

## 地形条件が土石流の数値シミュレーションに及ぼす影響

筑波大学生命環境科学研究科 ○経隆 悠  
 筑波大学生命環境科学研究科 堀田 紀文  
 (一財)砂防・地すべり技術研究センター 鈴木 拓郎

## 1. 研究の背景と目的

土石流の数値シミュレーションは、ハザードマップの作成や砂防施設の効果の評価、配置計画などに用いられ効果を発揮している。しかし、これらは土石流流下域で得られた成果であり、土石流発生域での数値シミュレーションは実施例が少ない。数値シミュレーションは、大規模崩壊地からの長期的な土砂流出量の予測のように、土石流発生域でも防災や流域管理上、有益であると考えられる。そのため、発生域での数値シミュレーション手法の確立が望まれる。

発生域の特徴として、流下域に比べ、河床の勾配が急で、地形が複雑であることが挙げられる。複雑な地形条件が土石流の数値シミュレーションに与える影響は、検討が不十分であり、明らかになっていない。従って、地形条件の影響の解明は、発生域での数値シミュレーション手法を確立のための課題の1つであると言える。

また、勾配変化点や狭窄部などの地形条件が急変する場所において、数値シミュレーションに用いる侵食速度式によって結果が異なることが指摘されている<sup>1)</sup>。このような差異は、地形が複雑な条件下でより顕著に生じることが予想され、各侵食速度式で統一的な解が得られない可能性がある。そのため、複雑な地形条件下での各侵食速度式の結果の差異についても検討する必要がある。

本研究では、土石流の数値シミュレーションにおいて、勾配の変化と起伏の有無や大小といった地形条件が、各侵食速度式を通して結果に与える影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 土石流の数値シミュレーション

数値シミュレーションにおける流れの支配方程式として、1次元浅水流方程式を用いた。構成則には宮本・伊藤の土石流領域の式を適用した<sup>2)</sup>。数値シミュレーションは、侵食速度式に高橋式<sup>3)</sup>、江頭式<sup>4)</sup>、鈴木式<sup>1)</sup>をそれぞれ用いた3通りを行った。

## 3. 数値シミュレーションの条件

## 3.1 計算水路の条件

水路床が平坦な直線水路と、水路床に起伏を与えた水路を対象として数値シミュレーションを実施した。どちらの水路も水路長 200 m、水路幅 1 m とした。また、水路の水分条件は飽和状態とした。

水路床が平坦な直線水路では、堆積層の厚さを一律 15 m 与え、水路勾配を 15 度から 30 度まで 1 度ずつ変化させて、それぞれの勾配で計算を行った。

水路床に起伏を与えた水路では、平均勾配が 20 度または 30 度となるように堆積層表面に周期的な起伏を与えた。起伏には二等辺三角形を用い、大小 2 通りの起伏で計算を行った。底角はどちらも 18 度であり、底辺は起伏小で 4 m、起伏大で 8 m とした。大小の起伏を形成す

る三角形は相似であるため、水路床表面の長さの積算値は両者でほぼ一致する。また、起伏の大小によらず、堆積層の土砂量は平坦な直線水路とほぼ等しくなるように与えた。

## 3.2 計算条件など

計算に用いた土石流の材料特性は表-1に示した通りである。水路上流端より、定常的に流量 0.183 m<sup>3</sup>/s の水を 600 秒間供給したという条件で計算した。便宜的に上流端からの給砂も行ったが、その濃度は 0.01 と極めて低く、堆積層の土砂が侵食されることで土石流が発生する。境界条件として、下流端の標高を固定した。また、平衡濃度の上限值は  $c_e = c_*$  とした。計算手法には、リーブ・フロッグ・スキームによる差分法を用い、差分間隔は時間間隔を 0.01 s、空間間隔を 1 m とした。

表-1 土石流の材料特性

砂礫の密度 $\sigma$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65
水の密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.00
内部摩擦角 $\phi_s$ (deg)	38.5
反発係数 $e$	0.85
砂礫の平均粒径 $d$ (m)	0.2
静止堆積濃度 $c_*$	0.6

