

利根川上流における ALB 及び水位観測データ密度が水理解析結果に及ぼす影響に関する検討

渡邊 明英¹・松延 和彦²・見上 哲章³・小島 崇¹・鈴田 裕三⁴

¹正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント 環境防災研究所(〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)
E-mail: watanabe-ak@tokencon.co.jp

²正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント 環境防災事業本部(〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

³正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント 環境防災事業本部(〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

⁴正会員 工修 朝日航洋株式会社 防災コンサルタント部(〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-14-4)

河川で生じる水理現象の解明や予測において現地観測は重要であり、観測情報の精度と密度はそれらの結果に大きく影響するが、必要な観測密度に関しては有益な知見が少ない。

利根川上流部において H28 年 ALB 計測結果を用いて地形の計測のデータ密度と解析格子のスケールが水位解析結果に及ぼす影響について検証し、利根川河道では平面二次元流解析に対して 1 点/100m²よりも細かくしても結果は変わらないことを示した。縦断的に密な計測が行われた H29 年 10 月出水データから水面縦断形時間変化に対して必要な水位観測計の数について、また水位観測の空間密度と粗度係数や流量ハイドログラフ等同定値との関係について示す。

Key Words: Tone River, density of observation, water level, ALB, data assimilation

1. はじめに

近年、縦断的に密に設置された河川水位観測値を基に水理現象の解明を行う研究が多くなっている^{1,2,3,4}。検証計算や現象解析・同化解析^{5,6}等において、現地の観測情報は極めて重要であり、特に観測情報の精度と密度はそれらの結果に大きく影響する。水位観測値の精度や誤差が同化解析や同定推定値とその分散に与える影響に関しては、既報⁷において観測値摂動に対するアンサンブル解析を行うことで検討を行っている。

一方、LP に代表される航空測量に加えて、水深と水質の制限を受けるものの ALB^{8,9}により水面下の河床形状を計測可能になっている。さらに UAV 測量と画像解析の活用により砂州・高水敷の形状や植生の状態も安価に把握可能になっている。しかし、河川の水理解析、特に水面形同化に対して水面下の河床形状を含め、どの程度の地形情報密度を用いれば良いのか、また水面形の同化解析や流量同定に対して必要な水位計の空間密度^{3,4}について、河川の特性和規模に依存すると考えられるため既往の検討データだけでは十分ではないと思われる。

著者らは、利根川河道 133km~152km に対して H23 年 9 月出水、H27 年 9 月出水に対して平面二次元洪水流の同

化解析を行っている¹⁰。この研究の中で H28 年にヘリコプターによる低空 ALB から詳細な地形情報を得た。この河道区間内に既設の水位計に加えて 6 基の簡易水位計を臨時に設置し、H29 年 10 月出水において非常に有益な水位観測情報を取得することができ、この河道区間における洪水ハイドログラフの流下変形の過程を捉えた。

本文では、利根川上流部における H28 年 ALB 計測結果から計測情報を間引いて解析格子を作成し、地形のデータ密度が平面二次元流解析の水位解析結果に及ぼす影響を検証した結果について述べる。次いで、縦断的に密な計測が行われた H29 年 10 月出水データから水位計を間引いて水位計の数を変えた 7 パターンのデータに対して同化解析を行い、水面縦断形時間変化の同化解析や流量ハイドログラフの同定に必要な水位観測の空間密度について検討を行った結果について述べる。

