

# 粒子フィルターを活用したダム流入量予測に関する研究

天 梁 渡 邊 方 田 信 純\*  
 梁 渡 邊 方 田 信 純\*\*  
 渡 邊 方 田 信 純\*\*\*

**概要** 発電を目的としたダムの管理事務所では、出水時に、ダム下流河川に急激な水位上昇を発生させないよう、常時満水位を超えないようにゲート放流の開始時刻や放流量を判断するため、ダム流入量予測モデルが導入されている。しかし、パラメータが最適化されたモデルでは全ての出水に対して予測精度を確保することが難しく、最終的なゲート操作はダム管理者の経験的判断に依るところが大きい。そこで、パラメータ誤差を流入量予測幅として評価する粒子フィルターと呼ばれる手法を用いてダム流入量予測の精度向上を図った。

**キーワード**：ダム流入量予測，分布型流出解析モデル，粒子フィルター，ゲート操作

## 1. はじめに

本論文にて検討対象とする道志ダム上流域は、図-1に示す通り、神奈川県相模川水系道志川に位置し、流域面積が112.5 km<sup>2</sup>であり、上流域流量が流入量として道志ダムに到達するまでの時間は概ね60～90分程度である。

道志ダムの目的は発電のみであり、操作規程に従い、常時満水位を超えないよう貯水位を維持する操作が求められており、水利権上の最大取水量である発電使用水量11.4 m<sup>3</sup>/s(宮ヶ瀬ダムへの道志導水路による導水がない場合)を上回る流入が継続すると予測される場合、ゲート放流を行う必要がある。ただし、道志ダムへの移動時間や放流連絡に要する時間、休祝祭日における職員の参集時間等の放流までのリードタイムの確保が必要である。

一方、過去30年間のダム流入量を整理すると図-2のとおり、近年、気候の変化等により最大流入量及び1時間当たりの流入量増加量が増加傾向を示しており、堆砂対策等の必要な措置を講じると共に、安全なダム管理と効率的な水運用を進めていくための精度の高いダム流入量予測システムの構築が不可欠である。

## 2. ダム流入量予測モデルの枠組み

ダム流入量予測モデルはダム流域特有のものであり、下流域の洪水予報河川等では洪水予測モデルが河川水位を予測している。この洪水予測モデルは、国土交通省及び都道府県等で運用されており、雨量を入力条件とし、流量を算定する流出解析モデルや流量を水位

に変換する河道モデルから構成される。ダム流入量予測モデル、あるいは、洪水予測モデル、いずれも、既往洪水に対してモデルを検証した上でモデル変数を最適化し、確定モデルとする検討過程を経るが、各過程やモデルには入力条件、モデル条件等の不確定性を数多く抱え、リアルタイムでのダム流入量・水位再現も難しい現実がある。この不確定性に対応するためにダム流入量予測等を対象とした研究として、古くは単位図、貯留関数、タンクモデル等にカルマンフィルターを適用した事例<sup>1),2)</sup>、近年では分布型流出解析モデルにカルマンフィルターを適用した事例<sup>3)</sup>等がある。しかし、カルマンフィルターは過去の観測値からモデル変数を最適化するため、急激に雨量とダム流入量等の関係が変化する際に予測精度が悪くなる等の問題がある。

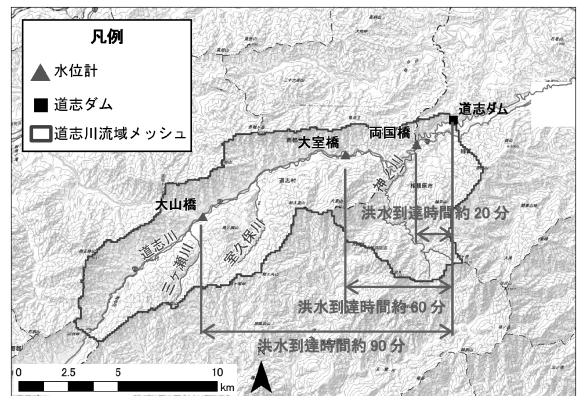


図-1 本研究の対象流域概要(相模川水系道志川)



天方 匡純

梁田 信河

渡邊 優

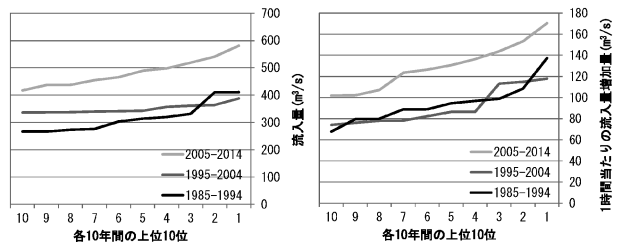


図-2 近年の出水傾向(左：流入量，右：流入量増加量)

\* 八千代エンジニアリング(株) 技術推進本部技術開発部 専門部長 amakata@yachiyo-eng.co.jp  
 \*\* 八千代エンジニアリング(株) 東北支店 取締役 支店長 会員 yanada@yachiyo-eng.co.jp  
 \*\*\* 八千代エンジニアリング(株) 総合事業本部河川部 技師 yu-watanabe@yachiyo-eng.co.jp

