

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

RELATIONSHIP BETWEEN TIME INTEGRATED FRICTION VELOCITY AND DAMAGE SECTION IN IKARASHI RIVER

安田 浩保¹・高橋 玄²・酒井 公生³・竹村 仁志⁴

Hiroyasu YASUDA, Gen TAKAHASHI, Kimio SAKAI and Hitoshi TAKEMURA

¹ 正会員 博(工学) 新潟大学准教授 災害・復興科学研究所 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

² 学生員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

³ 正生員 新潟県三条地域振興局 (〒 955-0046 三条市興野 1 丁目 13 番 45 号)

⁴ 正会員 八千代エンジニアリング大阪支店 (〒 540-0001 大阪市中央区城見 1-4-70)

In Ikarashi river, a risk of levee break was high at Niigata-Fukushima Heavy Rainfall Disaster in July 2011 because of occurrence of excessive flood. In order to comprehend fluid forces acting to channel, we conducted full 2-d analysis given the hydro of this excessive floods at channel has cross-section before the disaster. In this study, we discussed estimating indexes to predict disaster points due to flood flows. At a result of flow velocity and friction velocity, time integration of friction velocity has a close relationship of disaster points. Though current river channel designing method consider only velocity, the designing method should import the concept of time integrated friction velocity.

Key Words: *ikarashi river, Niigata and Fukushima Heavy Rainfall 2011, time integrated friction velocity, iRic*

1. はじめに

2011年7月末に発生した新潟・福島豪雨は、総降雨量が1000mmに迫る観測点が見られるなど、新潟県内をはじめとする各地に様々な形の水害をもたらした。信濃川の流域全体を上流から下流に向かって俯瞰すると、上流域の谷底低地を流れる塩谷川や鹿熊川などの河川では大規模な流下型の氾濫が生じ、中流域の五十嵐川や刈谷田川、そしてこれらが合流する信濃川本川では、いずれにおいても氾濫危険水位や避難判断水位を超えた。被災後の調査¹⁾によると、いずれの河川においても計画規模を大幅に越える超過洪水であったことが明らかとなっている。このように極めて危険な状態に達していたにもかかわらず、大規模な破堤やそれに伴う氾濫は免れ、広域の浸水被害は生じることなく堤内地の被害は最小限に留まった。

中流域の五十嵐川の河道内に目を向けると、その下流区間では低水護岸の破損と高水敷の洗掘が縦断的に連続して発生したほか、中流区間では湾曲部外岸側で300mにわたる河岸浸食とそれに伴う破堤氾濫が発生した。これらの大規模な河道変動は堤防を弱体化させる大きな要因に繋がり破堤を招く大きな要因となる。

本研究では、まず超過洪水を経験した場合に発生する河道内の被害規模や要因などを分析することを目的とし、被災後の現地踏査と河道断面の計測結果などに基づき河道変形の規模の把握を行った。つぎにそのとき



図-1 五十嵐川の流域図

に作用していた外力を推定することを目的に平面2次元の数値解析を実施し、流速やその継続時間と被災箇所の対応関係について整理した。また、被災箇所の推定に適した物理的な評価指標が平面2次元解析から得られる情報より導出できるかどうかについて検討した。

2. 対象洪水と五十嵐川の概要

(1) 平成 23 年新潟・福島豪雨

信濃川流域は2011年7月だけでなく、近年では2004年7月にも大規模な洪水を経験している。この豪雨では、栃尾観測所において日雨量が421mmに達し、1935年からの日雨量としては最大値を記録した。その結果、流域内の五十嵐川、刈谷田川、中之島川では複数の地点で決壊や越水被害が発生し、建物の全壊や死者を伴う広範囲にわたって甚大な被害が生じる水害となった。

