

山地流域における濁度変化と土砂動態

CHANGES IN TURBIDITY AND SEDIMENT MOVEMENT IN A SMALL MOUNTAINOUS WATERSHED

藤田正治¹・澤田豊明²・水山高久³

Masaharu FUJITA, Toyooki SAWADA and Takahisa MIZUYAMA

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所災害観測実験センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 農博 京都大学教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

The volume and the timing of sediment supply from a source point into a torrent are the essential parameters governing the sediment movement in the watershed. However, it is very difficult to measure them directly. Wash load may be used as an index indicating indirectly both of the volume and the timing because the occurrence of wash load is closely related to sediment movement. In this paper, we have studied this point from the field observation. We have introduced a monitoring system of sediment movement in an experimental watershed. The video camera system is recording the erosion process of the deposit and the sediment transportation in the headwater area. The turbidity meter and the flowmeter have been installed at the about 1000 m downstream of the video camera site. The observation result has shown that the situation of sediment movement can be inferred from the data of turbidity and water discharge.

Key Words: Sediment runoff, Monitoring, Sediment production, Turbid water, Wash load, Sediment movement

1. はじめに

山地流域の土砂動態に関する情報は砂防事業を進めていくうえで必要であるだけでなく、山地から海岸までの流砂系における境界条件を知るうえでも重要である。土砂動態は裸地斜面等での土砂生産、河道への土砂供給、河道内での土砂輸送・堆積から構成されるので、これらの構成要素についての情報をいかにして得るかが問題となる。この3つのうち、土砂輸送・堆積については、採水器、採砂器、濁度計などによる流砂の観測および河床変動の測定が行われ^{1), 2)}、山地河川で実用化も図られている³⁾。しかし、構成要素のうち、前2者のモニタリングは極めて難しい。

土砂生産・供給過程はその多くが源流域で生じ、現象が間欠的であるので、流域全体でそれらを直接観測することはほとんど困難である。さて、洪水時には砂礫とともに微細な粒子も濁質として山地斜面および河道堆積物などから流出する。濁度の大きさは土砂生産源から河道への土砂供給や河床材料の移動の結果として現れ、これらが活発なほど濁度は大きくなる。とくに、流域面積の小さな山地小流域では流砂現象に及ぼす土砂生産源の影響が強いと考えられるので、濁度と土砂供給過程の間に密接な関係が期待できる。この関係が明確になれば、濁度を計測した結果からその上流

域での土砂供給、土砂輸送・堆積過程が推定できるかもしれない。

本研究では、河川小流域において濁度の連続観測や源頭部での生産土砂の河道への供給現象のビデオ観測を行い、上流で起こる土砂供給イベントと下流で観測される濁度の時間変化の関係、濁度、流量、降雨量の相互関係、濁度の変化と河道内の土砂移動現象の関係について検討し、濁度観測により土砂動態の状況が推定できるかについて議論する。

2. 流域と観測の概要

(1) 流域の概要

濁度、土砂動態および水文観測を行っているのは、神通川上流の京都大学防災研究所附属災害観測実験センター穂高砂防観測所ヒル谷試験流域である。ヒル谷の流域面積は0.85km²で、その平面図は図-1のようである。図-2はヒル谷流域の地質を示したものである。図中の堰堤は流量や流出土砂量を観測するためのものである。この堰堤から約600m上流でヒル谷は二又に別れている。ここでは、左支川を支川A、右支川を支川Bと記す。支川Aの源頭部には高さ百数十メートルの花崗斑岩からなる大きな裸地があり、年間約15m³の土砂が生産され、この流域の主な土砂生産源となつて

いる。写真-1の向かって左側斜面がそれにあたる。一方、支川Bの上流域には大きな裸地はなく、土砂流出も流水の濁りもほとんどない。その他、石英斑岩からなる裸地や堆積層の裸地がある。本研究では堰堤から支川Aの源頭部までの約1kmの区間に着目する。

