

網状流路を有する大井川における 植生域消失と流路変動の関係

RELATIONSHIP BETWEEN THE EROSION OF VEGETATION AND THE CHANNEL EVOLUTION IN THE OI RIVER

赤堀 良介¹・溝口 敦子²・石黒 聡士³

Ryosuke AKAHORI, Atsuko MIZOGUCHI, Satoshi ISHIGURO

¹ 正会員 愛知工業大学 工学部土木工学科 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

² 正会員 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

³ 非会員 愛媛大学 法文学部 (〒790-8577 松山市文京町 3 番)

In this paper, the relationship between the channel evolution and the vegetation washout during a flood event in a braided stream was studied by using the spatial data that was obtained by the operation of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The study site was the downstream region of the Oi River where the fully developed braided stream has long been observed. In this region, a relatively large flood event occurred on October 23, 2017. The vegetation regions on this site were evaluated before and after the event in order to extract the specific regions where the vegetation was vanished after the flood. By using Digital Surface Model (DSM), the vanished regions of the vegetation were classified into the two classes, one is the covered by the bed material, and the other is the eroded by the channel migration. The results show that the thickness of the bed materials was relatively small on the regions where the vegetations were covered. On the other hand, the higher vegetations were only vanished on the eroded regions. By comparing the locations of these eroded vegetation regions to several longitudinal profiles of low water channels, it was implied that the step-pool-like structures may provide more possibility to yield the lateral channel migration in the braided stream.

Key Words : *braided stream, gravel river, vegetation, field observation, UAV*

1. はじめに

大井川下流部は網状流路がよく維持されていることで知られている一方で、近年になり河口付近を中心に徐々に植生域の拡大が見られており、将来的な樹林化の進展が危惧される状況である。礫床河川における植生の進出過程に関しては、多摩川を対象とした研究^{例えば}¹⁾など、既往の検討は多いが、一般に樹林化が顕在化した状態から過去の契機に遡って考察されることが多く、現時点での比高差が拡大した状態を想定したものが多い。これに対し、網状流路を維持している河道に主眼を置いた検討例は少なく、近年でも水理実験により植生の状況と水理量の関連に着目した例²⁾が見られる程度である。一方で、山口ら³⁾は、かつて網状流路であり現在単列化が進行した札内川を対象に、試験出水により残された旧流路を活用し、効率的に礫河原を復元する手法を検討している。この研究は単列化した流路を前提としているものの、瀬淵の構造を活用した上で流路の交番現象の可能性をいかに利用するかとい

う視点に立脚しており、網状流路を対象として同種の検討をする際にも、示唆するものが多い。

このような状況のもと、筆者らのグループでは2016年度より大井川の網状流路の維持の機構に関して現地観測を開始しており⁴⁾、2001年の長島ダム竣工前後からの流況の変化や、それに応じた流路網の変化等について、既往の航空写真やUnmanned Aerial Vehicle (UAV) 撮影画像等を使用して検討を進めてきた。本研究は、このうち特に出水の前後での大井川下流部の植生の変化に着目し、その状況を面的な解析手法により検討した。これにより、網状流路の出水期間での変遷と、それがもたらす植生域への影響について観測結果を整理し、網状流路の維持を前提とした植生及び河道の管理について基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 研究対象

大井川下流部は、牛尾の狭窄部(河口より20km)から下流で広大な扇状地区間となっている(図-1)。現在



図-1 大井川下流域、河口から 20km（牛尾狭窄部）まで

でも下流部の網状流路が維持されているが、近年その状況が質的に変化してきた⁵⁾。河口付近では、大規模な砂利採取が実施されていた間に大きく河床低下したが、1974年に特定砂利採取制度が実施されて以降は砂利の採取量が制限され、さらに2000年には直轄区間での砂利採取が禁止された。このため、1974年以降は河口部において河床は比較的安定した状況となっており、1980年頃からは植生の定着が見られる。現状では、植生域に関してはフラッシュによる消失と再生を繰り返している状況であり、小規模な出水が継続している期間では抜本的な植生域の流失が期待出来ない状況である。周辺では2016年から国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所によるUAV撮影が実施されており、河口より1.6kmから3.6kmまでは、2017年において10月5日および12月14日～15日と、2回の撮影が実施された。最近の細島水位流量観測所(図-1)における水位の時間変化を図-2に示す⁷⁾。この観測所では-0.51m以下の水位が記録されていないが、2017年8月8日、および2017年10月23日には出水が見られる。特に10月23日に関しては台風21号の影響によるものであり、河道内において低水路流路が大きく変動した。神座地点(図-1)での流量の暫定値として、8月8日は $1400\text{m}^3/\text{s}$ 前後、10月23日は $3900\text{m}^3/\text{s}$ 前後を推測している。前者の出水は平均年最大流量を下回る大きさであり、後者に関しては非超過確率で75%程度、すなわち1/4程度の確率規模の出水であると推測された⁵⁾。

