

土壌侵食モデルを用いた森林流域からの土砂流出の再現性の検討

東京大学大学院 裴 靖, ○堀田 紀文, 田中 延亮, 蔵治 光一郎
東京農業大学 佐藤 貴紀
摂南大学 大谷 侑也

1. 背景と目的

森林の公益的機能のうち、水源涵養機能と並び土砂災害防止に関する機能への期待は高い。気候変動による今後の頻発が予想される土砂災害に対して、流域規模での土砂管理の重要性が指摘されている。山地流域においては斜面崩壊や土壌侵食が活発に生じるため、一般に、斜面が主要な土砂生産源だとみなしている。その一方で、大規模な崩壊や侵食など、過去のイベントで供給されて河道に貯留した土砂が、数十年スケールで流域の土砂流出に影響を及ぼす事例も存在する(堀田・厚井, 2011)。したがって、土砂流出の制御を目的とした森林管理を効果的に行うためには、森林流域内での土砂の生産源と流出プロセスを明らかにする必要がある。しかしながら、流域による土砂流出特性の違いから森林の影響を一般化して論じることは難しく、流域を網羅する詳細な現地観測の実施も多大な労力を要する。

そこで本研究では、農地を中心に世界的に広く利活用が進む土壌侵食モデルを用いて山地森林流域からの土砂流出量の推定を試みる。土壌侵食モデルを山地流域の土砂流出の予測や将来シナリオの検討のためのツールとできないか、という意図である。観測データとの比較検証から森林流域における土壌侵食モデルの適用性を検証することを目的として、流域内の土砂動態について検討する。

2. 研究対象地と使用したデータ

研究対象地は愛知県豊田市大洞町の山地森林流域(35° 16' N, 137° 15' E, 標高 585-635 m, 流域面積 2.27 ha)である(図 1)。年平均気温は 13.6 °C, 年平均降雨量は 2100 mm で、植生は、2020 年時点で 30 年生のヒノキ林である。対象地では、東京大学生態水文学研究所により、気象・流量観測が継続的に実施されている。また、量水堰堤における年 1 度程度の土砂浚いと、斜面プロットにおける表面侵食量の計測が実施されている。

流域の諸条件に加え、気象データを土壌侵食モデルの入力データとし、流量・土砂流出量の観測データなどを計算結果との比較に用いた。流域の諸条件に関して、土層厚や粒度分布などは現地で計測し、土砂収支を明らかにするために濁度計と自動採水器を用いた SS(Suspended Sediment) 流出量の連続観測も実施した。

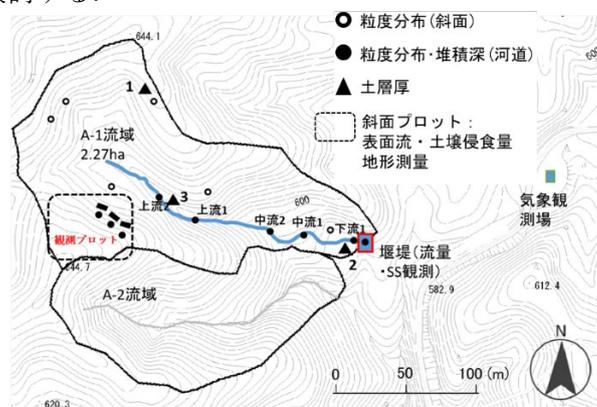


図 1 研究対象地 (大洞試験地)

3. 土壌侵食モデルの適用と解析方針

本研究では土壌侵食モデルとして WEPP (Water Erosion Prediction Project; Flanagan & Nearing, 1995) を流域スケールに拡張した GeoWEPP (Geospatial interface for the WEPP; Renschler, 2003) を用いた。DEM (数値標高モデル) に基づく河道描画と流域分割で計算領域が定義され、各斜面では WEPP によりリル侵食とリル間地侵食を評価し、河道区間での土砂の侵食・堆積の評価と合わせて、最終的に、流域からの土砂流出量と、流域内部の土砂生産量の空間分布が得られる。本研究では以下のような手順で GeoWEPP の適用と検証を行った。

- (1) 流量の再現：作物係数、土層厚、浸透能など、水文プロセスに関わる変数の感度分析を実施したうえで、流量の計算結果を観測結果と比較した。
- (2) 斜面侵食量の検証：土壌侵食量と表面流量の観測が実施されている 3 つの斜面プロットを対象に WEPP での再現計算を実施した。計算に際しては、Interrill Cover Ratio (林床植生の被覆率) と土壌の最終浸透能の感度分析を行った。
- (3) 流域の土砂流出量の再現：河道の侵食可能深に関して感度分析を実施したうえで、流域から土砂流出量を計算し、観測結果との比較を行った。計算結果から、流域内部での土砂生産量の空間分布を明らかにした。
- (4) 土砂の生産源と流出プロセスの検討：流域における土砂収支と、各地点での粒度分布から、対象地における土砂生産源と、そこからの土砂流出プロセスについて考察した。

4. 結果

(1)に関して、蒸発散に関わる作物係数 (Allen et al., 1998) を 0.65, 土層厚を 2000 mm, 最終浸透能を 70 mm/h に設定した時に、水収支とハイドログラフの再現性が最も高かった。これらの値は、現地で取得された値や、

