

大規模土砂生産後の中長期的な土砂動態の把握

泉山寛明・内田太郎・松本直樹

1. はじめに

平成29年7月の九州北部豪雨のように、豪雨や地震により大規模な土砂生産が発生した場合、発生直後に甚大な被害が生じる。それとともに、大量の土砂が流域内に残存しているため、その後しばらくは発生前に比べて土砂移動が活発になる。その結果、貯水池への大量の土砂流入が生じたり¹⁾、河床上昇によって中長期的に洪水の頻度が増加したりする²⁾。したがって、活発な土砂流出の継続期間を判断するとともに、土砂流出の高精度な再現計算が可能な計算技術を確認することは、防災・減災対策の観点から重要である。

これまで大規模土砂生産後の土砂動態特性について多くの研究があり、例えば降雨起因の場合は大規模土砂生産後、急激に河床が上昇し、その後徐々に低下すること³⁾、地震起因の場合は斜面に多くの土砂が堆積し、流出しづらいこと⁴⁾、一次元の河床変動計算では適切な河幅の設定が必要⁵⁾など、いくつかの重要な知見が得られている。

一方、活発な土砂流出が続く期間（以下「影響期間」という。）は定量的にどれほどか、活発な土砂流出の継続をコントロールしている要因についての知見が不足している。そこで本研究では、我が国で過去に発生した大規模土砂生産とその後の土砂流出の実態を明らかにするべく文献調査、現地調査、測量成果を用いた検討を行った。

2. 検討方法

2.1 対象流域

国内では大規模土砂生産が発生した事例がいくつかあるが、文献やデータの存在状況から判断して表-1に示す様に流域面積 A が数十～数百 km^2 の11流域を検討対象とした。2.2で示すが、流出土砂量は可能な限り堆砂量の時系列変化から推定するようにしたため、浦川を除き、堆砂測量が実施されている貯水ダムや砂防堰堤が下流端と

表-1 検討対象流域

	A [km^2]	大規模土砂生産発生年、 発生原因	V_L [万m^3]	V_Y [$\text{万m}^3/\text{年}$]
渡川 (渡川ダム流域)	143.0	平成17年,台風14号	25	75
川辺川 (朴木砂防堰堤流域)	97.0	昭和57年,豪雨	57	51
		平成16年,台風16号,18号	54	270
		平成17年,台風14号	130	
中川川 (三保ダム流域)	39.2	大正12年,大正関東地震	4121	261
宮川 (宮川ダム流域)	125.6	平成16年,台風21号	119	61
浦川流域	22.0	平成7年,豪雨	138	151
揖斐川 (横山ダム流域)	471.0	昭和40年,台風23号,24号,豪雨	702	545
		昭和50年,台風6号	250	407
		平成10年,豪雨,台風10号	198	78
芋川 (東竹沢第二砂防堰堤流域)	10.1	平成16年,新潟県中越地震	353	67
小渋川 (小渋ダム流域)	288.0	昭和36年,豪雨	3196	3216
		昭和57年,台風10号	375	846
		昭和58年,台風10号	266	
一迫川 (花山ダム流域)	126.9	平成20年,岩手宮城内陸地震	1073	67
王滝川 (牧尾ダム流域)	304.0	昭和59年,長野県西部地震	3856	696
常願寺川 (本宮砂防堰堤流域)	368.0	安政5年,飛越地震	13000	7600

なるように検討対象流域を設定している。降雨起因で現象が発生したのが6流域、地震起因で現象が発生したのが5流域である。いずれも複数の斜面崩壊が発生している。対象とした大規模土砂生産は、斜面崩壊による対象流域内の生産土砂量が 25万m^3 以上のものとしている。

2.2 生産土砂量・流出土砂量

(1) 生産土砂量 V_L

生産土砂量 V_L はある一つの豪雨あるいは地震に伴う大規模土砂生産を対象に算出した。ただし、川辺川では平成16年、17年と、小渋川では昭和57年、58年と連続して大規模な土砂生産が発生している（表-1）。大規模土砂生産後の下流域へ与える影響をそれぞれの年に分離することはできないため、これらについては一つの豪雨に伴う現象として取り扱うこととした。

V_L は以下の方法により求めた：

- 1) 既往の研究・直轄事務所の調査で判明している V_L を使用…浦川、芋川、小渋川、王滝川（伝上崩れ）⁶⁾、常願寺川⁷⁾
- 2) 既往の研究・直轄事務所の調査で判明して

いる崩壊地面積 A_L に基づき算出…川辺川平成16年・平成17年、中川川⁸⁾、宮川⁹⁾、揖斐川、一迫川

- 3) 新たに空中写真判読を実施し、その結果得られた A_L に基づき算出…渡川、川辺川昭和57年、王滝川（伝上崩れ以外）

なお、3)に示す渡川については、厚井⁸⁾による判読結果があるが、面積の大きな崩壊地に限られるため、改めて空中写真判読を実施して平成17年に発生したと考えられる崩壊地を全て抽出した。

