

流路変動の発現による 河道の危険性の物理的推定法の確立

新潟大学 災害・復興科学研究所 准教授 安田浩保
新潟大学 災害・復興科学研究所 技術補佐員 五十嵐拓実

概要：

本研究では、流路変動の発現による河道の危険性の物理的推定法の確立を目的に、被災実績がある新潟県能生川を対象にして、本推定手法の適用性について評価した。県などの自治体が管理している中小河川は、財政的な事情により河道の保守点検に必要となる地形情報や水文情報が直轄河川に比べて圧倒的に不足している。本研究では、このような定量情報が不足している中小河川においても、客観的な指標に基づいて流路変動が生じうる河道内脆弱点を推定するための 2 つの物理的推定法を開発した。一つ目は、有効無次元掃流力の偏差を用いることで能生川の被災箇所を推定が可能であることを示した。二つ目は、有効無次元掃流力の分布の特徴を統計量を用いて分析し、正規分布からの乖離量が大きいと流路変動による被災の可能性が高い河道状態であることを示した。2 つの推定手法の組み合わせにより、河道脆弱区間の危険性が推定でき、事業費が限られる中小河川の保守点検への貢献が期待できる。

キーワード：河道内脆弱点、能生川、有効無次元掃流力、歪度、 D 値

1. はじめに

既往最大を上回るほどの豪雨によって堤防や護岸などの河川構造物への被害が多発している。中でも、川表側の侵食による河岸欠損やそれに伴う破堤が深刻な問題となっている。平成 30 年西日本豪雨では破堤が危惧される深刻な河岸欠損が県などの自治体が管理する河川で相次いだり。しかも、川表側の侵食やそれを要因とした破堤は洪水時の水位が計画高水位に達しない場合でも生じる。このような計画高水位以下の水位で被災が生じる河道内脆弱点への対策には、その区間の推定などの事前の保守点検ができることが望ましいが、樋門などの河川構造物や堤体の保守点検に比べると技術の体系化は進んでいない。自治体が管理する中小河川は、国の直轄河川の総延長の約 10 倍に達するが、財政的な事情により地形情報や水文情報が大幅に不足し、保守点検をより一層困難にさせている。

出水時における河岸欠損や護岸の転倒や破損は、川表側の河床変動または護岸への流体力の作用によって引き起こされる。著者らの一人は、平面 2 次元の水理解析により洪水中における摩擦速度の積分値を算定し、これが河道内の脆弱区間の判定指標となることを提案した²⁾。重枝ら³⁾も彦山川における護岸被災の説明変数として摩擦速度の積分値が有効であることを報告している。これらの研究では具体的な摩擦速度の積分値の閾値が不明であったが、その後、河道内の各地点における摩擦速度の積分値の偏差が平均値より標準偏差以上となる箇所と被災箇所が対応することが明らかにされている⁴⁾。この摩擦速度の積分値

の偏差を判定指標にすることは河道内脆弱点の推定に有効である。一方で、摩擦速度だけでは護岸の転倒を含む河岸欠損を引き起こす河床変動に至る物理状態についての説明はできない。また、上述の河道内脆弱点の推定法は湾曲部での適用性に優れることが報告されているが、交互砂州のような発達した底面起伏を有する直線的な河道における有効性は不明である。

本研究では、流路変動の発現による河道の危険性の物理的推定法の確率のために以下を実施した。はじめに、河岸欠損等の被害が生じた直線河道に対する本研究で提案した推定法の適用性について議論した。次に、河岸欠損を誘発する交互砂州上の流況に着目し、その統計的な特徴に基づき被災の可能性が高い河道状態を判定できるかどうかについて検討した。

2. 能生川および平成 29 年出水時の被災状況

能生川は新潟県糸魚川市を流れる新潟県管理河川である。河道延長が約 20km、平均的な流路幅が約 70m、平均河床勾配が 1/80 の急勾配河川である。河道形状は上流から河口に至るまで緩やかに湾曲はしているものの、全体的に一般的な流路幅を有する直線河道である。

