

礫床河川における河川改修後の流況改善効果の 評価法 -根谷川を対象にして-

EVALUATION METHOD OF RIVER IMPROVEMENT IN A GRAVEL BED RIVER - CASE STUDY ON THE NENOTANI RIVER -

永井秀和¹・内田龍彦²・河原能久³・八木郁哉⁴・中野光隆⁵

Hidekazu NAGAI, Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA,
Fumiya YAGI and Mitsutaka NAKANO

¹学生会員 広島大学大学院博士課程前期 先進理工系科学研究科先進理工科学専攻
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 博(工) 広島大学院准教授 先進理工系科学研究科先進理工科学専攻(同上)

³フェロー会員 工博 広島大学副学長 学術・産学連携室(同上)

⁴正会員 東京建設コンサルタンツ株式会社 東京本社河川計画本部
(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15-6)

⁵正会員 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所(〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀3番20号)

At the Nenotani River in the Ota River basin, the maximum discharge was recorded during the heavy rainfall of H26.8, causing heavy damage. Although the channel had been improved after the flood, the revetment was damaged again during the heavy rain at 2018.7. In this study, two floods caused by the heavy rainfalls of 2014.8 and 2018.7 were analyzed for the river channel before and after the river improvement using Bottom Velocity Computation method. In addition, the effect of river improvement was evaluated quantitatively and qualitatively with water level and turbulence energy distribution. The methods showed the ability to examine the effect of river improvement quantitatively and qualitatively.

Key Words : BVC method, turbulence energy, quantitative and qualitative evaluation methods

1. 序論

大規模洪水時の河川治水機能を評価し弱点箇所を予測することが喫緊の課題になっている。河道形状や河床材料など河川ごとの特徴を考慮できる洪水流解析は、定量的に河道内の危険箇所を評価する手段として有効である。大規模洪水に対し治水の目的が防災から減災へと転換が起きている中、洪水流解析による弱点箇所の予測に基づき河道管理を行っていくことが今後の治水において重要と考えている。

河道洪水流解析には一般に平面二次元解析¹⁾²⁾が用いられ、比較的広域を対象に河床形状の予測等が行われている。橋脚まわりの局所洗掘現象に対しては、三次元解析法を適用される³⁾⁴⁾⁵⁾。また氾濫計算では、非定常二次元浅水流方程式を用いられ、各計算結果と氾濫原の大きさを比較し治水事業の効果が検討されている⁶⁾。

今回対象とする太田川水系根谷川では、下流端である

太田川・三篠川の3河川合流地点から河川改修による河道拡幅等を実施していたが、0k-3.4k程度までの河川改修を実施している中、H26.8豪雨で大きな被害を受けた⁷⁾。H26.8豪雨は戦後最大流量610m³/sが記録され、整備計画目標流量が見直され、3.4kmより上流の整備が進んだ。またH30.7豪雨では410m³/sが記録され、H26.8豪雨後と比較し3.4k-4.0k付近の流下能力は向上していたが、4.2k付近護岸が破壊された。現在これらH26.8豪雨、H30.7豪雨を受けて、根谷川では整備計画目標流量が460m³/sから710m³/sに見直されることが検討され⁸⁾、河川整備による更なる流下能力対策が必要とされている。

以上より、具体的箇所の河岸侵食対策としての護岸等の力学設計だけでなく、洪水時の流況から河岸侵食被害の危険度を検出することや、河川改修にともなう流況改善効果を評価する手法が必要と考えられる。そこで、本研究では、洪水流量を越水、溢水させない為の流下能力評価を量的評価、侵食、洗掘、流体力等による構造物被害を生じることなく安全に流下させられるかどうかの評