2011年7月に発生した新潟・福島豪雨は、図-2 a) のとおり流域の広い範囲で累積雨量が600mmを上回り、

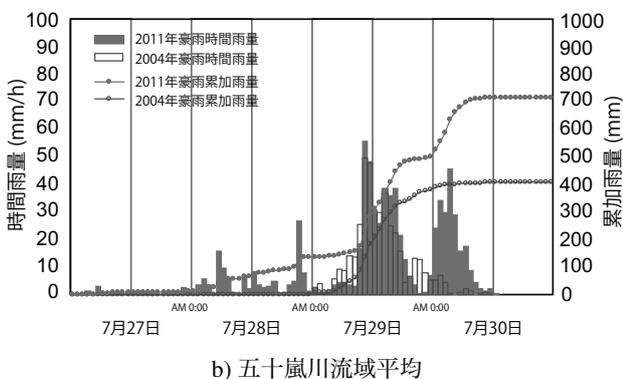


図-2 降雨の状況¹⁾

五十嵐川の上流域に位置する笠堀ダム地点では累積雨量が985mmに達した。この豪雨のハイエトグラフはいずれの地点でも二峰型になり、雨量の第一波が累積雨量全体の7割程度、第2波が3割程度の比率となり、五十嵐川の流域平均雨量ではそれぞれ約520mm、約200mmであった。第一波がもたらした雨量だけに着目しても大規模洪水となった2004年の400mmよりも2011年豪雨は遥かに大規模であったことが見て取れる。また、第1波と第2波の間には数時間の無降雨の時間帯が存在し、累加雨量曲線には平坦な踊場が存在することが特徴としてあげられる。

(2) 五十嵐川

五十嵐川は河道延長が約39km、流域面積が約310kmの規模を誇り、その上流域に笠堀ダムと大谷ダムを有し、三条市の中心部を貫流して信濃川に合流する一級河川である。

前述の2004年7月の大規模洪水では、下流区間の最大流量が1800m/sに達し、市街部において破堤氾濫が生じた。五十嵐川の流域全体では、被災家屋数が全壊、半壊、浸水の合計が6800戸にのぼった他、浸水面積は1,320haに及んだ。この洪水後、この時の最大流量であ



a) 災害復旧区間の河道内被災の状況 (kp.3.0)¹⁾



b) 大規模な河岸決壊の状況 (kp.14.6)¹⁾



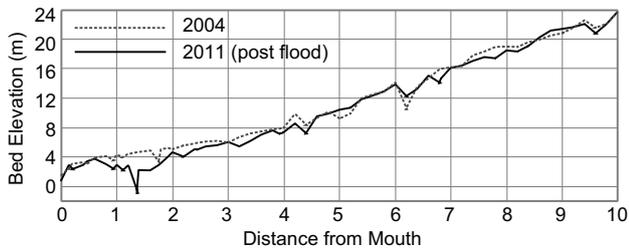
c) 大規模な河岸決壊の状況の航空写真 (kp.14.6)

図-3 河道内被災の状況

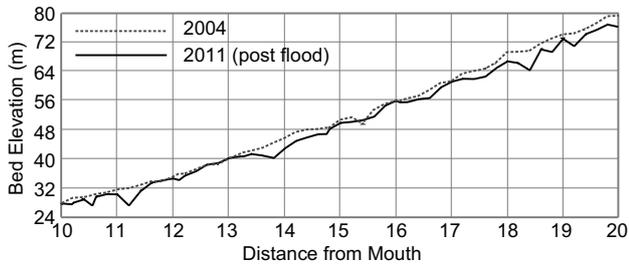
る1800m/sを流下させられるように、流下能力が不十分だった信濃川との合流点から約4kmの区間で河道拡幅と河道掘削による改修が行われた。2011年の洪水はこの区間での改修が完了された状態で迎えた。

