

流木動態の解明手法の提案とH27年連携排砂時 における黒部川下流域への適用

PROPOSAL OF CLARIFICATION METHODS OF DRIFTWOOD REGIME AND
THOSE APPLICATION FOR THE LOWER KUROBE RIVER IN 2015

手計太一¹・佐々木謙吾²・角哲也³・竹門康弘³・サメ カントシュ³・
小林草平³・藤田士郎⁴・森田賢治⁴

Taichi TEBAKARI, Kengo SASAKI, Tetsuya SUMI, Yasuhiro TAKEMON, Sameh KANTOUSH,
Sohei KOBAYASHI, Shiro FUJITA, Kenji MORITA

¹正会員 博(工) 富山県立大学大学院准教授 工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

²正会員 学士 富山県土木部 (〒930-8501 富山県富山市新総曲輪1-7)

³正会員 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴非会員 国土交通省北陸地方整備局 黒部河川事務所 (〒938-0042 富山県黒部市天神新173)

The purpose of this study is to clarify driftwood regime in the lower Kurobe River. First, driftwoods were traced with GPS and IC tag during flushing. Results of the observation showed that it was estimated that 74% of the whole driftwood with GPS and IC tag stopped in the river, and driftwoods which are shorter, thinner, and lighter tended to drift longer. Next, by aerial shoot with UAV, it was shown that many driftwoods existed along with channel after flushing. Also, DEM data was built from aerial shoot with UAV to find driftwoods. Third, numerical models showed driftwood regime. The results of the calculation showed that the place which water level did not rise and the place where were no driftwood corresponded.

Key Words : Driftwood, GPS, UAV, cooperative sediment flushing, the Kurobe River

1. はじめに

流木災害は世界各国で多発し、甚大な被害をもたらしている。上流域では斜面崩壊や土石流の発生に伴い流木が発生し、ダム貯水池に大量に流入することで、ダム施設・機能への損傷を引き起こす。さらに、下流域や中流域でも河岸や中州の河畔林が流木化し、その堆積による橋梁等河川構造物の破壊や、それに伴った洪水や氾濫の拡大が生じている¹⁾。しかし、現在の流木管理方法は、各河川で発生時期毎に現場で検討、対応しているに過ぎず、体系化された管理方法の開発が急務である。

流木災害を抑制するためには、河道における流木動態の解明は極めて重要である。鈴木ら(2004)は沙流川での流木の挙動について調査し、河畔性樹種の流木が全体の20%を占めていることを示した。さらに、研究対象であった2003年台風10号のような、計画高水位、ダム設計洪水流量を超越する記録的な出水では、河畔林は流木の

発生源であると共に、流木を捕捉する役目も有しているが、その一方で発生回数の多い中小洪水では、流れを低水路中心寄りへと向けると共に洪水を減勢させ、水衝部では河岸保護の役目を果たしていることを示した²⁾。また、赤堀ら(2015)は北海道内のアブシトエナイ橋を対象に、橋梁上に設置されたビデオカメラを用いて、出水時の局所的な流木の流下機構の検討を行った。その結果、対象とした河道の横断面において、流木が集中する箇所は流木のサイズと流量ハイドログラフの変動によって変化するということが示された³⁾。しかしながら、流木の連続的またはマクロ的な動態に関する研究はほとんどされておらず、さらに、土砂の発生に伴い流木の発生が多いと考えられる急流河川における流木動態の研究もほとんどされていないのが実情である。

以上を鑑み、本研究では連続的かつマクロ的な流木動態を解明する手法を提案し、急流河川の代表である黒部川を対象にそれらを適用することで黒部川下流域(宇奈月ダムから河口)における流木動態を明らかにする。

