

# 土石流・土砂流における堆積侵食プロセス: (1)堆積侵食速度式に対する代数的・物理的考察

砂防・地すべり技術センター ○志水 宏行・藤田 正治

## 1. はじめに

斜面崩壊起因の土石流は、急傾斜の山地河川上流域にて発生した後、河床から土砂を侵食しつつ流動し、緩傾斜の下流域にて土砂を堆積するという傾向をもつ。土石流は粗粒土砂・細粒土砂が清水中に高濃度で遍在する流れであるが、緩傾斜地点での堆積に伴う土砂濃度低下により、粗粒土砂を主成分とする下層、および、細粒土砂と清水を主成分とする上層からなる流れ(土砂流)に遷移する。近年砂防事業にて利用されている主な土石流・土砂流の数値シミュレーションモデル<sup>1,2)</sup>は浅水流方程式に基づいており、土砂運搬を直接支配する堆積侵食速度は、流れ底面における力学的平衡状態が成立する状態に時々刻々近づくように定式化される<sup>3-5)</sup>。複雑な物理素過程である堆積侵食の定式化は未だ確立されておらず、対応関係が十分に明確化されていないいくつかの式が試行的に適用されているのが現状である。また、上述した流れ底面での力学的平衡状態を評価する際、一般に、粗粒土砂が土砂の主体と考えられ、細粒土砂は、清水を主体とする間隙流体の一部として評価されるが、堆積侵食に対する細粒土砂の間隙流体化効果のモデル化についてもいくつかの手法が提案されている<sup>6,7)</sup>。本研究では、異なる数値モデル結果間の違いの建設的議論を可能にするために、細粒土砂成分の間隙流体化については可能な限りシンプルな手法を適用した上で、既存の異なる堆積侵食速度式の対応関係を明らかにする。

## 2. 細粒土砂成分の間隙流体化の効果

細粒土砂の間隙流体化効果をシンプルにモデル化するために、細粒土砂が清水との相対速度を一切持たず清水と完全にカップリングしていると仮定する。流れが形成する堆積物、および、斜面上に事前に存在する堆積物(移動河床)は、清水で飽和していると考え、全土砂濃度を $c_{*0} = 0.6$ とし、土砂中の細粒土砂の割合(細粒土砂流体化率)を $p$ と表すと(表1)、間隙流体の質量密度は、

$$\rho = \frac{pc_{*0}\sigma + (1 - c_{*0})\rho_w}{pc_{*0} + (1 - c_{*0})} \quad (1)$$

と表される( $\sigma$ は土砂密度、 $\rho_w$ は清水密度)。粗粒土砂と細粒土砂が0.2mm程度の境界粒径によって分類されると仮定すると、 $p$ は粒径分布から従属的に得られる<sup>7,8)</sup>。ここでは、堆積物中の粒径分布(つまり、 $p$ や $\rho$ )が時空間的に変化しない理想的な状況を想定する。

## 3. 堆積侵食速度式

広く使用されている2種類の堆積侵食速度式(所謂、江

表1 堆積物における粗粒土砂・細粒土砂・清水の体積分率

|              | 粗粒土砂                                                                                       | 間隙流体                                                                                                                                           |                    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|              |                                                                                            | 細粒土砂                                                                                                                                           | 清水                 |
| 濃度<br>(体積分率) | $c_{*0} = 0.6$                                                                             |                                                                                                                                                |                    |
|              | $c_* \equiv (1-p)c_{*0}$<br>$= \begin{cases} 0.6 & (p=0\%) \\ 0.36 & (p=40\%) \end{cases}$ | $pc_{*0} = \begin{cases} 0 & (p=0\%) \\ 0.24 & (p=40\%) \end{cases}$<br>$1 - c_* = \begin{cases} 0.4 & (p=0\%) \\ 0.64 & (p=40\%) \end{cases}$ | $1 - c_{*0} = 0.4$ |

頭式<sup>3)</sup>と高橋式<sup>4,5)</sup>を考察の対象とする。これらの共通の性質は、堆積侵食速度 $E$ (堆積:  $E < 0$ ; 侵食:  $E > 0$ )が流れの速度 $|u|$ に比例し、その係数部が流れ底面における力学的平衡状態が成立する状況に時々刻々近づくように定式化されている点である。一方、係数部の具体的定式化についてはいくつかの点で違いがある。

### 3.1. 江頭式

江頭式では、流れの厚さ方向に平均化された粗粒土砂濃度 $c$ に依存する平衡勾配 $\theta_e(c)$ に斜面勾配 $\theta$ が近づくというシンプルな幾何学的・運動学的考察に基づき、空隙を含む堆積侵食速度 $E$ は以下のように定式化される( $\phi_s$ は内部摩擦角)。

$$\frac{E}{|u|} = \tan(\theta - \theta_e(c)) \quad (2)$$

$$\theta_e(c) = \tan^{-1} \left[ \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi_s \right] \quad (3)$$