3. 2011年洪水による河道内被災

新潟県の調査¹⁾によると、2011年の豪雨において五十嵐川では最大で2600m/sが流下していたことが推算されている。2004年洪水の1800m/sを大幅に上回る規模の洪水となった。このような洪水であったにもかかわらず、2004年以降の河道改修が効果を発揮して破堤などの最悪の事態は回避された。しかし、以下で詳述するように主に河道内での被災が非常に多くの地点で発生した。



a) 0 - 10km



b) 10 - 20km

図-4 最深河床の洪水前後での比較¹⁾

全体的な河道変形の傾向としては、図-4に示した最深部分の河床変動図から分かるように、洪水前と比べて2011年の洪水を経験することで全体的に河床低下の傾向となっていた。ただし、同図は2004年の改修断面と2011年の洪水後の断面の比較であり、2011年の洪水前までの変動量も含められているため、同図において示した比較は被災後の定性的な判断材料に留める必要がある。

図-5と6の最上段には河口から0kmから10kmと10から20kmまでの区間における河床洗掘、法覆工、天端工などの護岸の被災状況を示した。河道に沿って描かれた太線が被災位置である。また、被災護岸の位置と平行に描かれた細線は越水の発生区間である。同図から分かるように、すべての区間において縦断的に一様に河道内被災が発生したことがわかる。

五十嵐川は、図-7に示したように2004年洪水の災害復旧区間である信濃川との合流点から4km上流までの区間では明瞭な高水敷を有する複断面の河道が築かれ、それより上流区間では比較的自然な状態の断面形になっている。次節では4km地点より下流区間と上流区間に分けて被災の特徴を述べる。

(1) 河口から0kmから4km

河口から0kmから4kmの2004年の災害復旧区間は、2つの曲率の大きな湾曲が連続している。2011年洪水の最大流量時には堤防満杯の状態が洪水が流下した。堤防上にはこの状態を確認する市民の姿が多数確認され、破堤が生じれば多大な人的被害が不可避な危険な状態があった。この区間の典型的な被災形態を示したものが図-3 a)である。同図中に示したように、法覆工、天端工などの被災に加え、高水敷の被覆工の破損についても顕著であった。

図-4 a)と7 a)から分かるように、低水路内の被災が大きく、広い範囲で2から3m程度、場所によっては5mもの河床低下が発生していた。被災前後の断面の比較から、河床変動が大きい区間で、湾曲しているためにその内岸側と外岸側で洗掘深が異なっていたことが図-7 a)などから分かった。

図-8に低水路と高水敷の左岸と右岸のそれぞれの洗掘深を示した。まず、同図 a)に示した右岸側低水路は、河口から1kmから2kmの区間が湾曲部の外岸側に位置するため、2004年の断面と比べて1.5mを超える洗掘が縦断的に連続的に生じていた。左岸側低水路は、河口から1kmから1.4kmの区間および河口1.8kmから2.6kmの区間は同じく湾曲部の外岸側に位置し、右岸側と比べると洗掘新は小さいものの0.5m程度の洗掘が発生していたことがわかる。

高水敷では図-8 b)に示したように右岸側については0.8kmから1.2kmの区間において洗掘が目立ち、最大で1.5mほどに達していた。一方で、左岸側については2km付近で2mを超える洗掘が発生していた。

(2) 河口から4kmから20km

河口から4kmから18kmまでは曲率の大きな蛇行はない。河道幅は河口から4kmまでの区間と比べると2倍程度まで広がる。図-5と6の最上段の被災箇所図から分かる通り、河道の両岸ともに主に護岸被災が生じていた。このうち、最も大規模な河岸浸食が河口から14.6kmの地点において発生した。これは、縦断方向に300m以上、横断方向に被災前の100mほどの川幅を40m程度押し広げる規模であった。最終的には破堤を伴ったために近隣の堤内地は広く浸水被害を受けた。

図-4 b)に示されているように、全体的に洪水後は河床低下の傾向になった。特に、川幅が狭くなる河口から11.2kmや13.8kmや18.2km地点付近で最大で2m以上の洗掘が確認された。