2. 計測、観測情報

本研究では利根川 133km~152km の区間を対象とする。図-1 に対象区間と後述する ALB 計測で得られた地盤高および水位計測地点を示す。

本研究では、対象区間の水中部を含む地形情報を適切

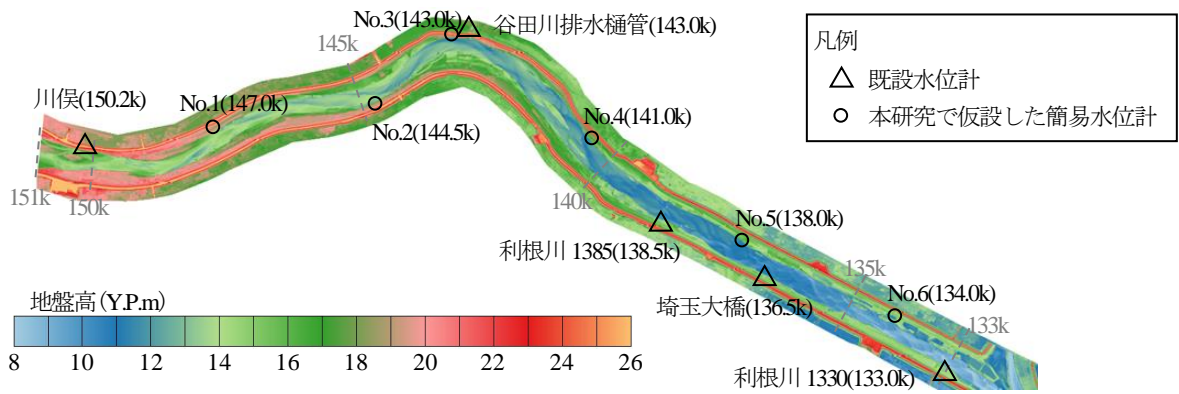


図-1 ALB計測で得られた地盤高と水位計測地点

表-1 ALB計測諸元

項目	陸上部	水中部
レーザ装置	Leica Chiroptera™ II	
対地高度	400m	
レーザ周波数	22.5 万 Hz	3.5 万 Hz
点密度	17.5 点/m ²	2.7 点/m ²

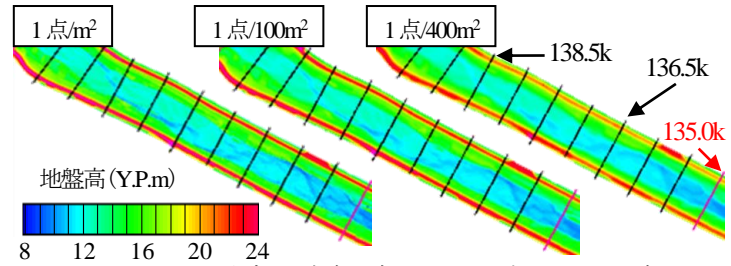


図-2 地形データ密度の違いによる標高コンターの違い

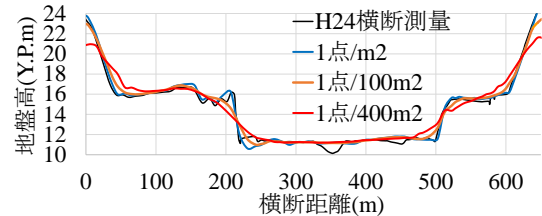


図-3 地形データ密度と計算メッシュ横断形状の関係(136.5k)

に把握するため、ALB を用いた地形計測を実施した。また、対象区間には水位計が4地点設置されている(図-1 中△印)が、空間的に偏りがあることと、同化解析や流量同定に対して必要な水位計の密度の検証を行うにあたり数が十分ではないと考え、簡易水位計(図-1 中○印)を設置し、洪水時の水位データの取得を行った。

(1) ALB計測

本研究では、ヘリコプターを用いたALB(航空レーザー一測量機)によって対象区間の陸上部および水中部の地形を同時に取得した。計測に用いた機材の諸元を表-1に示す。計測はH28年10月21日に実施したが、水深2m以深(対象エリアの約2%)について欠測となった。そのため、透視度が良いH29年2月に再計測を実施し、水深3m程度まで(対象エリアの約99.6%)計測可能であった。計測されたALBのパルスデータからTIN内挿により1m直交直線メッシュ地盤高に整理した結果を図-1に示す。計測された地形とH24年定期横断測量成果と比較して、河道中心(水中)部での差は平均で±0.3m程度で、おおむね地形を計測している事が確認されている。

