

京都大学防災研究所 正員 高橋 保
不動建設 正員 辻本浩史

1. まえがき 土砂災害の中でも土石流による災害は人命、家屋などに致命的なダメージを与える場合が多い。これは土石流が強大なエネルギーを有して流下してくるためであり、災害の防止、軽減策として渓流内に砂防ダムを設けるなどのハードな対策がなされているが、同時に、堆積域での危険範囲を予測し、被害を最小限に抑制するソフトな対処方法も重要となってくる。本研究の目的は危険範囲設定の際に基本となる、複雑な地盤条件にも対応できる土石流氾濫シミュレーションの方法を開発することにある。

2. 基礎方程式 土石流を水と土砂が一体となった流体と考えるならば、二次元平面上での基礎式として、

$$\text{運動方程式 } x \text{ 方向: } \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial M U}{\partial x} + \beta \frac{\partial M V}{\partial y} = -g h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{F_x}{\rho_0} \quad \dots\dots (1)$$

$$y \text{ 方向: } \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial N U}{\partial x} + \beta \frac{\partial N V}{\partial y} = -g h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{F_y}{\rho_0} \quad \dots\dots (2)$$

$$\text{連続方程式} \quad : \quad \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots (3) \quad \text{が成立する。ここに、} M, N \text{ はそれぞれ}$$

れx方向、y方向の流量ブラックス、h：流動深、z：地盤高、β：運動量補正係数、ρ₀：土石流の密度、F_x、F_yはそれぞれx方向、y方向の摩擦力である。βは土石流をダイラタント流体として取り扱う場合、1.25となる。また、摩擦項は従来より高橋が用いているクーロン摩擦に流体的な摩擦力を加えた二変数モデルとして次式で与えた。

$$F_x = (\sigma - n\rho)ghC_{du} \cos\theta_x \tan\alpha + k(D/d)U^2 \quad \dots\dots (4)$$

$$F_y = (\sigma - n\rho)ghC_{du} \cos\theta_y \tan\alpha + k(D/d)V^2 \quad \dots\dots (5)$$

ここに、nρは土石流中に含まれる微細砂の影響で増加する水のみかけの密度、C_{du}は土石流中に浮遊せず
にクーロン摩擦に寄与する粒子の濃度、D：堆積域での粗度、d：土石流構成材料の中央粒径である。基礎
方程式を解く方法としては、岩佐らの有限差分法による数値解析モデルを用いる。

3. 地盤変化のモデル 二次元平面での基礎方程式を有限差分法を用いて解く方法は洪水氾濫を対象とする
場合にもよく用いられるが、土石流氾濫シミュレーションの場合には、流下してきた土石流の一部が停止、
堆積するために地盤条件が時々刻々変化する点が大きな特徴である。この点を考慮するために、ここでは、
図1のように、堆積過程を停止、堆積、遡上の3つの段階に分類し、それぞれに地盤変化のモデルを考えた。
まず、停止過程は先端部の到達したメッシュにおいて流量ブラックスMが0になった時点で停止したものと
判定し、先端が停止すると後続の部分も停止するものとして流動中の全てのメッシュの流動深hを地盤高の
増分、 $h' = h * C_{du} / C_*$ として加える。ここで、右
辺にC_{du}/C* をかけているのは停止した後に水が堆
積層から絞りだされて厚さが減少することを考慮した
ものであり、C* は堆積層での砂れきの容積濃度であ
る。堆積過程の地盤変化のモデルにおいても、外縁部
では流動層全体が停止するものと考えられるので、流
量ブラックスの値で地盤に変換するかどうかの判定を
行うが、勾配変化点では、表面は常に流動を続けなが
ら底面付近で一部の土砂を堆積させ、地盤が上昇して
いくために、外縁部のような取り扱いは適当でない。
そこで、図2のように勾配変化点での流動深H_{B1}が常
に上流の境界で与えられるH_Bとほぼ同じ値H_{B1}=H_B
* cos θ_u / cos θ_d をとると仮定し、もしもH_{B1}