3. 研究手法の概要

(1) UAV 撮影画像をもとにした解析

UAV 撮影機体として DJI 社 M600 に Sony 社 $\alpha 7R$ を搭載したものを使用した。撮影時にはオーバーラップ率を 85%、サイドラップ率を 65% とした。撮影画像には



図-2 大井川水系細島水位流量観測所における 2017 年 8 月から 12 月に掛けての水位の時間変化

Structure from Motion Multi View Stereo (SfM-MVS) 解析が適用され、オリジナルの解像度は 2.0cm であった。地理情報システム (GIS) による検討の際には判別結果を平滑化する必要性や解析作業時の負荷を低減させる意味もあり、最終的に 1m メッシュとして整理したデータを使用した。また GIS アプリケーションとして ESRI ArcGIS10.2 を用いた。

上記のオルソ画像および Digital Surface Model (DSM) データに対して、GIS および河床変動解析モデルを用いて、出水の前後での草本と木本を含んだ植生域の変化を検討した。ここでの DSM データは、あくまでも写真に示された物体の表面高さを示すデータであり、植生等の高さを含んだものである。図-3 に提供された 10 月および 12 月のオルソ画像を示す。詳細に観察すると、同じ流路位置を保ったままでやや拡幅していった箇所、あるいは側方に大きく流路を移動させた箇所などに分類出来る。図-3 では、後者の側方への流路移動に伴い植生域が消失した代表的な箇所に、Area A から Area D までの名を付け（図-3 中の実線白枠）、後述の検討に利用した。

解析の際の手順として、まず GIS 上で 12 月 14 日および 15 日観測結果の 1m メッシュ DSM データから 10 月 5 日の同 DSM データを差し引くことで、10 月 23 日出水の前後での表面高さの変化を算出し、メッシュの各所において標高が上昇したのか（堆積）、下降したのか（侵食）を判別した。図-4 に対象期間の DSM 標高の変化を示す。次にオルソ画像に対し、教師付き分類解析を適用し、画像上での植生領域を分離した。出水前後の植生域を比較することで、植生域が 10 月 23 日の出水により消失したメッシュを抽出し、前述した同地点での DSM の差分結果から、そのメッシュにおいて植生が堆積により消失したのか、侵食により消失したのかを判定した。さらに目視によるオルソ画像の比較から、流路が首を振るような移動を見せた箇所内部における侵食植生消失メッシュを、流路移動による植生消失メッシュとした。最終的に、オルソ画像において植生の消失したメッシュに対し、「堆積により植生が消失し

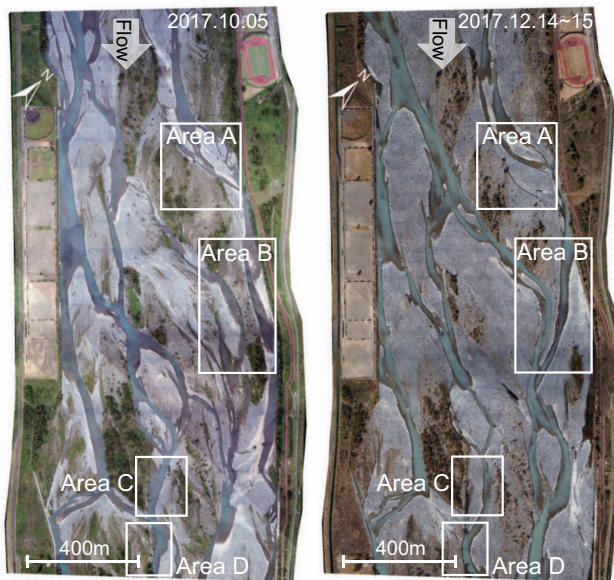


図-3 1.6km～3.6km オルソ画像の10月23日出水前後での比較（左：10月5日，右：12月14日～15日，白枠は流路の側方移動に伴い植生が消失した代表的領域）