2)、3)については、 A_L に崩壊深 D_L を乗じて V_L を算出した。 D_L は式(1)¹⁰⁾から求められると仮定して推定した（式(2)）。

$$V_L = \alpha \cdot A_L^{1.45} = D_L \times A_L \quad \text{式(1)}$$

$$\therefore D_L = \alpha \cdot A_L^{0.45} \quad \text{式(2)}$$

ここに α は定数である。Guzzetti et al.¹⁰⁾は世界中のデータから統計的に α を0.074としており、崩壊地の D_L の調査結果が無い流域についてはこれを用いた。一方、渡川^{11),12)}、宮川¹³⁾では既往の研究で、川辺川では直轄事務所の調査で、流域内で発生する斜面崩壊の A_L と D_L の関係が分かっているため、その関係に合うよう α を補正した。

(2) 流出土砂量 V_Y

浦川流域以外の10流域については、流域下流端に存する貯水ダムあるいは砂防堰堤の堆砂測量結果から1年あたりの流出土砂量 V_Y を推定した。つまりここで言う V_Y とは検討対象流域下流端に到達した土砂量のことを意味する。ただし堆砂測量結果から算出される V_Y は、貯水ダム等に堆砂せずに流下する細粒分を含まない。そこで貯水ダムによる土砂捕捉率を評価できるBrune曲線（捕捉率－総貯水容量/流入量）¹⁴⁾あるいは式(3)の捕捉率¹⁴⁾ E_r を用いて細粒分を推定した：

$$E_r = 1 - \frac{1}{(1+K \cdot C/F)} \quad \text{式(3)}$$

ここに K は定数、 C は総貯水容量、 F は流域面積である。なお、砂防堰堤（川辺川、芋川、常願寺川）に対し、貯水ダムに適用されるべき上記の手法が適用できるかどうかは要検討だが、他に手法がないことから、砂防堰堤にも適用できると仮定した。この場合、総貯水容量として計画貯砂量を代用した。Brune曲線は流入量が計測されている場合（川辺川、揖斐川、芋川、小渋川、一迫川）に使用し、それ以外には式(3)を適用した。

浦川の V_Y は河床変動量と崩壊土砂量から推定した。具体的には、平成7年以降、上流から下流にかけてほぼ一様に河床低下の傾向にあるため、河床変動量そのまま下流端への流出量に寄与したと仮定した(V_{Y1})。一方の崩壊土砂量については、そのうちどれほど河床へ流出したか不明であるため、その半分が下流端への流出量に寄与したと仮定した(V_{Y2})。最終的に浦川下流端への流出土砂量はこれらの和で表されるとした($V_{Y1}+V_{Y2}$)。

表-1を見ると、渡川、川辺川（平成16年、平成17年）、浦川、揖斐川（昭和50年）、小渋川（昭和57年、昭和58年）については生産土砂量 V_L より流出土砂量 V_Y の方が大きい。これは、崩壊土砂だけでなく側岸侵食等による土砂の流出が含まれているためと考えられる。

2.3 影響期間の設定

影響期間を V_Y の時系列的変化から推定する。ただし、異なる流域間で結果が比較できるように、 V_Y を A および降雨指標で除した値 V_{YN} で整理する。 V_Y と関係のある降雨指標として、年最大時間雨量、年最大日雨量、年降水量が考えられるが、流出土砂量との相関が最も高いのが年最大日雨量であったため、これを用いて V_{YN} を算定した。

影響期間は、例えば V_{YN} が大規模土砂生産前の水準まで低減するのに要する期間と設定できれば合理的だが、浦川、芋川、常願寺川では大規模土砂生産前の V_{YN} が不明である。一方、その他の流域では大規模土砂生産発生前の V_{YN} は大規模土砂生産後、最初に現れる V_{YN} のピーク値の1/10程度かそれより小さい場合があった。そこで本研究では、対象とした流域全てについて、大規模土砂生産後、最初に表れる V_{YN} のピーク値の1/10（1オーダー小さな値）を下回る年までの期間として影響期間を推定した。ただし、大規模土砂生産発生年は影響期間に含めないものとした。

なお、中川川と常願寺川については、大規模土砂生産発生直後からしばらくの間、データが無いため流出土砂量が算定できない。使用した V_{YN} のピーク値はそれぞれ昭和60年、昭和49年のものであり、実際よりも小さな値の可能性はある。よって、影響期間は過大評価の可能性はある。

