

植生の分布する広大な高水敷を有する荒川中流部における洪水流の解析精度向上に必要な地盤高と高水敷上の氾濫機構の評価方法に関する研究

FLOOD FLOW ANALYSIS ON NEW EVALUATION OF GROUND LEVEL
ON WIDE AND VEGETATED FLOOD CHANNELS IN THE ARAKAWA RIVER

福田匠太¹・竹村吉晴²・吉井拓也³・福岡捷二⁴

Shota FUKUDA, Yoshiharu TAKEMURA, Takuya YOSHII and Shoji FUKUOKA

¹正会員 東京都庁 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

²正会員 博(工) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所 計画課長
(〒350-1124 埼玉県川越市新宿町3-12)

⁴フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The Arakawa river has a plan to build new three retarding basins in the middle reach. It is important to understand flood control functions in middle stream of the Arakawa river with wide and vegetated flood channels. It is necessary to understand flood inundation mechanism on wide flood channels by flood flow analysis. Laser profilers can make use of the creation of detailed topographic maps of such flood channels, but may count the top height of vegetation on the ground. In this paper, filtering techniques of the laser profiler data are developed for reproducing proper ground heights of flood channels in the Arakawa river. Finally, the new flood analysis which improved the existing flood analysis method is presented.

Key Words : Arakawa River, Wide Channels, Laser Profiler, Filtering, Flood Flow Hydrograph, Inundation Mechanism

1. 序論

荒川は埼玉県と東京都を貫流し、流域内には多大な人口・資産が集積している。大規模洪水氾濫時には、人命や資産への甚大な被害にとどまらず、自然排水が困難なゼロメートル地帯に氾濫がおよび浸水が長期化することによる市民生活や社会経済への影響が懸念される。荒川水系河川整備計画¹⁾では、寄居(94.7km)における整備計画流量は6,500 m³/s、岩淵(21.1km)は6,200 m³/sとされており、この区間の中流部において洪水調節を行うことが見込まれている。荒川中流部の広大な高水敷には荒川第一調節池や横堤などがあるが、より効果的にピーク流量を低減させるために、第二、第三、第四の調節池群を整備することが計画されている。最大幅2.5kmにも達する高水敷に横堤群が設置された特別な河道区間において、河道が有する洪水調節機能を正しく把握することは、調節池群の効果的な整備を考える上で重要である。我が国では、荒川中流部のように高水敷が低水路幅に比して著し

く広く、様々な植生が繁茂し、また大規模な調節池計画を有する河道は極めて稀であり、これまで高い信頼度で用いられてきた福岡ら²⁾の洪水流解析法がそのまま荒川中流部に適用出来るか明確でない。

福岡ら²⁾は、洪水時の流れの構造、特に流れの抵抗、河道貯留、河床形状等が観測水面形の時間変化に現れていることに着目し、洪水流の観測水面形の時間変化を用いた平面二次元不定流解析等から、流量ハイドログラフや流れ場を高精度に推算する手法を示してきた。図-1は入間川合流点より下流の治水橋水位流量観測所における河道横断面図を示す。横断面図が示すように広大な高水敷を有する荒川中流部河道の堤間幅に対する低水路幅の比は縦断的に0.1を下回る。福岡・藤田³⁾、岡田・福岡⁴⁾が示した全国主要複断面河川の横断面形状では、この比は0.3～0.7の範囲に集中している。荒川中流部がいかにか特異な河道形状であるかが分かる。広大な高水敷には横堤等の構造物、畦道等の微地形、植生域が存在し、低水路から溢れ出た洪水は高水敷の起伏や植生の影響を受けながら、

