濁度計と放射性同位体トレーサを用いた 山地流域の浮遊土砂生産・流出過程の推定

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 〇水垣 滋 北海道開発局 札幌開発建設部 河川計画課 村上 泰啓 北海道開発局 事業振興部 都市住宅課 巖倉 啓子

山地は流砂系における主要な土砂供給源であり、総合的な土砂管理において安全かつ適切な土砂 供給が求められる。一方、山地からの土砂流出量は継続的な観測が難しく、土砂生産・流出データ が不足しており、土砂生産・流出実態に未解明な部分が多い。本報では、山地流域の浮遊土砂生 産・流出過程を明らかにすることを目的に、濁度計観測により融雪・降雨流出時の浮遊土砂濃度特 性と放射性同位体トレーサによる生産源推定を行った。

キーワード:生産源推定、流砂系、土砂移動トレーサ

1. はじめに

山地から沿岸までを流砂系とした総合的な流域土砂管 理において、山地流域における浮遊土砂の生産・流出特 性を把握することは、基本的かつ重要な課題である。一 般に、流域からの浮遊土砂流出特性は SS 濃度と流量の べき乗回帰式で評価されるが、山地小流域では SS 濃度 の流量に対する決定係数は必ずしも高くなく、ヒステリ シスを示すことが多い^{たとえば D}。このヒステリシスは、 浮遊土砂の生産源や輸送過程を反映していくつかのパタ ーンに分類されることが知られており^{たとえば D}、流域の 浮遊土砂生産源や流出特性を示す指標となりうる。



MIZUGAKI Shigeru, MURAKAMI Yasuhiro, IWAKURA Keiko

一方、浮遊土砂の生産源を特定する手法として、山地 斜面から河川を通じて流域末端に輸送される土砂を追跡 できる、土砂そのものがもつ物理・化学的特性をトレー サとした手法がある³。地質(岩相)や侵食深が異なる 生産源からの寄与率を推定できる。

しかし、流域の土砂生産・流出特性は出水規模やタイ ミングに応じてさまざまに異なることが普通であり、長 期的な観測に基づいた解釈が必要である。本研究の目的 は、流域の浮遊土砂生産・流出過程を明らかにすること である。濁度計を用いた流砂水文観測によりさまざまな 融雪・降雨流出時の浮遊土砂濃度ヒステリシスを調べた。 また、放射性同位体トレーサを用いた浮遊土砂生産源推 定⁴を行った。

2. 方法

(1) 研究対象流域

研究対象流域は、北海道南部に位置する一級河川沙流 川水系額平川の支川、総主別川流域とした。流域面積 16.75 km²、主流路延長 7.6 km、平均河床勾配 7.8%の山地 小流域である(図-1)。年平均気温は 6.6°C、月平均最 低・最高気温はそれぞれ 1 月で-7.2°C及び 8 月で 20.7°Cで ある(アメダス・新和)。年平均降水量は 1179 mm、年 平均降雪量は 177 cm、年平均最大積雪深は 48 cm (2004 ~2017年;アメダス・旭)であり、おおむね 11 月~4 月 が積雪期である。

流域全体が森林で覆われており、中・上流域は国有林、 下流域は民有林となっている。流域の主な地質構成は大 きく3つに岩相で区分でき、上流域がペルム紀から後期



写真-1 河床堆積土砂と風化による礫の細粒化(左: C-3 付加体堆積岩、中: A 堆積岩地域、右: C-1 付加体玄武岩地域)

ジュラ紀のリビラ層で輝緑凝灰岩・集塊岩質輝緑凝灰 岩・チャート(C-1:付加体玄武岩(海洋))、中流域が 後期白亜紀の函淵層群・蝦夷層群で海成・非海成の砂 岩・泥岩互層(A:堆積岩)、下流域が後期白亜紀から 古第三紀のニセウ層群で頁岩・砂岩互層(C-3:付加体堆 積岩)からなっている^{9.0}。上流域C-1及び中流域Aに おける河床堆積物には礫が風化により細粒化し、微細土 砂が生産・貯留されている様子が見られる(写真-1)。 一方、下流域C-3の本川河床堆積物には、支渓流から流 出した砂が混在している場合があるが、礫の風化による 細粒化はほとんどみられなかった。

(2) 観測・分析・解析方法

流砂水文観測定点は総主別川の額平川との合流点より 2.3 km 上流、町道総主別 1 号橋に設定した(図-1)。観 測定点には、水位計(応用地質 S&DL mini)及び後方散 乱式濁度計(JFE アドバンテック Infinity Turbi)を設置し、 2010年10月から2016年12月まで約6年間、水位及び濁 度を10~20分間隔で記録した。また、2011年~2014年 の融雪出水及び夏・秋期の降雨出水時に流量観測及び表 面採水を行った。高水時の流速測定は浮子観測によって おり、浮子観測は、原則、左岸・流心・右岸の3測線で 実施した。