2.4 河床材料の粒度分布

過去の直轄事務所の調査結果および現地調査結果から、大規模土砂生産発生の前後における河床

材料の粒度分布の変化を整理した。なお、データの存在状況から粒度分布の整理は川辺川、浦川、横山ダム、東竹沢、小渋ダム、牧尾ダムの6流域を対象として行った。表-2には各流域で大規模土砂生産前、直後、影響期間中（後述）、影響期間終了後のデータ整理結果を示す。粒度分布の分析結果は、可能な限り近接した地点のものを用いることとした。ただし、大規模土砂生産発生直後に河床材料調査結果がない場合がある。この場合は、河岸堆積物や崩壊堆積物で調査が実施されている場合があるので、この結果が代用できるとした。

3. 検討結果

3.1 大規模土砂生産の影響期間

図-1に、代表例として浦川および王滝川の2流域について、大規模土砂生産発生前から発生後数年にわたる V_{YN} の時系列変化を示す。いずれの流域についても、大規模土砂生産があった後から数年間、 V_{YN} は大きな値を示し、その後通常時の水準まで低減する傾向が見られる。浦川の場合、平成7年に大規模土砂生産が発生してから平成25年時点まで活発な土砂流出が続いており、影響期間は18年となる。一方、王滝川は昭和59年に大規模土砂生産が生じ、平成3年まで活発な土砂流出があり、影響期間は7年と推定される。

図-2は生産土砂量と影響期間の関係である。図ではプロットを地震起因と降雨起因とで分けて示し、それぞれの回帰曲線も示す。ただし常願寺川と中川川については影響期間を過大評価している可能性があるため、地震起因の場合の回帰曲線の

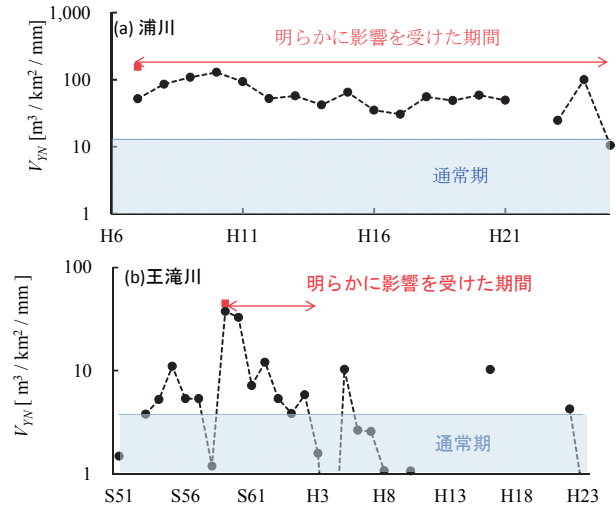


図-1 流出土砂量の時系列変化

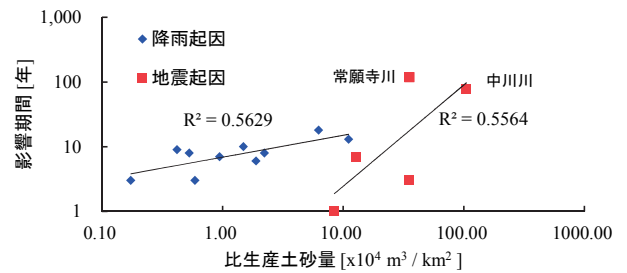


図-2 比生産土砂量と影響期間の関係

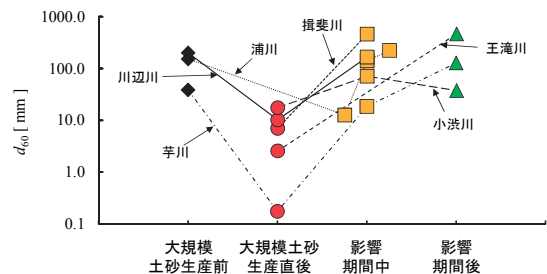


図-3 代表粒径 d_{60} の変化

表-2 粒径分布取得地点（取得年度）

	大規模土砂生産前	大規模土砂生産直後	影響期間中	影響期間後
川辺川 (H16, H17)	縦木砂防堰堤から上流1.8 km (H13)	縦木砂防堰堤から上流1.3 km (H17)	縦木砂防堰堤から上流1.7 km (H21)	なし
浦川	姫川合流点から上流100m (H3)	なし	姫川合流点 (H8)、合流点から上流100m (H14, H19)	なし
揖斐川 (H10)	なし	白川合流点から上流13.8km (H22) *崩壊堆積物	なし	白川合流点から5.6km (H20)
芋川	前沢川合流点から上流1.2 km (H14)	前沢川合流点から上流1.8 km (H28) *河岸堆積物	前沢川合流点から上流1.8 km (H19)	前沢川合流点から上流3.1 km (H28)
小渋川 (S36)	なし	本川合流点から0~12.4km地点の平均 (S36)	本川合流点から19.29 km (S42)	本川合流点から19.24 km (S50)
王滝川	なし	餓鬼ヶ喉から上流2.4km (S59 - S60) *河岸堆積物	なし	餓鬼ヶ喉から上流0.5km (H29)

