

多点水位ハイドログラフを用いた新しい流量推定法の水内川への適用

Application of a new discharge estimation method using multipoint water level hydrographs
to a flood in the Minochi river

岩苔和広*・河原能久**・森下祐***・内田龍彦****

Yasuhiro Iwakoke, Yoshihisa Kawahara, Yu Morishita and Tatsuhiko Uchida

*学生会員 広島大学大学院博士前期課程 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

**フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

***正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町 2-3-13)

****正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 文京区春日 1-13-27)

A new estimation method of discharge hydrograph during floods, which numerically solves the shallow water equations using multipoint water level hydrographs, is applied to a flood in the Minochi river. The physical environmental data of the river is so limited that topographical surveying using GPS, total stations and 3-d terrestrial laser scanning has been carried out along with continuous observation of water levels at several stations. Concurrently a stage-discharge curve in the river reach is produced by 2-d numerical simulations for relatively low and steady flows. The two methods are applied to a flood discharge in 2007 in the river. It is shown that the new discharge estimation method can give discharge hydrograph, whose peak value agrees well with that estimated by the stage-discharge curve.

Key Words: water level hydrograph, discharge hydrograph, 2-d model, Minochi river

キーワード: 水位・流量ハイドログラフ, 2次元数値解析モデル, 水内川

1. 序論

気候変動に関連すると推測されるような豪雨災害が多発している。また、少子高齢化の進行や自然災害への予防的予算の削減に示されるように、社会や行政も変化しつつある。そのような中で、治水対策も防災から減災へと転換しつつあり、着実なハード整備の必要性和その限界、防災施設の維持管理や危機管理の重要性が強く認識されるに至っている。

降水量や流量、水位といった水文観測データは河川の維持管理上でも必要であるが、治水計画にはなくてはならないものである。しかし、現在においても、データの蓄積のある一級河川においてすら洪水時の流量を高精度に計測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、それが治水事業を合理的に展開する上での障害となっている。

広島県では平成 17 年と 18 年に豪雨災害が多発した。とりわけ中山間地の急流河川では、堤防の浸食や護岸の破壊、隣接する道路の流出が頻発し、人的被害とともに長期間孤立する集落が生じた。また、平成 17 年で被災した箇所の近辺が平成 18 年で被災する事例もあり、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ている。

治水対策を検討する上で最も重要な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いる。例えば、喜沢・井出¹⁾は、現状の流量観測法(2点法など)のほか回転式流速計や ADCP など複数の計測器を用いた観測を同時に行い、現状の観測法による観測誤差の程度を示している。一方、洪水流解析において、福岡ら²⁾は、水位は流量に比べて観測精度が高いことに着目し、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ている。この手法により、河川合流点、河川分派点のような場所でも洪水流を精度良く計算することが可能であり、利根川・渡良瀬川合流点、江戸川・利根川の分派点において精度の高い洪水流量ハイドログラフ、流量分派率が推算されている^{3), 4)}。水位の観測データから、精度の高い流量ハイドログラフを推算するためには、抵抗係数(粗度係数や樹木群透過係数など)の大きさやその分布を適切に評価する必要がある。福岡らは、その評価のために流量ハイドログラフの観測データを利用しているが、このためには洪水期間中の流量の観測データが少なくとも 1断面で必要となる。最近、著者ら⁵⁾は、福岡らの方法をもとに、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、複断面蛇行水路での

非定常流に対してその適用性を示している。しかし、まだ河川での洪水への適用事例はなく、実務での有効性や課題を検討することが必要な段階にある。

そこで、本研究は、著者らが提案している流量推定法を実際の洪水へ適用し、その適用性を明らかにすること、および、中山間地を流れる急流河川での流れや河床変動の実態を明らかにすることを目的として、広島県が管理する水内川での現地観測と洪水の流量推定を行った。以下では、水内川での観測や流量推定のために行った 2 次元不定流解析で使用するデータの整備、流量推定法の概要、洪水の推定結果について順次説明する。なお、平成 19 年度には目立った出水は発生せず、8 月上旬の台風 5 号による降雨が小規模な出水を引き起こすにとどまった。そのため、直接的な流量観測が行われず、流量推定法の妥当性の検討が不十分となった。そこで、流量推定法で得られたピーク流量を別の方法で検討することにした。すなわち、下流の影響が及ばない堰の上流部で、かつ河道が直線的である区間において、2 次元数値解析が低水流況を再現することを確認した後、数値解析により水位・流量曲線を作成した。それは、台風 5 号による小規模な出水では河床変動も小さく、ピーク流量を推定するのであれば、2 次元定常流解析の結果とほぼ一致すると考えられるためである。本論文の後半では、低水流況の調査・解析について説明し、最後に本研究の成果と今後の課題を整理している。

2. 水内川での出水観測と河道データの作成

2.1 水内川の特性と調査区間

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。水内川の流域面積は 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の急流河川である。また、河道は蛇行しており、取水堰が多く存在している。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。調査区間は水内川下流の約 3 km 区間であるが、この区間には大きな支川の流入がなく、平成 17、18 年に大規模な護岸の被災や隣接する道路の流失の発生箇所を含んでいる⁹⁾。なお、この区間における最深河床の平均勾配は 1/130 である。

2.2 出水時の観測項目と観測方法

(1) 水位、降水量

水位の測定には絶対圧式水位計と大気圧計 (S&DL mini, 応用地質 (株) 製) を用いた。水位計の設置方法を図-2 示す。まず、水位を設置する地点に側壁に穴を有する鋼管を埋め込んだ。その後、水位計にワイヤーを取り付け、最上部の穴に設置したネジから吊した。この際、水位計にスポンジを巻き、ネジ部にバンドを取り付けることで水位計を

