

# SfM-MVSを応用した 出水前後の微地形変遷の検討

## A STUDY ON EVOLUTION OF MICROTOPOGRAPHY DURING A FLOOD BY USING APPLICATION OF SfM-MVS

赤堀 良介<sup>1</sup>・原田 守啓<sup>2</sup>・石黒 聡士<sup>3</sup>・青島 正和<sup>4</sup>・中田 詞也<sup>5</sup>

Ryosuke AKAHORI, Morihiko HARADA, Satoshi ISHIGURO, Masakazu AOSHIMA,  
Fumiya NAKATA

<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 正会員 岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

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

<sup>4</sup> 非会員 静岡市役所 (〒 420-8602 静岡市葵区追手町 5-1)

<sup>5</sup> 非会員 福田道路株式会社 (〒 951-8503 新潟市中央区川岸町 1 丁目 53-1)

In this study, the evolution of the microtopography on a channel bed of the Shonai River during a flood was studied by using the Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS) technique in order to investigate the influence of riparian herbaceous vegetation on the mechanisms of fine sediment trap. The high-resolution surface models of the Digital Surface Model (DSM) which represented the topography of the pre- and the post-flood periods were produced by the results of the SfM-MVS applications. The numerical calculation by using a two-dimensional bed-evolution model was also implemented to evaluate the influences of the hydraulic characteristics of the reach-scale channel topography on the sediment dynamics. The comparisons of the above results showed that the herbaceous vegetation tends to hold fine sediments during the flood. The micro-highlands which were grown by the trapped fine sediment by the vegetation tend to remain on the same places as well, even though they located on the regions where the numerical calculation results implied which tended to be eroded.

**Key Words :** *microtopography, SfM-MVS, fine sediment deposition, vegetation, field observation*

### 1. はじめに

低平地を流れる河川において河道内植生が細粒土砂の捕捉・堆積に及ぼす効果はよく知られており<sup>1)</sup>,特に河道内植生の初期の進出過程においては,植生の生育基盤を形成する細粒土砂が草本類により捕捉されることが重要であることが示唆されている.藤田ら<sup>2)</sup>は,先駆的植生がトラップにより細粒分を礫床上に堆積させた層を「表層細粒土層」とし,オギなどの進出が進展していくための初期の機構と考えた.近年の観測からも関連する成果が示されており,原田ら<sup>3)</sup>は,揖斐川の高水敷掘削後に再堆積した土砂と植物の定着状況を詳細に調査した結果,堆積土砂の粒度分布に時間的変遷が存在すること,現状の植生以前に侵入した先駆的草本類により細粒分の堆積が促進され,植生の進出および水域と陸域の分化が進んだ可能性があることなどを示した.また,大石ら<sup>4)</sup>による屋外実験水路を用いた研究成果では,比較的水理条件が落ち着いた実験

水路においても 10cm 程度の比高差や水深差が植生侵入状況に変化を生じさせる事を指摘しており,ごく僅かな地形的あるいは水理的な条件の差異が,その後の細粒土砂の堆積傾向を決定する要因となり得ることが示されたと言える.

これら先行研究の成果を総合すると,河幅の縮小や樹林化の進展はリーチスケール程度の現象として認識されるが,その初期の要因は微地形の影響を受けた僅かな水理的特性の違いがもたらす機構から生じていることがわかる.そこで本研究では,河道周辺の形状を微地形のレベルまで解像した上で出水前後におけるその変遷を把握し,草本を主体とした植生域と微地形の変遷の相互の影響について検討を行った.なお観測を行った 2016 年 9 月 20 日は対象河川とした庄内川で台風 16 号の影響による出水が発生したが,その前後での観測を行っていたことで,植生進出域での地形変化の状況を把握する機会を得た.本研究は,この成果をもとに検討を行ったものである.

