

連続した湾曲部における流れの再現計算

○筑波大学生命環境系 水野秀明
筑波大学大学院生命環境科学研究科 安海高明
筑波大学大学院生命環境科学研究科 関根敬

1. はじめに

崩壊や地すべりがダム貯水池や河川に急激に流れ込むと、その土塊が水を押しのけることによって段波が生じる。河川の地形的な条件やその時点における水理量の条件によっては、その段波は下流だけでなく上流側にも伝播し、被害を発生させる。例えば、平成 23 年 7 月に高知県東部を流れる奈半利川での事例やイタリア共和国北部のパイヨントダムでの事例が有名である。従って、土砂災害による被害を軽減するために、避難路と避難場所を検討するうえで、このような段波の発生も考慮すべきといえる。

崩壊や地すべりの発生に伴う段波の遡上を予め推定する手段として数値計算は非常に有効である。本研究で対象としている現象は主に山地流域で発生するため、数値計算は急峻な地形や、ウェットベッド問題とドライベッド問題の混在といった条件下でも良好な精度を有するべきである。さらに、数値計算は溪流や渓谷のように流路の湾曲や合流点といった箇所において生じる、局所的な衝撃波を考慮したものでなければならない。

このような観点から、著者らは有限体積法を基本とし、局所的に保存則を満たし、さらに局所的な衝撃波や希薄波を考慮した手法でフラックスを計算する方法を検討している（例えば MIZUNO And ANKAI, 2013）。本研究で対象としている現象では、湛水池内で水が静止している状態も考慮しなければならないが、セルアベレージ法のように計算要素内で変数を平均化する手法を適用した場合には考慮できない。そのため、数値計算は所謂 C プロパティ (ALFREDO BERMUDEZ and M'ELENA VAZQUEZ, 1994) を満たすような方法（例えば、R. Akoh, S. Li, and F. Xiao, 2007）で行わなければならない。しかしながら、C プロパティを考慮した数値計算では、著者らの調べた範囲内では Roe 近似を用いたもの (ALFREDO BERMUDEZ and M'ELENA VAZQUEZ, 1994) や 2 次元の特性曲線 (岩佐ら, 1981) による近似を用いた手法 (R. Akoh, S. Li, and F. Xiao, 2007) によってフラックスを算出する場合が多く、局所的な生じる衝撃波や希薄波を十分に考慮してフラックスを算出しているわけではない。

このような背景から、著者らは C プロパティを保持できるように、著者らがこれまでに開発してきた手法 (MIZUNO And ANKAI, 2013) を改良している。しかしながら、いわゆる C プロパティの保持に重点をおいて、湾曲部での流れの再現精度が低下すると良くない。そこで、本研究では C プロパティを保持できるように改良した数値計算の手法を湾曲部に適用し、その計算精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 数値計算の概要

基礎方程式は 2 次元浅水流方程式である。この 2 次元浅水流方程式を平面 XY 上で曲線 C で囲まれた計算要素 S 内で積分すると、式 (1) となる。

$$\iint_S \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} dS + \int_C \mathbf{A} \vec{n} dC = \iint_S \vec{S} dS \dots (1)$$

ここで、 \vec{q} は変数ベクトル、 \mathbf{A} は X, Y 方向フラックスのテンソル、 \vec{n} は曲線 C に対して垂直な方向の単位ベクトル、 \vec{S} は湧き出し項で、それぞれ以下ようになる。

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} h \\ Uh \\ Vh \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} Uh & Vh \\ U^2 + 0.5gh & UVh \\ UVh & V^2 + 0.5gh \end{bmatrix}, \vec{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \tau_{bx} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \tau_{by} \end{bmatrix} \dots (2)$$

ここで、 h は水深、 U, V は速度の X, Y 方向成分、 g は重力加速度 (9.81 m/s^2)、 z_b は水路床の標高、 τ_{bx}, τ_{by} は底面摩擦力の X, Y 方向成分で本研究では Manning 型の式を適用した。本研究では第一段階として式(1)の右边を零ベクトルとして変数 \vec{q} を更新し、第二段階として更新した \vec{q} を用いて式(1)の右边を計算し、式(1)の左辺第一項を前進差分によって変数 \vec{q} を更新する。式(1)の左辺第二項の詳細な計算方法は H. MIZUNO and T. ANKAI(2013)を参照していただきたい。

水野 (2013) は計算要素内のフルード数に応じて水面勾配を設定したが、本研究では計算要素内で渦度が生じないと仮定して、速度ベクトルが零ベクトルの場合に水面勾配を水平、そうでない場合には水面勾配を堆砂面の勾配と同じとした。また、本研究では計算要素を三角形としたが、その各辺上において水深が変化する。そこで、辺をウェットベット状態である区間とドライベッドである区間に分けて、それぞれの区間の始点、終点及びその中間点においてフラックスを算出し、それらの値からシンプソンの公式により辺を通過するフラックスの総量を近似した。

3. 再現計算と考察

本研究では、水野ら (2004) で報告された水路実験のうち Case1 を対象として再現計算を行った。図-1 は計算に用いた計算要素を示したものである。流路は中心角が 90 度、曲率半径が 1m の湾曲部を二つ有する。水路幅は 25cm で、勾配は湾曲区間の上流で 18 度、その下流で 9 度である。兩岸は 45 度の勾配である。チューブポンプを

用いて水路上流端から 8.31 リットル毎秒の割合で水を供給した。水路床には砂を貼り付けてある。湾曲部では所定の位置（5断面）でポイントゲージにより水位を計測した。その他、水路の詳細な形状と詳細な実験方法は水野ら（2006）を参照していただきたい。なお、水野ら（2004）の計測結果から水路の粗度係数を推定すると、0.036 程度であった。そこで、この数値を計算に用いた。