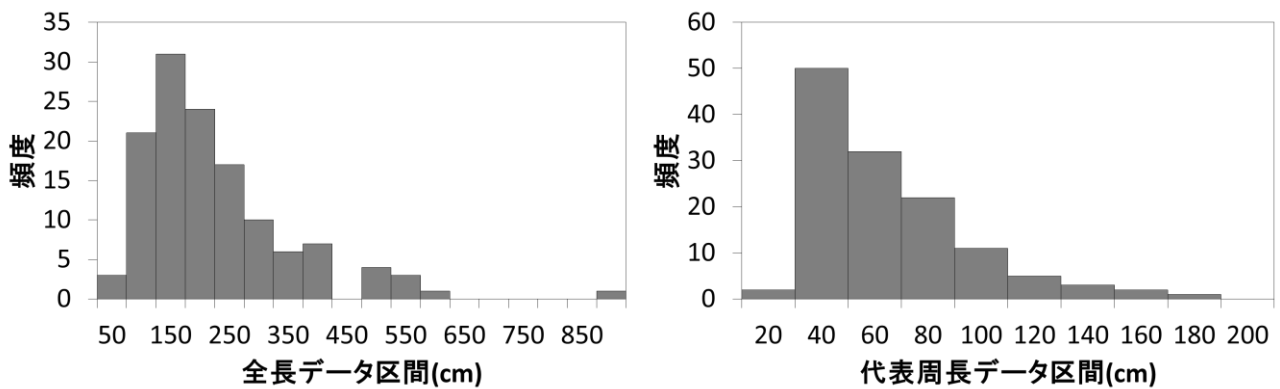


図-1 流木の全長の頻度分布(左図)、代表周長の頻度分布(右図)

2. 対象河川

黒部川は富山県東部に位置する幹川流路延長85 km、流域面積 682 km²の一級河川である⁴⁾。流域の年平均降水量は約 4,000 mm という国内でも屈指の多雨多雪地帯である⁵⁾。このため、上流域からの流出土砂量が非常に多く、それに伴い流木の発生量も非常に多いと考えられる。また、黒部川では毎年6～8月において連携排砂を実施している。その際に土砂のみならず、多くの流木もダムを通過し、下流域へと流下している。そのため、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所では連携排砂後に流木の回収を行っている。その過去11ヶ年の実績によると、黒部川下流域における平均流木処理重量が約1,400 t、平均流木処理費用が約2,000万円となっている。

3. ICタグとGPSを用いた流木の流下実験

黒部川において散在している流木にICタグとGPSを装着し、連携排砂時における流木の追跡を行った。

(1) ICタグの概要

ICタグはSHARP社製DS-3UT4を使用した。ICタグはUHF無線での位置特定が可能である。また、電池を必要とせず、溶出しなため、河川環境に害を及ぼすことなく、個々の価格が安価である。サイズは縦95 mm、横25 mm、高さ3 mmである。

流木に予めナンバリングしたICタグを木ねじで装着し、その上からシリコンを使い、防水と緩衝対策を行った。

(2) GPSの概要

GPSは準リアルタイム型GPSとロガー型GPSの2種類を使用した。準リアルタイム型GPSはWillGPS社製RT2300、MT6800である。サイズはそれぞれ、RT2300が縦81 mm、横48 mm、高さ28 mmであり、MT6800が縦85 mm、横60 mm、高さ40 mmである。ロガー型GPSはMobil Action社

製GT-600である。サイズは縦46 mm、横42 mm、高さ14 mmである。

準リアルタイム型GPSはGPS電波と基地局測位情報を用いており、インターネットを通して準リアルタイムでのデータの取り出しが可能である。さらに、稼働時間は約2週間と長い。一方、ロガー型GPSはGPS電波のみを使用しており、回収しなければデータが取り出せない。さらに、稼働時間が約6日間と短い。任意の時間でログ間隔が設定可能である。また、本実験で用いた全てのGPSは一定期間GPSに動きがないと、自動的に待機状態に入り、電池の消費を抑える機能が搭載されている。