ALB(水中)計測は、表-1に示した約2.7点/m²の点群データを取得しているが、本検討の利根川区間(133km～152km, 川幅約600m)のように長い区間の縦断水面形の時間変化を推定する場合には、上記よりも粗なデータ密度で作成された地形形状でも十分な精度で水面形を推定可能と考えられる。また、その場合には計算コストも抑えられる。このため、ALB計測のデータ密度と水面形推定値の関係を検討することは重要である。そこで、前述のALBの1mメッシュデータ、すなわち1点/m²のデータを用いた場合(Case1)と10m×10mに1点(=1点/100m²)

(Case2), 20m×20mに1点(=1点/400m²) (Case3)の3ケースについて水理解析に用いる計算メッシュを作成し、解析に与える影響を確認した。本研究では縦断、横断方向に10m程度の解像度の一般座標系による計算メッシュを用いている。計算メッシュ上の点の地盤高は、Case1では前述の1m直交直線メッシュデータ、Case2, Case3ではそれを間引いたメッシュの周囲4点において距離の逆数を重みとした加重平均により算出した。作成した地盤高のコンター図を図-2に示す。図-2からCase1とCase2では、大きく変わっていない。一方、Case2とCase3を比較した場合、滞筋がCase3ではぼやけており、メッシュ解像度に対して用いるデータの解像度が低く、直交直線メッシュのデータに対して平滑化されるためと考えられる。図-3に計算メッシュ作成に用いるデータ密度を変えた場合の横断形状への影響を示す。データ密度を下げた場合には、低水路河岸際でわずかに差が出る程度であった。水理解析結果への影響は後述する。

(2) 水位計測

次に、同化解析や流量同定に対して必要な水位計の密度について検討を行うために、図-1に示した6地点を表-2に示す諸元の簡易水位計を設置した。本研究で得られたH29年10月洪水の水位ハイドログラフを図-4に示

表-2 簡易水位計諸元および計測設定

項目	内容
簡易水位計	S&DLmini
計測時間間隔	1回/1分(瞬間値)
計測範囲	水深0~9m
水位分解能	0.1cm
記録方式	自記式

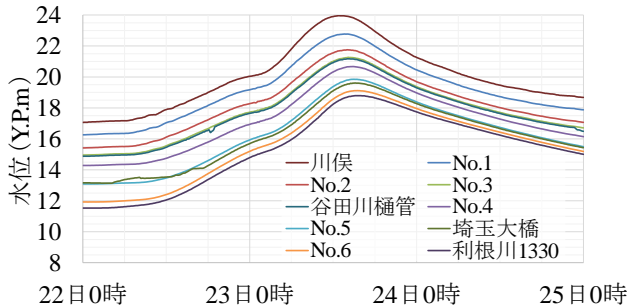


図-4 水位計測結果(H29年10月洪水)

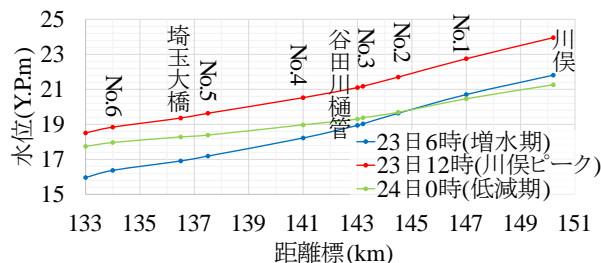


図-5 縦断水面形の時間変化(H29年10月洪水)

す。川俣から 133.0km までの区間で洪水波形が伝播していく様子が観測されている。図-5 に増水期(23日6時)、川俣のピーク時(23日12時)、低減期(24日0時)について縦断水面形の時間変化を示す。水面形は概ね滑らかであり、洪水期間の水位を適切に計測できているとみられる。