図-2に示すように上流域は花崗斑岩と堆積層、下流域右岸が石英斑岩、左岸が堆積層である。このような複雑な地質構造のため、降水の流出過程も複雑になっている。支川Aは通常は水が枯れており、強い降雨時のみ流水が発生する。それに比べて支川Bでは渇水期でも通常は水が流れている。また、合流点の下流には流水が伏流して水が枯れる場所があるが、堰堤から200m上流付近までの左岸の堆積層から湧水があるため、堰堤地点で水が枯れることはない。また、ヒル谷は、降雨イベントに対応した流量の一次ピークの後はこの湧水によると思われる2次ピークが観測されるという水文特性を持つが、その機構は十分明らかにされていない。つぎに、ヒル谷の河床形態はプールとシュートが連続した階段状河床形態である。河道に供給された土砂はプールを埋めながら、明確なフロントを形成して下流に流送される。平均河床勾配は15~45度程度であるが、階段状河床であるので局所勾配はそれより小さい。

(2) 土砂生産流出の実態

澤田の研究⁴⁾によると、ヒル谷流域での土砂生産は主に凍結融解作用によることがわかっている。凍結融解によって生産された土砂は融雪時に斜面全体にわたって不安定な形で残されているが、風などの作用により落下し、斜面下部に堆積することが流域調査によって観察された。斜面下部には積雪が残っているので、落下した土砂は写真-1のように残雪上に堆積する。したがって、融雪出水時土砂は流水にさらされないで流水はほとんど濁らない。融雪後、6月から7月の出水の前には、この土砂はそのまま斜面下部から溪床にかけて平均堆積深30~50cmで残っているが、出水期、そのほとんどが侵食され、階段状河床のプールに堆積しながら徐々に下流へ移動し、やがて堰堤に達する。堰堤では、毎年、4月から9月の間に人為的に排砂を行い、出水期前には堆砂のための容量が40~50m³程度確保されているが、通常、6月~7月の出水でほぼ満砂する。平均的に見ると、毎年生産された土砂は秋季までにほとんど全て堰堤に達し、堰堤を満砂させる。したがって、平均的にはヒル谷の土砂生産量は年間40~50m³となる。このように、土砂生産源から堰堤までの土砂移動のサイクルはほぼ1年で完結しているが、渇水年の場合、その年に生産された土砂が堰堤上流域に堆積したまま次年を迎えることもある。この場合、翌年降雨が多ければ、2年分の土砂が堰堤に運ばれ、堰堤が年に2回満砂することもある。

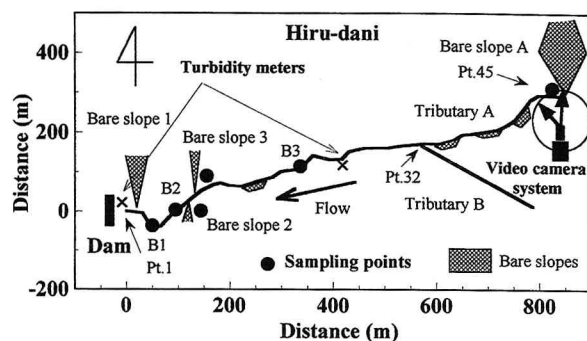


図-1 観測流域の平面図

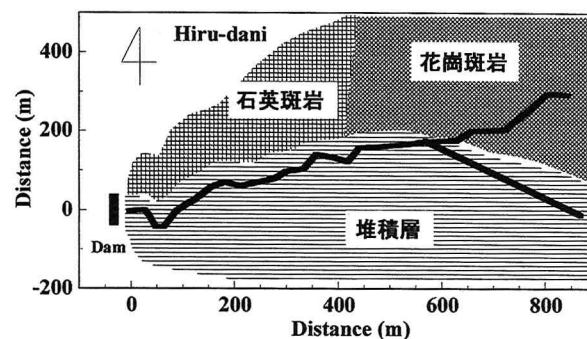


図-2 観測流域の地質



写真-1 2001年5月7日の裸地Aの様子

(3) 観測の概要

2000年4月に裸地A付近に観測所から遠隔操作できるビデオカメラシステムを設置し、裸地Aとその付近の河道の様子を連続的に撮影している。また、同年6月以降、堰堤とその400m上流付近において濁度の連続観測も行っている。流量は堰堤で連続的に測られており、雨量計は流域内に3箇所設置されている。また、河道のプールに堆積した土砂量の計測も毎年数回行っている。以上のような観測システムによって、雨量、流量、濁度の連続観測と裸地Aにおける表面流の発生、堆積土砂の侵食の様子、土砂および土塊の移動状況の録画が行われた。

