第65回(2021年度) 北海道開発技術研究発表会論文

放射性同位体トレーサを用いた 流砂系の土砂動態モニタリング技術の開発

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 村上 泰啓

巖倉 啓子

流砂系の総合土砂管理計画の策定に際し、土砂動態マップは最も基本的な情報の一つであり、 年々変動する土砂動態を流砂系全体で俯瞰するモニタリング手法が求められている。寒地土木研究 所では、放射性同位体を土砂のトレーサとした浮遊土砂の生産源推定手法を開発してきた。本報で は、このトレーサ手法を活用した流域内の土砂流出量の空間分布を支流域単位で表現できる浮遊土 砂動態マップの構築を試みたので、報告する。

キーワード:生産源推定、流砂系、浮遊土砂流出量マップ

1. はじめに

流砂系の総合的な土砂管理において、流域から海域へ の流出土砂量とともに、その生産源の空間分布は流域土 砂動態の最も基本的かつ重要な情報である。とくに、豪 雨や大規模地震に伴う崩壊や地すべりといった大規模土 砂生産現象は、その後の土砂流出に長期的に影響を及ぼ す可能性があるため¹¹、流域末端から海域に流出する土 砂が山地のどこから供給されたか、すなわち流域内の土 砂生産源を定量的にモニタリングすることが重要な課題 の一つとなる。欧米では、流域から海域に流出する微細 土砂を対象に、トレーサ手法を用いた定量的な生産源推 定が広く行われている²。わが国でも、古くから海岸砂 や河床材料の生産源推定が行われてきたが、大規模な出 水に伴う浮遊土砂の生産源寄与を定量評価した事例は少 ない³。寒地土木研究所では、沙流川流域を対象に岩石



図-1 対象流域の地質別生産源区分と調査地点

由来の放射性同位体を土砂移動トレーサとした土砂生産 源推定手法の開発に取り組んできた³。本研究の目的は、 流砂系の土砂動態モニタリング手法のひとつとして、流 域内の土砂生産源の空間分布評価技術を開発することで ある。

2. 方法

(1) 研究対象流域

研究対象流域は、北海道南部の沙流川流域とした(図 -1)。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³(図-1)。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。

沙流川流域の既往最大流量は平成15年8月台風10号 に伴う豪雨時に記録され、流域内に数多くの斜面崩壊が 発生し、大量の土砂・流木が流出した。その多くが二風 谷ダムで捕捉されたが、斜面崩壊等で発生した土砂はい まだ山地流域内に貯留されている可能性がある⁴。近年 では、平成28年8月に4つの台風に伴う豪雨により、 とくに上流域において斜面崩壊や土石流、河岸侵食、土 砂・洪水はん濫が発生し、農地や道路・橋梁が被災した。 しかし、沙流川流域における土砂生産量・流出量の実態 把握について、いくつかの調査・研究事例がみられるも

(2) 調査・分析・解析方法

沙流川流域の浮遊土砂流出量を把握するため、流砂水 文観測点を富川水位観測所に設定した(図-1)。2011年 ~2020年にかけて、室蘭開発建設部との合同水質調査に より融雪期と降雨期の出水時に表面採水を行い、SS濃 度を分析した。浮遊土砂は、表面採水試料や一定期間河 川内に設置した浮遊土砂サンプラーで捕捉された濁水試 料を全乾燥させて抽出し,後述する放射性同位体分析に 供した。また、高濃度濁度計により濁度の連続観測を行 い、濁度とSS濃度との関係式を構築することで、SS濃 度の連続データを得た⁵。年間の浮遊土砂流出量は、河 川の凍結・結氷期間を除外するため、4月1日~11月30日 までを対象として解析した。

流域から流出する浮遊土砂の生産源を把握するために、 抽出した浮遊土砂についてガンマ線スペクトロメトリー により岩石由来の放射性同位体(²¹²Pb、⁴⁰K,、²²⁸Ac)の 濃度を定量分析した。Mizugakiら³⁰は、これらの放射性同 位体をトレーサとして流域の6つの地域(以下、地質別 生産源)と浮遊土砂のトレーサ濃度特性におけるマハラ ノビス距離を計算し、浮遊土砂に対する各生産源の寄与 率を評価した^{3,6}。マハラノビス距離は以下の式(1)で



