

土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの数値解析

早稲田大学理工学部 正会員 関根 正人
早稲田大学大学院 学生会員 ○宮崎 麻衣子

1. 序論

土石流がより勾配の緩やかな斜面地形上に到達すると、地形面近くに土砂層、その上部に水流層がそれぞれ形成されるような流れへと遷移することがある。このような二層に分かれた土砂の輸送形式を「掃流状集合流動」と呼ぶ。本研究では、土石流から掃流状集合流動へと遷移する流れと、これにより引き起こされる地形変動とを数値的に再現することを目的とする。土石流の内部構造に関しては、江頭ら¹⁾によりその解明が進められ、その成果は「構成則」としてまとめられている。そこで、これに依拠して導かれた抵抗則を適用するならば、一層としての土石流（以下、これを「全層土石流」と呼ぶ）の数値解析は容易である。ところが、この解析を掃流状集合流動に拡張して適用しようとする、いくつかの点で理論上の破綻を生むことになる。たとえば、地形勾配がある値以下になると、外力としてのせん断応力に比べて内部応力のひとつである降伏応力の方が大きくなってしまいといった物理的な矛盾が生じることがある。こうした矛盾を解消するため、宮本ら²⁾は、一層の流れとして扱いつつも抵抗則に修正を加えることで数値的な破綻を回避する方法を提案している。本研究では、宮本らの方法を参考にしつつ、高濱ら³⁾と同様に、掃流状集合流動を土砂層と水流層からなる二層の流れとして取り扱う新たな解析手法を考案し、これに基づく数値解析を行った。

2. 解析概要

本解析では、全層土石流から掃流状集合流動へと遷移する流れを対象とするため、基礎方程式として土砂層・水流層のそれぞれに対する体積保存則、質量保存則ならびに運動方程式を解くことになる。その際、江頭らによる構成則を出発点として新たに導かれた抵抗則を適用することにした。また、地形面において生じる土砂の浸食・堆積に関しては、江頭により提案された評価式を用いる。ここで導いた抵抗則の詳細ならびに基礎式そのものについては、紙面上の制約からこれを記載することを省略する。数値解析に当たっては、掃流状集合流動における土砂層の濃度が河床土砂の理論上の濃度 c^* の $1/2$ になるとの近似を導入した。これは実験的な事実に基づいて導かれた考え方である。また、本解析のように掃流状集合流動の土砂層と水流層を分けて解析する場合には、この2つの層の間のフラックスやせん断応力を考慮に入れる必要がある。ここでは、上記の近似を適用しているため、特に前者の値の評価が容易となる。最後に基礎式の数値解法についてふれると、ここではスタッガード格子の考え方に従い各々の式を離散化した後に解くことにした。このうち、式中に移流項が現れる運動方程式ならびに土砂の輸送方程式の解法には、安定して数値解が得られるCIP法を適用した。

3. 結果と考察

本論文で説明する解析例は、以下の条件下で行われたものである。斜面の初期形状は、図-1の最上段に示す通りであり、途中で勾配変化点を有する一次元斜面である。その上流側斜面の勾配を0.268、下流側斜面の勾配を0.087とし、それぞれの延長距離は100cmである。また、上流端条件としては、土石流の単位幅流量を $80\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ とし、流入土砂の濃度を勾配0.268に見合った平衡濃度に等しいものとした。図-1に解析結果の一部を示した。図-1(a)には、全層にわたってとられた水深（以下、全層水深と呼ぶ） h_t と土砂層の水深 h_s の流下方向変化を時刻毎に表している。この図より、土石流のフロントが勾配変化点である $x=100(\text{cm})$ を過ぎると、全層水深 h_t と土砂層の水深 h_s との間に差が生じるようになり、水流層が現れることがわかる。また、図-1(b)にはそれぞれの層内の平均流速の流下方向変化を同じく時刻毎に表しており、水流層内の平均流速 u_w は土砂層の値 u_s に比べて大きな値となることがわかる。なお、流れのフロント付近においてわずかに数値計算上の振動が見られるが、計算の不安定を招くものではなく、全体結果を損なうものではない。さらに、図-1(c)には各時刻における全層平均の土砂濃度の流下方向変化を、図-1(d)には斜面形状の時間変化を、それぞれ示している。ここに、全層平均の土砂濃度 c_t とは、掃流状集合流動となっている区間に関しては、土砂層の濃度にその水深 h_s を乗じた値を全層にわたっての水深 h_t で除した値を意味する。この図より、土石流フロントが勾配変化点に到達するまでは堆積も浸食も生じないが、フロントが勾配変化点を越えて緩勾配斜面にさしかかると、勾配変化点付近を中心に堆積が生じるようになり、その範囲は下流のみならず上流にも及ぶことが理解できる。

