

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

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム ○水垣 滋
柿沼 孝治

豪雨・地震に起因する河川・河口・沿岸への濁水の長期化は利水、水産資源、生態系や景観に深刻な影響を及ぼす場合がある。河川管理者は濁度成分（微細土砂）の発生源の特定と発生メカニズムの解明が求められるが、必ずしも実態把握は容易でない。土木研究所では、土砂移動トレーサを用いた河川から流出する微細土砂の生産源推定手法を提案してきた。本報では、生産源推定手法のさらなる高精度化に向けて検討した結果を報告する。

キーワード：放射性同位体、元素組成、微細土砂

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及ぼす場合がある。大規模土砂生産後の濁水は数年単位で流出することもあり、地域住民・自治体・利水者が長期的な影響を懸念している場合も少なくない。流砂系の総合的な土砂管理や河川・ダム管理では、こうした微細土砂生産・流出の中長期的な影響（インパクト・レスポンス）や流出プロセスの解明、継続期間の予測が求められる。

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。近年、流砂系の総合的な土砂管理における基本事項として、流砂系全体の土砂動態を大局的に把握するために土砂動態マップの作成が推奨されており¹⁾（河川砂防技術基準）、微細土砂については複数の支川末端における水文観測（浮遊砂量観測）による1洪水を対象とした事例が示されている²⁾。微細土砂の発生源は降雨ごとに異なるのが通常であり、流砂系の土砂動態を把握するためには、現地調査・観測を長期的に継続する必要がある。しかし、多地点での出水時調査を長期的に継続するのはコスト・労力的に容易でない。流域内の微細土砂生産源を長期的に把握できる効率的な調査・観測手法の開発が必要となる。

さて、流域内のさまざまな生産源が流出土砂にどの程度寄与しているかを定量的に評価する手法として、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。筆者らは、鵠川及び沙流川を対象に3つの放射性同位体（²¹⁰Pb、²²⁸Ac、⁴⁰K）を複合トレーサとすることで、流域の濁質生産源を6区分し、さらに水文観測による浮遊土砂流出量と組み合わせて地質別の濁質生産量（原単位）を推定可能とした³⁾。さらに流域末端1点における10年間の継続的な出水時水質調査とトレーサ技術により、流域内の濁質生産源の長期的な変化を明らかにし、新たな土砂動態把握手法として提案した⁴⁾。しかし、同一地質区分内に複数の支川流域が含まれる場合等、土砂管理上の適当な単位空間（たとえば支川流域）ごとに評価できないといった課題が残された。

欧米では、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て、流域内の地質別に生産源を判別し、各生産源地域の浮遊土砂に対する寄与率を算出できる多変量混合モデル（multivariate mixing model）⁵⁾が広く使用されている。元素分析により流域内の多くの地質地域を判別可能な土砂移動トレーサを数多く取得できれば、流域内の微細土砂生産源をより詳細かつ高精度に区分できる可能性があり、土砂生産源推定の精度向上が期待される。

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⁶⁾。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⁷⁾を採用した。

2. 方法

(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³⁾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、北海道南部の鵡川及び沙流川流域を対象とした。鵡川（流域面積1270km²）及び沙流川（流域面積1350km²）はそれぞれ隣接する一級河川であり、日高山脈に源頭部をもち、支川と合流しながら太平洋に注ぐ。流域の地質は多様な岩相によって構成され、岩石由来の放射性同位体特性によって6つの地域（A、B、C-1、C-2、C-3、D）に区分された（図-1）³⁾。上流域は日高山脈を構成する深成岩（D）、付加コンプレックスの堆積岩・メランジ基質（C-3）や玄武岩ブロック（C-1）及び玄武岩岩体（C-2）で構成される。中流域は白亜紀の堆積岩（A）、蛇紋岩や片岩で構成される変成岩（B）、付加体のC-1やC-3で構成される。下流域はほとんどが第三紀の堆積岩（A）である。

(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³⁾において鵡川及び沙流川流域内の潜在的な生産源と考えられる溪岸裸地等72箇所にて採取された土砂を用いた。採取した土砂試料のうち、放射性同位体分析（ γ 線スペクトロメトリー）と同じく、粒径0.425 mm未満の画分を分析試料とした。土砂試料の元素組成は、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。

