

# 流路変動の発現箇所と発現時期の科学的な推定のための尺度の構築

新潟大学 災害・復興科学研究所 准教授 安田浩保  
(新潟大学大学院自然科学研究科 博士3年 石原道秀)

## 概要：

本研究では、大局的と局所的の2つの複層的な観点から砂州河川における危険箇所の推定手法の構築を試みた。まず、大局的な推定法である水深波長比に基づいた河床波の区分を用いることで、河川全体の中で河岸欠損や侵食破堤などの危険性の高い区間が把握できることがわかった。次に局所的な推定法である摩擦速度の偏差に着目したエネルギー集積法によって、前述した区間の中で河岸欠損や侵食破堤が発生しうる箇所を推定した。その結果、同推定法の適用時に河道内の滞筋や砂州などの地形が計算に十分に反映できた時に推定精度が高いことがわかった。

キーワード：多層的推定法，洪水リスクマネジメント，流路変動，河岸侵食，交互砂州

## 1. はじめに

人口居住地が多い中流域では河床が堆積と洗掘を繰り返す砂州が明瞭に発達していることが多い。近年になり、これが洪水流を偏心させ、河岸欠損や河表側からの堤体の侵食がたびたび発生している<sup>1)</sup>。しかし、著者らの知る限り、このような砂州河川における河岸欠損や堤体侵食に至るような危険箇所の推定法は未確立のようである。

上記の河岸欠損や侵食破堤を予防するため、著者らはエネルギー集積法<sup>2),3),4),5)</sup>と称する流れのエネルギーの偏差により危険箇所を推定する手法を開発してきた。複数の河川に対してエネルギー集積法を適用し、いずれの河川の危険箇所も良好に推定できることを示している。エネルギー集積法を適用するためには平面二次元の水利計算が必要である。県などの自治体が管理する河川の総延長は9万km強に及ぶが、これらの河川では、水利計算で必要となる河道の標高データと水文データのどちらも乏しい。一方で、近年では、UAVが普及してきて個人レベルでもそれほど広範囲でなければDEMデータの取得が可能となり、水利計算に必要なデータのうち、計算格子に用いる標高データの欠如の問題解消の見通しは立ってきている。

また、洪水時の河道変形の発生を簡便に推定する方法として、著者の一人は、微小振幅波理論において鉛直方向の流体運動の規模を規定する水深波長比を用いること

を提案している<sup>6)</sup>。水深波長比の算出はエネルギー集積法と異なり、一次元の水利計算によって簡便に算定できるのが特徴である。

上述の通り、著者らは原理の異なる2種類の砂州河川の危険箇所の推定法を開発している。両推定法の主な相違点は、推定に要する計算負荷である。水深波長比に基づく推定法は、エネルギー集積法に比べて計算負荷が小さい。両推定法の特性を踏まえると、標高データなどが乏しい河川における危険箇所の推定の手順を以下のように考えることができる。まず、簡便に算定できる水深波長比を用いて洪水時に河道変形の危険性が疑われる区間全体を俯瞰的に評価する。次に、水深波長比に基づき洪水時に河道変形が活発になる可能性が高い区間を対象とし、UAVなどで限定的にDEMデータを取得した上でエネルギー集積法により危険性の高い箇所を推定する複層的な推定法が考えられる。

本研究では、上記の2手法の組み合わせにより特に砂州河川における河岸欠損や堤体侵食の危険性を複層的に推定する手法について論じる。また、本研究では、エネルギー集積法と水深波長比の適用に当たって必要となるデータの解像度、種類が異なる河川でも同様の結果が得られるかについて、能生川と魚野川の2つ河川を対象として検証した。

## 2. 危険箇所の推定手法

本研究では、水深波長比を用いる推定法を大局的な視点での推定法、エネルギー集積法を用いる推定法を局所的な視点での推定法として各々を位置付けることとした。両推定法の概要は以下の通りである。

### (1) 水深波長比

河岸欠損や侵食破堤の要因となる砂州の発生の有無は、河床面の安定性解析によって川幅水深比が支配的なパラメータであることが理論的に示されている<sup>7),8)</sup>。国内では黒木・岸が提案した領域区分図が頻用され、河川の大局的な性質を理解するのに有用な指標とされている。川幅水深比が砂州の発生の有無に深く関係することが示されているが、流体力学的な観点から両者の関係について明瞭に説明されていない。そのため、対象河川を領域区分図で分類したとしてもその物理的な解釈が難しい。

