北川の大規模河川改修が川坂地区の 砂州地形と流況に及ぼす影響

IMPACT OF RIVER IMPROVEMENT ON SAND-BAR BEHAVIOR AND STREAM REGIME IN THE KITA RIVER

平川隆一1・渡邊訓甫2・杉尾哲3・中田哲二4・小南考輝5 Ryuichi HIRAKAWA, Kunitoshi WATANABE, Satoru SUGIO, Tetsuji NAKATA and Takaki KOMINAMI

1正会員 博(工) 佐賀大学助教 大学院工学系研究科(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町本庄1番地)
2正会員 工博 佐賀大学名誉教授(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町本庄1番地)
3正会員 工博 宮崎大学名誉教授(〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西一丁目1番地)
4正会員 修(工) 株式会社建設技術研究所(〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町一丁目6番7号)
5学生会員 学(工) 佐賀大学 大学院工学系研究科(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町本庄1番地)

The heavy rainfall by Typhoon No.19 in 1997 caused severe flooding, resulting in severe damage to the Kita River in the northern part of Miyazaki Prefecture, Japan. Sand-bars were excavated to enlarge the conveying cross section of the river channel as a special emergency project. Large amounts of sand gravels have been accumulated on the excavated area due to several floods after improvement works.

In this paper, changes of topographical features of an excavated sand-bar due to floods were examined. In addition, future topographical changes of the sand-bar were numerically simulated using the 2-D riverbed evolution analysis and it was considered that the amount of accumulated sand gravels reaches to over 2.0 m in height due to four times of floods.

Key Words: River improvements, sand-bar, topographical changes, simulation of 2-D riverbed evolution, flow resistance

1. 序論

宮崎県の北川では度々洪水による被害が発生している. 1997年9月には九州地方を縦断した台風19号に伴う出水により,14km付近左岸,8km付近左岸の2箇所で堤防が決壊し、家屋・事業所などの浸水、交通網の寸断など広範囲にわたる甚大な被害が発生した。この豪雨による出水規模は、1955年以降の北川観測史上最大となり、14.6km地点の熊田観測所での最大流量は5,067m³/sに達した。この出水による大災害を契機として、河川法改正後初の「河川激甚災害対策特別緊急事業」(以下、激特事業と呼ぶ)に採択され、川島橋(4km付近)から北川大橋(15.4km付近)までの約11.7kmの区間で緊急的に河川改修が行われた。この激特事業では、河川生態系への影響を考慮し、基本方針として極力低水路掘削は行わないこととして、主に高水敷に繁茂していた河畔林の伐採、あるいはそれに加え平水位+1m以上の標高での高水敷地盤掘

削が行われた. 川坂地区湾曲部(13.4~14km)の固定砂州 も高水敷化して河畔林が繁茂していたため激特事業の対 象となり、砂州の掘削とともに大部分を覆っていた河畔 林が伐採された. このように、北川における激特事業は その実施規模が大きいことから、河川形態や生態系に及 ぼす影響を把握することが重要である.

これまでの北川に関する研究では、激特事業で掘削されなかった砂州を対象に過去の出水による地形変化と植生域変化の特性を明らかにしたもの¹⁾、激特事業で掘削された砂州上の植生分布と年最大流量との関連性や事業前後の流況の変化を考察したもの²⁾、砂州上の植生の被覆状態や繁茂状態などの植生状況を表現する変数(植被指数)を導入し、この値の変化を出水時の流量規模と関連付けて解析を行なったもの³⁾、砂州の地形変化パターンとその進行速度、および植物群落分布を現地調査結果に基づいて推定し、河道管理の立場から見て重要な1~10年スケールの変化についてシステムとしての解釈を加えたもの⁴などがある。激特事業が実施された的野地区

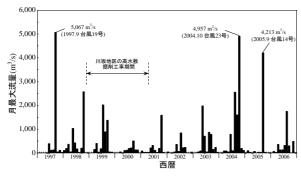


図-1 1997年1月以降の月最大流量

(8.8~9.8km)と同様に⁴⁾, 川坂地区においても, 事業後の 出水で掘削面に新たな砂礫堆が形成され, 出水の度に発達している. 今後も出水による地形変化が生じていくも のと予想されることから, 地形変化やそれに伴う通水能 力の変化を予測することが, 今後北川の河川管理上極め て重要である.