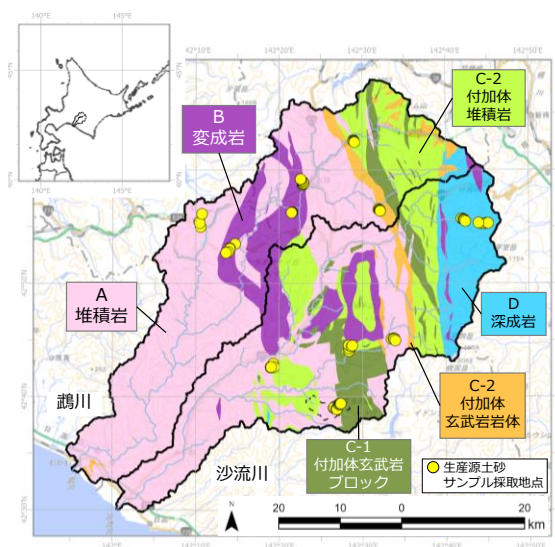


図-1 研究対象流域の先行研究³⁾による生産源区分図
（基図に地理院地図を使用）

(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^{5,7)}。生産源土砂サンプルの採取地点の位置情報と20万分の1日本シームレス地質図V2⁸⁾及び5万分の1地質図幅（御影⁹⁾、幌尻岳¹⁰⁾、石狩金山¹¹⁾、千呂露¹²⁾、岩知志¹³⁾、日高¹⁴⁾、紅葉山¹⁵⁾、比宇¹⁶⁾）をGIS上で重ね合わせ、各地点の地質情報を取得した。多変量混合モデルによる土砂生産源推定において、生産源地域をなるべく細分化するために、主に岩相を基準として採取地点の地質的特徴を分類した。なお、後に述べる統計解析に耐えうるよう、一つの分類につき3地点以上含むように留意した。

統計解析について、第1段階はトレーサ候補を抽出するためのノンパラメトリック検定（クラスカル・ウォリス検定）、第2段階はトレーサ候補として抽出された全ての元素の濃度特性を用いて判別分析を行った。判別分析では、十分に高い正答率が得られるまでステップワイズ法（増加法）によりトレーサ特性を増やしながら解析し、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

(1) サンプル採取地点の地質的特徴を踏まえた分類

表-1に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区分を示した。地質図を基にした全地点の地質的特徴は22種類であったが、後に述べる統計解析のために1区分につき3地点以上含むように分類・統合した結果、最大で10区分を得ることができた。これらの地域区分を精度良く判別できる有効トレーサを得られれば、先行研究^{3,4)}より詳細な土砂生産源推定が可能と

表-1 生産源土砂サンプル採取地点の地質的特徴を踏まえた区分と地点数

区分記号	主な地質・岩相		地点数
A1	後期白亜紀	泥岩・シルト岩・砂岩	15
A2	新第三紀	泥岩・砂岩・礫岩	4
B1	後期白亜紀	超苦鉄質岩類	7
B2	前期白亜紀	泥質片岩	12
C-1	ペルム紀	玄武岩	5
C-2	後期ジュラ紀?	玄武岩	5
C-3_1	白亜紀	混在岩	9
C-3_2	後期白亜紀～古第三紀	混在岩	4
D1	新第三紀	ノーライト	6
D2	新第三紀	はんれい岩	5

合計 72

なる。

(2) トレーサ候補群

10区分の生産源地域からの寄与率を算出できる多変量混合モデルを構築するためには、理論上10種以上のトレーサ候補が必要となる。19種の微量元素分析の中から、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（クラスカル・ウォリス検定）を行った。その結果、19種のうち、Y以外の18種が5%水準以下で有意差が認められた（表-2）。すなわち有意差が認められた18種の微量元素を多変量混合モデルのトレーサ候補として利用できる可能性が示された。

(3) 複合トレーサの探索

トレーサ候補として抽出された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。統計解析JMPの判別分析には、判別方法として、判別式を用いた線形法とマハラノビスの汎距離を用いた非線形法、これらの両方を考慮した正則化折衷法が用意されている。本研究では、これら3種の解析法（折衷法の正則化パラメータは $\lambda=0.1$ 、 $\gamma=0$ ）の結果を比較した。

線形法は、18種のトレーサ候補すべてを組み込むことで、地質的特徴から10地域に区分された72地点を83.3%

の正答率で判別できることがわかった（表-3）。非線形法では5種類のトレーサ候補で正答率86.1%と最大となり、線形法よりも少ないトレーサ特性でより精度良く生産源を判別できることがわかる。しかし、10区分の生産源の寄与率を推定するための多変量混合モデルには10種以上のトレーサ特性が必要であり、トレーサ数を10種に増やすことで判別分析の正答率が79.2%まで低下することがわかった（表-3）。折衷法では、12種のトレーサ候補で正答率100%で10区分された生産源を判別できることがわかった（表-3）。

このように、判別分析の判別法によって得られる判別精度や有効トレーサの組み合わせが異なることが示された。折衷法では、18種までトレーサ数を増やしても正答率は100%のままであり、尤度（もっともらしさの指標）も高くなることがわかった。したがって、多変量混合モデルには、表-3の折衷法で100%の正答率を得られた12種（Nb、Rb、Zr、Cu、Cr、Ba、As、Ga、Ni、V、U、Zn）ないし18種の微量元素を複合トレーサとして採用することで、先行研究^{3),4),7)}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。

4. 考察とまとめ

流域内の72箇所から採取した生産源土砂の微量元素を分析した結果、サンプル採取地点を12種の微量元素により精度良く10地域に区分できることがわかった。これをもとに流域全体の生産源区分図を作成するためには、試