本研究は、主に以下の3点の枠組みで構成される。1点目は、微地形を解像するために利用した新しい技術に関する適用性の検討と、その技術を用いた結果から考察される出水前後での地形変化の検討である。定期横断測量に関しては測線の間隔は200m程度であり、航空レーザー測量に関しても、国土交通省河川局による指針では2mピッチでの情報取得が推奨される条件である<sup>5)</sup>。このためこれらを利用して数10cm程度からのスケールで構成される細粒土砂の堆積箇所を検討することは困難であった。これに対処し得る最近の技術として、Unmanned Aerial Vehicle (UAV) と Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS) を併用した地形測量が挙げられるが、UAVの利用にあたっては法制度や安全性の面での制限が存在し、対象により観測実施が困難な場合がある。本研究ではこのSfM-MVS技術を応用しつつも、UAVによらない手法を適用することで、庄内川の対象地域における微地形の変遷を把握した。画像取得方法としては、UAVを用いず、「ボールカメラ」<sup>6)</sup>と称する、7mの伸縮型ポール先端に取り付けたカメラによる簡便で安全な撮影を実施した。

2点目は、航空レーザー測量による5mメッシュのDigital Elevation Model (DEM) を用いた河床変動解析である。出水期間の流れの状況を面的に検討するには数値解析的な手法によらざるを得ない。この際、空間的な流れ場を把握するためにはある程度の領域を網羅した地形が必要であるが、解像度の高い水理情報を得ようとした場合は横断測量の成果は利用が難しく、また前述のボールカメラを用いたSfM-MVSによる地形は解像度は高いが対象範囲が狭い。本研究では空間解像度と情報提供域のバランスから、既往の5mメッシュDEMデータを利用した。航空レーザー測量の性質上、低水時水面以下の地形情報は利用出来ないが、河道の平面形に規定された物理的特性を表す計算結果にはなると考えられる。この結果から、河道が出水時に有している浸食及び堆積の全体的な傾向を把握した。

3点目は、前述の2点を総合した検討である。1点目の検討では草本を主体とする植生域で実際に生じた河道の変化を微細に検討し、2点目ではリーチスケールでの物理特性がもたらす河床変動の傾向を検討する。最後に両者の結果を比較することで、草本類の進出した植生域が、河道の有する全体的な河床変動の傾向に対し、どのように影響を与えたのか、またどのように影響を受けたのかを検討する。

## 2. 研究対象

本研究では一級河川である庄内川の河口から28km周辺に存在する湾曲部右岸を観測の対象とした。図-1に

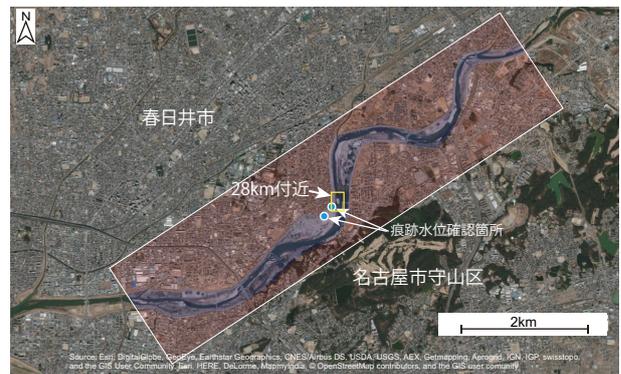


図-1 庄内川 28km 付近の観測対象地域周辺航空写真と白枠の計算対象領域 (赤いハッチ部は河道外扱い)

対象領域の航空写真と後述の計算対象領域を示す。このうち矢印で示された黄枠部分が河口から28km付近の調査対象領域である。ここでは2012年と2013年に堆積土砂の切り下げが行なわれたが、工事後の裸地にクサヨシ、コゴメイ、キシユウスズメノヒエなどを主体とした草本が進出し、微高地を形成していた(図-2)。これに対してスコップを用いて鉛直方向に掘り下げると、細粒土砂が数cmから数十cmの厚さに堆積した層の下から礫分を多く含んだ層が出現する(図-3)。

