

水内川における低水時の流れの2次元数値解析

広島大学大学院	学生会員	○岩苔和広	中央大学研究開発機構	正会員	内田龍彦
広島大学大学院	フェロー会員	河原能久	復建調査設計株式会社	非会員	森山 学
			広島県土木部	正会員	木村成弘

1. 序論

洪水時の流量データは河川計画には不可欠なものであるにも関わらず、データの蓄積のある一級河川においてすら、流量の高精度データを取得することは容易ではない。まして、県管理の河川では流量データに限らず基礎データの整備が遅れており、それが治水事業を展開する上での障害の一因となっている。広島県では平成17年と18年に続けて豪雨災害に見舞われた。しかも、平成17年で被災した箇所が平成18年で被災する事例もあり、河床形状や水文データなどの基礎データの整備とともに護岸の設計法の見直しが求められるに至っている。

著者らは、平成19年度に水内川で洪水観測の準備をしていたが、大規模な出水はなく、8月上旬の台風5号による小規模な出水により最高水位を記録するに過ぎなかった。森下は、この出水に関して多点での水位ハイドログラフを用いた2次元不定流解析により流量ハイドログラフの推定を行っている¹⁾。しかし、そのときの流量は観測されておらず推定結果の妥当性を検証することができていない。そこで、本研究ではそれとは別の方法で小規模出水のピーク流量の推定を試みた。すなわち、2次元数値解析により水位-流量曲線を作成し、観測された最高水位からピーク流量を推定した。そして異なる2つの推定法での結果がほぼ一致したことを報告する。

2. 水内川の特性和調査区間

水内川は、図-1に示すように、広島県広島市佐伯区湯来町を流れる太田川の支流である。その流域面積は143 km²、河道延長は22.1 kmの一級河川であり、流域の大部分が山地となっている。また、河道は蛇行しており、多くの取水堰が存在している。これまでに顕著な河床変動は報告されていないが、平成17、18年の台風による洪水によって水衝部の外岸側で大きな洗掘、内岸側で多量の土砂の堆積が生じ、問題となっている。河床材料の多くは砂礫であり、1m程度までの転石が多く存在している²⁾。調査区間は図-1中の長方形で囲まれた区間であり水内川下流の約130m区間である。この区間は、河床が比較的平坦であり、下流部に位置する堰のために低水時に下流の影響を受けない直線的な区間となっている。

