

随伴変数法による水位縦断分布のリアルタイム予測に関する研究 (その2)

REAL-TIME WATER LEVEL PREDICTION USING ADJOINT SENSITIVITY ANALYSIS (2)

西口亮太¹・壇 鉄也²・泉 典洋³

Ryota NISHIGUCHI, Tetsuya DAN and Norihiro Izumi

¹正会員 工修 日本工営株式会社 (〒 102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)

²正会員 日本工営株式会社 (〒 102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6)

³正会員 工博 北海道大学教授 環境フィールド工学専攻 (〒 060-8628 札幌市北区十三条西 8 丁目)

For real-time prediction of river water level, a numerical method of adjoint sensitivity analysis in river flow simulation was studied. First, a numerical method of river water level prediction with the one-dimensional unsteady river flow model is presented. The model's initial condition, water level and discharge of all the model grids, is obtained by data assimilation using adjoint sensitivity analysis. Next, the model verification was carried out on the actual flood event of the Tama River. As a result, this method provided practically sufficient accuracy in 1 hour predicted water level prediction. Furthermore, the prediction performance was compared by the different prediction conditions of number of water gauge, assimilation time period and upstream boundary condition. As one of the results, this method was confirmed to be able to predict the water level within propagation time of flood even in the absence of the predicted discharge.

Key Words: *Adjoint Sensitivity Analysis, Real-Time Simulation, Water Level Prediction, Data Assimilation*

1. はじめに

気象の数値予報では、予測更新前の時間帯の再現解析を反復して、観測値と解析値との差を最小化するように初期条件を調整する「客観解析」が、予報業務の重要なルーティンとして行われている¹⁾。こうして最適化された(スーパーコンピュータ上の)気象場から予測を始めることで、予測精度の確保を図っている。

一方、現業における河川の水位予測では、実測・予測降雨波形を斜面モデルで流量波形に換算し、これを比較的簡易な数値モデルで表現した河道モデルに入力して洪水追跡を行うケースが多い。つまり、実質的には流量予測で、水位は流量の従属変数の扱いとなっている。また、予測流量の初期値を同時刻の観測流量で置換するものの、それに見合う予測モデルの状態量を更新してはいないケースも見受けられる。

こうした中、福岡^{例え2)}の提唱を契機として、水面形の時間変化を科学的に分析することにより、当該河川の洪水時における水および底質の動態が明らかとなり、引いては、(水位予測を含む)広範な河川管理に活用できるようになることが認識されるようになってい

る。また、昨今、水害に対する危機管理の施策として、水位観測の拡充が図られようとしている。つまり、上記の提言を踏まえた河川管理を実現する環境が徐々に整いつつある。

多点観測水位の分析を行ううえでの基礎となる「データ同化」に関する河川工学での研究実績としては、粒子フィルタを用いる立川ら³⁾、星野ら⁴⁾の研究や DIEX 法を拡張した柏田ら⁵⁾の研究などがある。これらは流量を既知量として、ある時点の水面形を再現するためのモデルパラメータを推定するものとなっており、データ同化手法の類型としては最適内挿法に当たる。一方、後藤ら⁶⁾、吉田ら^{8),9)}や渡邊ら^{10),11)}の研究では、水面形の時間変化からモデルパラメータと流量他の状態量を逆推定している。つまり、水位の時刻歴も踏まえたデータ同化が行われている。とくに後二者の研究では、冒頭に記した気象予測でも採用されている随伴変数法によるデータ同化が行われている。

著者ら¹²⁾もまた、表題のように、水位の縦断分布の予測に活用すべく、随伴変数法を用いたデータ同化について検討を行っている。この序として、前回の報

告では、演算規模に鑑みて、現業への実践展開が比較的容易と考えられる1次元不定流モデルを予測モデルに選び、これに随伴変数法を適用するための方程式である「随伴方程式」を導出した。さらに、所定の境界条件のもとでの解析値を観測値に置き換えて境界条件を逆推定する双子実験を行ったうえで、実験水路あるいは実河川の斉時観測水位を用いたデータ同化を試行して手法の適用性を確認した。なお、本研究では、予測の更新を迅速に行うため、モデルパラメータの同定を省略している。また、現実的に即時の河道形状が取得し難い事に鑑みて、河床変動解析を省略している。

