

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

STUDY ON LATERAL VARIATION OF WATER ELEVATION IN A COMPOUND CHANNEL UNDER FLOOD EVENTS

中山朝陽¹・二瓶泰雄²

Tomoharu NAKAYAMA and Yasuo NIHEI

¹学生員 学 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

Although water elevation is generally assumed to be uniform in the lateral direction, there has been little information on measured results for lateral variations of water elevation in rivers under floods. In the present study, we performed water elevation measurements at several cross-sections of the Edogawa River. Results showed that the differences of water elevation between the main channel and the floodplain that occurred during flooding were mainly due to a small mound that was formed between the main channel and the floodplain that prevented any water exchange between the two. The influence of lateral variations of water elevation on the evaluation of roughness parameters and river discharge was examined.

Key Words: lateral variation of water elevation, compound channel, discharge, field measurement

1. はじめに

河川管理を行う上では、雨量・水位・流量は常時連続的なモニタリングが必要な最重要項目である。一般に、河川流量は各断面における $H-Q$ 式と水位実測データから算出されるため^{1)・2)}、実質的には、地上雨量と河川水位に関する観測ネットワークが全国各地で整備されている。特に、河川水位は、洪水氾濫への準備や避難開始の直接的な判断材料となるため、确实で高精度な水位モニタリングを行うことは必須である。

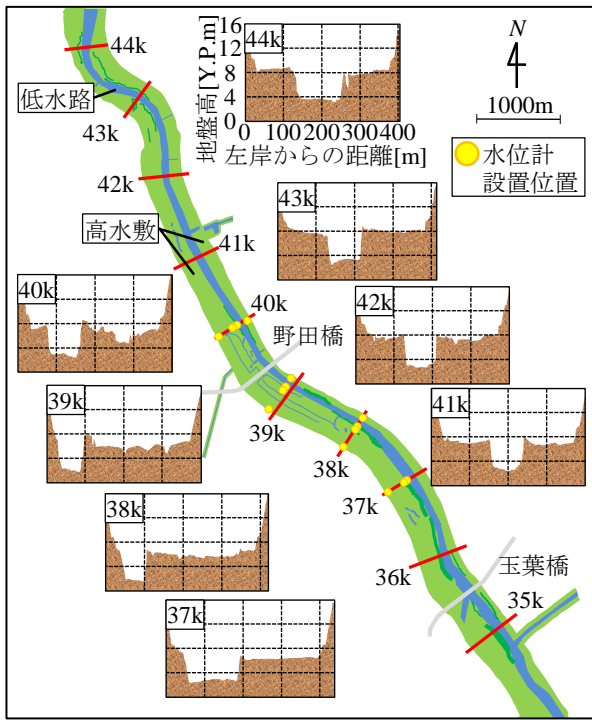
一般的に、水位計測は河川横断面内における一地点で行われており、これは時々刻々計測された水位が「河川横断方向に一樣である」という前提に立っている。この前提に基づいて河川流量も算出されている。しかしながら、各地における洪水後の痕跡水位データを見ると、河川両岸で痕跡水位が異なることはしばしば観測されており^{3)~5)}、上記の前提条件には疑問が残る。また、河川横断方向に水位変化が生じていると、流量の算出結果にも何らかの誤差が生じる可能性がある。

これまでの水位計測では縦断方向変化を詳細に捉える調査事例はあるものの⁶⁾、出水中の横断方向変化を計測した事例は皆無であり、上述した「横断方向に水位が一樣である」という前提条件の妥当性は不明なままである。