そこで本研究では、川坂地区を対象に大規模な河川改修後の出水による砂州地形変化特性を現地調査から明らかにするとともに、数値解析によって、河道応答や砂州地形の変化が洪水疎通能力に与える影響を検討する.

2. 研究対象砂州

(1) 川坂地区の河道特性

川坂砂州は13.4~14km区間に位置し、左岸湾曲部に形成された固定砂州である。川坂地区の平均河床勾配は約1/1,000、セグメント分類ではセグメント2-1に分類されている⁵. 平均的な河道幅は200m程度で、湾曲部では最も幅が広く約250mとなっている。

(2) 激特事業後の出水状況

図-1に示すように、激特事業後もほぼ毎年最大流量1,000~2,000m³/sの出水を生じているが、2004年には台風23号によって1997年と同規模の最大流量4,957m³/sの出水が、また、2005年には台風14号によって最大流量4,213m³/sの出水を生じている。

3. 砂州の地形変化

砂州幅が最大である13.6km地点の砂州横断形状を図-2 に示す. 1998年度に開始された高水敷の掘削工事は2001年3月までに終了しており、同年4月のラインは掘削直後の形状を表している. 図-1に示すように、2003年11月までに中規模の出水が2度(最大流量1,597m³/s, 1,981m³/s)起きているが、大きな地形変化は生じていない. しかし、2004年10月には台風23号による出水で掘削面上に明瞭な前縁線を有する砂礫堆が形成されて最大1m程度堆積し、

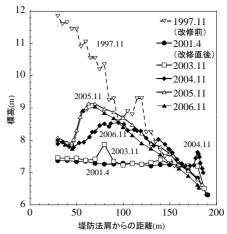


図-2 13.6km地点における川坂砂州横断形状

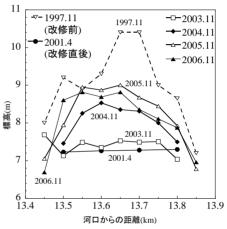
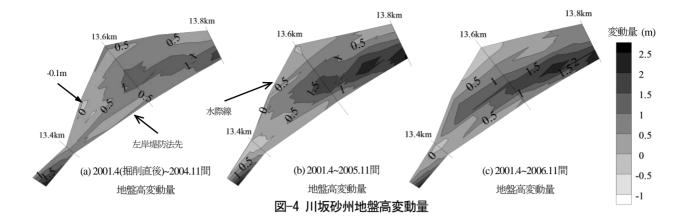


図-3 堤防法先から60mにおける川坂砂州縦断形状

2005年9月の出水で左岸側にさらに1m程堆積するなど、標高は掘削時から最大で約2m高くなった.

図-3に、左岸堤防法先からの距離が60mの位置における縦断形状を示す。2003年11月までは大きな地形変化は生じていない。2004年11月には、同年10月に生じた出水により13.55km付近を前縁線とする波高約1mの砂礫堆が形成されていることがわかる。その後、2005年の出水で堆積厚を増し、2006年の出水では波高はほとんど変化しなかったが、砂礫堆は50m程前進した。

図-4に、掘削直後から2004年11月、2005年11月および2006年11月までの堤防法先から水際間の砂州全域の地盤高変動量を示す。掘削直後から2004年11月間(a)では、2004年の出水で掘削面全域に砂礫が堆積し、13.55km付近を前縁線とする砂礫堆が形成されているのがわかる。一方、砂州下流端の13.45km付近では0.1m程洗掘され、それより下流側では法先付近に1.5m程堆積している。これは砂礫堆の形成による上流からの土砂供給の減少と、洗掘された砂礫の輸送によるものと考えられる。2005年11月の時点(b)では、2005年9月の出水によって13.6~13.8km間の砂州中央部で砂礫堆はさらに0.5m程堆積厚を増している。2006年11月の時点(c)では、2006年8月の出水により砂礫堆は50m程前進し、前縁線が13.5km附近に



達しているのがわかる.このように、激特事業で掘削された川坂砂州ではその後の出水により掘削面上に砂礫堆が形成され、最大堆積厚が約2mに達するなど、その規模を拡大させている.