表-2 土砂生産源 10 地域に対する各微量元素のクラスカル・ウォリス検定結果

微量元素	カイ2乗	自由度	p値
As	29.4054	9	0.0006**
Ba	42.8098	9	<.0001**
Ce	38.2476	9	<.0001**
Cr	33.5154	9	0.0001**
Cu	21.9611	9	0.009**
Ga	20.7673	9	0.0137*
La	40.0242	9	<.0001**
Nb	31.1058	9	0.0003**
Ni	34.9492	9	<.0001**
Pb	45.5743	9	<.0001**
Rb	45.4165	9	<.0001**
Sc	35.3894	9	<.0001**
Sr	19.7641	9	0.0194*
Th	44.8913	9	<.0001**
U	17.0481	9	0.048*
V	41.6534	9	<.0001**
Y	16.0727	9	0.0654
Zn	21.4847	9	0.0107*
Zr	32.5823	9	0.0002**

*は5%水準で有意、**は1%水準で有意であることを示す。

表-3 有効トレーサ探索のための判別分析の結果

	微量元素	線形	非線形	折衷法
1	Nb	27.8	36.1	31.9
2	Rb	40.3	54.2	50.0
3	Zr	47.2	72.2	65.3
4	Cu	50.0	69.4	68.1
5	Cr	61.1	86.1	83.3
6	Ba	61.1	80.6	88.9
7	As	63.9	80.6	93.1
8	Ga	66.7	75.0	94.4
9	Ni	66.7	79.2	94.4
10	V	75.0	79.2	97.2
11	U	77.8	73.6	95.8
12	Zn	80.6	65.3	100.0
13	Pb	80.6	61.1	100.0
14	La	77.8	50.0	100.0
15	Sc	79.2	48.6	100.0
16	Sr	79.2	50.0	100.0
17	Th	81.9	45.8	100.0
18	Ce	83.3	40.3	100.0

判別法の数字は正答率（100%－誤答率）

上から順にステップワイズ法で選択されたことを示す

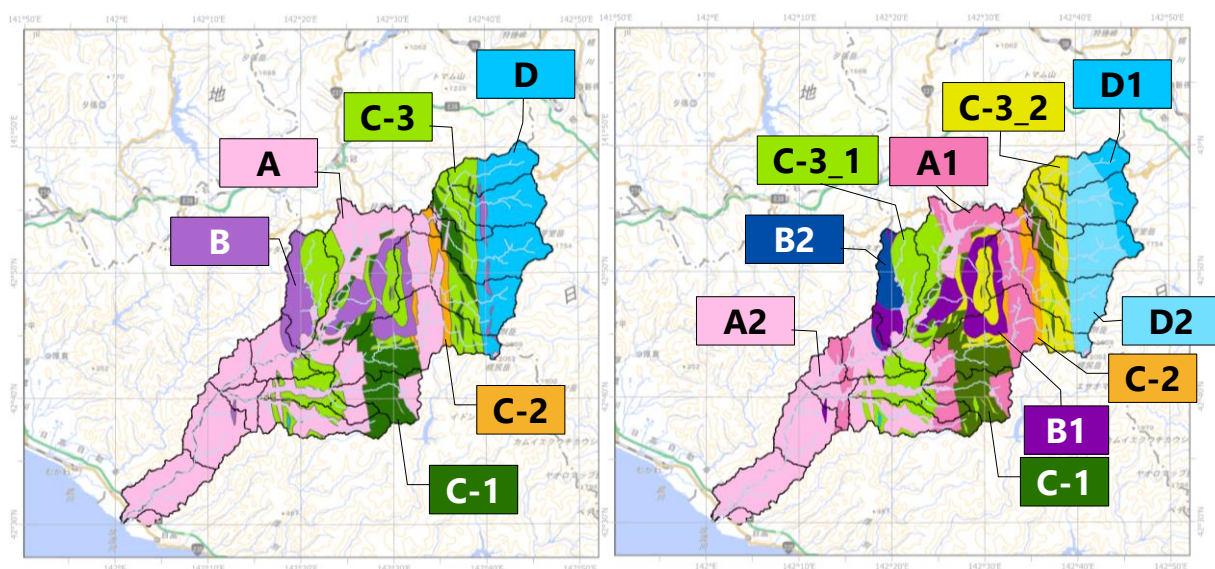


図-2 沙流川流域の土砂生産源区分図（左：先行研究³⁾、右：本研究、基図に地理院地図を使用。）

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、図-2に沙流川流域を事例として、先行研究³⁾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。

また、先行研究³⁾による放射性同位体に基づく生産源の判別精度は72.2%であったが、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判別精度100%で10地域を区分できることが示された。また、12種以上の複合トレーサが得られたことで多変量混合モデルを構築できることが示された。微量元素を複合トレーサとすることで、微細土砂の生産源推定の精度向上が期待される。

このように、流域内の生産源区分が高精度に細分化されることで、支川ごとの特徴を生産源区分の構成割合の違いによって表現できる。すなわち、多変量混合モデルにより各生産源からの寄与率を定量評価することで、支川ごとの微細土砂流出量の違いを推定できる可能性がある。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。

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: 水系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.