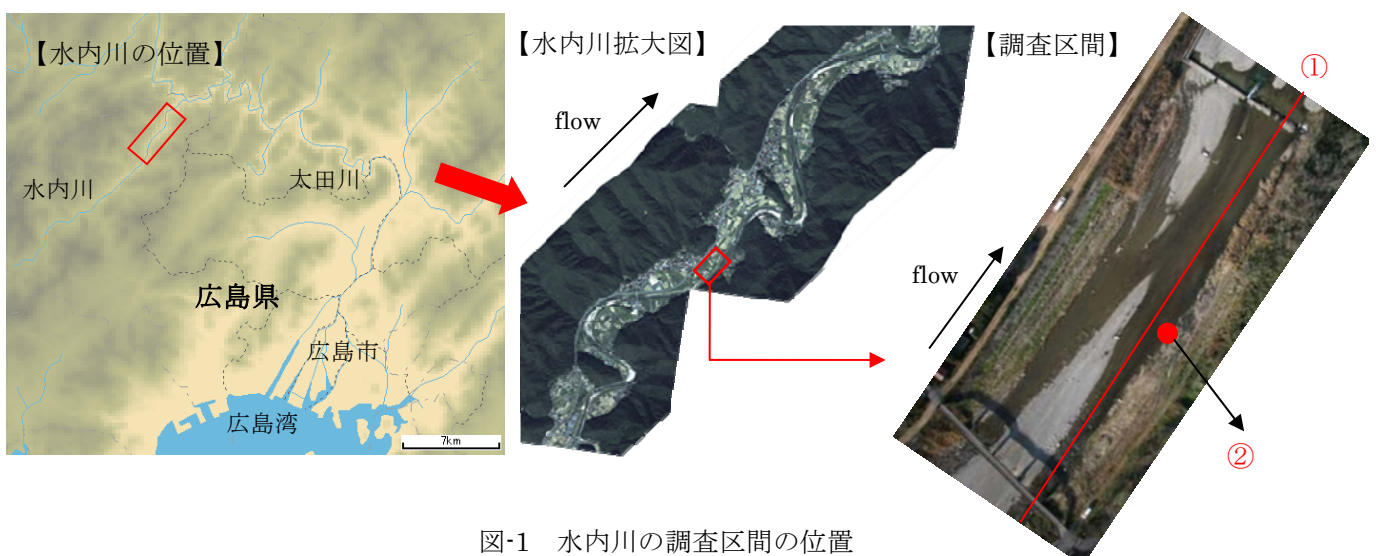


図-1 水内川の調査区間の位置

3. 観測項目と観測手法

水内川でレーザ測量と河川測量、流速・流量観測を低水期の 11 月に行った。河道形状の測量では、まず、調査区間の天端の左岸側に、縦断方向約 5m 間隔で、基準点を設置し、GPS で計測した。その後、その GPS の値を基準値として、トータルステーション（以下 TS と表記）を用いて横断形状を約 5m 間隔で計測した。横断測量は 26 断面（河道内で 24 断面、堰上で 2 断面）で実施し、その際水域であれば水深、植生域であれば植生高もスタッフを用いて同時に計測した。

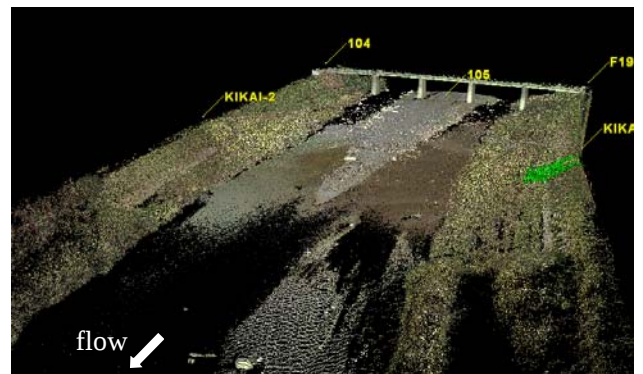
また、同時期に同じ調査区間で、レーザプロファイラ（以下 LP と表記）（ライカスキャンステーション 2, Leica Geosystems 製）を用いた観測を行った。LP は、レーザ光を発射し、地表から反射して戻ってくる時間差を調べて、三次元座標 (x, y, z) を測定する装置である。今回の LP による現地観測では、天端上の 2 箇所に LP を設置して行われ、各地点で取得されたデータを組み合わせることで、測量区間の三次元座標を取得する。図-2 に調査区間で取得されたデータ（3 次元座標と RGB, 受光強度）を示す。

流速測定は電磁流速計を用いて、2 点法により計測した。測定断面数は 6 断面であり、横断測量断面に平行に設置することで、流向、流速値のデータを取得した。また、上述の横断測量データと同一断面で計測した流速データより流量の算定も行った。さらに、流量測定を調査区間の約 100m 上流の、水深が十分に確保できる断面において ADCP

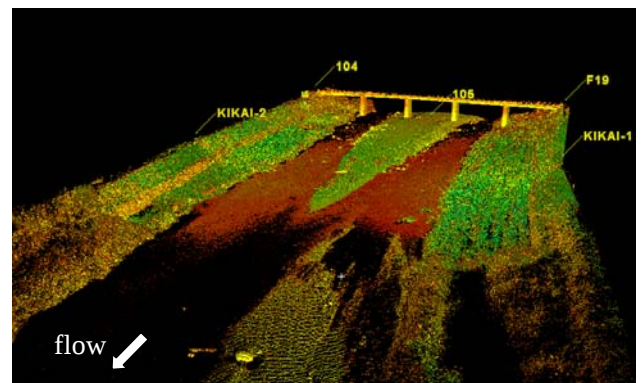
（Stream Pro, SEA 製）を用いて流量を計測し、流量 $0.85\text{m}^3/\text{s}$ の値を得た。

4. 計算メッシュデータの作成

調査区間の河道を $50\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ の計算メッシュで覆った。そして、そのメッシュの河床高 (z 座標) データを測量データから次のようにして作成した。河床高データとして、水域を除く領域では LP 観測により取得されたデータを使用し、水域では LP の性能上データ数が少ないため、GPS や TS の測量結果を使用した。低水時の流れを解析するために、河床高の補間による誤差を軽減することに留意した。すなわち、高水敷と低水路、堰上下端の境界にあたる両方のメッシュにあらかじめ河床高を与え、補間による河床高の内挿の精度を高めた。その後、着目したメッシュに一番近い観測地点を 4 点抽出し、距離に反比例する重み付けの線形補間を行った。得られた河床形状を図-3 に示す。この形状を数値計算に用いた。



