

インターバルカメラを用いた 山地河川での多地点連続観測による 支流間での濁り発生状況の違いの把握： 渡良瀬川上流の事例

UNDERSTANDING DIFFERENCES IN TURBIDITY DEVELOPMENT AMONG
TRIBUTARIES BY CONTINUOUS MULTI-POINT OBSERVATION IN A
MOUNTAIN RIVER USING AN INTERVAL CAMERA: A CASE STUDY OF THE
UPPER REACHES OF THE WATARASE RIVER

平岡 真合乃¹・内田 太郎¹・川上 愛生¹・杉田 毅²・関根 峻³

W.A.K.S. ARIYAKUMARA⁴・Emilia TANAAMI⁴・Suneth NERANJAN⁴・一倉 夏帆⁴

Marino HIRAOKA, Taro UCHIDA, Ai KAWAKAMI, Takeshi SUGITA, Ryo SEKINE

W.A.K.S. ARIYAKUMARA, Emilia TANAAMI, Suneth NERANJAN and Kaho ICHIKURA

¹筑波大学生命環境系 (〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1)

²国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所 (〒326-0822 足利市田中町 661-3)

³一般財団法人砂防・地すべり技術センター砂防部 (〒102-0093 千代田区平河町 2-7-5)

⁴筑波大学大学院理工情報生命学術院 (〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: hiraoka.marino.fu@u.tsukuba.ac.jp

Key Words: turbidity, mountain river, tributary, continuous multi-point observation, time-lapse camera

1. 研究背景

流域や沿岸域での土砂の流れによって発生する問題は、土砂災害の発生のみならず、堆砂によるダム容量の減少、取水施設の機能低下、河道の樹林化、海岸侵食など多岐にわたる¹⁾。これらの問題を解決するためには、山地から沿岸域に至るまでの流砂の実態を把握することが必要不可欠である。また、山地域では、大規模な土砂生産により、様々なタイムスケールで土砂動態が大きく変化すると考えられている²⁾。さらには、近接する山地小流域であっても、土砂の流出状況が流域ごとに大きく異なることが示されている^{3), 4)}。したがって、山地上流域の土砂動

態を把握するためには、比較的高い時間分解能での多地点、連続的な観測を実施することが望ましいと考えられる。

山地河川における流砂観測手法として、掃流砂については音響式掃流砂量計や掃流砂観測ピット、浮遊砂については濁度計などが挙げられる⁵⁾。いずれも連続的な定量観測がある程度可能であるが、設置や維持管理に時間と労力と費用が必要である。また、計測には流水や土砂と機器が直接接触していなければならないことから、特に出水規模が大きい場合、計測不可となる場合が発生し得る。そのため、土砂流出が活発な山地流域で多地点の連続観測をすることは難しい場合が多い。

非接触計測が可能な手法の一つとして、画像解析が挙げられる。近年、画像解析を用いた河川水位の監視技術が活用されている。例えば、国土交通省が全国の河川に設置している CCTV カメラ等を活用し、ライブカメラ画像を提供するだけでなく、画像認識型 AI で自動的に水位を判定する技術などがある。山地河道でも CCTV 等の映像データを用いて水位変化や濁りの発生といった流況変化の検知が試みられる⁹⁾など、水・土砂流出現象を把握するために画像の活用が進められている。現状、CCTV カメラ等の設置場所は限定的であるが、導入や設置、維持管理のコストが比較的低いインターバルカメラが多数、市販されている。これまでに、山地斜面での地表面の状況に関する季節変化を連続観測する手法⁷⁾や山地河川での濁度推定手法⁸⁾として、市販のインターバルカメラが活用された事例がある。したがって、インターバルカメラを活用して高時間分解能で撮影した河道の画像を解析することで、山地河川における水・土砂流出の状況に関して、多地点での連続的な観測を実施できる可能性が考えられる。

そこで、本研究では、土砂流出のうち、河川の濁りに焦点を当て、導入や設置、維持管理のコストが比較的低い市販のインターバルカメラを用いて流域内で多地点連続観測を行った。そして、取得画像の判読結果から、山地上流域の水位上昇や濁りの発生の有無について支流ごとに把握する手法の有効性について検討した。

