

土石流シミュレーションモデルに関する一考察

岐阜大学工学部 正 員 高濱淳一郎
 岐阜大学工学部 正 員 藤田裕一郎
 岐阜大学工学部 学生員 近藤 康弘

1.はじめに 現在までにいくつかの土石流シミュレーションモデルが提案されているものの、これらのモデルは異なったアプローチで基礎式が作られており、数値計算を行うアルゴリズムも相違している。このため同一の事象に適用されたとしても、計算結果は異なったものとなっているのが現状である。そこで本研究では、土石流の流動堆積現象の合理的な評価法を検討することを目的として、代表的なシミュレーションモデルである中川・高橋ら¹⁾のモデルと江頭ら²⁾のモデルの特性に関する比較検討を行った。なお、基本的な特性を把握するため、数値計算は一次元で実施している。

2.抵抗則の比較 江頭らのモデル²⁾に用いられている抵抗則³⁾は降伏応力を有しており、中川・高橋らのシミュレーションモデル¹⁾には降伏応力の無い高橋⁴⁾の抵抗則が用いられている。図-1に土石流の平衡濃度式⁴⁾を用いて計算した v/u_* と h/d との関係を示す。江頭らの抵抗則では勾配の減少に伴って抵抗が増加していくものの、高橋の抵抗則では逆の傾向を示している。

3.土石流による河床変動の評価法 侵食速度を導入した土石流流動層の連続式は以下のようである。

$$\text{混合物全体} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} = S_T \cdots (1) \quad \text{砂礫} \quad \frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(cvh)}{\partial x} = c_* S_T \cdots (2)$$

$$\text{河床高 } z_b \text{ の時間的変化} \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} = -S_T \cdots (3)$$

ここに、 S_T は侵食速度、 h は流動深、 v は平均流速、 c は土石流流動層の濃度、 c_* は堆積層濃度である。 S_T は流動層内の湧き出し項として解釈され、土石流の構成則として与える必要がある。江頭ら²⁾と中川・高橋ら¹⁾の侵食速度式はそれぞれ以下のようである。

$$\text{江頭ら} \quad S_T = v \tan(\theta - \theta_e) \cdots (4)$$

$$\text{中川・高橋ら} \quad \text{侵食時 } S_T = \delta_e \frac{c_e - c}{c_* - c_e} \frac{h}{d} v \cdots (5)$$

$$\text{堆積時 } S_T = \delta_d \left(1 - \frac{v}{pv_e} \right) \frac{c_e - c}{c_*} v \cdots (6)$$

ここに、 θ は河床勾配、 θ_e は土石流濃度 c に対応する平衡勾配、 c_e は河床勾配（逆勾配の時はエネルギー勾配）に対応する平衡濃度、 v_e は流下してきた地点での流動深 h で与えられた濃度 c の土石流が流動を継続できる平衡速度である。 δ_e, δ_d, p は定数で $v > pv_e$ のとき堆積は生じない。また、集合流動の領域では $v/pv_e = 0$ としている。図-2には、 $c_* = 0.6$ 、 $c = 0.3$ 、 $\tan \phi = 0.8$ （ ϕ は砂礫の内部摩擦角）、相対水深 $h/d = 10$ とした場合の $(\partial z_b / \partial t) / v$ が示されている。中川・高橋らの土石流領域（設定したパラメータにより $\theta > 8.8^\circ$ ）における堆積速度は $v/pv_e = 0$ とした上限値を示している。この項を無視すれば土石流領域における両者の侵食堆積領域は一致する。江頭らの侵食堆積速度の絶対値は中川・高橋らの速度式より大きく、中川・高橋らの侵食速度は平衡勾配に近づくにつれて急速に減少する。土石流による河床変動の評価には、侵食堆積速度式を導入する他に流動層濃度に平衡濃度を与える方法⁵⁾がある。平衡濃度を計算する勾配には河床勾配、エネルギー勾配などが用いられ、式(2)の濃度項に平衡濃度を導入して計算される⁷⁾。

4.一次元シミュレーション 両モデルの比較のため、一次元水路における土石流の堆積・侵食に関する数値実験を実施した。計算に用いた粒径は $d = 0.5 \text{ cm}$ である。まず、勾配変化点（急勾配→緩勾配）を有する固定床水路に土石流を定常供給し、堆積遡上させる計算を行った。水路の諸元は上流区間勾配 $\tan \theta = 0.3$ 、同水平長 2.5 m 、下流区間勾配 $\tan \theta = 0.15$ 、同水平長 1.5 m である。上流端の境界条件は $q_m = 500 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $h = 5.0 \text{ cm}$ 、及び $c = 0.245$ であり、この濃度に対応する平衡勾配は $\tan \theta = 0.225$ で

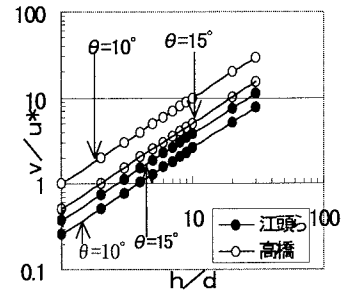
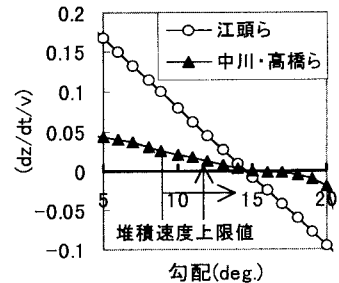


図-1 抵抗則の比較

図-2 侵食堆積速度の比較
($c = 0.3$ 、 $h/d = 10$)