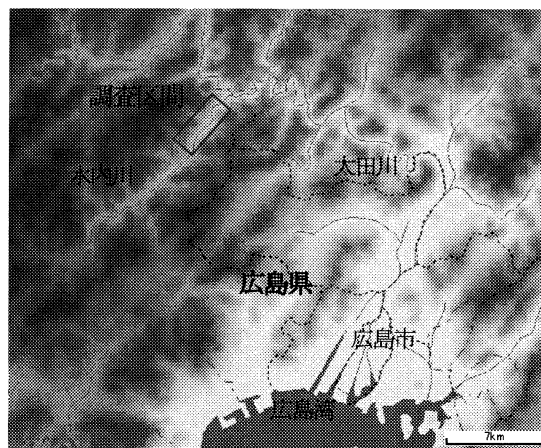


図-1 水内川と調査区間の位置

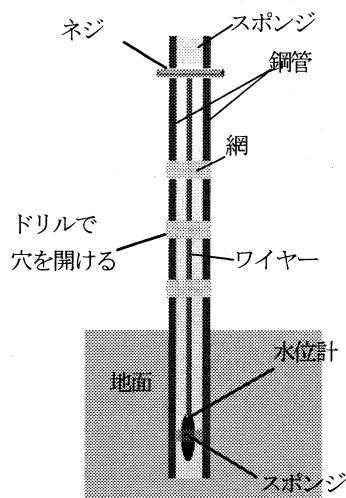


図-2 水位計の設置方法

平面内で動かないように固定した。さらに、上部にスポンジを取り付け、水及び土砂の侵入を防いだ。また、穴の部分にも網を張ることで、土砂の侵入を防ぎ、鋼管内に土砂が堆積しないようにした。測定方法は、鋼管上部の標高を GPS で計測し、上部からセンサまでの長さを差し引くことで、センサ部の標高を求めた。この標高と計測値から水位を算出した。

図-3 に後述の数値解析に使用する水位計の設置箇所を示す。各横断面の間隔及び測定点数 (両岸測定か片岸測定か) は河道の平面形状、堰などの河川構造物の有無により決定した。なお、水位計の大気圧補正のための大気圧計は No.6 断面付近の草谷橋に設置した。データは、水位計、大気圧計ともに 3 分間隔で取得した。

降水量は、転倒ます型雨量計 (U-Dot, UIZIN 製) をデータロガーとともに湯来東小学校 (図-3 の丸印) の屋上に設置し、計測した。

(2) 河床形状

河道形状の測量は、図-3 に示す No.3 から No.10 の区間において、GPS (Nikon-Trimble 5800, RTK 測量時の公称精度: 水平±10 mm 垂直±20 mm) とトータルステーション (以下 TS と表記) を用いて行った。まず、No.3 から

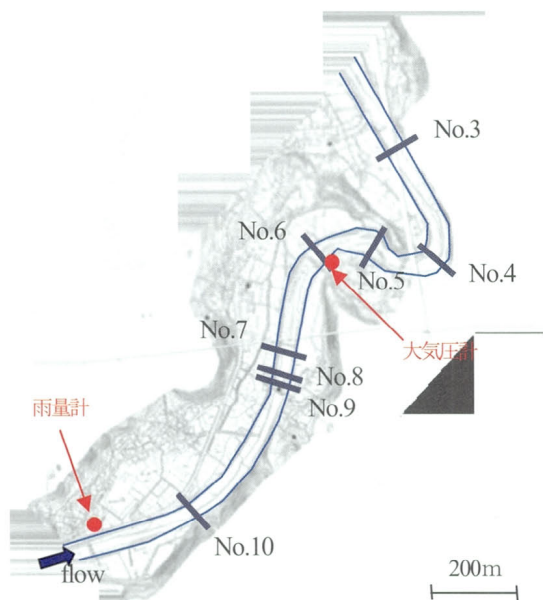


図3 水位計の設置箇所(No.3～No.10 まで約1.8km)

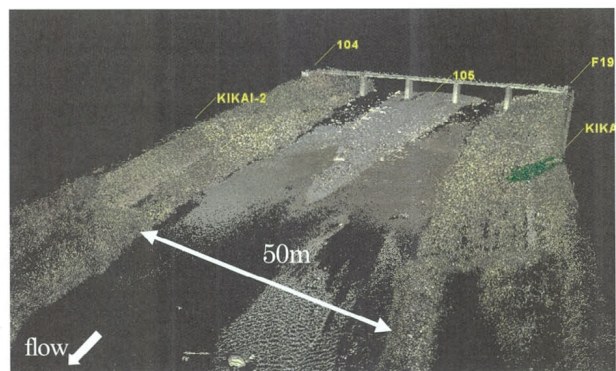
No.10 までの左岸側の天端に、縦断方向に約 50m 間隔で、基準点を設置し、GPS でその位置を計測した。その後、その GPS の値を基準値として、TS を用いて横断形状を 5～10m 間隔で計測した。また、地上設置型のレーザプロファイラ (以下 LP と表記) (ScanStation 2, Leica Geosystems 製) を用いた測量を行った。河床形状に関するデータが乏しい状況にあるため、LP の設置箇所を移動させながら、調査区間とその上下流を含む範囲でデータを迅速に取得した。一例として、図-3 の No.7 断面を含む区間において取得されたデータ (3 次元座標と RGB, 受光強度) を図-4 に示す。

2.3 計算メッシュのデータの作成

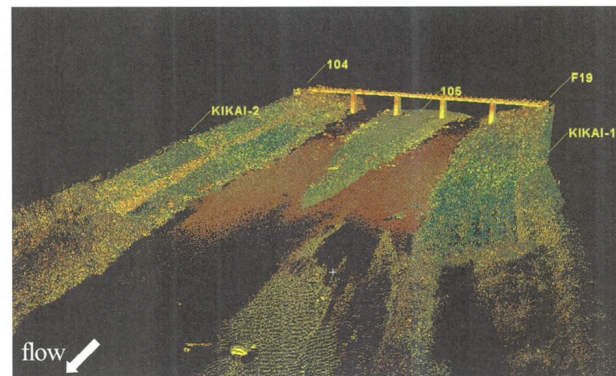
(1) 河床高と流体占有率の算出

後述の 2 次元数値解析では図-3 の No.3 から No.10 断面までの約 1.8 km 区間を解析対象としている。xy 座標系を定義し、この区間の河道を 4m×4m 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) と流体占有率のデータを観測データから作成した。河床高データには、水域を除く領域では LP 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。なお、LP によって取得されたデータは断面形状を高精度で再現するが、植生が繁茂する領域では植生の頂部や葉を検出するケースも多いことが確認されている⁷⁾。そのため、横断面形状を算出する際には LP データを横断面にプロットし、正しいと確認されたもののみを用いた。

図-5 に河床高と流体占有率の算出手順を示す。まず、GPS と TS による横断測量断面を含む計 67 断面の付近の LP データから幅 0.5m 程度でデータを抽出した。その後、抽出された各断面の LP データから、横断面図を作成した。その際、次の 4 点に留意した。すなわち、①内挿補間をした断面形状が正確に表現されるように、河床高の変曲部を