そこで、本論文では、状態・条件等の変化に対して柔軟性がある粒子フィルターと呼ばれる手法を流出解析モデルに適用し、ダム流入量予測モデルの精度向上を試みる。粒子フィルターを流量予測に適用した既往研究としては、工藤ら<sup>4),5)</sup>がタンクモデルに適用した事例、高崎ら<sup>6)</sup>が都市貯留関数モデルに適用した事例がある。更に、粒子フィルターを水位予測に適用した既往研究としては、立川ら<sup>7)</sup>がダイナミックウェーブモデルに適用した事例等がある。本論文では、分布型流出解析モデルに対して粒子フィルターを適用し、6時間先までの予測精度を確認すると共に、フィルタリングの掛け方の違いによる予測精度の違いを確認する。

### 3. 分布型流出解析モデルの構築

粒子フィルターの適用先である分布型流出解析モデルについて説明する。

#### (1) 分布型流出解析モデルの概要

分布型流出解析モデル(図-3参照)は、土研モデル<sup>8)</sup>を採用する。土研モデルは、3種類のタンクで構成される流出解析モデルであり、表層モデル、地下水モデル、河道モデルの各要素モデルから成る。それぞれの変数は、土地利用データ(出典：土地利用細分メッシュ図、国土地理院)、土壌データ(出典：土壌分類図、国土数値情報)、地質データ(出典：表層地質区分図、国土数値情報)を基に設定し、落水方向は5mDEM(出典：国土地理院)を100mメッシュ

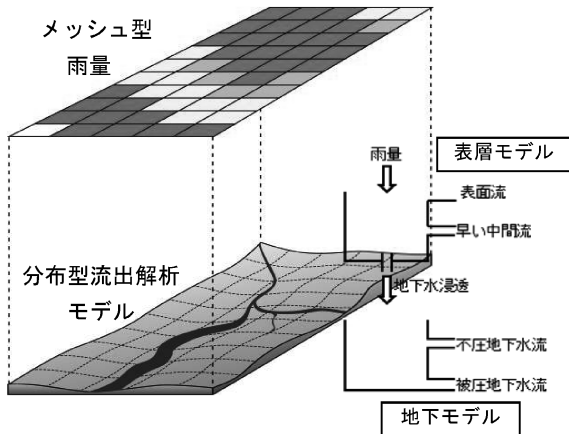


図-3 分布型流出解析モデルの概要

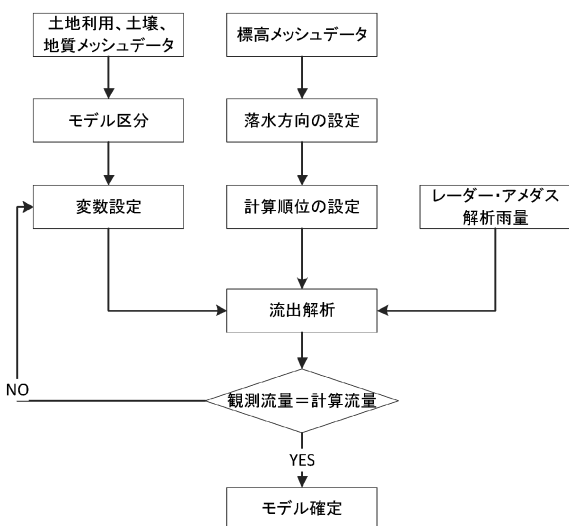


図-4 分布型流出解析モデルの構築フロー

に加工して設定した。

#### (2) 分布型流出解析モデルの計算結果

上記のとおり、基礎データからモデルの一次変数を設定し、図-4のフローに従い、観測流量と計算流量を比較したうえで最終的な変数設定とした。具体的には、平成17年から平成26年度までのゲート放流を伴う出水から10個の代表出水を選定し、ダム流入量に対して、図-5の小流域単位で変数検証を繰り返し(図-6参照)、変数を最終決定したうえで、平成27年度の3出水に対して、観測値と計算値を比較した。その結果を図-7に示す。

### 4. 粒子フィルターの概要

#### (1) 粒子フィルターのアルゴリズム

通常、我々が用いる図-3のようなシミュレーションモデルは、真のダイナミクスに対して空間の差分化や変数化等による不完全なモデルであり(図-8参照)、 $z_t$ を真のダイナミクスを記述する際に必要な全ての状態変数と仮定すると、今構築するシミュレーションモデルの状態変数  $x_t$  との関係は、(1)式のように記載される。ただし、 $\lambda_t$  は  $x_t$  に含まれない。

$$z_t = \begin{pmatrix} x_t \\ \lambda_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

我々のシミュレーションモデルが利用する  $x_t$  の次元が増えたとしても、真のダイナミクスを表現できるモデルには到達し得ないと考え、その乖離を確率変数で表現したものがシステムモデルと呼ば

