

歴史的風致地区の浸水被害軽減を支援する洪水予測システムの 精度向上

Accuracy improvement of flood forecasting system to contribution of disaster mitigation of
inundation area in historical preservation area

田中耕司¹・杉浦正之²

Kohji Tanaka, Masayuki Sugiura

¹株式会社建設技術研究所 大阪本社水システム部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)
Deputy General Manager, Water Management & Research Division, C.T.I. Engineering Co., Ltd.

²株式会社建設技術研究所 大阪本社水システム部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)
Senior Engineer, Water Management & Research Division, C.T.I. Engineering Co., Ltd.

There are many historical preservation area in C city, historical buildings and heritages were damaged by the flooding flow. It is important to mitigate damage of historical heritage as well as flood fighting and caution of evacuation for residents. This study is to purpose structure of flood forecasting model and system to contribute to decrease damage by flooding. Distributed model is employed as runoff model in flood forecasting system. Accuracy in discharge predicted by runoff model is described with using two feed back methods.

Keywords : *Flood forecasting system, Distributed Runoff model, Feedback methods, Particle Filter,*

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨による浸水被害が依然として発生している。歴史的な価値のある建築的建築物や遺跡がある氾濫地域では、歴史的資産の浸水の他に地域住民の他に観光客も被災する可能性がある。このような地域では住民を対象とした浸水対策に加え、歴史的な価値のある資産の保全に配慮した防災対策を行う必要があるが、不十分な場合が多い。

一方で、氾濫地域の浸水を防止するために、ダム能力を最大限発揮させるために、通常操作より大きい洪水調節が実施され、効果を上げている例がある¹⁾。しかし、流域内の降雨分布によっては、能力を十分に発揮できない場合があり、降雨の空間分布、時間変化を考慮して、精度の高い予測流入量をもとに、効果的に洪水調節を行う必要がある。

洪水調節能力を最大限発揮させるダムを操作するに際し、近年の気象庁や国土交通省のレーダ雨量、地上雨量データ、水位データがリアルタイムで取得できる情報システム²⁾が全国的に整備され、これを活用した洪水予測システムの導入が進んでいる。さらに、気象庁や民間の気象会社が独自に降雨予測を実施しており、過去データと組み合わせた洪水予測システムが導入が進んでいる。

本論文では、Bダムの例をとり、下流に位置する歴史的風致地区の浸水を軽減するために、リアルタイムで得られる情報システムを活用できる分布型流出モデルをベースにした予測システムを構築し、その適用性について検討したものである。

2. 対象流域の概要

一級河川A川上流の盆地に歴史的風致地区に指定されたC市がある。この上流に、Bダムが存在し、洪水調節し、浸水防止の重要な役割を担っている。C川においては、過去に幾たびか洪水被害を受けており、特に平成10年の洪水被害は甚大であった。これを契機に激甚災害特別事業の指定を受け、再発防止の観点から河道改修が行われた。

C市は、歴史的風致維持向上計画³⁾の認定を国から受けて、現在事業を実施している。C市は、奈良時代に国分寺・国分尼寺が置かれてから、近代まで多くの歴史的文化財に恵まれ、国、県、市から指定を受けている。また、歴史的文化財の他に、歴史的に貴重な建造物も多く残されている。

3. 流出モデルの構築

(1) 分布型流出モデルの概要

本研究では、流域をメッシュに分割し、レーダ雨量、予測雨量等のメッシュ情報をそのまま利用できる分布型流出モデルを用いることとした。

分布型流出モデルの単位メッシュは流出モデルと河道モデルにより構成され、雨量メッシュサイズとあわせて1kmメッシュで分割した。メッシュは流域モデルと河道モデルからなり、流域モデルで地表流、地下水流を解析し、河道モデルは洪水流を解析するものである。流域モデルの上部にある表層モデルは矩形斜面（単位メッシュを傾けた斜面）とし、単位メッシュ内の土地利用が単一でない場合には、同一の斜面長として、斜面幅は土地利用に比例する短冊状構造とした。

表層モデルの下は、地下水モデルを配置し、洪水の初期貯留と、緩やかな地下水流出を表現している。

1) 表層モデル

雨量を表面流、早い中間流、地下浸透流に分離するモデルで、上から1番目の孔が表面流、2番目の孔が早い中間流、下の孔が地下浸透である。表面流はManning則が成り立つものとし、流出量は貯留高の5/3乗に比例するものとする。早い中間流は便宜的に貯留高に比例するものとした。また、地下浸透はDarcy則に従い、浸透量は貯留高に比例するものとする。基礎式は次のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - E_{ps} - Q_{sf} - Q_o - Q_{ri} \quad (S_{f2} \leq h) \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - E_{ps} - Q_o - Q \quad (S_{f1} \leq h < S_{f2}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - \frac{E_{ps}}{S_{f1}} h - Q_o \quad (S_{f0} \leq h < S_{f1}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = r - \frac{E_{ps}}{S_{f1}} h \quad (h \leq S_{f0}) \quad (4)$$

