

# 確率的アプローチによる 高水敷保護工施工範囲の設定

## A PROBABILISTIC APPROACH FOR DETERMINING THE PROTECTION AREA OF RIVER FLOODPLAIN

舩屋繁和<sup>1</sup>・井上卓也<sup>2</sup>・岩崎理樹<sup>2</sup>・尾関敏久<sup>3</sup>・高橋賢司<sup>3</sup>・清水康行<sup>4</sup>  
Shigekazu MASUYA, Takuya INOUE, Toshiki IWASAKI, Toshihisa OZEKI,  
Kenji TAKAHASHI, Yasuyuki SHIMIZU

<sup>1</sup> (株) ドーコン 水工事業本部 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

<sup>2</sup> 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

<sup>3</sup> 国土交通省北海道開発局 旭川開発建設部 治水課 (〒078-8513 旭川市宮前1条3丁目3番15号)

<sup>4</sup> 北海道大学大学院工学研究院 教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Determining the protection area of river floodplain against the erosion during large flood is a major concern in river management works. In general, some threshold values of hydraulic parameters (e.g., water depth, velocity) have been used to identify potential zones of significant floodplain erosion, but, such approach does not perfectly explain the observed floodplain erosion area. Here, we propose a simple probabilistic approach for better decision making of floodplain protection. As a case study, we focus on the floodplain erosion caused by the record-breaking flood event in the Bebetsu River, Hokkaido, Japan observed in 2016. The probabilistic distribution of several hydraulic parameters, which are estimated by a numerical simulation, are compared with the observed erosion area. We find that the distribution of shear velocity is well linked to the probabilistic distribution of the floodplain erosion. The proposed approach might be more flexible tool to decide the protection area of floodplain.

**Key Words :** Floodplain erosion, shear velocity, probabilistic approach

### 1. はじめに

平成28年8月、北海道において観測史上初めて1週間に3個の台風が上陸し、さらに台風10号の接近により、全道各地で記録的な大雨が発生した。このとき、石狩川水系辺別川の直轄区間では、2箇所で堤防が一部流出するなど大きな被害を受けた。

辺別川では、低水路満杯程度の流量が長期に渡った平成23年9月出水においても、低水路河岸が侵食され堤防の一部流出に至っている。この平成23年9月出水を契機として、辺別川では低水護岸の整備が進められてきた。しかしながら、平成28年8月出水は整備計画目標流量を超過するピーク流量を記録しており、低水護岸裏の高水敷が洗掘され、堤防の一部流出に至っている。このため、低水護岸の整備とともに高水敷保護工の整備も喫緊の課

題となっている。

高水敷保護工の整備には、高水敷が洗掘される箇所の予見が必要である。予見方法としては、数値計算から水理諸量（例えば、摩擦速度など）を求め、ある閾値を超過した箇所を高水敷が洗掘される箇所とする方法が一般的であるが、実際の河川においては、設定した閾値を超過しても高水敷が洗掘・被災しない事例も多い。

安田ら<sup>1)</sup>は、護岸などの河川構造物の被災箇所と時間積分された摩擦速度の大小関係は良好に一致することを報告している。重枝ら<sup>2)</sup>は、護岸被災の説明変数として時間積分された摩擦速度が有効であることを報告している。しかし、安田ら<sup>3)</sup>は、実績洪水を対象に、時間積分された摩擦速度の偏差から護岸の被災有無の判定を試みているが、被災箇所で共通する閾値を超過した箇所でも、被災を免れた箇所が数多くあることも報告している。

本研究では、平成28年8月に発生した辺別川の高水敷



図-1 辺別川位置図



図-2 平成28年8月出水前の辺別川の様子

洗堀を対象に、数値解析によって再現された出水時のピーク水理諸量を基に高水敷の被災確率を算出し、高水敷被災確率を考慮した高水敷保護工程施工範囲の新しい設定方法を提案する。

