

日本全国のダム貯水池上流域を対象とした森林・地形状態と土砂・流木流出特性の解析

Relationship and analysis between forest and geomorphic conditions

and sediment and woody debris characteristics in watersheds with dam reservoirs throughout Japan

名古屋大学生命農学研究科 ○中島啓太・五味高志・田中隆文・小谷亜由美

## 1. 研究背景と目的

台風や線状降水帯の発生といった豪雨によって山地の上流域で発生する斜面崩壊などに伴い、山地流域から土砂や流木が流出する。近年、土砂や流木による災害は顕在化し 2017 年の福岡県朝倉市、2017 年の広島県呉市、2021 年の青森県むつ市などで土砂と流木の災害が発生している。このような土砂と流木の流出により、ダムや貯水池の機能低下も報告されている(助川・小森, 2017)。豪雨に対応した省庁横断型の治水対策として、として流域治水も開始されている(島谷・皆川, 2021)。流域スケールでの土砂と流木の動態では、上流域から生産⇒滞留⇒流出プロセスを経て下流域やダム・貯水池などへ移動・流出する(Nakamura et al., 2000)。このような流域内の土砂と流木の移動プロセスでは、流域面積や谷密度などの水文地形の要素、森林率や林床被覆率などの森林状態の要素と関連する(Milliman and Syvitski, 1992)。しかし、既往研究では流域の土砂流出と流木流出を個別に扱うことが多く(たとえば, Seo et al., 2010)、流域的視点での森林管理で重要となる土砂と流木の流出において、水文地形と森林状態の両方が考慮されていない。そこで、本研究では、生産⇒滞留⇒流出プロセスにおいて、(1) 流域における水文地形要素と森林状態のパラメータを抽出し、(2) それらの複合要因を、統計解析を行うことで、流域管理において重要となる土砂と流木の流出における流域特性を評価する。

## 2. 研究方法

全国 129 箇所の水資源機構データベースから、森林面積率(北海道・本州・四国 $\geq 90\%$ 、九州 $\geq 80\%$ )の高い 83 箇所のダム・貯水池流域を選定し、土砂・水流出・流木流出が安定的に収集されている 2011~2020 年の 10 年間のデータを用いた。各流域面積は 3~293km<sup>2</sup>、森林面積率は 81~99%であり、年平均降水量は 900~3000mm である。流域の水文地形情報は、国土地理院の 10m 数値地形図(DEM)から、流域面積(km<sup>2</sup>)、標高差(m)、地形湿度指数(TWI)平均、ストリームパワー指数(SPI)平均、流域形状比、平均傾斜( $^{\circ}$ )、流路勾配( $\theta$ )、谷密度(/km)、比高差( $\theta$ )、主流路長(km)、流路標高差(m)の 11 パラメータを算出した(Prasannakumar et al., 2011)。また、流域の水流出に関する指標として、気象庁メッシュデータから年降水量、ダム諸量データベースからダム貯水池の年総水流入量、年平均水流出量の 3 パラメータを取得した。森林情報は、林野庁が全国 4km メッシュで整備されている森林生態系多様性基礎調査のうち、今回の調査期間に該当する平成 26~30 年について森林面積(km<sup>2</sup>)、森林率(%), 平均林齢(年)、人工林割合(%), 蓄積量(ha/km<sup>2</sup>)、枯損本数(本)、立木含む出現種数(種)、高木層植被率(%), 林床被覆率(%), の 9 パラメータを算出した。また、ダム・貯水池の単位流域面積当たりの土砂流出量と流木流出量を比土砂流出量と比流木流出量と定義した。比土砂流出量と比流木流出量を従属変数とし、合計で 23 流域パラメータを説明変数として、重回帰分析を行った。重回帰分析では、ダムごとの各種パ

ラメータの値をから各種パラメータの平均値を引いたものを各種パラメータの標準偏差で割ることで各変数を標準化(平均の値を 0、分散を 1 とし、-1 から 1 の値をとる)した。また、R の car パッケージである vif 関数を用いて多重共線性の存在の目安である VIF の値が 10 以下であること確認した(天坂ら, 1996)。パラメータの抽出はステップワイズ法による独立変数の選択を赤池情報量規準(Akaike's Information Criterion: AIC)の値を用いて AIC の値が最小になる変数の組み合わせをモデルとして採用した。統計解析は R の lm パッケージを用い、有意水準 5%とした(James et al., 2013)。

