

土層の時空間変化シミュレーションに基づく土砂生産ポテンシャルの評価

パシフィックコンサルタンツ株式会社 ○菊池 美帆, 蔭山 星, 江川 千洋, 舩山 淳, 柴野 暉崇
近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター 竹下 航, 岸本 優輝, 小林 正直, 高原 晃宙
京都大学防災研究所 松四 雄騎

1. 土層厚の空間分布理論モデル

土層厚は斜面の安定性に大きな影響を与えることが知られており、従来は、経験的手法（土層厚・勾配の回帰式を用いて空間的分布を表現する手法：杉原ら（2014）、江川・菊池ら（2023））により空間分布を表現することが試みられているが、土層厚の経年変化や実態の土層厚分布を表現できてはおらず、現況土層厚を設定する上で、空間的に実態と完全に整合する土層厚を設定するのは困難である。また、気候変動を考慮した崩壊危険度評価では、豪雨時の崩壊を複数回経験したことが考慮される長期間（数百年以上）での土層厚の評価とそれをフィッティングした崩壊危険箇所の抽出方法が必要である。長期間の土層厚変化に関しては、Dietrich et al (1995)により土層の生成・輸送システムにより説明されることが述べられており、Heimsath et al (1999)、松四ら（2016）により、この土層の生成・輸送モデルを適用し、生成・輸送の収支を計算することで数百年以上スケールの土層の蓄積と土砂生産ポテンシャルを空間的に計算する手法が示されている（図 1）。

そこで本稿では、土層の生成・輸送モデルを適用し、現況土層厚の崩壊生産土砂量のポテンシャルの再現を試みる。本稿ではまず、尾根部が定常状態に達するまでの状態を土層の蓄積シミュレーションにより表現する。その後、土層の蓄積シミュレーションのみでは表現されない、谷部での表層崩壊による土層の除去を表現する崩壊シミュレーションを行う。このように、土層の蓄積と崩壊を繰り返す、土層の時空間変化シミュレーション（サイクルシミュレーション）により、尾根部の定常状態と谷部の非定常状態の両方を表現する土層厚モデルを作成する（図 2）。

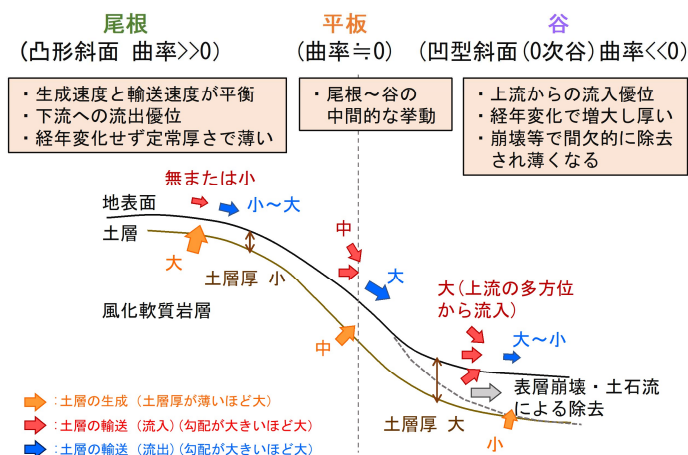


図 1 土層の生成・輸送モデルの概念図

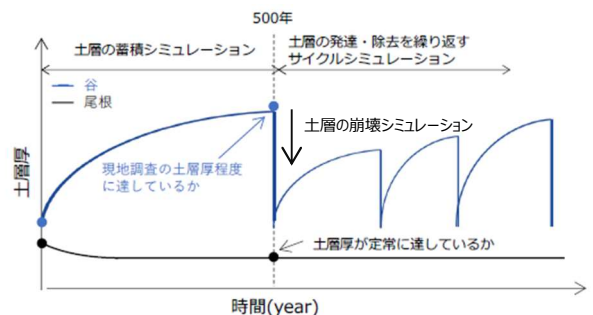


図 2 サイクルシミュレーション概念図

2. 土層厚の調査手法

調査流域は笠間川流域の奈良県山添村の毛原流域で地質は花崗岩である。調査地点は地形曲率に満遍なく、かつ崩壊発生/非発生箇所を網羅した 40 点程度を選定し、検土杖を用いて流域内の土層と風化岩境界深度（図 3）の分布を調査して、土層厚と地形曲率の傾向を確認した。土層厚は尾根（曲率>0.03）で相対的に薄く、谷（曲率<-0.03）で相対的に厚い傾向が確認された（図 4）。



