

岐阜大学工学部○高濱淳一郎
 岐阜大学工学部 藤田裕一郎
 岐阜大学工学部 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。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、中川・高橋ら¹⁾のモデル、江頭ら²⁾のモデル、及び侵食堆積速度式を導入せず流動層濃度に平衡濃度を与えるタイプのモデルについて、その基本的特性を一次元シミュレーションにより比較検討した。

2.抵抗則の比較 江頭ら²⁾のシミュレーションモデルにおける抵抗則³⁾は降伏応力を有しており、中川・高橋らのモデル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に平衡濃度式⁴⁾を用いて一様濃度を与えて計算した 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い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。ちなみに、椿・橋本ら⁵⁾による土石流の抵抗則について同様な計算を行ってみると、 v/u_* の値は江頭らによる値に近いものの、勾配の減少に伴い、抵抗は小さくなるという結果が得られた。

3.土石流による河床変動の評価法 侵食速度 s_T を導入した土石流流動層の連続式、及び河床高 z_b の時間的変化を以下に示す。

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

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

ここに、 h は流動深、 v は平均流速、 c は流動層濃度、 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。

$$\text{江頭ら } s_T = v \tan(\theta - \theta_e) \dots (4)$$

$$\text{中川・高橋ら 侵食時 } s_T = \delta_e \frac{c_e - c}{c_* - c_e} \frac{h}{d} v \dots (5) \quad \text{堆積時 } s_T = \delta_d \left(1 - \frac{v}{pv_e}\right) \frac{c_e - c}{c_*} v \dots (6)$$

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。なお、集合流動の領域では $v/pv_e = 0$ としている。図-2に $c_* = 0.6$ 、 $c = 0.3$ 、 $\tan \phi = 0.8$ (ϕ は砂礫の内部摩擦角)、相対水深 $h/d = 10$ とした場合の $(\partial z_b / \partial t) / v$ を示す。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。中川・高橋らの侵食堆積速度の絶対値は江頭らのモデルにより小さく、侵食速度は平衡勾配に近づくにつれて急速に減少する傾向がある。両モデルとも流動層濃度の増加に伴い、侵食領域が減少(グラフが右側にシフト)する。このとき、江頭らのモデルでは勾配の違いによる堆積侵食量の差(グラフの傾き)はあまり変化せず、中川・高橋らのモデルでは濃度の増加に伴い、勾配の違いによる堆積侵食量の差(グラフの負の傾き)が大きくなる。土石流による侵食堆積を評価する方法には、流動層濃度に平衡濃度を与える方法⁷⁾も提案されている。この場合、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、連続式を差分して河床変動高を計算している⁸⁾。

4.一次元シミュレーション 一次元水路における堆積・侵食に関する数値実験を実施した。計算には2種類の粒径($d = 0.5, 1.0 \text{ cm}$)を用いた。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)。計算では土石流先端部が勾配変化点に到達した時点で変化点から堆積を開始し、河床高は40秒程度でほぼ平衡状態に達し、供給濃度に対応する平衡勾配を有する河床が形成された。次に、江頭らのモデルにおける侵食速度式のかわりに平衡濃度式により流動層濃度を与えて計算してみた。まず、エネルギー勾配を用いて計算してみたところ、土石流先端部が勾配変化点に達した時点より遅れて堆積を開始し、開始位置は勾配変化点下流側であった。また、堆積区間の上流端で勾配が緩くなる傾向が見られた(粒径

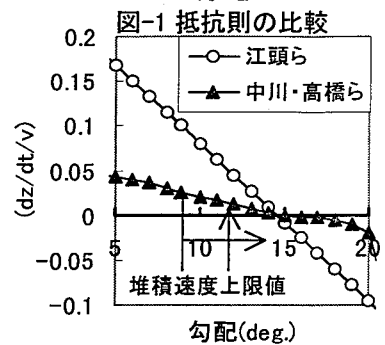
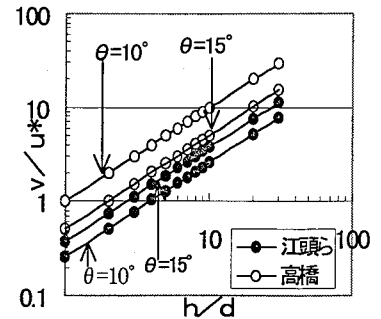