3. 観測結果

(1) 生産土砂および濁度成分の粒度分布

流水に含まれる濁度成分の粒度分布、裸地斜面の構

成材料の粒度分布、溪床の堆積土砂の粒度分布は、濁度を指標として土砂動態を探ろうとする本研究では重要な情報となる。そこで、濁水の採水および裸地斜面の構成材料や溪床堆積物の採取を行って、各粒度分布を調べた。図-3は最上流の裸地Aで凍結融解作用により生産された土砂の粒度分布と裸地2,3の斜面構成材料の粒度分布を示したものである。花崗斑岩の裸地Aでの生産土砂と石英斑岩の裸地3の構成材料は0.1~20mmの砂礫からなり、2mm以上の粒径で裸地3の方が粗くなっている。未固結堆積層の裸地2の構成材料は他のものよりかなり小さい。ついで、濁水中の濁質は粒径が0.2mm以下のものからなり、それらは土砂生産源に5から10%含まれている。

図-4は図-1のB1,B2,B3地点のプールに堆積した土砂の粒度分布を示したものである。河床材料はその年に溪流に供給された土砂が観測区間を通過した後に、プール内に残留したものを採取したものである。生産土砂に5~10%含まれている0.2mm以下の成分はB1,B2,B3の河床材料にはほとんど含まれていない。図-5は2001年7月10日におけるプール内の堆積土砂量およびその中に含まれる0.2mm以下の粒子の存在割合を調べた結果を示したものである。横軸のPoint No.は堰堤から約20m間隔で付けられている。まず、堆積土砂量の流下方向の変化を見ると2つのピークが見られる。前年の2000年には降雨が少なく、生産された土砂の掃流砂成分は堰堤まで到達しなかった。下流側のピークはこの土砂が2001年の降雨で移動してきたものである。一方、上流側のピークは2001年に生産された土砂の堆積物である。図-5下図より、No.26より下流の堆積土砂に含まれる0.2mm以下の成分の割合は2%以下で、No.20の下流では全く濁度成分を含まないわけではないが、0%に近づいている。先に述べたように元々5~10%含まれていたとすると、土砂が移動するにつれてそこに含まれる0.2mm以下の濁り成分が減少したことになる。ただし、淀みの部分には0.2mm以下の成分が2~4%含まれており、これらが濁りの主要な生産源になるかどうかは今後の検討を要する。

(2) 1999年、2000年の土砂移動

以下で、1999年と2000年の濁度の流出特性を考察

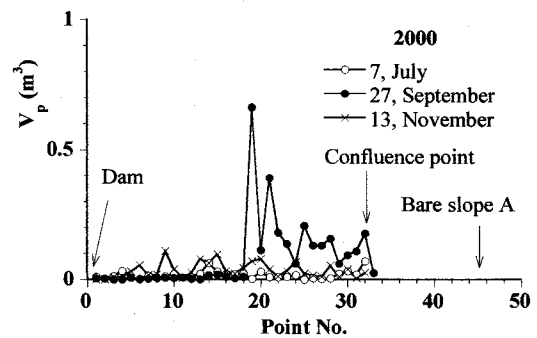
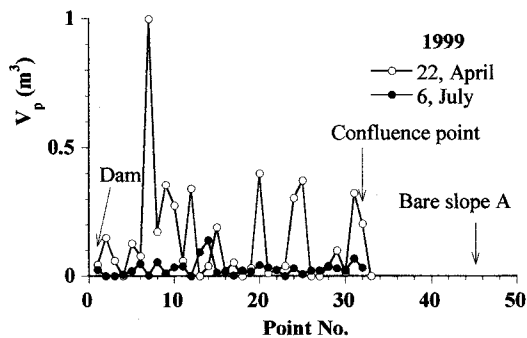


