

# 土砂移動トレーサによる濁質生産源推定手法の高精度化に向けた検討

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 5

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：柿沼孝治、水垣滋

## 【要旨】

山地から河川を通じて河口・沿岸に流出する微細土砂（浮遊土砂、濁質）の生産源特定に有効な土砂移動トレーサ技術について、微量元素を用いて生産源区分の細分化とそれらを判別可能な複合トレーサの探索を行った。その結果、10 区分された 72 の生産源採取箇所を 12 種の微量元素により 100%の正答率で判別できた。先行研究に比べてより細分化された生産源からの寄与率を高精度に推定できる可能性が示された。

キーワード：複合トレーサ、濁質モニタリング

## 1. はじめに

山地から河川を通じて河口・沿岸に流出する微細土砂（浮遊土砂、濁質）は干潟や河口・沿岸底質の主要な構成材料であり、栄養塩等の物質循環に重要な役割を果たす。一方、豪雨・地震に伴う斜面崩壊等の大規模土砂生産は、河口・沿岸域の濁水の流下・拡散や微細土砂の堆積等により、農業・工業用水の取水や水産資源等に深刻な影響を中長期的に及ぼす場合がある。微細土砂は、河床材料と交換せず山地から海まで一気に流下するため、生産源対策が不可欠であり、流域内の生産源分布の把握が重要である。

流砂系の総合的な土砂管理では、土砂動態マップの作成が推奨されており<sup>1)</sup>、複数支川末端における水文観測（浮遊砂量観測）による 1 洪水時のマップ作成事例<sup>2)</sup>が例示されている。しかし、コスト・労力的に容易でなく、中長期的な生産源特定のための土砂動態マップ構築に向けた効率的な調査・観測手法の開発が必要となる。

土砂生産源の特定には、土砂そのものの物理・化学特性を土砂移動のトレーサとする技術（土砂移動トレーサ技術）が有効である。当チームでは、鶴川及び沙流川を対象に 3 つの放射性同位体 ( $^{212}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Ac}$ 、 $^{40}\text{K}$ ) を複合トレーサとした地質別の浮遊土砂生産量（原単位）を評価できる手法を開発してきたが<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、生産源区分の判別精度や土砂管理に必要な空間解像度（例えば支川単位）の生産源特定に改善の余地が残されている。一方、欧米で広く使用されている主要酸化物（major element）や微量元素（trace element）を土砂移動トレーサとした多変量混合モデル（multivariate mixing model）<sup>5)</sup>では、判別精度の高い事例が報告されている。

多変量混合モデルによる定量的な土砂生産源推定においては、流域内の地質や土壌の違いによってどのように生産源を区分するか、また区分した生産源ごとの寄与度推定に有効なトレーサをどのように選択するかが、極めて重要となる<sup>6)</sup>。そこで本研究では、将来的に多変量混合モデルによる支川別の土砂生産源推定を目指すため、土砂の元素組成をトレーサとすることで、流域の生産源をより詳細かつ高精度に区分することを目的とした。土砂生産源推定に有効な複数のトレーサ（複合トレーサ）と流域内の生産源地域の区分方法との組み合わせを探索するため、2 段階の統計解析を用いる手法<sup>5)</sup>を採用した。

## 2. 方法

### 2.1 対象流域

本研究では、岩石由来の天然放射性同位体を土砂移動トレーサとした先行研究<sup>3)</sup>と浮遊土砂生産源の区分方法及び精度を比較するために、先行研究の対象流域と同じく、北海道南部の鶴川（流域面積 1270 km<sup>2</sup>）及び沙流川流域（流域面積 1350 km<sup>2</sup>）を対象とした。流域の地質は多様な岩相によって構成され、先行研究では 6 つの生産源地域（A、B、C-1、C-2、C-3、D）に区分される（図-1 左）<sup>3)</sup>。

### 2.2 材料及び分析方法

生産源土砂の元素組成を調べるために、先行研究<sup>3)</sup>において溪岸裸地等の潜在的な生産源 72 箇所採取された土砂を用いた。採取した土砂試料のうち、粒径 0.425 mm 未満の画分を分析試料とし、蛍光 X 線分析により微量元素 19 種（As、Ba、Ce、Cr、Cu、Ga、La、Nb、Ni、Pb、Rb、Sc、Sr、Th、U、V、Y、Zn、Zr）を

定量分析した。分析試料の調製は加圧成形法とし、補正式と検量線法により定量した。

### 2.3 解析方法

有効な複数のトレーサ（複合トレーサ）と流域内の生産源地域の区分方法との組み合わせを探索するために、生産源土砂サンプルの採取地点を地質的特徴により区分し、2段階の統計解析を用いて探索した<sup>3)7)</sup>。生産源土砂サンプルの採取地点の地質情報を20万分の1日本シームレス地質図V2<sup>8)</sup>及び5万分の1地質図幅<sup>9)~16)</sup>から取得した。生産源地域をなるべく細分化するため、統計解析に耐えうるよう区分内の地点数に留意しながら、主に岩相を基準として区分した。