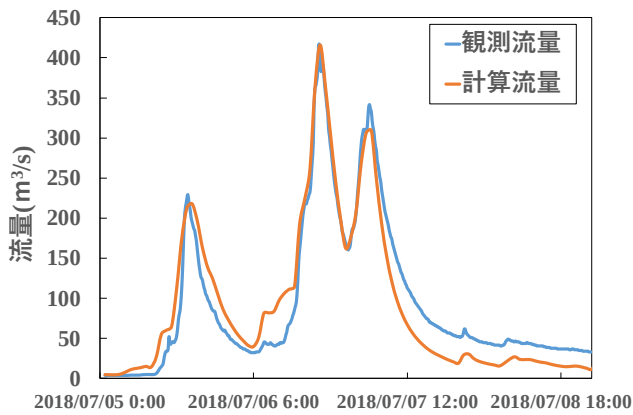


図-1 H30.7豪雨の流出解析結果

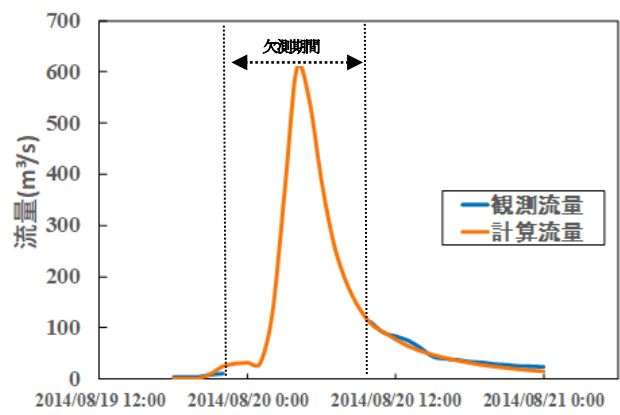


図-2 H26.8豪雨の流出解析結果

価を質的評価と呼ぶことにし、両者を評価する手法を検討することを目的とする。本研究では洪水流解析にはSBVC法(Simplified-Bottom Velocity Computation)⁹⁾を適用し、流れの三次元性を考慮した上で量的流下能力と質的流下能力の変化を根谷川の改修前河道(H26.8)と一部改修後河道(H30.7)で比較し検討する。河道の量的流下能力の検討には、左右岸の水位を用い計画高水位や堤防高と比較する。質的流下能力の評価には洪水流の乱れエネルギーが集中する箇所や局所洗掘や河岸侵食の起きる危険性が高くなると考えられる¹⁰⁾ことから、護岸沿いの乱れエネルギーの縦断分布と平面分布を調べ検討する。

2. 準三次元洪水流解析を用いた各豪雨再現計算

(1) 各豪雨の流出解析

H26.8豪雨とH30.7豪雨の流出解析を降雨流出氾濫モデルであるRRI (Rainfall-Runoff-Inundation model)¹¹⁾を適用し洪水流量ハイドログラフを定める。RRIモデルは浅水方程式を拡散波近似することで、式内の慣性項を無視して単位幅流量の計算を行っており、低平流域での河川流量の解析において精度が良いことが示されている¹²⁾。計算条件と解析パラメータを表-1に示す。パラメータは流域で同様として、H30.7豪雨時の根谷川2.16km新川橋流量観測所の流量ハイドログラフを利用し、H30.7豪雨時のピーク流量(2018/07/07 18:00)である416m³/sと一致するように決定した(図-1)。またH26.8豪雨では新川橋流量観測所では、一部観測流量が欠測しており(2014/8/19 23:00~2014/8/20 0:00)、H30.7豪雨時の流域パラメータを利用して計算した。計算結果と観測結果を比較すると流量が観測出来ていた期間の波形は大まかに一致している(図-2)。また今回の計算ピーク流量は609.11m³/sであり、既往の算定値⁷⁾(610m³/s)とほぼ一致した。

(2) 準三次元解析法

流れの三次元性を考慮し、危険箇所の把握を定量的に行う為、浅水流の仮定を用いたSBVC法を用いて、洪水

表-1 流出解析で用いた計算条件・パラメータ

	H26.8豪雨	H30.7豪雨
地盤データ	基盤地図情報数値標高モデル10mメッシュ	
土地利用	JAXA日本域10m解像度	
セルサイズ	150m	
比較観測流量	2.16k地点新川橋水位観測所	
対象雨量	XRAIN(250mメッシュ)	XRAIN-GIS(250mメッシュ)
計算期間	2014/8/19 18:00~2014/8/21 0:00	2018/7/15 1:00~2018/7/9 1:00
パラメータ	山地	平地
河道粗度係数	0.029	0.029
斜面粗度係数	0.25	0.25
土層厚(m)	1.3	0.5
有効空隙率	0.3	0.3
側方飽和浸透係数(m/s)	0.539	-
鉛直浸透係数(m/s)	-	5.56×10^{-7}