2. 研究方法

(1) 研究対象流域

本研究の対象流域は、渡良瀬川上流域（栃木県日光市足尾町から群馬県みどり市大間々町に至る領域）である（図-1）。本流の流路長はおよそ 44.5 km、平均河床勾配は 1/37 程度である。流域の最高点は皇海山で標高 2,144 m であり、下流端は標高 205 m である。

地質は足尾町付近には石英斑岩や流紋岩、草木ダム付近には花崗岩、その周辺にはホルンフェルス化した砂岩・頁岩類が分布している⁹⁾。足尾山地は中・古生界の堆積岩（主にチャートと砂岩・頁岩）で構成されている⁹⁾。流域の右岸側の上流付近や流域の出口付近には、皇海山や赤城山から供給された安山岩や溶岩、火砕岩などが分布している（図-1）。

草木ダムの貯水池への堆積土砂は、例外はあるものの大規模な出水時に供給され¹⁰⁾、上流側で一定以上の降雨規模になると土砂生産が活発化すると考え

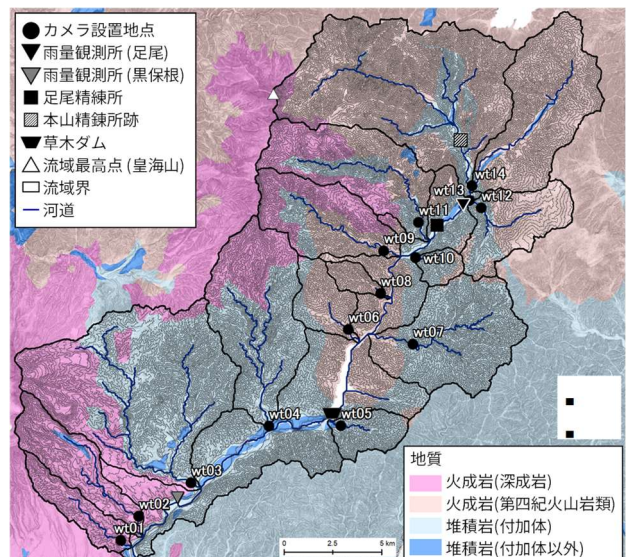


図-1 対象流域の地質および地形の概況と、カメラ設置地点 (wt01~wt14) および雨量観測所の位置図。

られている⁹⁾。草木ダムより上流の河床材料の粒径は地質分布が強く反映されている¹⁰⁾。草木ダムでは、降雨時に貯水池（1976年貯水開始）の基準貯水位を上回る恐れがある場合、事前放流を行うことがあり、ダムより下流では、その影響を反映した水位および濁りの変化が生じる場合がある。ただし、本研究の対象期間内に草木ダムからの放流は確認されなかった。

対象流域では、足尾精錬所や本山精錬所跡周辺の荒廃山地斜面などからの土砂生産が活発である¹¹⁾。また、1947年9月カスリーン台風、1948年9月アイオン台風、1949年9月キティ台風、1972年9月ヘレン台風などにより、斜面崩壊や土石流などの土砂災害が発生した¹¹⁾。その際に発生した不安定土砂が流域内に分布していると考えられており、その再移動などによる被害を防ぐために直轄砂防事業が行われている。

2014年から2023年の近傍の気象観測所における年平均気温は $15.5 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ （桐生）、平均年降水量 $1736 \pm 200 \text{ mm}$ （足尾）である。年降水量のうち6月から9月の合計降水量が約 58% を占める。

(2) 現地観測

対象流域内の支流 14 地点に 15 台のインターバルカメラ (HC-MINI301, SUNTEK) を設置した (wt11 に 2 台設置)。wt13 のみ、松木川と神子内川が合流後の渡良瀬川本川に設置した。各支流の地質、流域面積、流域の平均勾配は表-1 に示した。各支流のカメラ設置地点より上流の流域面積は、支流の総流域面積の 78.7% (wt07) ~ 99.9% (wt13) である。カメラは、河道の様子が見えるように堰堤の袖天端やガードレールなど

表-1 カメラを設置した支流の流域諸元. 流域面積の上段および下段の値は、本川と支川の合流点より上流の流域面積、カメラ設置地点より上流の流域面積をそれぞれ表す.

