

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

水垣 滋¹・村上 泰啓²・巖倉 啓子³

¹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
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²北海道開発局 札幌開発建設部 河川計画課 (〒060-8506 北海道札幌市中央区北2条西19丁目)

³北海道開発局 事業振興部 都市住宅課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

流砂系の総合土砂管理計画の策定に際し、流砂系全体で俯瞰できる土砂動態マップは最も基本的かつ重要な情報である。一方、年々変動する土砂動態を流砂系全体で把握するためには、複数の地点で流砂観測を継続することが必要であるが、必ずしも容易でなく、新たに効率的な土砂動態モニタリング手法が求められている。そこで、岩石由来の放射性同位体を土砂移動トレーサとした浮遊土砂の生産源推定手法を開発し、流域内の地質別浮遊土砂流出量の評価と支流単位での浮遊土砂流出量マップの構築を試みた。

キーワード 放射性同位体、土砂生産源、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場合があり、流域から海域へ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把握することは、土砂生産源対策における重要課題となる。検討対象流域の流出土砂量は、一般に、下流端における流砂水文観測により把握される。しかし流域内の土砂生産源の空間分布を把握するには、支川流域ごとに流砂水文観測を実施する必要があり、労力やコスト面で観測を継続することが困難な場合が少なくない。そのため、流域内の土砂生産源を効率的に把握できる新たなモニタリング手法が求められている。

一方、土砂生産源の推定は古くから海岸砂や河床材料を構成する砂礫を対象に行われてきた。わが国では、一般に岩種の肉眼判定に頼ってきたため、大規模出水時の浮遊土砂の生産源評価事例は少ない。近年、欧米では、流域から海域に流出する微細土砂の地球化学特性を土砂移動トレーサとした、定量的な生産源推定が広く行われている²⁾。この手法を流砂水文観測と組み合わせることで、土砂生産源を定量的に把握できる可能性がある。そこで寒地土木研究所では、岩石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（以下、トレーサ手法）の開発に取り組んできた³⁾。本研究の目的は、流域内の浮遊土砂生産源の空間分布を定量的に把握する

ために、トレーサ手法を活用した流砂系の土砂動態モニタリング手法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、Mizugakiら³⁾によると、浮遊土砂の生産源は岩石由来の放射性同位体特性によって6つの地質地域（A、B、C-1、C-2、C-3、D）に区分される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

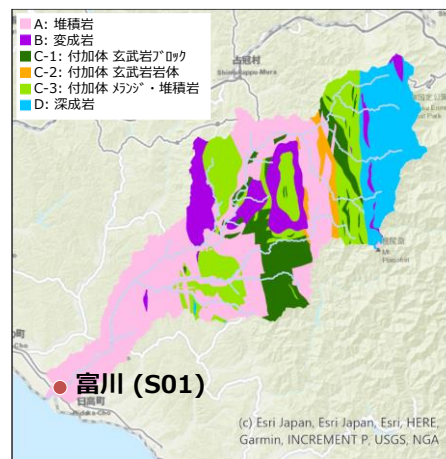


図-1 対象流域の地質別生産源区分と調査地点

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2003年 (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⁴⁾。近年では、2016年 (平成28年) 8月に4つの台風に伴う集中豪雨により、上流域で斜面崩壊や土石流、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。沙流川流域における土砂生産量・流出量について、いくつかの調査・研究事例がみられるものの、実態把握は必ずしも十分でない。

(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、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部との合同水質調査において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。また浮遊土砂は、表面採水試料や河川内に一定期間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

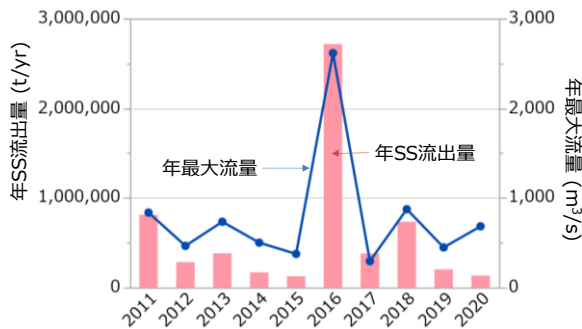


図-2 沙流川流域の年SS流出量 (4～11月) の経年変化

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、抽出した浮遊土砂の放射性同位体 (²¹⁰Pb, ⁴⁰K, ²²⁸Ac) の濃度をガンマ線スペクトロメトリーにより定量分析した³⁾。Mizugakiら³⁾は、これらの放射性同位体を土砂移動トレーサとし、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地質別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) で求められる⁶⁾。