(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4 レーザ測量データの一例 (No.7 断面周辺)

できるだけ抽出すること、②天端の河川側の端点を抽出すること、③植生が繁茂している区域では植生高を推定し (フィルタリングの妥当性を確認して) 正確な河床高を算出すること、④抽出したデータが水域のデータであるかどうかを判定しておくこと、である。④の水域のデータの判定は、観測時に撮影された写真や LP データ取得の際に 3 次元座標と同時に取得された RGB データを用いて行った。また、水域は上述したように、TS と GPS により測量されたデータで補う。次に、このようにして抽出された各横断面形状データを線形補間して、各横断面間に複数の横断面形状を作成した。この時、水域は水域のデータのみ、水域以外は水域以外のデータのみを用いて補間した。なお、これらの横断面形状の補間には LP データは使用しなかった。最後に、このようにして得られた河床高データを補間して計算メッシュの河床高を算出した。

流体占有率は領域内における水の透過できる領域の割合を示す値である。本解析では、堤防からの越流が発生しない場合を対象としたため、各断面から抽出された天端データを基に、河道内の領域 (透過領域)、堤内地で水が流れない領域 (非透過領域) として流体占有率を求めた。

(2) 橋脚と堰の処理

解析対象区間内には、橋が 3 箇所があり、橋脚 (約 1m×2m) が合計で 12 脚ある。本解析では、流体占有率を用いて橋脚の大きさを表現しているが、橋脚による形状抵抗は考慮していない。これは、後述するように、観測された水位の時空間的な分解能が十分には高くないことや、計

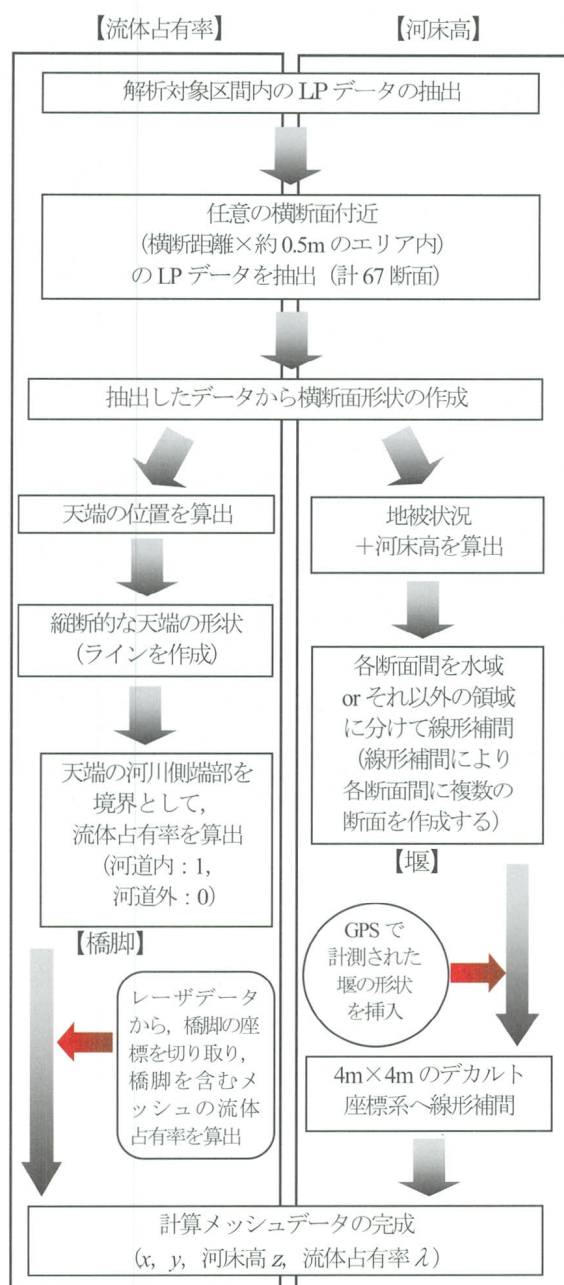


図-5 計算メッシュの特性データの作成手順

算メッシュが $4\text{m} \times 4\text{m}$ とやや粗いために、まずは考慮しないで計算を行った。この点については今後改善が可能である。

一方、堰は解析対象区間内に 1 箇所設置されている。本解析では、この堰の形状を取り入れるため、GPS で測定された詳細な堰の形状データを用いる。その方法は、図-5 に示すように、作成した河道形状に沿う密な河床高データに堰形状のデータを付け加え、その後、線形補間することによって堰の形状を表現した。

(3) 粗度係数

粗度係数の分布を次のように推定した。まず、LP データ (RGB 含む) と写真を用いて、地表面被覆を植生域 1 (高木)、植生域 2 (低木・草)、砂礫域と水域に分類し

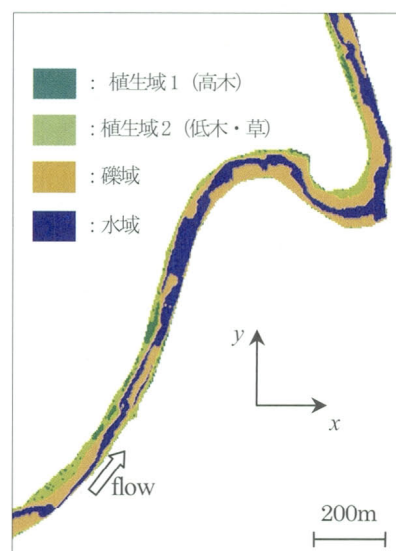


図-6 対象区間の地表面被覆の分類

表-1 粗度係数の分布

地点	No.3	No.4	No.6	No.7
粗度係数	0.040	0.035	0.045	0.069
地点	No.8	No.9	No.10	—
粗度係数	0.055	0.022	0.045	—

た。その結果を図-6 に示す。次に、被覆に応じて粗度係数の初期値を 0.045, 0.040, 0.035, 0.035¹⁰⁾ と与えた。本研究では、植生の繁茂状態に関するデータが十分には得られていないため、樹木群の透過係数を用いず、植生による抵抗は粗度係数で評価することとした。粗度係数の初期値を用いて 2 次元不定流解析を行い、水位の縦断分布の時間的変化を観測結果と比較して粗度係数を全メッシュにおいて試行錯誤的に修正した。水位計を設置したメッシュでの粗度係数の値を表-1 に示す。河床材料だけでなく、植生の影響や河床形状の誤差を粗度係数で考慮しているため、水位計設置箇所の状況が水際ではほぼ一致しているにも関わらず粗度係数が場所的にも大きく変化している。植生による抵抗や粗度係数の評価に関しては更に検討が必要である。