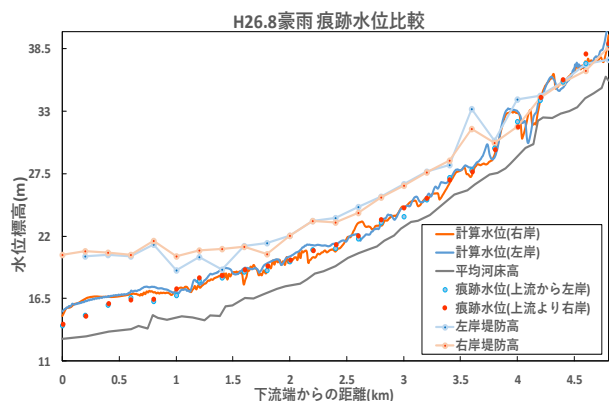
表-2 洪水流再現解析で用いた計算条件

	H26.8豪雨	H30.7豪雨
計算区間	0.0k(太田川と三篠川との合流点)~4.8k	
河道地形データ	横断測量データ・LPデータ(10m)	横断測量データ・LPデータ(5m)
上流端条件	H26.8豪雨 流出解析結果	H30.7豪雨 流出解析結果
下流端条件	縦断方向の水面勾配をゼロとする	
計算期間	2014/8/19 19:00~2014/8/20 18:00	2018/7/5 11:00~2018/7/8 5:00
河床粗度	ks(m)=D50(H25定期河床材料調査)	ks(m)=D50(H26定期河床材料調査)

流の計算を行う。SBVC法は広域で流れの解析が適用できる水深積分モデルの枠組みの中で、渦度を用いて式(1)より底面流速を評価し、鉛直方向の流速分布を計算できる準三次元解析法である。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij} \Omega_j h \quad (1)$$

ここに、 $i, j=1, 2$, (x_1, x_2) :水平 (x, y) 方向, ε_{ij} : Levi-Civita 記号, u_{bi} : x_i 方向の底面流速, u_{si} : x_i 方向の水表面流速, Ω_i : i 方向の水深平均渦度, h : 水深である。SBVC方程式の方程式は一般座標系で解かれる。計算条件を表-2に示す。格子間隔は横断方向に11分割、縦断方向に5mごとに分割している。今回河床を固定床として各豪雨の再現計算を行い、痕跡水位・観測水位と比較する。上流端条件には(1)の流出解析による流量ハイドログラフを与え



(a) H26.8豪雨痕跡水位比較

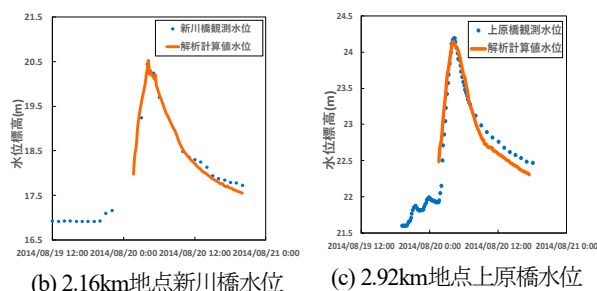
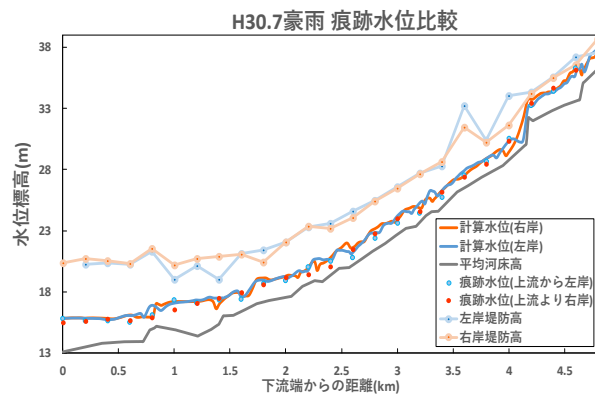