$$d_s^2(c_1, c_2, \dots, c_i) = (c_1 - C_{s1} \quad c_2 - C_{s2} \quad \dots \quad c_i - C_{si}) \begin{bmatrix} s_1^2 & \dots & s_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{s1} & \dots & s_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} c_1 - C_{s1} \\ c_2 - C_{s2} \\ \vdots \\ c_i - C_{si} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに d_s は生産源 s と流出土砂とのマハラノビス距離、 c_i は流出土砂のトレーサ濃度、 C_{si} 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^{3,6)}。

$$P_s = \frac{1/d_s}{\sum_{s=1}^n 1/d_s}, \quad P_s \geq 0, \quad \sum_{s=1}^n P_s = 1 \quad (2)$$

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

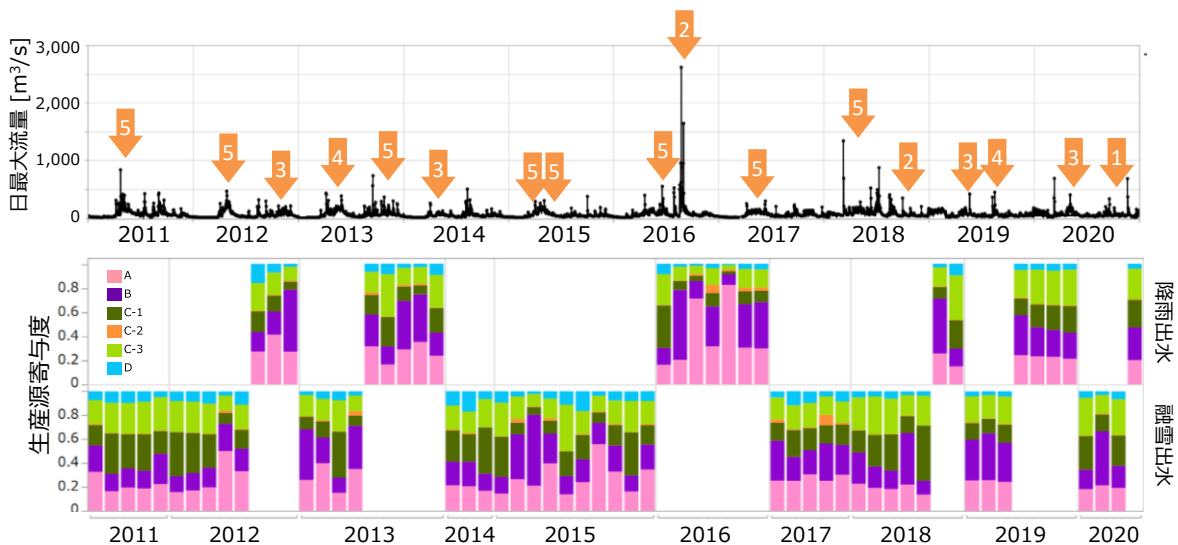


図-3 出水時の採水調査時期・サンプル数 (上) と浮遊土砂の生産源寄与率 (下)

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を評価するため、地質別生産源 s の浮遊土砂濃度 (C_{ss}) と流量 (Q) との関係式を構築した。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、水垣ら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) を採用し、式 (3) の3つの変量 (C_{max} , K_m , Lmt) の最適解を数値解析的に求めた。

$$\ln(C_{ss}) = \frac{C_{max}(Q + Lmt)}{K_m + Q + Lmt} \quad (3)$$

ここに、 C_{ss} はSS濃度、 C_{max} はSS濃度の上限値に関する係数、 K_m 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⁹⁾。生産源 s からの浮遊土砂流出量 (Q_{ss}) を浮遊土砂流出量に生産源 s の寄与率 (P_s) を乗じたものとし、 C_{ss} と P_s の積で得られる地質別生産源 s の浮遊土砂濃度 (C_{ss_s}) 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 ($t/km^2/yr$) 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、前述の各生産源 s からの比浮遊土砂流出量を乗じて合計することで、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. 結果と考察