## 2. 対象河川と対象出水の概要

### (1) 辺別川の概要

辺別川は、北海道第2の都市である旭川市の市街地南部に位置し(図-1)、石狩川の2次支川美瑛川へ合流する石狩川の3次支川である。流域面積198km<sup>2</sup>、河床勾配約1/160、河床材料の代表粒径約40mm、堤間幅約100m、低水路幅約60mのセグメント1河川である。本研究では、河川流路延長31.9kmのうち、直轄区間となっている美瑛川合流点から約9kmの区間を対象とする。

出水前の辺別川は、河道内に樹木はほとんど繁茂しておらず、低水路内は単列砂州河道の様相を呈している(図-2)。また、前述のとおり辺別川は旭川市街地の南部に位置しており、辺別川右岸が破堤すると、美瑛川の堤防沿いに氾濫流が流下し、旭川市街に至る危険性がある。

### (2) 平成28年8月出水の概要

8月20日から前線の停滞に伴い各地で強い雨が降り

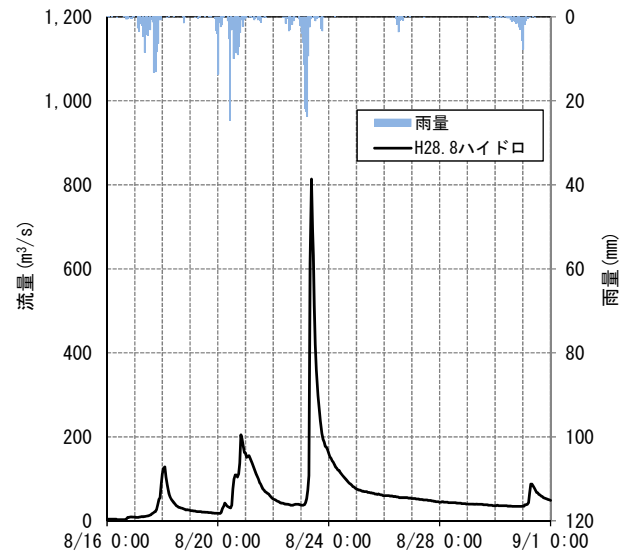


図-3 平成28年8月出水ハイドログラフ(18号観測所)

続き、8月23日明け方からは、台風9号の影響により特に美瑛川流域に強い雨が降った。この雨によって、辺別川18号観測所では既往最大である810m<sup>3</sup>/s(速報値)の流量が観測された(図-3)。特に、8月23日7時から8時にかけて流量が急激に増加している。

この出水によって、本研究の対象区間の一部で痕跡水位のHWL超過が確認されたほか、KP6.0左岸付近で低水路河岸侵食、KP0.4左岸付近、KP0.6右岸付近、KP4.2右岸付近、KP7.2右岸付近の4か所において、高水敷洗堀が確認されている(図-4)。このうち、KP6.0左岸付近、KP7.2右岸付近では特に被害が大きく、堤防の一部流出に至っている。なお、KPは合流点からの距離(km)を表す。

高水敷洗堀が生じた4か所は出水前に低水護岸が敷設されている。出水時に護岸裏の高水敷が洗堀されたものの、出水後も低水護岸は流失していない。このことから、高水敷洗堀が確認された4か所の高水敷洗堀要因は、低水路河岸の側方侵食ではなく、高水敷上の速い流れによって洗堀された蓋然性が高い。

## 3. 数値解析

### (1) 数値解析モデル

流れの計算には、以下に示す連続式(1)および運動方程式(2)、(3)を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x - \frac{F_x}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$



