

1. はじめに

山地斜面における雨水の浸透・流出プロセスは、山腹崩壊・土石流による土砂生産現象と密接に関わっている。また山地溪流のハイドログラフは、溪床・河道堆積土砂の流動を解析するのに不可欠なものである。このように、流域土砂管理のための土砂生産・流出予測において、山地小流域における水文プロセスの解明と適切なモデル化は非常に重要なものである。近年の観測・実験により、局所的な鉛直浸透、パイプ流、基岩への浸透といった、不均質な流れや、Darcy 則とは機構の異なる流れの存在が明らかにされつつある。また、タンクモデル（土壌雨量指数）、ブロック集合モデル、Richards 式に基づく飽和・不飽和浸透流解析など、種々の水文モデルの適用が試みられている。ここでは、これ等の研究成果に関して簡単にレビューした後、今後の研究の方向性について検討を加える。

2. タンクモデルによる流出ハイドログラフと表層崩壊発生の予測

菅原のタンクモデルは、短期～長期流出の予測に広く用いられているだけでなく、表層崩壊による土砂生産の予測にも適用が試みられている（例えば、鈴木ら（1979））。気象庁の土壌雨量指数の算定にも、三段のタンクモデルが用いられている。簡潔で実用的な手法である一方、個別の斜面における雨水の浸透・流出過程を表現できるわけではないため、崩壊発生箇所の予測には不向きである。また、パラメータや災害発生の基準値の決定に、長期間にわたる災害事例の蓄積が不可欠となる。

3. ブロック集合モデル

降雨の流出や表層崩壊発生を物理過程に基づいて予測するには、土層内における三次元的な雨水流動を解析することが必要となる。しかしながら、Richards 式に基づく飽和・不飽和浸透過程を実流域規模で三次元的に解くことは、かなり困難な課題である。そこで、流域を正方形メッシュに分割した上で各メッシュに一定の土層厚を持つ直方体の土塊（ブロック）を仮定し、これを計算の基本要素として雨水流動を追跡する「ブロック集合モデル」が提案され、多くの研究者により検討されてきた。

このモデルでは、各時間ステップにおいてブロック毎の水収支が計算され、ブロックの貯留量に変化していく。隣接するブロック間の水分移動は、一般に、透水係数に位置水頭勾配を乗じて求められる。このような計算により、例えば図-1 に示すように、表層崩壊の主要因となる地下水の発生を再現することができる。近年の山地流域の GIS の整備に伴って、ますますこのモデルの応用性が高まるものと考えられる。

ただしこのモデルは、物理過程を簡略化してブロック単位で計算を行うため、計測された土壌の物理特

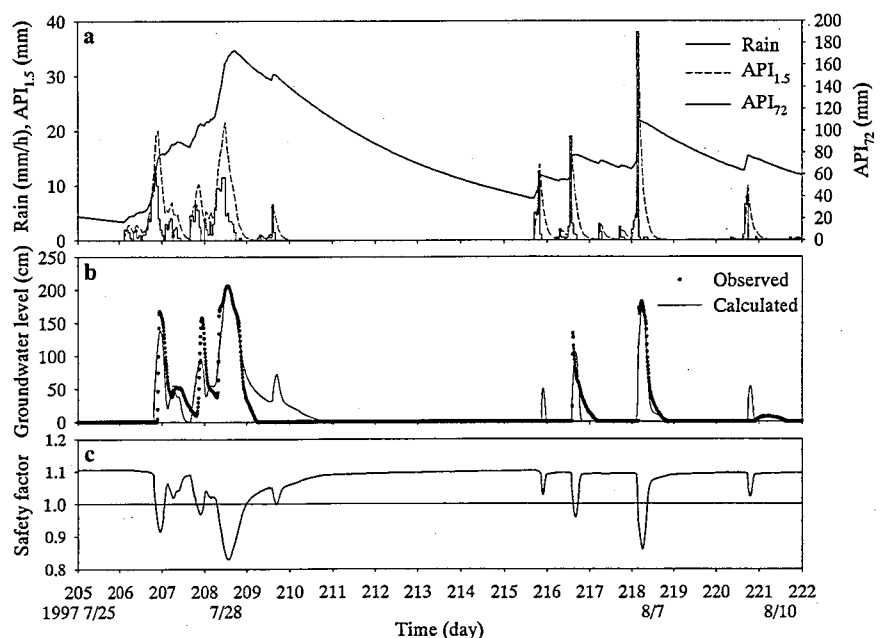


図-1 ブロック集合モデルによる地下水位の再現結果（小杉ら，2002）

性と各ブロックの「平均的な特性」の対応関係が必ずしも明確ではない。このためモデルで用いられるパラメータは、試行錯誤で定めなければならない場合が多い。さらに、実際の山地斜面でみられるバイパス流、パイプ流、基岩への浸透等の種々のスケールでの不均質性や機構の異なる流れを厳密に扱うことは不可能である。

