

本川からの影響を考慮した支川合流の浅水流モデルによる 1次元水面形計算に関する検討

(一財) 砂防・地すべり技術センター ○嶋 大尚 青木尊之 藤田正治
東京科学大学 総合研究院 Marlon Arce Acuna

1. はじめに

土砂・洪水氾濫の予測は、施設配置計画やハザードマップの作成に不可欠であり、1次元河床変動計算は実務において広く用いられている。しかし、本川と支川の合流点付近は2次元的な影響も含まれる複雑な区間であり、合流に伴う本川及び支川の堰上げ水位を精度よく計算することが不可欠である。

近年も支川合流点付近での土砂・洪水氾濫が発生している。令和2年(2020年)7月豪雨では、川辺川との合流による球磨川本川の水位上昇がバックウォーターを引き起こし、土砂・洪水氾濫が発生した。このように、合流地点における水面形の計算精度がきわめて重要であることが改めて認識されている。

流域スケールの1次元計算では、計算の簡略化のために支川と本川の合流の影響を無視する 경우가多い。しかし、土砂・洪水氾濫で合流点が流況のネックポイントとなる現象においては、合流に伴うバックウォーターを適切に考慮すべきだが、今行われている多くの計算では流域スケールの計算として無視していることが多いが、これは大きな問題である。

実際の合流は、支川が本川と接する一定区間から連続的に流入するものであり、この取り扱いの差異が計算精度に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、1次元計算とMT-Flowによる高精度2次元計算[1]との比較を行い、合流点の取り扱いが水位計算精度に与える影響を定量的に評価するとともに、1次元計算の精度を向上させる手法を提案する。なお、2次元計算は合流部の流れを平面的に解くことができるため、1次元計算の精度検証における参照値として用いる。

2. 計算条件

河床変動計算の計算水路の形状を図1に、計算条件を表1に示す。

河道の流れは等流状態で本川・支川ともに常流であり、本川流量 200(m³/s)、支川流量 80(m³/s)を定常状態で流した。水路の横断形状は本川幅 50m、支川幅 30m 矩形断面で全区間固定床で水面形の計算を行った。(流量は一定である。)

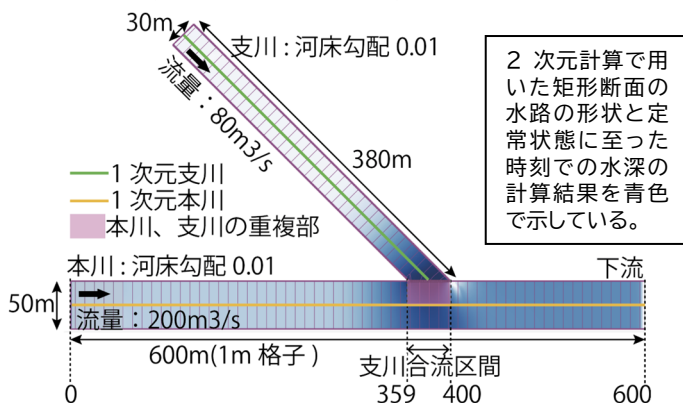


図1 合流する2次元矩形断面水路の形状と1次元計算の流路(等高線は2次元水路の河床形状を示す)

表1 計算条件一覧

項目	本川	支川	備考
河床勾配	1/100	1/100	
川幅	50 m	30 m	矩形断面
流量	200 m ³ /s	80 m ³ /s	定常流
粗度係数	0.04	0.04	
合流角度	—	45°	本川に対して
流れ	緩勾配水路	緩勾配水路	
計算格子	1 m 格子	1 m 格子	1次元・2次元共通
上流端境界条件	等流水深 等流流速	等流水深 等流流速	—
下流端境界条件	限界水深 限界流速	計算結果を 与える	—

3. 計算手法

1次元河床変動計算には、HLL (Harten-Lax-van Leer) 法を用いた。HLL 法は、双曲型偏微分方程式である浅水方程式を保存則の形で離散化し、リーマン問題の近似解を用いて界面フラックスを評価する有限体積法の一つである。本手法は、流れが射流・常流を遷移する場合や、跳水・衝撃波的な現象が生じる場合においても数値的安定性を保ちながら計算できる点の特徴であり、急勾配河川や合流点のような水理的に複雑な箇所の計算に適している。時間積分には3次のRunge-Kutta法を採用した。

