粒子フィルタの導入により
横断方向の水位差を緩和した準２次元不定流解析法

北海道大学大学院工学研究院　正員　星野 剛
新潟大学大学院自然科学研究科　学生員　○須田 光千野
新潟大学災害・復興科学研究所　正員　安田 浩保

1.　はじめに

河川の水位観測は一般的に横断方向に一箇所，縦断方向に複数箇所で行われており，それらの情報に基づいて洪水時の水理は把握されている．河川の横断方向に水位は一様であると仮定した上で解析に観測値が用いられているが，洪水時には必ずしも横断方向に一様の水位とはなっていないことが知られている [1)]．実際に，洪水後の痕跡水位は左右岸で差異が生じていたり，高水敷の地形の影響を受け低水路と高水敷の間で水位差が生じる事例が確認されている．このような条件下で観測された水位は横断方向に平均した水位と差異があるため，横断方向を代表する水位（以下，代表水位）を入力情報とする準2次元水理解析の結果に多大な影響を及ぼすことが予想される．

本研究ではこのような問題を解決するため，データ同化手法の１つである粒子フィルタを準２次元水理解析に導入した観測水位と代表水位との差異の推定手法を開発し，信頼性の高い洪水流解析の実現を試みた．

2.　横断方向の水位差の影響を緩和した準 2 次元不定流解析法

(1)　準２次元不定流解析

水理解析に用いる支配方程式は，準２次元不定流解析法における以下の運動方程式と連続式である．

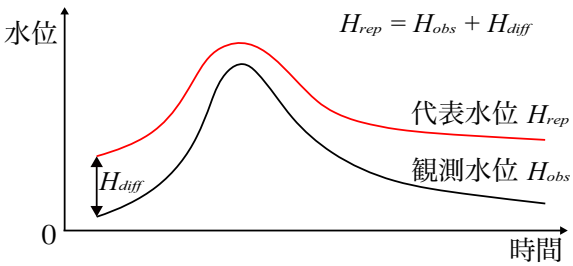
$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\beta Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial H}{\partial x}+gA\frac{Q\,|Q|}{K^2}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (2)$$

ここで，Q は流量，A は断面積，g は重力加速度，H は水位，β は運動量補正係数，K は通水能を表す．通水能 K は，河道の断面情報のみに依存して決定され，以下の式で表される．

$$K=\frac{AR^{2/3}}{n} \qquad (3)$$

R は径深，n はマニングの粗度係数である．支配方程式の差分化には陰解法４点プライスマン法を使用した．また，本研究では上下流の境界条件に水位を用いることを想定している．



図–1　観測水位と代表水位との関係

(2)　観測水位と代表水位との差異の決定

既往の知見 [1)] を参考に観測水位 H_{obs} と代表水位 H_{rep} との差 H_{diff} は**図–1** に示すように時間的に連続的に変化するものと想定した．このような H_{diff} の連続的な変化を効率的に反映するため，１タイムステップ前の H_{diff} が次のステップに引き継がれるように以下の式で表現した．

$$H_{diff}^{(t)}=H_{diff}^{(t-1)}+\epsilon_{H_{bn}},\epsilon_{H_{bn}}\sim N(0,\sigma_{h_{bn}}^2) \qquad (4)$$

上付き括弧内はタイムステップを表している．なお，$\epsilon_{H_{bn}}$ は H_{diff} の時間変化へ追従すること，および縮退をさけることを目的に設定した擾乱である．本解析では擾乱の大きさの標準偏差 $\sigma_{h_{bn}}$ は 0.01m と設定した．

境界条件として用いる水位 H_{bn} は観測水位 H_{obs} と代表水位との差異 H_{diff} を以下の式に代入することにより決定する．

$$H_{bn}^{(t)}=H_{obs}^{(t)}+H_{diff}^{(t)} \qquad (5)$$

(3)　データ同化手法

前節で示した観測水位と代表水位との差異 H_{diff} の決定手法では，$\epsilon_{H_{bn}}$ の付与により H_{diff} にバラツキが生じる．本手法では解析領域内の時々刻々と得られる観測情報を解析に逐次反映させていくデータ同化手法として粒子フィルタを導入し，H_{diff} の信頼性を向上させることを試みた．粒子フィルタはこれまでに洪水流解析への適用事例 [2)3)] があり，また，非線形・非ガウス型のあらゆる状態空間型モデルに適用可能であるという特徴がある．

Key Words: データ同化，粒子フィルタ，準２次元不定流解析，横断方向の水位差
〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050　　TEL 025-262-7053

3. 妥当性の検証

(1) 解析対象

本手法を実河川における洪水に対して適用した．解析の対象としたのは利根川上流部の 179〜183.5km 区間の 4.5km を対象とした．この区間には水位-流量関係式が作成されている八斗島水位観測所 (181.5km 地点) を含んでいる．ここでは H27 年の関東・東北豪雨時に河川の左右岸や低水路ー高水敷間において，簡易水位計により 1m 程度の差が確認された．