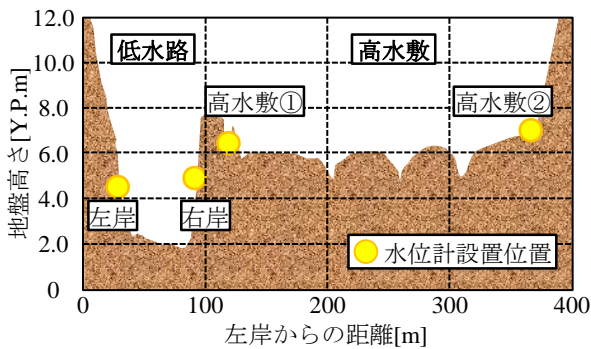
そこで本研究では、顕著な水位横断方向変化が予想される複断面河道において複数の横断面での多点水位連続観測を実施し、出水時における横断方向の水位変動を捉え、横断方向の水位変化が生じる要因を検討することを目的とする。そのため、複断面河道を有する江戸川中流部において、計 15 台の自記式タイプの圧力式水位計を横断面内の複数地点に設置したところ、二つの台風出水における水位計測を行うことができた。その中で、特に顕著な特徴が見られた同一横断面における低水路と高水敷間の水位変動特性の素過程について記述する。また、これらの水位の横断方向変化が、粗度係数評価や流量算定結果に及ぼす影響も合わせて検討する。

2. 現地観測の概要

観測サイトは、図-1(a)に示すように、複断面河道を有する江戸川中流部・野田橋付近であり、低水路幅は約 100m、堤間幅は約 400m である。この区間では、同図中に示される横断面形より、左岸側よりも右岸側の高水敷の幅が非常に広く、そのような状況が河口から 40km 地点より 27.5km 地点まで続く。この広大な高水敷の一部はグラウンドやゴルフ場として利用され、その他はヨシ等の植生群落が形成されている⁷⁾。観測対象断面は、河口か



(a) 平面図と観測点位置、横断面形



(b) 横断面内の水位計設置状況の一例 (39.1km 断面)

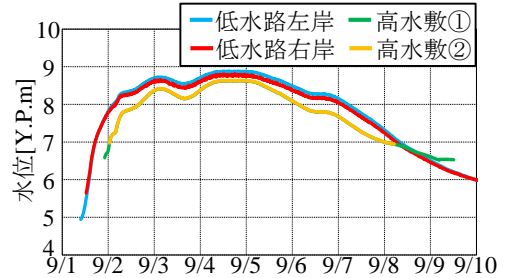
図-1 観測サイト

ら 40.0km, 39.1km, 38.0km, 37.0km の 4 つとした。各断面では、図-1 (b) に例示するように、低水路内の左右岸 1 箇所ずつと右岸側高水敷 2 箇所（低水路近くを①とその反対側を②と称す）の計 4 箇所にて自記式水位計 (U-20 Water Level Logger, Onset 製；計測範囲 9m, 精度 2cm) を設置した。なお、観測断面間の間隔は 1km を基本としているが、39.1km 断面には野田水位観測所があるため観測断面として選定した。また、37km 断面では、測器数の関係で、低水路内は右岸側のみに観測点を設けた。本研究では、高水敷まで冠水する規模の出水時の水位変動特性を捉えるために、低水路の観測期間は 2011/8/29～10/12 とし、高水敷では台風 12 号 (9/1～6) と 15 号 (9/21～22) に合わせて水位計を設置・撤収した。水位計の設置高さを計測するために、RTK-GPS (Trimble R4, 米国 Trimble 製；精度 4cm) を用いた。

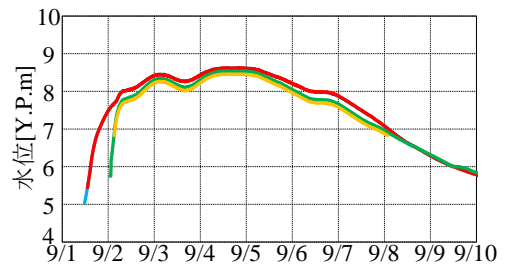
本研究で用いる水位計は圧力式であり、水圧センサーが流れと直に当たると動圧を感知し、正確な水位を計測