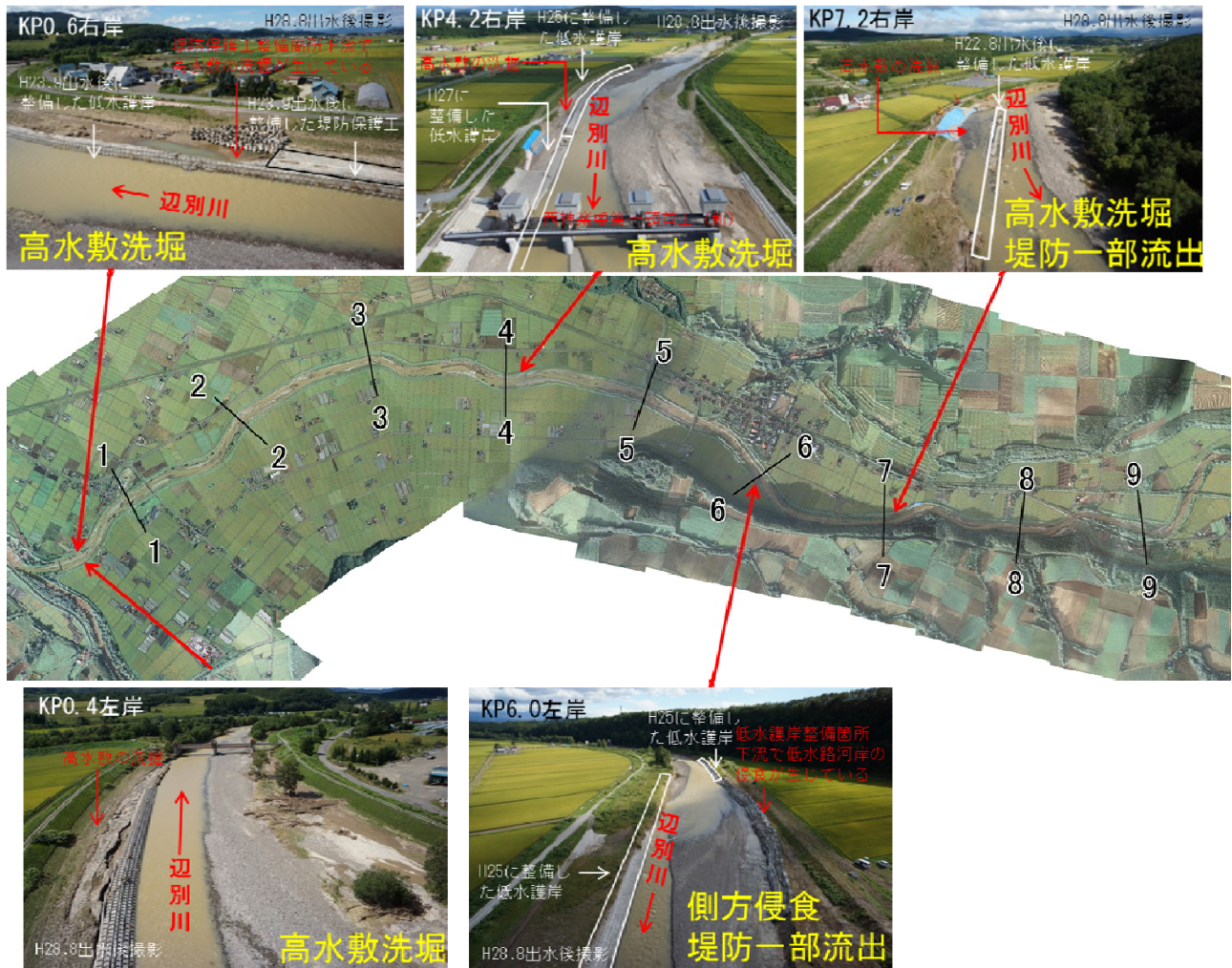


図-4 平成28年8月出水における辺別川の被災状況

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y - \frac{F_y}{\rho} \quad (3)$$

ここに、 $h$ ：水深、 $t$ ：時間、 $u, v$ ： $x, y$ 方向の水深平均流速、 $g$ ：重力加速度、 $H$ ：水位、 $\tau_x, \tau_y$ ： $x, y$ 方向の河床せん断力、 $F_x, F_y$ ： $x, y$ 方向の植生による抵抗力である。また、 $D^x, D^y$ は、それぞれ

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t h \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (4)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t h \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (5)$$