たもの」，「浸食により植生が消失したもの（流路移動：側方への流路の移動によるもの）」，「浸食により植生が消失したもの（流路移動含まず：側方への流路の移動を理由としないもの）」の3項目に分類した．この結果を図-5に示す．なお，DSMモデルに9×9メッシュでの最小値を与える空間フィルター処理を実施し，植生を除くことで，およそ地盤高を求めた．これを，元の10月5日のDSMから差し引くことで，各メッシュごと，消失前の10月5日時点での推定の植生高さを得た．

(2) 河床変動計算モデルによる解析

河床変動解析には，汎用解析ソフトのiRIC2.3⁸⁾に含まれるNays2DHをソルバーとして使用し，10月5日のDSMから作成した2.5mメッシュの計算格子を用いた．計算格子は正方格子とした．代表粒径として，対象領域の平均粒径⁴⁾よりやや大きい30mmを与えた．掃流砂量式には芦田・道上式⁹⁾を用いた．解析では助走期間に設定流量まで上昇させた後の1時間後のShields数 $(\tau_b / [(g(\sigma - \rho)d_s])$ などを検討した．ここで τ_b は底面せん断力， g は重力加速度， σ は砂礫の密度， ρ は流体密度， d_s は砂の粒径である．流量は1400m³/sおよび3900m³/sとした．

また，飯村ら¹⁰⁾を参考として現地での木本の流失要因について検討した．まず前述の数値解析により，各メッシュでの流速 u ，水深 h が得られている．またGISによる検討から植生高さ h_v が判別しており，これらの条件を用いると，各植生流失メッシュにおいて，以下の式(1)から流木の倒伏に作用するモーメント M_N を推定することが可能である．ここで C_D は抗力係数(1.0

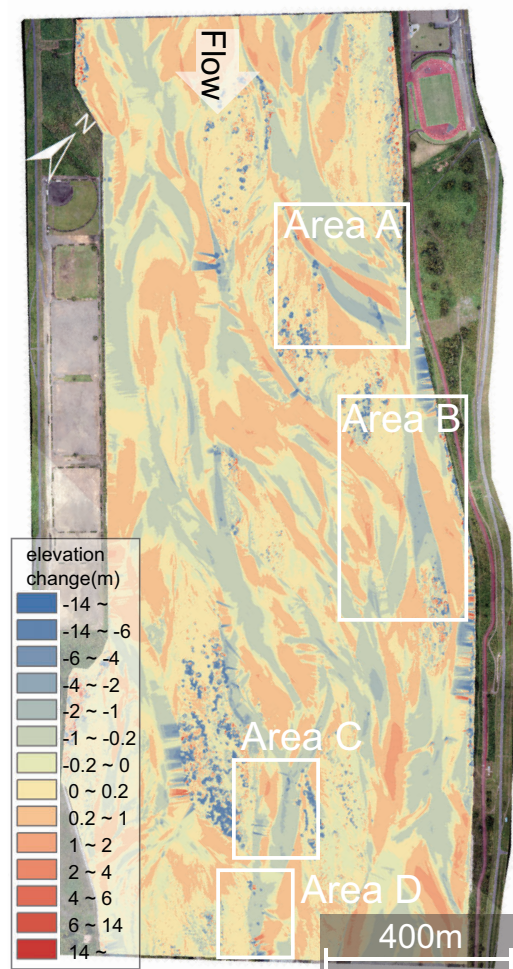


図-4 対象領域1.6kmから3.6kmの10月5日から12月14日，15日までのDSM標高の変化

とした)， d_v は植生の直径(0.1mとした)， L は水位と植生高さに応じて変化する(植生高さが水深を上回る場合には水深 h ，水没している状態では植生高さ h_v)．これは，植生を円柱で仮定した抗力に対し，底面から L の1/2に対して作用位置を与え，倒伏方向へのモーメントを計算したものとなる．得られた値が後述¹¹⁾の限界倒伏モーメントを超えていない場合，少なくともその場所では流体力による倒伏ではなく，河道の浸食により基盤が流失したことで木本の流失が生じたと考えられる．

$$M_N = (1/4)\rho C_D u^2 d_v L^2 \quad (1)$$

4. 解析結果

(1) GIS 解析結果

図-5に示した結果について，植生消失メッシュを集計して述べる．植生域の変化の検討から，2017年10月23日出水前では左右堤防間の河道内において，その約38%が植生域であったが，出水後は約24%に減少したことが示された．また，対象領域の河道全体でのDSM