図-2 侵食堆積速度式の比較

が小さいとこの傾向は強い)。このような違いはあるものの、最終的には平衡勾配区間が形成された。また、平衡濃度を導入した場合の方が計算区間全体での堆積速度が若干小さくなった。エネルギー勾配のかわりに河床勾配を用いて、平衡濃度を与えると河床が振動してしまい、不安定になった。これは、勾配変化(急変)点での急激な堆積がきっかけとなって生じたものである。さらに流動面勾配を使ってみたが、振動はおさまらず、流動面も振動する結果となった。粒径が大きいケースでは、平衡濃度を導入したモデルでは若干堆積速度が増加し、堆積速度式を用いた場合わずかではあるが堆積速度が減少した。中川・高橋らのモデルの場合、どちらの粒径の場合も、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 $\tan \theta \approx 0.155$)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、高濃度で且つ堆積させない条件下で緩勾配区間を流下させても、区間が十分長ければ、一つの等流状態に達することになる。そこで、与えられた流量と濃度に対応する等流流速まで減速させた状態を想定して、式(5)(6)から侵食堆積の領域区分を行ったところ、図-4に示すように、土石流領域では堆積領域がなく、非堆積・非侵食の領域が現れた。計算ではこの非侵食・非堆積領域が現れたことになる。高橋・中川らは、以前に河床面せん断力に摩擦力を導入したモデル⁹⁾を提案している。そこで、この抵抗則を用いて同様の領域区分を行ったところ、図-4に示す破線が領域界となり、破線より上で堆積、破線と平衡濃度との間で非堆積・非侵食となる。江頭らのモデルではこのような非堆積・非侵食の領域はない。

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、

同様勾配($\tan \theta = 0.25$)を有する水平長4mの固定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遡上し、前面では侵食し、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、中川・高橋らのモデルでは土塊背面において計算の初期段階で図-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、堆積土塊前面が侵食され、それに伴い土塊背面が頂部から侵食されていく。侵食の

進行は両者の侵食速度差を反映して、中川・高橋らのモデルの方が遅くなっている。また、中川・高橋らのモデルでは粒径が0.5cmから1.0cmになると侵食に要する時間が約2倍となった。江頭らのモデルでは粒径1.0cmの方がわずかではあるが侵食所要時間が長くなった。エネルギー勾配を用いて平衡濃度を与えるモデルでは、土石流先端部が堆積土塊頂部を乗り換えた時に急激な侵食が生じ、その後、堆積・侵食をを繰り返す、河床面が振動した。このとき、流動面に顕著な振動は見られなかった。エネルギー勾配のかわりに河床勾配やエネルギー勾配を用いてみたが、この場合も河床が振動し、不安定になった。

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。江頭らのモデルにおいて、流動層濃度にエネルギー勾配をから計算した平衡濃度を与えてみると、堆積計算結果には大きな差が見られなかったものの、侵食計算では急激な侵食、及び河床面の振動が見られた。また、エネルギー勾配のかわりに河床勾配や流動面勾配を用いて計算すると、いずれの場合も河床が振動し、不安定になった。これは、河床勾配の急変によるものと考えられ、実用上注意すべき点である。今後、緩勾配区間まで検討範囲を広げ、実験結果との比較を行って、問題点・課題を明確にし、合理的な評価方法について議論していくつもりである。

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：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，485-490，1988 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)橋本ら：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文集，No.317，1982，pp.79-91 6)土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，第40巻，863-868，1996 7)山山ら：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 8)高濱：土石流による河床変動，新砂防，Vol.51，No.3，67-72，1998 9)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

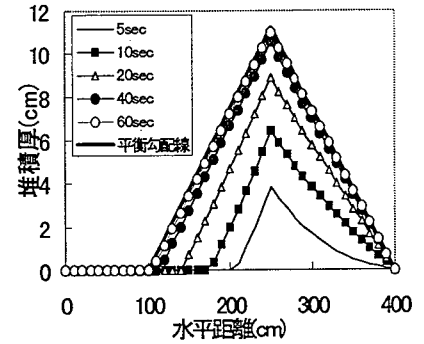


図-3 江頭らのモデルによる堆積計算結果

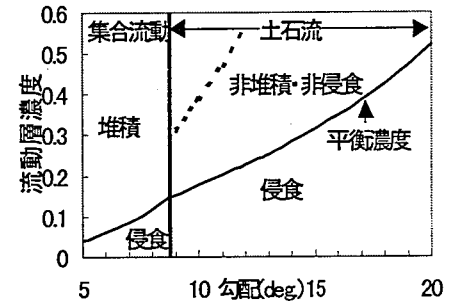


図-4 中川・高橋らのモデルによる領域区分(抵抗則による等流流速を使用)

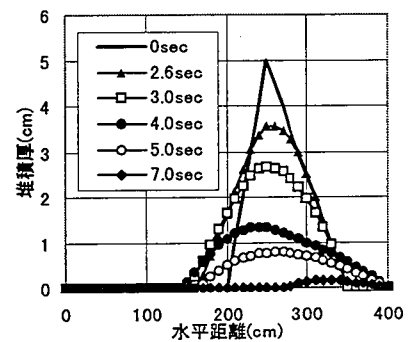


図-5 江頭らのモデルによる侵食計算結果

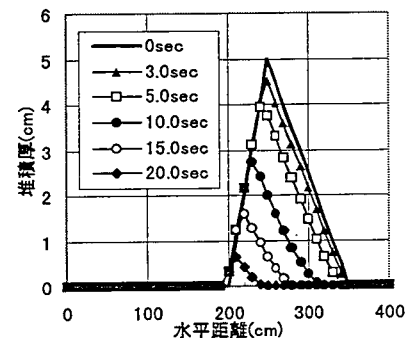


図-6 中川・高橋らのモデルによる侵食計算結果