3. 解析結果

(1) 地形データ密度が縦断水位解析値に及ぼす影響

平成 27 年 9 月洪水を対象に地盤高のデータ密度が縦断水位解析値に及ぼす影響を検討した。図-6 に、上述した Case1~3 のメッシュ地盤高を用いて水理解析を実施した川俣地点と埼玉大橋の水位ハイドログラフを示す。粗度係数及び樹木群透過係数に関しては、既報¹⁰⁾における設定値と同じものを利用している。図-6 より、Case1 および Case2 の計算水位はほぼ重なり観測値との再現性が高い。一方、Case3 の結果は Case1,2 に比べて再現性は若干低下し、観測値とのズレは 20~30cm 程度である。

次に縦断水位の時間変化やピーク水位への影響について考察する。図-7 に Case1~3 の河床形状を用いて解析した縦断水位の時間変化を示す。同図より大きな違いは見られない。図-8 にはピーク水位に着目した Case1 の計算水位と Case2, Case3 の計算水位の差分結果を縦断的に示している。図-8 より、Case2 のピーク水位は Case1 と

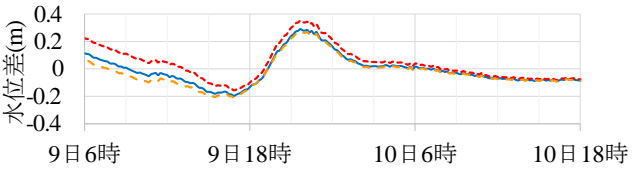
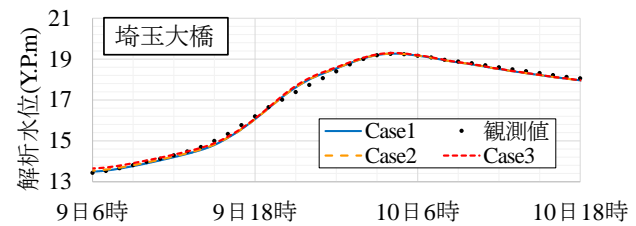
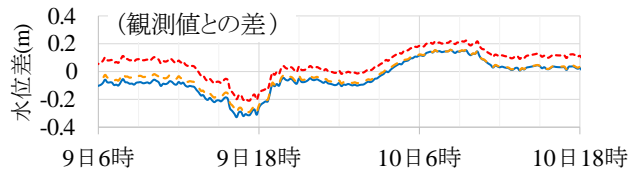
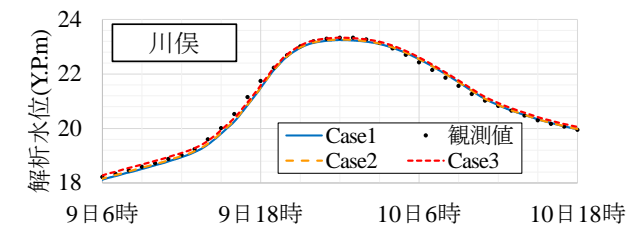


図-6 地形データ密度の違いによる水位ハイドログラフの差異

ほとんど変わらず、Case3 の縦断水位は大きい所で 10cm 程度の違いである。

以上より、利根川 133km~152km 区間を対象とした縦断水位の時間変化を推定する場合、地盤高のデータ密度が 1 点/100m² 程度であっても水面形を十分な精度で推定可能であることが示された。

(2) 水位観測密度が同化解析結果に及ぼす影響

既報¹⁰⁾では、本研究における対象河道である利根川 133km~152km において、平成 23 年 9 月台風 15 号出水および平成 27 年 9 月台風 18 号出水を対象として既存の水位観測所のデータを用い、左右岸水面形の Adjoint 法による同化解析を行った。結果、縦断水面形の同化が可能であり、抵抗特性値がある程度確からしいものであれば、流量制御だけでも水位が再現できることを確認した。ただし、水面形データ同化の制御変数の数に対し水位観測点数が少なかったため、データの空間密度と推定される制御変数値の確度の関係を得ることが課題であった。

そこでまず、既存の 3 観測所の観測水位に加え、2.(2) に述べた簡易水位計による観測データを含め、平成 29 年 10 月台風 21 号洪水の水面形の同化解析を行った結果を示す。ただし、簡易水位計 No.3 と谷田川排水樋管に関しては、図-1 に示したとおり、観測点が互いに接近しており、同化解析の際に両方を用いると、143km 付近