4. 流れ解析

激特事業後の地形変化が流況に与える影響を把握する ために、一般座標系の二次元浅水流方程式を基礎式^のと する流れ解析を行った。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{uM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{vM}{J} \right) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{uM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{vM}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_{y}}{J} \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\eta_{x}}{J} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right)$$

$$-\frac{\tau_{bx}}{\rho J} - \frac{f_{vegx}}{\rho J} + \frac{\xi_{x}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'}^{2}h \right) + \frac{\xi_{y}}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'}v'h \right)$$

$$+ \frac{\eta_{x}}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'}^{2}h \right) + \frac{\eta_{y}}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'}v'h \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{N}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{uN}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{vN}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_{y}}{J} \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\eta_{y}}{J} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) = -gh \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial U}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho_J} - \frac{f_{vegy}}{\rho_J} + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'}h \right) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2}h \right) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'}h \right) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2}h \right) \tag{3}$$

ここに、gは重力加速度(=9.8m/s²)、u、vはx、y方向成分の水深平均流速、hは水深、 ρ は水の密度(=1,000kg/m³)、Hは基準面からの水位、Jは座標変換ヤコビアン、 τ_{bx} 、 τ_{by} は底面せん断応力のx、y 方向成分、 f_{vegx} 、 f_{vegy} は植生抵抗のx、y 方向成分、 $-\overline{u'^2}$ 、 $-\overline{u'v'}$ 、 $-\overline{v'^2}$ は水深平均レイノルズ応力のx、y 方向成分である。底面せん断力はマニング則を用いて次式で与える。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2u}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2v}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$$
 (4)
ここに、 n はマニングの粗度係数である。単位面積当りの植生抵抗は次式で与える。

$$f_{vegx} = \frac{\rho g L_0}{K^2} u (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}, \ f_{vegy} = \frac{\rho g L_0}{K^2} v (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$$
 (5)

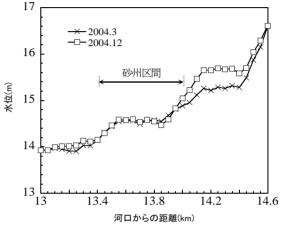


図-5 ピーク流量時の川坂地区水位

ここに、 L_0 は植生の投影高である。粗度係数は高水敷で $0.032 \, \& 0.035$ 、低水路で $0.031 \, \& \& 0.031$ は上能囲は現地調査と航空写真で決定し 5,7 、植生高は文献 5 を参考にした。透過係数Kは流れ解析結果を洪水痕跡と比較して決定し、植生域内の粗度係数は福岡ら 8 の研究を参考にして $0.032 \, \& \& 0.032 \, \& \& 0.032$

2004年3月と同年12月時の河床形状を用い,2004年10月の台風23号による出水データを用いて13.0~14.6km区間について非定常解析を行った.この時期における砂州域の植生は、堤防法尻と水際沿いの草本類(アレチハナガサなど)であり²、解析上は裸地状態であるとした.

流量ピーク時の河道中央における縦断水位を図-5に示す. 前述のように掘削面上に波高約1mの砂礫堆が形成されたことにより,12月河床形状では14.0km地点から上流で流れが堰上げられ,14.2km地点では約0.5m上昇している. それに伴い14.0km付近では3月河床形状に比べ水面勾配が急になっている. 一方,14.0km付近から下流の砂州区間では地形変化による影響はなく,3月河床形状での水位とほとんど同じである.

ピーク流量時の流速等値線と流速ベクトルを図-6に示す。図中の点線は低水路を表している。13.9km地点周辺の低水路では、12月河床形状における流速の方が大きいが、これは14km付近の水面勾配が増大したためと考えられる。両河床とも砂州より上流では低水路にあった主

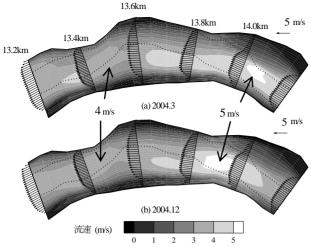


図-6 川坂地区の流速等値線と流速ベクトル

流部が、13.8kmから下流では砂州上に形成されている. 主流部が低水路から砂州上に移ることにより、洪水時には砂礫が低水路から砂州上に乗り上げてくることが推定される。3月河床形状の場合には砂州上で約5m/sに達する流速の大きな主流部が13.6km近くまで形成されているが、12月河床形状ではその範囲が縮小するなど、砂州上の流速の減少、低水路流速の増大が見られる。13.4~14kmの砂州区間では水位の変化はほとんどないが、平坦な掘削面上に砂礫堆が形成されることによって流速場に特徴的な変化が生じている。