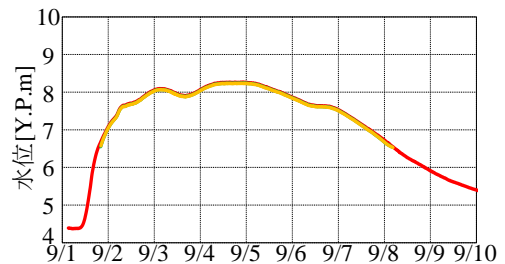
図-2 水位計設置状況



(a) 40.0km



(b) 39.1km



(c) 37.0km

図-3 水位の時系列変化 (台風 12 号時)

できない。この影響を排除するために、水位計を塩ビパイプ内に格納して設置する必要がある。本観測では、図-2 のように、低水路では両端が開いている塩ビパイプ内に水位計を固定し、その塩ビパイプを単管の下流側に設置した。一方高水敷では、水位計を設置した塩ビパイプの両端に土砂流入防止用のネットを張り地中に埋めた。

3. 横断面内の水位時間変動特性の比較

出水時の低水路と高水敷における水位の時間変動特性を比べるために、40.0, 39.1, 37.0km 断面における低水路 (右岸と左岸) と高水敷 (①, ②) における水位時系列データを図-3 に示す。ここでは、台風 12 号時を対象に、水位計冠水以降の結果が図示されている。なお、図中の低水路右岸側と高水敷①の直線距離は 26～35m と近い。これより、40km 断面では、低水路 2 地点の水位

は9/19時半頃に上昇し始めるが、高水敷ではその12時間半後に冠水・水位上昇しており、低水路と高水敷で水位上昇のタイミングが大きく異なる。また、低水路の水位は2地点共に高水敷2地点の水位を全般的に上回っており、減水期後半(9/8)にその両者の大小関係が逆転する。また、低水路右岸と左岸の結果を比べると、増水期初期は概ね一致しているが、水位ピーク期においては左岸側の水位の方が右岸側よりも高くなっている。また、高水敷2地点の水位については、洪水期間全般にわたり概ね一致している。

次に、39.1km断面については、低水路と高水敷の水位差が有ることや高水敷2地点での水位差が無い、という点に関しては40.0km断面と類似している。しかしながら、低水路2地点の水位差はほとんど見られず、40.0km断面とは異なる結果となった。図示していない38.0km断面の結果は39.1km断面と一致した傾向が確認されている。これに対して、37.0km断面では、低水路・高水敷共に水位上昇のタイミングが一致し、その後も明確な水位差は生じないまま増水期から減水期を迎える。

以上の結果より、横断方向水位変化の特徴としては、
 ①低水路と高水敷間の水位差は4断面中3断面(40.0, 39.1, 38.0km)で見られた。
 ②低水路内の水位差は4断面中1断面(40.0km)のみで見られた。
 ③高水敷内の水位差は全断面において生じなかった。
 と3つが挙げられる。以下では、①の低水路-高水敷間の水位差の実態やその要因などについて検討する。なお、②の低水路内の水位差に関しては、現段階では生成メカニズムは不明であり、今後、河道法線形の影響等を考慮し、より広範囲の追加観測等を行い検証する必要がある。

4. 低水路-高水敷間の水位差の形成メカニズムとその影響解析

(1) 低水路-高水敷間の水位差と水位のヒステリシス

低水路と高水敷間における水位差の実態を詳細に調べるために、台風12・15号時における低水路と高水敷間の水位差と水位のヒステリシスを図-4に示す。ここでは、低水路データとしては低水路右岸側の実測値を、高水敷データは低水路近くに位置する高水敷①の結果を用い、水位差としては低水路から高水敷の値を引いたものとする。また、4つ全ての横断面における結果が表示されている。

まず、38.0km, 39.1km, 40.0km断面の結果に着目すると、低水路と高水敷間の水位差は、増水期初期には1m程度もしくはそれ以上あり、その後も正となっており、低水路の水位は高水敷よりも高くなっている。その後、