生産源区分を判別できる複合トレーサを探索するため、まずノンパラメトリック検定（クラスカル・ウォリス検定）によりトレーサ候補を抽出し、次に抽出されたトレーサ候補の濃度特性を用いて判別分析を行った。判別分析では、ステップワイズ法（増加法）を採用し、最終的に最も高い正答率が得られた生産源区分と複合トレーサの組み合わせを決定した。統計解析には統計解析ソフトウェア JMP12.2.0(SAS Institute Inc.)を用いた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 複合トレーサの探索

生産源土砂のサンプル採取地点72箇所の地質的特徴を基に分類したところ、最大で10区分を得ることができた。10区分のうち少なくとも1区分でも他と有意差が検出できるトレーサ特性を抽出するため、ノンパラメトリック検定を行った。その結果、19種のうち、

5%水準以下で有意差が認められたY以外の18種の微量元素をトレーサ候補群として抽出できた。

次に18種の微量元素のうち、10区分の生産源をもっとも精度良く判別できるトレーサ特性の組み合わせ（複合トレーサ）を探索するため、判別分析を行った。3種の判別方法（線形法、非線形法、正則化折衷法（正則化パラメータ： $\lambda=0.1$ 、 $\gamma=0$ ））による結果を比較したところ、折衷法の判別精度が最も高く、12種（Nb、Rb、Zr、Cu、Cr、Ba、As、Ga、Ni、V、U、Zn）の微量元素により10区分の生産源を100%の正答率で判別できた。すなわち、折衷法で得られた12種の微量元素を複合トレーサとして多変量混合モデルに採用することで、先行研究<sup>3)4)17)</sup>よりも土砂生産源推定の精度向上が期待できることがわかった。

### 3.2 生産源区分図の比較

流域全体の生産源区分図を作成するためには、試料採取地点以外の地域も10地域に分類・統合する必要がある。そこで、サンプル採取地点以外の地域について、地質的特徴が類似している採取地点の生産源区分に統合し、流域全体の土砂生産源区分図を作成した。図-1に沙流川流域を事例として、先行研究<sup>3)</sup>による生産源区分図と並べて示した。微量元素で区分した10地域では、放射性同位体で区分された6地域における上流域の深成岩地域(D)や上・中流域に離れて分布する付加体堆積岩地域(C-3)、中流域に分布する変成岩地域(B)、中・下流域に離れて分布する堆積岩地域(A)がそれぞれ2地域に細分化されたことがわかる。