2.4 解析対象の降雨と出水の観測結果

平成 19 年度には観測体制を整備していたが、大規模な出水は発生しなかった。最も高い水位が記録されたのは平成 19 年 8 月 3 日であり、台風 5 号がもたらした降雨が原因であった。その時の湯来東小学校での降水量を図-7 に示す。5 mm を超える降雨は 6 時間程度継続したが、最大の時間降水量は 24 mm/h であり、小規模な出水が発生した。

図-8 に No.3 と No.10 断面での水位ハイドログラフ及びピーク水位時刻と縦断位置の関係、すなわち洪水流の伝播速度を示している。対象区間内に位置する No.5 では水位が測定可能な水位に達しなかったため、欠測となっている。上流端の No.10 での水位のピークは降雨のピークより約 2 時間遅れて生起している。また、No.10 と下流の No.3 地点

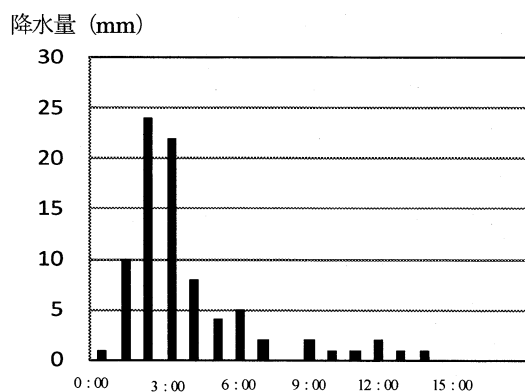


図-7 台風5号による降水量(湯来東小学校, 8月3日)

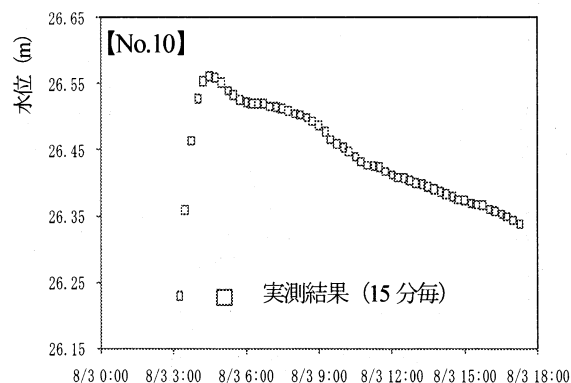
での水位ハイドログラフを比較すると, 減水期の水位低下の速度が両者で異なっている。

ピーク水位の発生時刻は, 2次元解析を用いた流量推定において重要な役割を演ずるため, 注意深く算出することが必要である。ここでは, ピーク付近の水位の観測値を4次多項式で近似し, その近似曲線の最大値からピーク水位の発生時刻を求めた。図より, ピーク水位の発生時刻は, No.10とNo.9の区間を除き, 上流から下流へ向かうにつれて遅れていること, No.9からNo.3まで伝播するのに要する時間はおおよそ10分程度であることがわかるが, No.9からNo.3の間においても距離に依存する結果とは言い難い。しかし, 各断面での水位ハイドログラフでピーク付近を比較すると, ほぼ距離に依存する結果であった。そのためピーク時間の抽出方法について再検討する必要がある。また, 上流の境界条件を与えるNo.10のピーク水位の発生時刻は早くなっており, 洪水流の伝播特性を考慮すると, 十分信頼できる値であるとは言い難い。この誤差の原因が, 計測誤差に因るものか, 地形の影響に因るものかは現時点では不明である。また, No.9からNo.3まで伝播するのに要する時間(約10分)に比して, 水位計測のサンプリング間隔(3分)が大きかったことも水位のピーク時刻の正確さを低下させる原因となった。このため, 洪水流の伝播速度を検討する場合, あらかじめ出水の伝播速度を十分に考慮してサンプリング間隔を設定する必要がある。また, 洪水流の伝播速度を検討する上では, 水位ハイドログラフは十分な精度を有していなければならず, そのためには十分な距離の計算区間を確保し, ピーク水位の発生時刻に十分な時間差が生ずるようにすることが必要である。

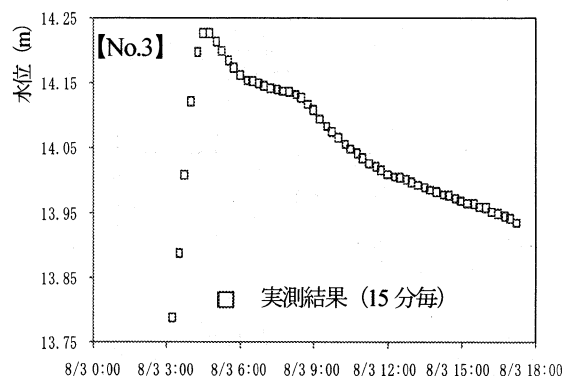
3. 新しい流量推定法

3.1 流量推定法の特徴

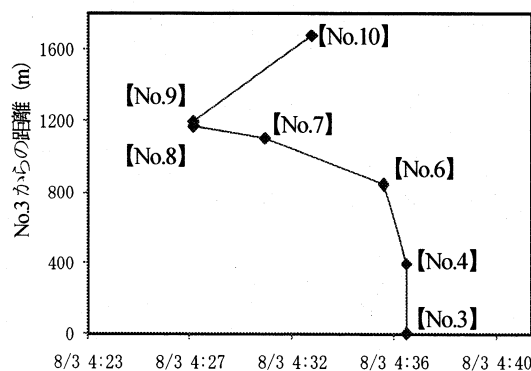
著者らは, 福岡らが提案しその有効性を実証しつつある高精度流量推定法²⁾を改良した方法を提案している⁹⁾。どちらの方法も, 観測水位ハイドログラフを境界条件とし, 2次元不定流解析によって, 洪水流量ハイドログラフを推算する点では同一である。しかし, 福岡らの手法が洪水期間中の流量の観測データを少なくとも1断面で必要とし



(a) 上流端での水位ハイドログラフ



(b) 下流端での水位ハイドログラフ



(c) ピーク水位時刻と縦断位置の関係

図-8 洪水流のピーク水位の伝播(8月3日)