図-6 プール内の土砂堆積量

するので、その期間における河道内の土砂の移動状況について述べておく必要がある。図-6は1999年と2000年におけるプール内の堆積土砂量の分布を示したものである。1999年4月22日の融雪出水時にすでに堰堤

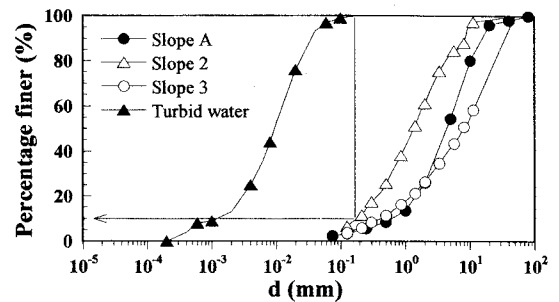


図-3 裸地斜面 A, 2, 3 および濁度成分の粒度分布

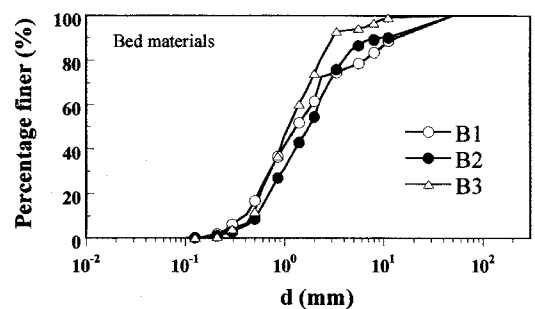


図-4 生産土砂移動後に残留したプール内の堆積物の粒度分布

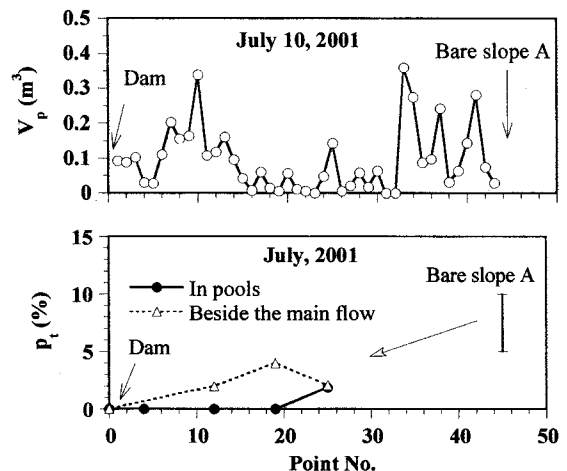


図-5 プール内の土砂堆積量および堆積物中に含まれる0.2mm以下の成分の割合

の直上流まで土砂が来ているのは前年の生産土砂である。7月6日には、5月～6月末までの出水によりプール内の土砂はかなり減少している。この時点で、この年の生産土砂もほとんど堰堤まで到達していることが流域調査からわかっている。2000年は降雨が少なく、この年の裸地Aの生産土砂は7月7日の時点でやっとNo.30付近に来ている程度である。また、このときNo.28付近より下流のプール内の堆積土砂量はほぼ0になっており、前年7月6日の時点でわずかに残っていた堆積土砂はさらに侵食され、その区間のプールは空の状態にある。2000年9月27日の時点では、その年に生産された土砂が裸地Aと試験堰堤の中間点にやっと到達し、11月13日には試験堰堤の近くまで到達している。しかし、流域調査によるとこの年の生産土砂は堰堤にまでは到達していない。