であり、 $\nu_t$ ：渦動粘性係数である。

なお、実際の解析では、上述の基礎式を一般座標系へ変換して用いている。

## (2) 解析条件

平成28年8月出水において、高水敷洗堀に至る水理諸量を把握するため、計算格子の標高は平成28年8月出水前に取得された平成23年測量横断データと平成23年から平成28年8月出水前までに辺別川で行われた工事図面を用いて設定した。

辺別川は、KP9.0付近の宇莫別川流入地点で河道内流量が大きく変化する。そこで、支川合流の影響を考慮できるように計算格子を設定し、18号観測所で観測された流量を流域面積比で配分して、辺別川と宇莫別川の上流端境界条件として与えた。下流端境界条件は美瑛川西神楽観測所で観測された流量を基に、美瑛川の辺別川合流点のHQ式から算出された水位を与えた。

粗度係数は、再現性を考慮して、低水路0.031、高水敷0.050とした。また、護岸が設置されている箇所は0.017とした。

## (3) 平成28年8月出水再現結果

平成28年8月出水の痕跡水位と、数値解析で得られたピーク水位を比較(図-5)する。本数値解析は洪水時の河床変動を考慮していないため、場所によっては多少のず

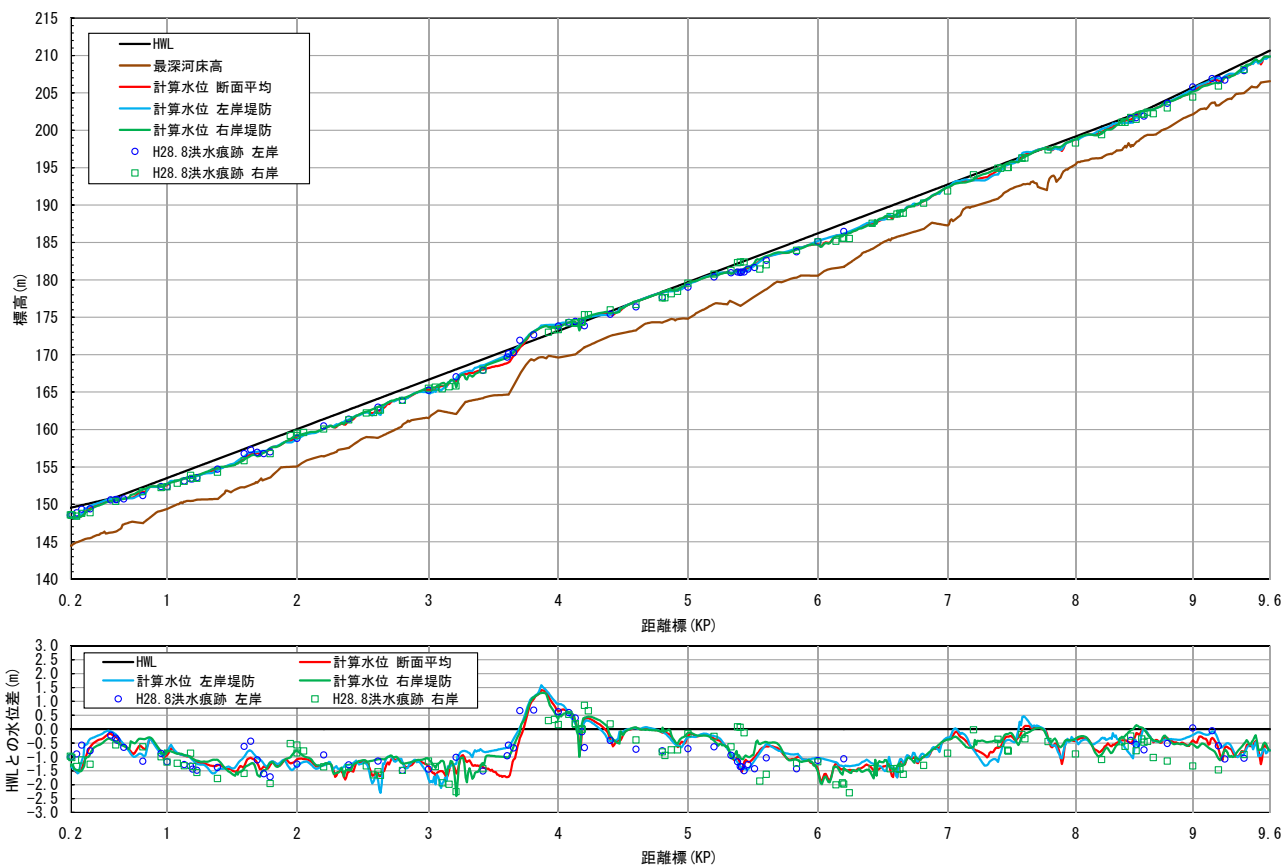


図-5 平成28年8月出水再現計算結果水位縦断面図

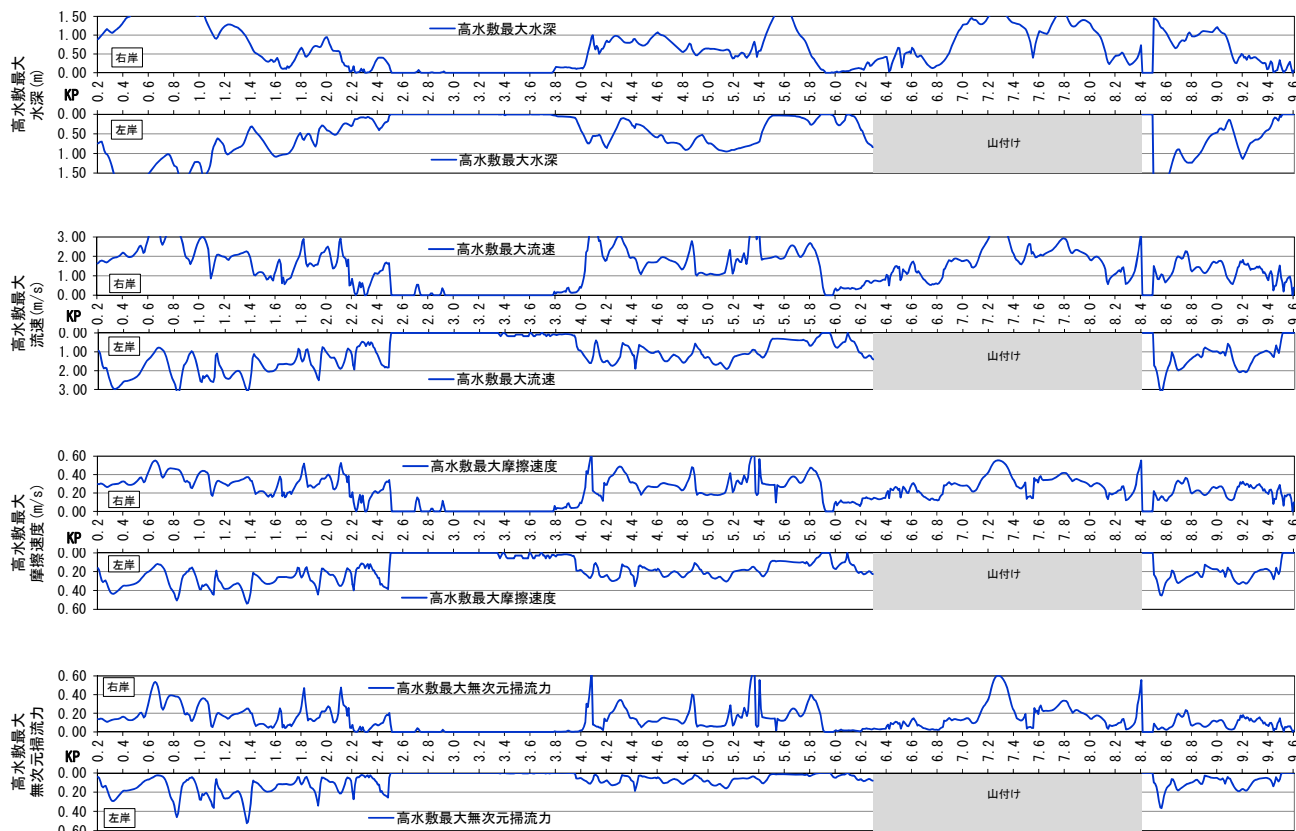


図-6 平成28年8月出水で発生した高水敷上のピーク水理諸量

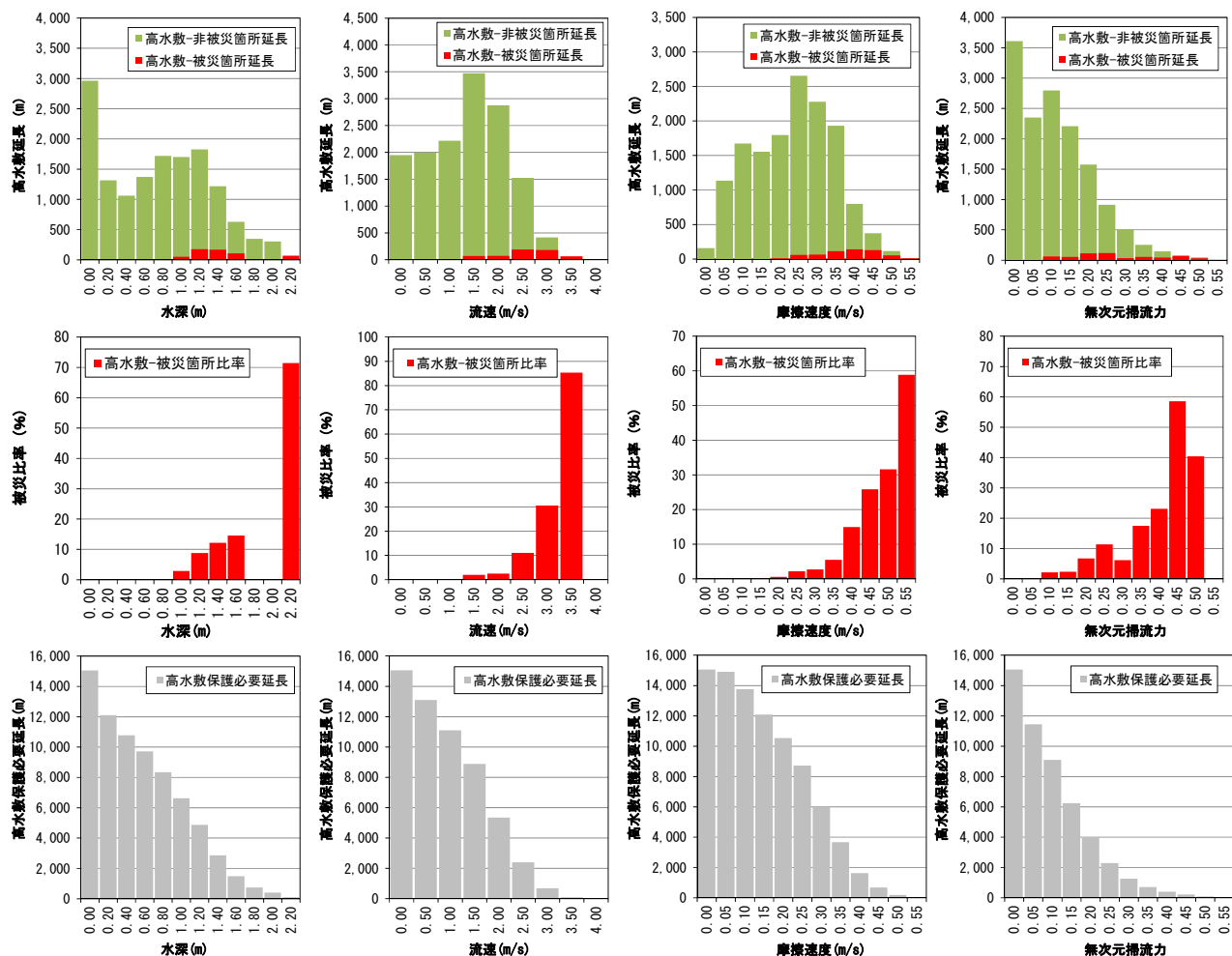


図-7 平成28年8月出水時に発生したピーク水理諸量と被災比率の関係

れはあるが、痕跡水位と数値解析で得られたピーク水位が概ね一致しており、平成28年8月出水時の流れを十分に再現できていると言える。

#### 4. 出水時の水理諸量と高水敷洗掘確率の関係

##### (1) 水理諸量の整理

平成28年8月出水の再現計算で得られた高水敷上の水深、流速、摩擦速度、無次元掃流力を縦断的に整理した(図-6)。安田ら<sup>3)</sup>は、時間積分された摩擦速度を用いた護岸被災要因の合理的な説明が難しいことを示唆している。