

## 平面二次元地表流モデルと飽和不飽和地中流モデルの結合

京都大学大学院 学生員 藤原一樹  
 京都大学大学院 正員 市川 温  
 京都大学大学院 正員 椎葉充晴

1 はじめに 雨水による圃場からの深刻な土壌浸食が世界各地で確認されており、重要な環境問題の一つと考えられている。土砂流出を防止・軽減するためには、その物理過程に基づく数値計算モデルを構成し、さまざまな降水に対して土砂流出量を的確に予測すること、また、流出防止対策を組み込んだ形でシミュレーションを実施し、その効果を評価することが基本となると考えられる。しかし精度の高い土砂流出モデルを構築するためには、土砂流出の起因となる雨水挙動を詳細に再現する必要がある。

そこで本研究では、表層の微細な起伏による流れや土中への浸透など、雨水挙動の物理過程を詳細に考慮した雨水流動モデルの構築を目的とする。具体的には、平面二次元地表流モデルと鉛直一次元飽和不飽和地中流モデルを結合することによって、表層付近の雨水流動をきめ細かく再現できるモデルを開発する。このモデルを基礎として土砂侵食現象をモデル化すれば、より正確に土砂流出量を算定すること、土砂侵食の支配的要因を特定することなどが可能になると考えられる。

### 2 平面二次元地表流モデル

2.1 基礎式 本研究では、勾配の小さい圃場域を対象としており、その地表面上の雨水流動は平面二次元不定流モデルで記述するのが適切であると考えられる。数値解法としてはリープフロッグ法を用いる。また雨水のドライな状態の格子への伝播は、地盤高と水位の関係に応じて、段落ち式あるいは越流公式 [1] を用いた。これらの式から各格子の水深・流量を求めた。

2.2 境界条件 地表面での境界条件は次のように考えることにした。まず地中の状態に応じて浸透能を計算する。この浸透能は次節で説明する飽和不飽和地中流モデルで計算する。つぎに、浸透能の値と降雨強度の値から、実際に土中に浸透する量を計算する。最後に、降雨強度から浸透量を差し引いた値を側方流入境界条件とする。

### 3 飽和不飽和地中流モデル

3.1 基礎式 多孔質土壌中の水の挙動は、Richards式によって数学的に表現できる。不飽和に拡張されたダルシー則と連続式とを連立させたRichards式は、変数の取り方によって三通りに表現することができるが、本研究では圧力水頭と含水率を変数とした式を基礎式とし、これに水収支誤差を理論的に0とする修正Picard法 [2] を適用した後離散化して土中の各格子における状態量 (圧力水頭) を計算した。

3.2 境界条件 本モデルでは水移動を鉛直一次元で考えているため、境界は土層最上端 (地表面) と最下端となる。最下端については不透水層が存在するとし、最下端格子と不透水層間における水の流入はしないものとした。

最上端では地表面からの浸透量が境界条件となる。ここでは最上端格子が飽和している場合としていない場合に分けて考えた。まず飽和していない場合には降雨強度、最上端格子の透水係数、最上端格子の含水可能容量のうち最も小さい値を浸透量とした。次に、飽和し、かつ地表に表面水深がない場合にも、先と同様に考える。最後に飽和し、かつ地表に表面水深がある場合には地表に水があると考えられるため、最上端格子の圧力水頭を静水圧とした。

4 地表流モデルと地中流モデルの結合 地表流モデルと地中流モデルの関係を図1に示す。地表流モデルは対象領域の地表部分を平面と考え計算をする。それに対し地中流モデルは一本の土柱に適用され、土柱は地表流モデルの各格子の下にそれぞれ配置する。

地表流モデルと各地中流モデルは計算時に境界条件として互いに状態量を授受しなくてはいけない。地表流モデルは各格子における浸透量を決定するために、各地中流モデルから浸透能を取得する。また各地中流モデルでも土中へ浸透する浸透量を決定するために、対応する地表流モデル格子の水深を取得する。これらの作業を計算時間毎に行い、各モデルでシミュレーションを行った。

キーワード：地表流モデル, 地中流モデル, 結合モデル, 浸透,

住所：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, 電話：075-753-5096, ファックス：075-753-4907