近年、著者らの研究グループでは微小振幅波理論における分散関係式を用い、砂州の他に砂堆や砂漣などの河床波の発生や存在の有無について統一的に区分できることを明らかにしている<sup>6)</sup>。図-1(a)に水深波長比の区分図を示す。この区分法は微小振幅波理論との適合性の都合により、横軸を川幅水深比と逆数の関係となる水深波長比、縦軸を河床勾配とした2軸の関係から河床波を区分するものである。この区分法の特徴は、従来の安定性解析による区分図とは異なり、流体力学的な観点から河床波を区分するとともに、3種の河床波を1つの水深波長比で区分する点にある。横軸の水深波長比と縦軸の河床勾配から構成される平面上において、3つに大別される河床波が発生、存在する領域を示している。同区分法により、河道が生来的に有する性質の把握が期待できる。

本研究では、水深波長比により河道の大局的な性質を把握し、河道変形の危険性の高い箇所の範囲を絞ることが可能か検証を行う。

### (2) エネルギー集積法

河岸欠損や侵食破堤は出水時における河道内の河床変動や護岸への流体力が主たる要因と推測されている。著者らの一人<sup>2)</sup>は、護岸に作用する流体力に着目し、平面二次元の水理解析により算出した摩擦速度が河道内の危険箇所の予測指標となる可能性を示している。また、重枝ら<sup>3)</sup>も彦山川での護岸被災の説明変数として摩擦速度が有効であることを報告している。上記を例とした研究以外にも他の実河川において同様の検証<sup>4),5)</sup>が行われており、その有効性が確認されている。本研究では摩擦速度を指標とした危険箇所の推定手法をエネルギー集積法と呼称している。本研究で用いるエネルギー集積法の具体的な方法は、平面二次元の水理解析より得られた対

象区間の河道内の摩擦速度の偏差を算出し、河道の護岸の強度が等流の水理量に基づいて決定されることに着目し、河道内の摩擦速度の平均値より $1\sigma$ 以上大きい箇所を危険箇所とするものである。

前節で述べた水深波長比は、大局的な観点から河道の持つ生来的な性質を把握し、河道変形の危険性を把握する手法である。そのため、河道内のどの箇所で河岸欠損や侵食破堤が発生しうるのであるのか、局所的な推定は難しい。そこで、エネルギー集積法を用い、上記の局所的な推定を行う。

## 3. 対象河川

本研究では、被災実績のある魚野川と能生川の2河川を対象とし、上述した2つの推定法を複層的に適用した場合の有効性について検証した。本章では対象河川における被災概要と対象区間について説明する。

### (1) 魚野川

#### a) 被災概要

魚野川は新潟県と群馬県の県境の谷川岳西麓一体に端を発し、新潟県の魚沼地方を貫流し、信濃川へと合流する一級河川である。同河川は2019年に発生した台風19号により、信濃川との合流点より26 km付近に位置する姥島橋下流において、大規模の河岸欠損が左右岸で11箇所も生じた。この区間の河床勾配は1/100程度であり、比較的急勾配となっている。また、同区間における河床粒径は40 mm程度となっている。

#### b) 対象区間

対象区間は河岸欠損箇所を含み定期横断測量データが存在する信濃川合流点から10.6 kmから30 kmとした。

### (2) 能生川

#### a) 被災概要

能生川は新潟県糸魚川市を流れる新潟県が管理する河川である。同河川は平成29年7月豪雨および同年10月台風による出水で、わずか10 kmにも満たない区間において8箇所も堤防が侵食等により被災した。特に平成29年7月豪雨による出水が大きな被害をもたらした。被災延長が長かった箇所では川幅80 mほどに対して110 mも堤体の侵食に至った。堤体の侵食の発生時の水位は、堤防の天端高よりも低く、越水するほどの水位でなかったことが推察されている。この区間の河床勾配は1/80程度であり、魚野川と同様に比較的急勾配となっている。また、同区間における河床粒径は80 mm程度である。