(2) データ同化条件

観測値として用いる水位および流量にはそれぞれ以下のような観測ノイズ ϵ_H, ϵ_Q を設定し，尤度計算に用いた．σ_h は 0.25 m，σ_q は流量の大きさに比例して誤差が大きくなることを想定し，$0.2Q_{obs}$ と設定した．

$$H = H_{obs} + \epsilon_H, \epsilon_H \sim N(0, \sigma_h^2) \quad (6)$$

$$Q = Q_{obs} + \epsilon_Q, \epsilon_Q \sim N(0, \sigma_q^2) \quad (7)$$

また，粒子数は 40 個に設定した．

(3) 双子実験による妥当性検証

本手法の妥当性を検証するために，データ同化手法の効果検証に頻用される双子実験を行った．

a) 解析手順と条件

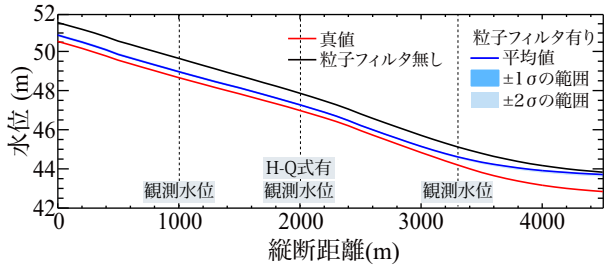
はじめに，対象とした区間において H27 年出水時の水位を上下流端に境界条件として与え，解析結果を得た．その結果を真値とみなし，任意の地点から観測値として水位の時系列変化を抽出した．次に，境界条件の上下流端水位を 1 m 上昇させた条件を設定し，抽出した観測値を粒子フィルタにより逐次的に反映させ，解析結果への影響を検証した．

解析範囲の上流から 1, 2, 3.3km の 3 地点における水位および水位-流量関係式が存在する 2km の地点における流量を観測値として使用した．

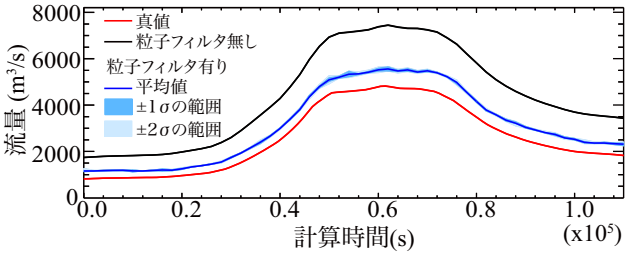
b) 解析結果

図–2 はピーク流量時刻の水位の縦断分布を示している．粒子フィルタを用いない解析では，境界条件の影響により真値に対して水位はどの地点においても約 1m の上昇が見られた．一方で，粒子フィルタを導入した解析では，上流部でより真値に近い分布となっている．しかしながら，下流端では水位の変動はほとんど見られなかった．これは H_{diff} が擾乱を与えられ小さくなる際に，下流端水位の低下直後に上流部の水位上昇が生じ，下流端より上流の観測水位との乖離が大きくなることが原因と考えられる．このような短時間の変動に鋭敏に反応する問題に対しては粒子スムーザーを用い，尤度計算までの時間間隔を長くすることで解決可能であると考えられる．

図–3 は，上流端から 2km 地点における流量の時間変化を示している．粒子フィルタを導入した場合は上流端



図–2 ピーク時刻における水位の縦断分布



図–3 流量の時間変化

の水位が真値に近づいたことにより，粒子フィルタなしの結果と比較して流量も真値により近い分布が得られた．

このように，課題は残るものの，代表水位から離れた値が境界条件として与えられた場合にも，解析結果の信頼性が向上することが明らかとなった．

4. おわりに

本研究は準 2 次元不定流解析を用いた際に洪水中の横断方向の水位差がもたらす影響を緩和することを目的に，境界部において観測水位と横断面を代表する水位との差を推定するデータ同化手法を提案した．双子実験によって妥当性を検証し，横断方向に水位差が大きく生じた際にも，精度の高い水理の推定が可能となることが示唆された．

一方で，今回の解析では境界部のみで観測水位と横断面を代表する水位との差の考慮を試みた．しかし，実際の現象においては全ての観測点で横断方向に水位差が生じている可能性があるため，今後は境界内部の観測点に対しても横断方向の水位差を考慮することを検討していきたい．

参考文献

1) 中山朝陽, 二瓶泰雄：出水時複断面河道における横断方向水位変動特性の検討, 土木学会論文集 B1(水工学) 69 巻, 4 号, 733-738 頁, 2013.
2) 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, 土木学会論文集 B1(水工学), 67 巻, 4 号, 511-516 頁, 2011.
3) 星野剛, 斉藤充紀, 安田浩保：粒子フィルタを導入した河道網の水理解析, 土木学会論文集 B1(水工学), 73 巻, 4 号, 661-666 頁, 2017.