

# 河川砂防技術研究開発

## 【成果概要】

|   |                    |  |                                      |       |    |
|---|--------------------|--|--------------------------------------|-------|----|
| ①研究代表者  | 氏名 (ふりがな)          |  | 所属                                   |       | 役職 |
|   | わたなべ あきひで<br>渡邊 明英 |  | 株式会社 東京建設コンサルタント<br>環境防災事業本部 環境防災研究所 |       | 所長 |
| ②研究<br>テーマ  | 名称                 | 水理解析と水位観測データ同化技術を組み合わせた河川縦断水位及び越水氾濫危険度の把握・予測手法の開発    |                                      |       |    |
|   | 政策<br>領域           | [分野] 河川技術分野  | 融合<br>技術                             |       |    |
|   |                    | [公募課題] 洪水時の水理現象を把握するための水理解析及び観測の高度化に関する技術研究開発「(A)解析」 |                                      |       |    |
| ③研究経費 (単位: 万円)  | 平成28年度             | 平成29年度   | 平成 年度                                | 総 合 計 |    |
|   | 1,112              | 842  |                                      | 1,954 |    |
| ※端数切り捨て。  |                    |  |                                      |       |    |
| ④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)  |                    |  |                                      |       |    |
| 氏 名   |                    | 所属・役職 (※平成30年3月31日現在)                                |                                      |       |    |
| 小島 崇  |                    | (株)東京建設コンサルタント・主任技師                                  |                                      |       |    |
| 見上 哲章   |                    | (株)東京建設コンサルタント・主任技師補                                 |                                      |       |    |
| 松延 和彦   |                    | (株)東京建設コンサルタント・技師                                    |                                      |       |    |
| 鈴木 裕三   |                    | 朝日航洋株式会社・主任技師  |                                      |       |    |
| 富澤 慎二郎  |                    | 朝日航洋株式会社・主任技師  |                                      |       |    |
| 鈴木 英夫   |                    | 朝日航洋株式会社・主任技師  |                                      |       |    |
| ⑤研究の目的・目標 (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)  |                    |  |                                      |       |    |
| 【研究の目的】   |                    |  |                                      |       |    |
| 本研究は、水位観測データと水理解析を応用して河川縦断水面形の時間変化を同化解析から推定し、さらに将来の水面形を予測して、洪水被害軽減に資する技術開発を目指すものであり、以下の4つの技術項目から構成される。  |                    |  |                                      |       |    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>河道地形や樹木群等の計測及び解析手法に関する研究開発と水理解析モデルの構築</li> <li>アジョイント法に基づく観測水位データの同化技術の研究開発と妥当性の検証</li> <li>河床変動モデルの構築と画像解析を応用した表面河床材料の判別及び CCTV の活用に関する研究開発</li> <li>同化解析値に対する将来水位予測への拡張方法に関する研究</li> </ul> |                    |  |                                      |       |    |
| 【研究の目標】   |                    |  |                                      |       |    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>(H28年度) 観測水位と整合のとれた水面形を精度良く推定する技術を開発する。</li> <li>(H29年度) 上流側の水位の伝播情報から数時間先までの水面形を予測する。</li> </ul>  |                    |  |                                      |       |    |

## ⑥研究成果

(様式 A-11と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### 【検討対象区間】

同化解析技術の開発に対する検証対象は図-1に示す縦断的に水位が観測されている利根川上流区間(133km～151km)であり、検証洪水は、H19年9月出水、H23年9月出水、H27年9月出水、H29年10月出水である。河道形状や樹木群を解析に反映することが重要であることから、H28年度にALBを用いた地形及び植生状況の計測を実施した。水位観測密度のデータ同化への影響を検討するため、対象区間内の6箇所簡易水位計を新たに設置し、H30年10月出水時に水位観測データを得た。



図-1 対象河川と区間

### 【H28年度：ALBによる面的な河道地形と樹木分布の計測と解析】

ALB計測結果(図-2)から水面下を含む地盤高が良好に計測されている。水深が2mを超えるような図-2灰色で示した地点で欠損が確認された。この欠損は対象エリアの約2%であった。定期横断測量結果(H24)と比較したところ、低水路内の地盤高は±0.3m程度であった。ALBにより、水理解析に必要な緻密な河道の形状と図-3に示す樹木・草本類の分布データを設定可能になった。