本文はこれの続報である。以下では、データ同化で得られる水位・流量の縦断分布を初期値とする水面形の実時間予測の手法を提案し、これを実河川の実績出水に適用して予測の模擬実験を行う。さらに、予測の仕様を変更した場合の結果と比較して、予測性能の分析を行う。

2. 予測手法

観測水位の集信と同期して、その都度、データ同化を行って、観測実績を概ね再現する流れ場(河積および流量の時空間分布)を生成したうえで、予測演算を行う。

ここでの予測のイメージを図-1に示す。図中、ハッチングを施した時刻・場所では、データ同化により既に計算されている時間帯の洪水波が変形を受けつつ遅れて通過するため、側方から大規模な流入がなく、下流の水位変動の影響があまりない区間では、高精度の水位予測が期待できる。なお、その予測精度はデータ同化の精度に依存するため、データ同化により尤度の高い流れ場を生成することが重要である。

(1) データ同化

随伴変数法による河川水位のデータ同化は次の手順で行う。

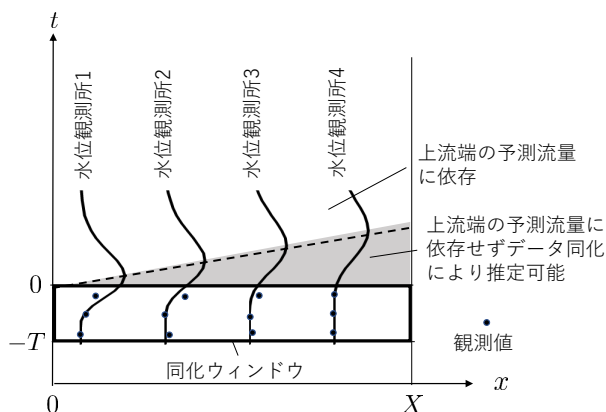


図-1 模式図

0. 予測区間内 $[0, X]$ の最新(時間 $t = 0$) の観測水位のデータセットを追加し($t < -T$ の観測水位のデータセットを除外し)、直前のデータ同化時の流れ場を初期値として計算を開始する。

1. 仮の初期条件・境界条件のもとで、(2) 式の離散化方程式を解いて、仮の流れ場を求める。
2. 仮の流れ場で、(4) 式の離散化方程式を解いて、随伴変数を求める。
3. (6) 式の感度係数を用いて、非線形計画法(ここでは、共役勾配法を採用)により、(1) 式の評価関数の総和が最小となる方向で初期条件・境界条件を更新する。
4. 収束の判定を行い、未然の場合は1.以降の計算を再度行う。

a) 評価関数

全観測所とも水位観測の精度に相違がないものと仮定して、同化ウィンドウ内のデータミスフィットの評価関数 f を次式で与える。

$$f(x, t) = \frac{w(x, t)}{2} (A(x, t) - A_{\text{obs}}(x, t))^2 \quad (1)$$

ここに、 x : 空間座標 ($0 \leq x \leq X$)、 t : 時間座標 ($-T \leq t \leq 0$)、 A_{obs} : 観測水位より計算した河積、 w : 座標 (x, t) で有意な観測水位がある場合1、それ以外で0を返す関数。

b) 流れの基礎方程式

先述の通り、1次元不定流モデルを流れの基礎方程式とする。抵抗則は Manning のそれを適用する。

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ g_2 &= \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial H}{\partial x} + i_e \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 Q : 流量、 A : 河積、 H : 水位、 g : 重力加速度、 i_e : 摩擦勾配である。