(3) 濁度の変化と土砂動態

堰堤地点では、2000年6月から10月まで濁度の自動計測が行われた。それに先立って、1999年にはいくつかの洪水時に手で濁度を計測した。その一例として1999年6月17日の観測結果を図-7に示す。時間雨量が10mm/hrを越える辺りから濁水が堰堤に達していることがわかる。図-8は2000年に発生した全ての濁水発生日の日最大時間流量と日最大時間雨量をこれ以外の日のデータと併せて示したものである。●が発生日のデータ、○が非発生日のデータである。流量は堰堤で計測されたもの、雨量はヒル谷流域内の3箇所計測されたもののうち最大値を示したものである。この図から、日最大流量が大きくても濁水が発生しない場合があるのに対し、日最大時間雨量が10mm/hrを超えると必ず濁水が発生していることがわかる。ヒル谷の特性として、日最大時間雨量=10mm/hrが濁水発生一つの指標となっていることは明らかである。流量が大きくても濁水が発生しない理由としては、堰堤地点の流水が堰堤直上流の左岸堆積層からの湧水による場合、移動土砂が湧水点より上流にあれば侵食されないこと、生産土砂のほとんどが堰堤に流入した後プールに残留している土砂は侵食されにくく、濁水のもとになる成分もほとんど存在しないことが考えられる。

図-7において、流量と降雨量のピークが1つしかないのに、濁度のピークは2つある。この理由の一つとして、上流で大きな土砂供給イベントが2回発生し、それに対応した濁度の増加があったということが考えられる。もしもそうであれば、濁度のモニタリングから土砂供給イベントの発生が推定できることになる。

つぎに、これらのデータから洪水時の濁度の履歴について見る。図-9は1999年5月27日および6月17日、2000年6月23日、7月15日、7月25日および9月11日の洪水について流量と濁度の関係を示したものである。流量がピーク値になるまでを●、それ以降