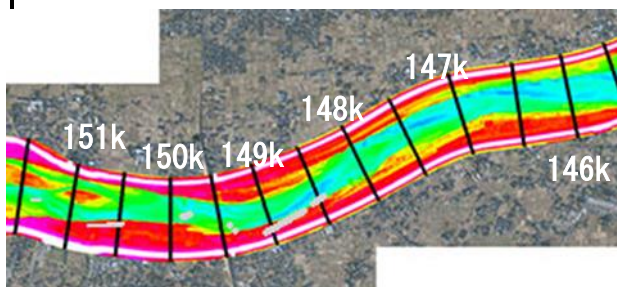


図-2 ALB計測結果(地盤高)と欠損位置

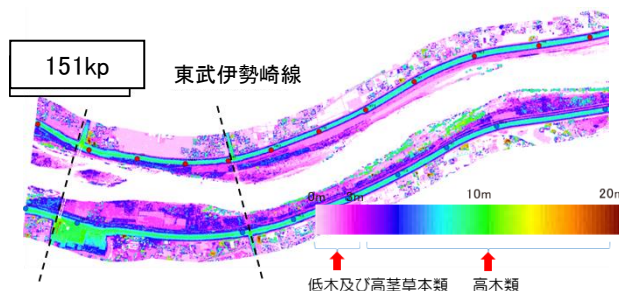


図-3 樹木及び草本の分布と高さ(146km～151km)

### 【H28年度：アジョイント法に基づく観測水位データの同化技術の研究開発】

対象区間において、平面二次元一般座標系流れモデルを利用し、観測水面形の時間変化に合致する流況解析結果が得られるかどうかを検証した。平成23年9月(台風15号)洪水に対して、開発したアジョイントモデルを適用し、観測水位の再現検証を行った。川俣と136.5kmの解析結果と観測水位の比較を図-4に示す。また、図-4 A(9/22 0時)、B(9/22 2時)、C(9/22 12時)の時点での縦断水面形を図-5に示す。計算の1回目では、上流端に川俣のHQ換算流量を与えているため、川俣の水位で遅れと低減時に差が大きく出ている。アジョイント法により上流端流量ハイドロ及び粗度係数を修正することで観測値に近づき、図-6に示すように5回程度で収束している。図-7には、同化中の粗度・透過係数の変化を示している。また、図-5の縦断水面形の変化の様子からも、洪水時の縦断水面形の同定が概ね妥当な結果であったと考えられる。

## ⑥研究成果 (つづき)

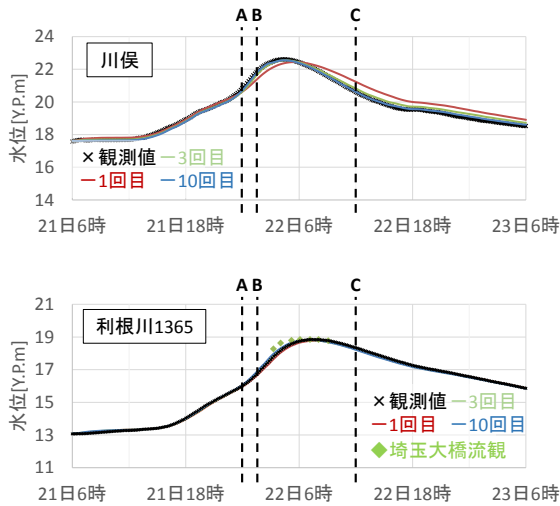


図-4 観測水位と計算水位の比較

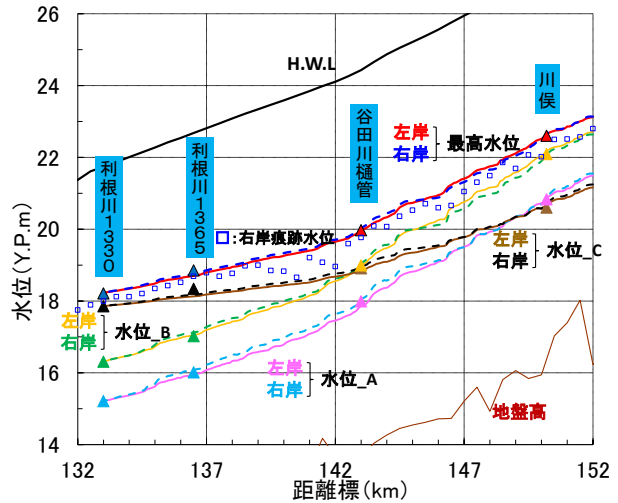


図-5 観測水位と同化水位の縦断分布(H23.9出水)