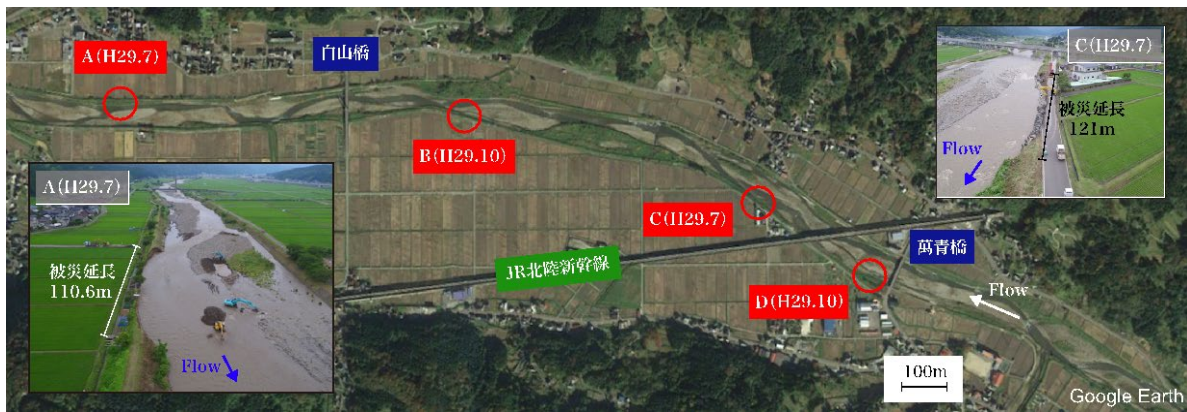


図-1 平成 29 年 7 月の豪雨および同年 10 月の台風の出水による能生川の被災状況

能生川は平成 29 年 7 月の豪雨と同年 10 月の台風 21 号による出水時に河岸欠損などの被害が生じた。新潟県が復旧対象に認定した被災箇所は約 10km の区間中に 8 カ所に上った。図-1 に赤丸で示したように、A 地点では被災延長が 110m に至る河岸欠損が発生し、破堤の危険性を孕む危険な状態に至った。また、C 地点では被災延長が 121m に至る河岸欠損が発生し、河道と並走する道路が流出する被害が生じた。

今次の被災の特徴としては、最大水位が計画高水位よりも低かったにも関わらず、僅か 10km 以内の区間において多数の箇所では被害が生じたことが挙げられる。これらの被災要因は発災当時の観測資料が不足しているため、十分に明らかにされていない。その後の対策としては原形復旧が行われている。

3. 有効無次元掃流力の偏差を用いた河道内脆弱点の推定

(1)河道内脆弱点の推定方法の概要

先述したとおり、著者らはこれまでに摩擦速度の積分値を用いた河道内脆弱点の推定を試みてきた。この摩擦速度の積分値の偏差を判定指標にすることは河道内脆弱点の推定に有効である。一方で、河岸欠損を引き起こす河床変動に至る摩擦速度の具体的な規模は現状では不明である。そこで、本研究では、無次元掃流力を限界無次元掃流力で除した値(以下、有効無次元掃流力と称する)を用いて、河床変動の有無の判定指標とすることにした。無次元掃流力は摩擦速度の従属変数であるため、既往の研究で示された被災箇所との相関は高いことが推測される。また、交互砂州のような底面起伏が発達した河川では、交互砂州が洪水流を偏倚させるため、流体力の岸沿いの偏在を引き起こすと考えられている。本研究では、この点に着目して、交互砂州によって生じた洪水流の偏倚の状態と有効無次元掃流力の対応関係について調べた。