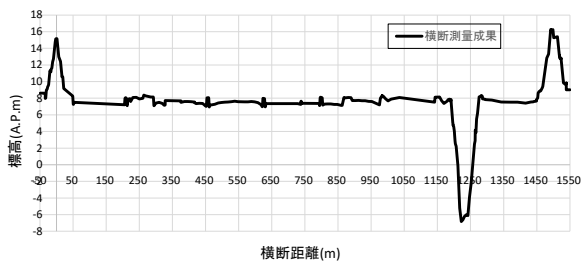


図-1 定期横断測量成果（治水橋 41.6km）

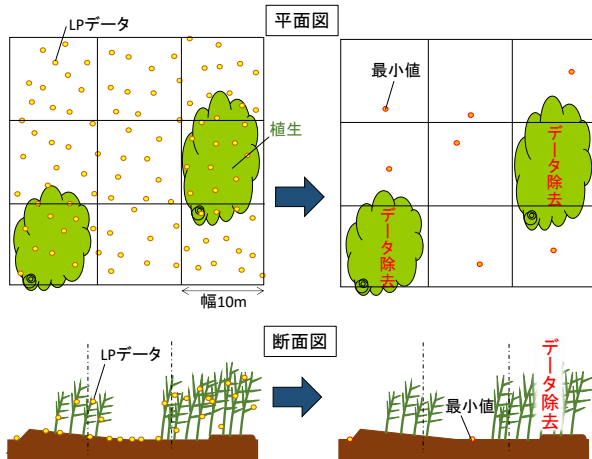


図-3 LPデータのフィルタリングのイメージ図

時間をかけて高水敷全体に広がる。一方、河道幅と低水路幅が同じ程度の多くの河川では、河道全体に素早く洪水流が拡がり、荒川の洪水流とは著しく異なる。すなわち、高水敷の広い荒川では高水敷上を氾濫する流れの水位を時空間的に適切に再現できなければならない、このためには、精度の高い地盤高が設定されなければならない。

本論文では、平成19年9月洪水を対象に、広大な高水敷を有する荒川中流部河道の洪水流解析のための地盤高の評価方法を提示し、それを用いた高精度な非定常平面二次元解析法が検討される。

2. 広大な高水敷と植生を有する荒川の洪水流解析法

(1) 対象洪水・区間と解析条件

実測水面形の時間変化を解とした非定常平面二次元解析法を適用し、平成19年9月洪水の再現を試みる。平成19年9月洪水は、熊谷水位観測所において氾濫危険水位を越え観測開始以来の最高水位を記録し、支川では都幾川の野本水位観測所、高麗川の坂戸水位観測所でも氾濫危険水位を越えた。解析対象区間は図-2に示す熊谷(76.5km)から西新井(13.5km)とし、区間内には市野川、入間川、小畔川、越辺川の流入、岩淵水門から隅田川への分派、荒川第一調節池と高水敷の横堤群、排水機場や樋管等からのポンプ流入、荒川第一調節池のさくらそう水門の開閉を考慮する。境界条件は、図-2の赤の丸印で示した地点に観測水位ハイドログラフを与える。流れの抵抗は粗度係数と樹木群透過係数で考慮する。