図-3 H26.8豪雨時の観測水位と計算水位の比較



(a) H30.7豪雨痕跡水位比較

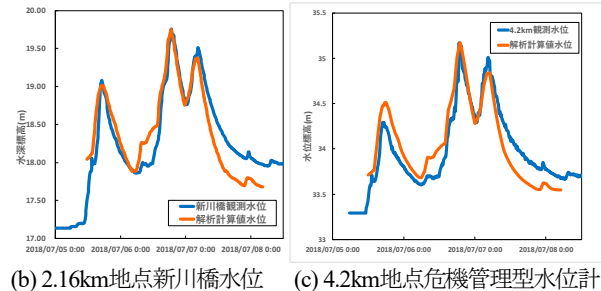


図-5 H30.7豪雨時の観測水位と計算水位の比較

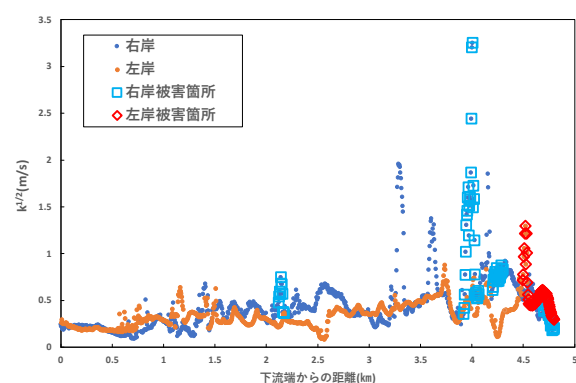


図-4 H26.8豪雨時の乱れエネルギー右左岸縦断分布

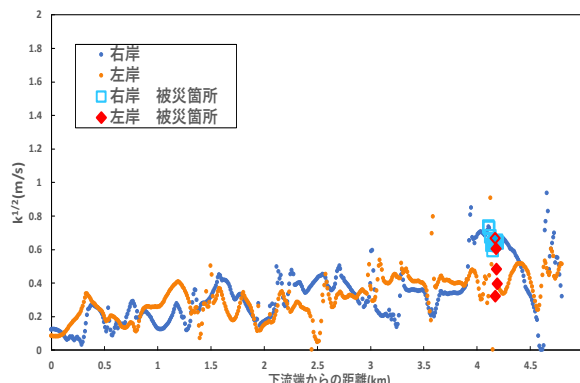


図-6 H30.7豪雨時の乱れエネルギー右左岸縦断分布

る。上下流端共に300m程の助走区間を設けた。初期条件はまず上流流量を一定に与え続け、流れが定常となったところで計算を開始している。河床粗度は定期横断測量が行われた地点間で線形近似を行い決定した。八木ら¹⁰⁾は乱れエネルギーが大きい箇所では、河岸侵食の危険性が高くなることを示している。SBVC法では乱れの局所仮定をし、各流速より乱れエネルギーは式(2)で計算される。係数には灘岡ら¹³⁾の値をそのまま用いた。

$$k = \frac{4C_h C_\mu}{5C_\epsilon^{1/2}} (8\Delta u_i^2 - 7\Delta u_i \delta u_i + 2\delta u_i^2) \quad (2)$$

$C_h=2.25$, $C_\mu=0.09$, $C_\epsilon=1.7$, U_i : x_i 方向の平均流速, $\Delta u_i = u_{si} - U_i$, $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ である。

a) H26.8豪雨における洪水再現計算

計算期間は2014年8月19日19時から2014年8月20日18時

とした。図-3にH26.8豪雨時の観測水位と計算水位の比較を示す。痕跡水位は概ね再現出来ているが、下流端付近0.0km~0.6km区間において解析水位が高くなっている。この差は本洪水において、根谷川で大きな流量であったが三篠川の流量が小さく合流部の水位が低かった為、洪水中河床が大きく低下した為と考えられる。図-4の左右岸沿いの乱れエネルギーと被災箇所の比較では、被災箇所と乱れエネルギーの大きい地点が一致した。また一方で3.2km付近と3.6km付近の右岸で乱れエネルギーが高い値を示したが被災箇所は見られなかった。これは3.2km付近でS47.7洪水にて約300mの法先洗掘被害、3.6km付近ではH20, H23の出水期後に護岸被害を受けた履歴があり、当豪雨時に被害がなかったのは護岸改修の効果であったと考えている。