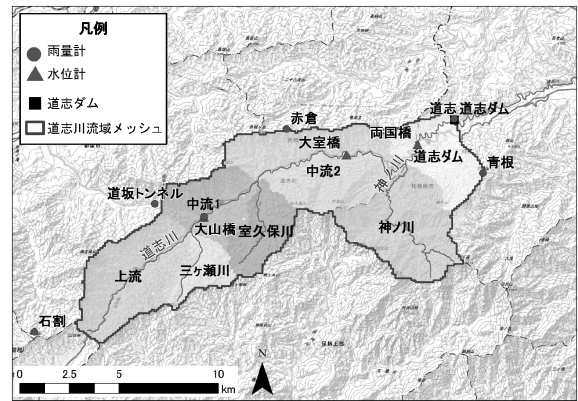


図-5 変数検証した小流域単位

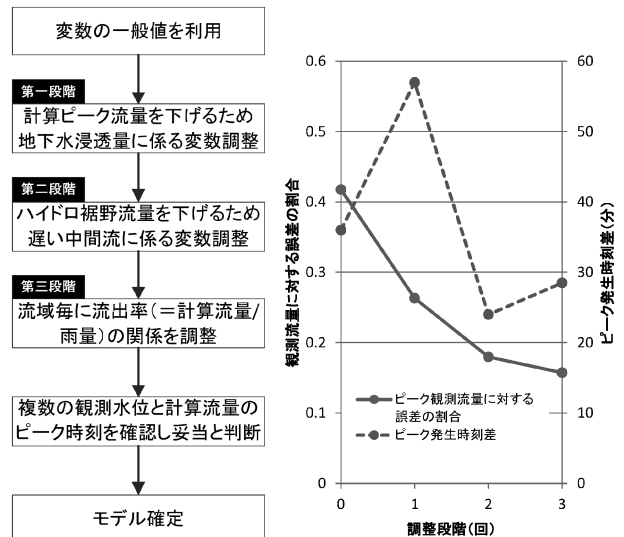


図-6 検証過程の推移

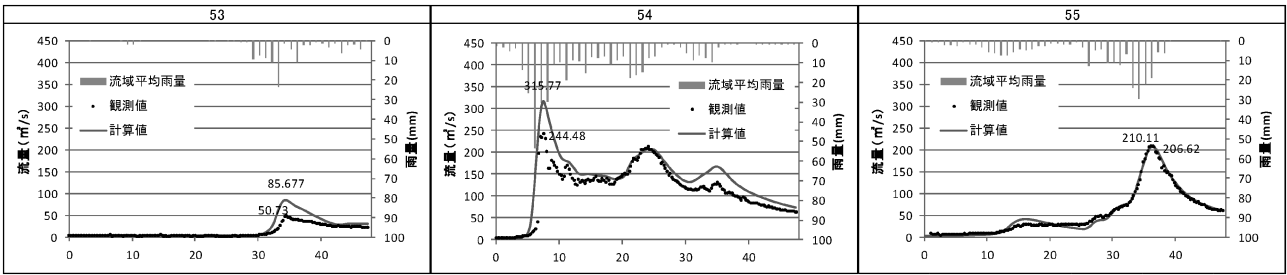


図-7 平成27年度3出水(左: H27.7.3, 中央: H27.7.16, 右: H27.9.9)検証結果

れる。その確率を担う変数を統計科学ではシステムノイズと呼ぶ。

上記のシミュレーションモデルに関する前提条件を踏まえ、非線形・非ガウス型の状態空間モデルとして、以下のような状態方程式と観測方程式を考える。

$$\begin{aligned} x_t &= f(x_{t-1}, u_t) \\ y_t &= h(x_t, v_t) \end{aligned} \quad (2)$$

$x_t$ は時刻  $t$  の  $k$  次元の状態ベクトル,  $y_t$ は時刻  $t$  の  $l$  次元の状態ベクトル,  $u_t, v_t$ はシステムノイズ(ホワイトノイズ)である。なお, 本論文ではこれらのノイズは *Box-Muller* 法で正規分布に従う乱数として考慮している。 $f, h$ は状態ベクトルに関する非線形関数であり, それぞれ時間発展を表す状態方程式, そして, 観測方程式である。

時刻  $t$  までの観測ベクトル  $y_{1:t}$  が得られた後, フィルタリングされた状態  $x_t$  の  $p(x_t|y_{1:t})$ (事後分布)は, ベイズの定理により

$$p(x_t|y_{1:t}) = \frac{p(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})}{p(y_t|y_{1:t-1})} \quad (3)$$

と表現される。粒子フィルターではこれらの条件付き確率分布を, その分布の実現値である独立のサンプルの集合(アンサンプル)を用いて近似する。具体的には(3)式内の  $p(x_t|y_{1:t-1})$ (事前分布)を

$$p(x_t|y_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t|t-1}^{(i)}) \quad (4)$$

と近似する。 $N$ は粒子数で  $1/N$ により積分値を正規化,  $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数,  $x_{t|t-1}^{(i)}$ は時刻  $t$  の  $i$  番目の粒子の事前推定値である。(4)式を(3)式に代入し, 観測値  $y_t$ を加えた後の事後分布が(5)式となる。

$$p(x_t|y_{1:t}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t|t}^{(i)}) \quad (5)$$

(4)式, (5)式を表現する粒子  $x_{t|t-1}^{(i)}, x_{t|t}^{(i)}$ は(2)式, (3)式に従って, 図-9の手順で求める。

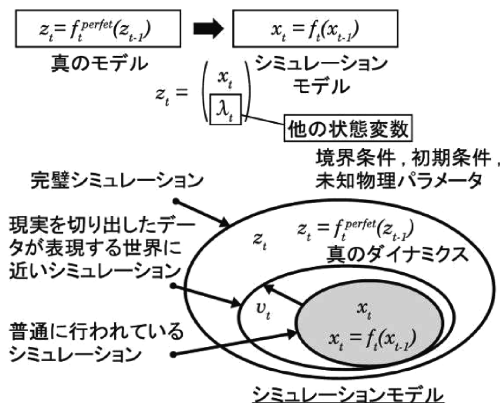


図-8 シミュレーションと現実世界<sup>9)</sup>

(3)式の  $p(y_t|x_t)$  は状態  $x_t$  のときに観測値  $y_t$  を得る尤度であり,

図-9の第3列の粒子群の大きさは尤度の大小を表し, 観測値に対する適合度が高い粒子ほど尤度大きいことを示す。この尤度関数の具体的定義は後述する。また, (3)式の分母の  $p(y_t|y_{1:t-1})$ は  $x_t$ に依存しない定数であり, 全確率が1になる条件を満たすための正規化定数と言える。これを周辺化と鎖状グラフィカルモデルのマルコフ性<sup>2</sup>の関係から変形すると(6)式となる。

$$p(y_t|y_{1:t-1}) = \int p(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})dx_t \quad (6)$$