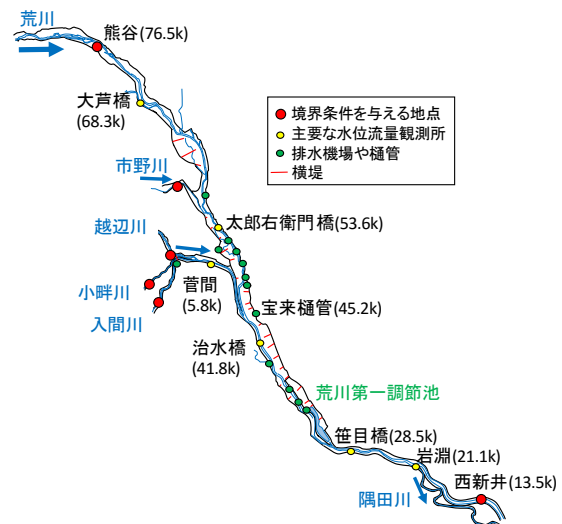


図-2 解析対象区間

(2) レーザプロファイラを活用した高水敷地盤高の評価

広い高水敷を有する荒川中流部における洪水流解析においては高水敷への氾濫流の広がり方を適切に説明出来ることが解析のキーであり、高水敷上の起伏や道路などの微地形を解析メッシュに取り込む必要がある。そのためにはレーザプロファイラの利用が不可欠である。一般に河川の洪水流解析ではオリジナルデータから建物や樹木群を除去したグランドデータ（以下LPと呼ぶ）が利用されるが、密に繁茂する植生群やオギ等の比較的低い植生は地盤高として評価されるケースが見られる。そのため、LPから高水敷地盤高を正しく評価するためには適切なフィルタリングを行う必要がある。田中ら⁵⁾は、過年度の定期横断測量成果を用いることで、植生高を計測したと考えられるデータをLPから除外し、地盤高を推定する手法を提案しているが、測量データの無い断面には適用できない。また、山地部では樹高の空間分布を考慮した手法⁶⁾も提案されているが、植生高を定義するのは困難であることから、本研究では、図-3に示す方法でLPのフィルタリングを行った。まず、対象区間を10m幅の格子に分割し、格子内に含まれるLPの標準偏差を算出する。図-4に荒川29.2km地点の横断測量成果とLPの比較を、図-5にLPの標準偏差の横断分布を示す。植生の繁茂する領域では、LPの標準偏差が比較的大きいこと、グランドなど平坦な領域ではLPの標準偏差が小さいことがわかる。対象区間の全断面で同様の検討を行った結果、標準偏差の閾値（本検討では0.2m）を設定することで植生領域の判断が可能であることを見出した。そのため、まず10m×10m格子内に含まれるLPの標準偏差が閾値を超える格子のLPは植生高を計測したのと考え除去する。さらに、標準偏差が閾値より小さい格子内で最も標高の低いLPを高水敷地盤高として抽出した。計算メッシュの地盤高はメッシュ内に含まれるフィルタリング後のLPの平均値で与え、メッシュ内にフィルタリング後のLPデータが存在しない場合は上下流の計算メッシュの地盤高

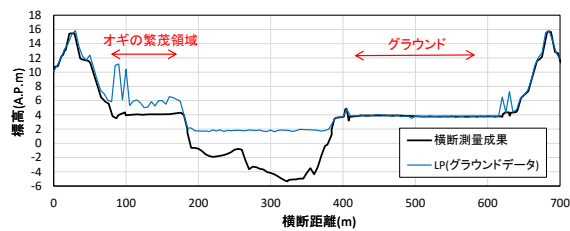


図-4 横断測量成果とLPの横断分布の比較

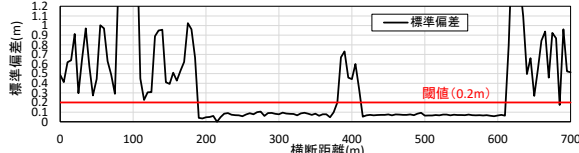


図-5 LPデータの標準偏差の横断分布



図-6 洪水後に水田や運動場に溜まる水（平成27年9月）

から内挿する。一方、この方法では、低水路際や堤防等の斜面部の地盤高がフィルタリングにより除去されてしまうため、低水路際と堤防の地盤高は横断測量成果から補間した。

LPを用いることで、定期横断測量成果よりも細かな間隔で高水敷地盤高の変化を解析に考慮することができる。一方で、LPから推定した高水敷地盤高の精度は、実測がないため、データを可視化し目視によりチェックするのが精々である⁷⁾。しかし、高水敷地盤高の再現性に求められる精度は、本来、研究目的から定められるべきである。本研究の目的は、高水敷を氾濫する洪水流を精度良く解析することにある。対象区間では、図-2に示したように堤防際の樋管で観測水位が得られている。また、図-6は平成27年9月洪水直後に撮影された航空写真であるが、高水敷に縦断的に設けられた道路や畦道によって、高水敷に洪水が貯留されたままになっている。このため、LPから設定した高水敷地盤高を用いて数値解析を実施し、堤防際で観測された観測水位ハイドログラフと同地点の解析水位ハイドログラフの比較（3章を参照）や図-6に示した洪水時の航空写真と解析の水深コンター図の比較から、LPから推定した高水敷地盤高の妥当性を検証する。次に、検証結果を踏まえ、フィルタリングの方法や解析メッシュの解像度が原因で、高水敷地盤高の評価が十分でなかった箇所については、フィルタリング前のLPや1/5,000地形図を参考に高水敷地盤高の修正を行う。このプロセスを繰り返すことで、高水敷地盤高の再現精度を高めていった。

(3) 高水敷上の流れの抵抗評価

洪水が低水路から溢れ、比較的小さい水深で高水敷を広がる時、地形の凹凸や植生により氾濫水の伝播に遅れが生じる。洪水流の数値解析では、メッシュスケール以下の微地形を評価できないため、最低水深（本検討では30cm）を設け、計算メッシュ内の水深が最低水深以上に達するまで他の計算メッシュへの流出量をゼロとすることで、氾濫水の伝播の遅れを考慮してきた。