b) H30.7豪雨における洪水再現計算

図-5にH30.7豪雨時の観測水位と計算水位の比較を示す。

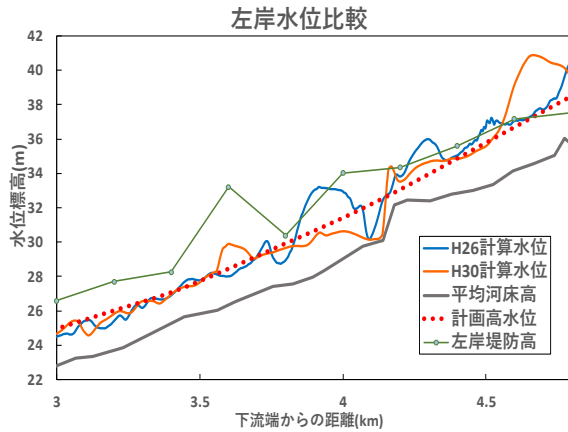


図-7 改修前後の右岸縦断水面形の比較

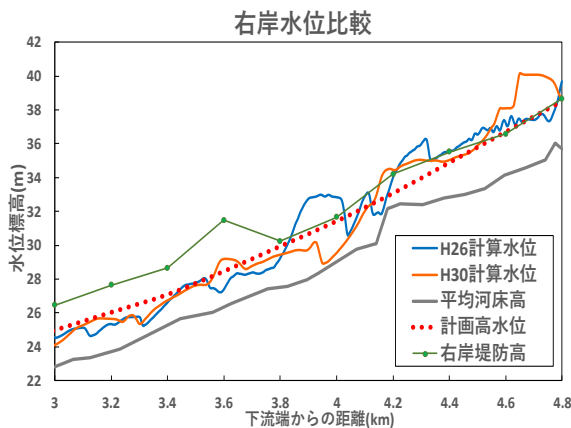


図-8 改修前後の右岸縦断水面形の比較

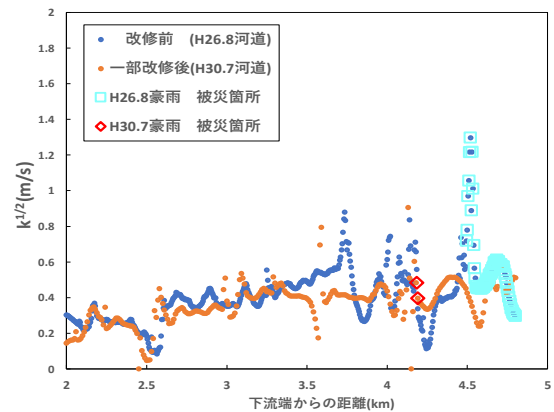


図-9 改修前後の乱れエネルギー左岸縦断分布

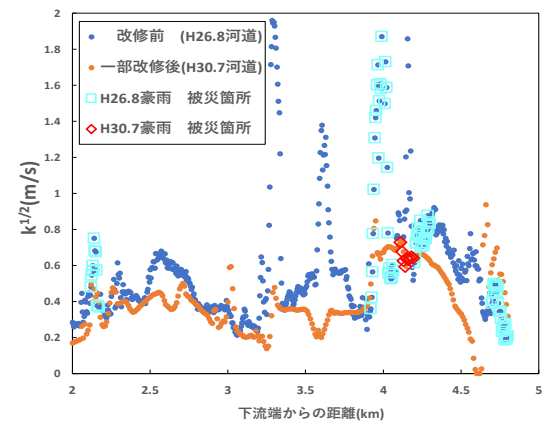


図-10 改修前後の乱れエネルギー右岸縦断分布

計算期間は2018年7月5日11時～2018年7月8日5時とした。水位計と計算水位の誤差は図-1のずれとほぼ同じ傾向であり、流出解析で求めた計算流量と観測流量との誤差が原因と考えている。しかし、ピーク流量時の観測水位と計算水位や痕跡水位は概ね値が再現できたといえる。図-6の乱れエネルギーの検証から被災箇所では他と比べて乱れエネルギーが高くなっていることがわかった。以上より、八木ら¹⁰⁾の三篠川の検討においても、河岸侵食被災箇所は乱れエネルギーが周囲に比べて高くなっている箇所で生じており、乱れエネルギーによって河岸侵食危険箇所を評価できる指標となり得ることが改めて確認された。

3. 流下能力改善効果の量的・質的検討

改修前・一部改修後の河道に既往最大流量を記録したH26.8豪雨流出解析結果を用い、各河道の洪水流の流況を河川事業実施区間である3.0～4.8km区間において比較することで河川事業効果を量的・質的に評価をする。今回回量的評価として左右岸の縦断水面形と堤防高・計画高水位を比較し、質的評価では乱れエネルギーを平面分布と護岸付近の縦断分布を比較する事で危険箇所の変化やエネルギー強度の変化を捉えることで評価を行う。