(2)対象河川の地形条件

本研究は先述した能生川(新潟県)を対象とした。能生川のような県などの自治体が管理する河川では、平面的な流況を把握するための平面 2 次元の水理解析に必要な地形情報が不足している。本研究では、国土地理院の電子国土 web⁵⁾として一般公開されている DEM データを用いた。本研究の水理解析では、平成 29 年 7 月豪雨の前年の平成 28 年 10 月 1 日に測量された DEM データを用いた。対象区間は河岸欠損が生じた A と C 地点を含む河口から 1.5km から 5.0km とした。同区間は平成 29 年の 2 度の出水で被災した 8 箇所のうちの 4 箇所を含んでいる。また、交互砂州の有無が脆弱区間の推定に及ぼす影響を調べるために、河道内の各断面毎の平均河床位に置き換えた平坦地の地形データを作成し、2 つの河床地形を用いて水理解析を実施した。

(3) 水理解析モデルと計算条件

水理解析には iRIC⁶⁾に同梱されている平面 2 次元の流れと河床変動のソルバーである Nays2D を用いた。上流端境界条件は流量、下流端境界条件は等流計算より求めた水位を与えた。粗度係数は粒径(平均粒径:8cm)から求まる Manning-Strickler 式から算出した 0.027 を全体に一律に与えた。また、本解析では一般化座標における計算格子を用いて、5m 間隔で計算点を配置した。一般化座標における計算格子は計算点の配置によっては安定な解を得ることができない。そこで、星野・安田⁷⁾が提案した方法に基づいて計算点配置を行った。県などの自治体が管理している河川では水文情報も不足している。能生川においても流量観測は実施されていないため、上流端境界条件に与えた流量は以下の手順で推定した。まず、平成 29 年 7 月の出水時に A 地点で河岸欠損が発生した時刻に撮影された写真から水位を判読した。次に、流量を数パターン変化させた固定床かつ定常条件の水理解析を行い、算出した水位が写