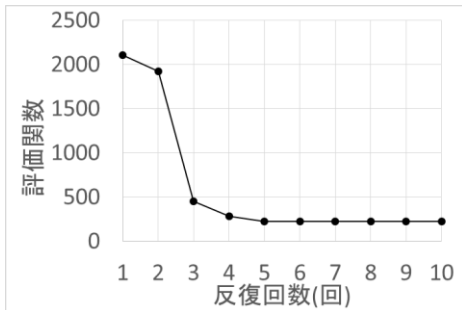


図-6 評価関数の収束状況

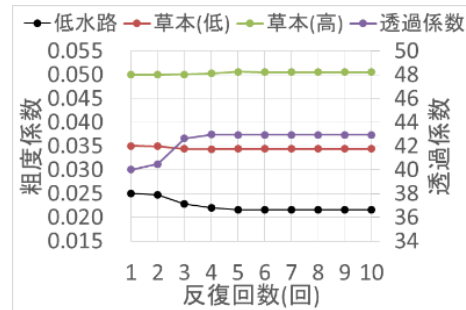


図-7 推定された粗度係数・透過係数の変化

### 【\*H29年10月出水による追加検討】

H29年台風21号では多くの観測地点で水位データを取得することができたため、観測地点数やデータの空間密度が河川水位のデータ同化に果たす役割について検討を行った。図-8に縦断水面形の時間変化を示す。図-5で間の空いていた148km-143km,143km-137kmの区間も再現できている。同化に用いる水位観測点数と解析から得られた推定値(抵抗特性値)の関係を図-9に示す。これまでの解析から明らかなように観測地点数が少なくても縦断水面形の同化は可能であるが、推定される流量は一つの値に定まらないという課題があった。図-9から明らかなように対象区間内部の観測値点数が増加するにしたがって、同化解析の過程で収束した流量を含む推定値の組み合わせが収斂していく現象が見られた。

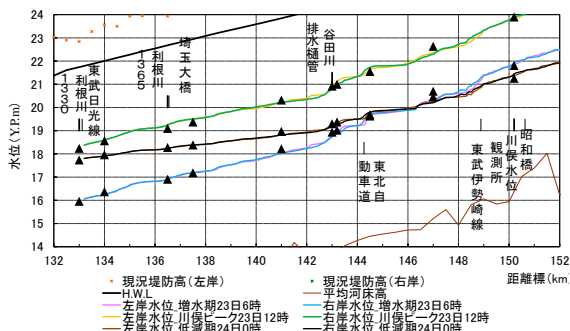


図-8 縦断水面形の時間変化(平成29年台風21号)

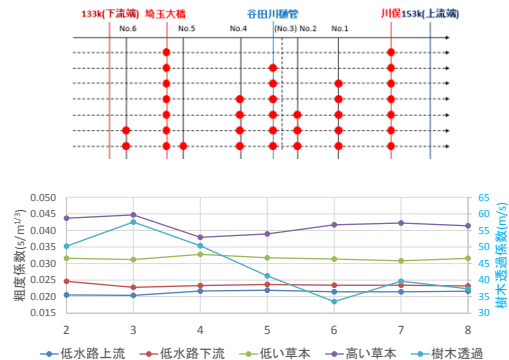


図-9 水位観測地点数と推定パラメータの関係

## ⑥研究成果 (つづき)

### 【H29年度：河床変動が水面形同化に及ぼす影響の検討】

掃流砂河床変動モデルを作成し、平成19年9月台風7号(川俣ピーク流量9300m<sup>3</sup>/s)に対して、河床変動解析を伴う水面形同化を検証した。図-10に定期横断測量(H20)の低水路平均河床高と洪水後の計算河床高 (Case2) を示す。縦断的な堆積・洗堀の分布はおおむね再現されているが、大きな河床変動は生じていない。縦断水面形への影響を図-11に示す。河床変動を伴う水面形同化解析Case3と伴わないCase1を比較すると、上昇期において同化される水面形に違いが見られ、河床変動を考慮した方が観測結果と近づいていた。本出水では縦断的な大きな河床高の変化が見られなかったため、今後、土砂動態の大きい河川を対象に検証することが望ましい。