図 3 検土杖で目視確認できる土層境界の例

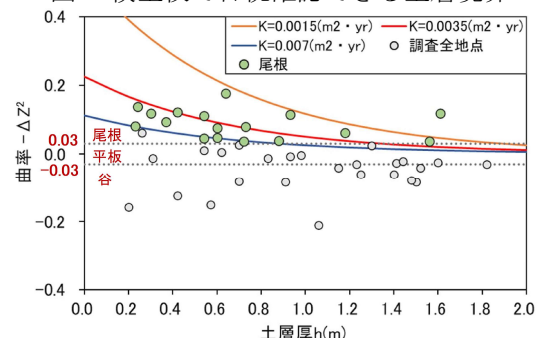


図 4 調査土層厚と地形曲率の相関関係

3. 曲率の空間分布を考慮した土層厚モデルの構築

パラメータ決定については、土層生成速度は、花崗岩地帯における既往研究（松四ら、2016）で 10^2 オーダー程度であることを参考に土層生成係数を設定した。また、設定した生成係数を用いて、松四ら（2016）で述べられている尾根部で土層厚が定常に達することより、調査土層厚（尾根部）の上端・下端を包括するように土層輸送係数の範囲を設定した。加えて、試算により同程度の土層厚分布が表現される係数の組み合わせが複数存在すること、土層の生成・輸送係数の間には相関が

あることがわかっており、本稿では便宜的にこの相関を用いて土層生成係数 $D_0 = 1600 \pm 200 (\text{g/m}^2 \cdot \text{yr})$ 、 $\alpha = 2.1 \pm 0.3 (\text{m}^{-1})$ 、土層輸送係数 $k = 0.0035 \pm 0.0003 (\text{m}^2/\text{yr})$ を空間的にランダムに設定した。

シミュレーションでは、 $2 \times 2 \text{ km}$ の計算範囲で 100 年に 1 度の確率で表層崩壊が発生すると設定し、10 サイクル計 1500 年間の土層厚の計算を行い、現況土層厚と計算土層厚のヒストグラムが最も整合する時点を確認した。本稿では、10 サイクル目直前において、尾根の頻度分布が整合し、谷・平板部における土層厚のばらつき (0.0-2.0m) が最も整合していることが確認され、この時点を経況土層厚モデルとして採用した (図 6)。このようにして、長期間のサイクルシミュレーションにおいて、現況土層厚のヒストグラムと整合する計算土層厚を推定することができる。

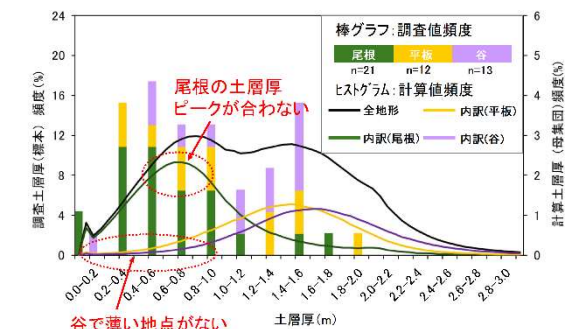


図 5 シミュレーション開始時のヒストグラム

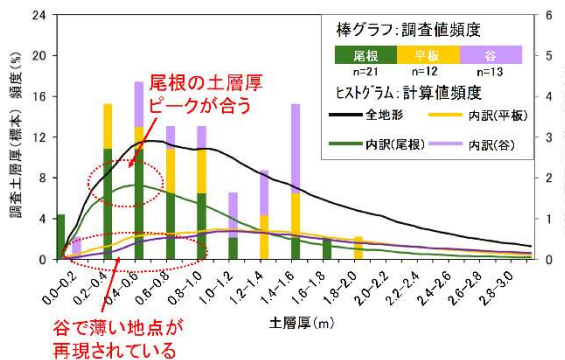
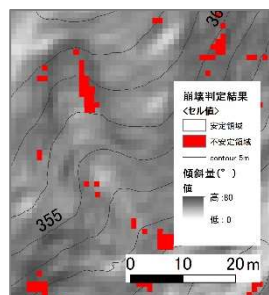


