

流速と濃度の分布を考慮した土石流の二層流解析

岐阜大学工学部 正会員 高濱淳一郎

岐阜大学流域圏科学研究センター 正会員 藤田裕一郎

岐阜大学大学院 学生員○吉野 弘祐

1. はじめに 土石流から層流状集合流動への遷移過程を解析するために、著者らは水流層と砂礫移動層では構成則が本質的に異なることに注目して、各層毎に支配方程式を立てて解析する二層流モデルを提案している¹⁾。ここで解析にあたって、簡単のため砂礫層濃度を一様濃度で与えており、また流速や濃度が分布を持つことに起因する分布補正係数をすべて1として解析している。しかし土石流の濃度は鉛直方向には一様でない分布を有しているため、これを考慮する必要がある。そこで本研究では流速と濃度が分布を持つことによる影響を二層流モデルに導入して、その精度の向上を図ることを目的としている。まず砂礫移動層厚比・流速分布・濃度分布・及び分布補正係数等に関する近似解と厳密解とを比較し、非平衡の状態における支配方程式への導入方法を検討する。最後に単純な条件に対する数値実験を行い、土石流の侵食堆積過程に及ぼす補正係数の影響について考察を加えた。

2. 二層流の支配方程式と分布補正係数 図-1に示す変数を使用すると、水流層と砂礫移動層の二層に分けて解析するモデルでは、*interface*を通して質量と体積のフラックスが導入されるので、砂礫移動層の連続式・運動方程式は次式のようにになる¹⁾。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial M_s}{\partial x} = s_T - s_I \cdots (1) \quad \frac{\partial c_s h_s}{\partial t} + \frac{\partial \gamma c_s M_s}{\partial x} = c_s s_T \cdots (2)$$

$$\frac{\partial \gamma' \rho_s M_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s \beta_s M_s}{\partial x} + \rho_s s_I u_I \cdots (3)$$

$$= \rho_s g h_s \sin \theta - \rho_w g \cos \theta \frac{\partial P_s}{\partial x} + \rho_w g h_w \cos \theta \frac{\partial h_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b$$

ここに $M_s = v_s h_s$ 、 ρ_s は砂礫移動層の平均密度、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度、 P_s は砂礫層の圧力である。また β_s は運動量補正係数、 γ および γ' は濃度と流速が分布を持つことに起因する補正係数である。侵食速度 s_T には江頭²⁾の侵食速度式を二層流に拡張して評価し、 τ_w 、 τ_b は、江頭³⁾の構成則を一様濃度に適用して評価する。

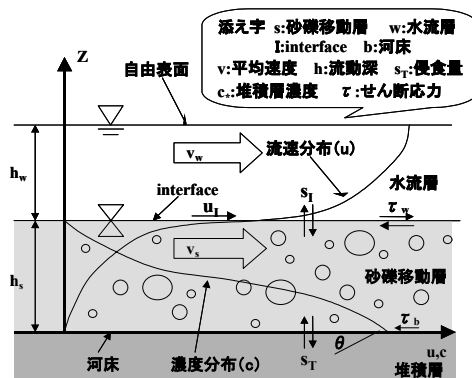


図-1 集合流動の模式図

$$\tau_b = (\sigma - \rho_w) c_s g h_s \cos \theta \left(\frac{c}{c_s} \right)^{\frac{1}{n}} \tan \phi_s + \rho_w f_s |v_s| |v_s| \cdots (4), \quad f_s = f_{s0} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} \cdots (5) \quad (f_{s0} \text{ は } h_s/d \text{ に依存しない。})$$

3. 近似解と厳密解の比較 二層流モデルでは以下の近似を使用している¹⁾。

① 集合流動状態の場合、砂礫層濃度は一様濃度 ($c_s/c_* = 1/2$) とする。② 流動層内では粒子衝突に伴う圧力 p_d と骨格応力 p_s との比を一定とし、河床面では $p_d = 0$ とする。図-2は近似解と厳密解との比較結果の一部である。 f_{s0} の厳密解はほぼ一定であるのに対して近似解では勾配の増加に伴って一旦増加し、水流層が喪失する勾配を境に減少傾向となる。 β_s は緩勾配で近似解が厳密解を上回っているが、勾配の増加に伴っての近似解と厳密解は近い値を示す。 c_s の近似解は二層状態で一定値であり、 γ の近似解は濃度を一様としたことにより常に1となるが、厳密解では両者とも勾配の増加に伴い、増加している。また厳密解では常に $\gamma < 1$ となり、

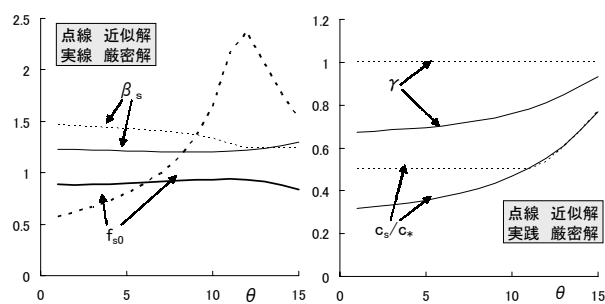


図-2 近似解と厳密解との比較

り常に1となるが、厳密解では両者とも勾配の増加に伴い、増加している。また厳密解では常に $\gamma < 1$ となり、

連絡先 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1 岐阜大学 TEL058-230-1111

キーワード 土石流, 分布補正係数, 二層流, 近似解, 厳密解

これは輸送濃度が体積濃度よりも低いことを示している．このような違いは見られたもの、流速分布形、輸送濃度 c_f 、流速係数については、近似解によって厳密解を概ね表現できている．