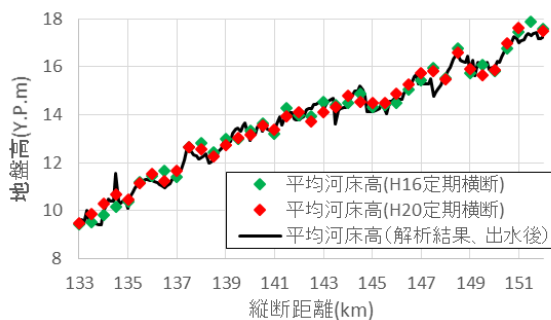


図-10 低水路平均河床高の縦断変化(H19 出水)

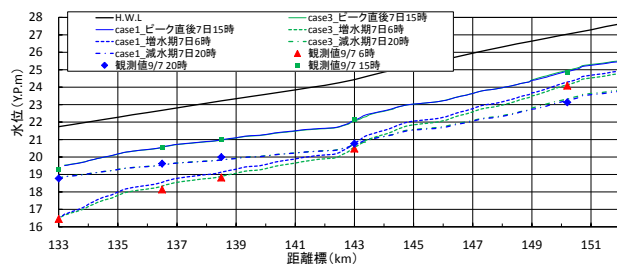


図-11 縦断水面形時間変化の同化結果(河床変動：有無)

### 【H29年度：表面河床材料の判別とCCTV等画像データを活用した水位データの取得】

リモートセンシング技術による水面下を含む表面河床材料の面的分布等特性を把握する方法を検討した。画像鮮明化で暗部や水中部の河床材料が判り易くなるが、地上解像度が4.2cmと大きいため、砂・礫の区別はできなかった。各箇所レーザー反射強度の平均値を求め、河床材料の種類ごとに閾値を設定した結果、砂礫・裸地・草本・水部は分類できた。反射強度のバラツキ具合に注目し、標準偏差から砂と礫を分類できることを明らかにした。

水位はCCTV画像を2値化して水面境界を判読し、画像上の位置座標とALBによる三次元地形モデルから標高値を得る方法では、CCTVカメラを橋脚等の構造物に向ける必要がなく、地形3Dデータがあれば、どの地点でも水位観測が可能である。平成29年10月台風21号洪水の埼玉大橋CCTVカメラ画像に対してカメラ姿勢のずれと水面奥行を補正した結果、計算値と観測値の間の差が0.5m～1mに収まった。現カメラの特性上、精度が距離に依存するため、100m程度の範囲で使用するならば、精度を20～30cm程度には抑えることができるものと考えられる。

### 【H29年度：解析区間の延伸と水位予測モデルの構築】

対象区間から上流側に延伸し、上流から伝播する同化済み情報平面から二次元モデルによって数時間先までの左右岸水面形の予測手法を図-12に示す。延伸対象区間は八斗島～133kmの約50kmである。同区間には広瀬川、石田川、早川、小山川の流入があり、これらを考慮した準二次元不定流モデルをベースにしたアジョイントモデルを構築した。流入区間には水位計がなく未知数の量を減らすため石田川・早川・小山川はまとめて早川の合流地点に流入させた。

平成29年台風21号を対象とした古戸および川俣観測所における水位同化結果を図-13に示す。川俣では比較的良好に同化している一方、古戸ではミスフィットが残っている。データ同化の問題点として、支川合流区間に水位計がないと横流入量が不定となる。精度良い水面形同化を行うためには影響する支川が流入する区間で水位データを取得することが必要である。

## ⑥研究成果 (つづき)

次に、左右岸水面形の予測モデルを検証した。本計算では予測時間を2時間とした。準二次元解析の誤差については、平面二次元モデルに予測値として入力する際に現時刻の実測水位と整合するように補正した。平面二次元計算に関しては、予測計算により得られた水位と実観測水位の値が比較的良く一致している。増水期、ピーク付近、低減期について、予測開始から2時間後の観測水位と左岸側の予測縦断面水面形を図-15に示す。