ここでは、常流の流れ場を想定して、初期条件・境界条件は以下で与える。これらを最適化することで間接的に流れ場が最適化される。

$$\begin{aligned} A(x, -T) &= A_0(x), \quad Q(x, -T) = Q_0(x) \\ A(X, t) &= A_B(t), \quad Q(0, t) = Q_B(t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 A_0, Q_0 : 河積・流量の初期条件、 A_B : 下流端の河積の境界条件、 Q_B : 上流端の流量の境界条件、である。

c) 随伴方程式

(2) 式の制約条件下で随伴変数法を適用するための必要条件となる随伴方程式は次式で与える。ただし、上流端の河積に対する変分 $\delta A(0, t)$ および下流端の流量

に対するそれ $\delta Q(X, t)$ は、評価関数への寄与が僅少であると仮定して、ゼロとおいた。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} + \left(\frac{gA}{B} - \frac{Q^2}{A^2} \right) \frac{\partial \lambda_2}{\partial x} + g \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} - i_e \right) \lambda_2 \\ = w (A - A_{\text{obs}}) \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_1}{\partial x} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial \lambda_2}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 λ_1, λ_2 : 随伴変数、 B : 水面幅、 z_b : 河床高である。

上式に対しては次の境界条件を課す。 $t = 0$ の条件が与えられるので、(4) 式は時間的に退行して解くことになる。

$$\begin{aligned} \lambda_1(x, 0) = \lambda_2(x, 0) = \lambda_2(0, t) = 0 \\ \lambda_1(X, t) + \frac{2Q(X, t)}{A(X, t)} \lambda_2(X, t) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

d) 感度係数

初期条件および境界条件の感度係数は以下で計算される。収束した段階では、これら全てがゼロになる。

$$\begin{aligned} \frac{\delta L}{\delta A_0(x)} &= -\lambda_1(x, -T) \\ \frac{\delta L}{\delta Q_0(x)} &= -\lambda_2(x, -T) \\ \frac{\delta L}{\delta Q_B(t)} &= -\left\{ \lambda_1(0, t) + 2\lambda_2(0, t) \left(\frac{Q(0, t)}{A(0, t)} \right) \right\} \\ \frac{\delta L}{\delta A_B(t)} &= \lambda_2(X, t) \left\{ \frac{gA(X, t)}{B(X, t)} - \left(\frac{Q(X, t)}{A(X, t)} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 δL : ラグランジュ関数 ($L = f + \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2$) の第一変分、 $\delta A_0, \delta Q_0, \delta Q_B, \delta A_B$: それぞれ、河積の初期条件、流量の初期条件、下流端の河積、上流端の流量の変分。

(2) 予 測

$t = 0$ の流れ場を (2) 式で時間発展させる。ただし、 $t > 0$ の上流端の流量は別途実施する流出予測、下流端の水位は潮位予測より与える。

3. 実河川での適用

(1) 概 要

多摩川の下流 29 km を検討対象とした。この区間に大規模な支川流入がないこと、河口で潮位観測が行われている他、石原、玉川および田園調布の 3 地点で水位観測が行われていることが選定理由である。

検討対象の出水は、過去 10 年間で最も規模が大きい 2007 年 (平成 19 年) 9 月の台風 9 号のイベントを選んだ。

データ同化にあたり、下流端水位は最適化の対象から除外して、観測値 (図-3) そのものを与えた。同化



図-2 計算範囲位置図

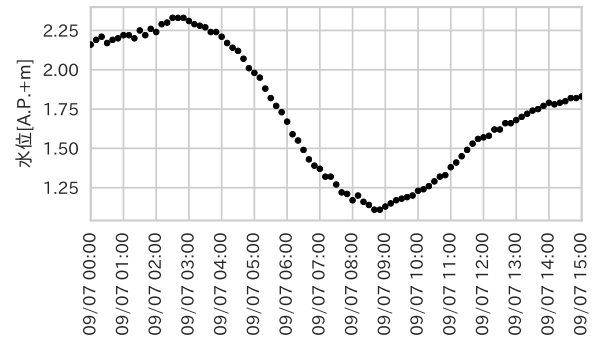


図-3 多摩川河口地点の水位

ウィンドウの時間サイズは、対象区間の洪水到達時間に若干の余裕を見て 2 時間とした。したがって、観測データの更新間隔である 10 分毎に 3 地点、13 時点の観測水位を用いて、データ同化を行うこととした。