水位-流量(H-Q)曲線を構築することで、流量の連続 データを得た。濁度データは、バッテリー切れや土砂に よる埋積、河床低下に伴う浮き上がりなどによる明らか な異常値・ノイズを除外した後、原因不明のスパイクを 除去するために前後 30分の移動平均値を採用し、毎時 データを抽出した。採取した河川水のSS濃度と濁度と の関係式を構築し、SS濃度に換算した。

2011年~2016年に水位計・濁度計により観測された流 量・SS 濃度の時系列データから、明瞭な流量ピークが 認められた連続雨量 20mm以上の降雨出水(以下、イベ ントと呼ぶ)を解析対象とし、89 イベントを抽出した。 各イベントについて、流量と SS 濃度を両対数軸上でプ ロットしたダイアグラムにおいて、ヒステリシスの形状 を調べた。

(3) 浮遊土砂の生産源推定

浮遊土砂の生産源推定について、Mizugakiら4)が提案 した放射性同位体²¹²Pb、²³⁸Ac及び40Kを土砂移動トレーサ とした生産源推定手法を採用した。総主別川流域内の異 なる地質地域(A:堆積岩、C-1:付加体玄武岩ブロッ ク、C-3:付加体堆積岩)を潜在的生産源とし、浮遊土 砂に対する寄与率を推定した。総主別川流域の浮遊土砂 の生産源を推定するために2010年~2014年の融雪出水時 や降雨出水時に表面採水を行い(11イベント、37サンプ ル)、抽出した浮遊土砂成分の²¹²Pb、²³⁸Ac及び40K濃度を ガンマ線検出装置により分析した。3つの地質地域(A、 C-1、C-3)の浮遊土砂に対する寄与度を推定した。

3. 結果

(1) SS濃度ヒステリシスの類型化と出現傾向

2011年~2016年の降雨出水89イベントについてSS濃度 の流量に対するヒステリシスループを調べたところ、主 に線形タイプ(I)、時計回りタイプ(II)、反時計回り タイプ(Ⅲ)、線形とループの複合タイプ(IV)の4つ のタイプに分類できることがわかった(図-2)。線形 タイプ(I)は、増水時と減水時のSS濃度が流量に対し てほぼ同じである場合に見られた(図-2a)。時計回り タイプ(II)は、SS濃度のピークが流量ピークよりも早 く出現し、SS濃度の低減が流量よりも顕著で、増水時 より減水時のSS濃度が低い場合に認められた(図-2b)。 一方、反時計回りタイプ(Ⅲ)は、SS濃度のピークが流 量ピークより遅く出現し、減水時のSS濃度の低下が緩 やかで、増水時に比べて減水時のSS濃度が高い場合に 認められた(図-2c)。複合タイプ(IV)は、タイプI とタイプIIIの組み合わせで、ある流量まではSS濃度が流 量とともに増減し、それ以上の流量ではSS濃度ピーク が流量ピークより遅く出現し、反時計回りのループ(タ イプⅢ)を形成していた(図-2d)。

ヒステリシスの出現数をタイプ別に調べたところ、時 計回りタイプ(II)が最も多く(40イベント、44.9%)、 次いで線形タイプ(I)(27イベント、30.3%)であり、







図-3 ヒステリシスのタイプ別出現割合



図-4 ヒステリシスタイプによる最大流量の比較

この2タイプで全体の75%を占めていた(図-3)。反時計回りタイプ(III)及び複合タイプ(IV)はそれぞれ 13イベント(14.6%)及び9イベント(10.1%)で認められた。

出水の規模がヒステリシスタイプに及ぼす影響を調べるため、出水規模の指標として各イベント期間中の最大 流量をヒステリシスタイプ間で比較した(図-4)。イ ベント期間中の最大流量は、各ヒステリシスタイプでか なりばらつきがあり、概ね時計回り(II) <複合(IV) <線形(I) <反時計回り(III)の順に大きくなること がわかった。すなわち、小規模な出水では時計回りタイ プ(II)が卓越すること、中~大規模の出水で線形タイ プ(I) や反時計回りタイプ(III)のヒステリシスが出 現するようになること、また複合タイプ(IV)のヒステ リシスは最大流量の大小にかかわらず出現することがわ かった。

(2) 一連の出水におけるヒステリシスの変化

ヒステリシスのタイプ別出現傾向は出水規模(最大流 量)に依存する傾向が認められたが、どのような過程を 経てヒステリシスのタイプが変化するかはわかっていな い。そこで、2012年の融雪期に観測された一連の3つの 出水を事例に、ヒステリシスタイプの時間変化から流域 の浮遊土砂動態を検討した(図-5)。