4. 洪水時の作用外力の評価指標

前章までに五十嵐川の河道内における被災の概況についてまとめた。被災状況について俯瞰すると、同程度の川幅や曲率の湾曲部であるにもかかわらず、著しく被災を被っている区間と免れている区間に二分されていることに気付かされる。例えば、0kmから4kmの区間はほぼ同程度の川幅にも関わらず、1kmから3km区間は2m以上の洗掘が発生しているのに対し、河口から1kmまでと3kmから4kmは前者と比べると洗掘の規模は小さい。また、14kmから18kmの区間は同程度の川幅と曲率の湾曲部が続くが、14.6kmの地点の前後のみ被災規模が大きく、これが五十嵐川における今回の出水で最も大規模な被災箇所となった。

本章では、前述したような差異の理由を推測するとともに、被災箇所をあらかじめ把握するために適した評価指標を導くことを目的として、被災前断面に今回

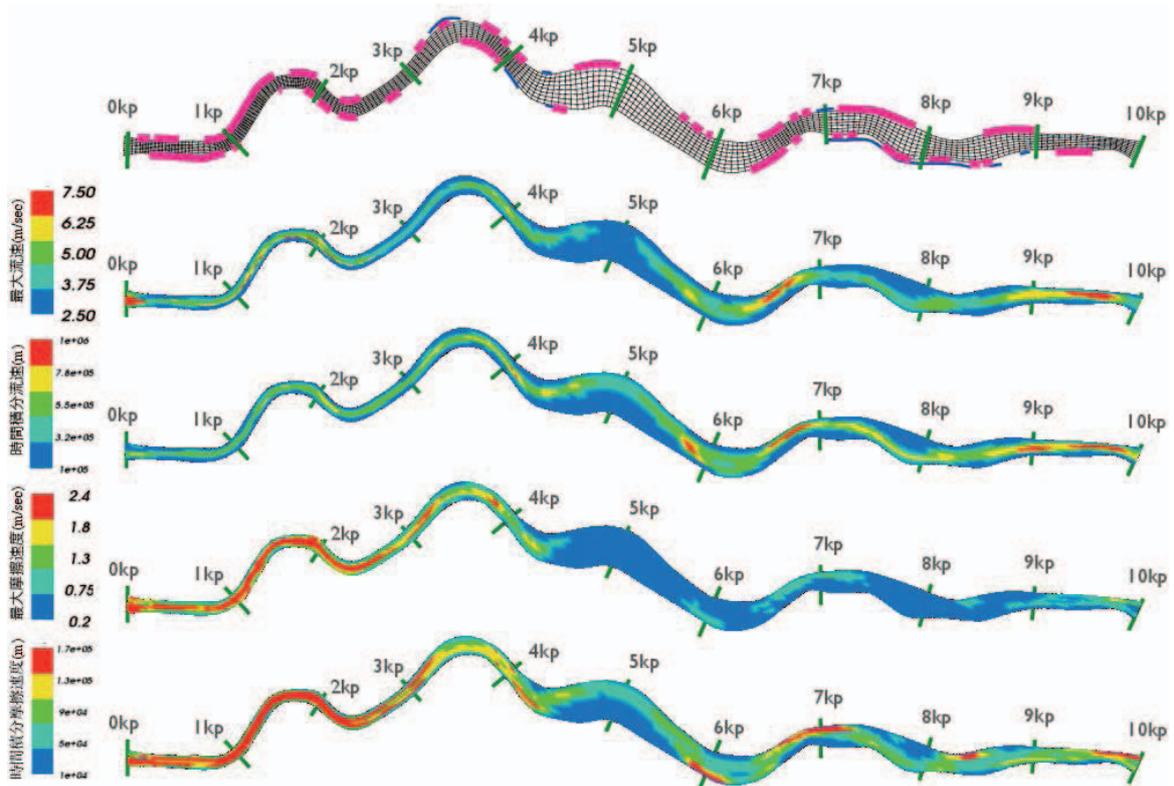


図-5 0km から 10km の河道内被災位置図と評価指標の比較 (1 段目が計算格子図と被災箇所と越流箇所の位置図、2 段目が最大流速の分布図、3 段目が時間積分された流速の分布図、4 段目が最大摩擦速度の分布図、5 段目が時間積分された摩擦速度の分布図)