(1) 量的評価

右左岸の縦断水面形を比べることで水位がどの程度低下するかを検討する(図-7, 8)。縦断水面形には、計算期における各メッシュの水位標高の最大値を用いる。河川改修区間において、3.8km～4.0km区間で水位以下を出来ている。特に3.8km～4.2km区間の引堤・河床掘削等の効果により、計画高水位や両岸の堤防高を大幅に超えていた水位が計画高水位以下に低減することがわかる。4.6km～4.8km地点で水位が顕著に高くなっているが、これは拡幅事業途中の地点に対し、河道事業未実施区間の河道の川幅が狭く、急縮部が形成されていた事に加えて本解析では河道から堤内地の水の氾濫を考慮していない点も挙げられる。なおH30.7豪雨時にはこの地点で旧堤防を越えた痕跡が見られた。以上の検討より、氾濫の危険性を下げる量的な効果が示された。

(2) 質的評価

乱れエネルギーの縦断分布図・平面分布図を改修前後で比較し検討を行う。各メッシュの助走区間を除く流量ハイドログラフ内の最大値を用いて算出した結果を用いている。図-9,10は乱れエネルギーの縦断分布、図-11は乱れエネルギーの平面図である。乱れエネルギーの経時的な変化を追った時、特に流量ピーク時で最大値を取っていた。縦断分布を見ると河川事業が行われた区間にお