流木に穴を加工し、予め防水と緩衝対策を行ったGPSを埋め込んだ。その後、木の板で蓋をしてその上からシリコンでさらに防水と緩衝対策を行った。GPSが完全に水没し、通信に支障をきたさないようにGPSは流木の側面に取り付けた。

(3) ICタグとGPSを用いた流木の追跡方法

流木の設置場所は現地調査において流木が多く見られた富山地方鉄道宇奈月温泉駅裏の河川とした。

ICタグは本実験対象である全128本の流木に装着した。図-1は128本の流木の全長、代表周長(各流木における最大の周長)の頻度分布である。大きな流木にはICタグを複数個装着し、流下中に流木が分裂しても番号が特定できるようにした。GPSは高価であるため、本実験では対象である全128本の流木の内、計7本の流木にのみGPSを装着した。6本(GPS-1～6)は準リアルタイム型GPSとロガー型GPSの両方、1本(GPS-7)はロガー型GPSのみ装着した。

さらに、回収率を上げるため、目視で確認しやすいように全ての流木を赤く塗装した。

ICタグのみの流木は加工後、平水時には流下しないように連携排砂の実施まで、平水時の水位より標高が高い河原に放置した。GPSは電池が必要であるため、GPS付きの流木は連携排砂実施直後に河川へ投入した。

連携排砂後、黒部河川事務所による流木回収作業が行われる前に流木を探索し、流下後の位置情報を記録した。

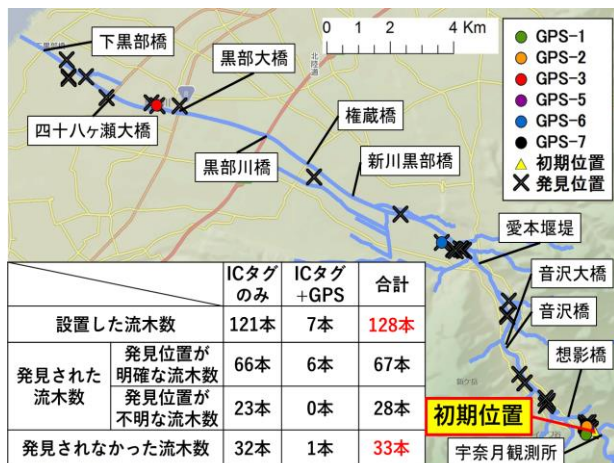


図-2 流木の初期位置と発見位置

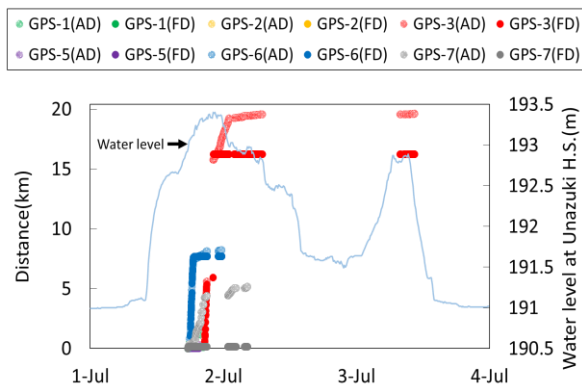


図-3 GPS付き流木のGPSデータ間の累積距離、流下距離と宇奈月観測所における水位

(4) 流木の回収結果

連携排砂実施期間はH27年7月1日～7月3日であり、7月9日～11日にかけて行った搜索作業で、67本の流木を発見し、位置情報を記録することができた。その後、7月15日から順次黒部河川事務所による流木の回収が行われた。その回収作業において新たに28本の流木が発見された。しかし、それらの流木については流下後の位置情報は得られなかった。