## 3.3 解析方針

各計算結果は、給水終了時の水路床形状の変化と、水路下流端での土石流流量の変化(下流端ハイドログラフ)に着目して比較する。

まず、直線水路の勾配を変化させた計算から、勾配による各侵食速度式の応答の違いを比較する。そのうえで、起伏を与えた水路での計算結果に基づき、勾配による侵食速度式の応答の違いが、複雑な地形条件下でどのように表れるかについて検討を行う。

## 4. 結果と考察

## 4.1 水路勾配による結果の違い

直線水路における土石流流下後の水路床形状の変化や下流端ハイドログラフは、各侵食速度式で異なった。また、侵食速度式間の結果の違いは、水路勾配によって異なるものとなった。

水路勾配 20 度以下のとき、次のような結果が共通に得られた。水路床形状の変化は、江頭式と鈴木式でほぼ同様な結果が得られた。高橋式では、上流端付近での侵食量が小さかった。下流端ハイドログラフでは、高橋式のみピーク流量が小さく、到達時間が遅れていた(図 1)。

一方で、河床勾配が 21 以上になると、江頭式と鈴木式でも異なった結果が得られた。水路床形状の変化は、各侵食速度式で大きく異なった。侵食量は江頭式が最も多く、鈴木式が最も少ない。下流端ハイドログラフは、ピーク流量や波形が大きく異なった(図 2)。江頭式は、到達初期に

大きなピーク流量を持ち、その後は給水の流量に安定した。高橋式は、ピーク流量が江頭式に次いで大きく、給水の流量に江頭式よりもなだらかに低減した。鈴木式は大きなピークが生じず、給水終了時であっても給水の流量まで低減しなかった。

本研究に用いた定数(表-1)から、平衡濃度 $c_e$ と水路勾配 $\theta$ の関係を求めると、 $c_e \leq c^*$ の条件を満たすのは、 $\theta$ がおよそ21度以下のときである。この勾配は、各侵食速度式の結果の違いが大きくなり出した勾配に対応している。このことから、平衡濃度が堆積層の濃度に達するような急勾配な条件下で、各侵食速度式の応答が異なると考えられる。