観測実施日は、2016年の7月29日、8月11日、および11月18日である。7月29日と8月11日に関しては、それぞれ堆積箇所の下流側と上流側での観測を実施し、11月18日に関しては対象領域を1日で観測した。この間、9月20日の出水で低水路内で地形が大きく変化した。図-4は対象近傍の水位流量観測地点における9月の水位変化である。後述のSfM-MVSにより作成した出水前後のオルソ画像に領域分けのインデックスを付与し図-5に示す。堆積域が拡大し右岸と接続したこと(B2領域)、粒径の大きい河床材料による裸地の領域が下流側に向け大きく拡大したこと(B3領域)、それに伴い草本の領域がオルソ画像の堆積域下流側のみ残されたこと(B3領域下流、B4領域)などが確認出来る。

## 3. 研究手法の概要

### (1) 現地観測

観測項目は、土砂サンプルの採取、植生密生度の確認、SfM-MVSのための高所撮影、および標定点とサンプル採取地点の確認のためのGPSによる位置情報の取得であった。土砂サンプル採取に関してはダブルスコップによる表層土砂の採取を実施し、鉛直方向に掘り進めた際に層の変化が明瞭な場合は、各層でのサンプルを採取した。これら土砂サンプルに対して、外部機関(中部土質試験協同組合)にて土粒子の粒度試験(JISA 1204)を実施した。植生の繁茂状況の確認に際して



図-2 庄内川 28km 右岸に見られた微高地



図-3 草本が進出した微高地を形成する細粒土砂層



図-4 2016年9月の志段味観測所での水位変化

は、0.5m あるいは 0.2m 四方の方形枠を用意し、その中の茎の本数を計数した後、代表的なものについて直径の平均値を求めた。これらの面積あたりの本数と直径から、式 (1) により密生度を算出した ( $n_s$ : 検査領域での植生本数,  $D_s$ : 茎の直径,  $S_s$ : 検査領域の辺長)。

$$a_s = \frac{n_s D_s}{S_s^2} \quad (1)$$

7月29日に採取した表層土砂サンプルの代表粒径  $D_{60}$  を密生度で整理した結果が図-6 である。草本域内で採取された密生度が高く粒径が小さいグループと、草本域の間隙の裸地に近い部分で採取された密生度が低く粒径が大きいグループに2分される傾向が確認できる。前者が草本域に堆積した細粒土砂を、後者が河床の主



図-5 庄内川 28km 右岸の堆積域を対象とした 2016年7月29日、8月11日と11月18日の DSM オルソ画像

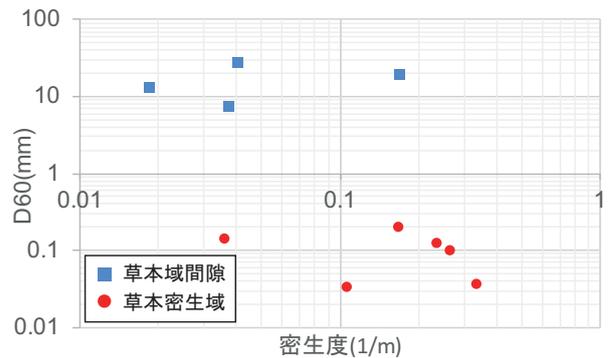


図-6 草本密生度と表層土の代表粒径  $D_{60}$  の関係

たる材料を代表する。それぞれ、図-3 における上層と下層に典型的に示されている。

## (2) ポールカメラ<sup>6)</sup>による高所撮影

高所撮影に際し、本研究ではポールカメラによる撮影を行った。これは遠隔撮影可能なカメラを伸縮ポールにより約 7m 上空に持ち上げて高所撮影を行うものであり、後藤<sup>6)</sup>により断層の形状を取得する際に提案された。本手法を採用した理由として、庄内川 28km 周辺が人口集中地区であり UAV の飛行に申請が必要であったこと、さらに河道上空に送電線があり危険性が高かったこと、などが挙げられる。本手法に関しては航空法の制約を受けず、かつ周辺に対して安全性が高いなど、特に都市河川を対象とした場合に運用上大きな利点を有



