

## 水の急激な流入による湛水池の水位変化の再現計算

○筑波大学大学院生命環境科学研究科 関根敬  
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

## 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バ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。

そこで、本研究では、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、余り複雑ではない地形条件の下での適用性を明らかにする。なお、本研究は既往の水路実験を再現することによって、適用性を検討した。

## 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 ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )、 $z_b$  は水路床の標高、 $\tau_{bx}, \tau_{by}$  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)の右辺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)の右辺を計算し、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 (2006) で報告された水路実験のうち Case5 を対象として再現計算を行った。図-1 は実験に用いた水路の形状と計算に用いた計算要素を示したものである。水路の上流端には貯水槽、下流端には湛水池を模した水槽を設置した。貯水槽と水路の接合部にはスルースゲートを設けた。水路は 16.7 度傾けて設置した。Case5 では、貯水槽に深さ 0.25m、湛水池を模した水槽に最大で深さ 0.56m で水をためておき、それらの水面が変動しな

くなってから、素早くスルースゲートを持ち上げて、湛水池に模した水槽内の指針の変化を計測した。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。

水野ら（2006）の計測結果から水路の粗度係数を推定すると、0.01 程度であった。そこで、計算に際して、粗度係数は 0.01 の場合と、比較のため 0 の場合の 2 種類実施した。

図-2 は粗度係数 0.01 の場合における、水路の中心線上での水位の時間変化を示したものである。図-3 は粗度係数 0 の場合における、水路の中心線上での水位の時間変化を示したものである。上流の貯水槽から流れ出た水は粗度係数 0.01 の場合で 1.4 秒後、粗度係数 0 の場合で 1.3 秒後に湛水池を模した水槽に到達した。この時刻を 0 秒として、湛水池を模した水槽において計測した水深の変動量の時間変化を示したものが図-4、5 である。

図-2、3 より、湛水池を模した水槽における水面は上流から水が流れ込む直前までで水平を保った。これにより、本研究で提案した手法は C プロパティを保持できることが分かった。また、図-4、5 より水深の計算結果は粗度係数 0 の場合で実験結果と概ね一致したが、粗度係数 0.01 の場合で計測地より低くなった。これは粗度係数の推定値の精度の問題もあると考えられるため、その原因を今後検討していきたいと考えている。

#### 4. おわりに

本研究で提示した手法は湛水池に流れが突入することで生じる水深の変化を概ね再現できたことから、余り複雑ではない地形条件の下では、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でも良好な精度を有することが分かった。今後、本研究で提示した手法が湾曲等の複雑な地形を考慮した場合での適用性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、小山内信智、沖中健起（2006）：天然ダムの湛水池への段波の突入による水位変化に関する影響に関する研究、国総研資料第 333 号、60pp.
- 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

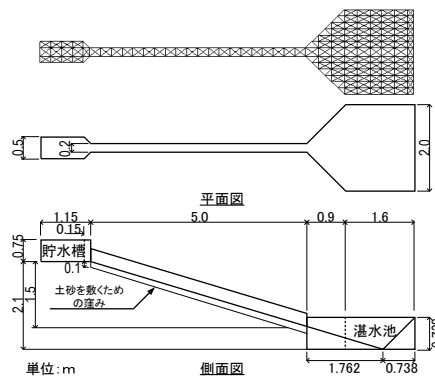


図-1 実験装置(水野ら、2006)と計算要素

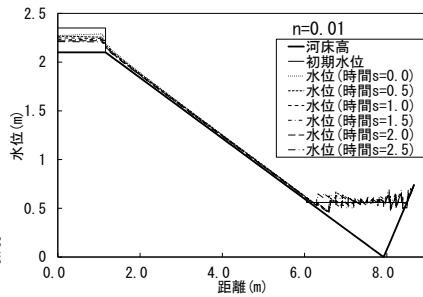


図-2 水位の時間変化(n=0.01)

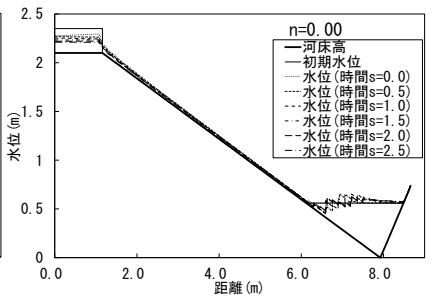


図-3 水位の時間変化(n=0.00)

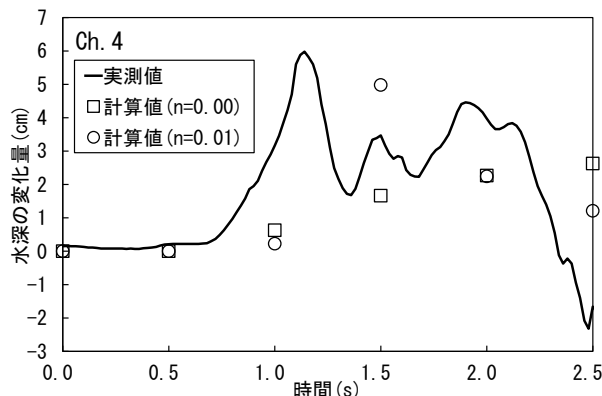


図-4 水路の時間変化の比較(Ch.4)

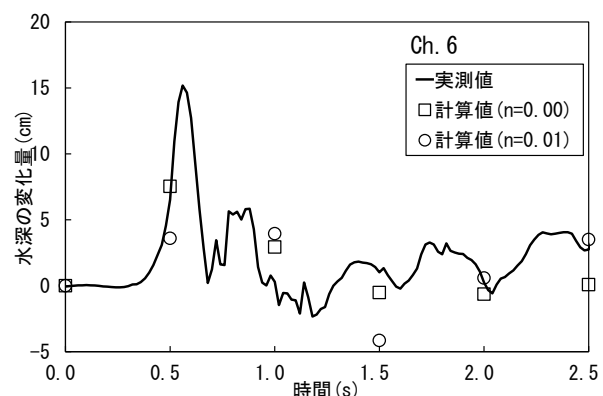


図-5 水路の時間変化の比較(Ch.6)