を○で示している。全ての洪水で流量と濁度の関係が右回りのループを描いており、増水期の方が同じ流量でも濁度が高い。また、流量に対する濁度の変化率

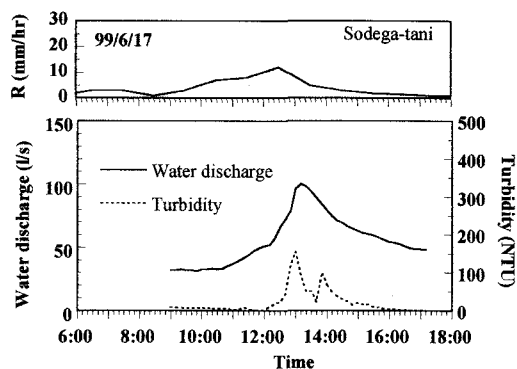


図-7 時間雨量、流量および濁度の時間変化

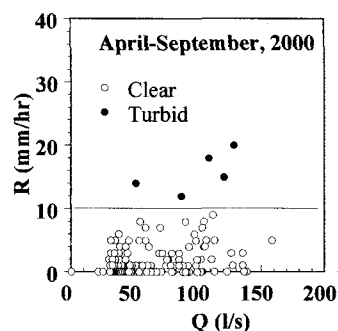


図-8 濁水発生非発生日最大流量と日最大時間降雨量

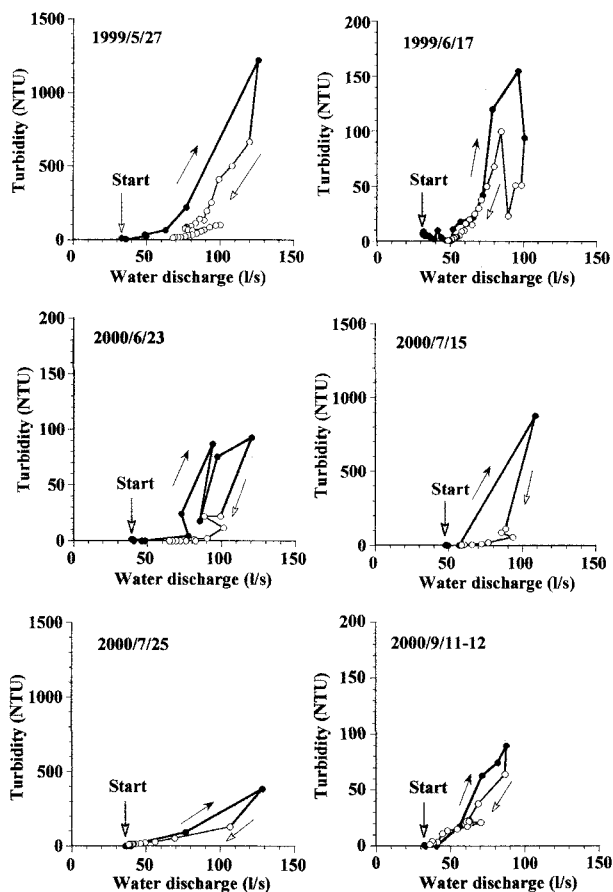


図-9 流量と濁度の履歴

も洪水ごとに大きく変化している。

図-9の2000年の結果について、土砂移動状況の調査結果を踏まえて考察する。図-6に示すように、1999年7月6日時点で河道のプールにはわずかし土砂が残されていないので、2000年の移動土砂はその年に生産されたフレッシュなものがほとんどで、それらは最初裸地A付近に堆積している。また、6月23日はこの年初めて濁水が発生した日で、裸地Aの堆積土砂が始めて移動した日である。この日の濁度変化を見ると、大きなループを描いているものの流量が増加しても濁度はそれほど増加していない。しかし、7月15日では濁度が急激に増加している。7月25日以降は再び流量に対する増加率が小さくなっていると同時にループも小さくなっている。裸地A付近の堆積土砂は強い降雨時のみ流水が生じる支川Aを流下し、その後、通常流水のある支川Bとの合流点から本川を流下する。7月7日の調査では合流点付近に土砂移動の先端が到達していることが確認されており、7月15日には土砂が合流点の上下流にあったと思われる。図-5で説明したように、河道堆積物に含まれる濁り成分は流下に伴って減少するが、合流点付近では濁度成分を多く含んでおり、本川流水による活発な土砂移動によって濁度が大きくなっている。それに比べて6月23日の堰堤地点の濁度が大きくないのは、裸地A付近で発生した濁水が支川Bの流水で希釈されたためと考えられる。その後、土砂移動とともに土砂に含まれる濁度成分が流出するので、結果的に7月25日以降濁度は大きくなっていない。図-10は1999年における流量と濁度の関係を洪水別に整理したものである。図-6に示すように土砂がほとんど移動してしまっていて、堰堤上流にわずかし土砂が残っていない6月30日では、流量が非常に大きくなければ濁度は大きくならないことがわかる。

土砂がまだ支川A内にあるときは、流水は強い降雨中に生じるので、土砂の侵食は洪水初期に生じ、濁度も大きくなるが、降雨後の流量減水期には支川Aには流水が少なく侵食も進まず、その結果濁度も小さい。そのため大きなループを描く。しかし、堰堤に近づくにつれて本川流量に大きく支配されるようになりループが小さくなる。すなわち、土砂が上流にあればあるほど大きなループになる。ループを描くもう一つの原因は降雨イベントに遅れて流出する左岸堆積層からの湧水の存在にある。1999年5月27日および6月17日はそれぞれ2000年7月15日および7月25日と同じような土砂移動状況にあったと推察される。

以上のように、堰堤で観測される洪水中における濁度の履歴ループの大小および流量に対する濁度の増加率は堰堤上流での土砂動態の定性的な特徴とよく対応しており、このような特性を知っていれば、濁度観測から上流の土砂動態の状況を推測することが可能であると考えられる。