図-2は流木の初期位置と発見位置を示したマップである。GPS-1, 2, 5, 7は投入位置から約0.1 km下流の位置で滞留し、GPS-3は初期位置から下流へ約16.2 km, GPS-6は約7.7 km流下した地点で滞留した。本実験の流木試料の内、43本が初期位置から0.1～0.2 km下流の範囲に堆積していた。堆積していた箇所は蛇行部の外側であった。また、河川全体を通して、橋梁や堰堤などの河川構造物に堆積している流木の有無を優先的に確認したが、発見されなかった。黒部河川事務所により、河道内におけるほぼ全ての流木が回収されたと推定されるため、本研究で使用した全128本の内、発見されなかった33本の大半は海へと流下した可能性が高いと考えられる。

(5) GPS付き流木の流下状況の時系列データ

各GPS付き流木の累積移動距離(以下、AD)と流下距離

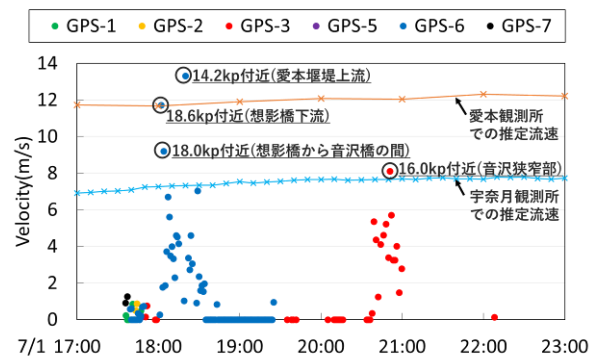


図-4 GPS付き流木の流下速度と宇奈月観測所・愛本観測所における推定流速

(以下、FD)を求めた。ADは各GPSデータ間の距離の累積、FDは滞留後も取得し続けていた回収地点付近ではGPS情報を1点にまとめた後、各GPSデータ間の距離の累積として算出した。なおFD算出の際、GPSデータが取得できていなかった間の区間では滞筋に沿った移動距離を概算した。

図-3はGPS付き流木のAD、FDと連携排砂時における宇奈月観測所(19.90 kp)の水位である。7月2日7時頃から3日8時頃までGPS-3のGPSデータは取得できていなかった。GPS-3は発見した際に中州に漂着していたことから、GPSデータが取得できなかった原因は、水位が下がった後GPSが中州で待機状態に入ったためであると考えられる。発見された全てのGPS付き流木は水位が低下するよりも先に滞留したことが示された。

図-4はGPS付き流木の流下速度と宇奈月観測所、愛本観測所(13.40 kp)における推定流速である。GPS付き流木の流下速度の算出にはFDを使用した。また、宇奈月観測所と愛本観測所における流速の算出には、次式のマンニングの平均流速公式を使用した。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここに、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 I は勾配である。本稿では概算値を算出したため n は0.03、黒部川の川幅は水深と比べて極めて大きいため、 R は各観測所における水深とした。水深のデータは、宇奈月観測所は10分毎、愛本観測所は60分毎のデータである。また、各観測所の勾配は国土交通省によるH26年定期横断測量データから算出し、宇奈月観測所では $I=1/94$ 、愛本観測所では $I=1/43$ とした。

GPS-3と6の結果から、流木が流下する際、回収地点まで一度に流下しているのではなく、何度か滞留しながら流下したことがわかる。さらに、宇奈月観測所の流速よりも速い流下速度を記録した位置を確認し、その箇所での流木の堆積状況を連携排砂直後に撮影した空撮動画から確認した結果、約18.0 kp地点以外の地点での流木の堆積は確認されなかった。これは流速が速く、流木が滞留しにくいということが大きな要因であると考えられる。