図-7 ポールカメラによる撮影の様子

する。本研究では、配線作業用ポール（プロメイト製、E-4867）の先端を加工し、レンズ型カメラ（Sony 製、ILICE-QX1L）を取り付けたものを用いた。撮影に際しては2名で作業を行い、1名がこのポールを持ち上げ、もう1名が手元のリモコン液晶で画角のオーバーラップを確認しながらシャッターを切る方法を取った。一般的な SfM-MVS のモデリングでは中心の対象を取り囲みながら撮影を重ねていくが、本研究では既往研究<sup>6)</sup>を参考に、カメラ保持者がその場で回転をしながら撮影を行い、360度回転したところで次の場所に移動するという手法をとった。1箇所での回転する間の撮影回数は12回から20回の範囲であった。撮影時の様子を図-7に示す。撮影時には、同時に RTK-GNSS（Sokkia 製、GSX2）により複数の標定点（Ground Control Point, GCP）の位置情報を取得した。

### (3) SfM-MVS 解析

上記画像に対し、Agisoft 製 PhotoScan Professional edition (Ver.1.2.6) を使用して SfM-MVS 解析を実施した。解析結果を 0.2m メッシュの Digital Surface Model (DSM) として整理し、GIS (ESRI 社、Arc Desktop10.2) 上で検討を行った。図-5 に示されたオルソ画像は、この DSM から作成されたものであり、航空写真とは異なる（但し背景に航空写真を含む）。11月18日観測に対する解析の例では、使用画像数が603枚、標定点（GCP）が19点、元の DSM の解像度が 2.16cm であった。近傍には標高が公表された距離標が存在せず、各観測日の DSM モデルの標高は、構造物や地形変化が起きていないと考えられる地点について、5m メッシュ DEM の標高値を元に基準化した。SfM-MVS から作成された DSM 上の標高に関し、RTK-GNSS により裸地上でランダムに取得した座標点の標高と比較したものが図-8 である。両者の差異について、標準偏差は 28cm となり、これは航空レーザー測量の精度指針<sup>5)</sup>

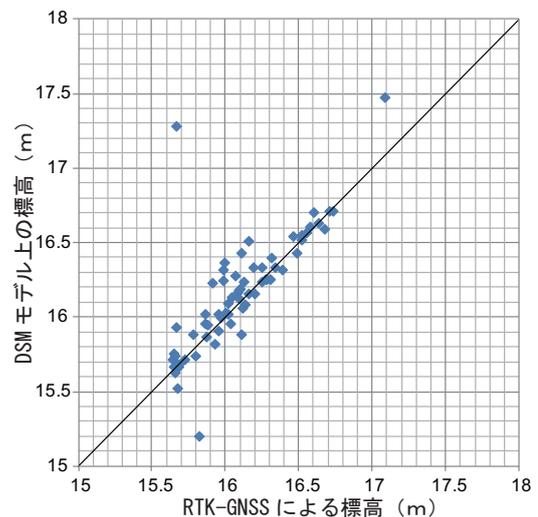


図-8 SfM-MVS による DSM とランダムに採取した RTK-GNSS による標高値の比較 (11/18)

(30cm 以内) に収まるものであった。また7月29日観測領域である堆積域下流側は、当日の水深が浅く水面下の河床が撮影され、微高地間隙の流路の河床標高に関しても値を得ることが出来た。一般的には水面下の標高に関しては屈折率を利用して値を修正することが行われるが<sup>7)</sup>、今回は水深が非常に浅い部分が主体であり、特に修正を行っていない。水面下の標高について RTK-GNSS の値と該地点での DSM の値を比較した場合の標準偏差は 20cm であった。なお、本研究で得られた地形情報は写真画像を用いたものであることから、地表高を示す DEM ではなく、あくまでも植生を含めての表面高さを示した DSM である。後述の解析結果の検討に際してはこの点を考慮の上で議論を進める。