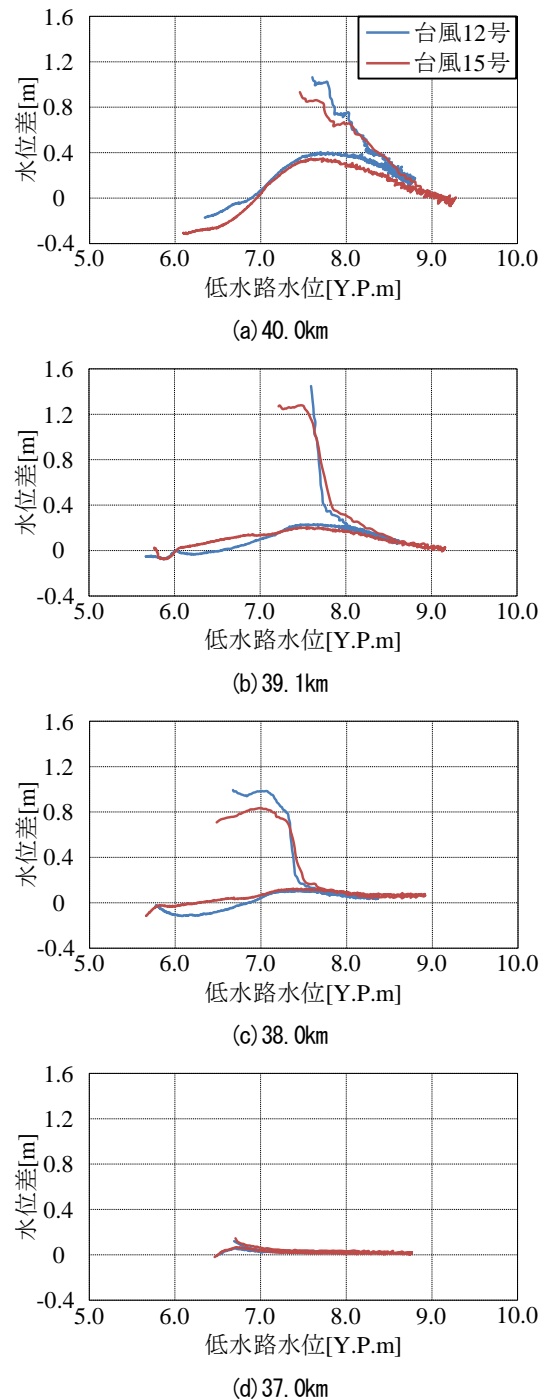
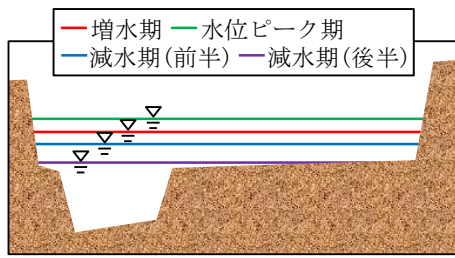


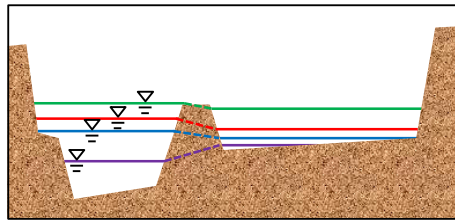
図-4 各断面における低水路と高水敷間の水位差と水位ヒステリシス

水位ピーク期に近づくとも水位差は相対的に減少し、ほぼ0となる。その後の減水期では、水位差は増水期より小さいものの正となっている。減水期後半において低水路水位が7[Y.P.m]以下になると、水位差は負となり、高水敷の水位が低水路を上回る。これらの結果は、二つの台風出水時共に見られており、再現性が高い現象であるものと考えられる。