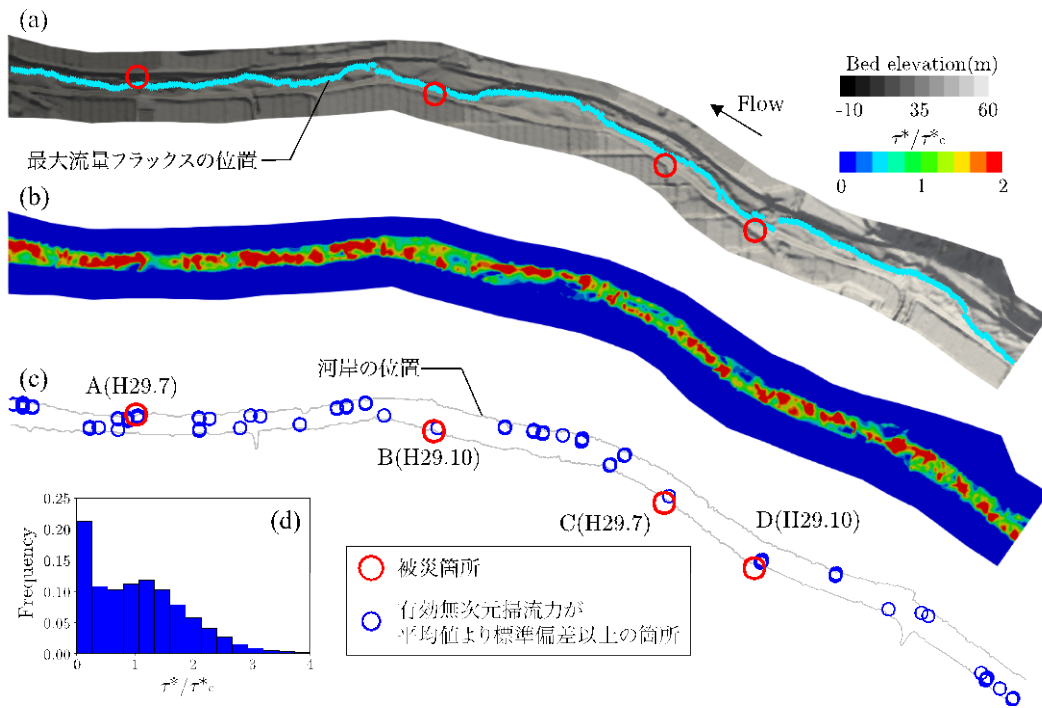


図-2 能生川における(a)平成 28 年の河床形状, (b)有効無次元掃流力の分布, (c)有効無次元掃流力の偏差の分布, (d)有効無次元掃流力の頻度分布

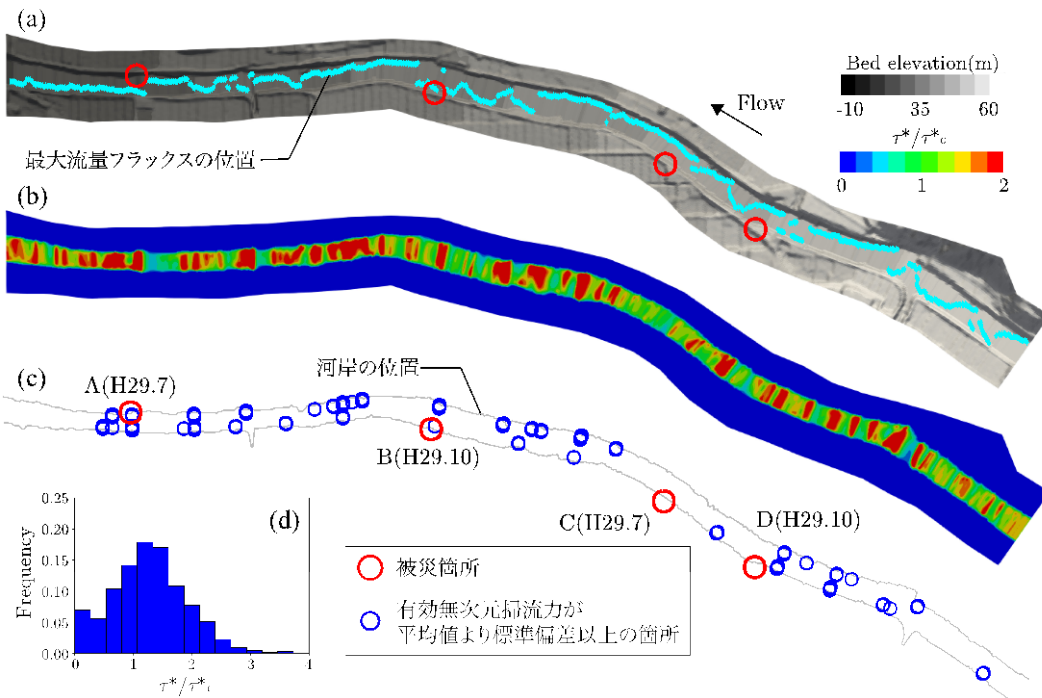


図-3 能生川における(a)仮定の平坦床の河床形状, (b)有効無次元掃流力の分布, (c)有効無次元掃流力の偏差の分布, (d)有効無次元掃流力の頻度分布

真から判別した水位に最も近づいた時の $250\text{m}^3/\text{s}$ を平成 29 年洪水の最大流量とすることにした。

(4) 河道内脆弱点の推定

a) 評価指標

河道内脆弱点の推定にあたり、既往の研究⁴⁾で用いられた摩擦速度だけでは河岸欠損を引き起こす河床変動に至る

物理状態が説明できないため、本研究では河床上の流砂の有無が分かる有効無次元掃流力の偏差を用いた。有効無次元掃流力は各計算点の流下方向と流路幅方向のエネルギー勾配に基づいた無次元掃流力を求め、それを限界無次元掃流力で除して算出した。

表-1 能生川と模型水路の水利条件の諸元

	能生川 (H29.7)	模型水路
流量 (m^3/s)	250	0.00087
流路幅 (m)	70	45
河床勾配	1/80	1/70
川幅水深比 ($BI^{0.2}/h$)	29.4	29.4
無次元掃流力	0.094	0.075