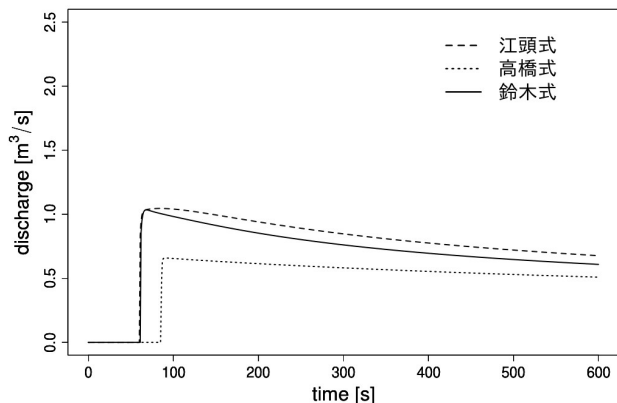


図1 水路勾配20度の下流端ハイドログラフ

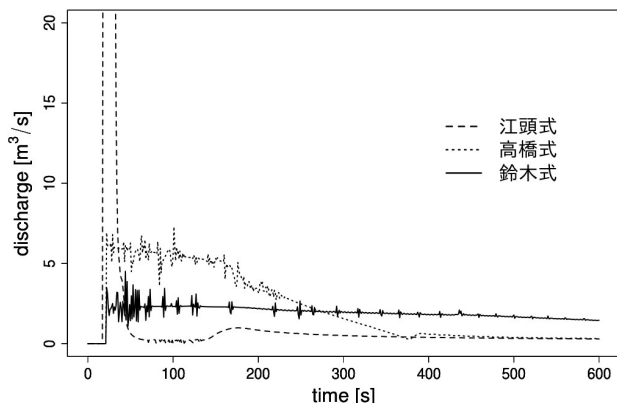


図2 水路勾配30度の下流端ハイドログラフ

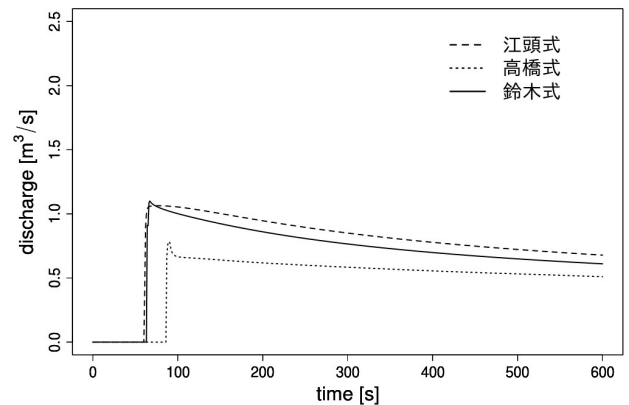
#### 4. 2 起伏による計算結果の違い

水路床に起伏を与えた水路における土石流流下後の水路床形状の変化は、平均勾配に依存するため、直線水路の結果とほぼ同様の結果となることが分かった。それに対し、下流端ハイドログラフは各侵食速度式で結果が異なった(図3、図4)。また、同じ侵食速度式であっても起伏の有無や大小によって、結果が異なることが分かった。

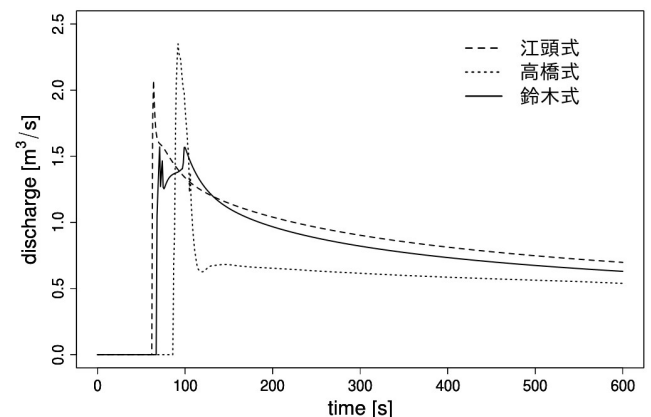
下流端ハイドログラフでは起伏が存在する場合に、いずれの侵食速度式でもピーク流量が増加した。また、ピーク流量の増加は起伏が大きいほど顕著であった。これは、起伏を構成している急勾配区間で、侵食が急速に進行することに起因する。さらに、4.1節で見たように、急勾配区間での応答が各侵食速度式で異なるため、同じ起伏の条件であっても、ピーク流量や波形は侵食速度式

によって異なっていた。

また、起伏の大小で水路床表面の長さの積算値がほぼ同じであることから、ピーク流量の増加は、急勾配区間の連続距離が長いほど顕著であると言える。これは地形条件が複雑な河川において、地形データの解像度や計算の空間間隔によって結果が異なる可能性を示唆している。



(a) 起伏小



(b) 起伏大

図3 平均勾配20度で起伏を与えたときの downstream ハイドログラフ

#### 5. まとめ

複数の侵食速度式を用いて土石流の数値シミュレーションを行い、河床勾配や河床の起伏が計算結果に与える影響について、比較・検討した。その結果、平衡濃度が上限値に達するような急勾配な河川では、各侵食速度式で計算結果の違いが生じることが示された。この違いは、河床に顕著な起伏があるような複雑な地形条件下でも影響を及ぼし、特に土石流のピーク流量が地形条件によって大きく変化することが明らかになった。

#### 引用文献

- 1) 鈴木ら(2009), 砂防学会誌, Vol.62, No.3, p.14-22
- 2) 宮本・伊藤(2002), 砂防学会誌, Vol.55, No.2, p.24-35
- 3) 高橋・匡(1986), 京都大学防災研究所年報, 第29号 B-2, p.345-359
- 4) 江頭ら(1988), 第32回水理講演会論文集, p.485-490