カメラ設置地点 下段は支流名	主な地質	流域面積 (km ²)	流域の 平均勾配 (°)
wt01 深沢川	深成岩	9.02 7.53	24.22
wt02 川口川	深成岩	15.97 14.61	23.96
wt03 小黒川	付加体 深成岩	68.29 67.97	25.98
wt04 小中川	付加体 深成岩	36.27 36.21	30.40
wt05 柱戸川	付加体	7.33 6.53	33.46
wt06 押手川	第四紀火山岩類 付加体	9.28 8.91	29.85
wt07 黒坂石川	付加体 第四紀火山岩類	31.96 25.16	32.17
wt08 楡沢川	第四紀火山岩類	3.33 3.22	33.13
wt09 餅ヶ瀬川	深成岩 第四紀火山岩類 付加体	22.15 19.29	31.81
wt10 薙ノ沢	付加体 第四紀火山岩類	3.58 3.51	31.58
wt11 庚申川	深成岩 第四紀火山岩類 付加体	28.49 25.64	31.32
wt12 内ノ籠川	第四紀火山岩類 付加体	16.84 15.92	22.97
wt13 渡良瀬川	第四紀火山岩類 付加体	101.71 101.63	32.34
wt14 神子内川	第四紀火山岩類	34.06 33.87	28.91

に固定し、データ回収時には画角が極力変わらないようにした。

画像の取得は4:00から20:00まで5分間隔で行った。光源は設置せず、自然光による撮影を行ったことから、時季によらず7:00から17:00まで、色の変化が分かる画像が取得できた。観測期間は地点によって多少異なるものの、2023/9/4～12/7である。

(3) 画像の判読

画像の全体的な傾向を把握するため、全ての取得画像を目視により確認し、河道内で何らかの変化が生じた場合の情報を表にまとめた。確認作業は4名で分担して行った。任意の地点についてまとめた期間を1人が担当し、同じ地点でも期間が異なれば別の人が担当することもあった。そのうえで、すべての地点の画像を1人が一貫して再確認した。

画像の確認に際しては、図-2のように河道内で



図-2 河道内での水位上昇、濁りの判定画像 (wt14).

の水位および河川水の色（濁り）の2項目について変化の有無を把握した。ここでは、濁りがなく水位上昇のみ発生した場合は「水位上昇発生」、水位上昇がなく濁りのみ発生した場合は「濁り発生」、水位上昇と濁りの両方が発生した場合は「水位上昇および濁り発生」とした。また、水位上昇、濁りの発生と降雨の対応も把握した。日雨量が記録された日から連続的に河道内で変化が生じた場合は「降雨に対応した変化」と判断し、前日および当日に日雨量が記録されていないにもかかわらず変化が生じたものは「降雨に非対応の変化」とした。

河道内で水位上昇や濁りが発生した場合は、その開始および終了時刻を記録した。ただし、水位上昇と濁りの両方が発生した場合の時刻の記録は、濁りの発生を優先した。水位上昇は水面と河道内の出水により動かない礫などの位置関係や堰堤の水通しからの落水状況から判断した。濁りは基本的に河川水の色の変化に基づいて判断したが、水位上昇や水面への雨滴衝突に伴う波紋による状況変化と区別する際、河床が見えるかを追加条件とした。カメラのレンズに雨滴が付着している、夜間や日陰になっている、遮蔽物がある、対象物との距離が遠すぎる、色の変化が微妙である場合等は、画像の判読が困難であった。画像が取得されていない、もしくはタイムスタンプがおかしい場合は欠測扱いとした。また、水面での光の反射などにより河道内の状況がほとんど分からない画像は判読しなかった。

(4) 降雨の発生状況

本手法では夜間の状況は観測できないため、河道内の状況を確認できる降雨イベントは限定される。そこで、流域近傍の気象観測点における日雨量、最大時間雨量およびその発生時刻を調べた。