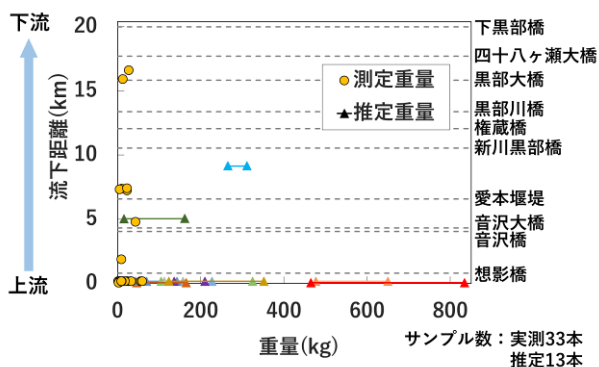


図-5 流木の重量と流下距離の関係

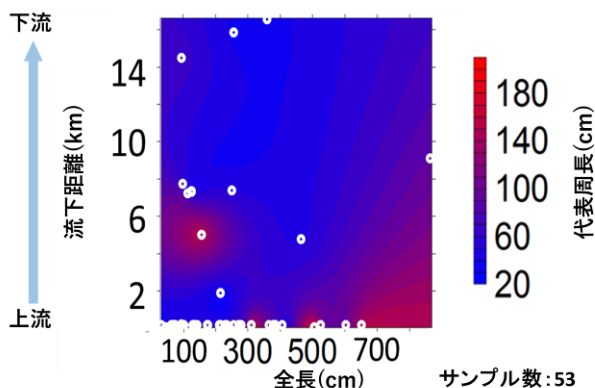


図-6 流木の全長、代表周長と流下距離の関係

(6) 流木の形状と流下距離の関係

流木の全長、代表周長、重量と流下距離の関係を調べた。全長、代表周長を測定した流木は53本である。重量は回収してから約1ヶ月後に測定し、三方よし社製クレースケールデジタル量り246910-01を用いた。重量が大きく、測定できないものは、最小周長と最大周長を測定し、推定最小体積、推定最大体積を求めた。それらに、重量測定ができた流木から算出した平均密度(532 kg/m³)を乗じ、推定最小重量、推定最大重量を算出した。重量が測定可能であった流木は33本であり、13本の測定不可能であった流木は推定重量を算出した。残りの流木は連携排砂後に発生した別の出水により見失ったため、今回の実験では発見した全流木を測定できなかった。

図-5は重量と流下距離の関係を示した図である。この図から、重量が小さい流木は流下距離が長いということが示された。またH27年連携排砂における規模の流量(宇奈月観測所における暫定ピーク流量: 474.64 m³/s)では、最も重量の大きなもので推定最大重量が312 kgの流木が約9.1 km流下することがわかった。

図-6は全長、代表周長と流下距離をそれぞれ横軸、縦軸、青～赤の濃淡で示した図である。図中の白点はそれぞれの流木の測定値を示し、Kriging法で内挿補間して描いている。実験に用いた各流木に全長、代表周長の相関関係はない。図-6から全長が小さく、代表周長が小さい流木の流下距離が長いという定性的な結果が示され



図-7 山間域における中洲の空撮画像(18.2 kp付近)

た。黒部河川事務所によると、黒部川で堆積している流木の特徴として、宇奈月ダムから河口にかけて、幹径が小さくなっているという報告がある⁹⁾。これはH27年連携排砂における結果とも概ね一致している。

4. UAVを用いたマクロ的な流木動態の観察

(1) UAVの概要

本研究ではDJI社製PHANTOM3 ADVANCEDを使用した。このUAVの特徴として、コントローラーとスマートフォンやタブレットを接続することで、UAV本体に搭載されているカメラと中継することができる。また、手元のコントローラーでは機体のGPS情報、バッテリー残量などがリアルタイムで確認できる。さらに、撮影した画像には撮影地点のGPS情報が記録される。専用バッテリーの最大フライト時間は約23分である。

(2) 連携排砂直後の空撮動画による流木堆積状況の解析

連携排砂直後(H27年7月9日～11日)、UAVを使用し、セグメントが変化する地点付近である山間域の宇奈月温泉駅裏の河川(約19.8 kp)から愛本堰堤上流(約13.6 kp)までと、河口付近の四十八ヶ瀬大橋下流(約2.2 kp)から河口までの2つの範囲で空撮を行った。その空撮動画から流木が多く堆積している地点を調べた。