### (4) 数値解析

2016年9月の出水が与えた影響を考慮するため、リーチスケールでの流れ場と河床変動の状況を数値計算により検討した。前述の SfM-MVS による DSM は対象の範囲が狭く、そのまま数値解析の地形条件として用いるには適さない。このため国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所より提供された、H21年度実施の航空レーザー測量による 5m メッシュの DEM を地形として用いた。計算領域を図-1 に白線で示す。流れと河床変動の解析には、iRIC<sup>8)</sup> に含まれる平面 2次元の河床変動計算ソルバーである Nays2D を用いた。流量に関しては、該当地域における対象期間の流量速報値が一般に公開されておらず、入手可能な情報からの推測が必要であった。本研究では、近傍の志段味観測所の水位情報（水文水質データベース<sup>9)</sup>）から、2016年9月20日のピーク流量を算出し、計算時の条件として用いた。その際、水位と流量が共に提供されている比較的最近（2014年3



図-9 流量 1500m<sup>3</sup>/s を与えた場合の流の解析結果を水深で示したもの（マーカーは水際の痕跡位置）

月)のデータから H-Q 式 ( $Q = 58.52(H - 0.20)^2$ ,  $Q$ : 流量 m<sup>3</sup>/s,  $H$ : 水位 m) を作成し, 流量の算出に用いた. 今回は, 2016 年 9 月 20 日 20 時のピーク水位 5.38m から, 流量約 1500m<sup>3</sup>/s を得た. 本解析では, 助走期間に徐々に解析対象の流量まで流入流量を増加させ, 規定の流量に達した後の 2 時間の河床変動の傾向を計算した. 粒径は現地観測での粒度分布を参考に 10mm の均一粒径として与え, 粗度は領域全体で 0.03 とした. 格子数は流下方向に 734, 横断方向に 180 であり, 1 辺を 10m とする矩形格子とした. 図-1 の白線内に赤くハッチされた部分はマスク処理により計算対象外とした.

流量 1500m<sup>3</sup>/s を与えたケースでの計算終了時の水深のコンター図を図-9 に示す. この結果からは, 出水時の水面が高水敷を満たし, 堤防法面に到達していたことが示されている. 図-9 中に, 現地の漂着物位置から推測したピーク時の水位痕跡をマーカーで示したが (図-1 内マーカーと対応), ほぼ計算結果の水際と一致しており, 計算結果が妥当であったと考えられる.

#### 4. 解析結果に基づく検討

##### (1) SfM-MVS 解析結果

DSM の出水後モデル (11/18) の標高から出水前モデル (7/29 と 8/11 を合成) の標高を差し引き, コンター図を得た (図-10). 図-5 との比較からは, 出水前の時点で草本が繁茂している領域に関しては表面標高が低下し, 堆積域の右岸側や下流側に存在していた 2 次流路状の部分 (B2 領域など) に関しては標高が上昇したことがわかる. 草本が繁茂した領域での標高の低下に関しては, 単に植生が出水時に流出したとは考え難い. 実際に 11 月 18 日の現地観測では, 30cm 以上の細粒土砂層が存在する上に, さらに礫を多く含む層が堆積した箇所を目視している. これより, 図-10 植生繁茂域での標高の低下は草本の倒伏が見かけ上現れた結果であり, 倒伏した草本が細粒土を保持したまま, その