ここに、 r は雨量、 Q_o は地下水モデルへの浸透量、 E_{ps} は蒸発散量、 Q_{sf} は表面流出量、 S_{f2} は表面流

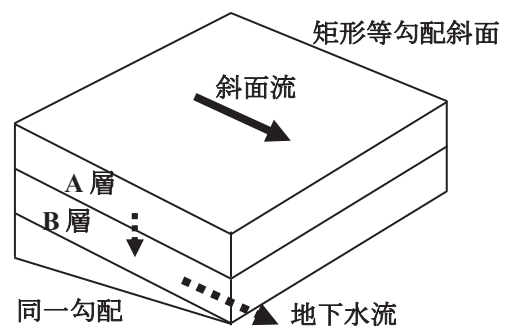


図1 流出モデルの基本構造

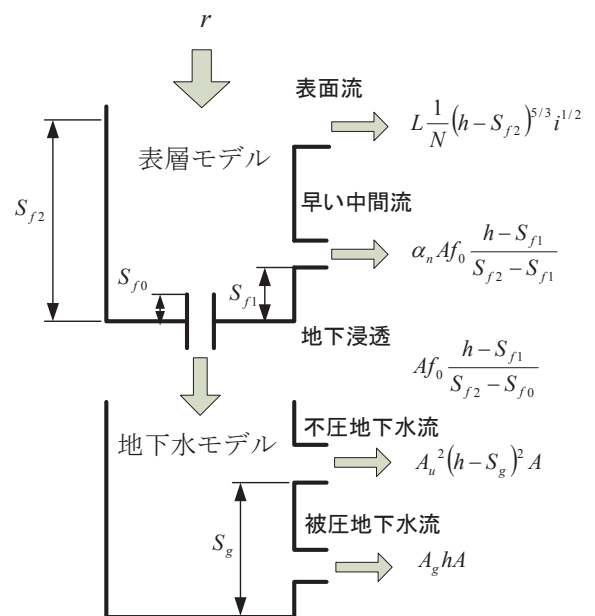


図2 分布型モデルの概念図

の発生する高さ、 Q_{ri} は早い中間流出量、 S_{f1} は中間流の発生する高さ、 h はモデルの貯留高、 S_{f0} は地下浸透の発生する高さである。

地下浸透量は、モデル上の貯留高が表面流の発生する高さと同じ場合に、浸透能数が飽和透水係数が等しいものとして、 f_0 を終浸透能、 A をメッシュの面積として式(5)(6)で与えられる。

$$Q_0 = \alpha_0 (h - S_{f0}) A \quad (5) \quad \alpha_0 = \frac{f_0}{(S_{f2} - S_{f0})} \quad (6)$$

早い中間流の流出量は、モデル内の貯留高に比例するものとし、 α_{ri} を経験定数とし式(7)で与えられる。

$$Q_{ri} = \alpha_{ri} \alpha_0 (h - S_{f1}) A \quad (7)$$

表面流の流出量は、土地利用別に粗度係数(N)を設定し、 L 斜面長として、式(8)で与えられる。

$$Q_s = \beta (h - S_{f2})^{5/3} \quad (8) \quad \beta = \frac{1}{N} i^{1/2} L \quad (9)$$

2) 地下水モデル

上段の流出孔は不圧地下水の流出、下段の流出孔は被圧地下水の流出を表している。被圧地下水の流出は h に比例し、不圧地下水の流出は h の2乗に比例するものとしている。ここに、 Q_{in} は浸透モデルからの流入量、 h はモデルの貯留高、 Q_{g1} は不圧地下水の流出量、 S_g は不圧地下水流出が発生する高さおよび Q_{q2} は被圧地下水の流出量を表している。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = Q_{in} - Q_{s1} - Q_{s2} \quad (h \geq S_g) \quad (11) \quad \frac{\partial h}{\partial t} = Q_{in} - Q_{s1} \quad (h < S_g) \quad (12)$$