傾きは実際には小さい可能性がある。一方、回帰曲線の切片に着目すると、降雨起因の方が地震起因よりも切片の値が大きいことが分かる。これは、降雨起因の場合、生産土砂量が少なくても影響期間が数年以上となるが、地震起因の場合、降雨起因と同じ影響期間となるためには多くの生産土砂量が必要であることを意味している。

この要因として生産土砂の流動性が考えられる。降雨起因の場合は、降雨浸透により生産土砂の飽和度が高く容易に流動化し、河道まで大量の土砂が到達しやすい。一方、地震起因の場合は、生産土砂の飽和度が小さく、河道に到達する土砂はあるものの、生産土砂の流動性は小さく、斜面に残存する土砂の割合が高い可能性が考えられる。

3.2 粒度分布の時系列変化

図-3に大規模土砂生産発生前後における粒度分布の変化を示す。図には代表粒径を60%粒径とした場合を示している。図を見ると、発生直後には細粒化し、影響期間、影響期間後と時間が経過するにつれて粗粒化していく傾向が見られる。これは大規模土砂生産により細粒分を多く含む土砂が河床へ供給され、その後、水流作用により徐々に下流へ流出することで、最終的には発生前の状態に河床が戻ることを反映していると思われる。したがって影響期間の長短は、河床の細粒土砂の存在状況に依存し、河床の細粒土砂の多寡をモニタリングすることにより影響期間の継続性が確認できることを示している。

4. おわりに

我が国で過去に発生した大規模土砂生産後の土砂流出現象についてデータの整理分析を行ったところ、大規模土砂生産後に土砂流出が活発となる期間（影響期間）が明らかになったとともに、それは地震起因か降雨起因かにより異なる傾向を示すことが分かった。また、細粒土砂の河床における存在状況が活発な土砂流出の継続をコントロールしている可能性のあることが分かった。今後は、本研究の成果を平成29年7月九州北部豪雨等の復旧計画やモニタリング計画に反映していきたい。一方、再現計算のためには、生産土砂の流動性の評価方法など不明な点がいくつかあるので、これらを明らかにするべく、研究を続けていきたいと考える。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、全国の地方整備局から関連データを借用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 黒岩知恵、平松晋也：三重県宮川ダム上流域における2004年台風21号による土砂生産に関する一考察、砂防学会誌、Vol.63、No.4、2010
- 2) 池田暁彦：大規模崩壊地からの土砂流出とその対策―常願寺川砂防事業の歴史―、砂防学会誌、Vol.64、No.3、2011
- 3) Kasai, O., Marutani, T., & Brierley, G.: Channel bed adjustments following major aggradation in a steep headwater setting: findings from Oyabu Creek, Kyushu, Japan, *Geomorphology*, Vol.62, Issues 3-4, 2004
- 4) Hovius, N., Meunier, P., Ching-Weei, L., Hongey, C., Yue-Gau, C., Dadson, S., Ming-Jame, H., & Lines, M.: Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.304, Issues 3-4, 2011
- 5) 例えば、丹羽諭、内田太郎、泉山寛明、桜井亘、大野亮一、寺田秀樹、里深好文：大規模土砂生産後の土砂流出を対象とした河床変動計算における流れ幅の設定の影響、砂防学会誌、Vol.70、No.6、2018
- 6) 大串和紀、井上建一、石村忍：牧尾ダムにおける堆砂問題、農業土木学会誌、Vol.63、No.8、1995
- 7) Ouchi, S., Mizuyama, T.: Volume and movement of Tombi Landslide in 1958, Japan, *Transactions, Japan Geomorphological Union*, Vol. 10, 1989
- 8) 厚井高志：長期ダム堆砂データを用いた山地森林流域における土砂生産・流出に関する研究、東京大学学位論文、2009
- 9) 黒岩知恵：森林伐採や植栽の影響を加味した土砂生産予測に関する研究、信州大学学位論文、2013
- 10) Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., & Valigi, D: Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.279, Issues 3-4, 2009
- 11) 高橋正佑、谷口義信：宮崎県南郷村松の内崩壊に関する研究、昭和55年度砂防学会研究発表会概要集、1980
- 12) 清水取：大規模土砂災害の発生履歴と土砂移動規模の評価、砂防学会誌、Vol.61、No.6、2009
- 13) Imaizumi, F., R. C. Sidle: Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan, *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 112(F3), 2007
- 14) Brune, G. M.: Trap efficiency of reservoirs, *Transactions American Geophysical Union*, Vol.34, No.3, 1953

泉山寛明



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室
研究官
Hiroaki IZUMIYAMA

内田太郎



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室
長
Taro UCHIDA

松本直樹



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室
主任研究官
Naoki MATSUMOTO