対象流域内には雨量観測所が13か所あり、全体的には量的にも時間的にもおおむね類似した降雨が観測されていた（観測所によっては11/1以降は閉局）。しかしながら、上流側と下流側で降雨量が大きく異なる期間（9/19～23）もあった（図-3）。そこで、上流側の足尾観測所における観測データを中心

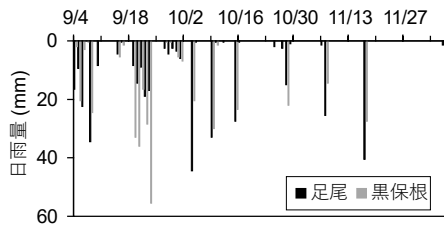


図-3 足尾観測所（上流）と黒保根観測所（下流）における観測期間中の日雨量。

表-2 観測期間中に発生した代表的な降雨イベント（足尾観測所）。

日付	日雨量 (mm)	最大時間雨量 (mm)	最大時間雨量の発生時刻
9/4	16.5	5.5	22:36
9/6	22.5	15.5	11:47
9/8	34.5	7.5	10:52
9/20	14.5	9.5	22:25
9/21	19.0	10.5	22:18
9/23	17.0	4.0	1:14
10/4	44.5	8.0	8:45
10/9	33.0	5.5	8:37
10/15	27.5	5.5	8:29
10/28	15.0	5.0	8:50
11/7	25.5	11.0	8:42
11/17	40.5	7.5	6:38

に使用し、下流側の黒保根観測所の観測データも補足的に使用した（図-1）。いずれの観測所でも欠測期間は含まれなかった。

足尾観測所における月別降水量は、9月が177.5 mm、10月が133.5 mm、11月が67.5 mmであった。観測日数95日のうち、1 mm以上の日雨量が観測されたのは27日であり、そのうち日雨量10 mm以上の降雨は12回発生した（表-2）。黒保根観測所における月別降水量は、9月が233.5 mm、10月が104.5 mm、11月が42.0 mmであった。観測期間中に日雨量10 mm以上の降雨が13回発生し、期間最大日雨量は55.5 mm（9/23）であった（図-3）。

3. 結果および考察

(1) 取得画像の一例

観測期間中の取得画像のうち、9/8の降雨時に濁りが発生した様子を図-4に示した。ここでは、足尾観測所から直線距離で約1.3 km離れたwt12における画像を一例として示した。

降雨は5:00から記録されたが、河道内の様子にはほとんど変化が見られなかった。その後10:00と11:00に時間雨量の最大値が記録され、11:00頃から河川水の色が変化し、濁っている様子が撮影された。そして、濁りは17:00まで継続したことが確認されたが、18:00以降は日暮れにより状況を確認できな