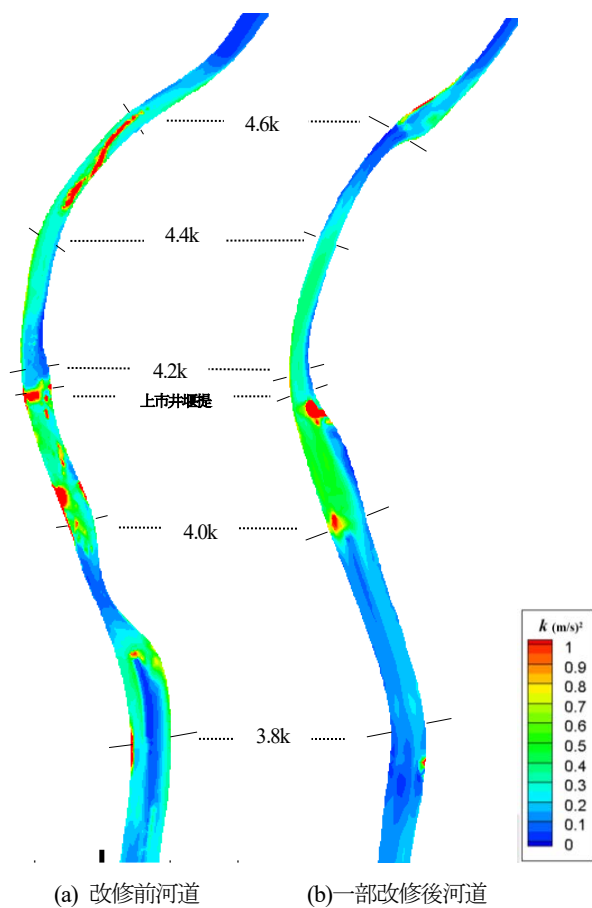


図-11 改修前後の乱れエネルギー平面分布の比較

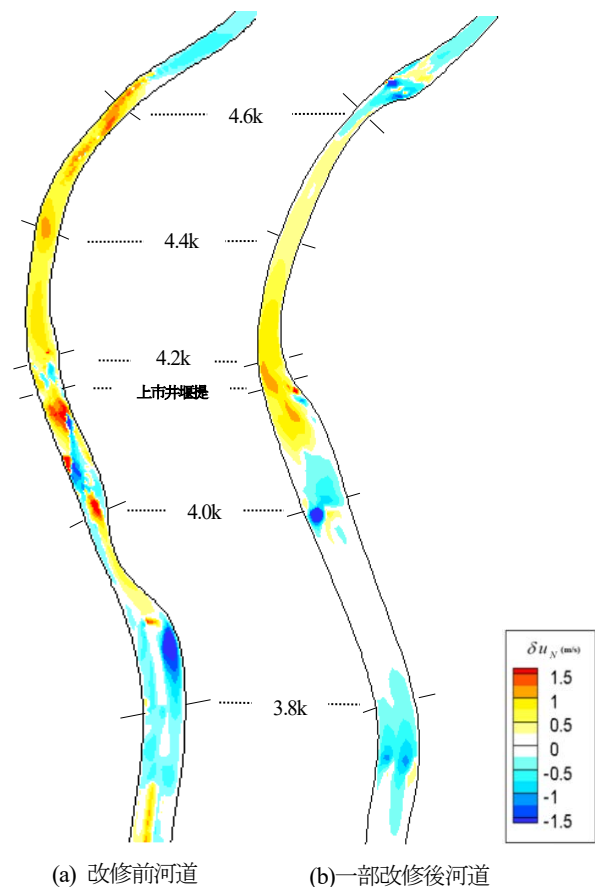


図-12 改修前後のSBVCの結果を用いて算出した δu_N

いて、改修前と一部改修後で比較すると全体的に低減していることがわかる。主に右左岸の縦断分布のうち、3.5～3.8kmの乱れエネルギーが大きく低減しており、一部改修後の河道において改修前の最大1/2以下になっている区間もある。4.2km付近の上市井堰堤直下では全体的に値は低減したものの、一部改修後(H30.7)の河道で見ると4.0km～4.2km区間では他の区間よりも比較的高い値であった。堰直下では流れの三次元性が高くなる傾向が見られ、河道の危険箇所の変化がしていなかったことが考えられる。図-11の平面分布より改修前の河道の被災箇所4.2～4.3km付近で護岸沿いに乱れエネルギーが低減しており、その4.6km付近においても同様に値が大きく減少している。以上より被災箇所付近での乱れエネルギーが減少し、流下能力の向上に対する効果が示された。事業実施区間において二次流方向の底面と水面の流速差を式(3)で、主流方向を等流状態からの流速分布の変形を考慮して計算した式(4)を用いて流れの検討を行う。

$$\delta u_N = (\delta u_i - \delta u_{ei}) \cdot \frac{(\varepsilon_{ij} U_j)}{|U|} \quad (3)$$

$$\delta u_s - \delta u_{es} = (\delta u_i - \delta u_{ei}) \cdot \frac{U_i}{|U|} \quad (4)$$

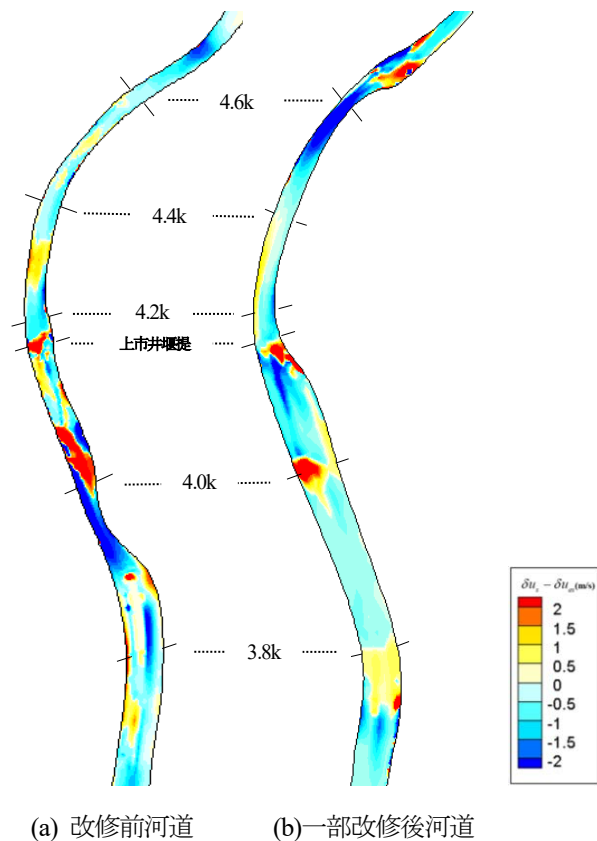


図-13 改修前後のSBVCの結果を用いて算出した δu_s

ここに、 δu_N , δu_S : 水面と底面流速差の、流れに対して垂直右方向 (N) , 流れ方向 (S) 成分, δu_{ei} : 等流状態における底面と水面の i , S 方向の流速の差である。図-12は主流方向から二次流方向が右回りのときは赤のコンターで、左回りのときは青のコンターで表す。また図-13は等流の流速分布に対して、直立している場合は青のコンターで、傾倒している場合は赤のコンターで表す。これらの値は各メッシュの助走区間を除く各値の最大値を用いて算出した。図-12より乱れエネルギーの大きい値を示した地点で、強い二次流が形成されていることがわかる。特に4.2~4.3kmでは河道の湾曲部で二次流が形成され乱れエネルギーが大きくなったものと考えられる。堰本体を改修の着工途中であり影響の検討は出来ていないが、図-13より4.2kmの堰直下では流れが改修前後では主流に対し流速分布が傾倒する傾向が見られた。堰により流れの三次元性が大きくなり、乱れエネルギーは改修前でも堰直下で大きい値をとっており、改修後も堰の影響により高い値が見られたと考えられる。