不圧地下水、被圧地下水の流出量は、以下の式(13)及び式(14)で与えられる。ここに、 A_u および A_q は、不圧、被圧地下水の流出量にかかる係数である。

$$Q_{q1} = A_u^2 (h - S_g)^2 A \quad (13) \quad Q_{q2} = A_q h A \quad (14)$$

3) 河道モデル

河道モデルは流域モデルで計算した河道流入量を受け入れて、矩形河道を仮定し、式(15)のKinematic Waveを用いて洪水追跡をするものである。ここに A は河道の断面積、 Q は流量、 $q(t, x)$ は横流入、 t は時間、 x は流下方向の距離である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(t, x) \quad (15)$$

(2) 分布型流出モデルの同定

洪水流出に大きく寄与するパラメータは、表層モデルの透水係数と地下水モデルの不圧地下水係数であることから、これらの係数についてSCE-UA法（最適探索方法）⁴⁾で定数を推定した。誤差評価地点はBダム地点とダムの放流の影響がある下流E,F地点とした。最適探索を用いて設定した表層モデルの定数を表.1、地下水モデルのそれを表.2に、近年の洪水波形での適合性を検討したものを図.3に示す。なお、表中の網掛けは、他の河川の事例を参考に定数を設定したものを適用し、実績データからほぼ妥当なものであると判断した。

表 1 表層モデルの定数

分 類	透水係数 k (cm/s)	モデルの高さ(mm)			等価粗度 係数 N	早い中間流 係数 α	
		S_{f2}	S_{f1}	S_{f0}			
森林	浸透性大	2.0×10^{-3}	60	35	15	0.6	0.05
	浸透性中	2.0×10^{-4}	45	25	10	0.6	0.03
	浸透性小	5.0×10^{-5}	30	15	5	0.6	0.01
水田	1.0×10^{-6}	75	15	05	1.0	3.0	
畑地	5.0×10^{-6}	30	15	10	1.0	3.0	
市街地	1.0×10^{-6}	20	15	5	0.005	3.0	

表2 地下水モデルの定数

分類		不圧地下水係数 ($\text{mm}^{-1/2}\text{day}^{-1/2}$)	被圧地下水係数 (day^{-1})	被圧地下水層の 高さ(mm)
浸透性大	上流	1.60	6.0×10^{-4}	300
	下流	0.06	3.0×10^{-4}	300
浸透性中	花崗岩	0.02	10.0×10^{-4}	800
	その他	0.20	6.0×10^{-4}	500
浸透性小	火山性岩類	0.30	1.0×10^{-4}	500
	半固結～固結堆積物	0.20	6.0×10^{-4}	500

図.3には、近年の代表的な洪水であり、氾濫が発生していない平成18年7月洪水を対象にした同定結果を示す。この結果によれば、E地点においては流量の誤差は大きい、ダム地点およびE地点より下流のFおよびG地点においては、実績の流量との整合から概ね妥当であると判断した。なお、この段階では、E地点のように誤差が発生している場合もあるため、後述するフィードバック手法を適用して、洪水履歴データから現時刻の流出量を調整する。