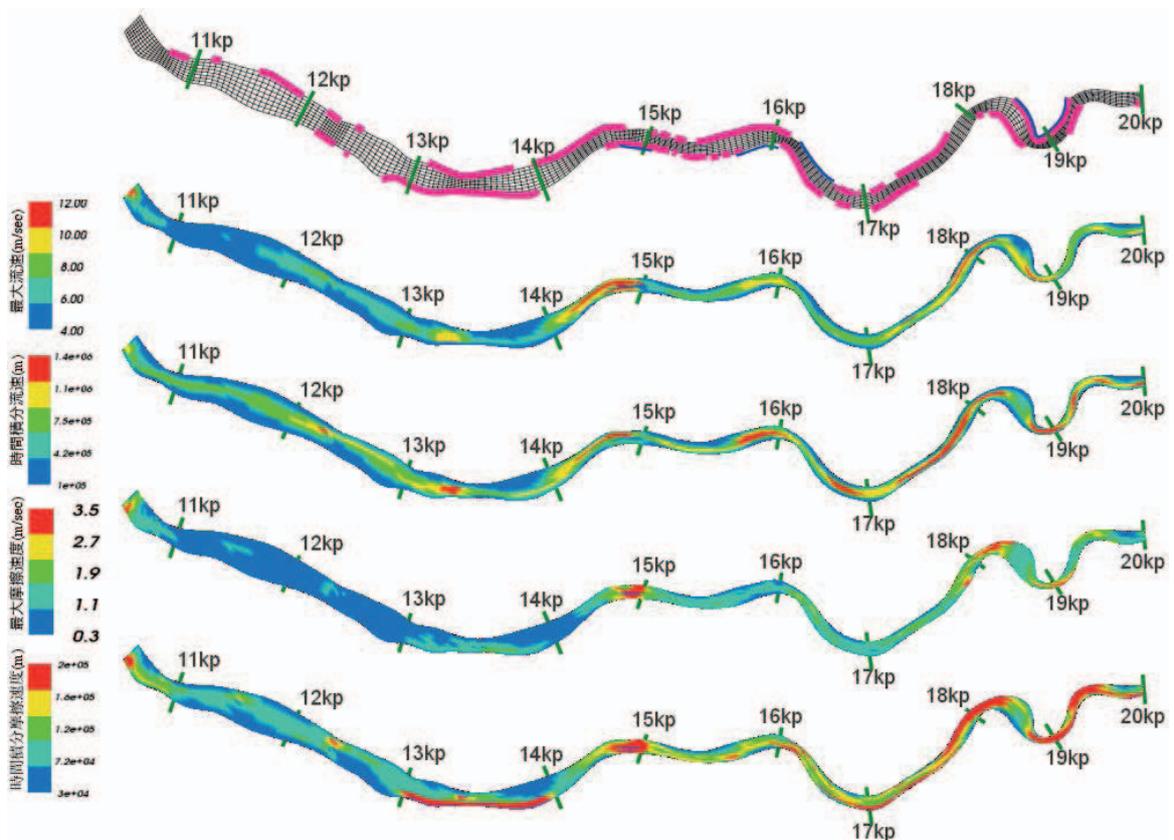
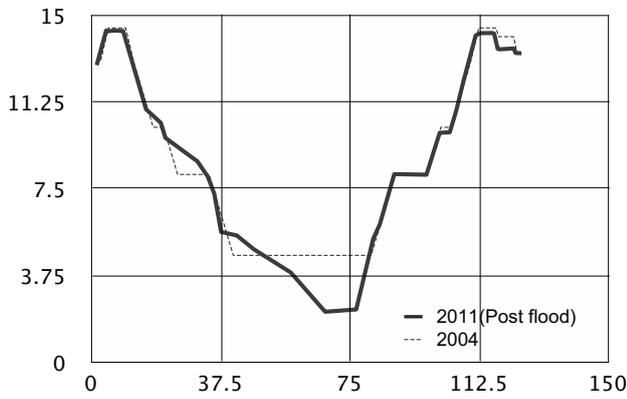
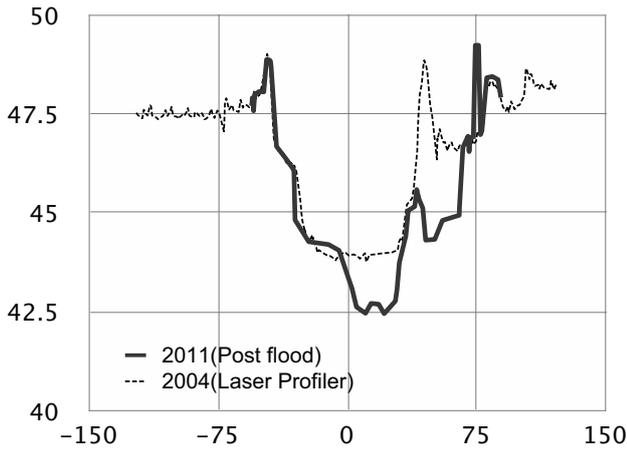