類似の植生・流域で得られた値の範囲に収まった。ただし、日流量に関しては、降雨時の直接流量の再現性が良好だったのに対して、無降雨日の基底流量の再現性が低かった。GeoWEPPでは土層厚の空間分布を考慮しておらず、不飽和浸透の取り扱いも不十分であることなどに起因すると考えられるが、森林流域での土砂流出は比較的大規模な降雨イベント中に生じることから、本研究への影響は無視できる。

(2)の斜面プロットにおける土砂再現では、Interrill Cover Ratioが20%、最終浸透能が120 mm/hに設定した時に、最も良好な再現結果が得られた。ただし、WEPPが農地での土壌侵食量の評価を目的として開発された関係で、森林斜面での軽微な土壌侵食は性能限界に近く、計算値のばらつきが大きく現れた。そこで、流域からの土砂流出が顕著な豪雨イベントのみ抽出して計算値と観測値を比較したところ、良好な対応関係が確認できた。また、(1)で得られた最終浸透能は70 mm/hであったが、感度分析の結果から流出量の差異は小さかったことから、土壌侵食量の再現性を優先して、GeoWEPPで用いる最終浸透能は120 mm/hとした。

流域全体の土砂流出状況を再現した(3)では、河道の侵食可能深の検討を行った。感度分析の結果から、河道の侵食可能深が計算結果に大きく影響することが明らかになったが、現地での河床堆積物の深度の測定結果に対応するように、一次河道で100cm、二次河道で20cmと設定した際の計算結果が堰堤の堆砂量の変化にもっとも良好に対応した(図2)。流域の土砂生産量の分布から、河道区間および、一部の河道隣接斜面において表面流が集中する部分で筋状に顕著な土砂生産が確認できた。

(4)において、本研究によって得られた対象地の土砂収支を表1に示す。SS観測結果に基づき年間のSS流出量を推定したところ、堰堤の堆砂量の10%程度の値を取った。すなわち、流域からの主要な土砂流出形態は掃流砂であり、大部分は堰に捕捉されていた。斜面からの生産土砂量(侵食量)は斜面プロットにおける観測値に基づき(流域面積を乗じて)推定した値であるが、SS流出量に比較しても小さく、対象地における土砂生産源は河道であることが分かる。GeoWEPPによる計算結果も同程度の値を示したが、性能限界に近い非常に小さな値であるために、計算結果が0となった年もあった。

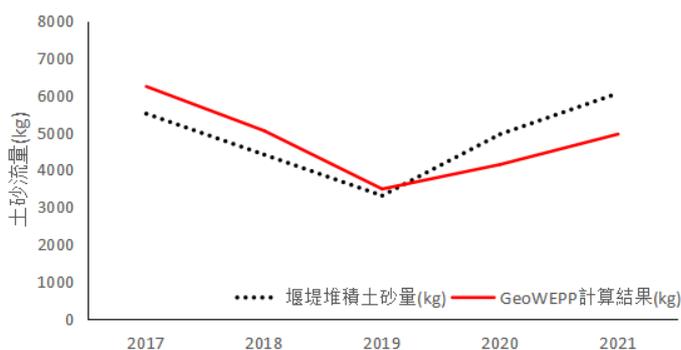


図2 流域からの土砂流出量の時系列変化

5. 考察

土砂収支と合わせて流域内(斜面, 上流から下流にかけての河道区間, 堰堤堆砂)の土砂の粒度分布を比較した結果, 流域中部の河道で粒度分布が変化していることから, 流域における現在の土砂流出は, 過去の大規模な崩壊・侵食によって供給され, 河道に堆積している土砂が, 下流から徐々に侵食されていくことで生じている可能性が高いと考えられる。

GeoWEPPは, 対象地における土砂生産源, 流出プロセスを適切に再現したが, 計算においては河道の侵食可能深が特に重要なパラメーターであった。植生や攪乱などの過去の履歴を反映して流域固有の値を取るという点で, 現状では実測値に基づく以外の方法で与えることが困難だという点にも注意を要する。

主要な土砂生産源が河道区間であったことから, 土砂流出抑制という観点からは対象地での森林管理の効果は河道周辺を除き低いと考えられる。したがって, 対象地のような森林流域で土砂流出を抑制する場合には, 河道区間における適切な施設配置や河道周辺の植生の扱いを検討する必要がある。一方で, 攪乱の影響が長期に及ぶという点で, 適切な森林管理の重要性を確認することが出来たとも言える。森林流域からの土砂流出とその制御を一般化して論じるのは難しいが, 土壌侵食モデルが複雑な森林流域からの土砂流出を良好に再現したことから, 適切な条件設定をすることで効果的な森林管理のシナリオ検討などが可能だと考えられる。

表1 流域における土砂収支

期間	堰堤堆積土砂量(kg)	SS流出量(kg)	GeoWEPP計算結果(kg)	GeoWEPP斜面土砂流量(kg)	斜面からの生産土砂量(kg)
2016.12-2017.10	5501.8	384.6	6232.7	0.0	91.4
2017.11-2018.09	4401.5	412.6	5042.6	51.2	60.7
2018.10-2019.09	3301.1	359.2	3479.4	98.1	52.7
2019.10-2020.09	4951.6	694.0	4137.2	0.0	46.1
2020.10-2021.09	6052	776.4	4953	274.1	74.2

引用文献: Allen et al., 1998, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Flanagan & Nearing (Eds.), 1995, NSERL Report. No. 10. 堀田・厚井, 2011, 砂防学会誌 63. Renschler, 2003, Hydrological Processes 17.