

広島大学大学院 学生会員 ○吉武 央気
 広島大学大学院 学生会員 中土井佐輔
 広島大学大学院 フェロー会員 河原 能久
 広島大学大学院 正会員 椿 涼太

1. 序論

近年，全国各地で急流河川やそれに隣接する道路の被災が多発している．流域の大部分が山地に位置する急流河川では，洪水時に急激な水位上昇や土砂輸送が起こり，災害が発生しやすい．データの蓄積がある一級河川でさえ洪水時の流量を高精度に計測することは容易ではないが，急流河川となると信頼性の高い流量観測は一層困難となる．流量データは河川の治水計画や維持管理において根幹をなすものであるが，急流河川では地形データや洪水流量データが得られていないことが多く，治水計画・対策を検討する上での大きな障害となっている．

流量の推定に関して，多くの研究者や技術者が取り組んできている．福岡ら¹⁾は，水位の観測精度が流量に比べて高いことに着目し，水位観測データから 2 次元不定流解析を介して，洪水流量ハイドログラフを推算する手法を提案した．森下ら²⁾は，福岡らの方法と異なり，洪水流量の観測データを必要とせず，多点で観測された水位ハイドログラフのみから流量ハイドログラフを推定する手法を提案し，その適用性を示している．

本研究はその流量推定法を急流河川の洪水流に適用し，その有効性を明らかにすることを目的としている．ただし，本研究では流れの解析精度を確認することを目的としているため，顕著な河床変動が発生しない小規模の洪水を対象としている．ここでは，広島県三次市に位置する灰塚ダムからの放流を対象としている．以下では，流量推定法の概要，現地観測，2 次元不定流解析の結果と考察を順次説明し，最後に本論文の成果と課題を整理する．

2. 流量推定法

2.1 流量推定法の概要

本流量推定法の流れを図-1 に示す．観測水位ハイドログラフを上下流端の境界条件とし，2 次元不定流解析によって，洪水流量ハイドログラフを推算する．本手法では，流量の観測データを必要とせず，多地点での水位ハイドログラフから算出できる特性（縦断水位ハイドログラフ，

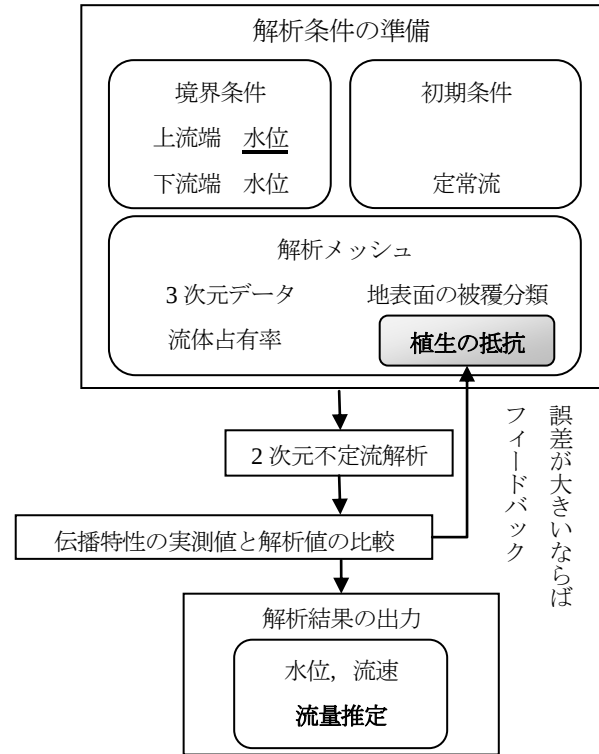


図-1 流量推定法のフローチャート

ピーク水位発生時刻)を用いる．伝播特性の実測値と解析値を比較し，両者の差が大きい場合には植生の抵抗（樹木群透過係数）を修正し，差が小さくなるまで計算を繰り返す．一方，粗度係数は河床材料の粒径からあらかじめ決定しておき，洪水中には変化させない．