#### b) 対象区間

対象区間は、被災延長が最も長い箇所を含む河口から1.5 kmから5.0 kmとした。

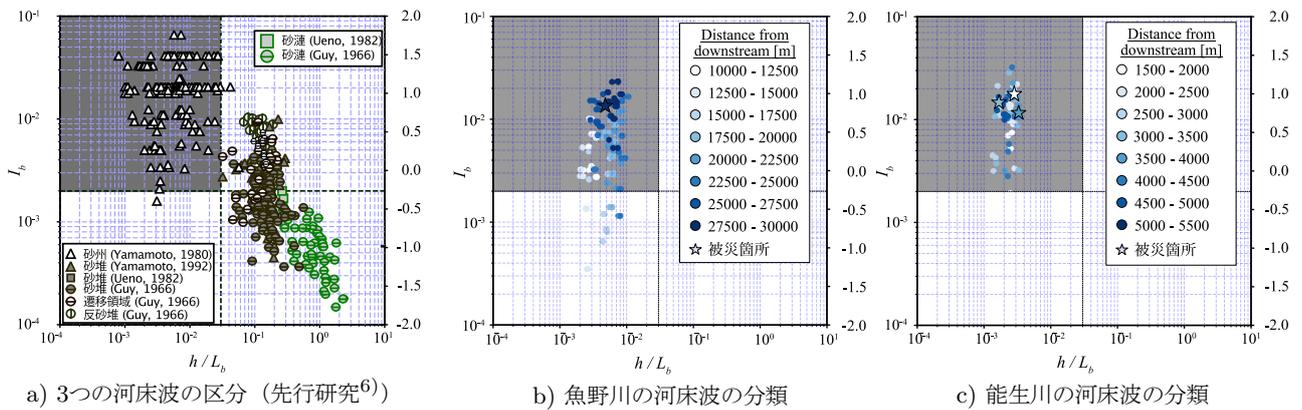


図-1 水深波長比と河床勾配による河床波の分類

## 4. 各種法の推定結果

2章で述べた2種の推定法を用いて以下の手順により危険箇所を複層的に推定する。

1. 一般断面の一次元水理計算により対象河川の全域において水深波長比を算出し、河道変形の要因となる河床波の発生とエネルギーの高い区間を推定する。
2. 上記の方法により危険性が高いと推定された区間を対象として、平面二次元の水理解析を実施し、エネルギー集積法により局所的な河道内の危険箇所の推定を行う。

### (1) 水深波長比と河床勾配による河道特性の区分

#### a) 計算条件

水深波長比は対象河川の水深を砂州の波長で除することで求める。砂州の波長はGoogleMapの航空写真より堆積部の長さを調査し、その長さを2倍して砂州の1波長分の長さとした。なお、砂州の波長の調査に用いた航空写真は対象洪水の発生時期と近いことを確認している。次に、水深は一般断面の一次元水理計算を以下の条件でそれぞれ行なった。

魚野川を対象とした計算では、平成24年度に測量された定期横断測量データを用いた。計算の空間間隔は、定期横断測量の実施間隔と同じ200 m間隔とし、対象区間の粗度係数は、国交省が公表している河床材料50 mmを参考に Manning ストリクラー式から算出した。また、上流端境界条件には台風19号の出水時に対象区間のちょうど中間に位置する六日町観測所で観測された流量とほぼ同程度の流量である流量1200 m<sup>3</sup>/sを与え、下流端境界条件にはその時の等流水深を与えた。

能生川を対象とした計算では、定期横断測量による横断面形状の標高データが存在しないため、DEMデータを用いて計算に使用する断面の作成を行なった。計算の空間間隔は、50 m間隔とし、対象区間の粗度係数は、国交省が公表している河床材料80 mmを参考に Manning ス

トリクラー式から算出した。また、上流端境界条件には平成29年豪雨の出水時における流量である250 m<sup>3</sup>/sを与え、下流端境界条件にはその時の等流水深を与えた。

#### b) 推定結果

図-1のa)に水深波長比の区分図を示す。同図は河床勾配と水深波長比を2軸とするグラフであり、既往の研究結果を整理しグラフ内にプロットしている。また、プロットされているマークの形は、その河道に発達する河床形状を表している。