### 【本研究のまとめ】

- 1) ALB 計測では水深 2m までの地形が計測できた。水中部の誤差は標準偏差で 0.3m 程度であった。レーザー測量から、植生の範囲分布や高さの分類、平面的な抵抗特性のマッピングが容易になった。レーザーの反射強度のバラツキ具合に注目することで、礫と砂の判別は判別可能であることが示された。
- 2) 平面 2 次元流解析を適用して空間的に粗で時間的に密な観測水位から水面形時間変化を同化するモデルを構築すると共に河床変動の影響を検討した。利根川対象区間のように流れが緩やかで河床変動が小さい河川では構築した同化モデルで縦断面水面形の時間変化を十分再現できることを示した。
- 3) アジョイント法に基づく 5-10 数回の演算により、観測縦断面水面形の時間変化を自動的に再現できた。引継ぎ同化 Window を用いた解析では、8 時間の Window に対して 1 演算 4 分程度であり、制御変数の収束性向上に伴い反復回数が減少したことから、1 時間毎データの同化更新を 30 分程度でできる。
- 4) 推定された粗度係数や流量の信頼性を確かめるために、観測摂動を与えてアンサンブル計算を行った結果、推定された流量や抵抗特性の値のほとんどは平均値に対して  $\pm 5\%$  程度範囲内に分布していた。
- 5) H29 年 10 月台風 21 号の出水データの検証から、同化解析に用いる制御変数の要素数が観測地点数よりも多ければ逆推定される制御変数のパラメータ値が一定値に収斂していくことが示された。
- 6) 八斗島地点(181.5km)まで延伸し平成 29 年台風 21 号を検証した結果、支川合流直後の古戸を除く八斗島付近及び川俣下流区間の同化水位は再現された。二次元解析区間の 2 時間先までの水位を精度良く推定することが示された。

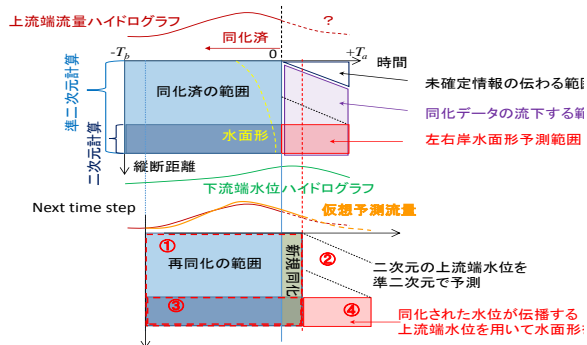


図-12 水面形予測手法と手順

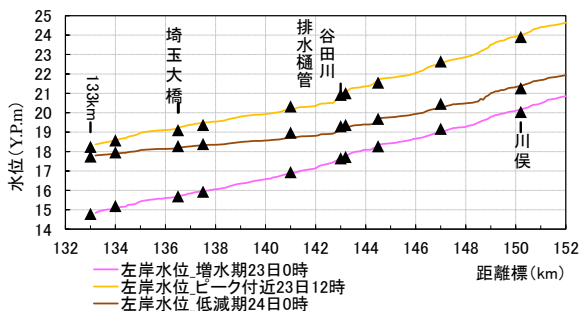


図-15 左岸側予測縦断面水面形及び観測水位(H21年)

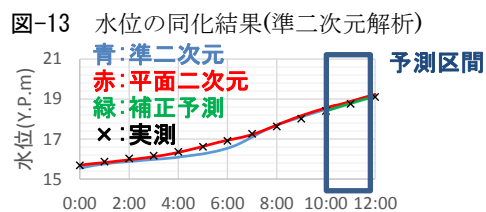
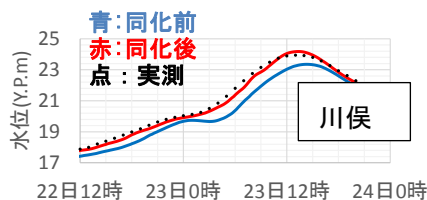
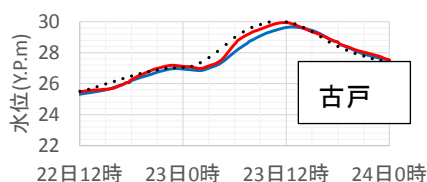


図-14 埼玉大橋水位予測結果 (H29年 10/23 10:00~12:00)

## ⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

・これまでに発表した代表的な論文

- 1) 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.
- 2) 渡邊明英, 鈴木裕三, 見上哲章, 松延和彦: アジョイント法を用いた縦断水面形時間変化の同化解析に対する制御変数の影響土木学会第 72 回年次学術講演会 II-138, pp.275-276, 2017.
- 3) 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 Vol.74, No.4(水工学論文集第 62 巻), I\_727-I\_732, 2018.
- 4) 鈴木裕三, 森本洋一, 角埜嵩文: ALB (航空レーザ測深機) による河床把握に関する検討, 日本写真測量学会平成 29 年度秋季学術講演会, 2017.