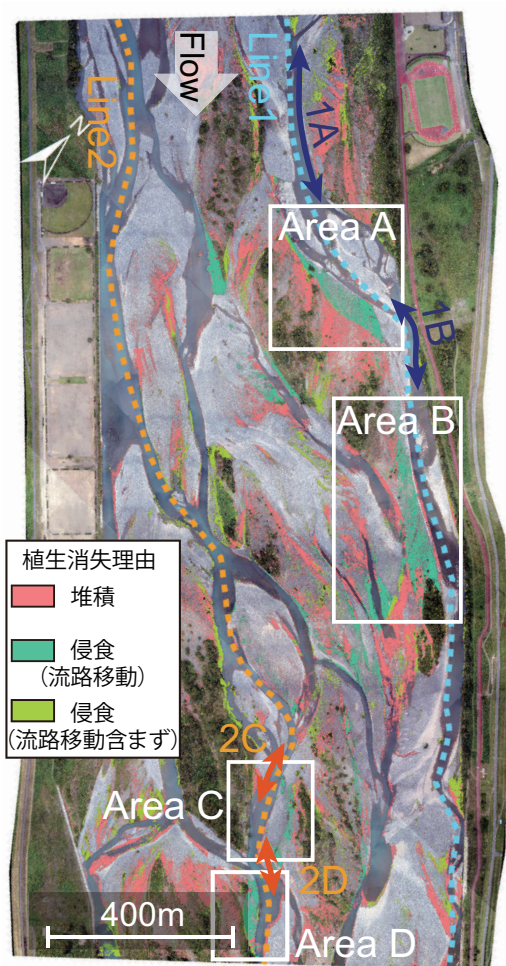


図-5 10月23日出水により消失した植生メッシュを3項目に分類し、10月5日のオルソ画像に重ねたもの

標高の比較では、河道全体のうち堆積が見られた面積の割合は約54%であったが、植生消失面積全体のうちで堆積によるものの割合は約62%となり、堆積に伴う植生消失の面積の割合が、全体での堆積傾向にある割合よりやや高く示された。これより、砂州の表面が全面的に更新される比較的規模の大きい出水において、実際には多くの植生域が河床の堆積により被覆され消失した可能性が示された。

また、前述の通り、DSMモデルに空間フィルター処理を実施して10月5日時点での推定の植生高さを得た。堆積による植生消失メッシュと、侵食による植生消失メッシュ（流路の側方移動によるものとそれ以外の侵食消失を含んだ合計）の、それぞれのメッシュ数を該当箇所における植生高さでクラス分けし、ヒストグラムにより示したものが図-6である。そもそもDSMの差分であり、樹冠の大きい高木が消失した場合は該当メッシュが侵食と判断されるほか、侵食量、堆積量とも元の植生高さがバイアスとして働く可能性があることから、堆積による消失には植生高の高いクラスは存在しないが、基本的に堆積による消失メッシュでは1.6m以

上のクラスがほとんど見られない。DSM差分により示された堆積の厚さ自体が、砂州上ではおよそ1m以内に収まっており、この厚さ以内に収まる植生のみが、堆積による消失を見せたことがわかる。実際のオルソ画像の比較でも、堆積が卓越した領域で木本が流失したと見られる状況はほとんど確認出来なかった。これらより、面積の総量として植生消失における堆積の効果は侵食のものよりも大きく、砂州上を裸地として広範に被覆するが、その厚さ自体は限定的であること、また木本の消失は侵食領域でなければほぼ生じておらず、進出した木本の流失を期待する場合には侵食による消失領域の存在が重要であることがわかった。

次に、侵食による植生消失メッシュに関し、流路の切り替えや首振り等の側方への大規模な移動により消失したものと、それ以外に分けた場合の結果について検討した。図-5に示された「侵食（流路移動）」が前者であり、「侵食（流路移動含まず）」が后者である。図-5には、前者のエリアを代表して、それぞれArea AからArea Dまで、主要なパッチの存在する箇所に白い実線による枠を示した。メッシュを集計した結果からは、侵食による植生消失メッシュ全体のうち、流路の側方移動に依存したものの、すなわち「侵食（流路移動）」の割合は34%程度であり、面積の総量としてはそれほど大きくないことがわかる。一方で目視で状況を検討すると、「侵食（流路移動含まず）」による消失は既存の流路から位置をあまり変えずに、若干の流路の拡幅によって生じた様子が見受けられ、流下方向に細長く続くのに対し、「侵食（流路移動）」は大規模な流路変動の軌跡がすべて網羅されるため、一つのまとまったエリアとして広範に存在する印象を受ける。