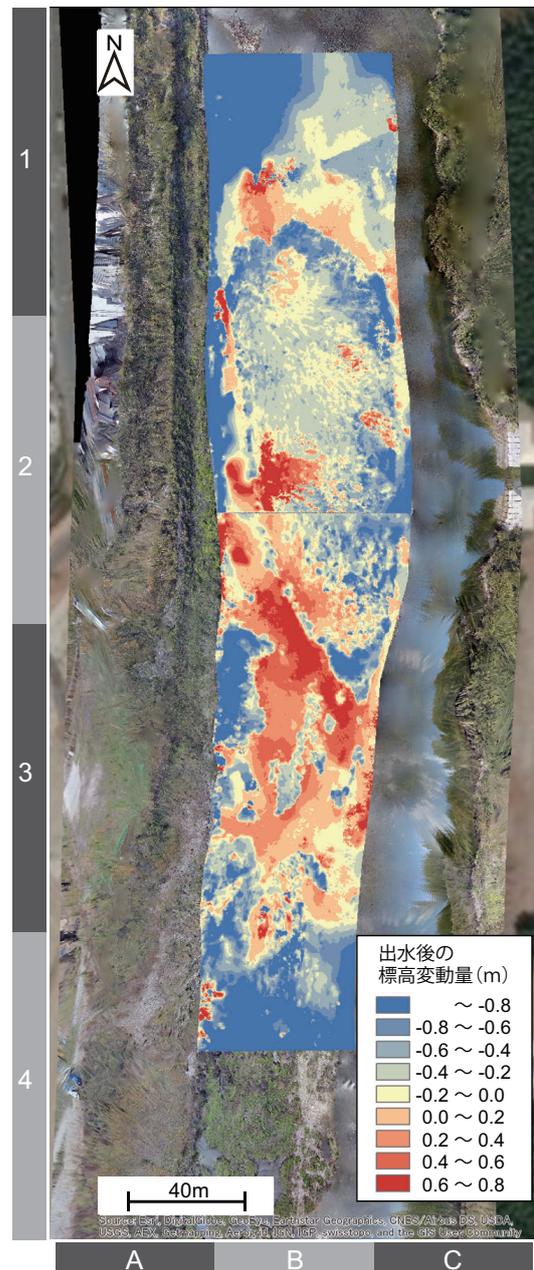


図-10 2016 年 9 月 20 日の出水前後での DSM の標高差

上に礫を多く含んだ土砂が堆積したと考えられる. このことは, 出水前に草本が少なかった場所に対して単純に堆積傾向が現れていることから推測出来る.

##### (2) 河床変動数値解析結果

図-11 に流量 1500m<sup>3</sup>/s での河床変動解析結果を表すコンター図を示す. この結果と図-5 を比較すると, 9 月 20 日の出水後に砂州が大幅に拡大した領域 (B2 領域) が, 河床変動解析に置ける堆積傾向にある領域とほぼ一致することがわかる. また図-5 における右側 11 月 18 日のオルソ画像に関し, 拡大した砂州の下流側において草本の群落が残存している領域が (B3 領域下流), 出水時にはむしろ浸食傾向にある領域であり, それに反して草本による微高地が維持されたことがわかる.