連携排砂直後の空撮動画の解析をした結果、宇奈月温泉駅裏の河川では、蛇行部の外側に多くの流木が堆積していた。図-7は18.2 kp付近における中洲の空撮画像である。図中の矢印は流下方向を示す。山間域の宇奈月温泉駅裏の河川から愛本堰堤上流では、このように、流木は滞筋に沿って中洲に多く堆積していた。これは、連携排砂によって水位が上昇した後、水位が回復する際に流下していた流木が中洲に張り付くように堆積したためだと考えられる。流木は中洲の上流側に多く堆積しており、これは既往研究と同様の傾向であった⁷⁾。

河口付近も山間域と同様に滞筋に沿って中洲に堆積している流木が多く見られた。しかしながら、河口付近では、山間域ではあまり見られなかった滞筋内での流木の堆積が確認された。図-8は2.2 kp付近における空撮画像で



図-8 河口付近における空撮画像(2.2 kp付近)

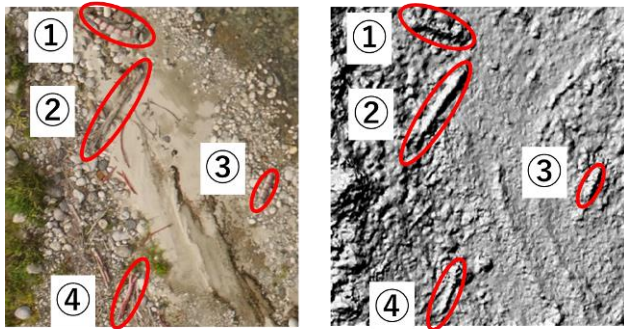


図-9 宇奈月温泉駅裏の河川における空撮画像から作成した航空写真(左図)とDEMデータ(右図)

ある。図中の矢印は流下方向を示す。国土交通省によるH26年定期横断測量データによると、山間域では1/100である平均河床勾配が河口付近では1/187と緩やかになるに加え、川幅が山間域では約200 mであるが河口付近では約620 mとなる。そのため、河口付近では流速が減少し、滞筋内でも流木が流下せず滞留したと考えられる。

(3) 空撮画像を用いたDEMデータにおける流木の判別

流木が多く堆積していた宇奈月温泉駅裏の河川の空撮画像からDEMデータを作成し、流木の判別が可能であるか検討した。空撮画像からDEMデータを作成するにあたり、Agisoft社のPhotoScan Professional Editionを使用した。空撮画像は60 %以上のオーバーラップが必要である。撮影条件は撮影面積：0.10 km²、河川からの高度：約70 m、撮影枚数204枚、撮影間隔：約3.6 mである。

図-9は宇奈月温泉駅裏の河川における空撮画像から作成した航空写真と、解像度約2.9 cmのDEMデータである。このDEMデータから確認でき、かつ最大直径が確認されていた流木の最大直径はそれぞれ、①36.92 cm、②40.43 cm、③37.88 cm、④29.92 cmであった。したがって、解像度約2.9 cmのDEMデータでは最大直径30 cm以上の流木が確認できることがわかった。