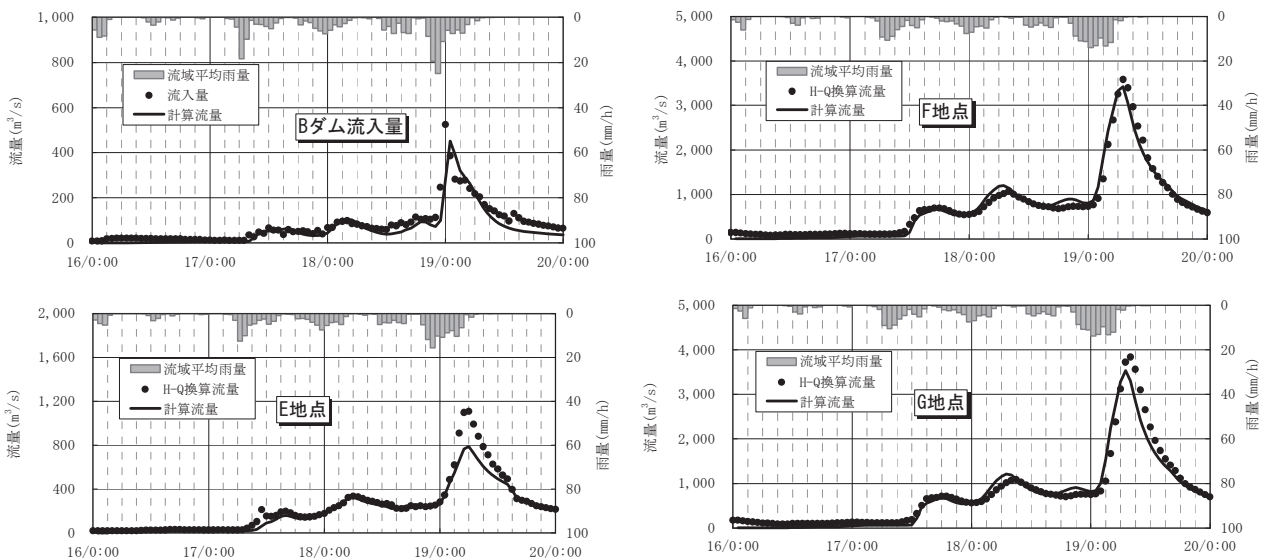


図3 平成18年7月洪水の同定結果

4. 洪水予測におけるフィードバック手法の開発

洪水予測においては、現時刻までの実測データに合わせた状態を想定した上で、現時刻の状態を調整する。一般にこの方法をフィードバックという。フィルタリングを使用しないで、観測値に合わせるために、解析結果に対して現時刻の流量誤差分を解析結果に上乗せする方法があり、多くの河川で使用されている。簡便であるが実測データと解析データの乖離が大きい場合は、予測精度が低下する場合がある。この方法は、短い時間では有効であるが、ダム操作に必要な24時間程度の長時間の予測には適用できない。流域の規模にもよるが、現時刻の誤差が継続するのは数時間程度までで、特にピーク付近では誤差の継続時間は短くなる。このため、現時刻に近い時刻は現時刻の誤差が継続し、継続時間が長くなると解析結果に近づくように改良を試みた。

フィルタリングを用いた手法にカルマンフィルタ法⁵⁾⁶⁾、粒子フィルタ法⁷⁾⁸⁾がある。粒子フィルタ法は複雑なシステムを対象に任意の誤差分布でフィルタリングできるように北川⁹⁾が提案したものである。多くの粒子でシステム誤差と観測誤差を近似し、カルマンフィルタのようにシステムの局所的な線形化、大幅なプログラムの書き換えを必要としない。本研究では、誤差の上乗せ法と粒子フィルタ法について比較し、その精度を検証することとした。

(1) 改良誤差上乘せ法

ダム運用では24時間程度の長時間の予測が必要となるが、24時間先まで、現時刻の誤差が継続するとは考えにくい。過去における流量変動が大きい時は洪水時であり、現時刻の誤差は将来の予測にはほとんど影響せず、予測値は解析結果に近いと考える。一方、流量変動が小さい時は主に低水時であるため、現時刻の流量誤差が将来も継続すると考える。

本研究では、流量の変動状況を実績流量と解析流量の変動係数の積で表し、変動係数の大小で誤差の継続性を変化させるものとした。実績流量の変動係数として過去6時間の流量の標準偏差を平均値で割ったものを定義し、さらに解析結果の変動係数として過去6時間から将来6時間までの流量の標準偏差を平均値で割ったものを定義した。

$$V_o = \frac{S_o}{m_o} \quad m_o = \frac{\sum_{t-6hr}^t Q_o(t)}{6hr} \quad S_o = \sqrt{\frac{\sum_{t-6hr}^t \{Q_o(t) - m_o\}^2}{6hr}} \quad (16)$$

$$V_c = \frac{S_c}{m_c} \quad m_c = \frac{\sum_{t-6hr}^{t+6hr} Q_c(t)}{6hr} \quad S_c = \sqrt{\frac{\sum_{t-6hr}^{t+6hr} \{Q_c(t) - m_c\}^2}{6hr}} \quad (17)$$

ここに、 V_o は実測流量の変動係数、 V_c は解析結果の変動係数、 Q_o は実測流量、 Q_c は解析流量である。実測調整で使用する変動係数は、式(18)のように実績流量と解析流量の変動係数の相乗平均（積の平方根）とした。

$$V_{oc} = \min(\sqrt{V_c V_o}, 1) \quad (18)$$

以上の考察から、式(19)(20)の補正を行った。実績流量が解析流量より小さい場合は比率で縮小し、逆に大きい場合、誤差を上乘せする方法である。これは、解析流量を縮小する場合には、誤差を差し引くと解析結果がマイナスになる不合理を解消するためである。また、実績流量が解析流量より大きい場合は、比率で割増すと流量増加時には過大な予測となる傾向があるためである。

1) $Q_o(t) \leq Q_c(t)$ のとき 実績流量が計算流量より小さい場合

$$Q_o(t+i) = Q_c(t+i) \times FF \quad FF = 1 - \frac{Q_c(t) - Q_o(t)}{Q_c(t)} \left\{ 1 - \frac{T-i}{T} V_{oc} \right\} \quad (19)$$