2章で述べたとおり、同図の縦軸は河床勾配、横軸は水深波長比である。灰色で塗りつぶされた範囲は河岸欠損や侵食破堤の要因となる砂州が発生する領域である。また、この領域は河道変形に要する十分なエネルギーを有することが推測され、侵食破堤や河岸欠損が発生する危険性の高い領域であると推察される。

図-1のb)とc)に魚野川と能生川における水深波長比の区分図の結果を示す。両河川ともに一般断面の一次元計算時の断面間隔ごとに勾配と水深波長比をそれぞれ算出し、それらをプロットしている。また、同図は上流の点ほど青色が濃く、下流の点ほど青色が薄くなり白色に近づくように着色している。

まず、魚野川の結果を見ると、対象区間の水深波長比は10<sup>-3</sup>から10<sup>-2</sup>内に分布する様子が見られる。縦軸の河床勾配を見ると、薄い青色の下流区間は比較的河床勾配が緩やかで、濃い青色の上流区間に行くほど河床勾配が急になる傾向が見られる。この結果より、対象区間全体を通して砂州スケールに位置することがわかる。加えて、被災箇所が位置する上流の区間はより河道変形を容易に生じるエネルギーを有していることが推測される。

次に、能生川の結果を見ると、対象区間の水深波長比は全体を通して10<sup>-3</sup>から10<sup>-2</sup>内オーダーに分布する様子が見られる。河床勾配を見ると、全区間を通して10<sup>-2</sup>付近に分布し、上下流区間で異なるような傾向はなかった。この結果より、能生川は対象区間全体を通して砂州が発生し河道変形のためのエネルギーを有している河道