江頭式では、 $\theta - c$ 空間において、平衡状態( $\theta = \theta_e(c)$ ; 図1の黒実線)から離れた状態ほど堆積侵食速度 $|E/|u||$ が大きくなるシンプルな傾向を示す(図1(a1))。細粒土砂流体化率 $p$ が増加すると、 $\theta - c$ 空間における堆積領域は縮小し、侵食領域は拡大する(図1(a2))。本式は未知パラメータを含まない論理展開の明快な理論式ではあるが、実験・観測結果との比較による妥当性の確認が求められている。

### 3.2. 高橋式

高橋式では、斜面勾配 $\theta$ に依存する粗粒土砂平衡濃度 $c_e(\theta)$ に流れ内部の粗粒土砂濃度 $c$ が近づくように堆積侵食速度 $E$ が定式化される( $\theta_{crit}$ は、土石流区間と土砂流区間での平衡濃度 $c_e(\theta)$ が一致する地点での斜面勾配<sup>2)</sup>)。

$$\frac{E}{|u|} = \begin{cases} \begin{cases} \delta_{d1} \frac{c_e(\theta) - c}{c_*} & \text{[高橋式1<sup>4)</sup>] } \\ \delta_{d2} \frac{c_e(\theta) - c}{d/h \cdot c_*} & \text{[高橋式2<sup>5)</sup>] } \end{cases} & (\text{堆積: } c_e < c) \\ \frac{\delta_e}{d/h \cdot c_* - c_e(\theta)} & (\text{侵食: } c_e > c) \end{cases} \quad (4)$$

$$c_e(\theta) = \begin{cases} \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} & (\text{土石流: } \theta \geq \theta_{crit}) \\ 6.7 \left\{ \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \right\}^2 & (\text{土砂流: } \theta < \theta_{crit}) \end{cases} \quad (5)$$

ここでは、 $c$ および $c_e$ の最小値 $c_{\min} = 0.01$ 、最大値 $c_{\max} = 0.99c_*$ を設定する。高橋式における堆積侵食速度 $E$ は、流れ底面での抵抗力と重力斜面方向成分による流れの駆動力の力学的釣り合いから求まる堆積侵食可能厚 $H_e$ とその厚さ内の土砂が完全に堆積侵食するまでにかかる遅れ時間 $T_e$ の比( $H_e/T_e$ )によって得られる。堆積時の $T_e$ については、 $h/(\delta_{d1}|u|)^4$ と $d/(\delta_{d2}|u|)^5$ の2種類が仮定・提案されており、それぞれを用いた高橋式を高橋式1および高橋式2と呼ぶ( $h$ は流れの厚さ、 $d$ は粗粒土砂の平均粒径)。侵食時の $T_e$ については、共通して $d/(\delta_e|u|)$ が仮定される。高橋式は、堆積速度係数( $\delta_{d1}$ または $\delta_{d2}$ )および侵食速度係数( $\delta_e$ )という未知パラメータを含み、これらの値は、考察対象流域での河床変動の再現計算におけるチューニングによってこれまで評価されてきたが、 $T_e$ に対する妥当性の確認が求められている。 $\delta_{d1} = \delta_{d2}/(d/h) = \delta_e/(d/h) = 0.2$ と仮定した堆積侵食速度 $E/|u|$ を図1(b1, b2)に示しているが、これらは江頭式(図1(a1, a2))に対し次の2つの違いをもつ。一つは、土砂流区間( $\theta < \theta_{\text{crit}}$ )において、平衡時の濃度・勾配が江頭式と異なるために式(3)・(5)参照)、高橋式では $\theta$ - $c$ 空間における堆積領域が広く、 $\theta$ と $c$ に対する $E/|u|$ の依存性の傾向が異なる点である。もう一つは、急傾斜領域における侵食速度 $E/|u|$ が著しく大きい点である。これは、 $c_e(\theta) \rightarrow c_*$ または $c_e(\theta) \gg c$ となる条件にて生じ、 $c_{\max}$ の設定値に強く依存する。

#### 4. 堆積侵食速度係数に対する代数的考察

江頭式と高橋式の対応関係を明確化するために、江頭式と一致する高橋式の堆積速度係数( $\delta_{d1(E)}$ および $\delta_{d2(E)}$ )と侵食速度係数( $\delta_{e(E)}$ )を、式(2)・(4)より以下のように導出した。

