様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　３０　年　　６　月　　４　日現在

機関番号：　１７６０１
研究種目：　基盤研究(C)（一般）
研究期間：　2015～2017
課題番号：　１５Ｋ０１２６１

研究課題名（和文）近年頻発している大規模土砂生産後の土砂動態に関する移動場変化過程に注目した解析

研究課題名（英文）Study on sediment dynamics of mountain stream channel after large sediment supply events focusing on chronological changes in site condition

研究代表者
清水　収（SHIMIZU, Osamu）

宮崎大学・農学部・教授

研究者番号：２０１７８９６６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,700,000円

研究成果の概要（和文）：豪雨により多数の崩壊が発生し，その生産された土砂が渓流の上流区間に大量に堆積した流域では，その後数年間，堆積土砂が活発に洗掘され，その後沈静化する。この一連の経過を実際の渓流でモニタリングし，土砂の洗掘がいつまで続き，なぜ沈静化するのかを調べた。その結果，平年並みの降雨状況でも洗掘が活発に起こり，5年後に沈静化した。5年間での土砂減少量は堆積で増加した土砂量とほぼ近似していた。水理学的な検討から，洗掘が沈静化した理由は，細粒土砂が流されて粗粒土砂が多くなったことと，河床横断形が水を安定して流すことのできる形・大きさに変化したことであると推察された。

研究成果の概要（英文）：This study performed a 15-year monitoring program of erosion processes in the stream channels which had been aggraded by newly deposited sediment. The sediment was actively eroded for 5 years after the deposition, and then the erosion stopped. The grain size distribution of channel bed has changed from fine to coarse, and the cross-sectional profile of channel bed has changed from flat to partially degraded through the erosion period. The reason why the erosion stopped is estimated that the channel has become stable because of both enough capacity of low-flow channels for discharge and erosion resistance of coarse sediment.

研究分野：　砂防学

キーワード：　土砂生産　土砂動態　河床変動　滞留土砂　河床横断形　河床材料　安定化

１．研究開始当初の背景

(1)　近年，明らかに豪雨の発生が増え，大規模な土砂災害が頻発している。豪雨時には流域内で数多くの斜面が崩れて，大量の不安定土砂が生産される。こうした土砂生産イベント時には，土砂が下流の生活圏へ流出して大きな土砂災害となる一方で，生産された土砂の多くは流域内の渓流上流部にも堆積して残存するため，イベントの影響はそれ以降も続くことになる。すなわち，堆積した土砂は未だ不安定であり，平年並みの降雨状況でも容易に侵食されるため，イベント以降の数年間，活発な土砂流出が継続する。このような大規模土砂生産後の土砂流出の動向を的確に予測できれば，流域の中期的な土砂管理において非常に有益である。

(2)　研究代表者は，2003 年の豪雨で大規模な土砂生産が発生した北海道沙流川において，２つの山地小流域を試験地に設定し，河床変動の観測を続けている。これは，2003 年豪雨時の大規模土砂生産によって河床に大量に堆積した土砂が，その後，洗掘され減少していく経過を毎年行う精密な縦横断測量によってモニタリングしているもので，申請時までに 11 年間の計測データが蓄積されていた。これを用いて，堆積土砂が洗掘されていく経過の時間的な推移，空間的な特性を検討してきた。

(3)　これまでに分ったことは，大規模土砂生産後の土砂動態には，洗掘を受ける側の土砂の存在量，分布，可動性（粒径など土砂の動きやすさの指標）といった「場の条件」と，洗掘を起こす側の営力となる降水量，流量など「外力の条件」の両方が関係すること，さらに場の条件は，例えば洗掘が進むにつれて土砂量が減少し粒径組成も変化するなど，時間的に変化していくこと，等である。こうした複雑な現象を解明するには，上流域の土砂の移動場そのものを調べる研究視点が必要であり，しかも時間的に推移していく現象を扱うことから，研究方法として長期の野外観測によることが最も有効である。こうした課題認識から，本研究が計画された。