2) $Q_o(t) > Q_c(t)$ のとき 実績流量が計算流量より大きい場合

$$Q_o(t+i) = Q_c(t+i) + DQ \quad DQ = \{Q_c(t) - Q_o(t)\} \left\{ 1 - \frac{T-i}{T} V_{oc} \right\} \quad (20)$$

ここに t は現時刻、 i は予測時間として、予測時間を $T = 12hr$ とした。

(2) 粒子フィルタ法

1) 基礎方程式

状態量(x_t)を観測値(y_t)により推定し、将来予測を行うシステムを想定する。洪水予測においては状態量はモデル定数、分布型流出モデルの水分量等である。ここでは状態量を x_t とし複数の状態量を表現する行列を考えている。また観測値 y_t はリアルタイムで取得した水位、流量流量と考えている。観測値は $y_{1:t}$ と表現し、1~ t 時刻までの観測値を示しているが、これは「過去のすべてのデータを使用した」ということを示しており、具体的に期間を決めているわけではない。

観測値から推定した状態量 x_t が観測値 $y_{1:t}$ で最適化された条件付き確率分布を $p(x_t | y_{1:t})$ (フィルタ分布) で式(22)に示す。また、1期先の予測を行った分布を $p(x_t | y_{1:t-1})$ (予測分布) を式(21)に示す。現時刻(ここでは $t-1$)における最適な状態量から1期先の状態量の確率分布を示したものである。

$$\text{一期先の予測分布} \quad p(x_t | y_{1:t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | y_{1:t-1}) dx_{t-1} \quad (21)$$

$$\text{現時刻のフィルタ分布 } p(x_t | y_{1:t}) = \frac{p(y_t | x_{t-1})p(x_t | y_{1:t-1})}{p(y_t | y_{1:t-1})} \quad (22)$$

$$\text{ただし } p(y_t | y_{1:t-1}) = \int p(y_t | x_t)p(x_t | y_{1:t-1})dx_t$$

$\delta(x)$ はディラクのデルタ関数で $x=0$ のときに 1, $x \neq 0$ のときに 0 を示す. 一期先の予測分布で $p(x_t | x_{t-1})$ は時間を更新することである. 現時刻のフィルタ分布はベイズの定理そのもので左辺が事後分布で, 右辺の $p(x_t | y_{1:t-1})$ を事前分布, $p(y_t | x_{t-1})$ を尤度となる.

粒子フィルタは予測分布 $p(x_t | y_{1:t-1})$, フィルタ分布 $p(x_t | y_{1:t})$ に式(23)(24)を代入することにより得られる. \approx は右辺の積分が 1 になるように調整することを示している.

$$p(x_t | y_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t-1}^{(i)}) \quad (23) \quad p(x_t | y_{1:t}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t,t}^{(i)}) \quad (24)$$

2)粒子フィルタの設計

複数のパラメータをフィルタリングできる特徴を生かして, 図.4のとおり粒子は6時間前の状態量の修正量と降雨にかかる補正係数の2つとする. また, 立川らは⁸⁾粒子の数を1,000個以上とすると安定的な予測結果が得られると指摘しているが, 1,000個との計算結果に比べほとんど変わらない結果となったので100個を採用した.

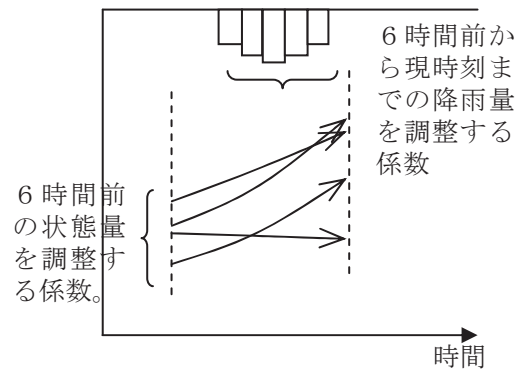


図4 粒子フィルタの概要

3)誤差分布の設定

現時刻の流量データで誤差を評価する方法として, 現時刻の急激な変動が結果に影響を及ぼす可能性がある. このため, 過去 6 時間の実測値に対する 2 乗誤差を算定し, 誤差分布

$P(Q_C(t,i))$ が自由度 1 の χ^2 の分布に従うものと仮定した. ここに, \hat{D} は誤差分布の期待値で観測流量の 1 割とした.

$$P(Q_C(t,i)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{D}}} \exp\left(-\frac{D(t,i)^2}{2\hat{D}^2}\right) \quad (25) \quad D(t,i)^2 = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^{18} \exp(-at)(Q_o(t) - Q_C(t,i))^2 \quad (26)$$