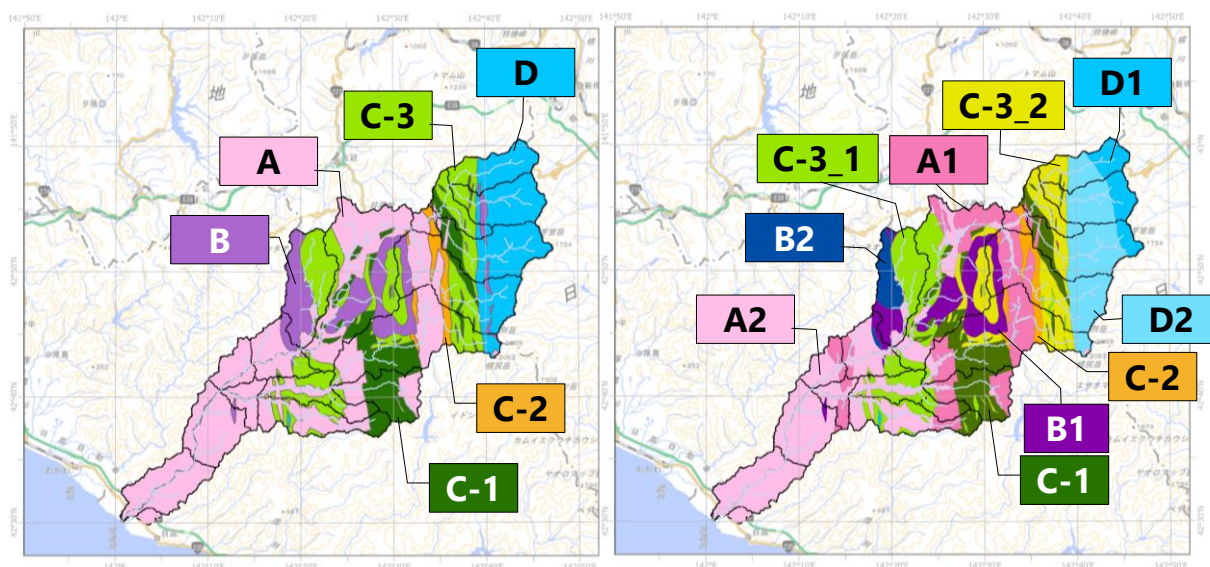


図-1 沙流川流域の土砂生産源区分図（左：先行研究<sup>3)</sup>、右：本研究、基図に地理院地図を使用。）

#### 4. まとめ

本研究では 12 種の微量元素と複合トレーサとすることで、先行研究<sup>3)</sup>に対し生産源区分の細分化と判別精度の向上に成功した。これにより、支川ごとの流出土砂量の違いを、細分化された生産源区分の構成割合の違いによって表現できる可能性がある。すなわち、微量元素 12 種の複合トレーサを用いた多変量混合モデルを構築し、10 区分された各生産源からの浮遊土砂流出量を定量評価できれば、支川単位の浮遊土砂流出量を推定できる。これらの推定結果は、複数支川における微細土砂流出量を水文観測により実測して比較検証する必要があり、今後の課題である。なお、本報告は令和 5 年度北海道開発技術研究発表会論文<sup>18)</sup>をもとにとりまとめたものである。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省: 第 16 章 総合的な土砂管理のための調査, 河川砂防技術基準調査編, pp. 516-536, 2014.
- 2) 藤田光一, 平舘治, 服部敦, 山内芳朗, 加藤信行: 水糸土砂動態マップの作成と利用-涸沼川と江合川の事例から-, 土木技術資料, No. 41, pp. 42-47, 1999.
- 3) Mizugaki, S., Abe, T., Murakami, Y., Maruyama, M. and Kubo, M.: Fingerprinting suspended sediment sources in the nukabira river, northern japan, International Journal of Erosion Control Engineering, No. 5, pp. 60-69, 2012.
- 4) 水垣滋, 村上泰啓, 巖倉啓子: 土砂移動トレーサを用いた新たな土砂動態モニタリング技術の開発, 令和 4 年度国土技術研究会発表課題論文集, No. 一般部門 安全・安心 II, pp. 24-29, 2022.
- 5) Walling D. E., Owens P. N., Leeks G. J. L.: Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the river ouse, yorkshire, uk., Hydrological Processes, No. 13, pp. 955-975, 1999.
- 6) 水垣滋, 古市剛久: 複合トレーサによる土砂の生産源推定. 現地観測 (13) 現地流砂観測 (その 4), 砂防学会誌, No. 74, pp. 48-54, 2022.
- 7) Collins A. L., Walling D. E., Leeks G. J. L.: Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers, Earth Surface Processes and Landforms, No. 23, pp. 31-52, 1998.
- 8) 産総研地質調査総合センター: 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, 2022. <https://gbank.gsj.jp/seamless> (閲覧日: 2023 年 10 月 4 日)
- 9) 橋本誠二: 5 万分の 1 地質図幅説明書「御影」, 北海道地下資源調査所, pp. 36, 1954.
- 10) 橋本誠二, 鈴木守, 小山内熙: 5 万分の 1 地質図幅説明書「幌尻岳」, 北海道地下資源調査所, pp. 46, 1961.
- 11) 小山内熙, 長尾捨一, 三谷勝利, 長谷川潔, 橋本亘: 5 万分の 1 地質図幅説明書「石狩金山」, 北海道開発庁, pp. 80, 1958.
- 12) 酒匂純俊, 小山内熙: 5 万分の 1 地質図幅説明書「千呂露」, 北海道立地下資源調査所, pp. 46, 1962.
- 13) 高橋功二, 鈴木守: 5 万分の 1 地質図幅説明書「岩知志」, 北海道立地下資源調査所, pp. 46, 1978.
- 14) 高橋功二, 鈴木守: 5 万分の 1 地質図幅説明書「日高」, 北海道立地下資源調査所, pp. 44, 1986.
- 15) 高橋功二, 谷口久能, 渡辺順, 石丸聡: 5 万分の 1 地質図幅説明書「紅葉山」, 北海道立地質研究所, pp. 116, 2002.
- 16) 吉田尚, 松野久也, 佐藤博之, 山口昇一: 5 万分の 1 地質図幅説明書「比宇」, 北海道開発庁, pp. 47, 1959.
- 17) 水垣滋, 大塚淳一, 丸山政浩, 矢部浩規, 浜本聡: 鶴川海岸の土砂生産源と粒径の季節変化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), No. 69, pp. I\_671-I\_675, 2013.
- 18) 水垣滋, 柿沼孝治: 土砂移動トレーサによる生産源推定手法の高精度化に向けた検討, 第 67 回 (2023 年度) 北海道開発技術研究発表会論文, 安-15 (治), 2024.