

山地流域におけるトレーサを用いた土砂生産源推定

○田中碧*¹ 宮田秀介*¹ 水垣滋*² 小杉賢一朗*¹

*¹：京都大学大学院農学研究科，*²：国立研究開発法人土木研究所

1. はじめに

流砂系の総合的な土砂管理においては、その出発点に当たる山地流域における、土砂生産源の把握が重要である。これまで欧米を中心に、土砂の物理化学特性（トレーサ）を用いた多変量混合モデルによるfingerprinting（土砂生産源推定）が普及してきた。しかしながら、これらの多くが海岸域を対象としたものであり、山地流域を対象とした事例は依然として限られている。

山地流域における土砂動態の把握には流砂観測が基本とされるが、その多くは流域末端でのみ実施されるため、生産源の空間的分布を評価することは難しい。トレーサ手法では、そうした流砂観測では直接把握が困難な上流域も、生産源推定の対象とすることができる。国内での適用事例としては、岩石由来の放射性同位体をトレーサとして用いた、水垣ら（2022）の研究が挙げられる。生産源を定量的に推定する手法を提案したが、本手法の適用性や汎用性を示すには、さらなる適用事例の積み上げが必要である。本研究では、より広域な山地流域へのトレーサ手法の適用可能性と、山岳流域においても簡便に推定を行うための手法を検討した。

2. 方法

2.1.対象流域

対象流域は、岐阜県高山市に位置する神通川水系蒲田川流域（流域面積：約 94.2 km²、平均河床勾配：1/13.0）であり、3000m 級の槍穂高連峰などを源流に有する急流河川である。本対象流域内には、水垣らが研究対象とした足洗谷流域（流域面積：約 6.7 km²）が含まれる。また、平湯川との合流点の上流側に位置する神坂砂防堰堤を、下流端として設定した。堰堤に設置されたスロットサンプラーで捕捉された流出土砂を、3 深度（上層、中層、下層）から採取した。これらの流出土砂は、観測結果から、2023 年 4 月 30 日の出水（総雨量 47.7mm、最大 1 時間降水量 8.5mm）において、捕捉開始後約 7 時間で流出したものと考えられる。

2.2.多変量混合モデル

流域内の各生産源の寄与率（流出土砂に対する構成比）を評価する手法として、多変量混合モデル（Walling ら 1999；Collins ら、2010）が提案されている。本モデルは、土砂のトレーサ濃度特性が、生産源となる裸地から流域末端までの輸送過程で、保存されることを前提としている。生産源 s の寄与率 P_s は、式(2)および(3)を満たし、かつ式(1)の誤差 E が最小となるように最適化することにより求められる。今回の解析では、サンプルの特性や統計解析の制約から、補正係数と加重係数を省略して計算した。

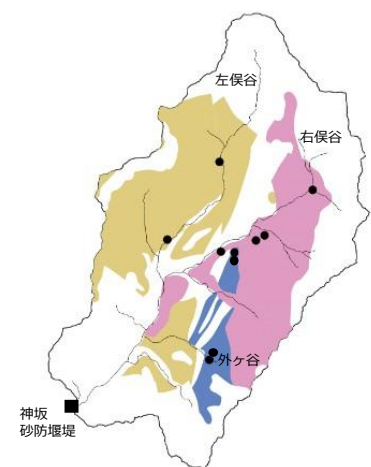
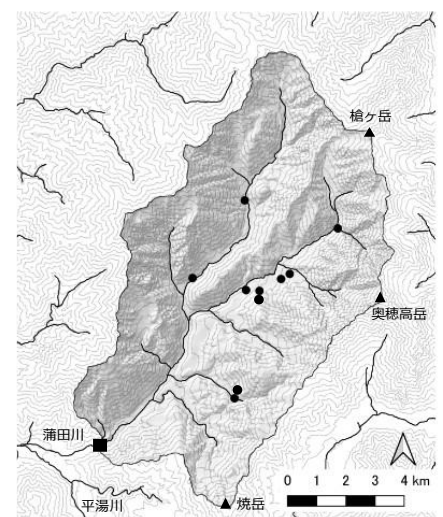
$$E = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{C_{ssi} - (\sum_{s=1}^m P_s S_{si} Z_s O_s V_{si})}{C_{ssi}} \right\}^2 W_i \quad \dots\dots (1)$$

$$\sum_{s=1}^m P_s = 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$0 \leq P_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

C_{ssi} ：流出土砂サンプルのトレーサ i の濃度
 P_s ：生産源区分 s の流出土砂に対する相対割合（寄与率）
 S_{si} ：生産源 s におけるトレーサ i の平均濃度
 n ：使用するトレーサの種数
 m ：生産源の区分数

Z_s ：生産源 s の流出土砂に対する粒径補正係数
 O_s ：生産源 s の流出土砂に対する有機物補正係数
 SV_{si} ：生産源 s におけるトレーサ i の分散を考慮した加重係数
 W_i ：トレーサ特性 i の判別力による加重係数



生産源区分
 A (花崗閃緑岩・段丘堆積物)
 B (玄武岩・付加体)
 C (流紋岩・崖錐堆積物)