最初の出水(①:4月3日~9日)は、流域が積雪で覆 われているところに2日間で585mmの降雨があり、流 量とSS濃度は急激に上昇し、その後、減水時のSS濃度 は流量ピークから少し遅れて低下している(図-5上)。 出水①のヒステリシスは反時計回りタイプ(III)であっ た(図-5下)。積雪期の降雨では、地表が融雪水によ って飽和状態となり表面流が発生したと考えられ、流域 全体の斜面から河道へ表面流による微細土砂の供給がも たらされたと考えられる。そのため、増水期は河床に貯 留された微細土砂(写真-1)が輸送され、減水期はそ れに加えて斜面から河道への微細土砂供給が継続したと 考えられる。観測定点からの距離によって浮遊土砂とし て輸送される時間に差が生じることから、減水期に高濃 度のSS濃度が維持され、反時計回りタイプのヒステリ シスが形成されたと考えられる。

次の出水(②:4月10日~25日)は、4月11日の22 mmの降雨により融雪が進み、流量とSS濃度が上昇した

(図-5上)。流量ピーク後にSS濃度は低減する一方、 引き続く降雨と融雪により流量は下がりきらない状態が 継続した。出水②のヒステリシスは時計回りタイプ(II) であった(図-5下)。出水②の増水時におけるヒステ リシスは、出水①の増水期とほぼ同じであることから、 河道内に貯留された微細土砂の輸送によるSS濃度の増 加が考えられる。一方、減水期のSS濃度の急激な低下 は、流域内の積雪の減少により斜面からの表面流による 微細土砂供給が限定されたこと、輸送可能な河床の微細 土砂が枯渇したことなどが要因として考えられる。

その後の降雨出水(③:4月26日~5月2日)は、4月 26日~27日に45mm程度の降雨による流量とSS濃度の 急激な上昇とゆるやかな低減が認められる(図-5上)。 出水③のヒステリシスは線形タイプ(I)であり、増水 期、減水期ともに出水②の減水期と同じ範囲で推移して いた(図-5下)。これらのことから、斜面からの表面 流による微細土砂供給が限定的であったこと、SS濃度 が河川流量の増減にともなう河道内の微細土砂の輸送と 堆積に依存していたことが考えられる。

このように一連の3つの出水における流量とSS濃度 のダイアグラムにおけるヒステリシスのタイプや分布範 囲から、流域の微細土砂の供給・輸送過程を読み取るこ とができた。濁度計を用いた流砂水文観測により出水時 のデータを蓄積することで、流量とSS濃度のヒステリ シスを定性的に解析するだけでも、山地小流域の浮遊土 砂流出特性を詳細に把握することが可能なことを示して



MIZUGAKI Shigeru, MURAKAMI Yasuhiro, IWAKURA Keiko

いる。

(3) 浮遊土砂の生産源

2010年~2014年の融雪期及び降雨期の出水時に採取した浮遊土砂(37サンプル)について、流域の3つの生産源(地質地域)からの寄与度を調べたところ、下流域の付加体堆積岩(C-3)で平均39.2%(浮遊土砂流出量による加重平均35.2%)、中流域の堆積岩(A)で33.8%(32.4%)、上流域の付加体玄武岩ブロック(C-1)で27.0%(32.4%)であった(図-6)。3つの生産源の浮遊土砂に対する寄与度は、37サンプルの平均値では有意な差が認められたが、浮遊土砂流出量による加重平均ではいずれも同程度の寄与であった。

流量と生産源寄与度との関係を調べたところ、AとC-1の寄与率は有意な正の相関(A: ρ =0.3965、p=0.0151; C-1: ρ =0.3731、p=0.0229)が、C-3は有意な負の相関(ρ = 0.6296、p<0.0001)が認められた(**図**-7)。C-3の寄 与度は流量が小さいときは寄与度が60%程度と高く、主 要な生産源となっている。流量が中規模(0.7 m³/s)以上 ではC-3の寄与度が激減し、一方AやC-1の寄与度が著し く増加する場合があり、浮遊土砂の主要な生産源が大き く変化することがわかる。流量が大きい時(4 m³/s以上) は、C-3の寄与度は35%前後で一定の傾向を示し、Aの寄 与度が高くC-1の寄与度が低くなるが、流量が10 m³/sを 記録した時の浮遊土砂については、上流域のC-3の寄与