ここに $Q_o(t)$ は観測流量, $Q_C(t,i)$ は t 時刻 i 番目の粒子の解析結果, a は定数である. フィルタリングによる予測流量の期待値 $\hat{Q}_C(t)$ は, 誤差分布の加重平均となり, 式(27)のように表される.

$$\hat{Q}_C(t) = \sum_{i=1}^{100} P(Q_C(i))Q_C(t,i) \quad (27)$$

4)粒子のリサンプリング

粒子は, 適合度で重みを持っているので, 次ステップに向けて分布形を変更しないで, 粒子の重みを変更する. この方法に図.5 のとおり, 粒子の重みを順番に並び替えて, 重みの大きい方から順にサンプリングする方法を採用した.

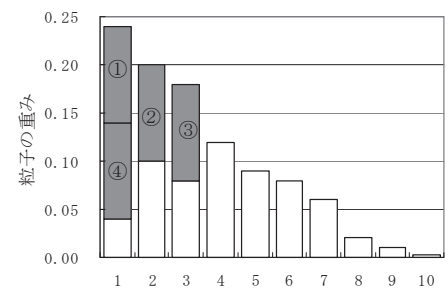


図5 リサンプリングの概念図

(3)予測結果の比較

先に示した2つの手法の適用性を評価するために, 実績レーダ雨量を予測雨量とみなして解析を行った. 流量の予測結果を図6に, Bダム下流の予測水位結果を図8に示す. 誤差は改良誤差上乘せ法と粒子フィルタではほとんど差がないことがわかる. しかしながら, 実績のハイドログラフと予測結果の適合性について, 3時間予測結果に着目して評価した結果を図7に示す. これによれば, ピーク流量, ハイドログラフの形状誤差では改良誤差上乘せ法が優れている. 図8に水位予測結果を示しているが, 洪水の立ち上がり付近に着目すれば, 実用的には両者とも水防警報による水防団の出動, 避難勧告等の発令に適用できる精度であると考えられる.