図-6 10km から 20km の河道内被災位置図と評価指標の比較 (1 段目が計算格子図と被災箇所と越流箇所の位置図、2 段目が最大流速の分布図、3 段目が時間積分された流速の分布図、4 段目が最大摩擦速度の分布図、5 段目が時間積分された摩擦速度の分布図)



a) 1.40km



b) 14.60km

図-7 横断形状の洪水前後での比較¹⁾

の出水の水理条件を与えた平面2次元解析を実施する。

(1) 数値解析モデル

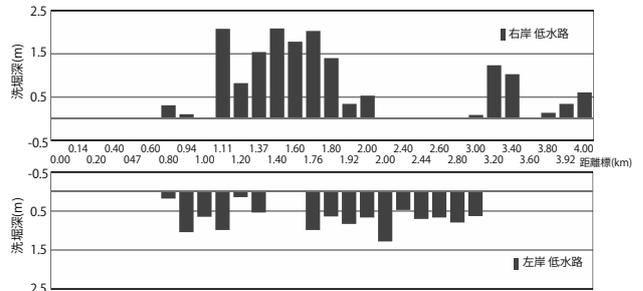
本研究では、iRIC²⁾に同梱させる平面2次元解析のソルバーであるNays-2Dを数値解析モデルとして用いた。

河道形状の境界適合は一般座標により行い、計算格子の空間分割の間隔は横断方向に10m程度、縦断方向に50m程度となるように格子設定を行った。

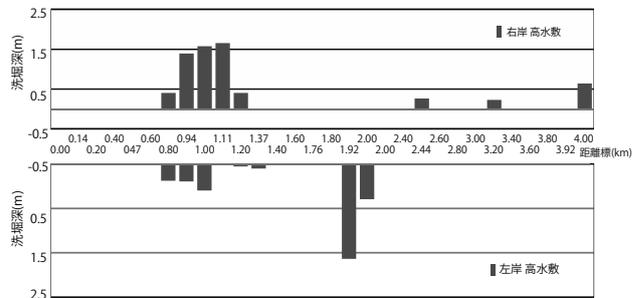
この数値解析における境界条件は、図-9に示したとおり、下流端の水位境界条件として信濃川本川に設置(五十嵐川の河口から約300m下流)されている荒町地点における観測水位、上流端の流量境界条件として新潟県により推定された二峰型のハイドログラフ¹⁾を与えた。時間分割間隔は0.01秒とした。

