な場合があり、全体的に見ると概ね同等であると判断された。

表-2にUSFモデルにカルマンフィルターおよび粒子フィルターを適用して1ケースの計算に要した時間を示す。表中の比率はカルマンフィルターの計算時間を1とした時の粒子フィルターの計算時間を示している。粒子フィルターについては並列処理による高速化が可能であるが本検討では行っていない。

PC環境によって異なるもののカルマンフィルターの計算時間は粒子フィルターの概ね1/2000~1/3000であり、カルマンフィルターを適用しリードタイム1分毎に異なるKF設定値を用いて60分先までの計算を行った場合でも粒子フィルターを適用する場合より短時間に計算が終了する。

1ケースの計算では経過時間360分までの計算を行っていることから、60分先までの予測計算を行う期間を考慮し、1ケースの計算時間を300で割ったものを1時点あたりの計算時間として表中に示した。1地点のみを対象とした場合には、1時点あたりの計算に要する時間は5秒以下であり、1分間隔で水文データを取得して計算を行うことを考えると計算時間の点では問題ないと考えられる。しかし、複数地点を対象とする場合や水文データ取得の処理に時間を要する場合には、より短時間に計算を行うことが求められ、並列処理等の高速化が必要になる。なお、計算機資源に大きな制約を受ける場合は粒子フィルターの適用は難しいのでカルマンフィルターを適用することになる。

4. まとめ

USFモデルへのカルマンフィルターを適用するために定式化を行った。定式化に際しては1変数の追加によりカルマンフィルターが全ての未知パラメータを取り扱えるようにした。そして、降雨流出特性が既知の仮想流域を対象に、カルマンフィルターを適用したUSFモデルの実時間予測特性について検証を行った。以下に本検証の結果を記す。

USFモデルにカルマンフィルターまたは粒子フィルターを適用することによってパラメータを固定した計算と比較して、60分先までの計算流出量の予測精度が向上した。USFモデルにカルマンフィルターを適用した場合、KF設定値によって予測精度が大きく変化するので、その設定においては十分な検討が必要である。また、リードタイム毎に適切なKF設定値を用いることで予測精度が向上し、粒子フィルターと変わらない予測精度を得ることができた。カルマンフィルターは計算時間が極めて短く、リードタイム別に異なる計算を行っても粒子フィルターより計算を短時間に終了させた。

粒子フィルターは十分に多くの粒子数を用いることによって1種類の設定のみでリードタイムに拘らず高い予測精度を得られ、さらに、カルマンフィルターでみられた短時間の大きな予測値の変化がない利点が確認された。一方で多くの粒子数を用いることによってカルマンフィルターと比べ大幅に長い計算時間を要する。

カルマンフィルターと粒子フィルターは予測精度の改善程度に大きな違いが見られなかったことから、計算機資源に余裕のある場合には取り扱いが容易な粒子フィルターを採用し、そうでない場合にはカルマンフィルターを用いるといった使い分けが考えられる。

参考文献

- 1) 東京都：東京都地下空間浸水対策ガイドライン—地下空間を水害から守るために—：p4, 2008.
- 2) 独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所寒地河川チーム：対話式洪水予測計算マニュアル，財団法人北海道河川防災研究センター・研究所, 2006.
- 3) 工藤亮治，近森秀高，永井明博：粒子フィルタを用いた河川流域における実時間洪水予測，農業農村工学会論文集，No.259, pp.17-25, 2009.
- 4) 立川康人，須藤純一，椎葉充晴，萬和明，キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発，水工学論文集，第55巻, pp.S 511-S 516, 2011.
- 5) 高橋正樹，藤井真人，柴田正啓，八木伸行：ゴルフ中継での放送カメラを用いたティショット軌道表示システム，電子情報通信学会論文誌，D, Vol. J92-D, No.7, pp.1036-1044, 2009.
- 6) 宍戸英彦，北原格，亀田能成，大田友一：パーティクルフィルタとカルマンフィルタを補完的に利用したバドミントン映像からのシャトル軌道推定，動画像処理実用化ワークショップ DIA2012, pp.206-211, 2012.
- 7) 高崎忠勝，河村明，天口英雄：都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案，土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 8) 高崎忠勝，河村明，天口英雄，石原成幸：粒子フィルタを用いた都市貯留関数モデルによる実時間洪水流出予測特性，土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I_511-I_516, 2012.
- 9) 高野晃平，河村明，高崎忠勝，天口英雄，中川直子：エリート戦略を用いた粒子フィルタによるUSFモデルの実時間流出予測特性，第39回土木学会関東支部技術研究発表会, II-39, 2012.
- 10) 河村明：貯留関数法を用いたカルマンフィルターによる洪水流出の実時間予測，水理公式集例題プログラム集CD-ROM版，土木学会, pp1.12.1-1.12.26, 2001.
- 11) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. : Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, Water Resources Research, 28-4: 1015-1031, 1992.
- 12) 田中丸治哉：タンクモデル定数の大域的探索，農業土木学会論文集 No.178, pp.103-112, 1995.

(2012.9.30受付)