4. 本川への支川流入流量の計算方法

支川からの流入を考慮した本川の水面形の計算を行うためには、連続式と運動方程式の左辺のそれぞれ第1項に支川からの流入量 q と支川流速 w を加えれば支川の影響を考慮した本川の水面形が計算できる。そこで、図2に示す支川最下流端の水深(h_{sj})と流速(w_j)を精度よく求めるために、境界条件として本川合流点位置にゴーストセルを作成した。ゴーストセルの水深(h_{i+1})は本川合流地点の水深を用い、ゴーストセル上の支川流速 w_{i+1} は $(u_{i+1})\cos\theta$ とした。ゴーストセルの川幅は支川最下流端のセルの川幅と同じとしているため、ゴーストセルの通水断面積 A_{i+1} は $(h_{i+1}) \times (B_{sj})$ としている。図2に示すように、1次元計算における本川(オレンジライン)と支川(緑ライン)の計算領域は、合流区間において空間的に重複する部分が生じる。2次元計算との比較を行う際には、この重複を避けるため、本川については図1のオレンジラインの位置、支川については緑ラインの位置における水深等の水理量をそれぞれ抽出し、比較対象とした。

水の連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

水の運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(Au) + \frac{\partial}{\partial x}\left(Qu + \frac{1}{2}gh^2B\right) = qw \cos\theta + gA(i - i_e)$$

A：通水断面(Bh), B：川幅, h：水深
 Q：本川流量, q：支川流量, u：本川流速
 w：支川流速, g：重力加速度, θ ：支川流入角度
 i：河床勾配, i_e ：エネルギー勾配

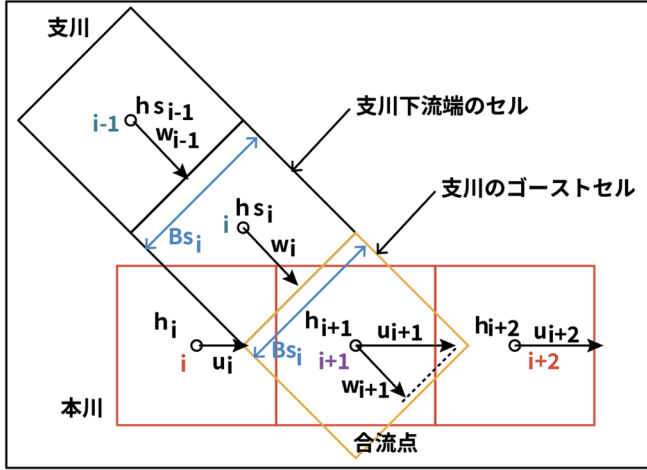


図 2 支川下流端の境界条件

5. 水面形の比較 (1次元・2次元)

2次元計算は合流部の流れを平面的に解くことができるため、1次元計算の精度検証における参照値として用いる。

1次元計算は、本川に対する支川流量の与え方を表2のように変えて3ケース計算した。

表 2 本川に対する支川流量の与え方

Case	支川流量の与え方
1	本川の400m地点の1メッシュに全支川流量を与える。
2	本川が支川と接する42個のメッシュに支川流量を均等分割して与える。
3	2次元計算で本川が支川と接する42個のメッシュの支川流量の配分を求め、その配分で支川流量を本川に与える。

図3は2次元計算で本川と支川が接する42個の場所と各メッシュのy方向の流量 Q_y を示す。本川に角度をもって合流する場合、合流区間において下流側に流量が集中する傾向がある。