ているのに対して, 著者らの方法では, 流量の観測データを必要とせず, 多点での水位ハイドログラフから算出できる洪水流の伝播特性を用いる点で異なっている。本流量推定手法のフローチャートを図-9に示す。本流量推定法では, 解析結果(水位の縦断変化とピーク水位の発生時刻)について, 多点で観測された水位ハイドログラフと比較し, 両者の差が大きい場合には粗度係数を修正し, 差が小さくなるまで計算を繰り返す。

また, 著者らの2次元数値モデルは, 河道内の流れだけでなく氾濫流も同時に解析でき, さらに計算精度を低下させないようにして, 実用性を高めたものである。すなわち, 著者らの2次元数値モデルでは, 境界適合座標系などの曲線座標系でなくデカルト座標系を利用し, メッシュ内の遮

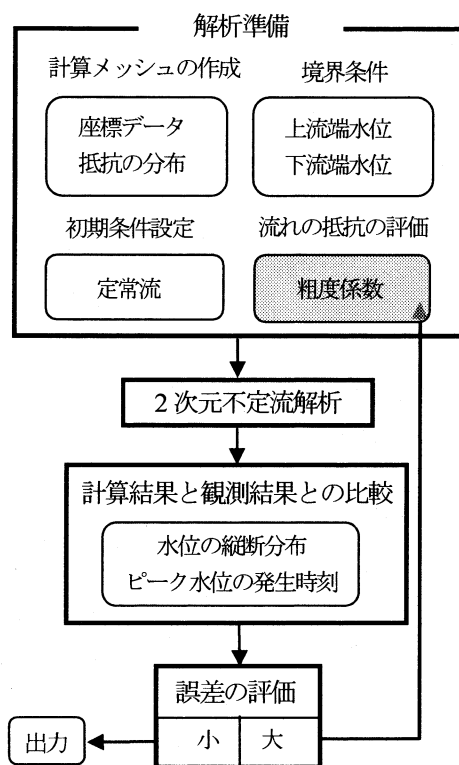


図-9 本研究での流量推定のフロー

蔽物の存在を流体占有率で表現し、高精度かつ安定な移流解法として CIP-CSL2 法⁸⁾を用いる陽解法である。CIP 法により物理量の計算格子内の分布を考慮した解析を行うことが可能となるため、様々な境界条件を考慮した解析を可能としている。以下にその手法の要点を説明するが、詳細については文献9)を参照されたい。

3.2 流れの基礎方程式

デカルト座標系で任意の境界形状を評価するため、基礎方程式は、図-10に示すように不透過の境界領域を考慮してコントロールボリューム（以下 CV と表記）内で平均化された、連続式(1)と運動量方程式(2)である。

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

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

ここで、 h : 水深、 u_i : 方向の流速、 $\zeta = z + h$ (z : 鉛直方向)であり、 λ は流体占有率である。 τ_{0i} は i 方向の底面剪断応力であり、次式で与える。

$$\tau_{0i} = g u_i \sqrt{u_j u_j} \frac{n_b^2}{h^{1/3}} \quad (3)$$

ここに、 n_b は底面のマンニングの粗度係数である。 τ_{ij} は分子

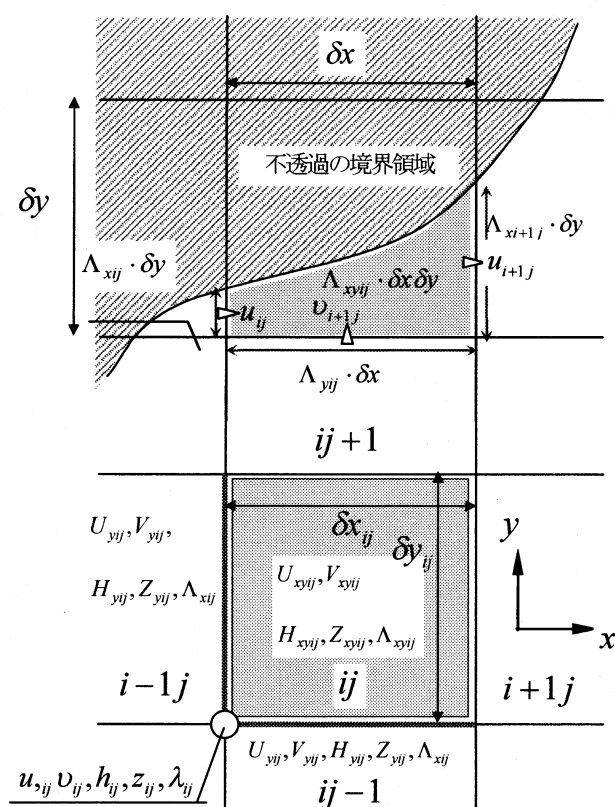


図-10 不透過の境界領域を空隙率で表現したコントロールボリューム（上）と本解析における主要な変数の配置（下）

粘性とサブグリッドスケールの流体混合による水平応力テンソルの水深平均値であり、CV内の流体部に作用する応力としている。後者については渦粘性モデルで与える。

$$\tau_{ij} = 2\nu S_{ij} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot k \quad (4)$$

ここで、 ν は動粘性係数 ν_m と渦動粘性係数 ν_t の和である。 S_{ij} は水平方向のひずみ速度テンソルであり、式(5)で定義される。

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

渦動粘性係数 ν_t の評価には、樹木群等による平面渦の解析に用いられている以下の1方程式モデルを用いる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\lambda h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \lambda h \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P - \varepsilon \\ & P - \varepsilon = \nu (2S_{ij}^2) + C_k \frac{u_*^3}{h} - C_\varepsilon \frac{k^{3/2}}{\Delta} \\ & \nu = \nu_m + \sqrt[3]{C_s^4 C_\varepsilon \cdot \Delta k^{1/2}} \end{aligned} \quad (6)$$

モデル定数は既往の研究¹¹⁾⁻¹³⁾を参考に、 $C_s=0.2$ 、 $C_\varepsilon=1.0$ としている。ただし、現地河川への適用にあたり、モデル定数値が妥当であるかどうかについては今後の検討を要する。 u_* は底面摩擦速度である。また、 C_k は、平衡状態において式(7)のゼロ方程式モデルに帰着するように、式(8)で

与えることとする。この際、 Δ をグリッドスケールとして、 $\Delta=(\Delta x \Delta y)^{1/2}$ で与える。

$$v = v_m + c_h u_h, \quad c_h = \kappa / 6 \approx 0.7 \quad (7)$$

$$C_k = c_h^3 (h / \Delta C_s)^4 \quad (8)$$

3.3 境界条件

上流と下流の境界条件については、上下流端に pond 部を設け、対象とする地点の水位の観測結果と解析結果が一致するように、pond 部に水位変動を与えた。本解析での境界は上流端が No.10、下流端が No.3 である。