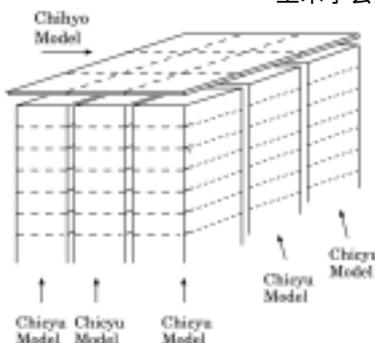


図1 地表流モデルと地中流モデルの関係

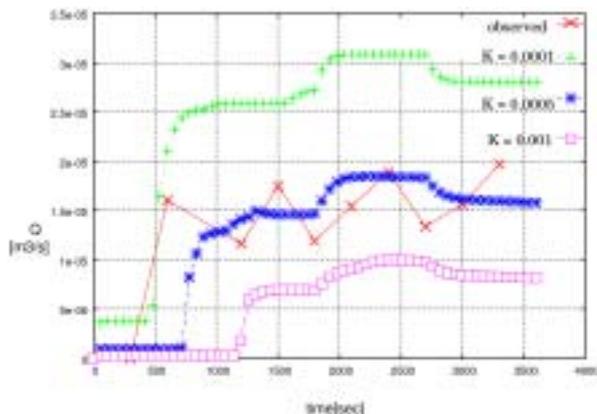


図2 シミュレーション結果 (case1)

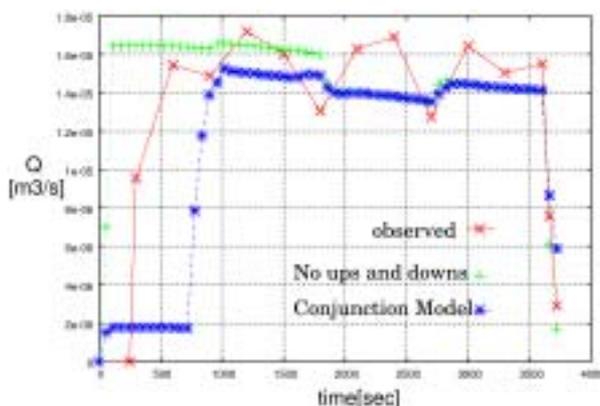


図3 シミュレーション結果 (case2)

5 実験地への結合モデルの適用 構築した結合モデルを人工的に作った小規模な裸地に適用し地表流量を計算した。2回の実験による観測結果(case1, case2)とシミュレーション結果を比較検討し、まずcase1との比較でパラメタの同定を行い、case2との比較で考察した。case1の観測結果とシミュレーション結果を図2に示す。シミュレーションは土壤の飽和透水係数[m/sec]の値を $1 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3}$ と変化させて行った。図2よりパラメタである飽和透水係数の値は $5 \times 10^{-4}$ が適当であると判断した。

次に同定されたパラメタ値を用いて、case2のシミュレーションを行った。case2の観測結果とシミュレーション結果、さらに地表の起伏を考慮せずに斜面勾配が

一定としてシミュレーションした結果を比較した。結果を図3に示す。図3の結果から観測結果と地表の起伏を考慮しシミュレーションした場合の地表流発生時刻が異なることがわかる。この要因としては地中流モデルにおける格子幅の設定を均等にしていることが考えられる。本モデルでは格子幅を一律0.1mとしているが、この幅を深さ方向に調整する、つまり最上端格子の幅をより小さく、深くなるにつれて大きくなるように設定するとよいと考えられる。このように設定することで、最上端格子は少量の雨水で飽和状態となり最も浸透しやすい状態になる。したがってシミュレーションで生じているようなすぐに地表流が発生することがなくなるのではないかと予想できる。また地表付近の格子幅を小さくとることにより、地表層付近の格子間の圧力水頭差が早くなり浸透量が減り地表流も早く発生すると考えられる。

また地表の起伏を考慮しない場合の結果との比較でも、地表流発生時刻が異なる。これは、地表流が下端に到達するまでの時間が違うためと考えられる。起伏を考慮しない場合、地表流は最短距離で下端に到達するのに対し、起伏がある場合は水みちが形成され、下端までの距離が長くなる。また今回の実験地では地表流が下端に到達する水みちは左下の方に限定されており、その水道の途中で小さな窪地があるため、起伏がない場合と比べて時間的な遅れがあると考えられる。

6 結論 本研究では、表層の微細な起伏や土中への浸透など、雨水挙動の細かな部分を考慮した雨水流動モデルを構築した。実領域でまずパラメタの同定を行い、次にモデルと観測結果の比較をしたところ比較的良好な結果が得られた。また地表の起伏を考慮しない場合と比較したところ、起伏が要因と考えられる地表流の下端への到達時刻の差を再現することができた。このように本モデルは、雨水流動の微細な機構を表現することができ、今後開発する土壤侵食モデルの基礎として活用できると考えている。

#### 参考文献

- [1] 川池健司: 都市における氾濫解析方とその耐水性評価への応用にかんする研究, 京都大学博士学位論文, 2001
- [2] MICHAEL A.CELIA AND EFTHIMIOS T.BOULOUTAS: A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.26, pp.1483-1496, NO.7, 1990