図-2 に平成 28 年の河床形状を用いた計算結果、図-3 に仮想の平坦床の河床形状を用いた計算結果を示した。図中の各図は、(a)水理解析に用いた河床形状、(b)有効無次元掃流力の分布、(c)有効無次元掃流力の偏差の分布を示した。流れの偏倚を把握するために、(a)に水理解析より求めた各横断面における最大流量フラックスの位置を水色の丸印で示した。(c)の有効無次元掃流力の偏差は河岸よりも内側の値を用いて算出した。河岸の位置は水理解析により計算した水深を用いて、水際の位置を河岸の位置と定義した。(c)の赤丸は平成 29 年の 2 度の出水で河岸欠損等の被害が生じた箇所、青丸は有効無次元掃流力が平均値より標準偏差以上の箇所を示している。さらに、有効無次元掃流力の分布の全体での傾向を把握するために(d)有効無次元掃流力の頻度分布を描画した。

b) 河道内脆弱点の推定結果と考察

図-2 の(a)河床形状を見ると、平成 28 年の河床には交互砂州が形成されていることが分かる。最大流量フラックスの位置は河岸沿いに集中し、上流から下流にかけて左右交互に切り替わっているため、交互砂州によって流れが左右に偏倚させられていることが分かる。(b)有効無次元掃流力の分布を見ると、滞筋とされる最大流量フラックスの位置において、流砂が生じる 1 以上の値を示していることが分かる。一方で、交互砂州の堆積部においては有効無次元掃流力が 1 以下の値となっており、流砂が生じない状態を示している。(d)有効無次元掃流力の頻度分布を見ると、ヒストグラムが左に偏っているため、有効無次元掃流力が 1 以下の箇所が河道全体で占める割合が高いことが分かる。この有効無次元掃流力の分布から偏差を算出した(c)を見ると、赤丸で示した 4 箇所の被災箇所における有効無次元掃流力はいずれも平均値より標準偏差以上という共通点が見られた。なお、平均値より標準偏差以上の箇所にも関わらず被災が生じなかった箇所については、発災後の現地調査の結果、被災箇所に比べて護岸整備が進んでいたことを確認している。

図-3 の(a)に示した最大流量フラックスの位置を見ると、各横断面毎に河床形状が流路幅方向に一樣であるため、流れの偏倚が平成 28 年時に比べて小さい。ほぼ直線河道であるが、緩く河道が湾曲しているため、外岸側となる右岸側に最大流量フラックスが集中している傾向である。(b)有効無次元掃流力の分布を見ると、流下方向に分布は持つものの、流路幅方向の分布はほぼ一樣であることが分かる。

(d)有効無次元掃流力の頻度分布を見ると、釣鐘型のヒストグラムを示しており、平均値周りに集中した分布であることが分かる。(c)有効無次元掃流力の偏差の分布を見ると、赤丸で示した 4 箇所の被災箇所のうち下流側の 2 箇所は平均値より標準偏差以上であるが、上流側の 2 箇所は異なる結果であった。

以上の結果より、有効無次元掃流力の偏差を用いても著者らの既往の研究⁴⁾と同様に被災箇所を推定できることが示された。また、交互砂州が形成された平成 28 年の河床形状と仮想の平坦床にした河床形状を比較した結果、交互砂州が形成された平成 28 年の河床形状の方が河道内脆弱点の推定精度が高かった。両者の違いは交互砂州の有無による流れの偏倚の有無である。少なくとも能生川においては、河道の平面形状よりも、交互砂州による流れの偏倚が被災を招いたことが推察される。

4. 統計量を用いた河道状態の把握

実河川は河岸材料が不均一であったり、護岸の整備率が同じ河川内でも均一ではないことが多い。そのため、河岸の強度は空間的に異なり、河道内被災の現象には不確実性が内在する。このような現象に対し、河道の保守点検を効果的に行うためには、再現性が担保された科学的な方法により河道状態を把握できることが望ましい。本研究では、河岸欠損を誘発する交互砂州上の有効無次元掃流力の分布に着目し、その分布の特徴から河道状態を判定できるかどうかについて検討した。前述の通り自治体が管理する実河川で検証するには、比較する各年代ごとの地形情報が不足している。このため、本章では模型実験を実施して、交互砂州の発達過程ごとの底面情報を取得し、その後、底面形状ごとに水利計算を行って有効無次元掃流力を算出し、その分布の特徴を統計量として整理した。