2.2 流れの基礎方程式

数値解析はデカルト座標を用い，境界部などの複雑な形状を流体占有率によって考慮した解析³⁾を行った．基礎方程式を(1),(2)に示す．

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

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

ここで、添え字 i, j は総和規約に従い、1, 2 はそれぞれ x, y 方向を示す。 h は水深、 $\zeta = z + h$ (z : 河床高)、 u_i は i 方向流速、 g は重力加速度、 ρ は水の密度、 λ は流体占有率である。 τ_{oi} はマンニングの粗度係数 n を用いた i 方向の底面せん断応力であり、次式で与える。

$$\tau_{oi} = gn^2 \frac{u_i \sqrt{u_j \cdot u_j}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

式(2)中の F_i は植生の抵抗であり、次式で与える。

$$F_i = g \frac{h_a u_i \sqrt{u_j \cdot u_j}}{K^2} \quad (4)$$

ここに、 h_a は水深か植生高の小さい値を用い、 K は樹木群の透過係数である。この透過係数を空間的なパラメータとし誤差修正を行い、多地点における水位を一致させる。また、流量の上昇に伴う植生の倒伏によって植生高は低くなる。この倒伏に関する条件については3章にて説明する。 τ_{ij} は水平せん断応力であり、次式で与える。

$$\tau_{ij} = \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot k \quad (5)$$

ここに、 ν は0方程式モデルと Smagorinsky モデルの渦動粘性係数の和であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

本解析では、運動方程式の移流項とその他の項を分離して解き、運動方程式では流速を計算する。その移流項の離散化には CIP-CSL2 法⁴⁾を用いている。また、連続式には R-CIP-CSL2 法を適用し、水深を陽的に算出している。

3. 実洪水への適用

平成 21 年 3 月 25 日、広島県三次市に位置する灰塚ダムの下流部である上下川(図-2)において、フラッシュ放流時に 1 地点での流量と多地点での水位の観測を行った。上下川は一級河川江の川の支流であり、アユの餌となる新鮮な付着藻類の更新を目的とし、ピーク流量 100(m³/s)を 1.5 時間継続する放流である。このフラッシュ放流を対象として、洪水流への有効性を検証した。なお、灰塚ダムは 図中の No.1 地点の上流に位置する。

3.1 現地観測

観測項目は水位、流量、河床洗掘深、植生範囲、河床形状、河床材料であり、調査対象区間は約 6km である。図-2 に示した断面において計測を行った。絶対圧式水位計 (S&DL mini, 応用地質) を 17 地点 (No.6 では兩岸) に設置し、また、大気圧計 (S&DL mini, 応用地質) を 2 地点 (No.8, No.11) に設置、ともにサンプリング間隔 60