荒川中流部の河道内に繁茂する植生は、ヨシやオギ等の高茎草本が大半を占める。洪水時にはヨシ・オギの倒伏により、流れの抵抗が時間的に変化することが考えられる。内田ら⁸⁾は、ヨシの根元モーメントに基づいた倒伏限界条件から粗度係数と地盤高を変更する手法を提案し、六角川洪水における非定常二次元解析で有効性を示している。本研究では、簡単のため水深のみで倒伏条件を与え（水深が2m以上で倒伏）、ヨシ・オギが繁茂する領域では倒伏前の粗度係数を $n=0.1$ とし、倒伏後は粗度係数を0.05程度に変化させる。このとき倒伏高さの0.7m以下は死水域になると考え、倒伏高だけ地盤高を高くする。

3. 解析結果と考察

ここでは上述の本解析手法による解析結果と、2.で説明したLPデータのフィルタリングや航空写真、堤防沿いの観測水位から地盤高の修正等を行わず、低水路沿いで測られた観測水位を再現するように粗度係数等の設定を行った場合の解析結果（以下、従来法と呼ぶ）の比較から、本解析法の有効性を示す。図-7(a), (b)に荒川本川の観測と解析の水面形時系列の比較を示す。ここでプロットは観測値、実線は本解析法による解析結果、破線は従来法による解析結果を示す。本解析法、従来法ともに解析水面形は低水路沿いで観測された水面形の時間変化を同程度に再現している。しかし、広い高水敷で水位および氾濫水が堤防沿いの樋管に到達する時間は、図-8(a), (b)に示すように本解析法が従来法に比べて遅れて到達しており、観測値を良好に説明している。図-9～図-14に、主要な地点の水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの観測値と解析値の比較を示す。図-9(b)の熊谷観測所では、ピーク付近の観測流量が、観測水面形の時間変化に基づく解析流量に比べて著しく大きな値となっている。図-9(b)の黒のプロットは、熊谷観測所の約20km上流に位置する寄居観測所での観測流量を示す。寄居と熊谷観測所の間に大きな支川流入はなく、ピーク付近の解析流量は寄居での観測流量とほぼ一致している。平成19年洪水時の熊谷観測所での浮子観測結果を調べたところ、ピーク付近で他の分割断面に比べ非常に大きな流速が観測されている断面がある。以上の2つの理由により熊谷観測所の平成19年洪水ピーク付近の観測流量は過大に評価され、正しい測定値を与えていないと見なし、以降この観測値を除外して検討する。