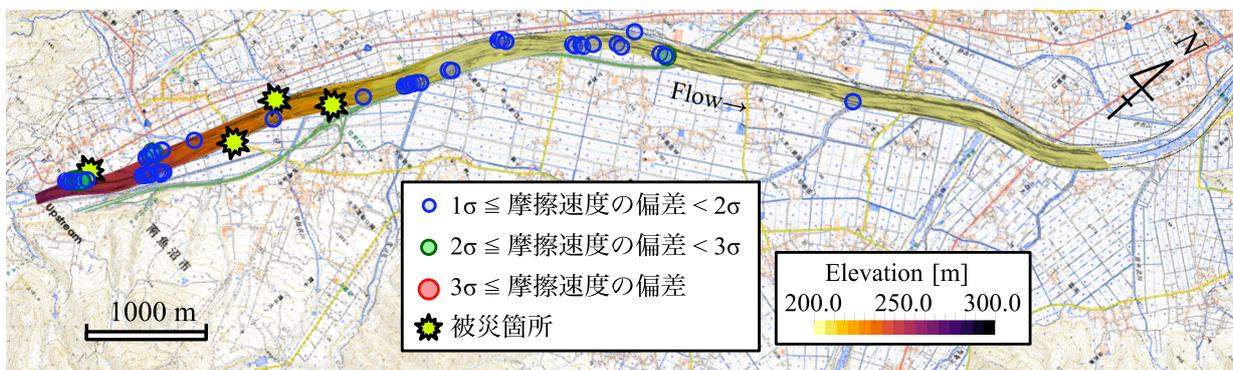


図-2 魚野川の摩擦速度の偏差と実際の被災箇所との比較

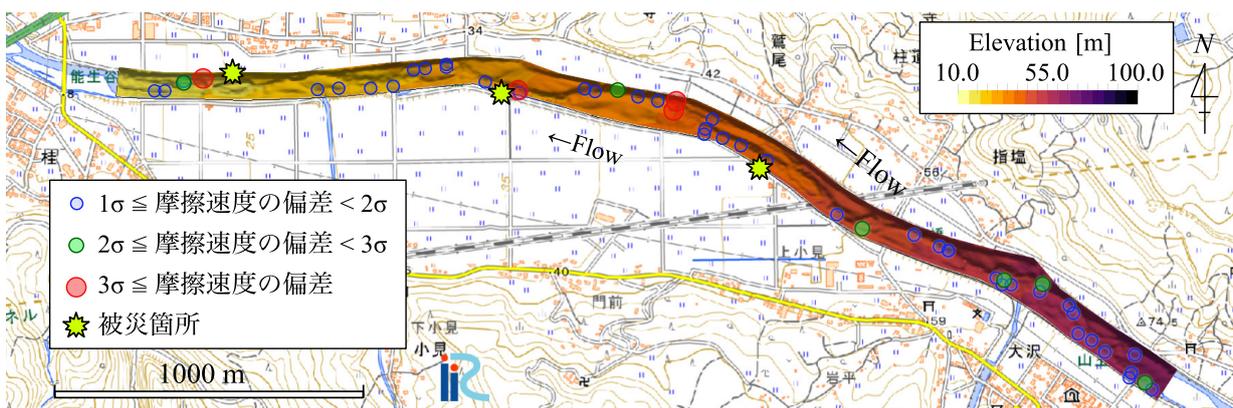


図-3 能生川の摩擦速度の偏差と実際の被災箇所との比較

であることが推測される。

## b) 推定結果

### (2) エネルギー集積法による河岸欠損・侵食破堤箇所の局所的な推定

#### a) 計算条件

エネルギー集積法の適用のために実施した水理解析には、平面二次元水理解析のソルバーであるiRIC<sup>9)</sup>に同梱されるNays2DHを用いた。

魚野川の計算に用いた計算格子は、平成28年に測量されたDEMデータ(3.8 mに1点の間隔)を使用し、標高データがない冠水部は定期横断測量の標高データで補間し作成した。対象区間は水深波長比による推定で河岸欠損や侵食破堤の危険性の高いと推定された勾配が1/100の区間(旭橋より上流の区間)とした。

次に、能生川の計算に用いた計算格子は、平成28年に測量されたDEMデータ(3.8 mに1点の間隔)を使用し作成した。能生川は魚野川と異なり冠水部の標高データを補間するための定期横断測量データが未整備だったため、出水時の流量から等流水深を求め、DEMの標高値から0.5 m下げた値を与えた。粗度係数や境界条件については、両河川ともに前節の一次元計算と同様の設定とした。

図-2に魚野川におけるエネルギー集積法による推定結果、図-3に能生川のエネルギー集積法による推定結果を示す。図面に示すコンター図は計算時に使用した再現地形であり、その上に実際の被災箇所を黄色いマーク、エネルギー集積法による推定箇所を摩擦速度の偏差が1σ以上、2σ以上、3σ以上の各々を青、緑、赤のシンボルで示した。このシンボルの箇所が河岸欠損、侵食破堤の危険性が高いと推定された箇所である。なお、摩擦速度の偏差の算出は表示中の全区間を対象とし、図示したシンボルは河岸欠損への寄与が推測される左右の岸沿いから流心方向に3つの計算点のみとした。

まず、魚野川の推定結果について見てみると、実際の被災箇所と、摩擦速度の偏差が1σ以上の箇所と一致した箇所は上流端の1箇所のみで、それ以外の箇所は一致が見られなかった。