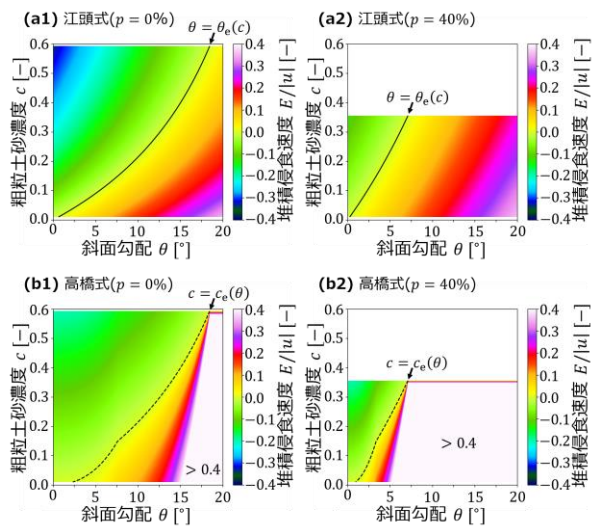


図1  $\theta$ と $c$ を独立変数とする堆積侵食速度 $E$ と流れ速度 $|u|$ の比(黒実線: 式(3); 黒破線: 式(5)). (a)江頭式:  $p=(a1)0\%$ , (a2)40%. (b)高橋式( $\delta_{d1} = \delta_{d2}/(d/h) = \delta_e/(d/h) = 0.2$ ):  $p=(b1)0\%$ , (b2)40%

$$\delta_{d1(E)} = \frac{\delta_{d2(E)}}{d/h} = \frac{\tan(\theta - \theta_e(c))}{(c_e(\theta) - c)/c_*} \quad (6)$$

$$\frac{\delta_{e(E)}}{d/h} = \frac{\tan(\theta - \theta_e(c))}{(c_e(\theta) - c)/(c_* - c_e(\theta))} \quad (7)$$

これより、 $\delta_{d1(E)} = \delta_{d2(E)}/(d/h)$ と $\delta_{e(E)}/(d/h)$ は $\theta$ と $c$ のみに依存することがわかる。 $\delta_{d1(E)} = \delta_{d2(E)}/(d/h)$ は $\theta$ - $c$ 空間にて大きく値は変化しないが(図2(a1)),  $\delta_{e(E)}/(d/h)$ については $\theta$ および $c$ によって値が大きく変わる(図2(b1)). 細粒土砂流体化率 $p$ が増加すると、 $\delta_{d1(E)} = \delta_{d2(E)}/(d/h)$ と $\delta_{e(E)}/(d/h)$ は両者ともに減少する(図2(a2, b2)).

#### 5. おわりに

土石流・土砂流の堆積侵食速度式として提案されている江頭式と高橋式の対応関係明確化のために、江頭式と一致する高橋式の堆積侵食速度係数を求め(式(6)・(7)), 細粒土砂流体化率 $p$ に対する依存性を明らかにした。ただし式(6)・(7)は $E/|u|$ における対応関係を表しているに過ぎず、流れや堆積物の挙動における対応関係を評価するためには、流れの流動速度 $|u|$ に影響を与える構成則なども含めた土石流・土砂流モデルの方程式系全体における違いについて議論すべきである。これについての数値シミュレーションによる対応関係評価は今後別の機会に報告する。

#### 引用文献

- 1) 宮本・伊藤 (2002) 砂防学会誌, 55, 2;
- 2) 鈴木ら (2013) 砂防学会誌, 66, 2;
- 3) 江頭 (1993) 砂防学会誌, 46, 1;
- 4) 高橋ら (1991) 京大防災研年報, 34, B-2;
- 5) 高橋・匡 (1986) 京大防災研年報, 29, B-2;
- 6) 内田ら (2018) 土砂災害に関するシンポジウム論文集;
- 7) 山崎ら (2018) 土木学会論文集 B1, 74, 4;
- 8) 江頭ら (2016) 砂防学会誌, 68, 5

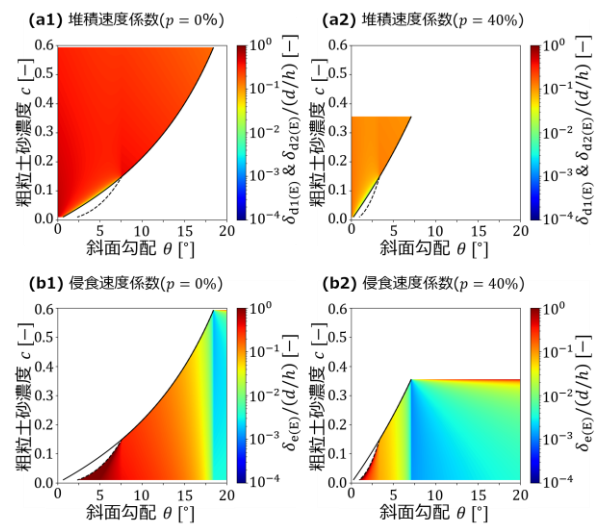


図2 江頭式と一致する高橋式の堆積侵食速度係数(黒実線: 式(3); 黒破線: 式(5)). (a)堆積速度係数 $\delta_{d1(E)} = \delta_{d2(E)}/(d/h)$ :  $p=(a1)0\%$ , (a2)40%. (b)侵食速度係数 $\delta_{e(E)}/(d/h)$ :  $p=(b1)0\%$ , (b2)40%