3.4 解析法のフロー

基礎方程式の移流項の解法には CIP-CSL2 法を採用している。これにより、保存性が保証されるだけでなく、物理量の方向積分値を解くことになるため、水深 h や流速 u 以外の量が評価しやすくなるのみならず、複雑な境界条件への適用性を増している。図-10 に不透過の鉛直壁を空隙率で表現したコントロールボリュームと本解析における変数の配置を示す。一般に CIP 法では staggered 格子で流速とその方向微分値が連立されて解かれるが、本研究では計算格子 j において、格子の交点の値(点値、小文字の変数)、 xy 方向の格子一辺にわたる平均値(線平均値、添字 x もしくは y の大文字の変数)、格子内にわたる平均値(面平均値、添字 xy の大文字の変数)を同時に解くことによって、流速値の補間を必要としないようにしている。

2次元不定流解析のフローチャートを図-11 に示す。従来の CIP 法と同様に、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、連続式では水深を計算する。連続式の解法には R-CIP-CSL2 法を用いて陽的に計算する。

4. 出水時の数値解析結果と考察

4.1 水位の縦断分布

図-12 において水位の縦断分布の時間変化について観測結果と解析結果を比較している。図より、水位の解析結果と観測結果は増水期、減水期ともほぼ一致していることが知られる。ただし、流下方向の標高差に比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。そこで次に各地点の水位ハイドログラフを比較する。

4.2 水位ハイドログラフ

図-13 に各断面における水位ハイドログラフの観測結果と解析結果の比較を示す。上・下流の境界条件を与えている No.10 と No.3 では、観測結果と解析結果がほぼ一致しており、適切に境界条件が与えられていることを確認できる。また、No.8 と No.6 では、減水期(8月3日15:00以降)

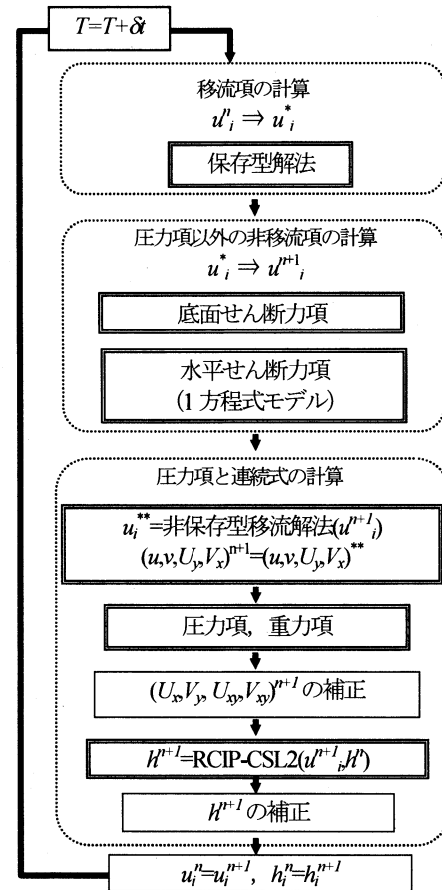
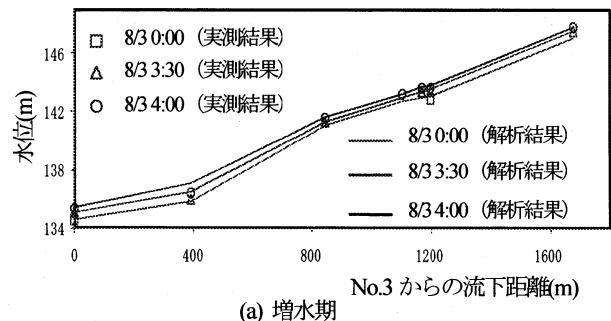
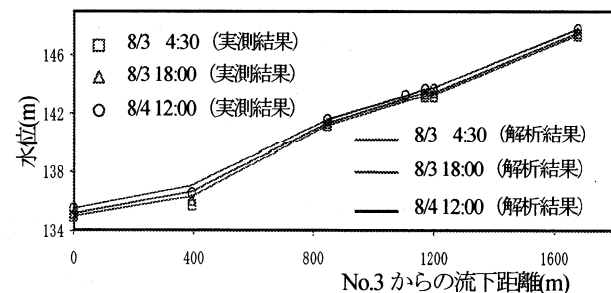


図-11 保存型陽解法のフロー



(a) 増水期



(b) 減水期

図-12 水位の縦断分布

で多少の誤差が見られるものの、解析結果は良好に観測結果を再現している。

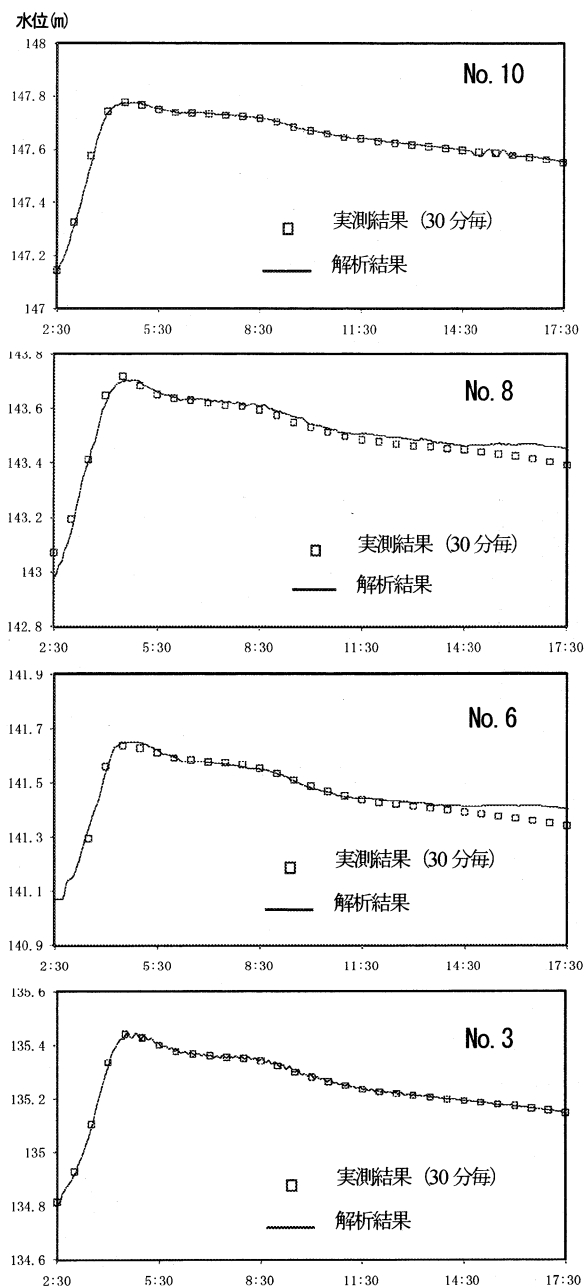


図-13 水位ハイドログラフ (8月3日)