不定流計算の時間刻み、距離刻みはそれぞれ 2 秒、約 200m (横断測量間隔) で与えた。Manning の粗度係数は、石原地点のピーク流量 ($3,845 \text{ m}^3/\text{s}$) 流下時の不等流計算の結果を参考に、0.025 で与えた。なお、この区間には、二ヶ領上河原堰、二ヶ領宿河原堰、調布取水堰の 3 つの可動堰が存在するが、検討対象とした時間帯では何れも全開状態と想定されるため、堰操作は考慮していない。

今回、流出予測は行っていないので、上流端の予測流量は石原の実績水位から水位流量曲線式で換算した数値で代用した。同地点の水位流量曲線式はデータ同化で得られる水位・流量のヒステリシスとほぼ一致することが、既報¹²⁾ で確認されている。つまり、以下では石原において良好な流出予測結果が得られることを想定して検討した。

(2) 計算結果

まず、毎正時のデータ同化の状況は図-4 のようである。3 地点の同化ウィンドウの水位の RMSE (Root Mean Squared Error) は、石原 35.4 cm、玉川 9.4 cm、田園調布 22.1 cm となっている。ここでは、全地点のデータミスマスを最小化するように境界条件を最適化してい

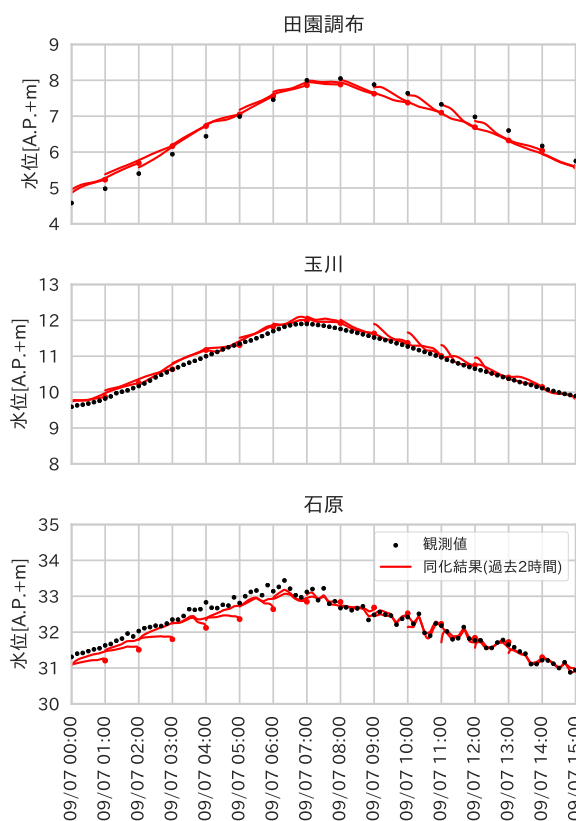


図-4 データ同化の状況

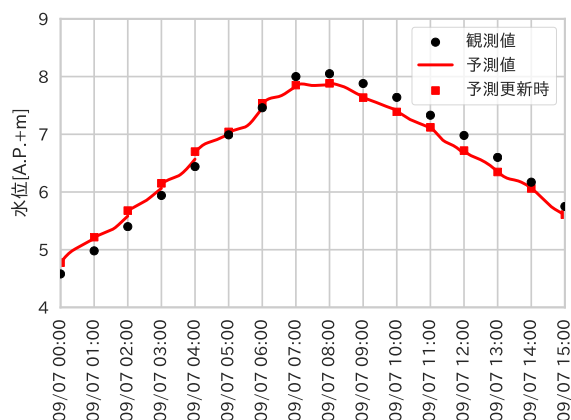


図-5 予測水位 (田園調布)