4. Richards 式に基づくパイプ流のモデル化

近年の山地流域における水文観測によって、斜面土層内の飽和側方流出過程にパイプ流が大きく寄与していることが明らかにされてきた。また、崩壊直後の斜面ではしばしばパイプからの水の吹き出しが観察されるため、パイプ流と表層崩壊の関連性も指摘されている。このようなことから、流出ハイドログラフや、表層崩壊発生時刻・場所の予測精度を向上させるためには、パイプ流の適切なモデル化を避けて通ることはできないと考えられる。図-2は、「パイプ埋設部位は飽和透水係数の大きな土壌で近似できる」という仮定を用いることにより、人工パイプを埋設した土層の通水実験を再現計算したものである。この結果から、Richards 式に基づく浸透計算によりパイプ出口付近の局所的な間隙水圧の上昇が再現できることがわかった。

5. 土層内の選択的な流動経路の発達

パイプ流に代表されるような、土層内の選択的な水流を知ることが、降雨流出・表層崩壊発生予測にとって重要である。図-3は、砂とシルトを混合した土層（長さ90cm、高さ30cm、厚さ2cm）に一定の動水勾配を長期間かけ続けたときの流量と土層底面中央の間隙水圧変化である。100日間の間に流量が約5倍に増加し、土層の透水性が大きく変化したことがわかる。浸透流により透水性が変化する機構の解明が、流動経路の解析において重要と考える。

6. 斜面内の選択的な流動経路の特定

斜面土層内の選択的な流動経路を知ることが、地形図上には現れない崩壊発生危険箇所の特定に重要である。例えば、土壌水分計付貫入試験機による計測の結果、土層内の含水率空間分布が比較的容易に計測できた（図-4）。新たな計測手法の開発により、土層内部の状態を詳細に明らかにすることが、流出・崩壊予測の精度向上に不可欠だと考える。

引用文献 伊藤ら (2005) H17年砂防学会概要集(本冊子)；小杉ら (2002) 新砂防 55(3), 21-；Kosugi et al. (2004) Hydrol. Process. 18, 777-；小杉ら (2004) 新砂防 57(3), 3-；鈴木ら (1979) 新砂防 31(3), 1-

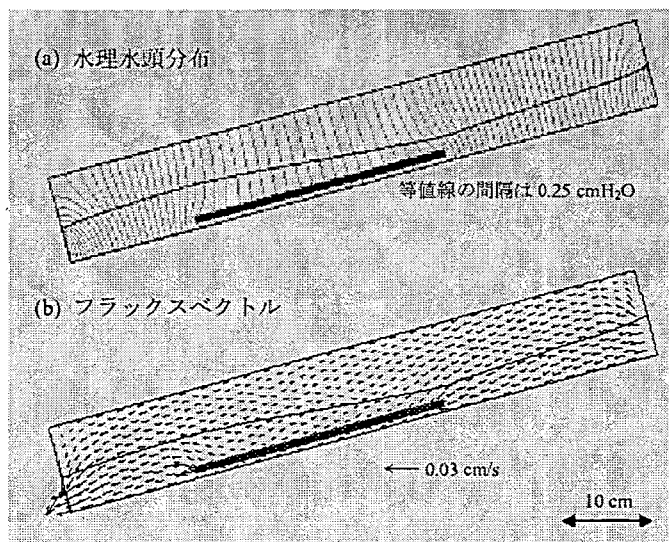


図-2 人工パイプを埋設した土層内部の水移動のシミュレーション結果 (Kosugi ら, 2004)

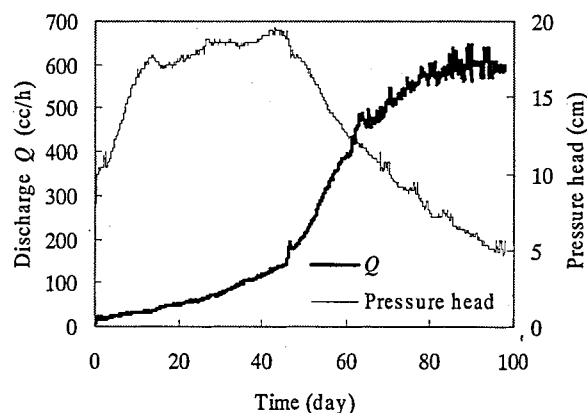


図-3 土層の透水性の変化に伴う流量と間隙水圧の変化 (伊藤ら, 2005)

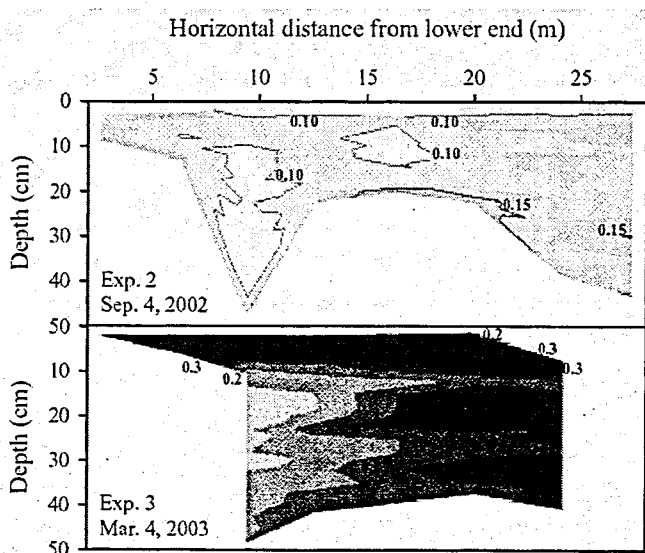


図-4 土壌水分計付簡易貫入試験機による斜面土層含水率分布の計測結果 (小杉ら, 2004)