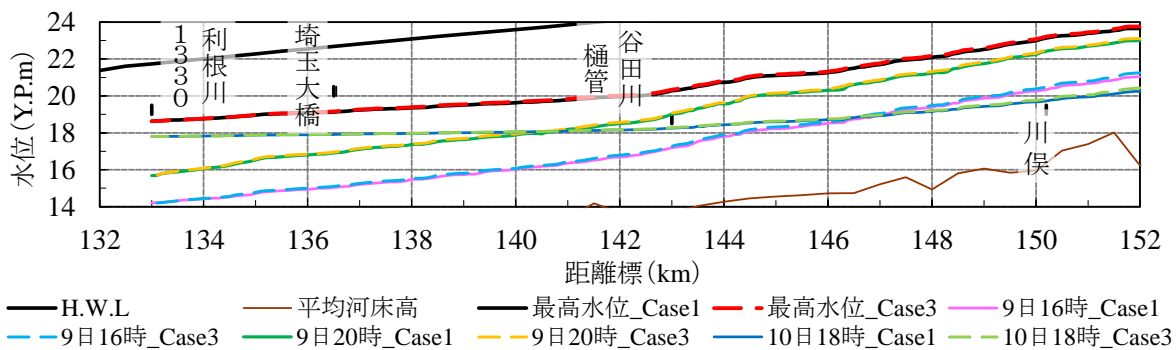


図-7 ALB 計測によるデータ密度(間隔)の違いによる縦断水位の時間変化

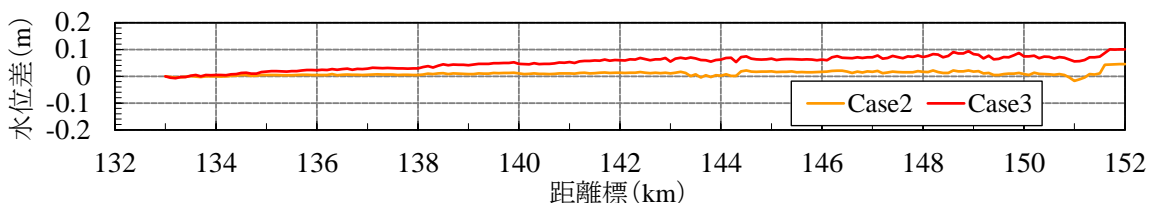


図-8 Case1のピーク水位に対するCase2, Case3の解析水位の差分

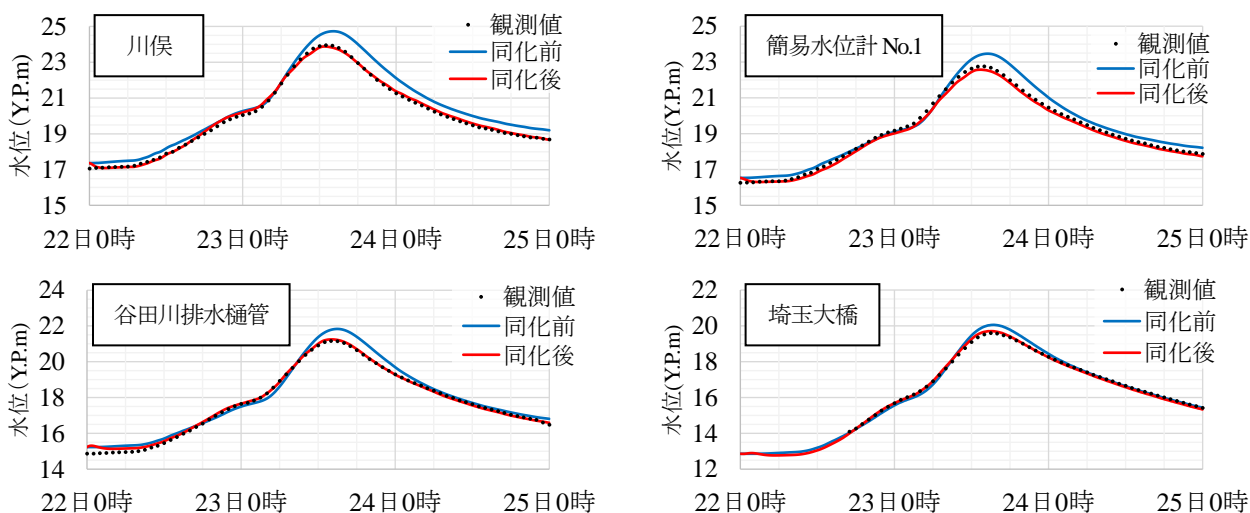


図-9 観測水位と同化解析水位のハイドログラフ(H29年10月)

の水位データの重みが過大になる。本検討では No.3 をデータ同化の対象から外し、残り 5 地点の簡易水位計と、下流端境界条件として用いている利根川 1330 を除く既存の 3 観測所を合わせた計 8 地点の観測水位から水面形の同化を行った。同化解析にあたっての制御変数は、既報¹⁰⁾と同様に、上流端における流量ハイドログラフ、低水路粗度係数(上流部区間, 下流部区間), 高水敷粗度係数(低い草本, 高い草本), 樹木群透過係数とした。

図-9に既存の3観測所及び水位計No.1における観測水位と同化解析水位のハイドログラフを示す。細かく見れば一致していないところもあるが、全体的にほぼ一致しているとみて良い。同化解析前後における上記の制御変数の値を表-3に、8地点の水位同化により推定された流量ハイドログラフを図-10に示す。解析から推定された抵抗特性は事前推定値と大きくは変動しておらず、1割～2割程度の変化であった。既往の出水における川俣観測所付近の低水路逆算粗度は、左岸側の砂州の影響等に