そして, (4)式, (6)式を(3)式に代入すると, 事後分布として, (7)式が求められる。

$$\begin{aligned} p(x_t|y_{1:t}) &= \frac{p(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})}{\int p(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})dx_t} \\ &= \frac{p(y_t|x_{t|t-1}^{(i)})}{\sum_{i=1}^N p(y_t|x_{t|t-1}^{(i)})} = \frac{w_t^{(i)}}{\sum_{i=1}^N w_t^{(i)}} \end{aligned} \quad (7)$$

(2) 粒子フィルターの各種条件

図-3の分布型流出解析モデルを状態方程式と見立て, 粒子フィルターを適用する。以降に設定条件を具体的に示す。

a) 粒子化の対象と初期設定

粒子フィルターでは, 状態量, パラメータ, 初期・境界条件等にランダムに異なる値を与え, 得られた多数の状態方程式を同時に計算し, 観測情報をベイズの定理に基づき予測情報に盛り込む。ここでは, 分布型流出解析モデルのパラメータが多い, 河道の詳細情報が入手できない等の条件も加味し, 誤差を考慮する対象を計算流量とし, それに乗ずる係数  $r$ を粒子化対象とする。 $r$ の初期分布は正規分布を仮定し, 流量係数  $r$ は  $N(1.0, 0.2^2)$ よりランダムに発生さ

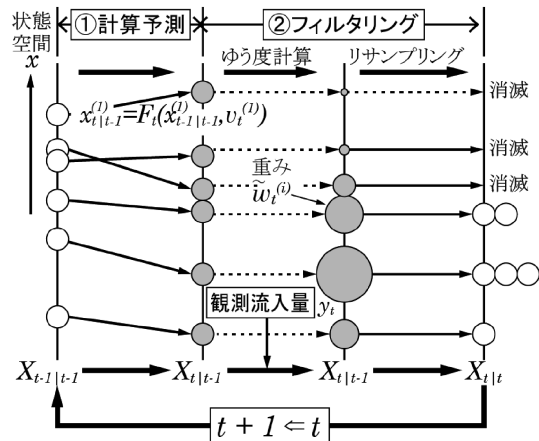


図-9 粒子フィルターのシステム図<sup>10)</sup>文献に加筆

せる。ダム流入量や山地蛇行河川流量の観測精度確保の困難さを考慮し、流量係数偏差を0.2とした。後述するダム流入量のみをフィルタリングする場合、支川流量にフィルタリングする場合も同様の考え方とした。

b) 粒子数

実務上、ダム流入量予測の際には時間的制約が伴うため、粒子数は既往文献<sup>4),5),6),7)</sup>で採用されている最小の100個とした。

c) 尤度関数の設定

(2)の観測方程式から定まる尤度関数を(9)式とする。

$$p\left(y_t | x_{t-1}^{(i)}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left[-\frac{(q_{t,cal}^{(i)} - q_{t,obs}^{(i)})^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (9)$$

$q_{t,cal}^{(i)}$ は時刻  $t$  の  $i$  番目の粒子のダム流入量の計算値、 $q_{t,obs}^{(i)}$ は観測値である。 $\sigma_y$ は観測値の誤差であり、20%の観測誤差があるとして  $\sigma_y = 0.2q_{t,obs}^{(i)}$  とする。出水時のダム貯水位の振動や貯水位-貯水容量曲線の管理実態を踏まえ、既往文献<sup>4),5)</sup>の流量観測誤差10%等も参考にダム流入量観測誤差を20%と設定した。

d) リサンプリング手法

リサンプリングの目的は、重み  $w_t^{(i)}$  を持つ粒子  $x_{t-1}^{(i)}$  によって表現される分布関数を、重みが等しい粒子として選び直す行為である。本論文では、立川<sup>7)</sup>を参考に、抽出方法が簡単なランダムサンプリング方式を採用した。

5. 粒子フィルターの適用

(1) ダム流入量に対する粒子フィルターの適用

粒子フィルターは、最適化されたダム流入量予測モデルに反映しきれない空間条件、物理条件、観測条件等の不確定性を予め誤差と見込むことでモデルのアウトプットに幅を持たせ、現時刻の観測値との比較により尤度関数を設定し、次の時間ステップの予測精度を向上させる手法であり、図-12のフローに従い実行する。また、分布型流出解析モデルの変数全てを粒子化対象とする煩雑さを避けるため、第一歩として、図-13左図に示すように、分布型流出解析モデルの計算結果の一つである道志ダム流入量のみを粒子化対象とする。

ダム流入量に対して流量係数を乗じ、100個のモデルにより計算流量の不確定性を表現し、図-10に示す粒子フィルターによる流量再現性を確認した。予測値は100個のモデル結果の期待値とした。図-7で大きくずれていた計算値もフィルタリングにより観測値と近接する結果に補正されている。

