

地形変化を適切に表現できる数値解析手法と堆積侵食効果に関する考察

(一財)砂防・地すべり技術センター 砂防技術総合研究所 ○吉田真也, 志水宏行, 青木尊之, 藤田正治

1. 研究の背景・目的

現在、国・都道府県が進められている土砂・洪水氾濫対策の検討では一次元河床変動計算が主に用いられており、数値解析手法としてはリープフロッグ法が多く採用されている。また土砂の挙動については単一粒径の石礫型土石流を対象とした江頭<sup>1)</sup>や高橋ら<sup>2)</sup>による侵食堆積モデルが主に採用されている。

当財団では土砂・洪水氾濫検討のための一次元河床変動計算プログラムを新たに開発中であり、数値解析手法として有限体積法を採用し、江頭・高橋双方の侵食堆積モデルと、土石流中の細粒が液相化するフェーズシフトモデルを採用している。このプログラムは既往の研究成果に基づいて開発されているが、侵食堆積モデルを複数粒径に拡張してさらにフェーズシフトモデルも実装しているため知見が不足している部分があり、コンサル 20 社ほどの協力を得ながら条件設定や適用範囲などの課題について検証を進めている。

昨年度はこのプログラムを用い解析解の得られている一次元ダムブレイク問題との比較による数値解析手法の妥当性検証<sup>3)</sup>や、フェーズシフトが侵食堆積傾向に及ぼす影響等を報告している。今年度は砂防施設を地形として簡易に表現することを想定して、川幅の急縮急拡や逆勾配などの地形の急変に対応したロバストな数値解析手法上の工夫に加えて、江頭・高橋の侵食堆積モデルを適用する際の留意点について報告する。

2. 数値解析手法の概要と地形変化への対応

本プログラムで採用している有限体積法は、河道断面間を1つの cell (検査要素) とし、cell face を出入りする数値流束(Flux)を HLLC 法で求め、その差分から cell 内の保存量ベクトル  $U$  (水深や流速) を算出し、さらに底面抵抗や土砂の侵食堆積を Source Term として評価している。(図-1)

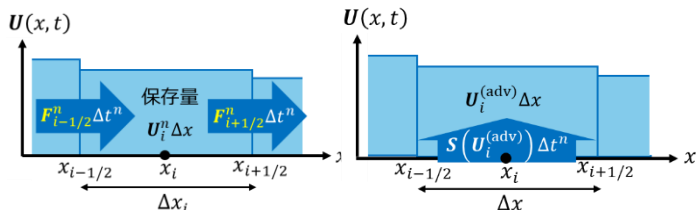


図-1 有限体積法による数値解析の概念図

さらに一次元浅水流方程式を解く際に式を変形し、川幅の変化に対応する項を運動量保存式の右辺に追加した保存系の式を解いている。また地形勾配および川

幅は cell face の値で定義され流れの方向によらない。これらにより地形の急変は cell face でのみ取り扱い、cell 内の保存量には直接反映されないため安定した計算が可能となっている。

3. 複雑で急変する地形での検証計算結果

本プログラムの数値解析手法が様々な地形変化に対応できるかを検証するため、KURGANOV & PETROVA<sup>4)</sup>に示された不連続を含む地形など、検証済みの複雑地形に対する一次元ダムブレイク問題として水のみを対象とした解析を行い、発散や数値振動が起きず妥当な結果が得られていることを確認している。(図-2)

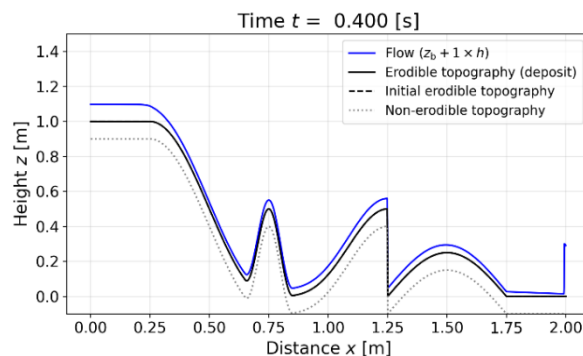


図-2 KURGANOV の地形を用いた計算結果

また水平矩形断面の途中に急縮部 (1cell の間に川幅 10m→5m) と急拡部 (1cell の間に川幅 5m→10m) を設定し、摩擦なしで上流端から一定流量の水を供給した計算結果を図-3に示す。

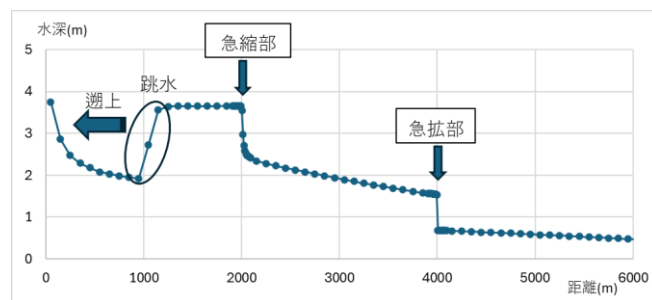


図-3 急縮急拡部を含む地形を用いた計算結果

急縮部で発生した跳水が段波として遡上する水面形が見られており、小石・山田<sup>5)</sup>での理論および数値実験結果と同じ傾向を示している。これによりコンクリートスリット堰堤等を急縮部として簡易に地形として表現した計算でも、堰上げが表現できることが分かる。

#### 4. 侵食堆積モデルへ適用する際の留意点

土石流の侵食堆積は江頭モデルでは平衡勾配に、高橋モデルでは平衡濃度にそれぞれ近づく過程としてモデル化されており、いずれも地形勾配の変化が侵食堆積の主な原因となっている。これまでのプログラムでは cell 間隔を狭くした場合、細かな勾配の変化により土砂の侵食堆積が振動する場合があります、便宜的に cell 間隔を広くし滑らかな地形を用いる、または地形勾配ではなく水面勾配を用いる等の対策がなされてきた。