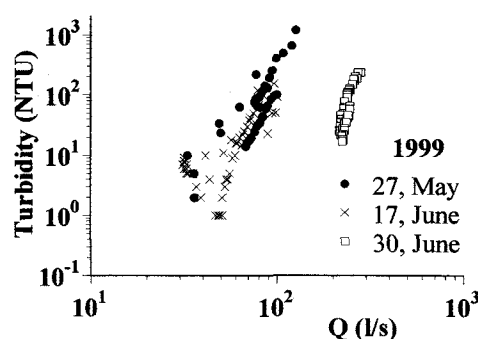


図-10 流量と濁度の関係

4. 土砂供給イベントと濁度変化

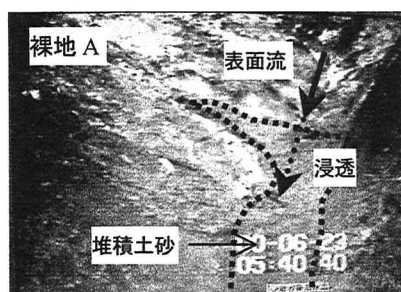
(1) ビデオ観測結果

図-7の2つの濁度のピークは上流での土砂供給イベントに対応していると推測したが、その実態はわからない。そこで、2000年6月から裸地Aとその付近の溪流の様子をビデオカメラで撮影し、降雨時にこの土砂供給源と溪流でどのような土砂動態イベントが起こっているのかを観測し、それらと堰堤で観測される濁度変化との対応について検討する。

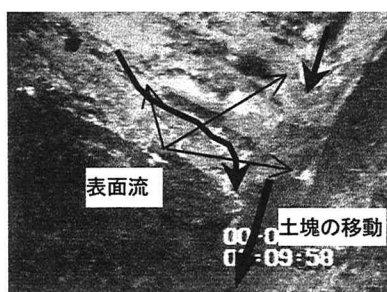
6月23日に裸地A付近の降雨状況、裸地斜面における表面流の発生、それに伴う斜面下部および溪床上に堆積した土砂の侵食現象がビデオ撮影された。写真-2(a)は当日の5時40分における裸地A下部を写した一コマである。土砂堆積物は線で囲まれた部分である。降雨は間欠的に強くなったが、強くなると写真-2(b)のように堆積物の向かって左側に表面流が発生し、側岸が活発に侵食された。

溪床堆積物には上流からの流水が供給されるが、6時8分ごろまでは全て浸透して表面流は発生していない。しかし、流入流量が大きくなる6時8分を過ぎると写真-2(b)に示されているように、左岸側に表面流が発生し、土砂が土石流のような形態で移動した。その後、6時9分から10分に堆積土砂が土塊として移動し、その後、左岸側に水みちができ、6時20分ごろまで土石流状態で土砂が流下している。また、6時49分から、堆積土砂の上流右岸側から下流左岸側を流れる流路が発達し、堆積土砂は側岸侵食され、堆積物は写真-2(c)のようになった。

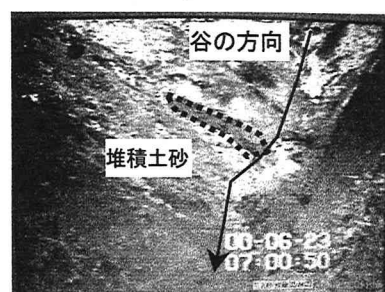
下流の渓流水は6時8分ごろまでは濁りがなかったが、堆積土砂の侵食が始まる6時8分ごろから濁り始め、侵食が活発になる6時12分ごろから濁りが強くなり始めた。裸地Aの下部で土塊の移動や土石流の発生が見られた6時10分から13分の後、6時23分にはじめて土石流が河道を下った。6時51分にも再び土石流が発生している。6時23分に発生した土石流の流下の様子を写真-3に示す。