## 3. 結果と考察

### (1) 流域の土砂と流木流出額の関係

本要旨では、現段階で解析済みの本州・四国・九州の 49 流域の解析結果を以下に報告する。ダム・貯水池からの比土砂流出量 0~525m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>、比流木流出量 0.3~132m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>であった。最大比土砂流出量を確認した流域は、福岡県佐田川の寺内ダム流域(525m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>)、その次は長野県小渋川の小渋ダム流域(267m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>)であった。最大比流木流出量を確認した流域は、佐賀県広瀬川の竜門ダム流域(132m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>)、その次は福岡県佐田川の寺内ダム流域(24m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>)であった。土砂量の増加により流木量が多くなる傾向はみられるものの、流域間のばらつきも大きかった(図-1)。地域別の比土

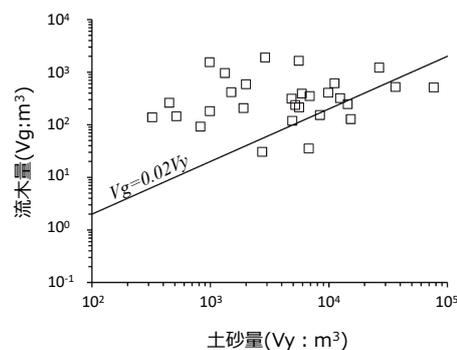


図-1 流域の土砂流出量と流木流出量

砂流出量、比流木流出量をみると東日本では平均 2645m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>、349m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>、中日本では平均 8675m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>、378m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>、西日本では平均 3739m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>、455m<sup>3</sup>/年/km<sup>2</sup>であった。また、本研究の土砂量(m<sup>3</sup>)に占める流木流出量(m<sup>3</sup>)の割合は、1%から 157%(平均 18%、SD33%)であり石川ら(1989)で示されている土砂量に対して流木流出量の上限值としている 2%(図-1 中の線)よりも多い流域が 24 箇所であった。

上限値を超えたダムとしては、福岡県寺内ダム(5%)や栃木県五十里ダム(65%)の流域が挙げられる。寺内ダムは 2017 年九州北部豪雨、五十里ダムは 2015 年の関東・東北豪雨の影響を受けており、近年の豪雨や斜面

崩壊により多くの流木が流出したと報告されている流域と一致した。土砂量に対して流木量が多くなる要因として、多数の斜面崩壊が発生しそれに伴って多くの流木がr 輸出したことが挙げられ、また、崩壊発生場の森林の蓄積量が石川ら (1989) の結果と比較しても、近年の森林で、 $1598 \times 10^6 \text{m}^3$  (1990 年) から  $3545 \times 10^6 \text{m}^3$  (2022 年) と、およそ 2 倍 (人工林のみ) となっており (令和 4 年度 森林・林業白書, 2023)、近年の豪雨や斜面崩壊により、蓄積の大きな森林において崩壊が発生することで、多くの流木が流出したと考えられた。

#### (2) 土砂・流木流出に及ぼす流域パラメータ

重回帰分析の結果、比土砂流出量を説明する変数は谷密度 (-0.37), 人工林割合 (-0.25), 林床被覆率 (-0.33), 高木層植被率 (-0.53), 森林率 (-0.29), 樹木含む出現種数 (-0.41), 年平均流入量 (-0.42) となり、このときに AIC は -46.4 ( $P < 0.01$ )。土砂流出に影響するパラメータとしては、高木層植被率と年平均流入量が最も大きく寄与していた。比流木流出量としては、TWI 平均 (-0.17), 森林率 (-0.09), 枯損本数 (-0.06), 林床被覆率 (-0.12), 高木層植被率 (-0.10), 年総流入量 (-0.06) が抽出され、このときの AIC は -146.8 ( $P < 0.01$ ) であった。流木流出量に影響するパラメータとしては、TWI 平均と森林率が大きく寄与していた。

比土砂と比流木流出量ともに水文地形と森林状態のパラメータを考慮することでモデル精度が向上した。比土砂流出の解析で抽出された谷密度は土砂の生産と貯留に関する指標 (水谷, 1981) でもあり、谷密度が大きくなることで、土砂が流域内に堆積しやすくなると考えられた。また、高木層被覆や林床被覆の割合は表土の土砂流出に関連する指標としても重要であることが報告 (Miura et al., 2003) されている。出現種数が増えることで土砂量が増える傾向が示されたが、これは過去に斜面崩壊などの攪乱が多い場合には出現種などが多様化する傾向 (伊藤・中村, 1995) などと関係していると考えられた。