また、この手法は時間積分する期間の設定に試行錯誤が必要である。そこで、本研究では簡便のため計算期間中のピーク値を右岸高水敷、左岸高水敷別に整理した。なお、辺別川は高水敷幅が狭く、高水敷上であれば低水路河岸付近であっても洗掘が発生した際には堤防流出に至る可能性があることから、各水理諸量の横断方向最大値を抽出して整理した。

KP2.6からKP3.8区間は、対象区間内で相対的に高水敷標高が高く、高水敷が冠水していない。また、KP6.4からKP8.4左岸は山付き区間であることから、評価の対象外とした。

水深の区間平均は約0.6mとなっており、区間最大は2.4mである。また、流速の区間平均は約1.2m/s、区間最大は4.2m/s、摩擦速度の区間平均は約0.2m/s、区間最大は0.65m/s、無次元掃流力の区間平均は約0.10、区間最大は0.72である。

なお、高水敷を構成している材料の粒径が得られていないことから、無次元掃流力の算出にあたっては、河床材料の代表粒径を代用した。

##### (2) 高水敷洗掘確率と水理諸量の関係

縦断的に整理した水深、流速、摩擦速度、無次元掃流力について、同一レンジの水理諸量が発生した高水敷縦断延長を整理した(図-7)。また、高水敷縦断延長の整理にあたっては、平成28年8月出水時の被災箇所(赤)と非被災箇所(緑)に分けて整理した。例えば、図-7上段グラフのうち、摩擦速度のグラフをみると、平成28年8月出水時に0.25m/sから0.30m/sの摩擦速度が発生した高水敷延長は約2600mであり、そのうち約60mの高水敷が被災していることが分かる。

図-7中段グラフは、被災比率を把握するため、各レンジの被災箇所延長を総延長で除してグラフ化したものである。例えば、0.25m/sから0.30m/sの摩擦速度が発生した高水敷では、被災比率は約2%となっている。



図-7下段グラフは、各レンジの下限値を閾値とした場合に保護が必要となる高水敷の総延長を示しており、例えば、摩擦速度0.25m/sを下限値とした場合に保護が必要となる高水敷延長（摩擦速度が0.25m/s以上の区間の累計値）は、約8700mである。