ある。図-3 に江頭らのモデルによる計算結果を示す（右端が下流端である。以下同じ）。河床高は40秒程度でほぼ平衡状態に達し、供給濃度に対する平衡勾配を有する移動床区間が形成されるに至った。江頭らの浸食速度式のかわりにエネルギー勾配による土石流の平衡濃度式を導入して計算すると、堆積区間の上流端で勾配が緩くなる傾向を持つものの、平衡勾配区間が形成された。中川・高橋らによるモデルを用いて計算した場合、モデルで定められた集合流動の適用上限勾配（本計算条件では $\tan \theta = 0.153$ ）とほぼ同じ勾配の堆積区間が形成されるものの、それ以上堆積は進行しない。中川・高橋らのモデルでは降伏応力が無いため、下流区間を十分長くとり

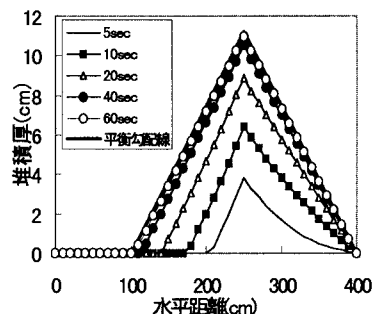


図-3 江頭らのモデルによる堆積計算結果

ば、与えられた流量、濃度に対する等流状態が計算される。そこで、抵抗則から計算される等流流速を用いて、式(5)(6)から浸食堆積の領域区分を行った。図-4 に示すように、中川・高橋らのモデルでは土石流領域において平衡濃度を越える流れが存在したとき、流速が抵抗則による等流流速まで減速しても堆積せずに流下する。計算ではこの非侵食・非堆積の領域が現れたことになる。高橋・中川らはこのモデルの以前、河床面せん断力に摩擦力を導入したモデルを提案している。そこで、この河床面せん断力を用いて同様の領域区分を行った。図-4 に示す破線が堆積境界であり、破線より上で堆積し、破線と平

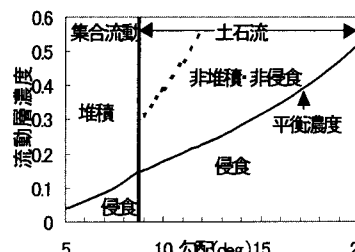


図-4 中川・高橋らのモデルによる領域区分（抵抗則による等流流速を使用）

衡濃度との間では非堆積・非侵食となる。江頭らのモデルでは、図-4

の土石流領域において、平衡濃度より上では堆積し、下では侵食する。

中川・高橋らによる土石流状態の侵食領域は江頭らのモデルと一致する。そこで、一様勾配 ($\tan \theta = 0.25$) を有する水平長4mの固定床水路上に飽和土塊を設置した後、上流から土石流を定常供給し、堆積土塊を侵食させる計算を実施した。初期堆積形状は三角形であり、堆積前面勾配 $\tan \theta = 0.3$ （水平長1m）、堆積背面勾配 $\tan \theta = 0.15$ （水平長0.5m）である。粒径及び上流端境界条件は堆積計算と同じである。図-5 には江頭らのモデルによる計算結果が、図-6 には中川・高橋らのモデルによる計算結果が示されている。江頭らのモデルでは、堆積土塊背面で若干堆積増上し、前面では侵食し、堆積土塊形状が平滑化されながら全体としては侵食されていく。一方、

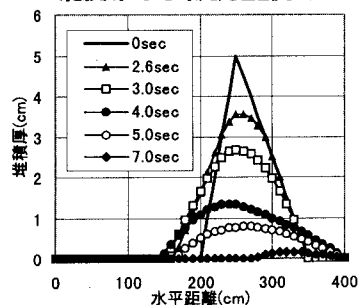


図-5 江頭らのモデルによる侵食計算結果

中川・高橋らのモデルでは計算の初期段階で堆積土塊背面において図-4 に示す非堆積・非侵食の領域に入ったため、背面形状が保持されている。そして、堆積土塊の前面が侵食され、それに伴い堆積土塊背面が頂部から侵食されていく。侵食の進行は図-2 に示された侵食速度の差を反映して、中川・高橋らのモデルの方が遅くなっている。

5.おわりに 中川・高橋らと江頭らのモデルの抵抗則は互いに異なった傾向を持ち、侵食堆積領域区分、及び侵食堆積速度にも有意な差違が認められ、それらが計算結果の違いとなって現れた。今後、実験結果との比較を行い、現状の問題点・課題を明確にし、合理的な評価法について議論していくつもりである。

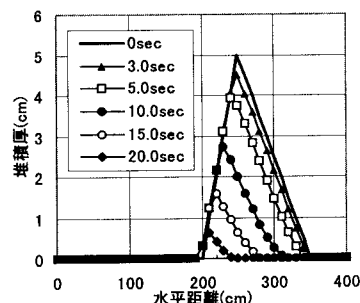


図-6 中川・高橋らのモデルによる侵食計算結果

参考文献 1)中川・高橋ら：計画土石流の設定と避難計画，京大防災研年報，第35号B-2，347-371，1996 2)江頭ら：地すべり堆積土砂の二次侵食による土砂流出，水工学論文集，第40巻，863-868，1996 3)江頭ら：土石流の構成則に関する研究，京大防災研年報，第32号B-2，487-501，1989 4)高橋：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研年報，第20号B-2，405-435，1977 5)江頭ら：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，485-490，1988 6)水山ら：土石流氾濫シミュレーションと模型実験による土石流災害の再現，新砂防，Vol.40，No.3，17-22，1987 7)高濱：土石流による河床変動，新砂防，Vol.51，No.3，67-72，1988 8)高橋・中川ら：土石流及び土砂流扇状地の形成に関する研究，第32回水理講演会論文集，497-502，1988