一方、37.0km断面では、図-3(c)で見られたように、二つの出水時共に水位差はほぼ0である。このように、低水路と高水敷における水位差の様子は、台風12・15



(a) 37.0km



(b) 38.0km~40.0km

図-5 低水路と高水敷間の水位差形成状況の模式図

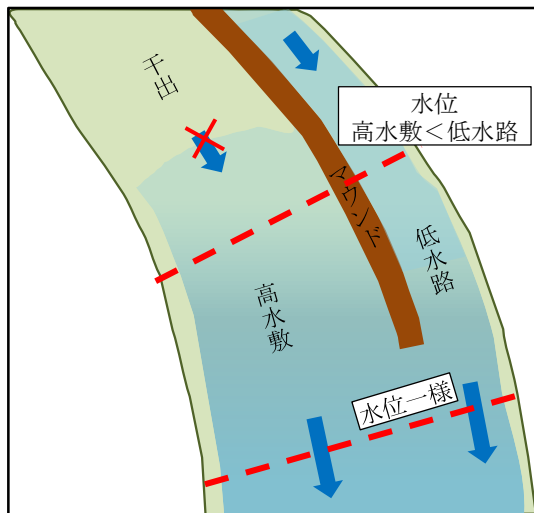


図-6 減水期前半の低水路と高水敷間における水位差形成メカニズム

号で共通し、かつ、横断面によって異なることが明らかとなった。

(2) 高水敷—低水路間の水位差形成メカニズム

前節の結果をまとめるために、洪水中における水位横断パターン推移を図-5に示す。ここでは、37.0km断面と38.0~40.0km断面に分けて、水位変動状況と典型的な横断面形状を表示している。まず、37.0km断面では、どの時点でも水位は横断方向に一様であるが、38.0~40.0km断面における水位大小関係は、増水期では低水路>高水敷となり、水位ピーク期では低水路>高水敷<低水路≒高水敷であり、減水期の前半では低水路>高水敷、後半では低水路<高水敷、という4パターンとなっている。横断面形状の違いとしては、図-1に示すように、38.0~40.0km断面では、低水路と右岸側高水敷の間に大きなマウンド⁸⁾が形成されているのに対して、37.0km断面ではマウンドは見られない。このマウンドは43kmから

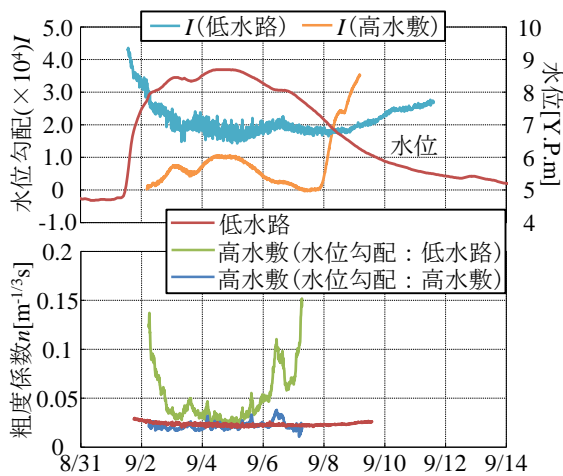
38.0kmまで存在している。マウンドがある断面では増水期において低水路から高水敷への流入が遅れ、かつ、流入量も抑制されるため、低水路と高水敷間に水位差が形成されるが、マウンドが無く、高水敷形状が平らな断面では、そのような水位差は生じない。

上記のように、マウンドがある場合、増水期では、低水路から高水敷への流入遅れのため、水位の大小関係は低水路>高水敷となる。一方、減水期では、逆に高水敷からの低水路への流出が抑制され、低水路<高水敷という水位差になることが考えられるが、実際には、減水期前半においては、逆の大小関係となっている。そこで、減水期前半において、高水敷の水位低下量が低水路よりも大きく、結果として、低水路>高水敷となる水位差形成要因を検討する。上下流の断面形を調べたところ、図-1に示すように、38km~42km断面では右岸側高水敷の中央付近で窪んだ地形となっているが、43kmより上流ではそのような地形は見られず、かつ、高水敷高さも高い。そのため、水位ピーク後には、43、44km断面の右岸側高水敷は早々に干出したものと考えられる。その場合、図-6に模式的に示すように、右岸側の高水敷では、上流側が干出し、高水敷では干出部からの水の流入がなくなる一方、下流側への流出は存在しているため、低水路よりも水位低下量が大きかったものと考えられる。なお、これらの現象は低水路と高水敷の比高差も関係しており、比高差により高水敷上での底面摩擦や貯留量も変化し、上述した水位差の時間変化の様子が変わるものと推測される。