(a) 3 次元座標データと RGB 値データ



(b) 3 次元座標データと受光強度データ

図-2 レーザ測量データ

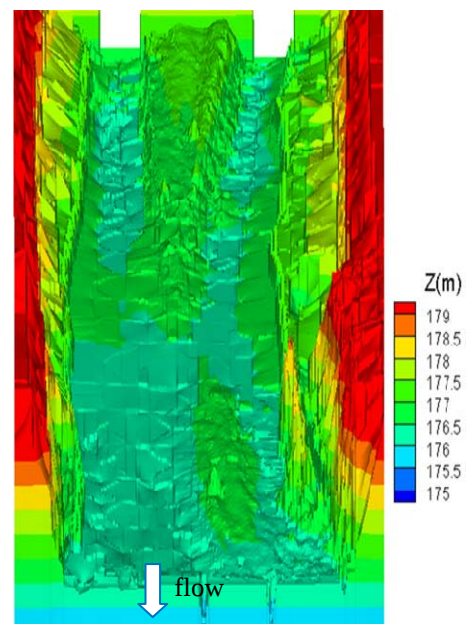


図-3 計算に用いた河床高コンター

5. 2次元数値解析

(1) 解析手法と計算条件

本研究解析モデルの基礎方程式は連続式(1)と運動量方程式(2)である³⁾。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{h} \left(\frac{\partial u_i h}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j h}{\partial x_j} \right) = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{0i}}{\rho h} + \frac{1}{\rho h} \cdot \frac{\partial \tau_{ij} h}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 h ：水深、 u_i ： i 方向の流速、 $\zeta = z + h$ （ z ：鉛直方向）である。 τ_{0i} は i 方向の底面剪断応力であり、マンニングの粗度係数 n を用いて与えた。 τ_{ij} は水平せん断応力である。詳細については文献3)を参照されたい。

上述の計算メッシュを用いて低水流況に対する2次元数値解析を行った。流れは定常流とし、河床変動は無視した。境界条件として、上流端で流量、下流端の堰直下にて流出条件を与えた。具体的には、上下流端にpond部を仮想的に設け、上流端のpond部にて流出量を与えた。与えた流出量は上流端が2つに分かれているため、ADCPで計測した流量を電磁流速計で計測した流速データを用いて算定した流量比で与える。具体的には、左岸側で流量 $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 、右岸側で流量 $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$ を与える。また、下流端では仮想pond部の河床高を低くし、段落ちとなるよう設定した。マンニングの粗度係数には 0.035 の値を与えた。

(2) 解析手法の検証

水位の縦断分布について計算結果と観測結果を図-4に示す。比較した縦断面は図-1の直線①であり、調査区間の上流端からの直線距離を横軸の流下距離としている。図-4を見ると、計算された水面形は滑らかな形状となっており、観測値を良好に再現していることが分かる。また、このことより、マンニングの粗度係数 0.035 の値が全体的に妥当であることが分かる。

水際線の位置についても比較を行った。図-5に観測値と計算値の水際線の位置を示す。メッシュを作成する際、低水路と高水敷の境界となるメッシュに河床高を与えてあること、砂州上ではレーザ測量データが多数あるため砂州の水際付近の形状も正確に表現していることにより、水際線は良好に再現できたものと考えられる。

図-6に、計算で得られた水深コンター上に計算と実測の流速ベクトルを重ねて示す。青線が観測結果、赤線が計算結果である。流速値は一部を除き概ね一致している。しかし、流向が観測値と計算結果で大きく異なる箇所が見られる。下流端の堰付近を除き、多くの地点では