また、数値解析の妥当性を検証するため、高濱ら³⁾の実験結果と本解析結果とを比較した結果を図-2に示した。ここには、土砂層と水流層との境界面（Interface）の高さが示されている。実験条件は、流側斜面の勾配を0.309、

キーワード：土石流、掃流状集合流動、構成則、抵抗則、地形変動

連絡先：〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1, TEL 03-5286-3401, FAX 03-5272-2915

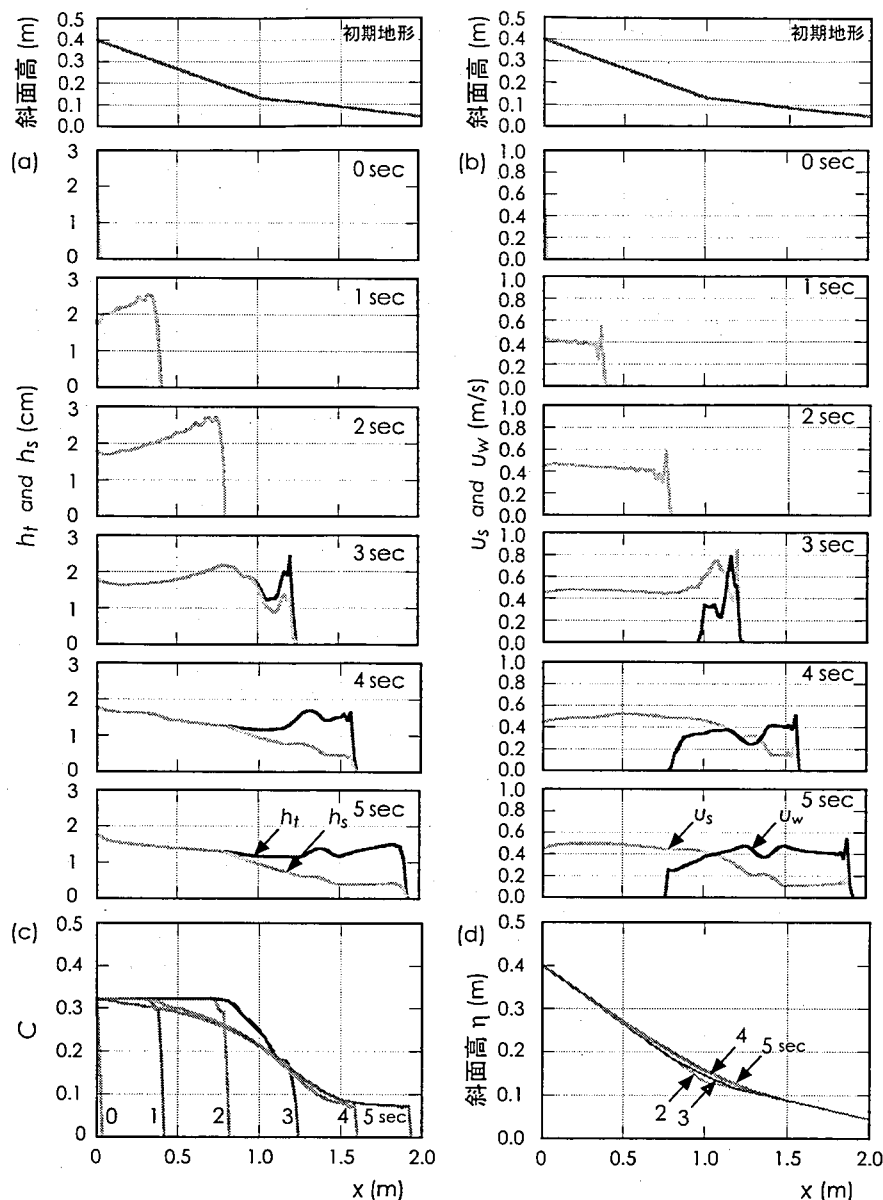


図-1 数値解析結果：(a) 全層水深 h_t と土砂層の層厚 h_s ，(b) 土砂層ならびに水流層の平均流速 u_s および u_w ，(c) 全層平均の土砂濃度 C ，(d) 斜面高 η の時間変化

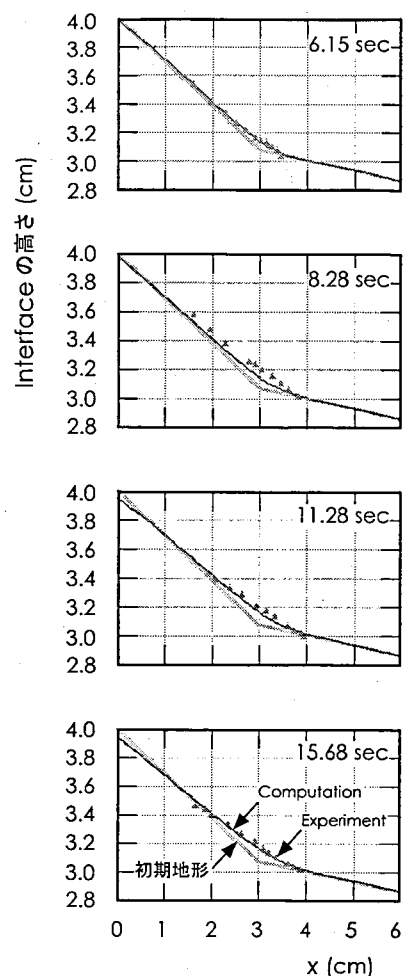


図-2 Interface 高さの流下方向変化の実験値との比較
 細線：計算値，▲：実験値，
 太線：初期地形高

下流側斜面の勾配を 0.070 とし、それぞれの延長距離は 300cm である。また、上流端からは、土石流の単位幅流量 $128.8 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 、濃度 0.300 の土砂が 10.71 秒間連続供給されている。