次に、能生川の推定結果について見てみると、実際の被災箇所と摩擦速度の偏差が1σ以上の箇所が全ての箇所と一致する様子が見られた。

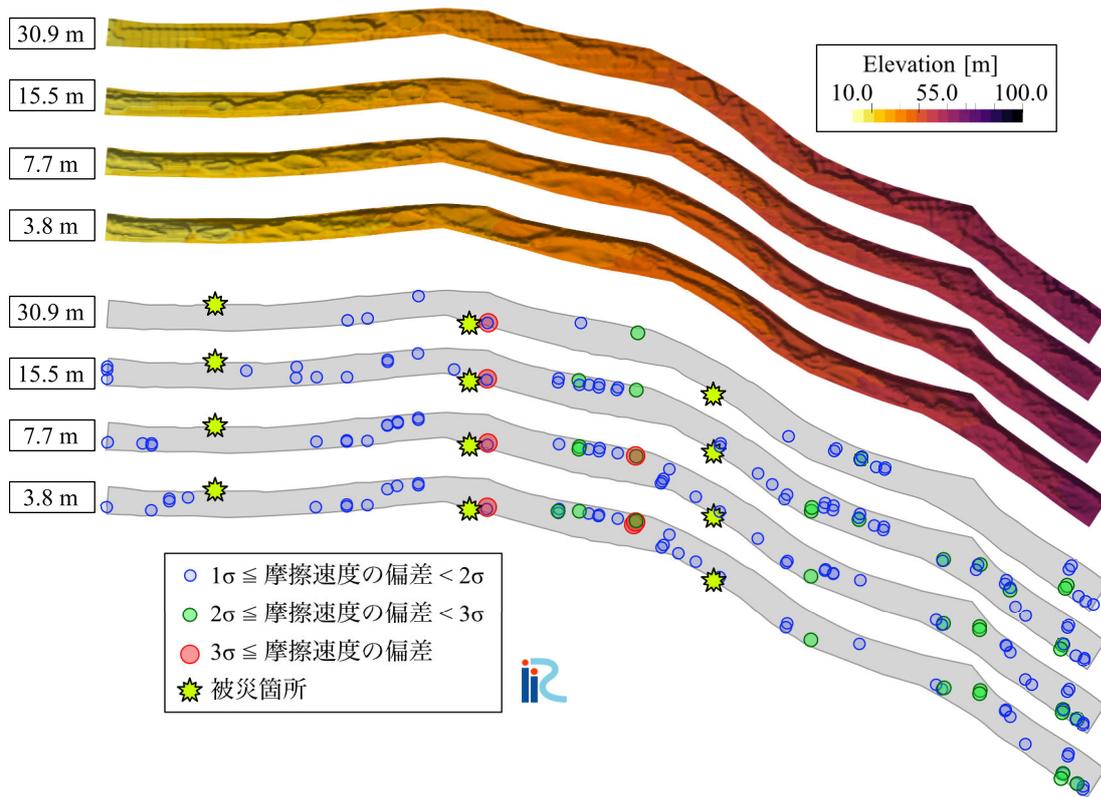


図-4 データの解像度の違いによるエネルギー集積法の結果の比較（上図：底面形状，下図：エネルギー集積法）

### (3) 地形データの解像度によるエネルギー集積法の適用範囲

前章で示した魚野川と能生川のそれぞれのエネルギー集積法の結果を見てみると、能生川の方が河道内の地形をより忠実に再現できており、エネルギー集積法の推定箇所と被災箇所がより一致している。このことから、計算格子に用いる標高データの解像度がエネルギー集積法の結果に影響していることが示唆される。そこで、エネルギー集積法に用いる標高データの解像度を変化させ、推定に十分なデータの解像度を調べる。

#### a) 検証方法

同一河川において計算格子の標高データの解像度を変化させて計算を行い、データの解像度がエネルギー集積法の結果に与える影響について検証する。前節で被災箇所とエネルギー集積法の推定箇所が重なる様子が見られた能生川を対象とした。計算に用いる計算格子は標高データを30.9 mに1点、15.5 mに1点、7.7 mに1点、3.8 mに1点と変化させ、それぞれエネルギー集積法により危険箇所の推定を行った。

#### b) 標高データの解像度を变化させた推定結果

図-4の上図に標高データの解像度を変えた場合の再現地形、下図にその計算格子を用いたエネルギー集積法の結果を示す。最上段の図は30.9 mに1点の標高データを持ち、下に行くほど標高データの解像度は高くなり、

最下段の図は3.8 mに1点の標高データを持つ解像度が最も高い結果を示している。

まず、最上段の解像度の最も低い30.9 mに1点の地形では、凹凸は確認できるものの、河床形状は自然河川では観察されないような不自然な地形となる。データの解像度が高い下段側の図ほど、河道内の滞筋が明瞭となり、解像度の最も高い3.8 mに1点の地形では河道全体において交互砂州を確認できる。

次に、下図のエネルギー集積法の推定結果についてである。まず、標高データの解像度が低い30.9 mの結果を見ると、エネルギー集積法により推定された侵食破堤箇所が点在しているが、推定箇所と重なっている被災箇所は3箇所あるうち中間の1箇所のみである。図の下に行くにつれて標高データの解像度を15.5 mに1点、7.7 mに1点とデータの解像度が高くなると、エネルギー集積法による推定箇所が増加していき、解像度が30.9 mのときには推定されなかった最上流の破堤箇所がエネルギー集積法による推定箇所と重なる様子が見られた。解像度の最も高い3.8 mに1点の結果では最下流の被災箇所の周辺にも推定箇所が点在する様子が見られた。