4. 数値実験による検討 支配方程式に導入する補正係数を勾配の関数で与えると問題があると考えられる．例えば、土石流が緩勾配区間に流入した直後では全層が砂礫層である状態もありうるからである．そこで、全層濃度に対する砂礫層の濃度分布と流速分布は勾配にかかわらず相似であると考えて、図-3のように全層平均濃度 c_t に対して各補正係

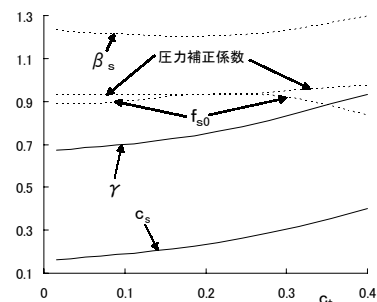


図-3 全層平均濃度と補正係数の関係

数を与えることとした．考慮した変数、および補正係数は c_s 、 β_s 、 γ 、 γ' 、 f_{s0} 、 u_l/v_s 、および砂礫層に作用する圧力に関する補正係数である．数値実験は勾配変化点を有する移動床水路の上流端から一定濃度の土石流を一定時間定常供給する条件で実施した．計算にはリープフロッグスキームを用い、刻み幅は $\Delta x = 5.0\text{cm}$ とした．このとき上流端の体積濃度は上流勾配 15 度に対する平衡平均濃度を与えた．図-4の上段及び中段は勾配変化点到達時の、下段は勾配変化点通過後の数値計算結果である．各種補正係数をすべて考慮した場合は、砂礫移動層の濃度が上方に向かって減少していることによって、流れの上方の濃度の低い層が土石流の先端に集中する過程が計算され、その結果、濃度の低いフロント部で侵食が起こる．それに対して、補正係数を考慮しない場合は勾配変化点到達前には侵食は起こらない．これは土石流の濃度が一樣なため、侵食を起こす濃度の低い層が考慮されていないためである．また下段で示した通り勾配変化点通過後はフロント部の濃度が低いこともあって流下速度は補正係数を考慮した場合のほうが速くなる．このとき補正係数を考慮しないと全層平均濃度は減少するのに対して砂礫層平均濃

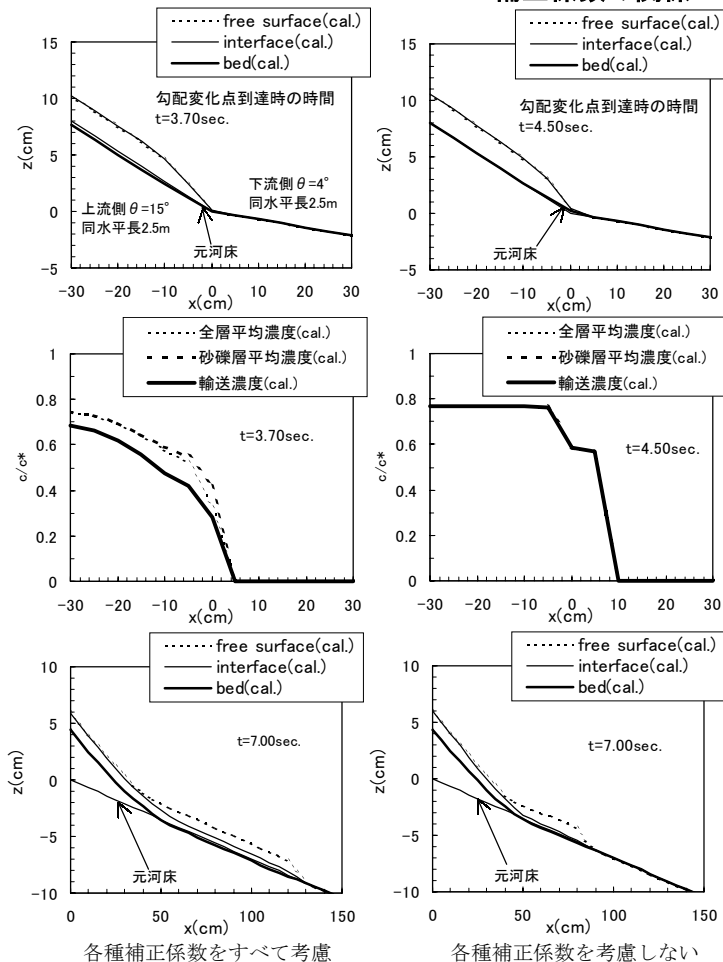


図-4 土石流の流下堆積過程に関する数値実験結果

度は一定なので、全層に対する砂礫移動層厚比は近似解の方が小さくなる．この計算の他に c_s と γ のみを考慮した数値シミュレーションも実施した．流下速度はすべて考慮した場合のほうが多少高くなるものの、侵食堆積過程や濃度の縦断分布についてはほぼ同じ結果が得られている．以上より、土石流の侵食堆積過程において、砂礫部分の連続式(2)の砂礫フラックス中の c_s と γ の影響を強く受けることがわかる．

5. おわりに 今後、広範囲に渡る条件に対して計算を行って、濃度分布の影響を把握するとともに、現地への適用を図りたい．

参考文献 1) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：土石流から掃流状集合流動に遷移する流れの解析法に関する研究，水工学論文集，第44号，pp.683-686，2000年 2) 江頭進治・本田尚正・安東容輔：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，pp.863-868，1996年 3) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，第41巻，pp.789-794，1997年