4.3 流量ハイドログラフの推算

図-14 に本解析で得られた流量ハイドログラフの一例を示す。なお、流量ハイドログラフは図の上に示した断面で算出している。図から、ピーク流量は $43 \text{ (m}^3/\text{s)}$ 程度で小規模なものであったと推定される。ただし、その推定値の妥当性は、本出水に対する流量観測が行われていないため、直接的に検証することはできない。そこで、低水時の現地観測と数値計算をもとに別途ピーク流量を推定し、検証を試みることにした。

5. 低水時の現地観測と数値解析

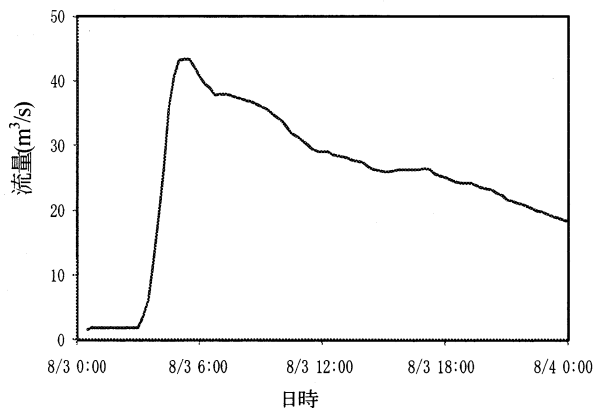
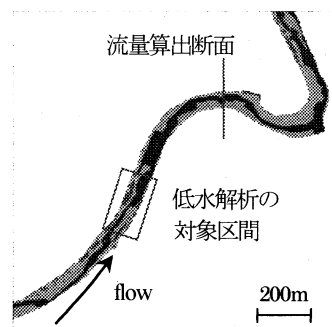


図-14 流量ハイドログラフとその算出地点

5.1 調査区間

図-14 の上図に示す区間内で流路が比較的直線的であり、下流の影響を受けない流況であることが望ましいため、堰を有する区間を探した。その結果、図に四角で示した区間 (図-3 の No.9 下流の約 130m の区間) において、低水流量を対象とした現地観測と数値解析を実施することとした。現地調査は平成 19 年 11 月に行った。台風 5 号による出水が小規模であったため、河床形状は変化していないものと仮定した。

5.2 調査項目

低水時に横断測量、流速・流量の測定、レーザ測量を行った。低水流況の再現性を高めるために、横断測量では測量間隔を約 5m として河床形状をより詳細に計測した。得られたデータから作成された河床形状を図-15 に示す。

数値解析手法の検証のために、流速測定と水位の計測を行った。流速測定には電磁流速計を用い、2 点法により平均流速を算出した。流向・流速の測定は 6 断面で行い、流量を算出した。6 断面で得られた流量は $0.63 \sim 0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。また、同一日に、この調査区間の約 100m 上流の断面において ADCP (Stream Pro, SEA 製) を用いて繰り返し流量を計測し、流量 $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ の値を得た。この値を検証用の低水流況の解析に用いた。

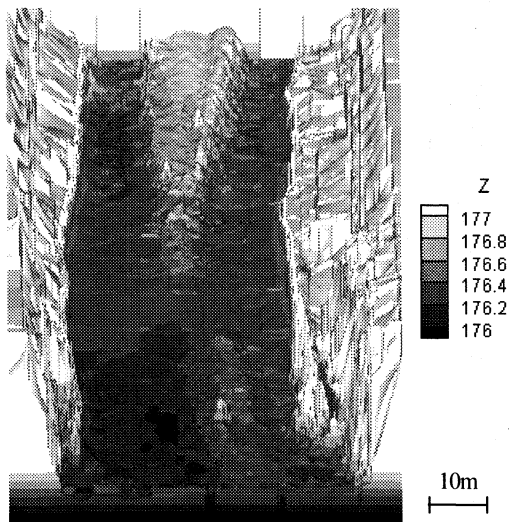


図-15 低水解析に用いる河床高コンター

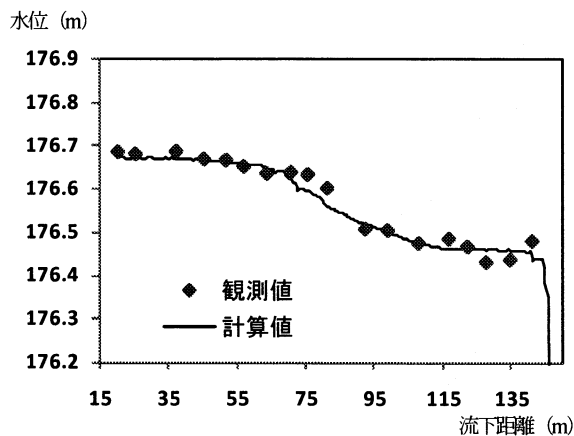


図-16 水位の縦断分布の比較

5.3 低水流況の数値解析

低水流況に対する2次元数値解析を行った。解析手法や基礎方程式は3章で述べた手法と同じである。計算対象が低水時の流況であり、微地形を表現するために50 cm×25 cmの計算メッシュを用いた。また、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。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。また、流体占有率は全域で1.0とした。マンニングの粗度係数は植生域への侵入がないため、全領域で一定値とする。また、与えた粗度係数は、値を変化させて計算結果と観測結果の縦断水位が一致する粗度係数を検討し、0.035の値を与えた。