より幅があるが、概ね0.018～0.030の範囲にあり、表-3の推定結果は妥当であると言える。推定ピーク流量についても、速報値(図-10中の同化前)よりおよそ6%小さい程度であり、浮子観測の精度を考慮すれば十分取りうる差異であると考えられる。

図-11に縦断水面形の時間変化を示す。各位置と各時間において十分に再現できている。H23年及びH27年洪水にて観測データが得られておらず、解析の精度が明確でなかった146km～148kmの区間も、データ同化を行うことで計算値と観測値が概ね一致していることが見て取れる。ただし、同化解析では解析区間および期間全体で水位の最適解を求めているので、局所的には同化後も観測値との差が残りうる。簡易水位計No.1における23日12時における観測値と計算値の差は、およそ20cmである。

次に、図-12に示すように同化に用いる水位観測点数を変えて同化解析を行った。同図には、同化に用いる観測点数と解析から得られたピーク流量の推定値を示して

表-3 推定された抵抗特性値

パラメータ	同化前	同化後
粗度(低水路 上流端-143km)	0.027	0.022
粗度(低水路 143km-下流端)	0.025	0.023
粗度(低い草本)	0.035	0.032
粗度(高い草本)	0.050	0.041
樹木群透過係数	40	37

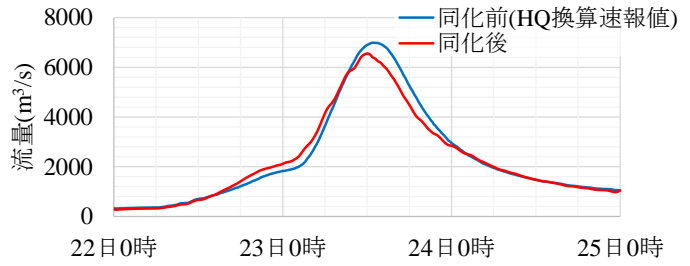


図-10 川俣観測所の推定流量ハイドログラフ(8地点同化)