るので、何れの地点でも観測水位に合致という結果にはならない。これに関して、河道モデルの改善の余地はあるが、そのためにも水位の観測密度を高めることが望まれる。

次に、3地点を代表して、最下流の田園調布の毎正時の1時間後までの予測結果を図-5に示す。1時間後の予測水位と観測水位の差異は、20cm以内であり、高々、3地点でのデータ同化の結果であることを考え合わせると、良好な結果であると判断される。

ちなみに、ここでの解析領域 (29 km) に対する、前記一連の手順に要する時間はシングルスレッド (Intel® Core™ i7-3770 プロセッサ動作周波数 3.40 GHz) で3～5分であった。

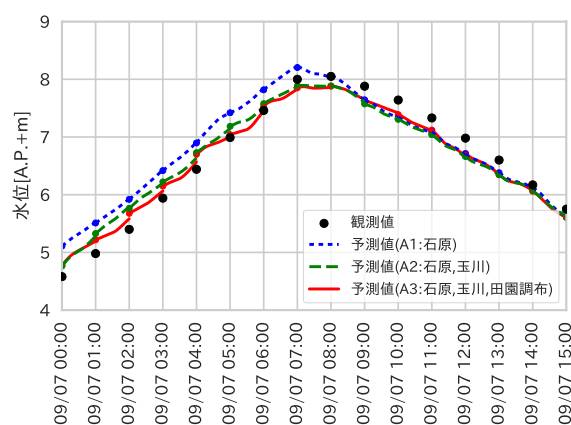


図-6 観測地点数が相違する予測水位の比較 (田園調布)

(3) 予測条件の比較検討

前節で記した条件を基本として、データ同化の条件あるいは予測条件を変更した場合の予測について比較した。

a) 観測地点数

データ同化の評価対象とする観測所数の多少による予測精度への影響を検討した。計算ケースは以下とした。ケース A3 は前節で示したケースである。

ケース A1 1地点 (石原)

ケース A2 2地点 (石原・玉川)

ケース A3 3地点 (石原・玉川・田園調布)

各ケースの毎正時の予測水位は図-6の通りであり、観測地点の数が多いほうが予測精度が高いことが確認できる。さらに、表-1は各ケースの同化ウインドウ内の水位の RMSE を比較したものである。ケース A2 とケース A3 については差異が少ないが、石原に関しては他の観測所が加わると RMSE が大きくなっている。図-4を見ると、石原の水位波形は他の観測所のそれに比べて、単周期の成分が多く含まれている。このような観測値の性質が、予測精度に影響すると推察される。

b) 同化ウインドウの時間サイズ

同化ウインドウの時間サイズによる予測値への影響を次の2ケースで比較した。

ケース B1 2時間

ケース B2 4時間

両ケースの毎正時の予測水位は、図-7に示す通りである。時間が長いケース B2 の方が、水位上昇期では精

表-1 同化ウインドウ内の水位の RMSE(m)

ケース	石 原	玉 川	田園調布
A1	0.034	0.256	0.369
A2	0.290	0.122	0.272
A3	0.354	0.094	0.221

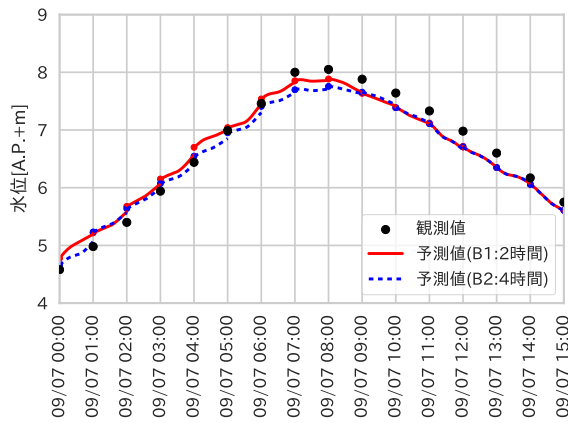


図-7 同化ウィンドウが相違する予測水位の比較 (田園調布)