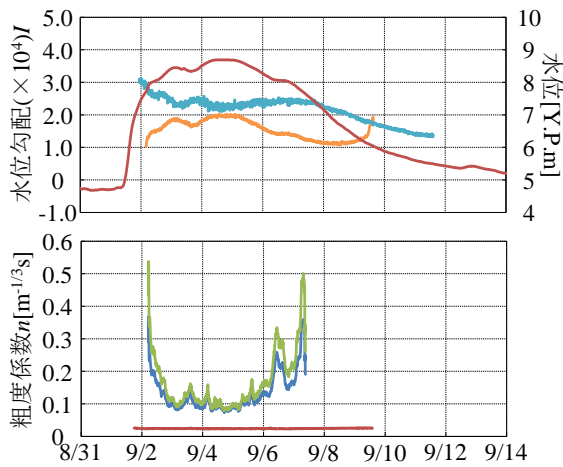
以上より、低水路—高水敷間のマウンドの存在により、低水路から高水敷への流入状況が抑制され、増水期では低水路の水位が高水敷より高く、その後、減水期前半も、高水敷では上流部干出のため水位低下量が大きく、増水期と同じ水位大小関係となる。その後、減水期後半では、高水敷全体の水深が小さくなり底面摩擦が増大するため高水敷からの流出量が抑制され、結果として、水位の大小関係が逆転する(低水路<高水敷)。このように、マウンドを介して、低水路と高水敷間には顕著な水位横断方向変化が形成されることが明らかとなった。

(3) 低水路と高水敷の水位縦断勾配の比較

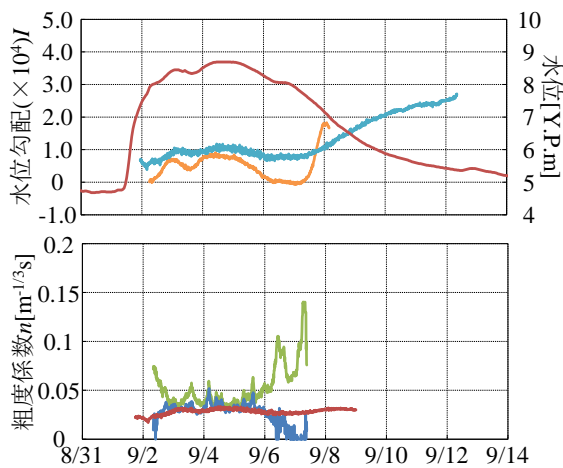
このような低水路と高水敷間の水位差が存在すると、水位縦断勾配やそれにより得られる粗度係数 n の逆算結果が異なることが予想される。そこで、台風12号時における低水路と高水敷の水位縦断勾配 I の時間変化を図-7(a)~(c)の上半分に示す。ここで、3組の断面間(40.0~39.1km, 39.1~38.0km, 38.0~37.0km断面)における水位データから求められる水位縦断勾配 I を低水路・高水敷に分けて算出している。なお、低水路では右岸側デ



(a) 40.0km-39.1km



(b) 39.1km-38.0km



(c) 38.0km-37.0km

図-7 水位 (39.1km 断面, 低水路) 及び低水路・高水敷の水位縦断勾配 (上) と逆算粗度係数 n (下) の時系列変化 (台風 1112 号出水時)

一た、高水敷では①地点の水位データをそれぞれ用いている。図中には合わせて、39.1km 断面の低水路における水位変化も表示している。これを見ると、低水路の水位縦断方向 I は、水位ピーク時において $1.0 \sim 2.5 \times 10^{-4}$ ($=1/10000 \sim 1/4000$) となり、平均的な河床勾配 ($=1/4000$)