(2) 解析結果の妥当性

最大流量時である計算開始から53時間後の水位の観測値と計算値の比較を示した。図-10中に丸印でプロットした5箇所の観測値がいずれとも良好に再現されていることがわかり、水理的に妥当な結果を得ているものと判断できる。



a) 低水路



b) 高水敷

図-8 河口から4kmまでに見られた局所的な洗掘¹⁾

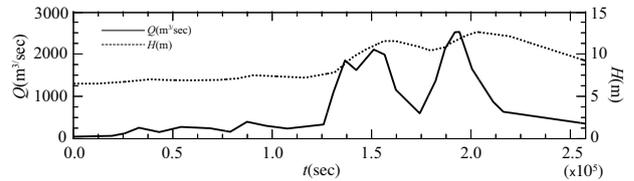


図-9 下流端の水位と上流端の流量のハイドログラフ

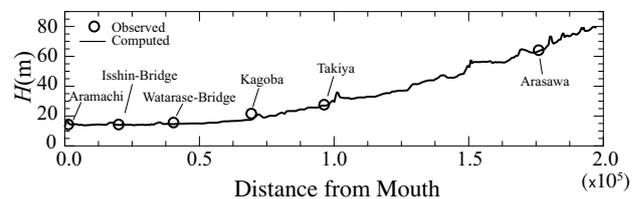


図-10 実測と計算された水位の縦断比較(計算開始から53時間後)

(3) 作用外力の評価指標の選定

現在の力学的な河道断面の設計手法³⁾では、それぞれの断面において計画高水位以下の水位における最大流速を代表的な指標として採用するものとされている。しかし、力学的に根本的な視点に立ち返ると、設計された断面や構造物が洪水流に抵抗できるか否かは流れによりもたらされる仕事量から規定されることは自明であり、最大流速だけからの判断には疑義が残る。また、これらの流速は本章において実施したような水理解析から算定され、平面2次元解析からは豊富な情報が得られる。ここでは、これらを最大限に活用することで、最大流速よりも合理的な流体力の作用時間を導入した作用外力の評価指標について検討を行う。

河床変動量は、摩擦速度あるいはこれに河床材料の粒径を反映した無次元掃流力により評価することができる。ただし、計算格子と同程度の解像度の河床材料の粒径の空間分布は測定することが実際的に困難である

ことから、本研究では掃流力ではなく摩擦速度を指標として利用する。

本研究では、最大流速、時間積分された流速、最大摩擦速度、時間積分された摩擦速度の四者を評価指標の候補とする。ここで、時間積分された摩擦速度は、

$$U_T^* = \int_0^T \sqrt{u_i^{*2} + u_j^{*2}} dt = \int_0^T \sqrt{gh(i_e^i + i_e^j)} dt \quad (1)$$

として求めた。ここで、 U_T^* が時間積分された摩擦速度、 T が河道への流体力の作用総時間、 u_i^*, u_j^* が縦断方向 i と横断方向 j の摩擦速度、 g が重力加速度、 h が水深、 i_e^i, i_e^j が流下方向 i と横断方向 j のエネルギー勾配である。ただし、 i_e^i, i_e^j は上下流と左右岸の端部の計算格子を除き、計算格子の各方向座標軸に沿うように中央差分で求めた。

以降において、評価指標と被災箇所との対応関係を明らかにすることで、いずれの評価指標が河道内の脆弱箇所の推定にとって適当であるかを調べる。

(4) 評価指標と被災箇所の対応関係

a) 0km から 10km

0km から 10km の区間では、**図-4 a)** と **5** を組合せると、低水路内の顕著な洗掘が 1km から 3km、7.5km 前後の右岸や 8.2km 前後の左岸の護岸被災、逆に 5km から 6km では河道内と護岸のいずれとも被災が発生していないことが分かる。