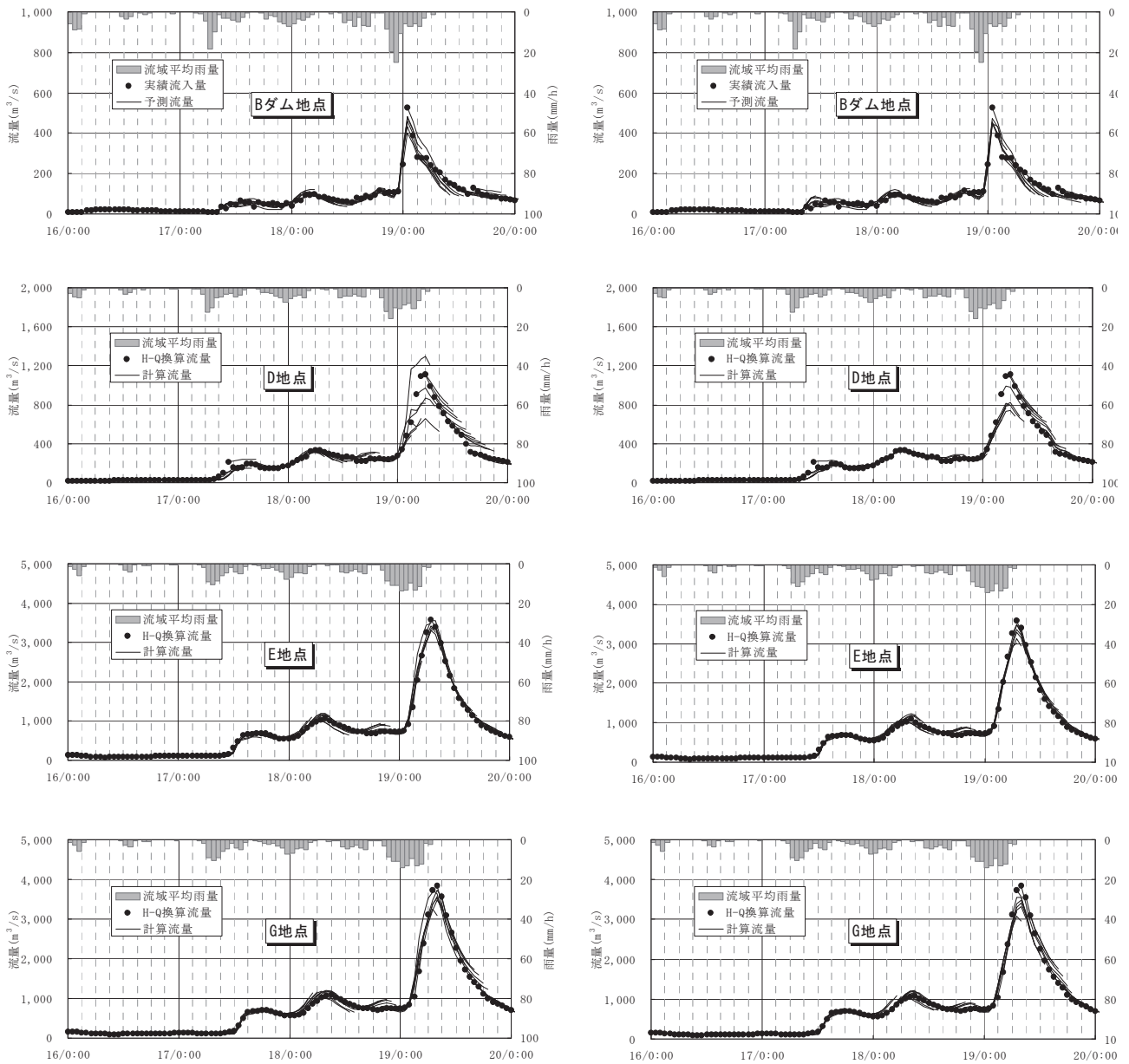


図6 予測流量の比較 (左; 改良誤差上乘せ法、右; 粒子フィルタ法)

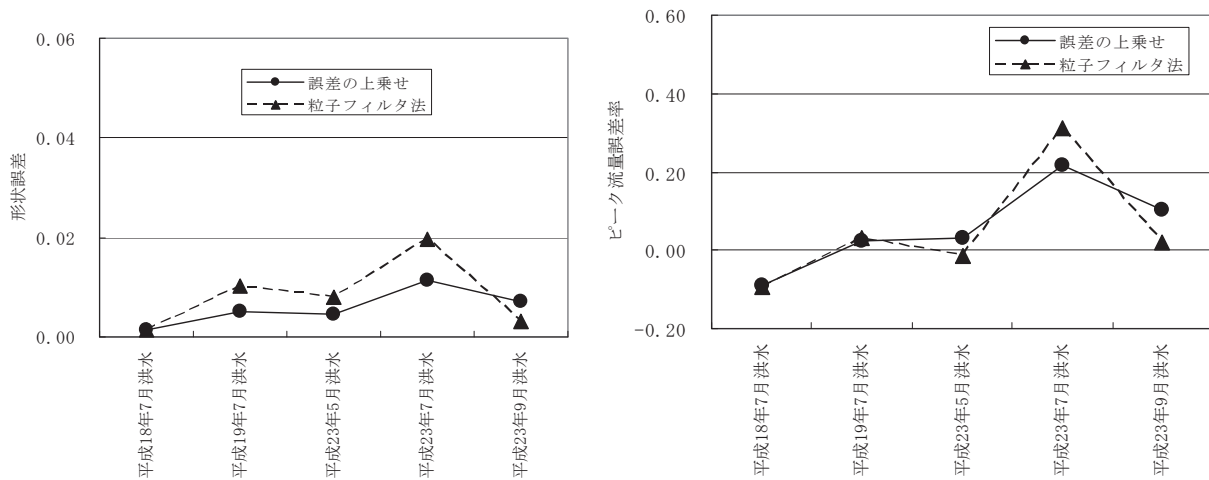


図7 予測時間3時間の誤差比較 (左; 洪水波形の誤差率、右; ピーク時の流量誤差率)