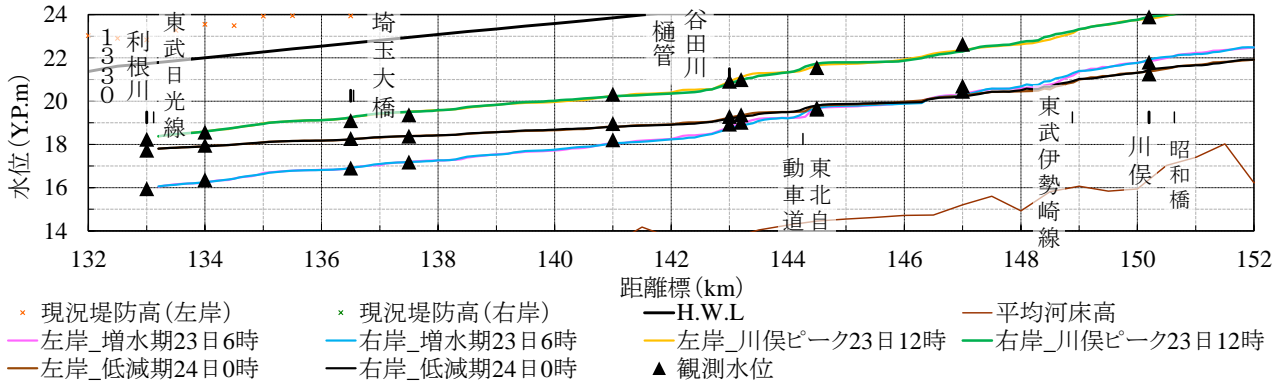


図-11 縦断水面形の時間変化(平成29年10月台風21号, データ同化後)

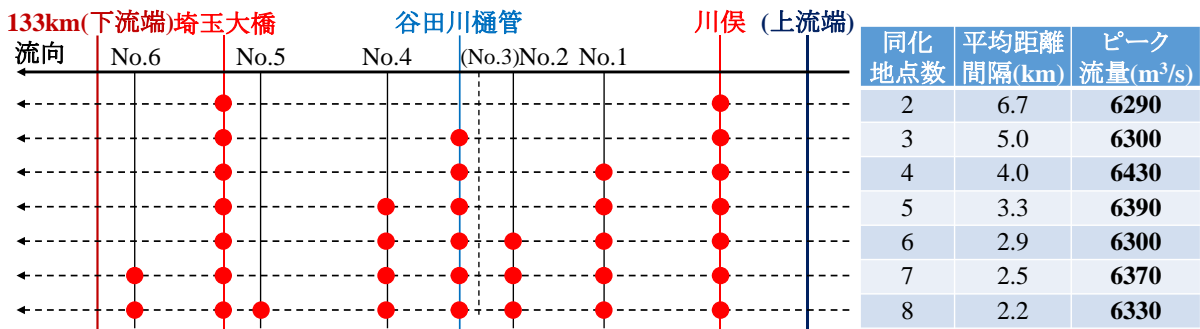


図-12 同化に用いた観測地点の組み合わせとピーク流量

いる。図-13にH23年及びH27年洪水の同化解析で用いられたもの同一の3地点の水位を同化したケースと、前述の8地点の水位を同化したケースについて、左岸の縦断水面形を比較したものを示す。水面形はほぼ同一となっている。

また、観測点数と抵抗特性値の関係を図-14に示す。図-14では、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る。最小二乗法の観測点からすれば計測点数が増えることで推定値の精度が高まることは当然であると思われるが、今回の観測結果から実際に確かめることができた。事例が一つなので確実ではないが、必要な観測点数はおおよその目安として、制御変数の数よりも多いことが望ましい。水位計の数が未知な制御変数の数よりも少なければ、水面形の時間変化の同化をできても、推定流量値の確率分布が広がりを持つ^{7, 10}。水位計の配置や同化解析にあたっては、必要な推定精度と水位計設置のコストを勘案した上で、

制御変数を適切に絞り込むことが重要である。

4. おわりに

本研究では、利根川上流部(133km~152km)において、まずH28年ALB計測結果から計測情報を間引いて解析格子を作成し、その間引き方による平面二次元流解析の水位解析結果に及ぼす影響について検証した。次に、既存の水位観測所に加えて簡易水位計を設置し、縦断的に密な計測が行われたH29年10月出水データから同化対象とする水位計の数を変化させて同化解析を行い、水面縦断形時間変化の同化解析や流量ハイドログラフの同定に必要な水位観測密度について検討を行った。