(1) 模型実験の概要

実験に用いた模型水路は全長 9m、水路幅 45cm の直線矩形断面水路である。河床材料には代表粒径 0.76mm の東北硅砂 4 号を用いて、水路床から高さ 5.0cm で均一に敷き詰めた。水利条件は平成 29 年 7 月出水時における能生川を対象とした。交互砂州のような河床波は既往の研究から主に川幅水深比、無次元掃流力が支配要因であると考えられている。本実験では、能生川での川幅水深比と無次元掃流力に近くなるように流量、水路床勾配を設定した。能生川および模型水路における水利条件の諸元を表-1 に示した。黒木・岸⁹⁾の領域区分図を参考にすると、本実験条件は複列砂州の発生領域に該当する。なお、川幅水深比は一致させることができたが、実験水路の制約上、無次元掃流力は実河川と模型水路で一致させることはできなかった。また、上流端からの給砂は本実験では行っていない。通水時間

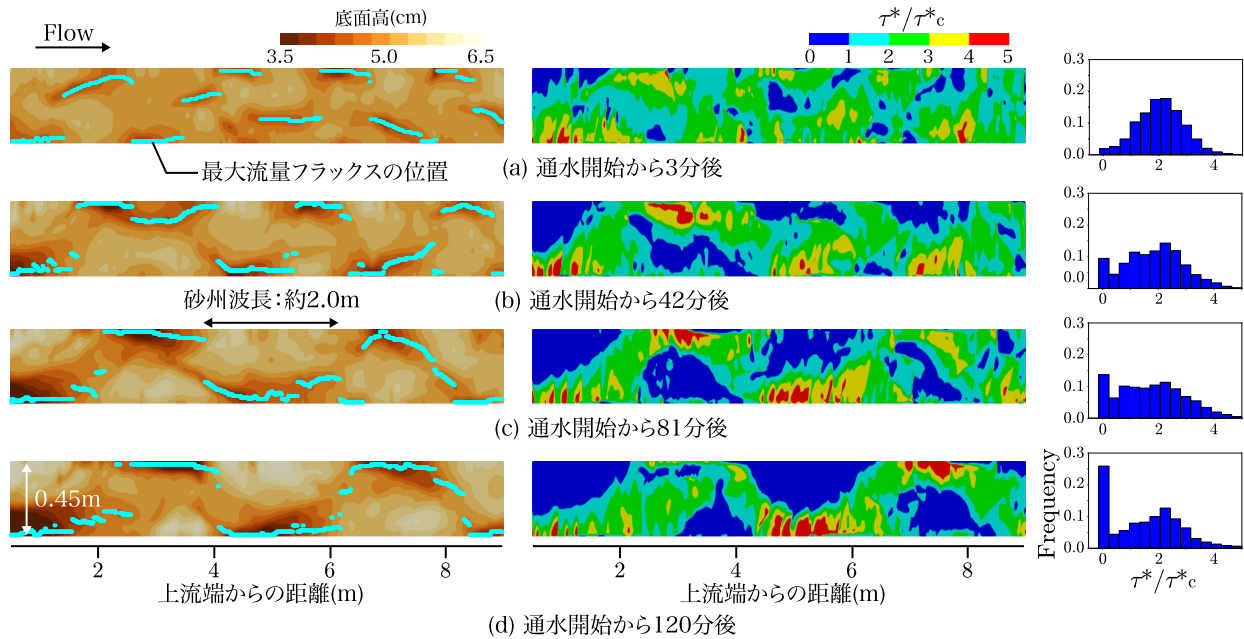


図-4 計算結果と数値計算の計算結果 (左図: 底面形状, 中図: 有効無次元掃流力の分布, 右図: 有効無次元掃流力の頻度分布)