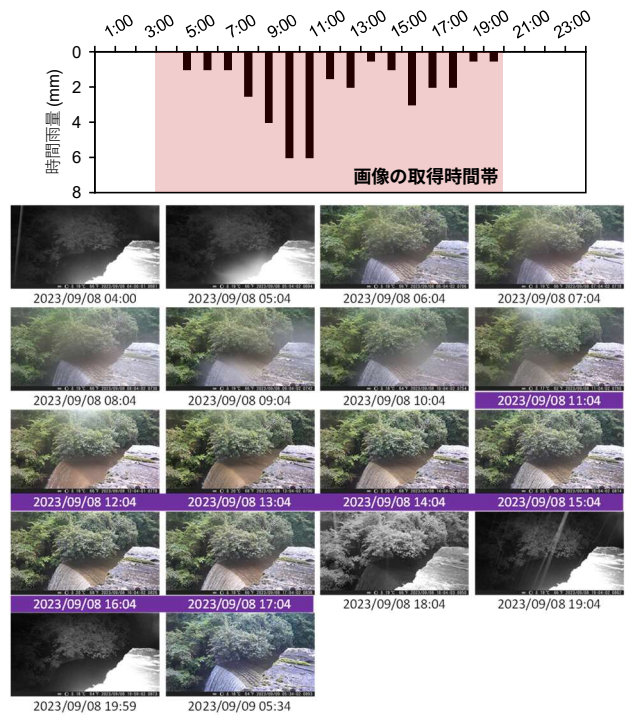


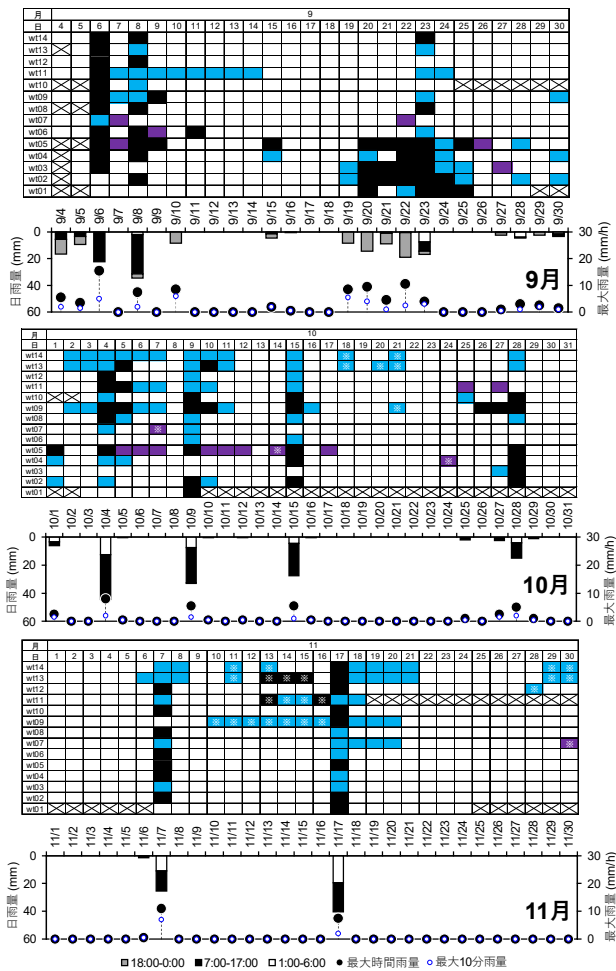
図-4 9/8の時間雨量（足尾観測所）と1時間ごとの河道の様子（wt12）。紫塗は濁りが確認されたことを表す。

かった。翌日の日の出以降の画像を確認したところ、濁りは確認されなかった。

(2) 降雨に対する支流の応答

観測期間中の5分ごとの取得画像を全て判読し、カメラを設置した全地点の水位上昇と濁りの発生状況を図-5にまとめた。12月はほとんど降雨がなく、いずれのカメラ設置地点における河道内の様子にもほとんど変化がなかったため、掲載を省略した。

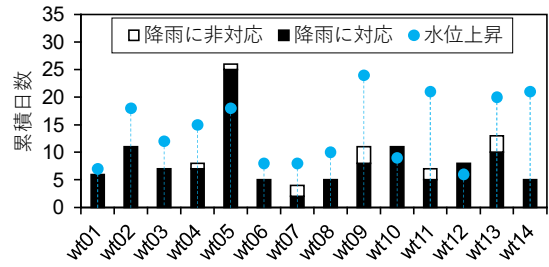
水位上昇、濁りの発生は、降雨に対応しているものと非対応のものがあつたが、ほとんどの地点で降雨に対応した変化が生じていた。足尾観測所において日雨量が1~5 mmと比較的少なく、最大時間雨量や最大10分雨量が3.0 mm以下と小さい場合、河道内の変化が発生する地点は1~3か所と限定的であり、降雨が発生した翌日には変化が収まる傾向がみられた（降雨発生日：9/15, 9/27, 9/28, 9/30, 10/1, 10/25, 10/27, 11/6）。9/10の夜間（18:00~0:00）には、足尾観測所で日雨量8.5 mm、最大時間雨量が8.5 mm、最大10分雨量が6.0 mmと短時間に比較的強い降雨が記録され、wt06では翌日の日の出以降の画像で水位上昇および濁りの発生を確認した。一方、足尾観測所において日雨量が15.0 mm以上と多く、最大時間雨量や最大10分雨量が比較的大きい場合、ほとんどの地点で河道内の変化が発生してお