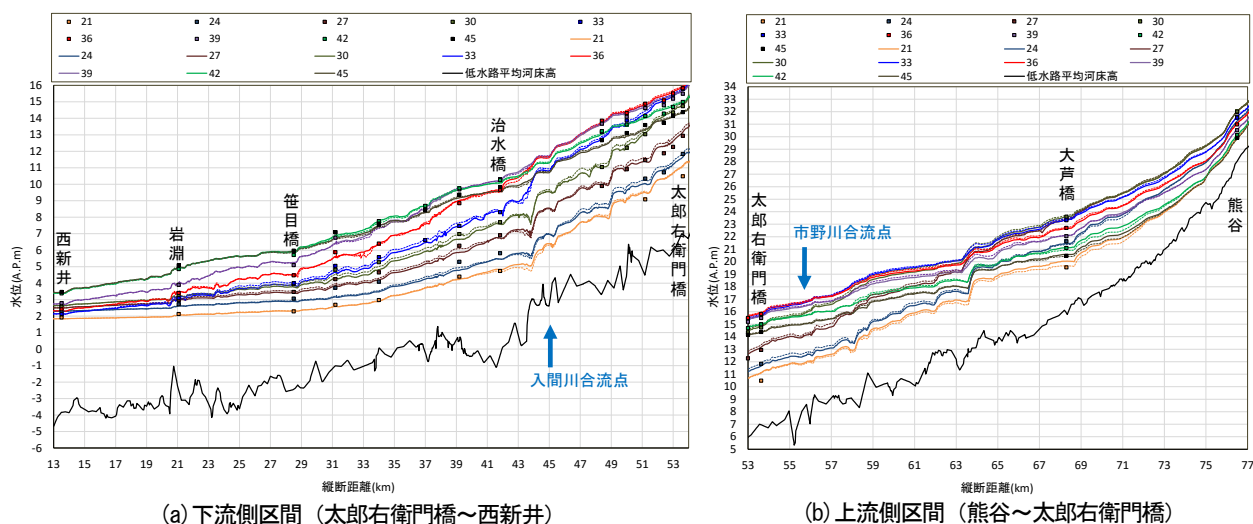


図-7 水面形の時間変化の比較

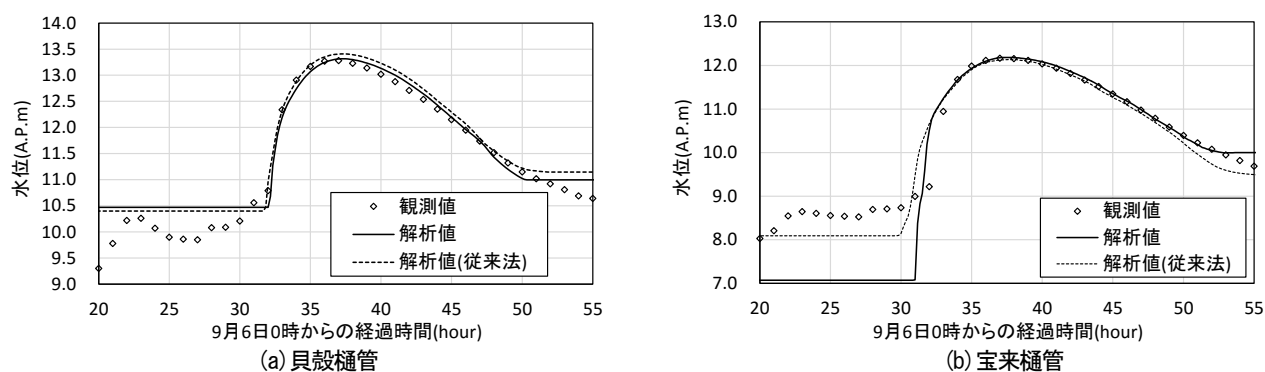


図-8 樋管における水位ハイドログラフ

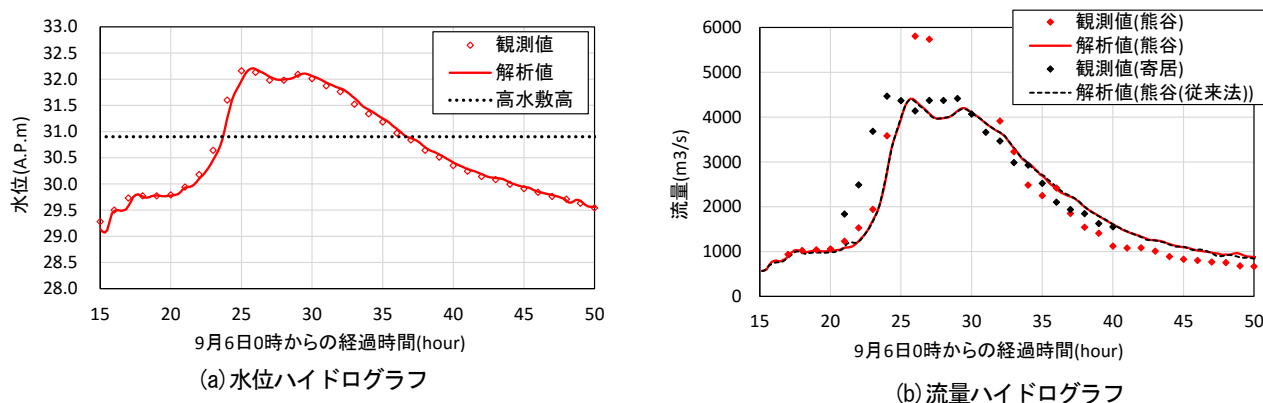