さらに、それぞれのメッシュについてDSM差分のデータから侵食された際の鉛直方向の深さを算出し侵食深クラスとして整理し、前者と後者での違いをヒストグラムにより求めた。結果を図-7に示す。この結果からは、「侵食（流路移動）」による植生消失メッシュにおいて、出水前後の鉛直方向の侵食量がより大きかったことがわかる。木本の流失のみでなく、ツルヨシのような地下茎を有する多年生の草本を十分にフラッシュする必要がある場合には、このような鉛直方向の侵食量が大きな影響を有することが想像される。

(2) 河床変動数値解析結果

河床変動解析の結果について計算終了時のShields数を出力し、該当する出水後のオルソ画像と重ねたものを図-8に示す。どちらもShields数が0.05以下となる領域は描画していない。流量 $1400\text{m}^3/\text{s}$ は8月8日の規模の小さい出水を、流量 $3900\text{m}^3/\text{s}$ は10月23日の台風21号の際の出水を想定している。前者では、Shields

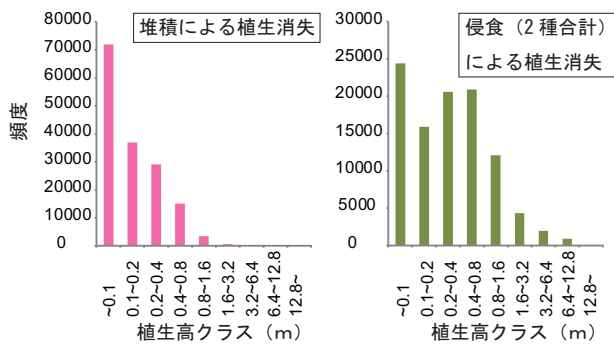


図-6 植生消失メッシュ数に対する植生高さによるヒストグラム（左：堆積による消失，右：侵食による消失）

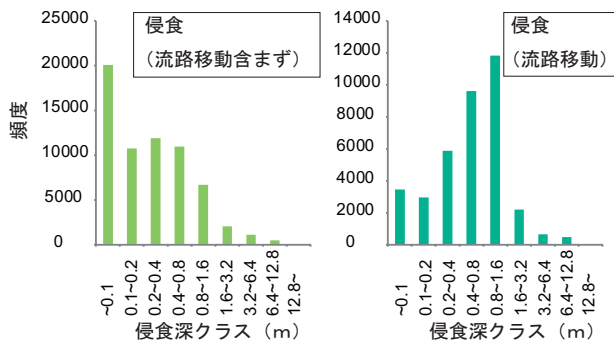


図-7 侵食による植生消失メッシュ数に対する侵食深によるヒストグラム（左：流路移動含まず，右：流路移動）

数 0.05 以下の領域が 10 月 5 日に残存していた植生領域と精度良く一致し、後者に関しても概ね同様の傾向が見られた。これより平均粒径よりやや大きい程度の河床材料に関して無次元限界掃流力以下となる領域が、植生域が残存する領域をよく代表することが示された。

図-9 には、堆積による植生消失メッシュと、侵食（前述の 2 種の合計）による植生消失メッシュについて、該当位置での数値解析結果（3900m³/s）が示した Shields 数と先に述べた植生高さの推定値を与え、両者で整理した散布図を示した（計算結果が現地での植生消失状況と完全に一致することは無いため、図-9 には Shields 数が 0.05 以下の領域も図示されている）。この結果からは、河床変動計算が示した Shields 数の値の大きさ自体と消失した植生の推定高さとの間には明瞭には関連性は見られず、無次元限界掃流力を超えている状況であれば、植生の消失に関しては、侵食の場合も堆積の場合もそれが十分生じることが示された。

渡邊ら¹¹⁾は鵜川を対象に現地での木本の倒伏実験を実施しており、試験木の倒伏限界モーメント M_C の回帰式（式 (2)、ただし M_C は単位を kgf m、 d は cm で表記）を得ている。現地での木本の直径を 10cm と仮定した場合、 M_C は 260(kgf m) となる。数値解析と GIS 解析結果に基づき式 (1) により侵食による植生流失メッシュでの倒伏モーメントを算出した結果、 M_C が 260(kgf m)「以下」となったメッシュは、流路移動によらない消失メッシュで約 40%、流路移動によるメッシュ