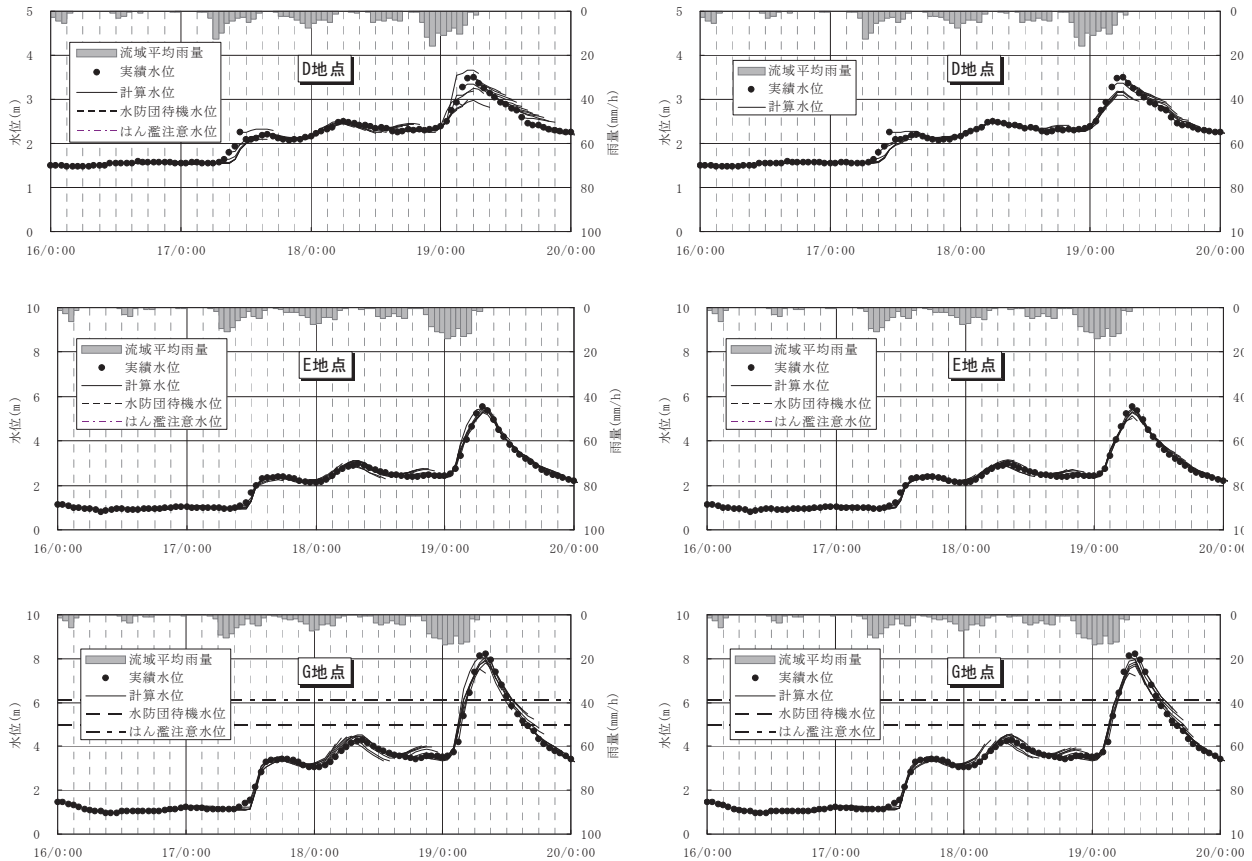


図8 水位予測結果 (左;改良誤差上乘せ法、右;粒子フィルタ法)

5. おわりに

本研究では、ダム下流のC市とその中の歴史的風致地区の浸水被害を軽減するために高精度に上流ダムの流入量と下流の水位を予測する手法について研究した。その中で、分布型流出モデルの定数をSCE-UA法で同定し、実用上問題のない程度の同定結果が得られることを確認した。またフィードバック手法として、改良誤差上乘せ法と粒子フィルタ法について比較した結果、両者とも実用上問題ないことを確認した。

粒子フィルタ法は自由度の高い手法で、フィードバック手法として過去の履歴を考慮でできる手法であり、フィルタの設計方法、観測値の誤差分布の設定方法等に研究の余地がある。また、粒子フィルタ法はサーバ等の機器への負荷が大きい手法であり、サーバ等への負荷の軽減も今後の課題である。

参考文献

- 1) (独)水資源機構：青蓮寺ダム，比奈知ダム，室生ダム 名張川上流3ダム連携による台風18号時の統合操作，2009.
- 2) 清水 裕・福永 健・太田垣 暁・蠣崎 哲・佐々木 晋：統一河川情報システム（表現と活用シナリオ），平成16年度 河川情報シンポジウム 講演集，pp.1-9，2004.
- 3) 国土交通省：歴史的風致の維持及び向上に関する法律，2008.
- 4) 田齋秀章・平松和昭・森 牧人・原田，昌佳：SCE-UA法を用いたTOPMODELパラメータの特性評価，九州大学大学院農学研究院学芸雑誌，61(2)，pp.261-272，2006.
- 5) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，2004.
- 6) 佐山敬洋，立川康人，寶馨：バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化，土木学会論文集，土木学会論文集B，64(4)，pp.226-239，2008.
- 7) 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.
- 8) 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.S511-S516，2011.
- 9) 北川源四郎：モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について，統計数理，第44巻1号，pp.31-48，1996.