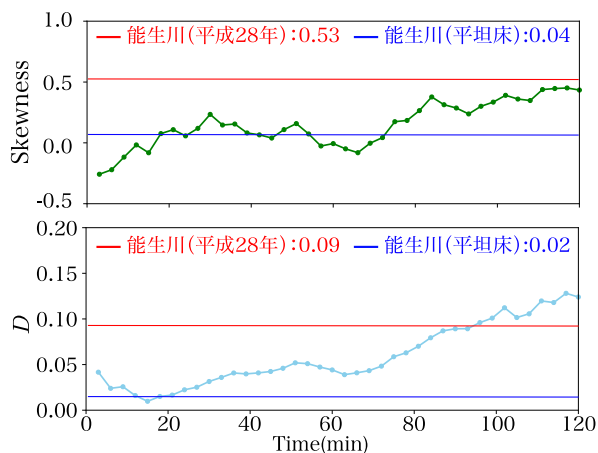


図-5 有効無次元掃流力の歪度と D 値の時間変化

は同条件の予備実験を行なった結果を踏まえて、交互砂州が十分に発達した通水開始から2時間までとした。

(2)底面起伏の計測方法

本実験では、時刻毎に変化する底面起伏を計測するために星野ら⁹⁾が開発したSTを用いた。STは通水中における底面と水面を同時に計測する手法である。STの計測原理と計測精度は別紙9)を参照されたい。このSTを用いて通水開始から3分間隔で計測を行った。計測の空間分解能は流下・流路幅方向ともに1cm間隔に設定した。計測区間は上流の固定堰を原点に、0.5mから9.0mの区間を計測した。

(3)水理解析の概要

水理解析は、前章における能生川の水理解析と同様にiRICに同梱されているNays2Dを用いた。水理条件は模型実験と同じである。計算格子にはSTによって計測された各時刻毎の底面高を用いて、流下方向と流路幅方向どちらも1cm間隔の計算格子を作成し、各時刻毎に固定床水理解析を行った。計算時間は水位や流速が十分に定常に到るまで実施した。

(4)計測結果と計算結果

図-4の左図に底面高の計測結果。中図に有効無次元掃流力の計算結果、右図に有効無次元掃流力の頻度分布を示した。底面高は水路床からの高さを表している。また、流れの偏倚を把握するために底面高のコンター図に各横断面における最大流量フラックスの位置を水色の丸印で示した。

底面高を見ると、通水直後から底面起伏が発達し、通水開始から3分後には複列砂州と見られる底面起伏が形成された。その後、通水を継続すると通水開始から42分後には複列砂州から交互砂州に遷移したことが分かる。交互砂州の形成後も砂州波長が発達を続け、通水開始から81分後には全区間で約2mの砂州波長の交互砂州が形成され、最終時刻まで維持された。この砂州波長を流路幅で無次元した波長川幅比は4.4である。図-1の航空写真から能生川の波長川幅比を算出した結果、対象区間においては約3.0から6.5程度であった。従って、本実験で形成された交互砂州の波長川幅比は実河川の値に近い、実河川の河床形状を再現していると判断した。

次に、最大流量フラックスを見ると、通水開始から 3 分後は最大流量フラックスは流心付近にも位置しているため、流れの偏倚は生じていない。通水開始から 42 分後には左右の側壁沿いに流れが偏倚し始め、通水開始から 120 分後には側壁沿いに偏倚したことが分かる。

最後に、通水開始から 3 分後においては複列砂州が形成されているが、水路内において有効無次元掃流力は概ね一様分布であることが分かる。同時刻の頻度分布は 2 の値周辺に集中しており、釣鐘型のヒストグラムとなっている。交互砂州へと遷移した通水開始から 42 分以降は堆積部が寒色系、洗掘部が暖色系に着色されており、空間的に有効無次元掃流力の分布が偏在したことが分かる。頻度分布を見ると通水開始から 42 分以降は、0 付近の値が全体に占める割合が増加したため、左側に偏った形状へと徐々に変化したことが分かる。