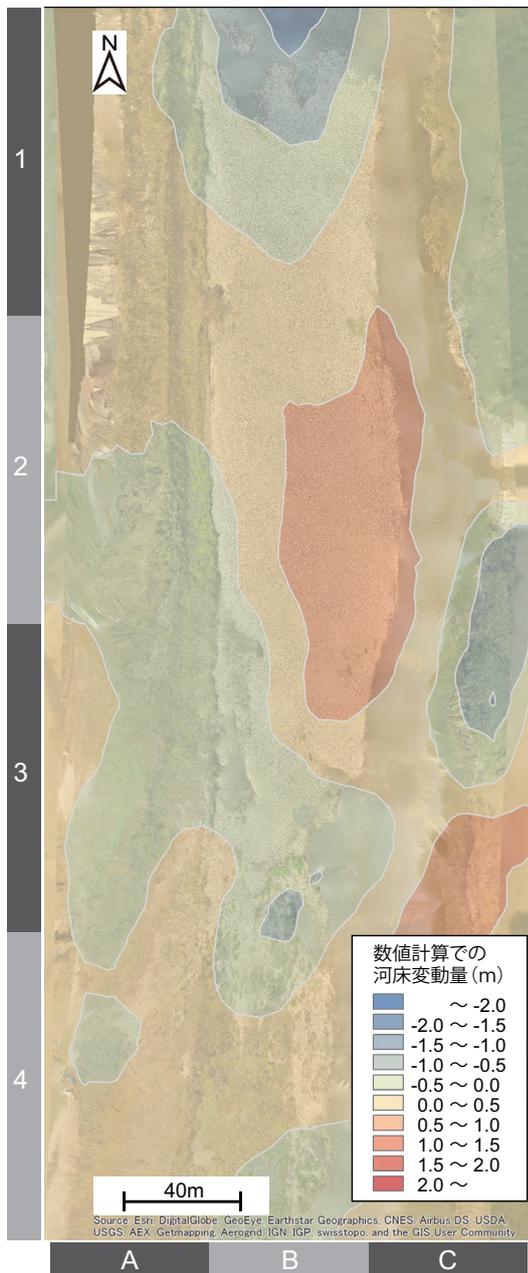


図-11 流量  $1500\text{m}^3/\text{s}$ 、単一粒径  $10\text{mm}$  を与えた場合の数値解析結果における河床変動量

### (3) 河床地形の実測での変化と数値解析結果の比較

DSM の出水前後の比較 (図-10) と数値解析の結果 (図-11) から、草本進出域のうち、出水時の河道特性から堆積傾向にある領域に関しては草本が完全には流出せず、その上に土砂が堆積していったこと、浸食傾向にある領域に関しては、草本群落が出水期間を通して流出すること無く、出水前に補足した細粒土砂を含んだまま残存したことがわかる。また草本群落の進出によって形成された微高地に囲まれた 2 次流路に関しては、出水後に周辺の裸地と同じ標高に埋め戻されており、このような 2 次流路が存在した場合は一度の出水で大量の土砂を堆積させる傾向にあることがわかる。

## 5. まとめ

本研究では、庄内川 28km の出水前後の微地形の変遷と草本域の関係について検討した。その際に、微地形情報を簡易に得るためポールカメラを用いた SfM-MVS を適用したほか、河道の水理的特性を検討するため既往の 5mDEM を用いた平面 2 次元河床変動解析を実施した。結果から、上記手法により解像度の高い地形情報を得ることが可能であったこと、河床変動解析の結果が領域全体の地形変化の傾向を良く表し得ることが示された。また両者の比較により明らかとなった植生のもたらす特徴として、河道の特性から堆積傾向にある草本域では、植生が以前に捕捉した細粒土砂の上に粒径の大きい土砂が新たに堆積していること、さらに侵食傾向にあるとされた領域でも草本により形成された微高地は流失せず、一度定着した細粒土砂が出水期間中も保持された状況が確認された。

謝辞:本論文では、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。国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所から測量結果を提供頂いた。また片桐浩司氏(当時:国立研究開発法人土木研究所,現:秋田県立秋田中央高等学校)から現地の植生に関しアドバイスと示唆を頂いた。記して感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 藤田光一, MOODY, J.A., 宇多高明, 藤井政人: ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小, 土木学会論文集, No. 551 /II-37, pp.47-62, 1996.
- 2) 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.
- 3) 原田守啓, 永山滋也, 大石哲也, 萱場祐一: 揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, L1171-L1176, 2015.
- 4) 大石哲也, 高岡広樹, 原田守啓, 萱場祐一: 河道横断面形状の設定と草刈りの有無が植生変化に与える影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集(平成 26 年 9 月), pp.267-268, 2014.
- 5) 国土交通省河川局: 航空レーザ測量による河道及び流域の三次元電子地図作成指針(案), 2005.
- 6) 後藤秀昭: SfM(Structure from Motion)-MVS(Multi-Video Stereo) 技術を用いた変位地形の数値表層モデルの作成と変位量の計測 -1970 年代撮影の空中写真およびポールカメラの写真を用いた検討-, 活断層研究, 42 号, pp.73-83, 2015.
- 7) 赤松良久: ドローンを用いた中小河川の環境モニタリング法の開発, 平成 28 年度 土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会 2016 in 香川 発表概要集, pp.47-48, 2016.
- 8) iRIC software: <http://i-ric.org/ja/>
- 9) 水文水質データベース: <http://www1.river.go.jp/>

(2017. 4.3 受付)