5. 平面二次元河床変動解析による流木の動態推定

(1) 数値解析条件

平面二次元河床変動解析を利用して、流量の変化によ

表-1 2015年連携排砂時の暫定流量を用いた計算における計算条件

平均格子サイズ	20m×20m
格子数	i 743×j 25=18,575 i：縦断方向 j：横断方向
時間	5日間
Δt	0.1秒

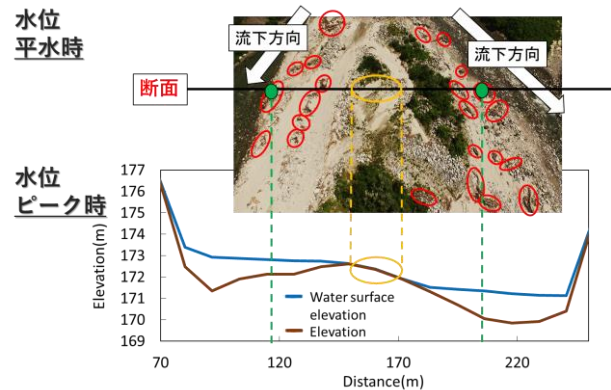


図-10 連携排砂直後の空撮画像と連携排砂の暫定流量を用いて算出したピーク時の水位

る流況の変化と地形の関係について調べた。本解析にはiRIC⁹⁾に含まれるNays2DHソルバーを使用した。Nays2DHソルバーは、河川における流れ、河床変動、河岸侵食の計算を行うために開発された、一般曲線座標で境界適合座標を用いた非定常平面二次元流れと河床変動計算の解析用ソルバーである。また、地形データは国土交通省による約200 m毎のH26年定期横断測量データを用いた。

(2) 流量規模による流木動態の特徴

H27年連携排砂時の暫定流量データ(ピーク流量474.64 m³/s)を用いた計算を行い、実際に流木が多く堆積した中州の断面の流況を解析した。

本解析で用いたH27年連携排砂時の暫定流量とは、H26年のH-Q式を用いて算出した宇奈月観測所における暫定流量である。計算条件は表-1に示す。連携排砂実施期間はH27年7月1日15時20分～7月3日9時20分であり、対象期間は6月30日1時～7月4日23時とした。

また、連携排砂時に実際に流木が多く堆積していた中州の水位を算出した。図-10はその計算における標高とピーク時の水位を表している。連携排砂直後に撮影した写真と比較すると、流木が堆積していない箇所では水位の上昇はほとんどないことが確認された。

(3) 流量規模による流木動態の特徴

黒部川で毎年生起する出水の規模が500～600 m³/sであることから、300、400、500、600 m³/sのそれぞれ一定の定常計算を行い、流速ベクトルから求めた粒子を可視化し、その動態を調べた。表-2は計算条件である。

表-2 定常計算における計算条件

平均格子サイズ	20m×20m	
格子数	i 743×j 25 = 18,575 i : 縦断方向 j : 横断方向	
時間	10,000秒	
Δt	0.1秒	
境界条件	上流端流量	300, 400, 500, 600 m ³ /s (定常)
	下流端水位	0m