以上の結果から、交互砂州の形成に伴って、流れの偏倚が生じるとともに有効無次元掃流力の分布も偏在することが確認された。

(5)実河川と模型水路の統計量の比較

前節の結果から交互砂州の形成過程で有効無次元掃流力の頻度分布の形状が釣鐘型から左側に偏った形状へと変化したことが分かった。この頻度分布の変化の特徴を定量評価するために、歪度と Kolmogorov-Smirnov 検定における D 値を用いた。歪度は頻度分布の左右の偏りを評価する指標である。また、 D 値は 2 つの分布の適合性の評価する指標である。釣鐘型の頻度分布は正規分布に近いことから、本研究では D 値を用いて頻度分布の正規分布からの乖離量を評価指標に用いた。

図-5 の上図に有効無次元掃流力の歪度、下図に D 値の時間変化を示した。また、前章における能生川の計算結果から歪度と D 値を算出した。赤線は平成 28 年の河床形状、青線は平坦床の条件における各統計量の値を示した。

歪度の時間変化を見ると、通水直後は負の値であったが、通水開始 20 分後から 70 分後までは 0 前後の値を推移していることが分かる。その後は 0.5 近くまで増加した。 D 値の時間変化を見ると、通水開始から 70 分後までは 0.05 以下を推移していたが、その後は増加傾向に変化したことが分かる。つまり、歪度と D 値の時間変化から、通水開始から 70 分後以降に正規分布から大きく乖離した頻度分布に変化したことが分かった。

これらの模型水路の値と能生川の値を比較すると、能生川においても平坦床の時は正規分布に近く、一方で、交互砂州が形成された河床形状の時は正規分布から乖離した

頻度分布であったことが分かった。

上記の模型水路における統計量との比較から出水前の能生川は十分に発達した交互砂州であったことが推察される。歪度と D 値を用いることで河岸付近に流体力が集中かつ河床変動が生じやすく、被災の可能性が高い河道状態を推定できることが示された。

5. おわりに

本研究は流路変動の発現による河道の危険性の物理的推定法の確立を目的に、河道内脆弱区間を 2 つの推定法を用いて推定した。一つ目は、有効無次元掃流力の偏差を用いることで、能生川の被災箇所が推定可能であることを示した。既往の研究では湾曲部を有する河道を対象としてきたが、能生川のような直線河道の河道内脆弱区間が推定できた。二つ目は、有効無次元掃流力の分布の特徴を統計量として整理し、正規分布から乖離すると河道内被災の可能性が高い状態となり、それを判定しうる統計量について示した。本研究で用いた 2 つの推定法の組み合わせにより、河道内脆弱区間の危険性が推定でき、事業費が限られる中小河川の保守点検への貢献が期待できる。

参考文献

- 1) 科研費・特別研究促進費平成 30 年 7 月豪雨による災害の総合的研究報告書,2019 年 4 月
- 2) 安田浩保,高橋玄,酒井公夫,竹村仁志:五十嵐川における河川構造物への流速の作用時間に着目した被災要因の分析,河川技術論文集,第 18 巻,pp.245-250,2012.
- 3) 重枝末玲,秋山一郎,平松裕樹,松本拓磨:平成 24 年豪雨災害時の彦山川の護岸・河岸被災プロセスの検討,土木学会論文集 B1(水工学),Vol.71,pp.1399-1404,2015.
- 4) 安田浩保,五十嵐拓実,安田晃昭,中土紘作:中小河川における河道内脆弱点の水理学的推定の試行,河川技術論文集,第 22 巻,pp.327-322,2016.
- 5) 国土地理院,<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>
- 6) 北海道河川財団,<http://i-ric.org>.
- 7) 星野剛,安田浩保:自然河川の水理解析における一般座標格子が有する打ち切り誤差の理論的評価とその緩和手法,土木学会論文集 A2(応用力学),2013.
- 8) 黒木幹男,岸力:中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究,土木学会論文報告集,第 342 号,pp.87-96,1984.
- 9) 星野剛,安田浩保,倉橋将幸:交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発,応用力学論文特集号,2017.