### 【投稿予定の論文】

- ・第63回水工学講演会 (2018.11)

・著書 (教科書、学会妙録、講演要旨は除く)

・国際会議、学会等における発表状況

### 【投稿中(二次査読中)】

- 1) Akihide Watanabe, Takashi Kojima, Tetsuaki Mikami, Kazuhiko Matsunobu, Hiromi Suzuta and Shinjiro Tomizawa: Interpolation of water surface profile in unsteady open channel flow using the adjoint method based on 2D shallow water equations, River Flow 2018 conference, 2018.

・主要雑誌・新聞等への成果発表

・学術誌へ投稿中の論文 (掲載が決定しているものに限る)

・究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況

・企業とのタイアップ状況・特許など、知的財産権の取得状況

・技術研究開発成果による受賞、表彰等)

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

### 【新聞記載】 プレス発表

- ・記載内容 : 「朝日航洋 水陸同時に座標計測3D測深機 ヘリ搭載」
- ・新聞名 : 建設通信新聞
- ・掲載日 : 2016年7月22日

## ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

特になし

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

### 【課題】

- ・対象区間の水位を予測するため、水面形の流下遅れ時間に着目し、同化解析モデルを上流まで延伸することで、現在時刻までの縦断水面形の同化と伝播に基づく水面形の将来予測手法を開発した。検討した結果、水位波形に対する上流側流量の影響の伝播速度は(流速+浅水流の波速)程度であり、水位ピークの伝播速度よりも速いことが示されたため、水位ピークの遅れ時間よりも予測できる推定期間は短くなる。このため、同化Windowの期間は短くすることができるが、予測のためには同化区間長を長くとの必要がある。

### 【今後の研究の展望】

- ・縦断水面形の時間変化だけでなく、粗度係数や流量まで精度良く推定するためには多地点の観測水位を得ることが望ましいが明らかになった。このため、効率的な水位計設置方法などには十分検討する必要がある。特に合流や分派がある場合における水位計の設置状況と推定精度についての検討が必要である。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

### 【防災面：危機管理に対する支援】

- ・本研究は、沿川住民に対する水防災情報の見える化を支援することを目的として始められ、上述のような成果を得た。設置される危機管理型水位計の設置密度が高くなれば、将来同化を行う必要がなくなるかも知れない。しかしながら、県管理区間も含めて考えれば支流の水位も分かるようになるので、同化によって水位縦断分布を求め、流量を推定することは予測の観点からも有用であると思われる。

### 【河道計画、河道の維持管理への反映】

- ・本研究で示したように今回開発した同化解析手法は洪水時に河道内で起こっている現象について観測水位を担保にした精度で半自動的に再現することができ、平面二次元流による流況や河床変動状況を把握すると共に植生や地被状態の影響を考察することができる。これらからの得られた解析情報を河川計画や管理に役立てることができると考えられる。
- ・本研究において利用したリモートセンシング手法は、精度を保持したままの省力化という点で優れていたものであった。特に ALB 計測による水面下の河床高を含めた詳細な河道標高データを得る技術により、洪水前後の河道地形など河道計画・維持管理の基本的なデータの取得・蓄積に役立つと考えられる。

### 【洪水危険度情報プラットフォーム】

- ・本研究で対象とした利根川 133k~151k の約 18k 区間において、水面形同化手法の洪水リアルタイム計算を検討した場合、計算に要する時間は十分 1 時間に収まる。このため、洪水危険度情報プラットフォームへの運用は可能と考えられ、洪水時に 1 時間間隔でデータ同化情報を更新しながら、左右岸水面形をリアルタイムで再現・予測可能である。検討区間の ALB(航空レーザー測深機)による緻密な堤防高、堤内地盤高を併せて提供することが可能である。