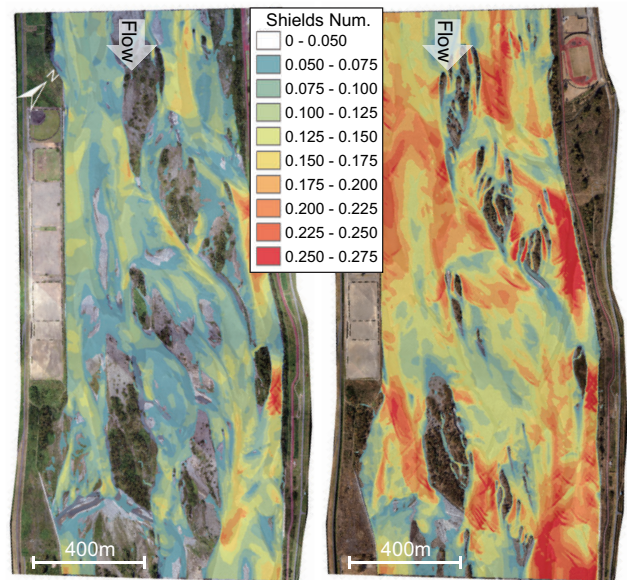


図-8 数値計算結果の Shields 数コンター図をオルソ画像と重ねたもの（左：流量 1400m³/s に対する 10 月 5 日オルソ画像，右：流量 3900m³/s に対する 12 月 14 日，15 日のオルソ画像，Shields 数が 0.05 以下となる領域は描画していない）

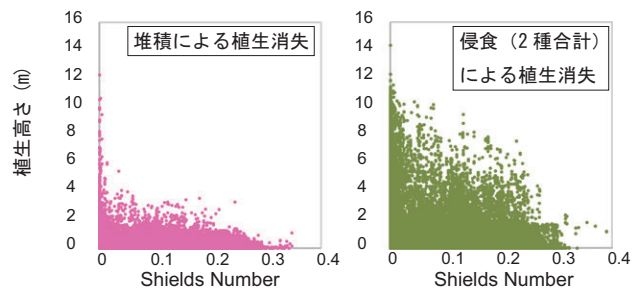


図-9 植生消失メッシュにおける推定植生高さと Shields 数の関係（左：堆積による消失，右：侵食による消失）

において約 30%となった。実際には木本が群生している状況に対し、式 (1) では木本を単一の円柱で仮定しているため、上記の値でもなお倒伏可能である側に過大な結果を有していると想像される。このことから、今回の出水において流失した木本のうち、実際には高い割合が、河道の側方侵食により基盤が流失したことによるものと考えられる。既往の検討⁴⁾からは、同河川において平均年最大流量を下回ると考えられる 1000m³/s 程度の出水においても、活発な河床変動が観測されている。これらを踏まえると、頻度の大きい小規模な出水の際にも、流路の側方への移動を効率的に促すことが可能であれば、植生域の侵食による木本や草本の抜本的な消失を期待し得ることがわかる。

$$M_C = 2.6d^2 \quad (2)$$

5. 考察

ここまでの結果から、側方への大規模な流路移動に伴う浸食が植生の流失に重要であることが示された。この結果を踏まえると、河道内の流路のうち、その後の出水時に側方への大規模な移動が生じ得る箇所を判別することが管理上重要であると考えられる。

山口ら³⁾は、十勝川水系札内川における礫河原再生事業の観測結果に基づき、試験出水による旧流路への引き込みが効果的な箇所として淵の直下の瀬の部分提案している。ここでは、上記³⁾の手法を参考に、任意の河道の縦断面形状を抽出し、淵と瀬の構造からの流路変動の説明を試みる。