(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8月豪雨による大規模土砂生産が生じた2016年の271万tであった。次に浮遊土砂流出量が多い2011年 (81万t) と2018年 (73万t) は、2016年の27%~30%程度であった。その他の年は38万t以下であり、最小は2015年と2020年の約13万tであっ

た。

(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、主要な生産源はA, B, C-1及びC-3で構成されていることがわかった。

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、台風10号の前 (主に台風7号、11号及び9号; 以下、BT10) と後 (以下、AT10) の2時期に区分できる (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

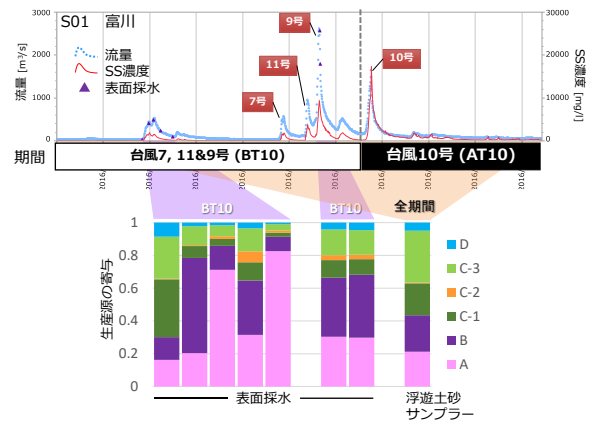


図-4 2016年8月豪雨時の浮遊土砂生産源の寄与率

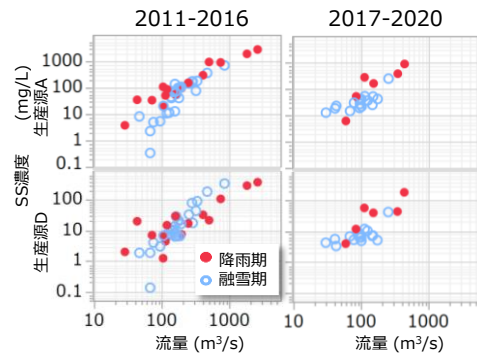


図-5 地質別 SS 濃度と流量との関係例

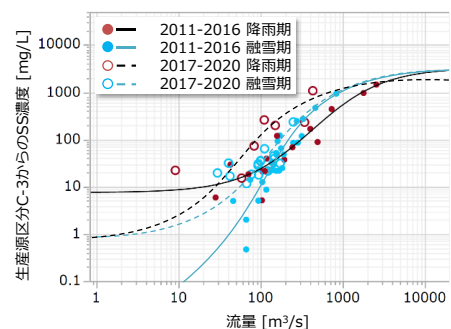


図-6 地質別 SS 濃度への C-Q モデルのあてはめ事例

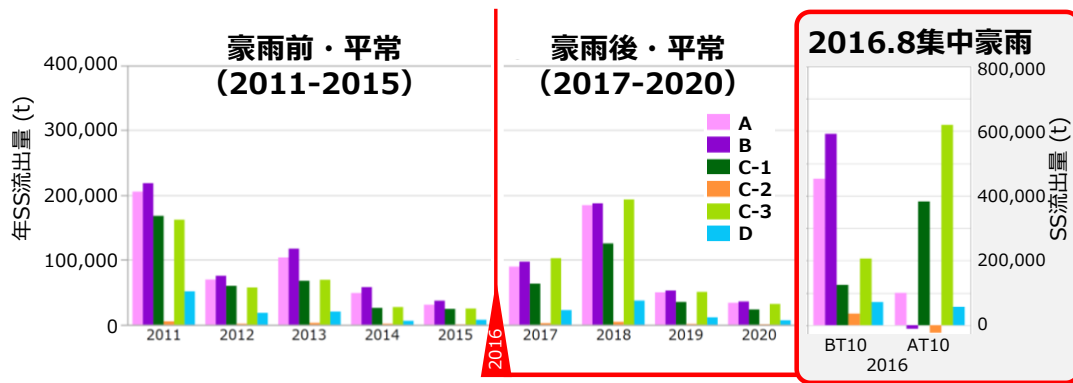


図-7 地質別の年 SS 流出量の変化

左：地質別C-Qモデルによる年SS流出量（4月～11月），右：2016年8月豪雨時の2時期の地質別SS流出量

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。

(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、2016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-Q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、2016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