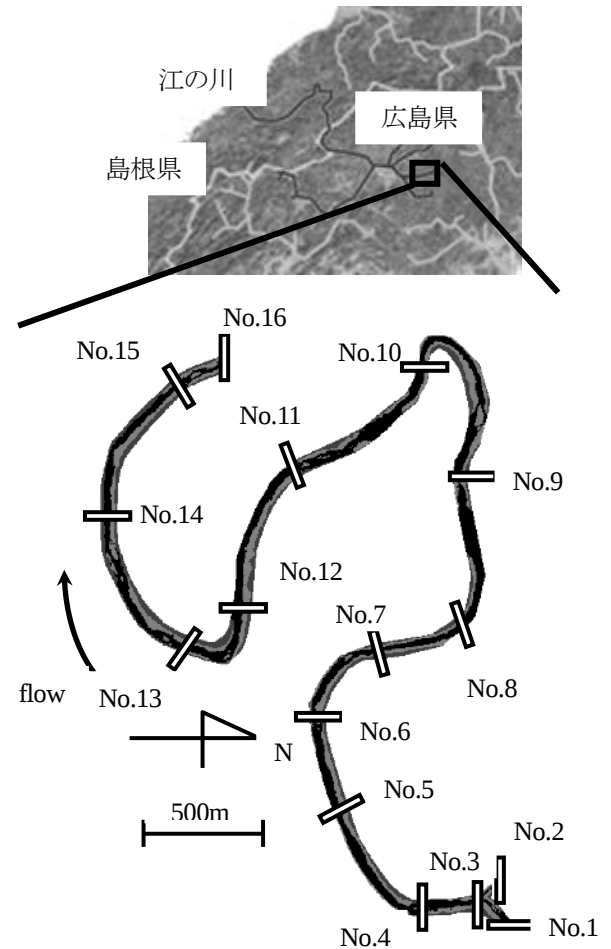


図-2 上下川における計測位置

秒で計測し、水位を算出した。また、No.11 の堰の上流において、ADCP (ハイドロシステム開発) を用い放流中の流量を 30 分毎に観測した。この観測流量と解析流量を比較し、流量推定法の信頼性を検討した。河床洗掘深計センサー⁵⁾を No.3 の位置に設置した。本放流ではブロックは 1 個流出し、5cm 程度の河床変動が発生したことを確認した。No.11 より下流においては放流前後で航空写真を撮影するとともに、No.11 より上流域においては天端上より写真測量を行い、植生の倒伏範囲を確認し、地表面の被覆分類を行った。放流後の平成 21 年 5 月中旬に RTK-GPS (Nikon-Trimble 5800) とトータルステーション (Nikon-NST-305Cr) を用い河道の横断測量を 70 断面において実施し、天端と河道内の 3 次元地形データを取得した。また、横断測量と同時期に、河床材料を 4 断面 (No.3, No.7, No.11, No.15) で計測し、水域 (礫域)、植生域での平均粒径を算出した。

3.2 数値解析条件

写真測量より地表面の被覆分類 (植生域、倒伏植生域、

水域)を、横断測量の地盤高よりスプライン補間を行いデカルト座標である解析メッシュを作成した。粗度係数は河床材料の粒径データからマニング・ストリクラーの式を用い、植生域で0.019、水域で0.028とした。植生に関して、植生の倒伏範囲は写真測量より判定したが、植生高や植生の倒伏条件は詳細には調査していない。そこで、植生高は1.0mと全区間一様で与え、植生の倒伏条件は倒伏植生域と判別したメッシュにおいて、水深が植生高の1.2倍を越えると、植生が傾き、植生高が0.7mになるとした。境界条件として上流端にNo.1, No.2の実測水位ハイドログラフを与え、下流端にはNo.16の実測水位ハイドログラフを与えた。初期条件として放流前の午前10時における定常流を与えた。また、計算メッシュの大きさは4m×4m、計算時間間隔は0.1秒とした。

3.3 解析結果と考察

図-1 に示すように、2次元不定流解析の結果と実測結果を比較し、ピーク水位の発生時刻を再現できるように樹木群の透過係数を調整した。樹木群の透過係数の推定値を表-1に示す。図-3に水位の縦断分布の観測結果と解析結果の比較を示す。下降期の21:00の時点で差異が見られるが、これは植生の倒伏による抗力の低下を適切に評価していないためであると推測される。しかし、植生の倒伏による影響を無視すると上昇期・下降期ともに再現性の高い結果が得られた。ただし、流下方向の標高比に対して水位の上昇量が小さいため、より詳細な検討が必要である。そこで、地点毎に水位ハイドログラフの比較を行った。図-4に3地点(No.5, No.7, No.15)における水位ハイドログラフの比較を示す。図より、水位ハイドログラフは概ね再現されていることがわかる。誤差を生む原因として、河床高が局所的に変化するにも関わらず100m間隔の横断測量結果しかないこと、植生の倒伏による抗力の低下や水域の拡大を正確には把握できていないことが考えられる。図-5に植生域を有するNo.14付近の初期時、ピーク時の解析流速ベクトルを示す。初期状態では、天端近くの植生域に水が流れていないが、中洲にある植生域には水が流れている。このことから、河床高に誤差があることが分かり、横断測量断面を50m間隔にするなど、地形形状をより高精度に再現する必要があることが分かった。ピーク時では、植生が倒れた方向と流速ベクトルの向きがほぼ一致していた。