図-2 沙流川流域の年SS流出量(4~11月)の経年変化

求められる%

$$d_{s}^{2}(c_{1}, c_{2}, \cdots, c_{i}) = (c_{1} - C_{s1} \ c_{2} - C_{s2} \ \cdots \ c_{i} - C_{si} \left[\begin{array}{c} s_{1}^{2} \ \cdots \ s_{1i} \\ \vdots \ \ddots \ \vdots \\ s_{s1} \ \cdots \ s_{i}^{2} \end{array} \right]^{-1} \begin{pmatrix} c_{1} - C_{s1} \\ c_{2} - C_{s2} \\ \vdots \\ c_{i} - C_{si} \end{pmatrix}$$
(1)

ここにdiは生産源sと流出土砂とのマハラノビス距離、 は流出土砂のトレーサi濃度、Csは生産源sにおけるトレ ーサiの平均濃度、行列式は各トレーサ間の共分散逆行 列である。各生産源の流出土砂に対する寄与率は、マハ ラノビス距離の逆数に比例するもの仮定し、以下の式で 算出した^{3,0}。

$$P_{s} = \frac{\frac{1}{d_{s}}}{\sum_{s=1}^{n} \frac{1}{d_{s}}}, P_{s} \ge 0, \qquad \sum_{s=1}^{n} P_{s} = 1$$
 (2)

ここに P_sは流出土砂に対する生産源 s からの寄与率、n は生産源区分数である。

(3) 地質別生産源からの浮遊土砂流出量

放射性同位体トレーサによる生産源寄与率から、年間の地質別生産源からの浮遊土砂流出量の評価するため、 地質別生産源sの浮遊土砂濃度(Csss)と流量(Q)との 関係式を検討した。一般に、浮遊土砂濃度は流量のべき 乗式で近似されるが、必ずしも決定係数は高くない。そ こで、筆者ら⁹が提案した流量と浮遊土砂濃度との関係 式(以下、C-Qモデル)を採用することとした。式(3)



MIZUGAKI Shigeru, MURAKAMI Yasuhiro, IWAKURA Keiko

の3つの変量(*C_{max}、K_m、Lmt*)の最適解を数値解析的に求めることとした。

$$Ln(Css) = \frac{C_{max}(Q + Lmt)}{K_m + Q + Lmt}$$
(3)

ここに、CssはSS濃度、CmaxはSS濃度の上限値に関する係数、KmはSS濃度の増加率に関する係数、LmtはSS濃度に 影響する流量の下限値に関する係数である⁵。生産源sからの浮遊土砂流出量(Qss)を浮遊土砂流出量に生産源s の寄与率(Ps)を乗じたものとし、CssとPsの積で得られる地質別生産源sの浮遊土砂濃度(Csss)と流量との関係 をC-Qモデルにあてはめて、数値解析により各係数を決 定した。構築した各地質別生産源のC-Qモデルにより、 地質別生産源からの年浮遊土砂流出量(t/yr)及び比浮 遊土砂流出量(t/km²/yr)を算出した。

(4) 支流域単位の浮遊土砂流出量の推定

流域内の浮遊土砂流出量の空間分布を評価するため、 支流域単位の浮遊土砂流出量の評価を検討した。支流域 ごとに地質別生産源sの面積をGISにより計測し、前述の 生産源sの比浮遊土砂流出量を乗じて合算することで、 支流域単位の浮遊土砂流出量を算出した。これをGISで 空間分布として表現することで、浮遊土砂流出量マップ を構築した。