と同程度かやや小さい。一方、高水敷の水位縦断勾配 I は、低水路よりも小さく、区間によってはほぼ 0 (水平勾配) となる時間帯も見られる。このように、低水路と高水敷間の水位差に伴って、縦断方向の水位勾配も大きく異なっていることが示された。

これらの水位縦断勾配データを用いて、粗度係数 n を逆算した結果も各図中の下半分に示す。粗度係数 n の算定に際しては、低水路と高水敷に分割し、それぞれに対して、次のマンニングの平均流速公式を用いる。

$$n = \frac{R^{2/3} I^{1/2}}{(Q/A)} \quad (1)$$

ここで、 R は径深、 Q は流量、 A は断面積である。水位縦断勾配 I は各断面間の実測値を与え、径深 R と断面積 A は 2 つの断面のうち下流側断面における水位と断面形から算出する。流量 Q に関しては、著者らが江戸川の 39.1km 断面で行った H-ADCP 計測と数値解析法 (DIEX 法) を用いた流量推定結果⁹⁾から低水路・高水敷の流量を抽出し、それらを全断面で与える。なお、粗度係数算定にあたり、高水敷の水位データが無い場合には、低水路のみのデータから推定することがある。そこで、低水路の n 算定には低水路の I を用い、高水敷の n 算定には高水敷と低水路の I を与える。

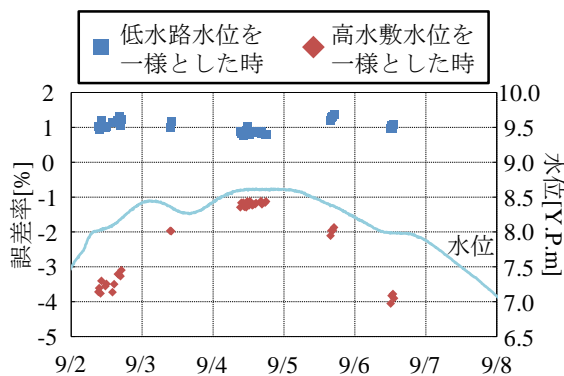
これより、高水敷の粗度係数 n は、全般に低水路よりも大きく、1 オーダー程度の差となっている場所もある。これは、高水敷にはヨシなどの植生群落が存在しているためである。また、高水敷の粗度係数 n に関する二種類の算定結果を比べると、水位勾配の違いを反映し、低水路の水位縦断勾配 I を用いる方が、高水敷の結果を用いるよりも全般的に大きい。これらの平均値を求めると、低水路水位を用いた粗度係数は、高水敷の場合の 1.2~2.3 倍と過大評価しており、複断面河道における高水敷での水位計測の重要性が示された。

(4) 流量算定精度に及ぼす影響

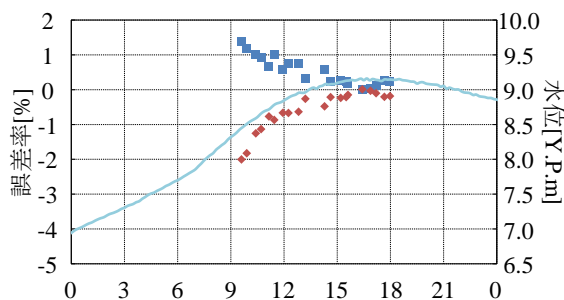
低水路と高水敷間の水位差が流量算定に与える影響について検討する。ここでは、低水路もしくは高水敷で計測された水位が横断面内で一様とした場合に生じる流量誤差を算定する。そのため、同じ台風 12, 15 号時に江戸川・野田橋 (39.2km 地点) において得られた ADCP 流量観測データ⁹⁾を用いた。具体的には、ADCP データより得られた水深平均流速 U_{obs} はそのままとし、各横断位置の水深には観測値 h_{obs} から水位観測誤差 Δh を引いたものを用い、次式で流量 Q_{cal} を求める。

$$Q_{cal} = \int U_{obs} (h_{obs} - \Delta h) dy \quad (2)$$

ここで、 y は横断方向である。低水路の観測水位を用い



(a) 台風 12 号



(b) 台風 15 号 (9/22)