土石流を流し始めてから 6.15 秒後（土石流が勾配変化点を過ぎてから 1 秒後）の計算値と実験値はおおよそ一致している。8.28 秒後、11.28 秒後には実験値の interface の方が計算値よりもわずかに高くなったが、これは、上流側斜面上での計算による浸食量が実験値よりも小さくなっており、下流区間への土砂流入量が少なくなったためと考えている。15.68 秒後の計算値の状態は最終堆積形状によく一致するものと言えよう。以上のように、本解析手法を適用することによって全層土石流から掃流状集合流動へと遷移する流れならびに浸食堆積過程を概ねよく再現できることがわかった。

4. 結論

本論文に示した解析結果などから、ここで適用した解析方法が概ね合理的なものであることが確認された。今後は、現象の非平衡性の議論や浸食速度式の考え方などについて検討を加えるとともに、解析を平面二次元に拡張していく予定である。

参考文献：1) 江頭，芦田，矢島，高濱：土石流の構成則に関する研究，京都大学防災研究所年報，32，487-501，1989。2) 宮本，伊藤：支配方程式に侵食速度を導入した場合の土石流数値シミュレーション手法，砂防学会誌，55，24-35，2002。3) 高濱，藤田，近藤，蜂谷：土石流の堆積浸食過程に関する実験と二層流モデルによる解析，水工学論文集，第 46 巻，677-688，2002。