図-7の水深、流速、摩擦速度、無次元掃流力の各グラフをみると、いずれも大きな値のレンジになるほど、被災比率が大きくなっていることが分かる。しかし、水深の被災比率をみると、水深1.8mから2.2mのレンジで0%となっており、1.8m以下、2.2m以上のレンジでは被災比率が0%以上となっていることから、高水敷の被災比率を説明する変数としては不適当と考えられる。流速の被災比率も同様で、4.0m/sを超えるレンジで被災比率が0%であり、最も大きな流速が発生しているレンジで被災比率が0%となることから、高水敷の被災比率を説明する変数としては不適当と考えられる。無次元掃流力の被災比率を見ると、流速と同様に最も大きな無次元掃流力のレンジで被災比率が0%となっている。ただし、無次元掃流力は低水路の河床材料粒径を用いて算出していることから、説明変数としての適用性については、高水敷構成材料の粒径を用いて無次元掃流力を算出し、改めて評価する必要がある。摩擦速度の場合は、0.2m/sから0.25m/sのレンジで被災比率は約0.6%、0.4m/sから0.45m/sのレンジで10%を超過し、0.5m/sから0.55m/sのレンジで約60%であった。以上のことから、水深、流速、無次元掃流力と比較して、摩擦速度は被災比率との相関が高い。

## 5. 被災確率を考慮した高水敷保護工施工範囲の設定

図-7から、被災確率(被災比率)を考慮した高水敷保護工施工範囲の設定が可能となる。例えば、摩擦速度を説明変数とした場合、一切の被災を許容しないとすれば、高水敷保護工施工範囲の閾値を0.2m/s以上とすればよく、施工延長は約11kmである。しかし、10%程度の確率での被災を許容するのであれば、閾値は0.4m/s以上とすればよく、施工延長は約1.6kmとなる。

また、予算に応じて被災確率の高い箇所から高水敷保護工施工範囲を優先的に設定することや、背後地の状況に応じて許容する被災確率を設定し、高水敷保護工を施工することも可能である。

摩擦速度を用いた高水敷の被災評価方法はこれまでに提案されており<sup>1)2)3)</sup>、そのこと自体に新規性はない。しかし、これまでの手法では、摩擦速度と結びつけるもう片方のパラメータを、被災の有無という0か1の指標としていたため、その閾値設定が非常に難しく、これが護岸などの設置範囲の判断を難しくしていた。閾値設定が難しい理由として、高水敷洗掘や河岸侵食は、そのメカ

ニズムが完全に解明されてはおらず、また、地質状況、樹木の繁茂状況、周辺構造物の形状・劣化状況など数多くの不確実性を含むことが挙げられる。本研究手法は、被災確率という新たな指標の導入により、予算に応じた施工範囲の設定や優先順位の判断がより簡単にできる点に工夫がある。

## 6. おわりに

本研究は、平成28年8月出水で被害を受けた辺別川を対象に、被災確率を考慮した高水敷保護工の施工範囲の設定方法を示し、その有用性について議論した。以下に、本研究で得られた主要な成果を列記する。

- 1) 平成28年8月出水で高水敷洗掘が生じた辺別川を対象に、出水中のピーク水深、流速、摩擦速度、無次元掃流力を整理した結果、各水理諸量ともに、値が大きくなると被災確率が大きくなる傾向にある。
- 2) 水深、流速、摩擦速度、無次元掃流力のうち、被災確率との相関が最も高いのは摩擦速度である。
- 3) 摩擦速度と被災確率の関係を把握することにより、被災確率を考慮した高水敷保護工施工範囲の設定が可能となる。また、予算や背後地の重要性に応じて高水敷保護工施工範囲の閾値を設定することが可能となる。

従来、護岸の施工範囲の設定は被災箇所で出水時に発生したと想定される水理諸量のうち最も小さい値を閾値としたり、その中でも相対的に大きな値が発生している箇所を優先的に施工するといった対応が一般的であった。本研究で示した被災確率を考慮した高水敷保護工施工範囲の設定方法は、従来の方法の妥当性を確率的アプローチの導入により、より分かり易く説明可能であることを示したものである。

今後は、他河川での適用事例を増やし、本手法の妥当性を確認するとともに、安田ら<sup>1)3)</sup>や重枝<sup>2)</sup>らが提示した時間積分された摩擦速度の説明変数としての適用性についても検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 平松裕樹, 松本拓磨: 平成24年豪雨災害時の彦山川の護岸・河岸の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.
- 3) 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.327-332, 2016.

(2018. 4. 3受付)