図-5 の 2 から 4 段目に示した最大流速、時間積分された流速、最大摩擦速度、時間積分された摩擦速度の 4 つの評価指標のうち、いずれの被災箇所とも良好な対応関係が認められるのは時間積分された摩擦速度である。被災箇所と評価指標との一致を表す濃色で着色されている。そのうえ、0km から 4km までの区間のうち比較的洗掘深が小さかった 0km から 1km は淡色に着色されるなど経験だけでは判断の難しい箇所を克明に表現している。ただし、4.7km 右岸と 6.5km 左岸の被災については評価はできていない。一方で、最大流速と時間積分された流速は同じ傾向を示し、これらから被災状況との対応関係を認めることは難しい。また、最大摩擦速度による評価についても 1km から 3km の着色は被災状況と一致するものの、それ以外の被災箇所には一致を表す濃色での着色がない結果となった。

b) 10km から 20km

10km から 20km の区間では、**図-4 b)** と **6** を組合せると、低水路内の顕著な洗掘が 11km や 13.5km 前後、また 14.6km 付近で大規模な河岸浸食が発生していることが分かる。このほか 15km 前後と 16km 前後の左岸や 17.5km の右岸や 18.1km 前後の左岸で護岸被災が発生していたことが分かる。

前項の 0km から 10km の区間とは異なり、10km から 20km の区間では、4 つの評価指標ともそれぞれの被災箇所を比較的良好に把握できることがわかった。また、今回の出水で最大の被災箇所となった 14.6km の地

点についてはどの評価指標によっても明瞭に示された。そのうえ、時間積分された摩擦速度による評価は他の 3 つと比べると局所的な濃淡が明瞭に現れ、この区間の被災箇所と良好な一致を示した。全体としてこのような良好の一致が認められる一方で、15.8km の右岸、19km 前後の右岸などの被災箇所についての対応関係は明瞭と言えるものではなかった。ただし、19km 地点については最大流量時にこの蛇行部を短絡するように洪水が流下した可能性が否めない。今回の解析では河道内の水理量のみを追跡対象としているため、この地点の評価についての言及は現時点では見送る。

上記までの考察から、時間積分された摩擦速度による評価指標は、土質や河床材料の情報を無視した土砂水理学的な視点のみの指標とはいえず、相対水深が大きくなる複断面に加え幅広断面の両者の被災評価の指標として極めて有用であると結論できる。そのうえ、数値解析から得られる一般的な水理量のみから算出が可能である点からも実用性を兼備していると言える。

5. おわりに

破堤することなく超過洪水が流下した五十嵐川における河道変形の規模を調べた結果、全体に 2 から 3m の河床低下が見られたうえ最大で 5m 程度も洗掘されている箇所が複数確認され、破堤の危険性が高かったことが明らかとなった。

洪水時の作用外力の把握などを目的に、被災前断面にこの超過洪水の流量ハイドロを与える平面 2 次元解析を実施した。得られた解析結果に基づき被災箇所をよく説明するための評価指標の検討を行った。流速と摩擦速度を軸に検討を行ったところ、相対水深が大きくなる複断面に加え幅広水路のいずれの区間においても時間積分された摩擦速度が大きくなる箇所が被災箇所ともっともよく一致することがわかった。このことは、現状の河道設計では流速のみを基準としているが、高速な流速が生じる可能性がある河川においては流速の作用時間をも踏まえた設計が必要であることを示唆するものである。

謝辞：本研究は、河川整備基金(代表者 玉井信行)および科研費基盤研究(B)(代表者 渡邊康玄)からの支援を受けて実施されている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.pref.niigata.lg.jp/kasenkanri/1317679266491.html>、平成 23 新潟・福島豪雨対策検討委員会、新潟県土木部
- 2) <http://i-ric.org/>、北海道河川財団
- 3) 護岸の力学設計法、国土開発技術センター、2001 年

(2012.4.5 受付)