表-1 樹木群透過係数推定値

区間No.	1~4,9~12,13~16	4~7	7~9	12~13
樹木群透過係数(m/s)	4	10	50	15

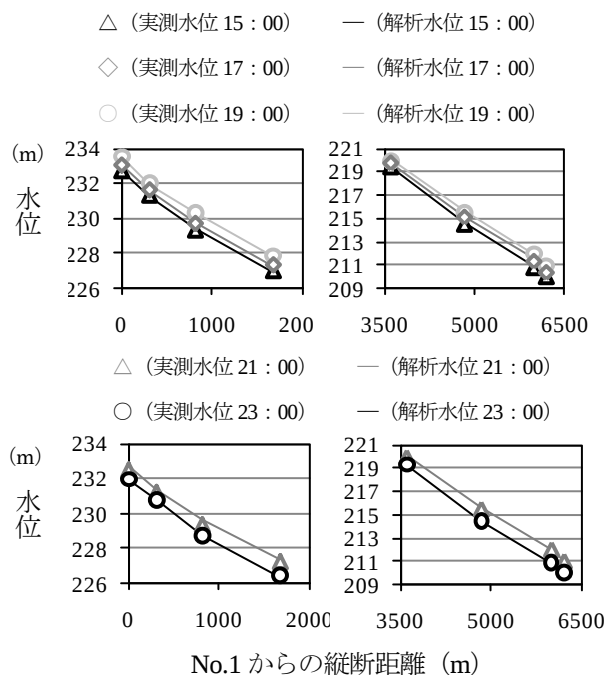


図-3 水位の縦断分布の比較

上：上昇期 No.1, No.4, No.5, No.8

下：下降期 No.11, No.13, No.15, No.16

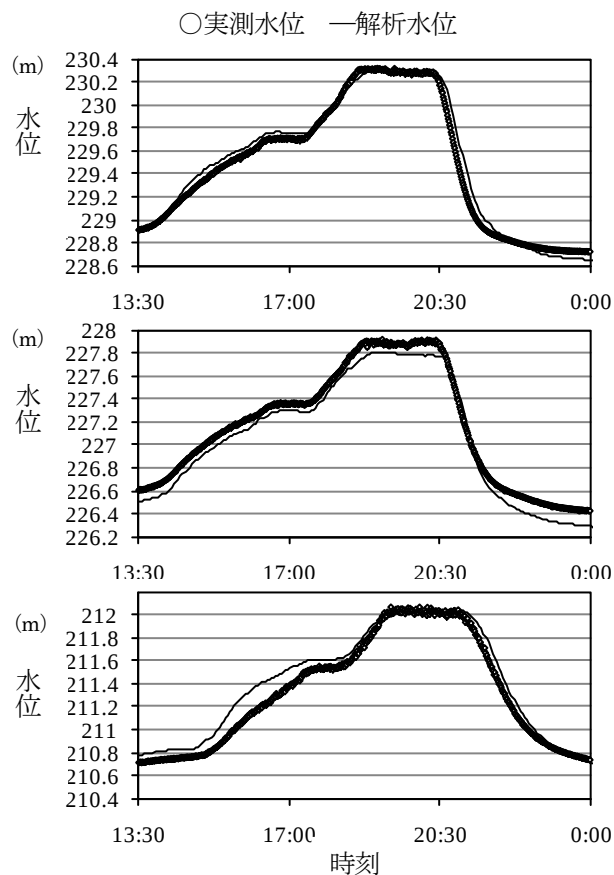


図-4 水位ハイドログラフ

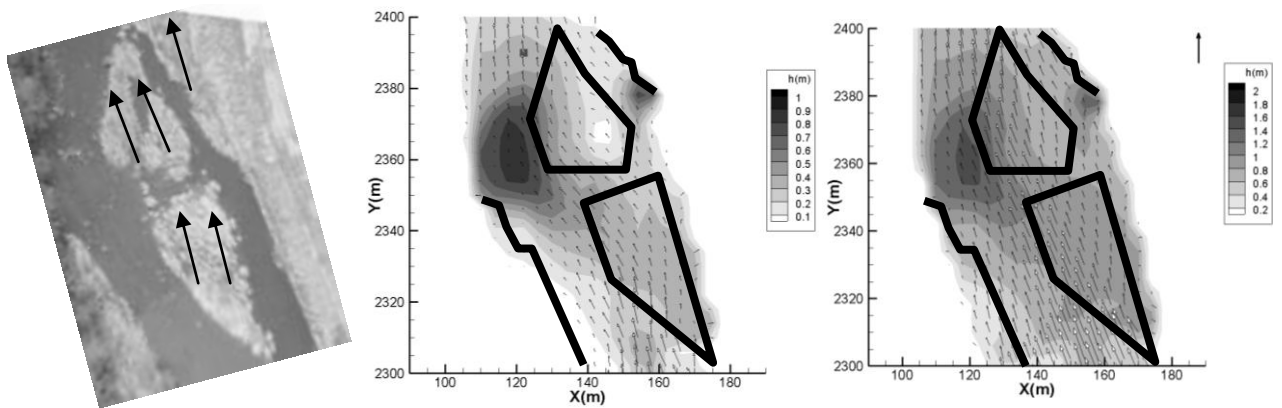


図-5 解析流速ベクトル (左：放流後航空写真 中：初期状態 右：ピーク時)

図-6 にダムからの放流量ハイドログラフと No.1 における計算された流量ハイドログラフの比較, また No.11 における観測した流量ハイドログラフと計算された流量ハイドログラフの比較を示す. No.1 の境界部において高精度に流量を再現できていることが分かる. No.11 においても誤差は小さく, 流量ハイドログラフをほぼ再現することができた. すなわち, 本流量推定手法は小規模な洪水に対して有効であることが確認された. しかし, より高精度に再現するためには, 植生が流れに与える影響, 土砂の移動や河床変動を解析モデルに導入することが必要である.

4. 結論

本研究では, 流量推定法の実洪水への適用性を検討するために, 上下川において, 現地観測と 2 次元不定流解析を行った. 河床変動が小さい条件下では本手法は洪水時の流量推定に適用できることを示した.

今後の課題として以下のことが判明した.