(1) 水面形

図-16に解析結果と観測結果の水位の縦断変化を比較している。図より、本解析結果は観測値を良好に再現してい

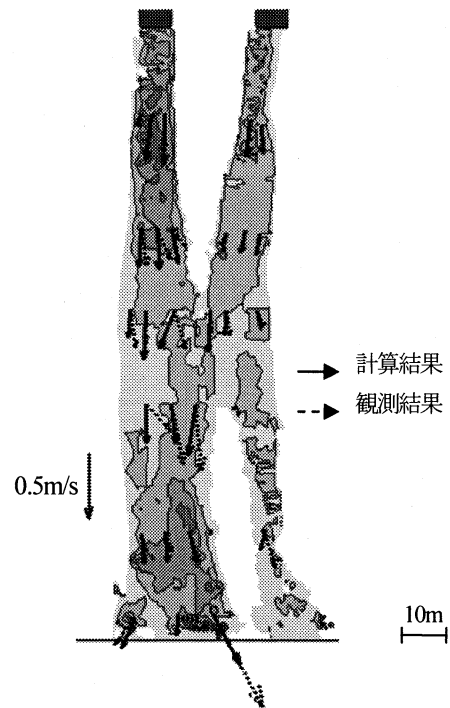


図-17 流速ベクトルの比較

ることが確認できる。

(2) 流速ベクトル

図-17に計算で得られた水深コンター上に計算と観測の流速ベクトルを重ねて示す。破線が観測結果、実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。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るが、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。なお、下流端の堰付近を除き、多くの地点では2点法で計測した流向はほぼ平行であった。

(3) 水位－流量曲線

上流端の境界条件である流量を変化させて同様な計算を行い、図-3のNo.7地点において水位－流量曲線を作成した。なお、粗度係数は計算区間全域で0.035とした。また、上流端での左右岸側の流量比は観測された流量比のままであると仮定した。得られた結果を図-18に示す。No.7の水位計でのデータによると、台風5号時の最高水位は177.07 mであった。したがって、今回作成した水位－流量曲線を用いると、台風5号による最高水位での流量は40 m³/sであると推定できる。この結果は、前述の、著者らが提案している流量推定法による流量43 m³/sとほぼ一致する。原理が異なる2つの方法でほぼ同一の値を与えることから、著者らによる流量推定法は、河床変動が無視できる条件下での流量ハイドログラフの推定に使用できる可能性が示されたと考えられる。ただし、本解析では粗度係数を全区間、全水深で変化しないものとしており、その粗度係数の値は表-1の値より小さい。今後、粗度係数

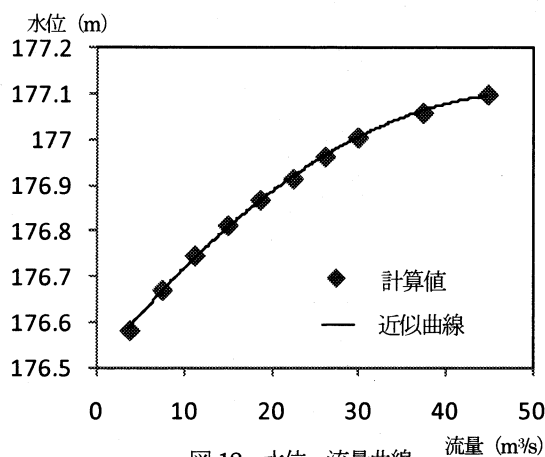


図-18 水位-流量曲線

の場所的な変化や水位上昇による植生の抵抗の変化を考慮した解析を行い、H-Q 曲線の信頼性を高めることが必要である。

6. 結論

著者らが提案している流量推定法の適用性を検討するために、広島県の水内川において出水を対象として現地観測を行った。平成 19 年度では最大規模であった台風 5 号による出水に対して流量ハイドログラフの推定を行った。しかし、その出水の規模は小さく、検証データも不十分であったため、低水流況に対する 2 次元数値解析を行い、水位-流量曲線を作成し、2 つの異なる方法で得られた流量を比較した。それらから以下のような知見が得られた。

- 1) 流量の観測結果を使わず、多点での水位観測データを用いて、台風 5 号時の流量ハイドログラフの推算を行い、ピーク流量を $43\text{m}^3/\text{s}$ と推定できることを示した。
- 2) 低水を対象とした水位-流量曲線から、台風 5 号の出水のピーク流量を $40\text{m}^3/\text{s}$ と推定した。
- 3) 2 つの異なる方法が同程度の流量を算出することが確認され、著者らが提案している流量推定法が実河川の洪水に適用できる可能性が示された。

また、今後の課題として以下のことが判明した。

- 1) 流量の推定精度を直接的に検証するために流量観測を行うことが望ましい。
- 2) 本流量推定法を活かすためには、その出水の伝播速度を精度良く把握できるサンプリング間隔、方法で水位を計測する必要がある。
- 3) 急流河川における大規模な洪水流量の推定精度を向上させるためには、本流量推定法に河床変動を考慮することが必要である。

謝辞

現地調査に際して広島県土木局土木整備部と復建調査設計株式会社の方々から多くの支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 喜沢一史, 井出康郎: 河川流量観測における新計測法の提案について, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp.485-490, 2001.
- 2) 渡邊明英, 福岡捷二, Mutasingwa, A.G., 太田 勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常 2 次元解析, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.427-432, 2002.
- 3) 福岡捷二, 永井慎也, 佐藤宏明: 河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ, 貯留量の評価—利根川・渡良瀬川の平成 13 年 9 月洪水を例として—, 水工学論文集, 第 49 巻(1), pp.625-630, 2005.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 田端孝輔, 風間聡, 牛腸宏: 利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1165-1170, 2006.
- 5) 森下祐, 内田龍彦, 河原能久: 水位ハイドログラフと二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.
- 6) 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.
- 7) 内田龍彦, 河原能久, 山水綾, 渡辺豊, 森山学: ヘリコプタに搭載した高精度 3D レーザスキャナによる河川の物理環境の計測, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.243-248, 2007.
- 8) Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T. and Takizawa, K.: Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, Journal of Computational Physics, Vol. 174, 171-207, 2001.
- 9) 内田龍彦, 河原能久: 地形変化を有する二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.
- 10) 建設省河川砂防基準(案)同解説 調査編, 建設省河川局監修, 社団法人日本河川協会編, 山海堂, 1997.
- 11) 灘岡和夫, 八木宏: 浅い水域の乱流場に関する数値解析モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No.473/II-24, pp.25-34, 1993.
- 12) 清水義弘, 辻本哲郎, 小葉竹重機: 平衡植生流れと浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.845-850, 1997.
- 13) 中山恵介, 堀川康志, 江島敬三: 樹木群を考慮した浅水流モデル, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.801-806, 1999.

(2008 年 4 月 14 日 受付)