3. 結果・考察

(1) 2011~2020年の浮遊土砂流出量の変化

沙流川流域の浮遊土砂流出量を評価するため、濁度計 観測によるSS濃度の連続データから年SS流出量を評価 し、2011年~2020年の10年間における経年変化を調べ、 年最大流量とともに図-2に示した。年浮遊土砂流出量は 概ね年最大流量の変動に対応しており、この10年間の浮 遊土砂流出量の平均は59万t、最大は2016年の271万 tと最 大であった。次に多いのは2011年(81万t)と2018年(73 万t)で、2016年の27%~30%程度であった。その他の年 は38万切人下であり、最小は2015年と2020年の約13万tであ った。最大を示した2016年は平成28年8月北海道豪雨に よる土砂生産の影響を受けたものであり、その前後は年 最大流量が1,000 m3k以下であることから浮遊土砂流出量 が少なかったものと考えられる

(2) 浮遊土砂に対する地質別生産源の寄与率

浮遊土砂の生産源を定量的に把握するため、融雪期及 び降雨期のさまざまな出水時に採取した浮遊土砂につい て、放射性同位体トレーサの分析を行い、6つの生産源 からの寄与率を評価した(図-3)。寄与率の構成割合は 採取した浮遊土砂によって様々であるが、主要な生産源

MIZUGAKI Shigeru, MURAKAMI Yasuhiro, IWAKURA Keiko

はA、B、C-1及びC-3で構成されていることがわかった。 平成28年(2016年)8月豪雨に伴う出水期間は、流量 に対する浮遊土砂濃度の違いによって2時期(BT10;台 風7号、11号及び9号、AT10:台風10号以降)に区分でき る(図4)。表面採水によって採取した浮遊土砂の生産 源寄与率は、7月末の低気圧による出水時はAやBが高く、 台風9号による出水時はAとBは同等程度に高い。一方、 7月~9月にかけて河川内に設置した浮遊土砂サンプラー で捕捉された浮遊土砂の生産源寄与率は、C-3で最も高 かった。台風10号による豪雨は沙流川上流域で斜面崩壊 や河岸侵食などによる相当な量の土砂生産が確認されて おり⁷、上流域に分布する地質地域からの浮遊土砂の流 出が示唆される。



図-4 平成28年8月豪雨時の浮遊土砂生産源の寄与率



2011-2016 降雨期 [] 10000 [] [] 2011-2016 融雪期 0--2017-2020 隆雨期 2017-2020 融雪期 1000 生産源区分C-3からのSS濃度 100 10 0.1 10 100 1000 10000 流量 [m³/s]

図-6 地質別 SS 濃度への C-Q モデルのあてはめ事例



図-7 地質別の年SS 流出量の変化

左: 地質別 C-Q モデルによる年 SS 流出量(4月~11月),右: H28 年 8 月豪雨時による 2 時期の地質別 SS 流出量

(3) 地質別生産源からの年浮遊土砂流出量の評価

地質別生産源からの浮遊土砂流出量を評価するため、 地質別生産源ごとに流量とSS濃度との関係式を構築し た。流量とSS濃度との関係はばらつきが大きく、とく に2016年8月豪雨の前後で土砂流出特性が大きく変化し た可能性があるため、2016年の前後で区分する必要があ ること、また融雪期と降雨期で異なる傾向があることが 確認された(図-5)。したがってC-Qモデルを適用する にあたり、2011年~2020年までをひとつの関係式で近似 することが困難なため、時期(2016年以前と2017年以降) と季節(5月までの融雪期と6月以降の降雨期)に区分し てC-Qモデルを構築した(図-6)。なお、H28年8月豪雨 時の地質別浮遊土砂流出量は、採水調査を実施した BT10では評価可能であったが、AT10では採水調査を実 施していないためC-Oモデルを構築できなかった。そこ で、AT10のBT10とAT10の全期間の地質別浮遊土砂量 (濁度計観測による浮遊土砂流出量に浮遊土砂サンプラ ーによる浮遊土砂試料の生産源寄与率を乗じて算出)か らBT10のそれを差し引くことで、AT10の地質別浮遊土 砂流出量を推定した。