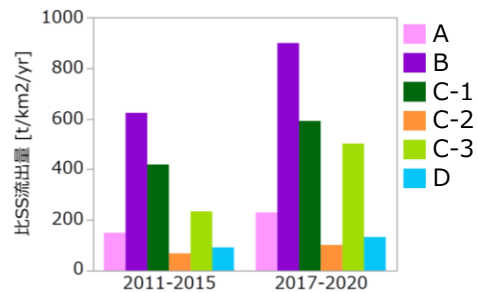


図-8 2016年前後の地質別比SS流出量

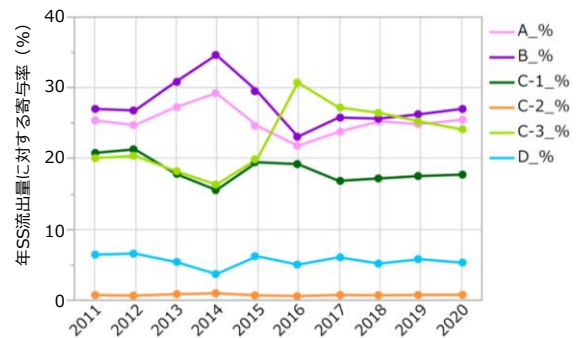


図-9 SS 流出量に対する地質別生産源の寄与率の経年変化

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2016年の前後、すなわち2011年～2015年と2017年～2020年で比較すると、地質による違いは傾向が類似しているが、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）。これを相対的な生産源の寄与率の経年変化で見ると、2016年には8月の豪雨により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（図-9）。これらのことから、2016年8月豪雨により流域全体の土砂流出量が増加し、とくに2016年台風10号に伴う豪雨により上流域のC-3で生産された土砂が継続的に流出していることが示された。一方、2011年～2015年はBと

A及びC-1とC-3にそれぞれ同じ寄与率の変動パターンが認められた(図-9)。このことから、中小規模出水時の浮遊土砂生産には岩石の風化特性が反映したと推察される⁸⁾。

(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、支流の地質構成割合と地質別の比浮遊土砂流出量から、支流単位で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)。この流域