図一五 河道内での濁りおよび水位上昇の発生状況と足尾観測所における日雨量および最大時間・10分雨量。黒塗りが濁りおよび水位上昇、紫塗りが濁りのみ、青塗りが水位上昇のみをそれぞれ表す。降雨に非対応の河道内の変化には※印を付した。×は欠測を表す。

り、場所によっては降雨停止後も水位上昇や濁りが数日間継続することもあった（降雨発生日：9/6, 9/8, 10/4, 10/9, 10/15, 10/28, 11/7, 11/17）。これらのことから、降雨の広がり、量、強度に対応した水位上昇や濁りが発生した可能性が考えられる。

9/19～23にはまとまった降雨が観測されたが、河道内の様子は地点により異なっていた（図一五）。草木ダムより上流側（wt06～14）の大部分では、22日まで河道内の様子に変化は見られず、水位上昇や濁りが発生した場合も1～2日程度で終了した。wt10, 12では降雨期間中を通して河道内に変化は生じなかった。一方、wt01～05では19日や20日から水位上昇や濁りが発生した地点が確認され、23日以降は最長で26日まで変化が継続した。期間内の連続雨量は、足尾観測所で68.0 mm、黒保根観測所で169.5 mmであった。また、最大時間雨量は黒



図一六 河道内で濁りと水位上昇が発生した累積日数。白塗と黒塗りの棒グラフは無降雨日、降雨が生じた日に濁りが発生した日数を表す。

保根観測所で9.0～29.5 mmであり、足尾観測所（4.0～10.5 mm）よりも強い降雨が記録された。このことから、降雨に対する支流の応答が流域の上部と下部で大きく異なったことは、流域内で期間降雨の総量および強度が大きく違っていたことと関連している可能性が考えられる。

一方、降雨に非対応の河道内の変化が発生した地点は限定的ではあるが、いくつかの支流でみられた（図一五）。カメラ設置地点近傍の11か所の雨量観測点における降雨記録を参照し、河道内の変化が発生した日には雨量が記録されていないことを確認した。ほとんどの場合、無降雨時の濁りの発生期間は5分から数十分程度であった。このような変化が生じた明らかな要因の一つは、河道内を人が移動することにより一時的な濁りが生じる場合であったことを、取得画像から確認した。

(3) 支流ごとの濁りの発生状況の違い

観測期間中の水位上昇および濁りが発生した累積日数について、カメラを設置した全地点で比較した（図一六）。水位上昇の累積日数は、降雨に対応した濁りおよび水位上昇が発生した日と水位上昇のみ発生した日の合計とした。

降雨に対応した濁りの発生日数はほとんどの地点で11日以下であったが、wt05では25日と最多であった（図一六）。wt05における水位上昇の発生日数は18日であり、濁りの発生日数よりも少なかった。また、降雨発生日の翌日以降に水位は低下したが、濁りだけが継続する場合があった（降雨発生日：9/6, 9/8, 10/4, 10/9）（図一五）。濁りの発生日数が比較的少ない（5日以下）支流の流域面積は3.33～34.06 km²であり、流域の平均勾配は28.91～33.13°であった。一方、wt05を含む濁りの発生日数が6日以上だった支流の流域面積と流域の平均勾配は3.58～101.71 km², 22.97～33.46°であり、前者と後者の間に大きな違いはなかった（表一）。そこで、Google Earthで2018年5月と2022年5月の空中写

真を比較したところ、wt05 より上流側の河道沿いの複数箇所に、崩壊地が分布していることを確認した。直接的な因果関係についてはより詳細な検討が必要であるものの、上流域では濁りの発生源となりうる河川に近接した崩壊地が多く存在するため、水位低下後も濁りが継続するなど、他の支流よりも濁りの発生日数が多かった可能性が考えられる。

一方、ほとんどの支流では、濁り発生よりも水位上昇の発生日数が多い傾向がみられた（図-6）。特に wt07, 09, 11, 14 では、水位上昇の発生日数が濁りの発生日数の3倍以上と多かった。Google Earth で2018年5月と2022年5月の空中写真の比較によれば、wt07 では伐採跡地と考えられる裸地、wt09 では地すべりによると考えられる小規模な裸地が流域内に出現していたが、その場所はいずれも河道から離れた斜面上であった。wt11, 14 では、2時期で地表の被覆状態に大きな変化は見られなかった。こうした支流では、降雨の際に水位は上昇しやすいものの、濁りの発生源が河床や溪岸に少ないため河川水が濁る頻度は低い可能性が考えられる。