２．研究の目的

(1)　豪雨時には流域内で多くの崩壊が発生して土砂が生産され，それら大量の土砂は流域内の河道に堆積して，土砂で満たされた平坦な河床が出現する。その後に続く平穏な期間には，小さな降雨出水によっても河道堆積土砂が活発に洗掘されて，河床を満たした土砂が少しずつ減少していく。当初平坦だった河床には洗掘の結果，溝状の流路が掘り込まれ，その溝は次第に断面積を拡大していく。こうした土砂の動態が，沙流川の試験流域において 2003 年豪雨と 2006 年豪雨の２回ともに計測されている。そして，現在は土砂洗掘が鈍化してきた。こうした経過を踏まえ，具体的な研究目的として以下の２点を設定した。

(2)　土砂洗掘レートの推移の解明
　１年間の洗掘量を洗掘レートとし，これが土砂堆積イベント後にどう推移してきたかの時間的変化，この間の降雨イベントと洗掘レートとの関係を明らかにする。

(3)　河床横断形・河床土砂粒径組成の時間的変化の解明
　河床洗掘の推移を水理学的に理解するために，河床横断形の時間的変化（流路断面積の拡大，断面が溝型から箱型へ変化するなど），および河床材料の時間的変化（粒径の大きいものが増える等）を明らかにする。

３．研究の方法

(1)　試験流域は，北海道日高地方を流れる一級河川沙流川の支流で，ルベシュベナイ川とパラダイ川という２つの山地小流域である。流域面積は共に約 2㎞^{2} である。両流域の下流端付近から上流に向かって，ルベシュベナイ川では長さ 2.3 ㎞，パラダイ川では長さ 1.8 ㎞の調査区間を設定し，ここに縦断距離 50m 間隔で固定横断測線を設けている。

(2) 2003 年 8 月の台風 10 号に伴う記録的豪雨により，調査区間では大規模な土砂堆積が発生した。この土砂堆積量と河床の地形を調べるために，同年 10 月に固定横断測線においてレベルを用いた縦横断測量を実施した。その後，毎年 9 月に縦横断測量を行い，2003 年から 2017 年までの 15 年にわたり毎年の河床変動量が調査されている。

(3)　堆積直後の河床表面には細かい土砂が優占し，その後，年々，洗掘が進行するにつれて粗い礫が目立つようになることが観察された。ルベシュベナイ川において，これらの変化を定量的に把握するために，毎年の測量時に各測線を約 10m 下流から撮影した写真から，測線における最大礫の直径と礫間を埋める直径 10 ㎝未満の土砂（砂利と呼ぶ）の多寡を目測により求め，これの毎年の変化を調べた。さらに，両流域のいくつかの測線において，土砂堆積イベント以降に洗掘を受けておらず堆積時の状態が保存されている高位堆積面と，堆積イベント以降に洗掘を受けており 2013 年あるいは 2014 年時点で流水路沿いに位置する低位面において，それぞれ線格子法による礫径調査を行い，両者を比較することで洗掘に伴う粗粒化を調べた。

４．研究成果

(1)　土砂移動量の推移
①図１と図２に，ルベシュベナイ川とパラダイ川における 2003 年以降の各年の堆積土砂量（青），洗掘土砂量（赤），堆積量から洗掘量を差し引いた土砂の増減量を 2003 年イベント以前を初期値０として累加した滞留土砂