図 6 10 サイクル目 (崩壊直前) のヒストグラム

4. 土砂生産ポテンシャルのシミュレーション結果

崩壊生産土砂量を算出した結果、崩壊発生間隔が長い (降雨に長期間さらされていないことを想定) タイミングでは、土層の蓄積期間が長く、生産土砂量が大きく算出された。一方、崩壊発生間隔が短い (前回の降雨から経過時間が短いことを想定) タイミングでは、土層の蓄積期間が短く、生産土砂量が少なく算出された。このように、長期間崩壊が発生していない時期・箇所では生産土砂量が大きくなるという、時間スケールを取り入れた山地斜

図 7 10 サイクル目の崩壊計算における不安定領域の分布



面の挙動が表現できた (図 8)。崩壊発生場についても、凹型斜面 (0 次谷) において不安定と計算されており、実際の崩壊現象が再現される結果となっている (図 7)。

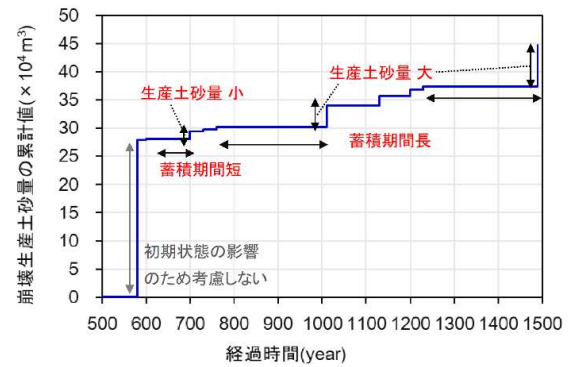


図 8 崩壊生産土砂量

5. まとめと今後の展望

本稿により、土層の生成・輸送モデルと現地調査を基にした手法を用いて土層厚モデルを構築し、土砂生産ポテンシャルの時空間的再現を行った事例を示した。この手法および考え方は今後、土砂・洪水氾濫対策 (崩壊生産土砂量の推定) に活用できる可能性があり、さらに応用することで土石流対策 (施設配置計画や土石流計算の入力条件) へ適用できる可能性もある。

加えて本モデルは、地形・森林・水文要素から構成される複合モデルであり、今後各要素の精度向上により更なる予測精度の向上が期待できる^{6) 7)}。

本事例は花崗岩流域における事例であり、気候や地質が異なる地域では、土層厚モデルや崩壊モデルの入力条件が異なることが想定される。今後は、他地域でのモデルの検証やパラメータのデータベース化によって、広域展開に繋がると考えられる。

参考文献

- 1) 杉原ら (2014) : 花崗岩地域における山地の開析程度と土層厚の関係についての一考察. 平成 26 年砂防学会研究発表会
- 2) 江川・菊池ら (2021) : 熊野酸性岩類 (花崗斑岩) の岩石学的特徴と表層崩壊発生危険度の関係性令和 5 年度砂防学会研究発表会
- 3) Dietrich et al (1995) A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data, Hydrological Processes, 9, 383-400
- 4) Heimsath et al (1999) : Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth, Geomorphology, 27, 151-172
- 5) 松四ら (2016) : 土層の生成および輸送速度の決定と土層発達シミュレーションに基き表層崩壊発生場および崩土量の予測, 地形第 37 巻第 4 号 427-453 頁
- 6) 蔭山ら (2025) : 地形・森林・水文のカップリングモデルを用いた生産土砂量の降雨応答特性解析, 令和 7 年度砂防学会研究発表会
- 7) 田中ら (2025) 樹木根系による付加的粘着力の空間分布を考慮した表層崩壊発生予測, 令和 7 年度砂防学会研究発表会