図-2 から 4 は粗度係数 0.005 の断面 1, 2, 4 での水位の計測結果及び数値計算の結果である。図中の実線は第 2 章で示した方法で計算した結果で、点線は計算要素内の変数をセルアベラージュ法で算出した場合の計算結果である。この結果によれば、改良と従来の場合共に、計算結果は兩岸において概ね一致したものの、流路の中心付近では計測結果よりも高くなった。この原因の一つに 2 次元浅水流方程式では鉛直方向の加速度が無視できるほど小さいと仮定している一方で、実際の現象では無視できるほど小さくなかったためと推測できる。この点については今後の検討課題としたい。しかしながら、C プロパティの保持を考慮した計算結果も概ね実験結果を再現できていたことから、今回提案した方法は湾曲部における精度を大きく低下させないことが分かった。

4. おわりに

本研究で提示した手法を湾曲部に適用し計算精度に及ぼす影響を見たところ、本研究で提示した手法による計算結果は実験結果を概ね再現できていたことから、計算精度を大きく低下させないことが分かった。また、湾曲部での鉛直方向の加速度による影響が計算精度に影響を及ぼしたことが推測された。今後はこの点の改良方法を検討すると共に、本研究で提示した手法を実際に発生した崩壊とそれに伴う貯水池での段波の形成事例に適用して、計算精度を明らかにしていきたい。

引用文献

- R. Akoh, S. Ii, and F. Xiao (2007): A CIP/multi-moment finite volume method for shallow water equations with source terms, *Int. J. Numer. Fluids*, 56, p.2245-2270
- A. BERMUDEZ and M. VAZQUEZ (1994): UPWIND METHODS FOR HYPERBOLIC CONSERVATION LAWS WITH SOURCE TERMS, *Computers Fluids* Vol. 23. No. 8, p. 1049-1071
- 岩佐義朗、井上和也、吉田英信（1981）：特性曲線法による二次元平面流れの数値解析法に関する 2, 3 の検討、京都大学防災研究所年報第 24 号 B2, p.387-396
- H. MIZUNO and T. ANKAI(2013): Study on Surge Triggered By Debris Flow Plunging Into River, *The 4th International Workshop On MULTIMODAL SEDIMENT DISASTER*, p.51-56
- 水野秀明(2004) : S 字型湾曲部の流下痕跡から土石流の流速を推定する方法に関する実験的研究、*茶房学会誌* Vol.57, No.4, p.56-59
- 水野秀明(2013) : 土石流の突入による水位変化の推定手法の改良、平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集 B, p.268-269

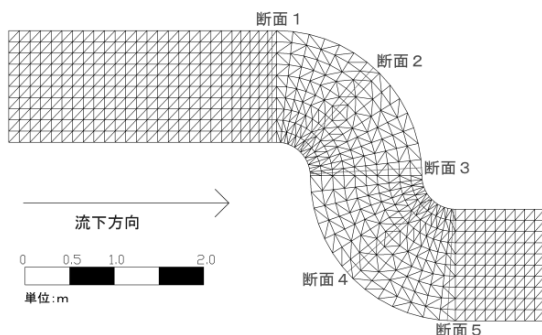


図-1 計算に用いた計算要素

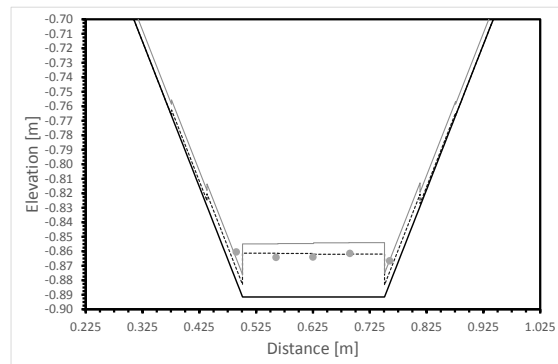


図-2 断面1における計算結果

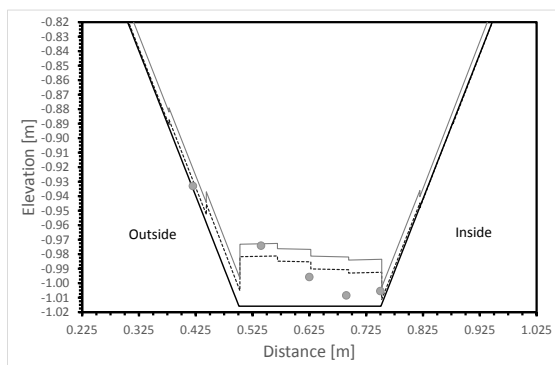


図-3 断面2における計算結果

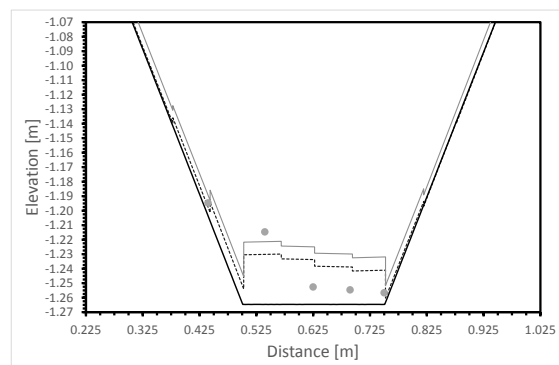


図-4 断面4における計算結果