以上のように、河川水の水位上昇や濁りが発生する日数は支流ごとに異なっていることが示され、降雨時に水位上昇が発生しやすい支流と濁りが発生しやすい支流を把握できることが分かった。このことは、降雨に対する山地河川の水・土砂流出の応答のしやすさを支流単位で把握できる可能性を示している。

4. まとめと今後の展望

山地河川の支流ごとの水位上昇や濁りの発生の有無を把握するため、市販のインターバルカメラを用いた多地点、高頻度の観測を行い、取得画像を判読した結果、以下のことが分かった。

- ・ 取得画像を目視で判読することにより、日中に限っては、降雨規模が小さく、一部の流域のみで発生する水位上昇や濁りを把握できる場合があることが分かった。
- ・ 山地流域における降雨時の水位上昇や濁りの発生といった降雨流出応答の違いを、支流単位で把握できる可能性が示された。

本研究から、本手法は、水位、濁りに関して定性的ではあるものの、多地点で連続的な観測が可能な手法であることが確認された。そして、山地河川のような一般的に観測が難しい場所における流砂観測手法の一つとしての有効性を示すことができた。今後は、水位上昇や濁りの発生と流域内の降雨分布や

支流の地質・地形的な特徴との関連についてより詳細に分析するとともに、画像判読の効率化や情報の定量化に向けてさらなる研究が必要である。

参考文献

- 1) 水山高久：流砂系における土砂動態と土砂管理そして砂防，土木学会論文集，No. 754，II-66，pp. 1-8，2004.
- 2) 泉山寛明，内田太郎，松本直樹：大規模土砂生産後の中長期的な土砂動態の把握，土木技術資料，60巻，12号，pp. 8-11，2018.
- 3) 田村圭司，小菅尉多，内田太郎，永田葉子，小杉賢一朗，水山高久：六甲山系における山地河川の浮遊砂の計測と特性，砂防学会誌，71巻，1号，pp. 3-14，2018.
- 4) 對馬美沙，内田太郎，山越隆雄：地形，地質および降雨条件が類似した山地流域からの豪雨による流出土砂量の空間的分布特性，砂防学会誌，73巻，3号，pp. 25-34，2020.
- 5) 岡本敦，内田太郎，鈴木拓郎：山地河道における流砂水文観測の手引き（案），国土技術総合研究所資料，第686号，2012.
- 6) 五十嵐和秀，水谷佑，木下篤彦，井深真治，肥後明豪，池島剛，秋田寛己，水野秀明：画像のRGB空間における濁水の立体分布と3次元ベクトル空間モデルを用いた流況変化検知手法の基礎的検討，砂防学会誌，71巻，6号，pp. 28-34，2019.
- 7) 平岡真合乃，五味高志，内山佳美：インターバルカメラを用いた連続観測による山地斜面の林床被覆の季節変化の把握，砂防学会誌，66巻，1号，pp. 42-48，2013.
- 8) 鈴木準平，中野大助，野田晃平：機械学習を用いたインターバルカメラ画像解析による濁度推定手法の提案，土木学会論文集 G（環境），78巻，5号，I_263-I_269，2022.
- 9) 小玉芳敬，池田宏，伊勢屋ふじこ：渡良瀬川における粒径別岩種構成比の縦断的变化—沖積礫床河川における礫の破碎・摩耗効果の重要性—，筑波大学水理実験センター報告，No. 13，pp. 13-25，1989.
- 10) 池田宏，伊勢屋ふじこ，小玉芳敬，太田明雄，高島順子，宮本幸治：渡良瀬川の草木貯水池における堆砂の地形と堆積物，筑波大学水理実験センター報告，No. 9，pp. 1-13，1985.
- 11) 中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会：1947カスリーン台風報告書，https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeisho/rep/1947_kathleen_typhoon/index.html，2010.

(2024. 5. 31 受付)