量（折れ線），をそれぞれ示す。

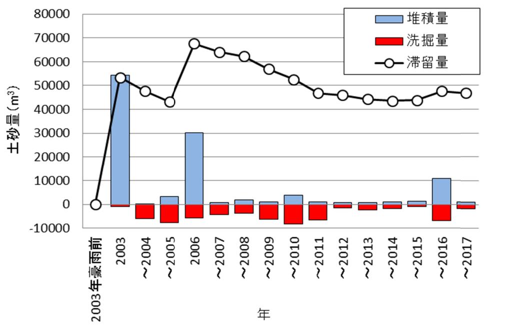

図 1　ルベシュベナイ川の各年の土砂移動量

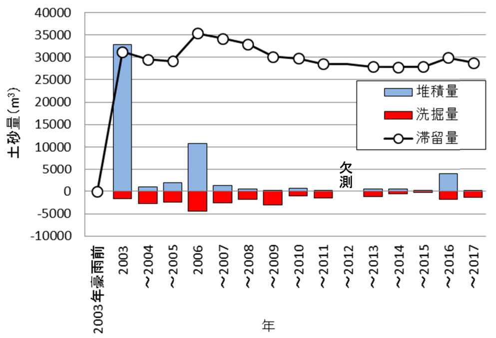

図 2　パラダイ川の各年の土砂移動量

両流域ともに，2003 年堆積イベント後の 2 年間に洗掘が活発に進んで滞留土砂量が減少した。続く 2006 年堆積イベント後にも，ルベシュベナイ川では 2011 年まで，パラダイ川でもおおよそ 2011 年まで活発な洗掘が続き，滞留土砂量が減少した。そして，2012 年からは洗掘が鈍化した。さらに，2016 年にも堆積イベントが発生した。2017 年は洗掘が多くなく，今後の推移を継続して調査する必要がある。
②2003 年後は，洗掘が活発に継続している期間中に 2006 年の土砂堆積を迎えたため，洗掘の鈍化は現れなかった。2006 年後は，2012 年から洗掘が鈍化したが，2007 年から 2015 年までの間，雨の降り方に特段の変化はなかったことから，洗掘の鈍化は雨の変化で生じたものではない。
③両流域ともに，2011 年の滞留土砂量は 2006 年イベントの前年である 2005 年の滞留土砂量に近似している。つまり，2006 年堆積イベントで増加した土砂量と 2007 年から 2011 年までに洗掘によって減少した土砂量が近似している。このことは，2006 年イベントの土砂増加が洗掘により解消されることで洗掘が鈍化した，と解釈することもできる。

(2)　河床横断形の変化特性

2003 年と 2006 年の土砂堆積イベントでは，流路が埋積され横断測線の全体にわたって河床上昇し，平坦な河床面が形成された。その翌年からは，測線上で局所的にやや窪んでいた箇所から洗掘が進行して溝状の流路が形成され，その断面が次第に拡大していった。2011 年まで流路の拡大が進んでいったが，2012 年以降は横断形の顕著な変化はなくなり，洗掘や堆積は非常に小さくなった。この時点における最深河床高は，堆積イベント前の最深河床高と近似している。ただし，測線によって以前よりも最深河床高が高い場合や低い場合もあることから，堆積以前と同じ最深河床高に戻ることが洗掘が鈍化した理由だとは言えない。一方，溝状流路の断面積は，2006 年以降で想定された最大流量を十分に流せる大きさであることが分かった。

2016 年の土砂堆積イベントは 2003 年及び 2006 年に比べて規模が小さく，横断測線全体が河床上昇するほどには至らなかった。しかし，一つの測線内で流路への土砂堆積と河岸の高位堆積地の洗掘の両方が起こって，平坦な河床横断形に変化した。