これらの考察は、左右岸縦断水面形および流量の推定について必要な精度と、河道地形のデータ密度および水位の観測点を密に設定することによるコストを考慮し、河道の維持管理に必要な情報を得ることに資するものである。今後の課題としては、計算メッシュの密度と併せ

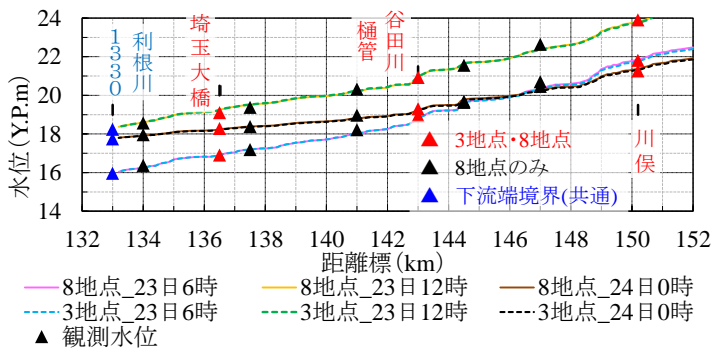


図-13 同化対象とした地点数による縦断水面形の変化(左岸)

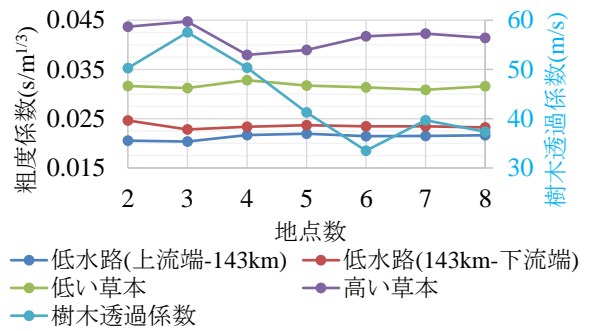


図-14 水位観測地点数と推定パラメータの関係

た考察を行うことや、スケールの異なる河川を対象として同様の検討を行い知見を深めることが挙げられる。

謝辞：本研究は平成 28 年度河川砂防技術研究開発公募河川分野研究(研究代表者：渡邊明英)の補助を受けて行われた。本研究で用いたデータは、国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所より提供していただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, 第 761 号/II-67, pp.45-56, 2004.
- 2) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.1-6, 2006.
- 3) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_355-I_360, 2017.
- 4) 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.
- 5) 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 B2(水工学), Vol.67, No.4, I_511-I_516, 2011.
- 6) 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.
- 7) 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, I_727-I_732, 2018.
- 8) 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.
- 9) 山本一浩, 中村圭吾, 福岡浩史, 戸村健太郎, 金田真一：グリーンレーザ(ALB)を用いた河川測量の試み, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.293-298, 2017.
- 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.

(2018.5.31 受付)

STUDY ON THE DENSITY OF OBSERVATION DATA NECESSARY FOR THE HYDRAULIC NUMERICAL ANALYSIS AND THE DATA ASSIMILATION

Akihide WATANABE, Kazuhiko MATSUNOBU, Tetsuaki MIKAMI, Takashi KOJIMA and Hiromi SUZUTA

The validity of hydraulic computational results is closely related to the observed information and the analysis model. However, there are few study cases relationships between the density of observed data and the accuracy of computational results.

In this paper, by using the elevation of numerical computational mesh in the general coordinate system which was made from three different densities measured by ALB, we discuss the measurement density of elevation for hydraulic computational analysis. Next, it was shown that the estimated hydraulic values and identification parameters to data assimilation in a Tone River reach changed according to the difference of the space density of the observation sites of the water level during the flood in October, 2017. We discuss the space layout of observation site for the data assimilation to the time-varying longitudinal water level distributions.