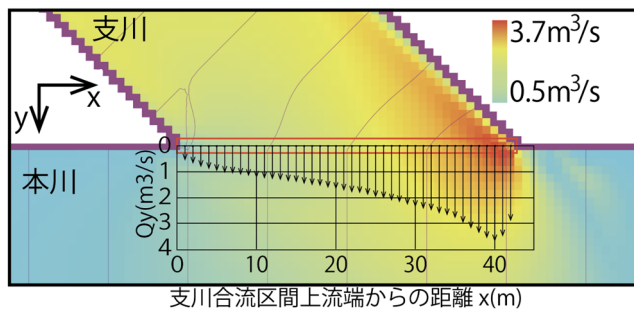


図 3 各メッシュでのy方向の流量 Q_y

図4、図5はこれらの1次元計算ケースと2次元計算の水面形を本川・支川で比較したものである。

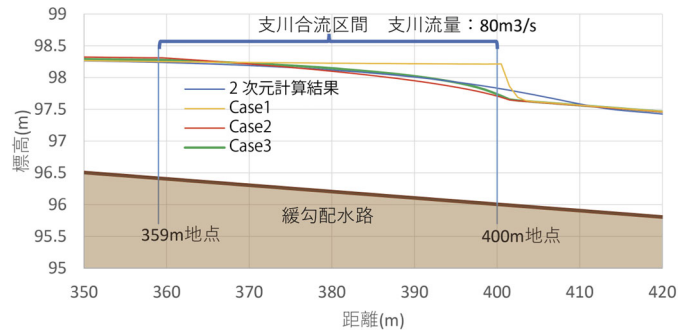


図 4 支川合流点付近の本川縦断面図

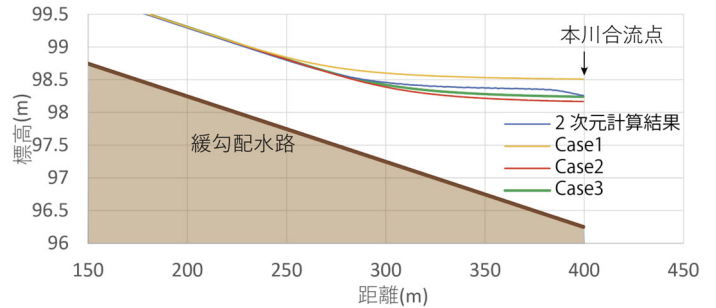


図 5 本川合流点付近の支川縦断面図

これらを比較した結果、本川の水面形については支川流量の均等配分を行えば実用的な精度になるが、より精度を向上させるためには、流量配分比の検討が必要となる。一方、実際の流量配分比は支川の勾配・川幅・流量・合流角度等の条件によって変化すると考えられる。これらのパラメータを系統的に変えた場合の配分特性の解明は今後の課題である。

また、合流区間の本川水位を適切に再現することは、支川バックウォーター計算における最下流端境界条件の精度向上につながり、支川の水面形計算の信頼性向上に直結する。

6. 今後の展望

本研究では仮想的な矩形断面水路を用いた検討にとどまったが、今後は実河川を対象に2次元計算を実施し、その結果を参照値として1次元計算との比較・検証を行う予定である。図6に実河川における2次元計算結果の一例を示す。

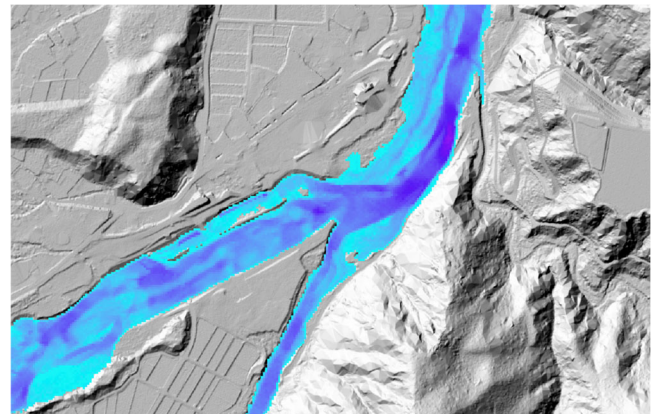


図 6 実河川における2次元計算結果の一例

7. 参考文献

[1] 青木尊之・嶋大尚・吉田真也・Marlon Arce Acuña (2023)：1メートル格子を用いた広域の2次元土砂・洪水氾濫シミュレーション, 令和5年度砂防学会研究発表会概要集, R2-4, pp. 101-102.