図－1 蒲田川流域と流域内の生産源区分

2.3. 試料採取と解析

生産源土砂のトレーサ特性を調べるため、地質図、空中写真および登山地図を用いて、登山道からアプローチ可能な10箇所の裸地を採取地点として設定した。このとき、流域内に裸地が存在する各地質につき、複数箇所から採取するよう留意した。採取した土砂試料は、炉乾燥（120℃、24時間）後にふるい分けし、そのうち3粒径階（Ⅰ：0.25～0.425mm、Ⅱ：2～4.75mm、Ⅲ：9.5～19mm）を分析の対象とした。波長分散型蛍光X線分析装置を用いて、分析試料の化学元素組成を、簡易的な定量方法であるFP法により測定した。

分析結果に基づきトレーサと生産源区分を決定し、判別分析により正答率（適切に生産源地域区分に判別される確率）を確認した。この試行を繰り返し、最も正答率の高い組み合わせを2.2の多変量土砂混合モデルに適用し、流出土砂に対する各生産源の寄与度を粒径階ごとに推定した。

3. 結果・考察

検出された化学元素の中から、地点間のばらつきが顕著な5種類（Fe、K、Ti、Sr、P）をトレーサとして抽出し、クラスター分析を行った。その結果から、地質特性を基準として、流域を3地域に区分した（図－1）。なお、図－1に示された白色の区分には、顕著な裸地が確認されなかった地質、もしくは土砂採取が実施できなかった地質が分布する。

図－2に、粒径ごとに生産源寄与率を推定した結果を示す。この図から、捕捉時期や粒径階に応じて各区分の構成比が異なることがわかる。例えば、粒径階Ⅲ（9.5mm～19mm）においては、出水開始直後（下層）は花崗閃緑岩・段丘堆積物で構成される区分が80%程度を占めるが、中層や上層では流紋岩・崖錐堆積物で構成される区分が50～60%程度まで増加している。このことから、掃流砂として輸送された流出土砂の主な生産源は、時間の経過とともに、右俣谷流域から左俣谷流域へと移行した可能性が考えられる。一方で、粒径階Ⅰ（0.25mm～0.425mm）およびⅡ（2mm～4.75mm）においては、出水中のタイミングにかかわらず、流紋岩・崖錐堆積物の寄与率は70～100%と高く、玄武岩・付加体の寄与率は20%未満と低い傾向が確認された。後者の玄武岩・付加体が分布する外ヶ谷流域には、大規模な崩壊裸地斜面が存在することから、外ヶ谷流域に複数設置された砂防堰堤の効果が反映された可能性が考えられる。

4. おわりに

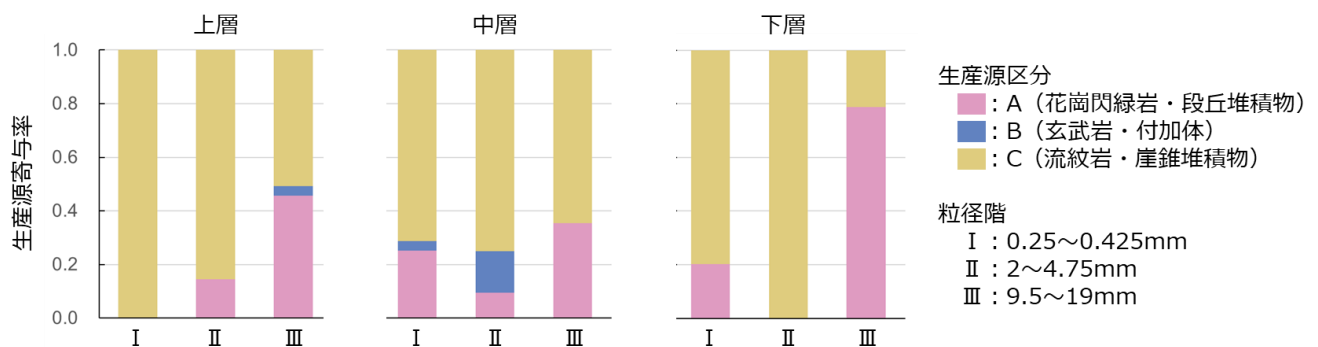
本研究では、化学元素をトレーサとして用い、広域な山地流域における土砂生産源の推定を行った。比較的アプローチが容易な地点のみからサンプリングを実施した結果、各生産源区分あたりのサンプル数が必然的に限定され、トレーサと生産源区分の組み合わせを統計解析で適切に評価するには不十分であった。したがって、土砂採取地点の追加が第一の課題である。さらに、裸地が分布していたものの、アプローチが困難なため解析対処から除外せざるを得なかった区域が、稜線部を中心に存在した。このような区域を生産源として適切に評価するためには、より簡便なサンプリング方法および解析方法の検討が必要である。

参考文献

Walling, D. E., Owens, P. N. and Leeks, G. J. L. (1999) : Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK, Hydrological Processes, Vol. 13, p. 955-975

Collins, A. L., Walling, D. E., Webb, L. and King, P. (2010) : Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information, Geoderma, Vol. 155, p. 249-261

水垣滋、古市剛久：複合トレーサによる土砂の生産源推定、砂防学会誌、Vol.74、No. 6、p.48-54、2022.



図－2 各層における粒径階ごとの生産源寄与率