本プログラムは地形勾配の急変にも対応した数値解析手法を採用しているが、侵食堆積モデルを組み込む際には留意が必要であり地形勾配を不適切に扱くと数値振動が生じる場合がある。これは cell face での地形勾配と cell 内の水深や流速を侵食堆積速度の算出に用いたことと、元の侵食堆積モデルでは流下先の風下勾配を用いて陰的に平衡勾配や平衡濃度を定義していることとの違いが原因と考えられる。そのため侵食堆積に使用する地形勾配は cell center の値と風下側の隣の cell center の値から求めることとし、流体の計算での地形勾配と使い分けることにより対処した。

また不透過型砂防堰堤を配置した cell に特殊な処理をせず、簡易に逆勾配として表現する場合にも留意が必要である。例として川幅一定で勾配が  $8^\circ$  から  $2^\circ$  に滑らかに変化する斜面の中間に高さ 10m の逆勾配部を設け、上流端から土砂濃度 0.06、流量は  $50\text{m}^3/\text{s}$  一定で水と土砂を供給し、図-4 に示す粒度分布を用いて摩擦速度と沈降速度の比が 3 以上でフェーズシフトする条件で計算した。計算結果として 10,000 秒後の河床高を図-5 に示す。

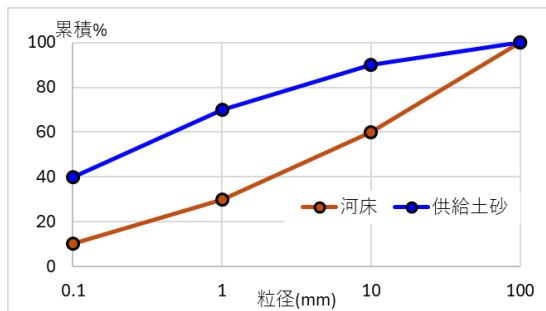


図-4 計算で用いた河床と供給土砂の粒度分布

江頭モデルでは逆勾配で  $\tan \theta$  が負であれば平衡勾配  $\theta_e$  も負となり、勾配の差に応じた形で逆勾配の上流側に土砂が堆積する。それに対して高橋モデルでは  $\tan \theta$  が負であると平衡濃度  $C_e$  は計算上負となるが物理的にはあり得ない値であるため、この場合プログラムでは平衡濃度を 0 としている。言い換えると逆勾配の場合は勾配の緩急によらず平衡濃度は 0 であり堆積速度に上限が生じることと、さらに堆積速度係数とフェーズシフトの影響により土砂の堆積速度が過少となる

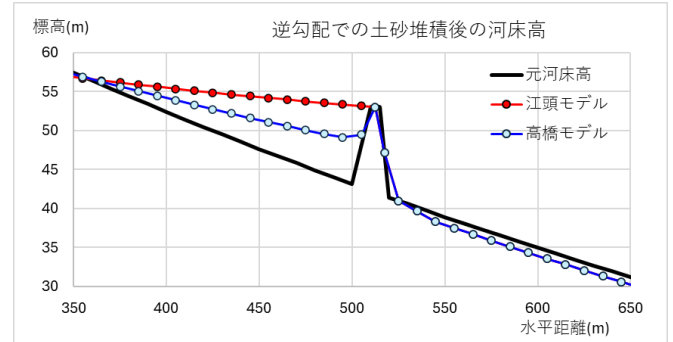


図-5 それぞれのモデルでの土砂堆積結果

可能性がある。高橋モデルを使用する場合は施設を単純な地形で表現するだけでは不十分であり、里深・水山<sup>6)</sup>で示された砂防ダム堆砂域での堆積速度式を修正する等の特殊な処理を組み込む必要がある。

#### 5. まとめ

従来の土石流や土砂・洪水氾濫対策に用いられた数値シミュレーションのプログラムでは実績の災害に対する再現計算で妥当性確認 (validation) が試行されているが、数値解析手法の面から解析解との比較や適用範囲の検証 (verification) が行われた例は少ない。

当財団が開発中の一次元河床変動計算プログラムは有限体積法をベースに地形の急変に対応した流体の数値解析手法を実装しており、複雑な地形における検証計算により勾配や川幅、断面間長の急変にも対応できることを今回示した。土砂の侵食堆積については現状で解析解がないため定量的な評価には至っていないが、数値解析手法上の留意点や地形変化、特に逆勾配に対する侵食堆積モデルによる傾向の違いを示した。

今後、数値シミュレーションの品質を確保するためには V&V (verification & validation) に基づき標準的な検証手順を確立させる必要がある。さらに土砂の挙動には不明な点が多く、モデルの改良のためには災害実績の調査とともに、実現現象に見られる土砂量や発生時刻などの不確実な要素を可能な限り除いた実験により、プログラムの検証に用いる信頼できるリファレンスデータを蓄積することが強く望まれる。

#### 【参考文献】

- 1) 江頭(1993) 砂防学会誌, vol. 46, No. 1, P45-49
- 2) 高橋・中川・山敷(1991) 京大防災研年報, 34, B-2, P355-372
- 3) 志水ら(2025) 令和7年度砂防学会研究発表会概要集, P77-78
- 4) KURGANOV & PETROVA(2007), COMMUN. MATH. SCI, Vol. 5, No. 1, P133-160
- 5) 小石・山田(2018) 河川技術論文集, 第24巻, P123
- 6) 里深・水山(2005) 砂防学会誌, Vol. 58, No. 1, P14-19,