(a) 5:40:40



(b) 6:09:58



(c) 7:00:50

写真-2 表面流の発生と堆積土砂の滑動

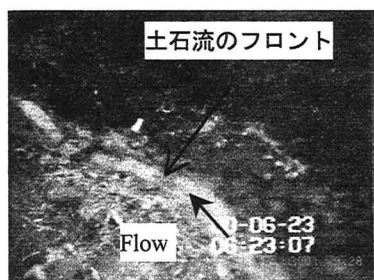


写真-3 溪流を下る泥流 6:23:07

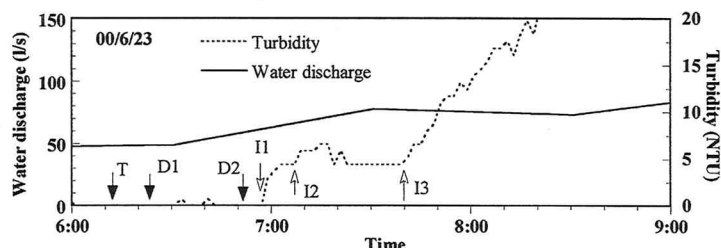


図-11 裸地 A での土砂移動と試験堰堤での濁度変化

(2) 濁度の時間変化と土砂供給イベント

上記のビデオ撮影中、約 1km 下流の堰堤で濁度の連続観測が行われた。図-11 は 6 時から 9 時までの堰堤地点の濁度と流量を示したものである。濁度が大きくないのは前述したように支川 B の流水による希釈によると考えられる。裸地 A 付近では、6 時 12 分ごろ (T) から濁りが強くなり始めているが、図-11 によると堰堤ではそれから 45 分くらい遅れて濁度の上昇 I1 が見られる。その後、6 時 23 分ごろ泥流 (D1) が河道を下った。この泥流の発生に伴うと思われる濁度の上昇 I2 は、約 45 分後ダム地点で観測されている。さらに、同様な現象が起こり、6 時 51 分に再び泥流 (D2) が発生している。この泥流による濁度の上昇 I3 は 47 分後ダム地点に現れている。ところで、山地溪流における濁りの伝播は階段状河床のプールによって遅延される。堰堤の下流で 6 月 23 日とほぼ同じ流量の 500 l/s のとき、濁りの伝播実験を行った。その結果によると、濁りの伝播速度は 30 cm/s 程度であった。ダムの上流でもこれと同じ速度で伝播したとすると、裸地 A 付近からダム地点まで濁りが到達するのに約 50 分かかることになり、前述したような裸地 A での濁りや泥流の発生時刻とダム地点での濁度の上昇時刻のずれが説明できる。このように、下流の濁度の変化と上流の土砂供給イベントがよく対応している。

5. おわりに

本研究では、濁度を指標とした山地河川の土砂動態のモニタリング手法を開発するために、流域面積 1 km² 程度の実山地小河川流域での土砂動態と濁度変化につ

いて観測した結果を述べた。得られた主な結果を列挙する。

- (1) 上流の土砂供給源における土砂移動現象に対応して下流側の濁度が敏感に変化する。
- (2) 洪水時の濁度の履歴から土砂移動の状況が推測される。すなわち、流量に対する濁度の増加率が小さいが大きなループのときには生産土砂が移動し始めた段階にある。増加率、ループともに大きいときは生産土砂が活発に移動している状態に対応し、堰堤に近くにつれて、小さいループで増加率も小さくなり、ほとんどの土砂が流出してしまうと、濁度の増加率は極めて小さくなる。
- (3) 下流で観測される濁度の変化は土砂供給過程や移動過程の結果を的確に表現しており、また、場の変化にもよく対応していることから、土砂動態の指標として有効である。

謝辞：本研究の観測は京都大学防災研究所技官志田正雄氏、同大学院農学研究科大学院 2 回生の太野哲君の協力を得て遂行された。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 本郷國男：姫川における流砂系土砂モニタリング，砂防学会誌，Vol. 53，No. 6，p. 77-81，2001。
- 2) 仲野公章，笹原克夫：流砂の計測—今，なぜ流砂の計測か—，砂防学会誌，Vol. 54，No. 1，p. 90-97，2001。
- 3) 浦真，下井田実，有澤俊治，横山康二，浜名秀治：与田切川における流砂の計測—流砂系モニタリングのために—，砂防学会誌，Vol. 54，No. 3，p. 81-88，2001。
- 4) 澤田豊明：山地流域の土砂流出に関する研究，京都大学学位論文，1985。

(2002. 9. 30 受付)