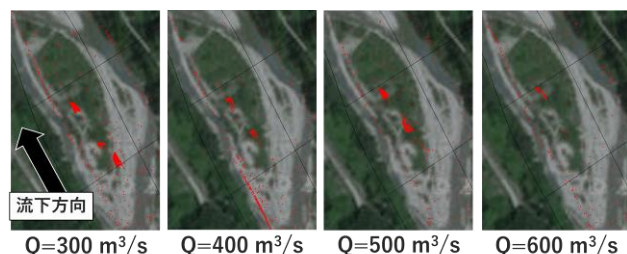


図-11 流量300～600 m³/sの時の17.8～18.4 kpにおける粒子の滞留結果

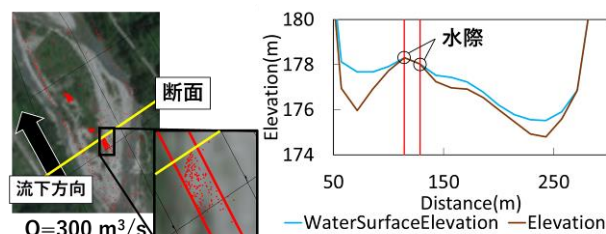


図-12 流量300m³/sの時に粒子が滞留した地点付近の横断面における水位と標高

図-11はそれぞれ、300, 400, 500, 600 m³/sの時の17.8～18.4 kpにおける粒子の滞留結果である。図中の矢印は流下方向を示す。流量の違いにより粒子の滞留状況が異なった。そこで、粒子が滞留した全ての地点付近の横断面を確認した。図-12は流量300 m³/sの時に粒子が滞留した地点付近の横断面における水位と標高である。粒子が滞留しているのは1つの格子内であり、その縦断方向と中州における水際が一致していることがわかる。粒子が滞留した全地点において同じ傾向が示された。このことから、粒子を用いることで中州における水際の特定が容易にできると考えられる。また、流木は中州における水際で漂着しやすいと考えられるため、粒子の動態を観察することで流木の中州における漂着地点が推定可能であると考えられる。

6. 結論

本稿では流木動態を解明するための3つの手法を提案し、それらを用いて黒部川下流部において流木動態の解明を行った。

ICタグとGPSによる流木追跡では全流木試料の内、74 %の流木が河川で堆積し、26 %が海へと流出したと

考えられる。GPSデータから、流木は水位がピークを迎える前に河岸や中州に漂着したことがわかった。さらに、流木の流下速度が速い地点での流木の堆積はほとんど見られなかった。また本実験の流木試料から、全長が短い、代表周長が小さい、重量が軽い流木の流下距離は長いという定性的な傾向が示された。これらのことから、ICタグとGPSを用いることで流木動態を解明することが可能であると示された。

UAVを用いた流木動態の観察では、連携排砂直後、非常に広範囲にわたり滞筋に沿った流木の堆積が確認された。また、河口付近では滞筋内で滞留している流木もいくつか見られた。UAVを用いることで、流木の堆積状況を確認することができた。さらに、空撮画像から解像度約2.9 cmのDEMデータを作成することにより、最大直径が30 cm以上の流木が確認できた。空撮、流木の判別を自動化していくことが今後の検討課題である。

平面二次元河床変動解析では、連携排砂時の暫定流量を用いた計算の結果、実際に流木の堆積がない箇所では水位の上昇はほとんどなかった。また、流量により粒子の滞留状況が異なり、中州における水際が容易に特定できることから、中州において流木が漂着する箇所の特定が可能であると考えられる。

謝辞：本研究は平成27年度京都大学防災研究所共同研究（一般共同研究）の助成を受けた。

参考文献

- 1) 阿部修也, 渡邊康玄, 長谷川和義 : 2003 年台風 10 号出水における沙流川での橋梁被害, 河川技術論文集, 第 11 巻, pp109-114, 2005.
- 2) 鈴木優一, 渡邊康玄, : 沙流川での台風 10 号における流木の挙動, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.1633-1638, 2004.
- 3) 赤堀良介, 川村里美, 土田宏一, 白井博彰 : 実河川における流木観測データを用いた流れの空間構造と流木流下機構の検討, 河川技術論文集, 第 21 巻, pp.159-164, 2015.
- 4) 国土交通省 : 黒部川水系河川整備基本方針, 2006年
- 5) 国土交通省 北陸地方整備局 : 黒部川水系河川整備計画, pp.36, 2009.
- 6) 石川伸 : 黒部川ダム連携排砂と流木の実態, 平成 26 年度京都大学防災研究所水資源セミナー, 流域一貫の総合流木管理に向けて, pp.21-28, 2014.
- 7) Bertoldi, W. (2014) 大河川における流木捕捉と動態 : 現地観測と実験的検討から, 平成 26 年度京都大学防災研究所水資源セミナー, 流域一貫の総合流木管理に向けて, pp.47-56.
- 8) 竹門康弘 (2014) イタリア・タリアメント川における流木の動態と生態的機能, 平成 26 年度京都大学防災研究所水資源セミナー, 流域一貫の総合流木管理に向けて, pp.57-64.
- 9) iRIC software : <http://i-ric.org/ja/> (2016 年 1 月 16 日閲覧)

(2016. 4. 4受付)