図-9 熊谷における水位・流量ハイドログラフ

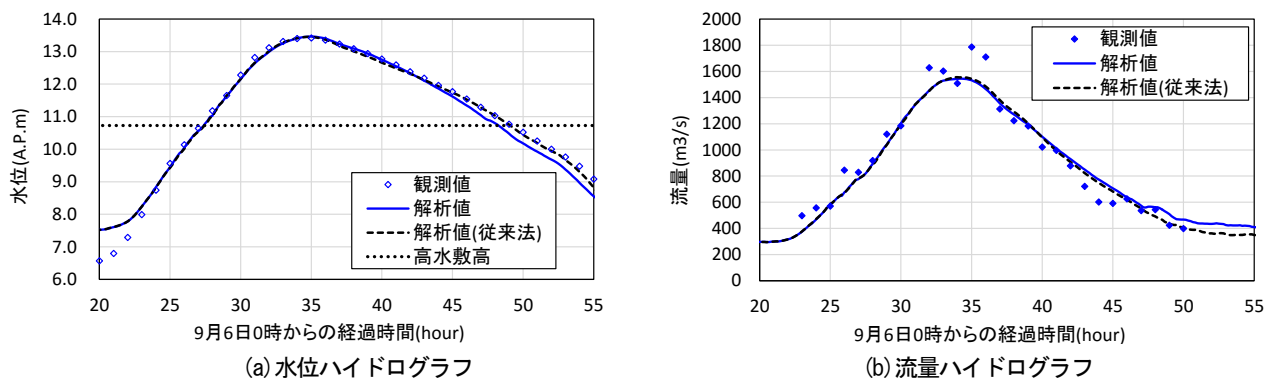
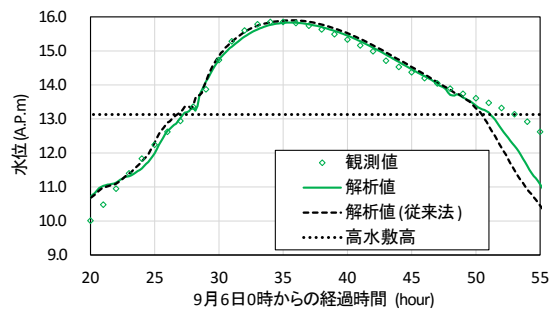
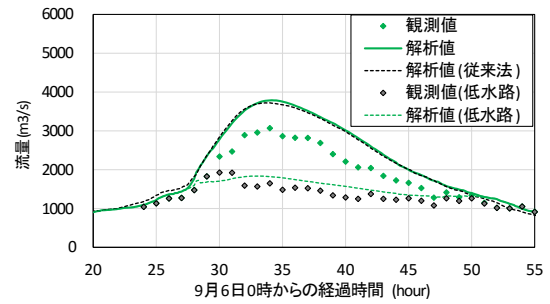