次に現時刻のフィルタリング結果の期待値に最も近い粒子を選定し、実績雨量を予測雨量に見立てて、6時間先まで計算したものが図-11である。現時刻のフィルタリングでは強制的に観測値との誤差が小さい尤度分布が形成され、精度の高い予測値が算定されたが、フィルタリングの効力が弱まる6時間先の計算値について

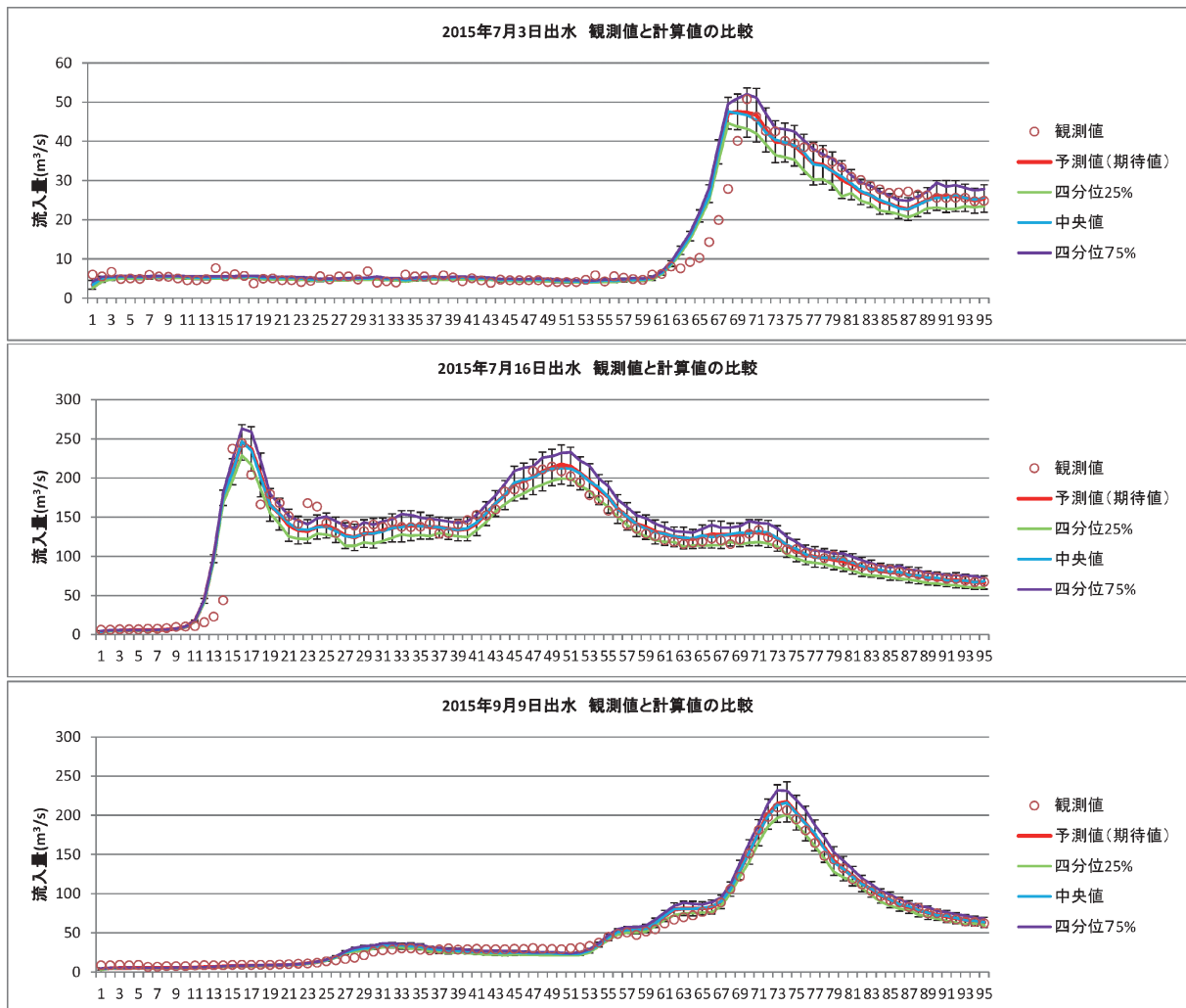


図-10 ダム流入量のみへのフィルタリング操作による計算値補正結果

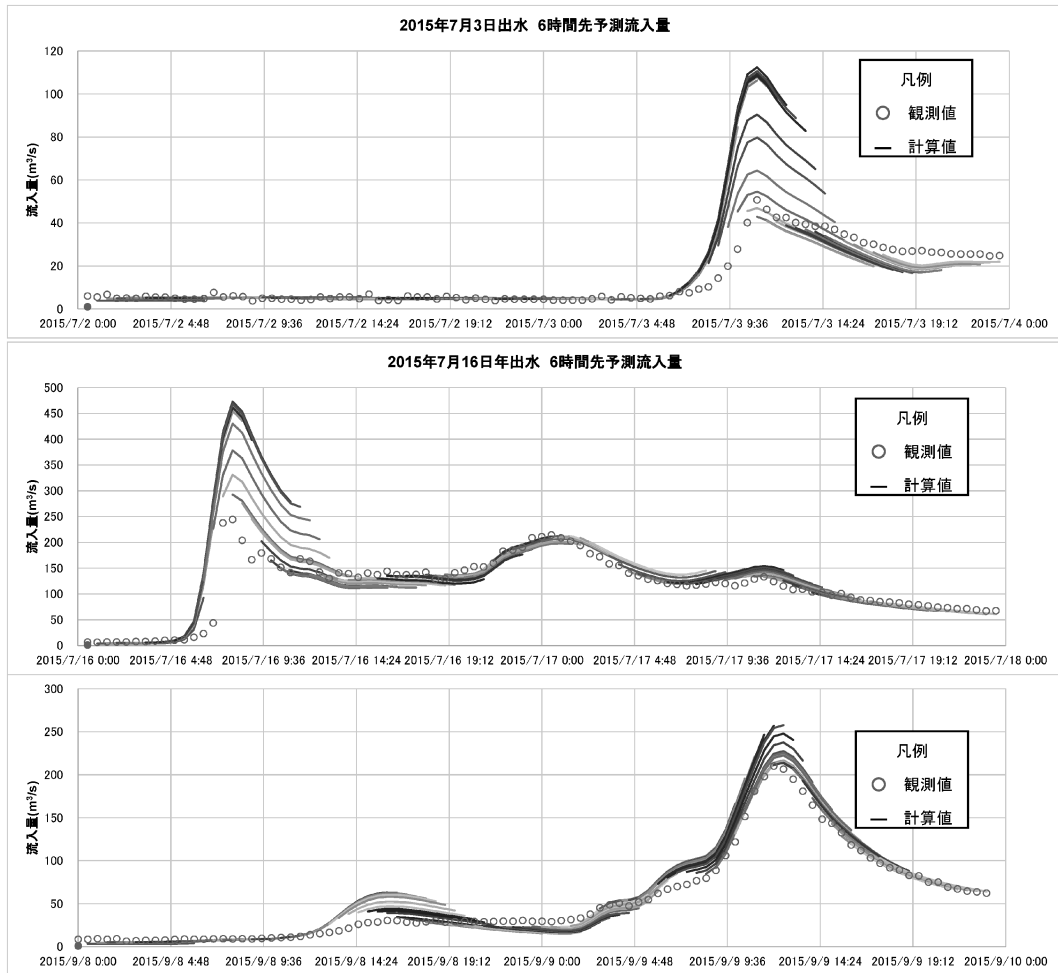


図-11 ダム流入量に対してのみフィルタリングを掛けた場合の6時間先までの予測結果

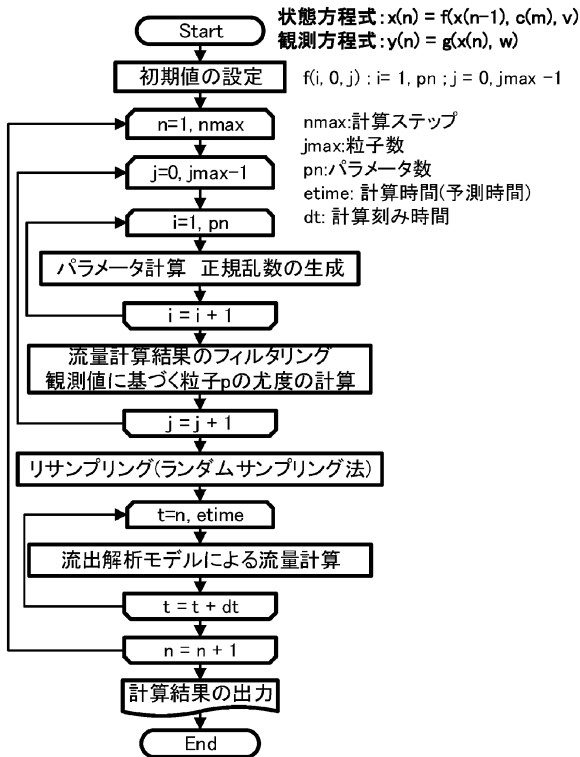


図-12 道志ダム流域における粒子フィルター適用の考え方

は、図-7で見られた元来の状態方程式(流出解析モデル)が持つ特性が顕著に表現され、予測精度が大きく劣化している。

(2) 支川流量に対する粒子フィルターの適用

前項ではダム流入量のみを粒子化の対象としたが、分布型流出解析モデルの一つのアウトプットのみに対する強制的な調整のため、現時刻フィードバックと呼ばれる補正方法と大きな違いはない(計算結果の期待値に最も近い粒子を選択しているため厳密には異なる)。そこで、より流出システム全体への補正に近くなるように、図-13右図に示すように支川流域からの計算流量を粒子化対象とする。対象とする支川流域は図-5と同様とする。ただし、全体で約