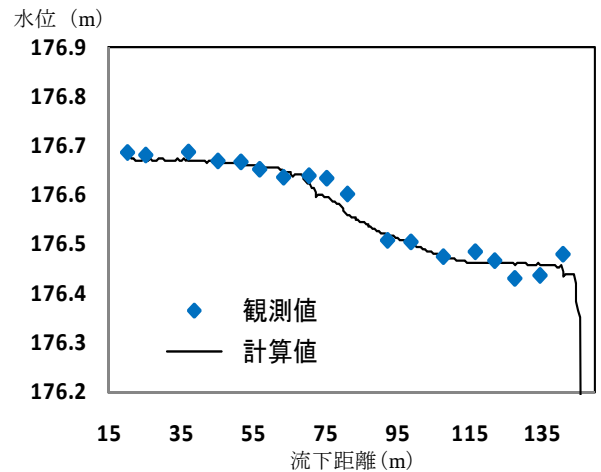


図-4 水位の縦断分布の比較

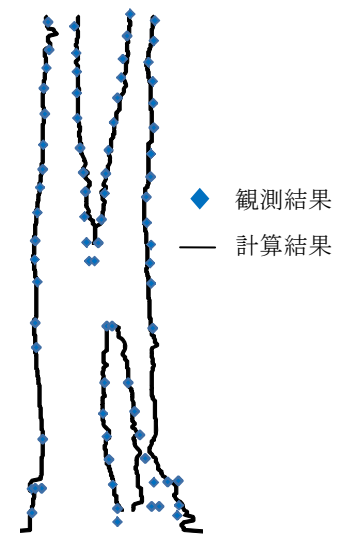


図-5 水際線の比較

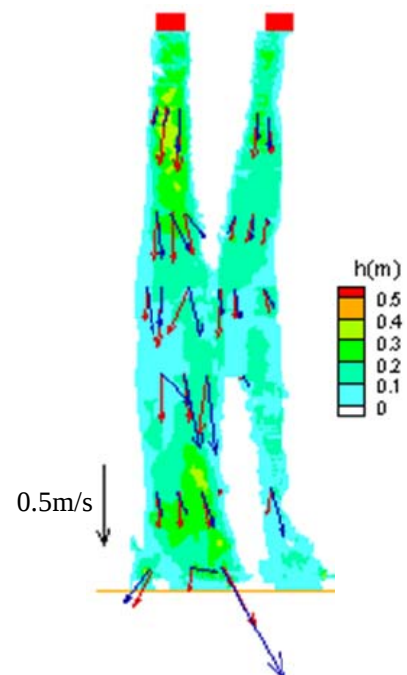


図-6 流速ベクトルの比較

2点法で計測した流向はほぼ平行であった。低水時の流れは河床形状の影響を強く受けるため河床形状を正確にとらえる必要があり、約 5m 間隔の横断測量と今回用いた補間方法では局所的な変化を捉えることが難しいためであると推測される。

(3) 流量の推定

小規模の出水を解析対象とするため土砂輸送は無視できるものとした。なお、対象とする区間の下流端に堰が存在するため、その下流の影響を考慮する必要がない。そこで、河床形状はそのまま、上流端の境界条件である流量を増加させ、図-1 の地点②における水位－流量曲線を作成した。なお、上流端の 2 つの流路の流量に関しては再現計算の場合と同じ流量比とした。その結果を図-7 に示す。

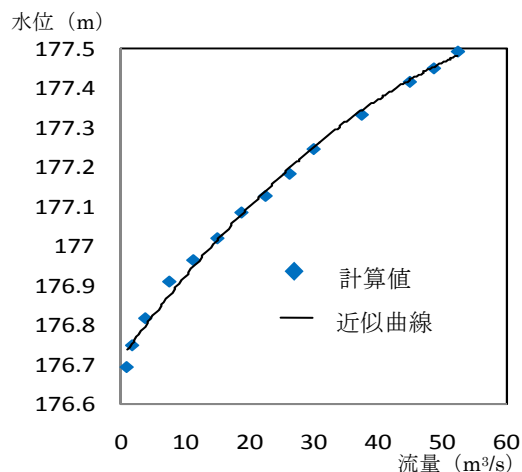


図-7 水位－流量曲線

平成 19 年の台風 5 号時に地点②に設置した水位計で観測した水位は 177.45m であった。今回作成した水位－流量曲線によると、その流量は約 48m³/s であると推定できる。これに対して、森下は 2 次元不定流解析により流量ハイドログラフの推定を行い、ピーク流量を 43 m³/s と報告している¹⁾。異なる方法で推定した結果がほぼ一致することが確認された。

5. 結論

本研究で広島県の水内川において低水流況に対する現地観測と流れの数値解析を行った。本研究で得られた知見は以下のである。

- 1) 水内川の調査区間での測量データに基づき、詳細な河床形状データを作成した。それを用いた 2 次元数値解析が低水時の水位を良好に再現することを示した。また、流速分布の再現性を高めるためには、より詳細な河床形状データを作成することが必要であることが示唆された。
- 2) 水位－流量曲線から、平成 19 年の台風 5 号の出水のピーク流量を 48 m³/s と推定し、別の方法で推定した流量値とほぼ一致することを示した。

参考文献

- 1) 森下祐：多点水位観測結果を用いた流量ハイドログラフの推定法と水内川への適用，平成 19 年度広島大学大学院工学研究科修了論文，2008。
- 2) 広島県：一級河川水内川河川状況検討計画書，平成 19 年 1 月。
- 3) 内田龍彦，河原能久：二次元浅水流の保存型 CIP 陽解法の開発とその検証，応用力学論文，Vol.9, pp.917-924, 2006。