度が向上しているが、ピーク付近では精度が低下している。統計的には、仕様するデータセットの数が多いほど、精度の高い結果が得られると考えられるが、必ずしもそうはなっていない。データ同化の今ひとつの代表であるカルマンフィルタでは不完全な予報誤差の情報を延々と引き継いでいくのに対して、随伴変数法ではモデルの誤差を同化ウィンドウを越えて引き継ぐことはない。この結果はこれの証左と考えられる。

同化ウィンドウの時間サイズは期待する先行時間と数理モデルの質を考え合わせて設定する必要がある。

c) 上流端流量

ここまでは、上流端で予測流量を与えることを前提条件としていたが、予測流量が得られない条件下での予測について比較した。計算ケースは以下とした。

ケース C1 予測更新時の流量で固定

ケース C2 予測流量を入力

両ケースの毎正時の予測水位を図-8に示す。両ケースの予測水位の線分が分岐する時間が上流端からの洪水波の伝播時間に対応している。上流端から17km下流に位置する田園調布の場合、予測更新の概ね30分後にこれが生じている。計算結果に潮位の影響は見取れないので、上流端流量が与えられない場合でも、この程度の時間は比較的精度が保証された先行時間として稼げることになる。

ところで、今回は河口までを計算領域としている。参考として、観測情報が無いため、実測との比較は不能であるが、田園調布より約7km下流の川崎駅最寄りの6.2k地点(図-2参照)について、同様の計算結果を示したものが図-9である。同図より、ここでは予測流量を必要とせず、約1時間先までの水位予測が可能なものとなっている。

4. 結 論

本文では、随伴変数法による水位縦断分布の予測方法を提示し、多摩川の下流29km区間を検討対象とし

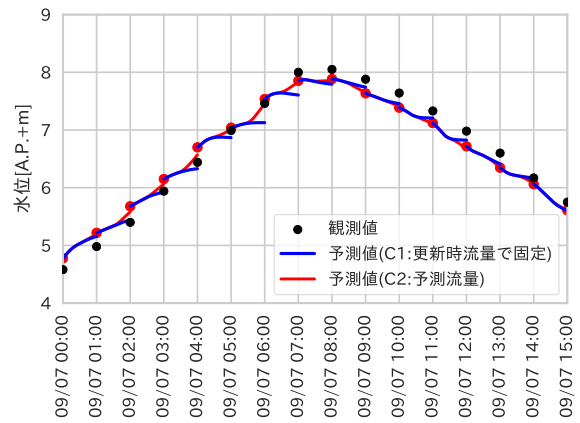


図-8 上流端流量が相違する予測水位の比較 (田園調布)

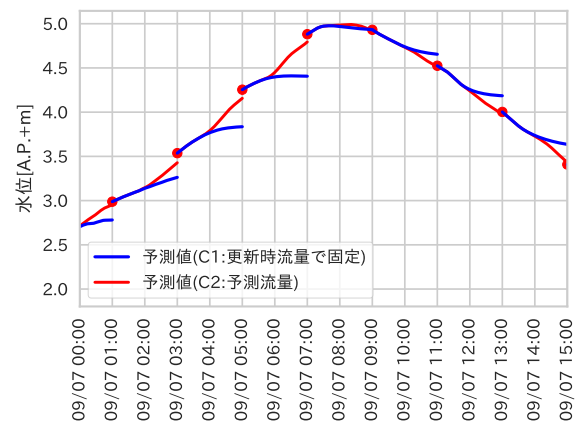


図-9 上流端流量が相違する予測水位の比較 (川崎駅付近)