【ダム流入量のみフィルタリング】 【支川流量をフィルタリング】

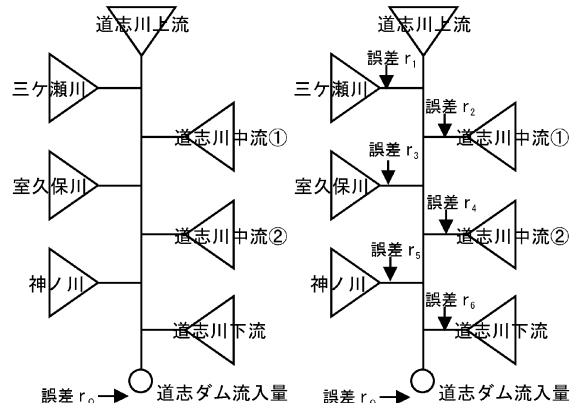
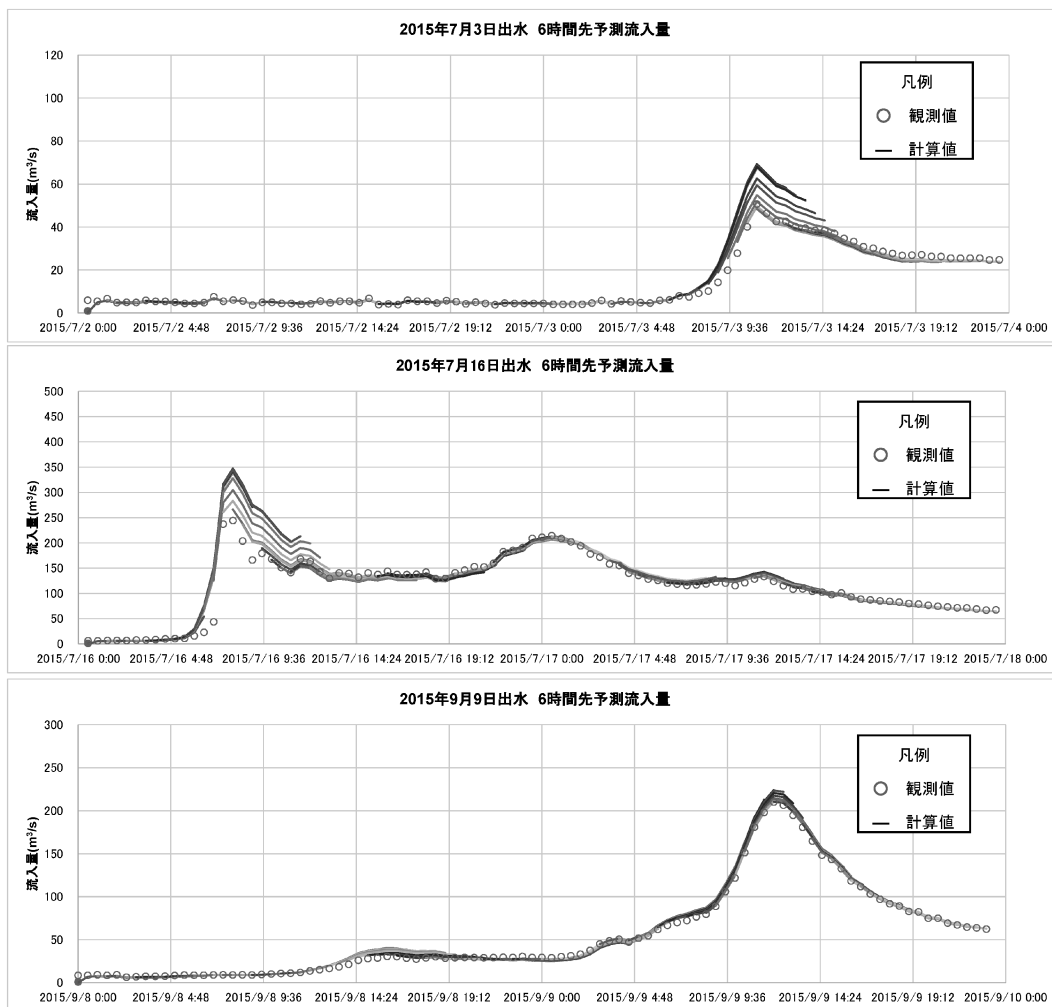


図-13 フィルタリング対象としたダム流入量及び支川流量



図一14 支川流量等に対してフィルタリングを掛けた場合の6時間先までの予測結果

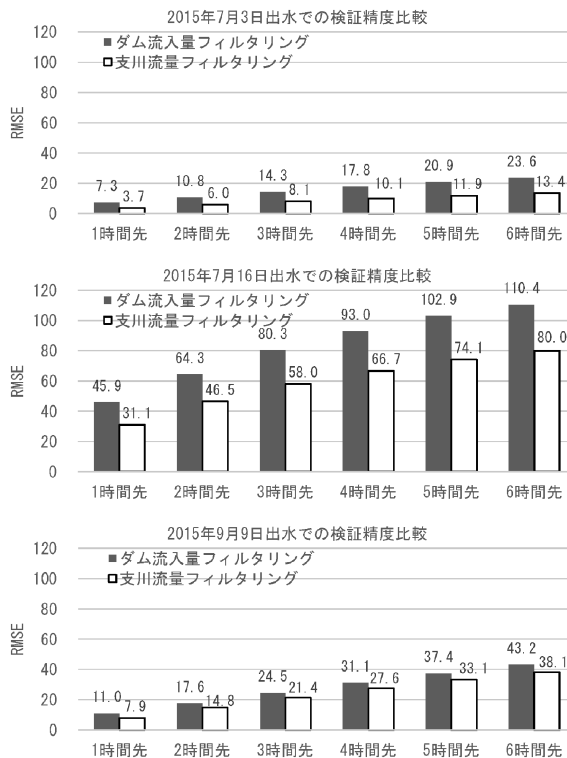
100個の粒子数とするため、各流域に対して15個の粒子を割り当てた。各計算流量の流量係数の与え方は前項と同じとした。以上の計算条件にて粒子フィルターの適用結果を示したものが図一14となる。なお、現時刻フィルタリングの差は図一11と大きく変わらなかったため、6時間先までの結果のみを掲載する。