- 1) 洪水時に植生が倒伏するなどの影響を含めた植生の抗力を正確に再現する必要がある.
- 2) 急流河川においては流れが局所的に変化するために, 地形形状を密に計測する必要がある.
- 3) 急流河川における洪水流量の推定精度を向上させるために, 本流量推定法に河床変動を考慮することが必要である.

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, No.761/II-67, pp. 45-56, 2004.
- 2) 森下祐, 内田龍彦, 河原能久: 水位ハイドログラフと

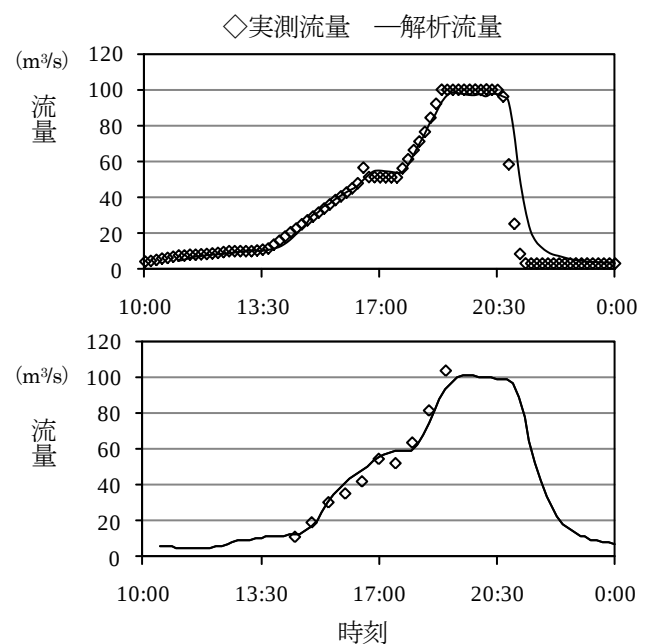


図-6 流量ハイドログラフの比較

上: No.1 の解析値とダムからの放流量

下: No.11 の解析値と ADCP の観測値

- 2 次元不定流解析を用いた高水敷粗度及び流量ハイドログラフの推定, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.901-906, 2008.
- 3) 内田龍彦, 河原能久: 地形変形を有する 2 次元浅水流の保存型 CIP 陽解法, 応用力学論文集, Vol.9, pp.917-924, 2006.
- 4) Nakamura, T. et al.: Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, Journal of Computational Physics, Vol.174, 171-207, 2001.
- 5) 河原能久, 内田龍彦, 吉田晋, 木村成弘: 急流礫床河川における洗掘深センサーの開発, 河川技術論文集, Vol.14, pp.313-318, 2008.