て、近年で最も規模の大きい2007年9月の出水時の水位予測の模擬実験を行った。もって得られた成果は以下のとおりである。

- 提案した予測手法で概ね観測水位と合致する予測水位が推定できることが確認された。
- データ同化に用いる観測点が多いほど高精度な予測値が得られることが確認された。今回は既設観測所のデータで分析を行ったが、さらなる水位観測の高密度化は予測精度の向上に寄与する可能性が高い。これは、水理モデルの精度を高めるためにも有用である。ただし、観測の質に差があると、予測精度を左右するので注意が必要である。
- 同化ウィンドウの時間サイズは長ければ良い、というのではなく、徒に過去の大きなモデル誤差を継承しないことがデータ同化の質を高める。この点は随伴変数法の利点である。
- 良質な流出予測の結果が得られることが先ず肝要であるが、データ同化を行うことによって、一定の時間までは流出予測に依存せずに高精度な水位予測を行うことが可能である。また、今回のように、予測時点での上流端流量を固定した予測計算を別途実行することで、臨時の洪水伝播時間を把握することが可能である。

また、今後の課題としては以下が挙げられる。

- 上記のように、観測データの精度水準はデータ同化の成否を左右する。したがって、データ同化に先立つ、データの品質管理の基準を検討すること必要である。
- 今回はデータ同化に要する時間を短縮することを優先して、Manning の粗度係数を固定値とした。何度かに一回、これも加えたデータ同化を行う、といった対処でモデル誤差を減少させる可能性がある。ただし、この場合には、同定されたパラメータの値、あるいはその挙動が不合理なものとならないよう、確認したうえで適用すること必要である。
- 今回の検討では、支川からの大きな流入がない解析区間を選んで検討を行った。この前提を外せば、より長い区間の水位予測に適用可能となり、防災上、有用である。側方流入がある流れ場での解析事例を加えて、予測モデルを汎用化することが必要である。

謝辞：本研究で用いた河川測量成果および水位データは国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所より提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁 報道発表資料: 全球数値予報モデルの改善について～高度な初期値解析手法「4次元変分法」の導入～, <http://www.jma.go.jp/jma/press/0502/16a/4jigen.pdf>, 2005.
- 2) 福岡捷二: 洪水流の水面計観測の意義と水面計に基づく河川維持管理技術, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.1-6, 2006.
- 3) 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) Vol.67, No.4, pp.I.511-I.516, 2011.
- 4) 星野剛・齊藤充紀・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) Vol.73, No.4, pp.I.661-I.666, 2017.
- 5) 柏田仁・二瓶泰雄: 一次元不定流解析のための新たな水位同化手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I.595-I.600, 2017.
- 6) 後藤岳久・柴田亮・山本浩之・廣野太志・福岡捷二: 多点水位計測システムを用いたリアルタイム水面形・流量推算手法, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.257-262, 2017.
- 7) 吉田圭介・石川忠晴: 変分法と浅水流モデルを併用した河床粗度の逆推定法に関する研究, 水工学論文集 54 号, pp.991-996, 2010.
- 8) 吉田圭介・石川忠晴: Adjoint 法による流量ハイドログラフ推定法に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.68, No.4, pp.I.1264-I.1266, 2012.
- 9) Yoshida, Keisuke and Ishikawa, Tadaharu: Flood hydrograph estimation using an adjoint shallow-water model, Journal of Hydro-environment Research, vol.9-3, pp.429-440, 2015.
- 10) 渡邊明英・見上哲章・小島崇・松延和彦・鈴木裕三・富澤慎二郎: 平面二次元流解析とアジョイント法に基づいた点観測の水位情報に対する縦断水面形時間変化の同化手法の検討, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.197-202, 2017.
- 11) 渡邊明英・見上哲章・小島崇・松延和彦・鈴木裕三: 不確実な入力条件に対する河川縦断水面形の同化解析推定量とその分布, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, pp.I.727-I.732, 2018.
- 12) 西口亮太・壇鉄也: 随伴変数法による水位縦断分布のリアルタイム予測に関する研究, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.275-280, 2017.

(2018.4.3 受付)