図-10 菅間(入間川)における水位・流量ハイドログラフ

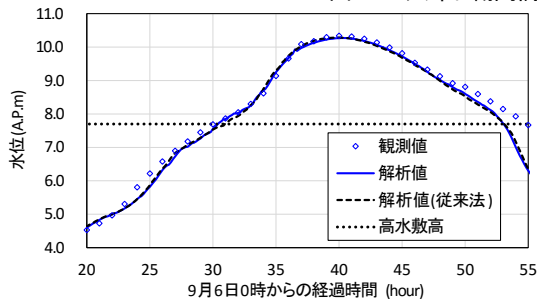


(a) 水位ハイドログラフ

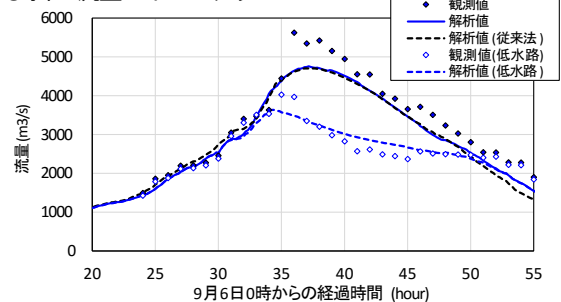


(b) 流量ハイドログラフ

図-11 太郎右衛門橋における水位・流量ハイドログラフ

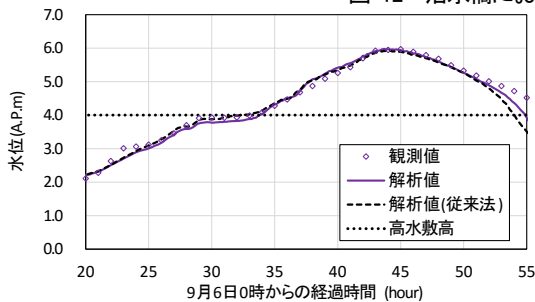


(a) 水位ハイドログラフ

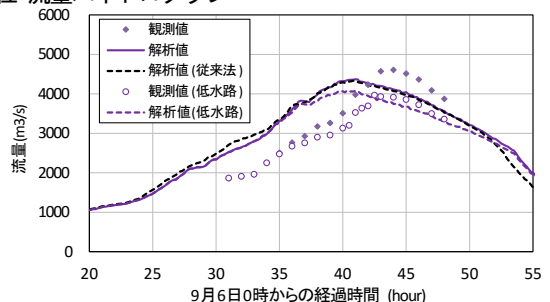


(b) 流量ハイドログラフ

図-12 治水橋における水位・流量ハイドログラフ

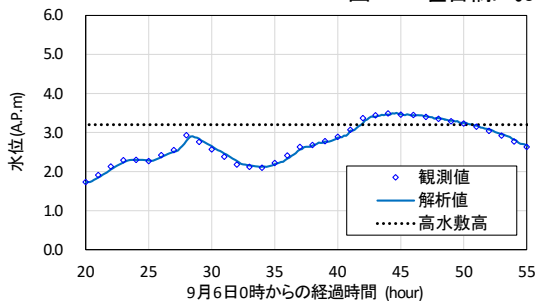


(a) 水位ハイドログラフ

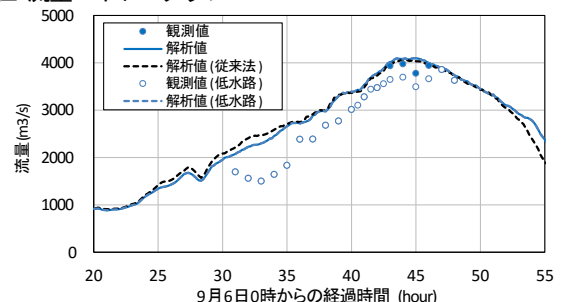


(b) 流量ハイドログラフ

図-13 笹目橋における水位・流量ハイドログラフ



(a) 水位ハイドログラフ



(b) 流量ハイドログラフ

図-14 西新井における水位・流量ハイドログラフ

図-10(b)の入間川の菅間観測所の解析流量ハイドログラフは観測結果をほぼ説明できている。図-11(b)～図-14(b)の荒川本川の熊谷観測所より下流の横堤区間の観測所では、図-15に示すように横堤を回りこむ流れが生じるなど高水敷の流れが複雑なこと、笹目橋、西新井観測所では、高水敷水深が浅く観測浮子の流跡等に異常があったことが記録されていることから、ここでは相対的に観測精度の高いと考えられる低水路流量についても比較検討を行っている。低水路流量については、笹目橋では、増水期で解析流量が観測流量に比べて大きくなる傾向にあるが、他の観測所では観測流量を説明できてい

る。全流量についても、笹目橋を除けば、流量の絶対値に若干の違いは見られるもののピーク流量の発生位置などを説明できている。

次に、本解析法と従来法の解析結果を比較する。図-9(b)、図-10(b)に示すように、荒川本川の熊谷、入間川の菅間において、実線の本解析法と破線の従来法による解析流量ハイドログラフに差は見られない。これに対し、治水橋より下流では本解析法と従来法で流量ハイドログラフに差が生じている。流量ピークは同程度だが、増水期には、洪水開始時から水位が高水敷よりもある程度高くなるまでの間、本解析法の解析流量が従来法に比べ

表-1 低水路の粗度係数

	従来法	本解析法
71km～77km	n=0.035	n=0.035
63km～71km	n=0.028	n=0.032
54km～63km	n=0.028	n=0.030
44km～54km	n=0.026	n=0.026
41km～44km	n=0.022	n=0.026
31km～41km	n=0.022	n=0.022
13km～31km	n=0.017	n=0.017