また、フィルタリングの掛け方による予測精度の違い(図一11と図一14の違い)を定量的に示すため、RMSEにより観測値と予測時間毎(1時間先, 2時間先・・・, 6時間先)の計算値との差を評価した。RMSEは次式で算定する。図一15に整理結果を記す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_c(i) - h_o(i))^2}$$

N : 総計算ステップ数,  $h_o(i)$  : i時の観測値,  
 $h_c(i)$  : i時の計算値

図一15より、道志ダム流入量のみフィルタリングを掛けるよりも、各支川流量にフィルタリングを掛けた方がハイドロ全体として精度改善が見られる。また、ハイドロ形状を比較すると、特にピーク流量の誤差が大きく改善されている。これは、単一の変数に対して100個粒子化するよりも異なる変数に対して粒子化し、多様性を表現した方がより本質的なシステム補正となり効果的であることが想定される。本論文では、作業の煩雑さからいずれも計算結果に対する粒子化を試みたが、様々な変数、状態量等に対する粒子化を試みることで、リアルタイムという一時点での変数調整のなかでも、真のシステム補正に近い粒子選択の可能性が高まると考えられる。



図一15 フィルタリング対象によるRMSEの違い

## 6. おわりに

本論文では、分布型流出解析モデルからの計算流量について、ダム流入量のみをフィルタリングした場合と流出システム的に各支川流量をフィルタリングした場合で、流量再現精度の向上程度を確認した。どちらのフィルタリングも一期先(30分先)の予測結果は大きく変わらなかったが、6時間先までの予測結果は大きく異なる結果となり、システム的にフィルタリングを施した方が精度向上に寄与した。このことから、不確実性が生起する様々な変数、状態量等を粒子化し、多様性のあるシステムとして粒子フィルターを適用することが、本質的にシステムの柔軟性を高めることになると考えられる。

一方で、本論文のフィルタリング手法は、以下の点で課題があると考えられる。

- (1) 分布型流出解析モデルから算定される計算流量に対して粒子フィルターを適用した。しかし、分布型流出解析モデルの計算結果が有する不確実性は、雨量、様々なモデル変数にあり、これらの他の不確定要素を含めて、モデル化することで更に精度向上する余地がある。
- (2) 粒子フィルターは時刻  $t$  にてフィルタリングを行い、時刻  $t+1$  の予測精度を高める手法である。このため、6時間後の予測ではフィルタリング効果が弱まり、予測精度は劣化する。そこで、一時点の静的フィルタリングではなく、ある程度の時系列の動作を想定した上での動的フィルタリングを定義できると、数時間先の予測が重要な洪水予測・ダム流入量予測では有意義である。

今後は、これらの課題を踏まえて、まずは数時間先のダム流入量予測精度向上に寄与する研究を続けていきたい。

## 謝 辞

本検討にあたって、データの提供を始めとして、神奈川県企業庁相模川水系ダム管理事務所から多大な協力を得た。改めて感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用，土木学会論文報告集，No. 221，pp. 39-47，1974.
- 2) 角屋睦，田中丸治哉：長短期流出両用モデルによる実時間洪水予測，農業土木学会論文集，No. 177，pp. 31-41，1995.
- 3) 藤田暁，大東秀光，上坂薫，椎葉充春，立川康人，市川温：分布型流出モデルに基づくダム流入量実時間予測モデルについて，水工学論文集，第45巻，pp. 115-120，2001.
- 4) 工藤亮治，近森秀高，永井明博：粒子フィルターを用いた河川

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.

- 5) 工藤亮治，近森秀高，永井明博：粒子フィルターを用いた実時間洪水予測システムの構築と河道任意地点における予測精度の検証，水文・水資源学会誌，第24巻，第3号，pp. 137-148，2011.
- 6) 高崎忠勝，河村明，天口英雄，石原成幸：粒子フィルター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. 268，No. 4，I\_511-I\_516，2012.
- 7) 立川康人，須藤純一，椎葉充晴，萬和明，キムスンミン：粒子フィルター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. S551-S516，2011.
- 8) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，32-10，pp54-59，1990.
- 9) 樋口知之，上野玄太，中野慎也，中村和幸，吉田亮：データ同化入門，朝倉書店，2011
- 10) 樋口知之：予測にいかす統計モデリングの基本，講談社，2011.
- 11) 樋口知之：粒子フィルター，電子情報通信学会誌，Vol. 88，No. 12，pp. 989-994，2005.
- 12) 中井悦治：IT エンジニアのための機械学習理論入門，技術評論社，2015.
- 13) 北川源四郎：時系列解析入門，岩波書店，2005.
- 14) 加藤丈和：パーティクルフィルターとその実装法，情報処理学会研究報告，CVIM，コンピュータビジョンとイメージメディア，2007(1)，pp. 161-168，2007.
- 15) 足立修一，丸田一郎：カルマンフィルターの基礎，東京電機大学出版社，2012.
- 16) 片山徹：非線形カルマンフィルター，朝倉書店，2011.
- 17) 石井信，照井伸彦，井本清哉，北川源四郎：統計数理は隠された未来をあらわにする，東京電機大学出版社，2007.

## ABSTRACT

In recent years, the particle filter based on the Bayesian theory is applied in many fields. When we use the particle filter, we regard the difference distribution between the observation value and the calculation value as an error probability distribution of any equations. The mass calculation based on the various initial conditions produces the difference distribution. In this thesis, we applied the particle filter to the distributed runoff analysis model and enhanced the prediction accuracy. This way is supported by the new statistics processing technique and the improvement of the calculation machine.