構築したC-Qモデルを用いて年浮遊土砂流出量を評価 した結果を、平成28年8月豪雨時の時期別の浮遊土砂流 出量と合わせて図-7に示した。2016年8月豪雨時の地質 別浮遊土砂流出量は、BT10とAT10で明らかに異なる傾 向を示しており、BT10ではB(変成岩)やA(堆積岩) からの流出量が他の生産源よりも多く、一方AT10では C-3(付加体基質・堆積岩)とC-1(付加体玄武岩ブロッ ク)からの流出量が多く、AやBの流出量はBT10に比べ てかなり少なかった。2011~2015年は、全体的な流出量 の多寡はあるものの、AとBが同等程度の流出量で最も 寄与が大きく、次いでC-1とC-3がAとBに比べてやや少 ないが、寄与率が高くなっている。一方2017年~2020年 は、C-3の流出量がAやBと同程度となっており、それ以 前に比べて寄与が高くなっている。

地質別の比浮遊土砂流出量(単位面積当たりの浮遊土 砂流出量)を2011年~2015年と2017年~2020年で比較す ると、地質による違いについては傾向は類似しているが、





2017年以降でいずれの生産源でも値が増大しており、とくにC-3の値が高くなっていた(図-8)。

相対的な生産源の寄与率の経年変化を調べるために、 年浮遊土砂流出量に対する地質別生産源の寄与率を算出 した(図-9)。その結果、2011年~2015年はBとAの寄与 率が高く、連動して変化しており、次にC-1とC-3がほぼ 同じ寄与率で変動していた。これは、岩石の風化特性を 反映したものと考えられる⁸。平成28年8月豪雨があった 2016年にC-3の寄与率が急増してBやAを上回り、2017年 から2020年にかけて徐々に減少する傾向が認められた。 これらのことから、2016年8月豪雨を経て流域全体的に 土砂流出量の増加と、AT10において上流域で生産され た土砂が継続して流出している可能性があることが示さ れた。

(4) 浮遊土砂流出量マップの構築

流域内の浮遊土砂流出量の空間分布を表現するため、

支流域の地質構成割合と地質別の比浮遊土砂流出量から、 支流域単位の浮遊土砂流出量を算出し、GISを用いて浮 遊土砂流出量マップを作成した(図-10)。この支流域 単位の浮遊土砂流出量は、区分した支流域の面積に依存 することに留意が必要であるが、概ね、比浮遊土砂流出 量が大きい地質(BやC-1、C-3)が分布する中流域で浮 遊土砂流出量が多い傾向が認められる。

図-10で示した浮遊土砂流出量マップは、地質別の比



図-10 浜厚真沙流川流域の年浮遊土砂流出量マップ



図-11 H28 年 8 月北海道豪雨に伴う沙流川流域における降水量の分布と SS 流出量マップ(降水量による加重処理済み)

MIZUGAKI Shigeru, MURAKAMI Yasuhiro, IWAKURA Keiko

浮遊土砂流出量を、該当する地質地域全体に均等に分配 したものである。すなわち、同じ生産源区分であれば、 上流域から下流域まで同じ量の浮遊土砂が流出すると仮 定したものである。2016年を除いた他の年では、大規模 な豪雨出水がなかったため、局地的な豪雨による土砂流 出の影響は考えにくく、一定程度の信頼性があるものと 考えられる。一方、平成28年8月豪雨時のように土砂生 産に影響をおよぼす場合は注意が必要となる。

平成28年8月豪雨時の降水量分布について、1kmメッシュ全国合成レーダーGPVをもとに調べたところ、台風 7号、11号及び9号(2016年8月16日17時~28日23時;以下、 BT10)と台風10号以降(2016年8月28日23時~9月17日0時;以下、AT10)では大きく異なっていた(図-11上)。 BT10期間では総雨量300~500 mmが全域に分布していた が、AT10期間では日高山脈の地形性豪雨により総雨量 300~500 mmの範囲が沙流川上流域に限定され、中~上 流域では100~150 mm、中~下流域では100 mm以下であ った。このように、同じ地質別生産源に区分される地域 でも、土砂生産に影響を及ぼす降水量が大きく異なる場 合は、支流域単位の浮遊土砂流出量に換算する際に、何 かしらの補正が必要と考えられる。