図-8 低水路と高水敷それぞれの水位を用いた場合の流量誤差率と水位の関係 (39.1km 断面の水位を使用)

る場合には高水敷部分で水位誤差 Δh が生じ、高水敷の観測水位を用いる場合には、低水路で Δh が発生することになる。この解析には、流量観測断面に近い 39.1km の水位データを用いる。

図-8 は両台風出水時における流量の誤差率 (= (推定値-観測値) / 推定値 \times 100) の時系列変化を示す。これより、低水路水位一樣とする場合には誤差率は+1%、高水敷水位一樣の場合には誤差率は-4%に達している。このように、水位の与え方により、流量誤差は1~4%になり、有意な誤差が生じることが明らかとなった。ADCP による流量観測では、ADCP を横断方向に移動させることにより、横断面内の水深や流速を直接計測しており、断面積算定用に水位データを用いる必要はない。一方、一般的な流速計 (電波流速計等) を用いる場合には、流量算定に水位データは必須であり、これらの高精度化のためにも、複断面河道では低水路・高水敷で別々に水位データを取得する必要があることが示唆された。

5. おわりに

本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1) 複断面河道の複数の横断地点において水位計測を出水時に行ったところ、低水路と高水敷間に顕著な水位差が確認された。低水路内の水位差は4断面中1断面のみ

で見られ、高水敷内での水位差は生じなかった。

2) 低水路-高水敷間の水位差の発生状況と要因としては、低水路と高水敷の間のマウンドにより、低水路から高水敷への流入出が抑制され、洪水全般にわたり低水路の水位の方が高水敷より高かった。このような水位差が減水期前半でも維持するのは、高水敷の上流部が干出したためであり、高水敷における地形効果が低水路-高水敷間の水位差と密接に関与していることが明らかとなった。

3) 低水路-高水敷間の水位差が存在するため、水位縦断勾配やそれにより得られる逆算粗度係数の算定結果が用いる水位データにより大きく変化することが示された。また、この水位差により、流量算定時の誤差が1~4%程度と有意になっており、複断面河道の流量計測には、低水路・高水敷各々の水位計測が必要であることが示唆された。

謝辞：現地観測に際して、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏の惜しみないご協力により本研究を行うことができた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局, (社)日本河川協会編：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編, pp.33-58, 1997.
- 2) 土木学会：水理公式集 [平成 11 年度版], 丸善, pp.75-86, 1999.
- 3) 国土交通省 中国地方整備局 (案) [国管理区間]：太田川水系河川整備計画, pp.22-76, 2011.
- 4) 後藤岳久, 福岡捷二, 兒子真也, 中須賀淳：複断面蛇行河川における洪水流による樹木群の倒伏・破壊機構と樹木管理への活用, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.1, pp.47-65, 2010.
- 5) 重枝未玲, 朝位孝二, 坂本洋, 長木茂樹, 秋山壽一郎, 樋口直樹, 重岡広美, 徳永智宏：樹木群を考慮した平面 2 次元数値モデルによる乙津川の洪水流解析, 水工学論文集, Vol.50, pp.1171-1176, 2006.
- 6) 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, Vol.12, pp.1-6, 2006.
- 7) 加茂川優紀, 二瓶泰雄：出水時における河川内草本類の破壊条件に関する基礎的検討, 河川技術論文集, Vol.17, pp.239-244, 2011.
- 8) 有田正光, 池田裕一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上和男：水圏の環境, 東京電機大学出版局, pp.350-352, 1998.
- 9) 御厨純, 二瓶泰雄, 鈴木大樹, 中山朝陽：2 台の H-ADCP 計測と DIEX 法に基づく複断面河道の洪水流量計測 ~台風 1112 号出水を例に~, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.L1345-L1350, 2012.