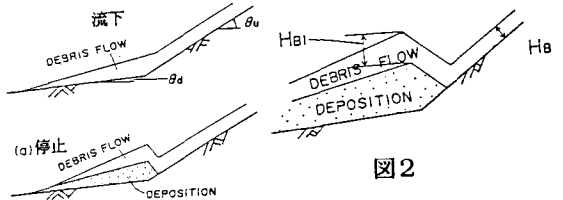


図2

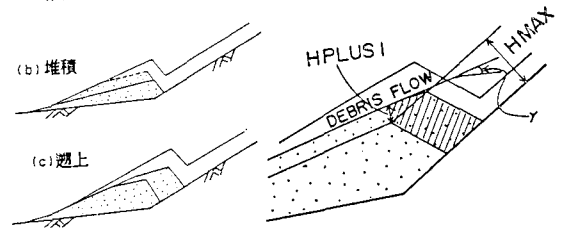


図1

図3

よりも大きな水深 H_1 が計算された場合は $HPLUS1 = (H_1 - H_{bl})C_{qu}/C_*$ を地盤高の増分とする。堆積過程では勾配変化点で流下してきた土石流が堆積土砂に衝突してジャンプするが、堆積の厚さ $HMAX$ 以上になると土石流の一部が上流溪床内に堆積し遡上過程が始まる。このとき、高橋のモデルを参考にして、上流溪床内に一定の表面勾配 γ で堆積が進むものとして、堆積土砂量 Q_1 を $Q_1 = DY * \sin \gamma * \sin \theta_u (H_B^2 - (H_B - HPLUS1)^2 + HPLUS1 * HMAX) / 2 / \sin (\theta_u - \gamma)$ で表わした。また、 $HMAX$ はエネルギー線の高さで近似できるものとして、 $HMAX = (\alpha' v_u^2 \cos \theta_u / 2g + h_u) * 0.8$ とした。ただし、 α' はエネルギー補正係数でダイラタント流体の場合1.7である。

4. 実験結果との比較検討 以上に述べた氾濫シミュレーションを実験結果と比較したものが図4～6である。実験に使用した材料は50%粒径が0.82mmでかなり微細砂が含まれていたために、計算に際しては $n=1.4$ とし、また γ は 10° とした。図5のように堆積水路の勾配が比較的急な場合の適合性に問題がのこされており、とくに谷の出口付近で計算による堆積幅が過大になる傾向が現われている。しかし、その他の点についてはほぼ妥当な結果となっており、図6のように、流路工があるような複雑な堆積域においても計算が可能な点、また氾濫の時間変化を予測できる点などが本モデルの長所である。

5. 昭和54年洞谷土石流への適用 実際への適用性をみるために岐阜県の洞谷に発生した土石流を対象にシミュレーションを試みた。図8より、土石流が流下して4分後には流路工の湾曲部付近から氾濫している。この結果は現地証言から得られた実際のデータとほぼ一致している。図9では氾濫した土砂が家屋などの障害物の間を流下し、堆積範囲を拡大しているが、これはほぼ同じ時刻の実際の堆積分布を示した図7と比較してもほぼ良好な結果である。

6. おわりに 今回、力学的な基礎方程式に基づいた土石流の氾濫シミュレーションを行い、複雑な地盤条件にも対応できるモデルを導いた。しかし、このモデルには谷の出口付近での取り扱いをはじめ、いくつかの研究課題が残されている。

参考文献 1) 高橋：京大防災研年報，22B2

2) 岩佐，井上，水鳥：京大防災研年報，23B2

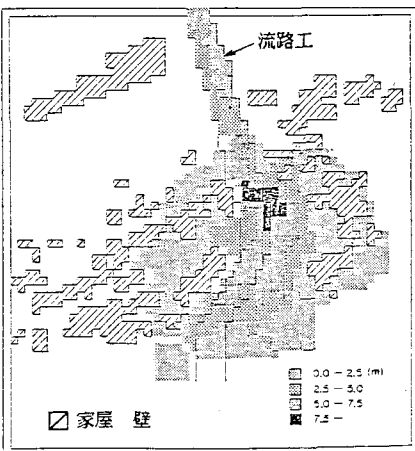


図7

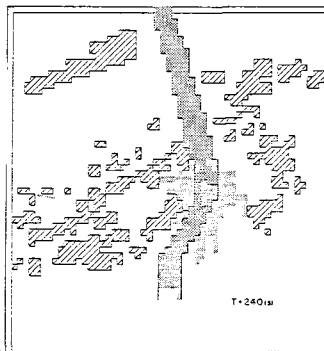


図8

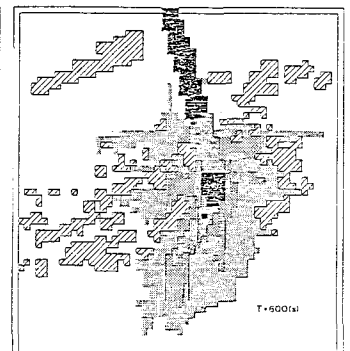


図9

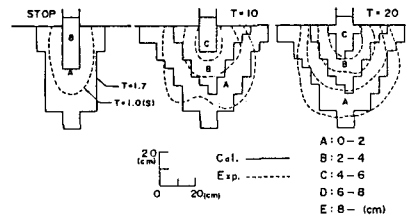


図4

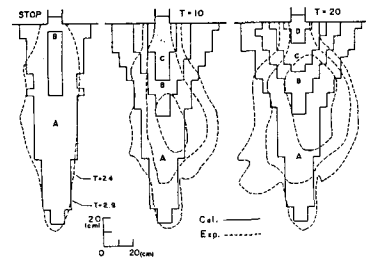


図5

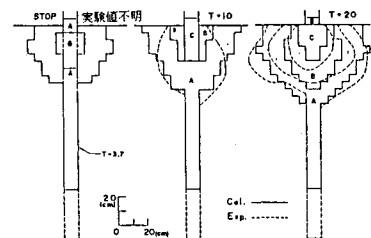


図6