そこで、地質別浮遊土砂流出量を1kmメッシュの降水 量に応じて加重して分配することで、支流域単位の浮遊 土砂流出量マップを再構築した(図-11下)。その結果、 AT10において降水量が比較的少ない下流域では浮遊土 砂流出量が下方修正され、一方、降水量の多い上流域で は上方修正された。このように、降水量等で補正するこ とで、より実態を反映した浮遊土砂流出マップとして表 現できたものと考えられる。ただし、降水量だけでなく、 土壌侵食・土砂流出に影響を及ぼす地形・土地利用や河 川流量等の諸因子をどのように反映させるかについては、 今後の課題である。

4. まとめ

2011年~2020年の10年間にわたって継続的に濁度計観 測や出水時の水質調査といった流砂水文観測が実施され ている沙流川流域を対象に、放射性同位体トレーサを用 いて地質別の浮遊土砂流出量を評価し、支流域単位の浮 遊土砂流出量マップを構築した。土砂移動トレーサを用 いた生産源推定において、流域内の生産源の区分方法と 有効な複数のトレーサの組み合わせを統計的に探索する ことが最も重要であり、最初に取り組む必要がある⁹。 しかし、検討対象流域において、一旦、複合トレーサと 生産源区分の組み合わせの探索に成功すれば、あとは流 出土砂のサンプリングとトレーサ分析を行うことで、比 較的簡単に各生産源からの寄与度を定量的に評価するこ とができる。

本報で構築した浮遊土砂流出量マップにより、流域全体の土砂動態を俯瞰することができ、さらに10年間の経年変化を見える化した。とくに平成28年8月豪雨による大規模な土砂生産・流出を含めた流域の土砂動態変化を把握することができた。すなわち、浮遊土砂流出の時空間分布を把握できる、流域土砂動態のモニタリングツールとして有効であることを示した。今後、さまざまな流砂系における総合土砂管理において活用されることが期待される。

謝辞: 沙流川流域における出水時のSS濃度及び浮遊土 砂試料の多くは室蘭開発建設部治水課・二風谷ダム管理 所・沙流川ダム建設事業所との継続的な合同調査・ご協 力により得られたものです。また降水量分布について寒 地土木研究所水環境保全チームの山田嵩研究員にご協力 いただきました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 後藤宏二,内田太郎(2012)大規模土砂生産後の流砂系土砂 管理のあり方に関する研究.建設マネジメント技術2012年 7月号,49-53.
- Collins, A.L., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L. (1998): Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 23, p. 31-52.
- Mizugaki, S., Abe, T., Murakami, Y., Maruyama, M. and Kubo, M. (2012) Fingerprinting Suspended Sediment Sources in the Nukabira River, Northern Japan. International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 5, p. 60-69.
- 4) 村上泰啓,中津川誠(2004)斜面崩壞・土砂生産・流木発生, (編) 土木学会水工学委員会,平成15年台風10号北海道豪 雨災害調査団報告書.土木学会,東京,p.46-56.
- 5) 水垣滋,捧雅章,小田島大祐(2018)鵡川・沙流川水系におけ る2016年8月豪雨による浮遊土砂流出量.第61回(平成29年 度)北海道開発技術研究発表会論文集,防37(治).
- 水垣滋,古市剛久(2022)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)(印刷中).
- 7) 秋田寛己,水垣滋,村上泰啓(2020)豪雨に伴う新規崩壊による流域スケールの土砂生産量推定-沙流川水系パンケヌーシ川流域における平成28年台風10号の事例-.2020年度砂防学会研究発表会概要集,p.71-72.
- 水垣滋,谷瀬敦,平井康幸(2015)岩石の暴露試験による積雪 寒冷地域の微細土砂生成速度. 寒地土木研究所月報 750,2-13.