(3)　河床材料の粗粒化

①図 3 にルベシュベナイ川における写真判読による粒径調査結果の例を示す。

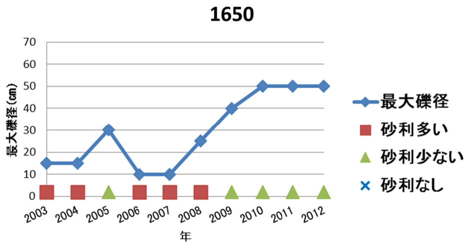

図 3　1650m地点の粒径の経年変化

2003 年と 2006 年の土砂堆積イベント直後には，河床表面の最大礫径が 10～15cm で砂利も多く存在していたのが，堆積後の時間経過につれて最大礫径は大きくなり，また砂利も減少していった。このように堆積イベント以降，活発に河床洗掘が進んでいくのと同時に，河床表面材料の粗粒化も進んでいった。そして，洗掘が鈍化したのは 2012 年以降であったが，河床材料の粗粒化が停止したのも 2011 年以降であり，両者はほぼ同じ時期となっていた。
②堆積後に洗掘を受けていない高位堆積面と，洗掘によって河床低下した流路沿いの低位面との間で粒径分布を比較した結果は，低位面では粗い粒径が多く，高位面では細かい粒径が多かった。したがって，堆積イベント直後は河床全体が細粒であった状態から，洗掘・河床低下を起こした部分では粗粒化が起こったことが分かる。
③さらに，2016 年堆積イベントにより新規に堆積した土砂を対象に，線格子法によってその粒径分布を調べたところ，上記の低位面よりも細粒であり，高位面と類似した粒径分布

であった。
(4)河床の安定化に関する考察

本研究で得られた大規模土砂生産後の土砂動態は，それ以前には土砂移動が発生しなかったような小降雨・小流量でも堆積土砂の洗掘が活発に進み，ある期間を経るとそれが沈静化する，というものであった。これは，移動し易い土砂が豊富に存在して河床が変動し易い状態から，その土砂が排出され河床が安定した状態へと変化する現象と考えることができる。

移動場である河床の状況で説明すると，変動し易い状態は「移動し易い細粒土砂が豊富に存在し，河床横断形は平坦で，流水はそこを浅く広く流れる状態」であった。一方，安定な状態は「移動し易い細粒土砂が少なくなり，河床横断形は複断面で，流水は低水路をある程度の水深を持って流れる状態」であった。

ここで，安定な状態に向かう河床の変化は次のように解釈できる。河床材料が粗粒化することは，移動し易い土砂が減少すること，言い換えれば河床の侵食抵抗性が増大することになる。また，河床横断形において平坦河床を溝状に掘り込んで複断面になることは，同じ流積ならば潤辺が小，径深が大で，流速が大きい「水理学的に有利な断面」を低水路断面として得ることになる。これら２点が，安定な状態へ河床が変化していくメカニズムだと考えられる。

洗掘が鈍化した段階である 2012 年以降の河床は，変化することで獲得した安定な状態を表していると考えられるが，このうち粒径の粗粒化については，アーマーコート状態には達していなかった。したがって，洗掘が続いていき，それが最後に鈍化した際の理由は，アーマーコートの出現ではなく，最大流量を安定して流せる断面を獲得したことが，主たる要因と考えられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　3　件）

①清水　収，前田幸恵：河床変動モニタリングによる土砂動態の研究－北海道沙流川支流ルベシュベナイ川－，砂防学会誌，査読無，69 巻 2 号，p.36-40，2016

〔学会発表〕（計　4　件）

①福永悦子，北村宏太，清水　収：大雨に伴う土砂堆積で形成される山地渓流の河床横断形の特徴－15 年間の河床変動の推移から－, 平成 30 年度砂防学会研究発表会, 2018

②清水　収，川西志歩：2017 年九州北部豪雨による赤谷川支川乙石川の氾濫範囲と家屋残存域の地形的特徴，平成 30 年度砂防学会研究発表会，2018

③清水　収，帆足　直：2017 年九州北部豪雨により筑後川水系妙見川で発生した斜面崩壊の地形的特徴と土砂移動量，平成 30 年度砂防学会研究発表会，2018

④清水　収：大規模な土砂堆積後の山地渓流における土砂洗掘過程と流路安定化プロセス，平成 28 年度河川基金研究成果発表会，2016

〔その他〕

①清水　収：観測を長く続けて分かること，砂防学会誌，70 巻 2 号，p.1-2，2017

６．研究組織
(1)研究代表者

清水　収（SHIMIZU, Osamu）
宮崎大学・農学部・教授
研究者番号：２０１７８９６６