図-7 各生産源の寄与度と流量との関係

度が高く、中流域のAの寄与度がやや低い。全体的に、 流量が小さいときは各生産源の寄与度にばらつきがあり、 流量が大きくなるにつれていずれの寄与度も30~40%程 度に収束するように見える。これらのことから、流量が 小さいときは観測定点近傍の下流域で浮遊土砂が供給さ れ、流量が大きいほど流域全体から供給された浮遊土砂 が流出したと考えられる。

4. 考察・まとめ

流量とSS濃度のヒステリシスのタイプ別出現傾向と 放射性同位体トレーサによる浮遊土砂の生産源推定の結 果から、出水規模によって浮遊土砂の供給源が変化する ことが示された。

小規模出水時に卓越する時計回りタイプ(II)のヒス テリシスは、観測点近傍の河床堆積物が増水初期に寄与 する場合や、増水期に河床堆積物中の微細土砂が枯渇す ることが要因として考えられ、風化による細粒化が少な く、下流域に位置するC-3地域の寄与度が高いことと一 致する。一方、大規模な出水時に出現する反時計回りタ イプ(III)は、その形成要因のひとつとして、流域内の 広範囲からの土砂供給により流量ピークよりもSS濃度 ピークが遅れて出現することがあげられている。このこ とは、トレーサ手法で中・上流域に位置するA地域やC-1地域の寄与度が流量に対して増加傾向を示したことか らも支持される。中規模の出水時に見られる線形タイプ

(I)のヒステリシスは、河床堆積物中に微細土砂が豊富に存在し、流量見合いでSS濃度が増減する場合に形成される場合に生じることがあるが、トレーサ手法ではA地域やC-1地域の寄与度が高い場合が多く確認されていることと整合的であった。これらのことから、河床や渓岸の礫の風化により生産された微細土砂が河床堆積物中に貯留されていることに起因すると考えられ、河床堆積物の風化による微細土砂生産と貯留機能が流域の浮遊土砂流出特性に大きく影響を及ぼすことを示している。

本研究では、濁度計を用いた流砂水文観測とトレーサ 手法を併用することで、山地流域における河床堆積物の 微細土砂生産・貯留・流出機構を反映した浮遊土砂流出 過程を把握できる可能性を示した。このような流域にお ける河床の土砂貯留機能は既往研究において認識されて おり、流域面積や地質による地形的特徴の違いが影響し ている可能性がある^{7,8}。しかし、流域スケールの土 砂流出モデルでは浮遊土砂を主に構成するウォッシュロ ード(微細土砂)は河床にはほとんど存在しないものと され、河床堆積物が供給源とされることは想定されてお らず、現象が反映されていない場合が多い^{9,10}。流砂 系の総合土砂管理において実態把握が困難な山地流域の 土砂動態について、本研究で示した濁度計観測とトレー サ手法による定量的な現象の把握・評価をすすめること で、現象のモデル化と流域スケールにおける浮遊土砂流 出量の予測精度向上に寄与することが期待される。

謝辞: 現地調査にあたり平取町及び林野庁北海道森林 管理局日高北部森林管理署には、観測機器設置の許可等、 現地観測・調査においてご支援・ご協力いただきました。 ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 倉茂好匡:浮流土砂の測定および解析方法、(編:恩田裕一, 奥西一夫,飯田智之,辻村真貴)水文地形学-山地の水循環 と地形変化の相互作用-,古今書院,東京,pp. 132-142, 1996.
- Williams G.P.: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, Journal of Hydrology, No. 111, pp. 89-106, 1989
- 3) 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 (5), pp. 48-54, 2022.
- 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 Vol. 5, pp. 60-69, 2012.
- 5) 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,p.47,1959.
- 6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編):20万分の 1日本シームレス地質図2015年5月29日版,産業技術総合研 究所地質調査総合センター,2015.
- 7) 浅野友子,内田太郎,勝山正則,平岡真合乃,水垣滋,五味 高志,丹羽論,横尾善之:山地流域の水・土砂流出における 空間スケールの影響(2):集中的な観測が行われた流域 の事例,水文・水資源学会誌,No.31,pp.232-244,2018.
- 村上泰啓,水垣滋:山地渓流における水系網の地質別の特徴,第5回土砂災害に関するシンポジウム論文集,No.,pp. 195-200,2010.
- 9) 横尾善之,丹羽諭,内田太郎,平岡真合乃,勝山正則,五味 高志,水垣滋,浅野友子:山地流域の水・土砂流出における 空間スケールの影響(3):数値解析モデル上の取り扱い 事例,水文・水資源学会誌,No.31,pp.245-261,2018.
- 10) 内田太郎,浅野友子,平岡真合乃,横尾善之,五味高志,水垣 滋,丹羽論,勝山正則:山地流域の水・土砂流出における空 間スケールの影響(4):水・土砂流出予測精度向上に向 けた提案,水文・水資源学会誌,No.34,pp.192-204,2021.