流域の比流木流出量を説明する地形要素として、TWI が抽出された。TWI は流域面積と流域勾配で算出され、流域内の水貯留を表す指標 (Beven, 1979) であることから、流域内の水移動に伴う流木の移動と滞留を示していると考えられた。また、土砂流出量と同様に、林床被覆率や高木層植被率も抽出され、流木の流出においても斜面の森林状態や土砂移動と関係していることが予想された (矢野ら, 2020)。また、枯損本数も重要であることが示され、林齢や過去の攪乱の有無などによる枯損木の大小が関連していると考えられた (太田, 2019)。上流斜面で生産された流木が流送される過程で水流出が重要と報告 (Haga et al., 2002) されており、流量による流木の移動のしやすさも重要と考えられた。

#### 4. まとめ

本研究では、森林生態系多様性基礎調査を活用することにより、流域スケールでの土砂と流木流出の評価において、水文地形と森林状態の両面を評価することができた。水文地形と森林状態の双方を同時に考慮することで、森林面積率や人工林面積率などの面積的な評価のみならず、出現種数や林床植生被覆などの森林の「質」を評価する指標の重要性が示唆された。

今後の流域治水では、土砂や洪水対策において、森林管理やその結果としての森林状態 (林床植生など) を考慮することの重要性が示された。本研究は日本全国の土砂と流木の流出特性の把握を試みたものであり、全国の傾向や地域ごとのトレンドを把握することでより流域の土砂・流木流出の特徴に対応した砂防計画の構築に貢献できると考えられる。ここでは、49 流域のみ

を対象とした解析結果を報告したが、日本全国 83 流域に解析を拡張し、土砂流出・流木流出の流域特性の把握を行ったものを報告する。

#### 引用文献

- 天坂格郎, 大岩洋之, & 神尾信. (1996). 多重共線性の影響と新変数選択法の提案: 変動要因解析のための重回帰分析活用法に関する研究. *日本経営工学会誌*, 46(6), 573-584.
- Beven K. 1979. On the generalized kinematic routing method. *Water Resources Research* 15(5): 1238-1242.
- 石川芳治・水山高久・福澤誠. 1989. 土石流に伴う流木の発生及び流下機構. *砂防学会誌* 42(3): 4-10.
- 伊藤哲・中村太士. 1995. 地表変動に伴う森林群集の攪乱様式と更新機構. *森林立地* 36(2): 31-40.
- Haga H, Kumagai T, Otsuki K, Ogawa S. 2002. Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: An in-situ field experiment of log transport and a field survey of coarse woody debris distribution. *Water Resources Research* 38(8): 1-1.
- James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. 2013. An introduction to statistical learning. New York: Springer.
- Milliman JD, Syvitski JP. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The journal of Geology*, 100(5), 525-544.
- Miura S, Yoshinaga S, Yamada T. 2003. Protective effect of floor cover against soil erosion on steep slopes forested with *Chamaecyparis obtusa* (hinoki) and other species. *Journal of Forest Research*, 8(1): 27-35.
- 水谷武司. (1981). 急勾配山地からの土砂流出に係る流域諸要因. *砂防学会誌*, 33(4), 1-9.
- Nakamura F, Seo JI, Akasaka T, Swanson FJ. 2017. Large wood, sediment, and flow regimes: Their interactions and temporal changes caused by human impacts in Japan. *Geomorphology*, 279, 176-187.
- Nakamura F, Swanson FJ, Wondzell SM. 2000. Disturbance regimes of stream and riparian systems—a disturbance - cascade perspective. *Hydrological Processes* 14(16 - 17): 2849-2860.
- 太田猛彦. 2019. 「流木災害」と森林管理. *水利科学* 62(6): 70-83.
- Prasannakumar V, Shiny R, Geetha N, Vijith HJEES. 2011. Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences* 64: 965-972.
- Seo JI, Nakamura F, Chun KW. 2010. Dynamics of large wood at the watershed scale: a perspective on current research limits and future directions. *Landscape and Ecological Engineering* 6: 271-287.
- 助川友斗・小森大輔. 2017. 日本全国のダム貯水池における流木流出量の統計解析. *土木学会論文集 G (環境)* 73(5): I55-61.
- 島谷幸宏・皆川朋子. 2021. 流域治水から国土再編へ. *河川技術論文集* 27: 575-578.
- 矢野真一郎・正垣貴大・矢藤壮真・津末明義・笠間清伸. 2020. 令和元年東日本台風による丸森町における斜面崩壊のロジスティックモデルの開発と流木発生量の推定. *土木学会論文集 B1 (水工学)* 76(1): 1 253-263.

**Keywords:** Sediment transport, Large woody debris, Forest condition, Watershed scale