図-5における代表的な流路移動に伴う植生消失領域 (Area A から Area D) を通る流路を任意に取り出し、それぞれを Line 1 および Line 2 とした。GIS 上でこの線上の DSM 標高を 10m 間隔で取り出し、距離に応じた流路の縦断面形状として示したものが図-10 である。DSM では撮影時の流路の水面下の形状は取得されていないため、ここでの標高は兩岸の水際から補間された水面形をトレースしたものであると考えられる。図-10 において、大規模な流路の側方移動が見られた Line 1 沿いでは縦断面勾配の緩急が大きく、Line 2 では一部領域を除いて勾配が一様であることが見受けられる。このうち、特に縦断面勾配が明確に小さい領域に 1A, 1B, 2C および 2D の名前を与え、図-5 と図-10 に示した。図-5 における Area A から Area D との比較において、上記の勾配が小さい領域が各浸食エリアの直上流に位置していることがわかる。すなわち、大規模な流路の側方移動に伴う浸食により植生が消失した領域に関しては、その直前に勾配がゆるやかな領域が存在し、消失領域自体はそこから急変して勾配が急になる領域に存在することを示している。上記の結果は、山口ら³⁾が提案する淵から瀬に至る構造が見られる箇所において旧流路の再生が効果的であるという認識と一致する。

6. まとめ

本研究では、大井川下流を対象に、2017 年 10 月 23 日の出水の前後での網状流路の変動と植生域の変化に関して検討を行った。結果から、表面上判断される植生の消失に関し 6 割程度の面積が堆積による河床材料の被覆に依存するが、木本の消失は浸食による消失のエリア内にほぼ限られることが示された。特に浸食深の深さなど効率の面を考慮すると、側方への大規模な移動に伴う浸食が植生の流失に重要であると考えられた。また大規模な流路移動を伴う植生域の消失は、淵と瀬の構造が明瞭で、かつ淵の部分から瀬の部分に変

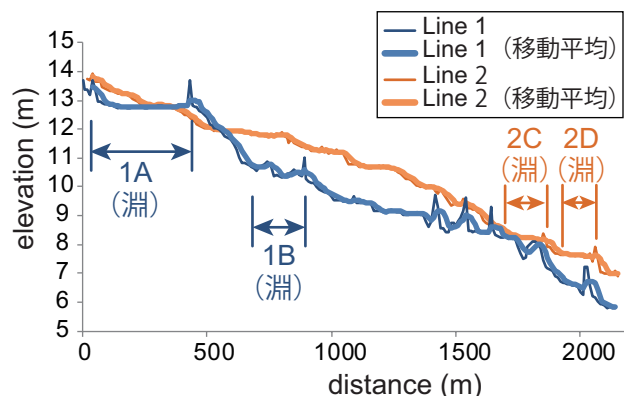


図-10 任意流路に沿った DSM 標高の縦断面勾配 (抽出した流路を図-5 に示す)

遷する位置で生じていることが確認された。

謝辞：本研究は河川砂防技術公募地域課題分野（河川）の「多列砂州河道の特徴を踏まえた河道維持管理」に向けた検討（代表者：溝口敦子）の一部として実施された。研究の実施にあたり国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所および島田出張所から多大な支援を頂いた。また、文部省科学研究費補助金基盤研究（C）（研究代表者：赤堀良介、課題番号：16K06520、2016）の補助を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也: 扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No. 747 / II-65, pp.41-60, 2003.
- 2) 久加朋子, 山口里実, 渡邊健人, 清水康行: 植生分布を考慮した網状河川の流路変動に関する実験的検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I.883-I.888, 2017.
- 3) 山口里実, 渡邊康玄, 武田淳史, 住友慶三: 流路の固定化が進行した河道における効率的な旧流路回復手法に関する検討, 河川技術論文集, 第 21 巻, pp.217-222, 2015.
- 4) 溝口敦子, 赤堀良介: 多列砂州を有する大井川の河床変動特性と、流量時系列の変化が河床変動へ及ぼす影響, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.537-542, 2017.
- 5) 国土交通省中部地方整備局: 大井川水系河川整備基本方針, 2006.
- 6) 国土地理院航空写真: <https://maps.gsi.go.jp/>, 2018.4.2.
- 7) 水文水質データベース: <http://www1.river.go.jp/>, 2018.4.2.
- 8) iRIC software: <http://i-ric.org/ja/>, 2018.4.2.
- 9) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 10) 飯村隼多, 宮本仁志, 井上敏也, 千ヶ崎祐夏, 浜口憲一郎: UAV 計測による洪水インパクトが鬼怒川の河道植生に与えた影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I.1069-I.1074, 2017.
- 11) 渡邊康玄, 市川嘉輝, 井出康郎: 洪水時における河道内樹木の倒伏限界, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.169-174, 2017.

(2018. 4.3 受付)