4. 結論

本研究では洪水流解析にて再現計算を行った後に、改修前河道(H26.8)と一部改修後河道(H30.7)に既往最大流量を記録したH26.8豪雨のハイドログラフを用いて、改修効果を量的、質的に比較し検討した。以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

- 1) 本解析法を用いてH26.8, H30.7洪水時の水位が再現できることを示した。また両洪水において侵食被害を受けた箇所は洪水時の乱れエネルギーが高い箇所であることを示した。
- 2) 量的評価では、河川改修による洪水時の水位の低減量を調べ、事業実施3.8k~4.0km区間で計画高水位以下の水位でH26.8豪雨による洪水を流下できることを示した。
- 3) 質的評価により河川事業実施区間では乱れエネルギーが低減しており、河道内の危険箇所が低減することを示した。これは引堤による2倍程度の拡幅は水位のみならず、底面せん断力や乱れなど流れの3次元性からもたらされる河岸侵食の危険性も低減させることを示した。

本研究より、乱れエネルギー分布を用いることで、洪水時の河岸侵食を引き起こす危険性のある流況抽出や、河川整備による流況改善効果を評価できる可能性が示された。乱れエネルギーによる流況評価の定量指標のさらなる検討を行うとともに、実用的な流況評価手法の開発が必要であり、この点については今後の課題とする。

参考文献

- 1) 清水康行, 板倉忠興, 山口甲 : 2次元モデルを用いた河床形態変化のシミュレーション, 水理講演会論文集, No.31, pp.689-694, 1987.
- 2) 西本直史, 清水康行, 青木敬三 : 流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算, 土木学会論文集, No.456, pp.11-20, 1992.
- 3) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y.: Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, No.12/V-131, pp.1074-1087, 2005.
- 4) Roulund, A., and Sumer, B. M. and Fredsøe, J., and Michelsen, J.: Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, J. Fluid Mechanics, vol.534, pp.351-401, 2005.
- 5) Olsen, N.R.B., and Kjellesvig, H.M.: Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth, Journal of Hydraulic Research, vol.36, pp.579-590, 2010.
- 6) 田中 甫幸, 清水 康行, 木村 一郎, 岩崎 理樹 : 札幌市における河道改修と氾濫形態の変化, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, pp.11-20, 2011.
- 7) 中野光隆, 兒子真也, 入川直之, 大森嘉郎 : 平成30年7月豪雨の概要及び太田川水系根谷川における河川整備効果, Vol.75, No.1, pp. 239-243, 2019.
- 8) 国土交通省中国地方整備局 ; 太田川水系河川整備計画変更目標・整備メニュー(案), 第13回河川整備懇談会, 資料-4, 2020.
https://www.cgr.mlit.go.jp/oitagawa/plan2/pdf013kondankai/siryou4_dai13kaioitagawa.pdf
- 9) Uchida, T., Fukuoka, S.: Numerical calculation for bed variation in compound-meandering channel using depth integrated model without assumption of shallow water flow, Advances in Water Resources, Vol.72, pp.45-56, 2014.
- 10) 八木郁哉, 内田龍彦, 河原能久 : 大規模洪水時における河岸侵食 危険箇所の検出法, 河川技術論文集, 第25巻, pp.729-734, 2019.
- 11) 佐山敬洋, 立川康人, 賓馨, 市川温 : 広域分布流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, No. 803/II 73, 13 27, 2005.
- 12) 佐山 敬洋, 建部 祐哉, 藤岡 奨, 牛山 朋来, 萬矢 敦啓, 田中 茂信 : 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集B1, Vol.69, No.1, pp.14-29, 2013.
- 13) 灘岡和夫, 八木宏 : 浅い水域の乱流場に関する数値解析モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No.473/II-24, pp.25-34, 1993.

(2020. 4. 2受付)