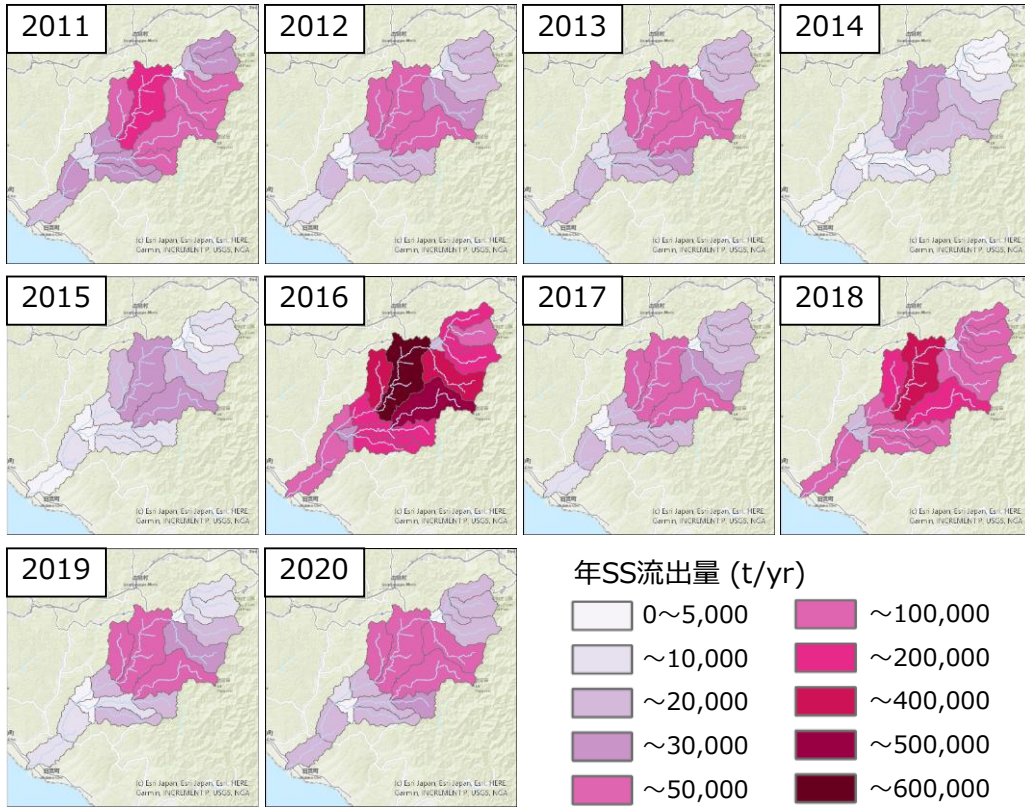


図-10 沙流川流域の年浮遊土砂流出量マップ

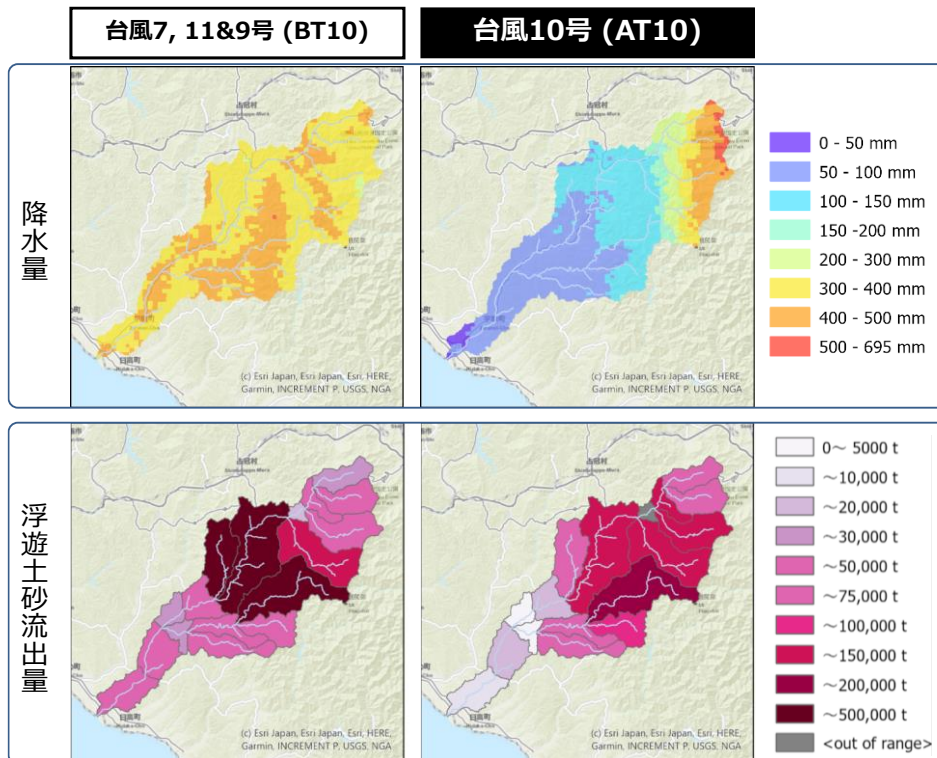


図-11 2016年8月豪雨に伴う沙流川流域における降水量の分布とSS流出量マップ(降水量による加重処理済み)

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。解析対象期間のうち2016年を除けば、豪雨による大規模な土砂生産がなく、概ねノンポイントソースと考えられ、信頼性があるものと考えられる。一方、2016年8月の局地的豪雨による大規模土砂生産が生じた場合は注意が必要となる。

2016年8月豪雨時の降水量分布について、1 km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10号の前（BT10；2016年8月16日17時～28日23時）と台風10号以降（AT10；2016年8月28日23時～9月17日0時）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1 km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（植生被覆）や崩壊跡地等の裸地の分布、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。

本研究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2016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、新たな流域土砂動態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北海道開発局室蘭開発建設部治水課・二風谷ダム管理所（当時）・沙流川ダム建設事業所（当時）との継続的な合同調査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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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) 斜面崩壊・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) 鶴川・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).
- 6) 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), 48-54.
- 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.
- 8) 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.