表-1 各河川の推定に用いたデータの種類

対象河川	水深波長比	エネルギー集積法
魚野川	定期横断測量	DEM+定期横断測量
能生川	DEM	DEM

表-2 各河川の各手法による推定結果

対象河川	水深波長比	エネルギー集積法
魚野川	被災区間と一致	破堤箇所と一致せず
能生川	被災区間と一致	破堤箇所と一致

## 5. 2河川における2つの推定手法による推定結果の比較

表-1に各河川の計算に使用したデータ、表-2に各種法による推定結果のまとめを示した。

まず、水深波長比の結果は、各河川で出水時の河道変形の様子と水深波長比の区分図より推定された河道変形の危険性の高い区間が各河川で一致することを確認した。水深波長比による推定で実施した次元計算は、魚野川では定期横断測量のデータを使用し、能生川ではDEMデータより作成した一般断面を使用して計算を行った。魚野川のデータの間隔は200 m、能生川のデータの間隔は50 mとそれぞれデータの解像度は大きく異なる。しかし、両河川とも推定された河道特性と実際の河道変形が同様の傾向が得られ、水深波長比の推定に対して、上記の空間分解能の差異は大きな影響は及ぼさないものと推測される。

次に、エネルギー集積法であるが、魚野川の結果では河岸欠損または侵食による破堤箇所と推定された危険箇所が一致する箇所は4箇所中1箇所だけであった。一方で、能生川では推定された危険箇所が実際の破堤箇所と一致した。4章の3節では危険箇所とエネルギー集積法による推定箇所が重なる様子が見られた能生川を対象として標高データの解像度を増大させた推定結果の変化を示した。その結果、計算格子の標高データの空間解像度を増大させることは、推定精度の向上にある程度寄与することが示唆された。

## 6. おわりに

本研究では、砂州河川における河岸侵食や侵食破堤の危険性を推定する複層的な手法について論じた。本推定法は、砂州河川の洪水時の挙動などを異なる支配変数で説明する2つの推定法を組み合わせたものである。本推定法を異なる2つの河川に適用したところ、次元計算から得られる水深波長比による区分では、河道内の詳細な標高データが未整備であっても、河道の大局的な河道変形の可能性の高い区間を推定できることが示唆された。一方で、二次元計算を使用するエネルギー集積法では、砂州に由来した滞筋部を十分に解像できる標高データが存在する時に河岸欠損や侵食破堤の危険箇所を良好に推定できることを示した。

本研究を通し、標高データの空間解像度が高いほど危険箇所の見逃しが減ることが示唆された。しかし、上述までの推定法で必要となる標高データの空間解像度の合理的な決定法は著者らが知る限り未確立である。現時点で著者らは、サンプリング定理に基づくことで定量的に決定できると考えている。ただし、完全に機械的に危険箇所を推定するための課題として、護岸の構造の新旧による耐久性の違いや、そもそも被災箇所とはならない山付きの区間の扱いなどが挙げられる。

ここまでの研究成果は、研究課題の主眼の一つである流路変動の発現箇所の科学的な推定について試みたものであり、もう一つの主眼である発現時期については今後の研究で取り組む予定である。

## 参考文献

- 1) T. Nagata, Y. Watanabe, H. Yasuda, A. Ito, Development of a meandering channel caused by the planform shape of the river bank, *EARTH SURFACE DYNAMICS* 2(1) 255 - 270 2014.
- 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) 重枝未玲, 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) 五十嵐拓実, 石原道秀, 安田浩保, 本村康高, 竹石一喜, 河道の保守点検のための河道脆弱区間の水理的推定法の提案, *河川技術論文集*, 第25巻, pp. 617-622, 2019.
- 6) 小関博司, 安田浩保, 水深波長比を用いた河床波の統一的区分とその支配水量, *土木学会論文集A2分冊(応用力学)*, 第76巻2号, pp.I.489 - I.498, 2021.
- 7) Callander, R. A.: Instability and river channels, *J. Fluid Mech.*, 36: 465-480, 1969.
- 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*, No. 342, pp.87-96, 1984.
- 9) 北海道河川財団, <http://i-ric.org>.