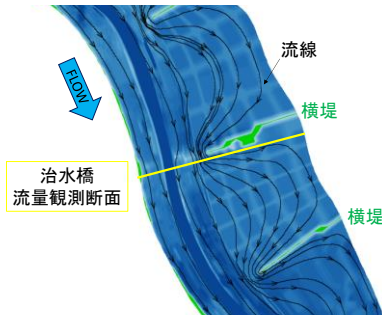


図-15 治水橋地点の洪水時の流れ

て小さくなっている。また減水期には、水位が高水敷よりも下がると本解析法の解析流量が従来法に比べて大きくなっている。これは、本解析法と従来法で同じように低水路の観測水位を再現しても、LPデータのフィルタリング等により高水敷地盤高を正確に取り込んでいる本解析法に比べて、従来法は高水敷上で貯留量が小さくなること、洪水流が高水敷へ溢れ出すタイミングが異なることが原因と考えられる。表-1に、本解析法と従来法での低水路の粗度係数の比較を示す。従来法に対し、本解析法の方が低水路の粗度係数が大きくなる傾向にある。これは上述したように、従来法では、洪水が高水敷に溢れていく時間帯での低水路流量が本解析法に比べて大きくなることから、低水路で観測された水面形の時間変化を再現するためには、本解析法よりも低水路粗度係数を小さくする必要があったためである。治水橋(41.8km)での低水路の粗度係数は、本解析法と従来法でそれぞれ0.026、0.022となる。治水橋での低水路満杯時(3000m³/s)の等流水深を比較するとその差は1.06mとなる。荒川水系河川整備計画¹⁾では、連続する4つの調節池が高水敷に配置される計画になっている。調節池群の効果を評価するには、調節池への流入のタイミングや越流堤付近の水位の解析精度が求められる。このためには、流れの抵抗を正しく評価することが特に重要である。

本研究で示したように、広大な高水敷と植生を有する大河川では、高水敷の氾濫機構や貯留量を正しく評価しなければ、流量ハイドログラフや流れの抵抗を正しく評価することはできない。そのため、広大な高水敷と植生を有する大河川における精度の高い解析モデルの構築には、縦断的な観測水面形だけでなく、高水敷上での多点の水位観測、UAV等を用いた写真による氾濫機構の見える化が必要である。また、図-9(b)～図-14(b)に示したように、平成19年9月洪水では上下流の観測流量の整合性に問題があり、解析モデル構築の大きな障害となった。特に広い高水敷と植生を有する河川では、高水敷の

水位・流量を精度良く測るための観測方法、観測体制を充実することが今後の重要な課題である。

4. 結論

- 1) 河川の洪水流解析で、一般に利用されるLPのグランドデータには、密に繁茂する植生群やオギ等の比較的植生高の低いものを地盤高と評価したものが含まれていること、そのような領域ではグランドデータの標準偏差が比較的大きくなることを見出し、グランドデータの標準偏差を指標とすることで高水敷の地盤高の合理的な評価方法を示した。
- 2) 洪水時の航空写真や堤防沿いの観測水位は、解析に優先的に取り込むべき微地形を判断し、高水敷の氾濫機構の解析精度を高める上で重要なデータとなることを示した。
- 3) 荒川平成19年9月洪水の再現計算から、広大な高水敷を有する大河川の洪水流解析において、流量ハイドログラフや流れの抵抗を正しく見積もるためには、高水敷での氾濫機構や貯留量を正しく評価することが重要であることを示した。このためには、主に低水路沿いで観測された観測水面形に基づく解析方法だけでは不十分であり、高水敷での平面的な水位の取得、UAV等を活用した洪水時の氾濫機構の見える化が重要である。

参考文献

- 1)国土交通省関東地方整備局：荒川水系河川整備計画【大臣管理区間】，2016。
- 2)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，No.761，II-67，pp.45-56,2004。
- 3)福岡捷二，藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，No.411，II-12，pp.63-72,1989。
- 4)岡田将治，福岡捷二：複断面河道における洪水流特性と流砂量・河床変動の研究，土木学会論文集，No.754，II-66，pp.19-31,2004。
- 5)田中成典，今井龍一，中村健二，窪田 輪，梅原喜政：LPデータと過年度の河川定期横断測量成果を用いた横断図生成手法に関する研究，土木学会論文集F3(土木情報学)，Vol. 70, No.2, I_283- I_292, 2014。
- 6)杉盛啓明，奥田裕一，村手直明，徳村公昭，大森博雄：樹高の空間分布を考慮した航空機レーザースキャナデータからの地表面推定法，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol. 42, No. 1, pp.4-11, 2003。
- 7)安田浩保，武富一秀，舘 健一郎，金木 誠：レーザースキャナにより取得した数値標高情報に基づく河道形状情報の作成に関する研究，河川技術論文集，第9巻，pp. 247-252, 2003。
- 8)内田龍彦，濱邊竜一，福岡捷二：高水敷に繁茂するヨシの倒伏判定法とそれを用いた非定常平面二次元解析，河川技術論文集，第16巻，pp.219-224, 2010。

(2016.4.4受付)