5. 河道応答特性

(1) 解析方法

川坂砂州の河道応答予測および砂礫堆積が洪水疎通能力に与える影響を検討するために、河床変動モデルを構築した。用いた流量ハイドログラフは、図-7に示すように2004年の出水と2005年の出水の後、2004年の出水を模擬洪水として7回与えた。これは、図-1に示した過去の出水履歴および本村地区(11.0~12.0km)ではほぼ6年に一度の頻度で出水による植生の大破壊が生じていることのなどを勘案すると40~50年間に相当する。ただし、図中には模擬洪水の2回分のみ表示している。

流れ解析は前章と同様であり、河床変動解析の基礎式 は次に示す二次元流砂連続方程式および粒径階別質量保 存則である.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Z_b}{J} \right) + \frac{1}{1 - \lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Sigma q_b \xi k}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Sigma q_b \eta k}{J} \right) \right\} = 0 \tag{6}$$

$$E_{m} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_{bk}}{J} \right) + P \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Z_{b}}{J} \right) + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{b\xi k}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{b\eta k}}{J} \right) \right\}$$

ここに、 Z_b は河床高、 λ は河床材料の空隙率(=0.4)、 $q_{b\xi k}$ 、 $q_{b\eta k}$ は ξ 、 η 方向の粒径別流砂量である。流砂は掃流砂のみ考慮することとして、粒径別流砂量には次式に示す

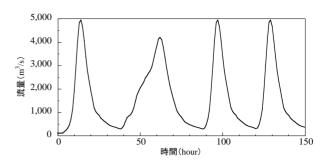
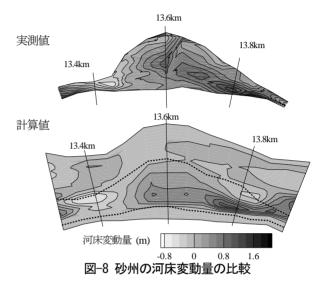


図-7 解析に用いたハイドログラフ



ように流線方向及び流線と直交する方向にそれぞれ芦田・道上の式 10 、長谷川の式 $^{11)}$ を用いた.

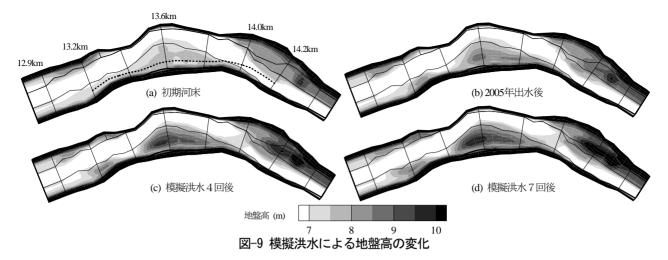
$$q_{bsk} = 17 p_{bk} \tau_{*ek}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_{*}} \right) \sqrt{sgd_{k}^{3}}$$
 (8)

$$q_{bnk} = q_{bsk} \left(\frac{h}{r_s} N_* - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\mu_s \mu_k \tau_{*k}}} \frac{\partial Z_b}{\partial n} \right)$$
(9)

ここに, p_{bk} は交換層内の粒径階kの存在率, τ_{*ek} , τ_{*ck} , τ_{*k} はそれぞれ粒径別の無次元有効掃流力,無次元限界掃流力,無次元掃流力, u_{*ck} は限界摩擦速度, u_* は摩擦速度,s は河床材料の水中比重(=1.65), d_k (k = 1,2,…,n)は各粒径範囲の代表粒径, r_s は流線の曲率半径, μ_s , μ_k はそれぞれ河床材料の静止摩擦係数(=0.7)および動摩擦係数(=0.5)である。 N_* は2次流の強度を表す係数で,Engelund¹² に従い7.0とした。また式(7)において $\partial Z_b/\partial t \geq 0$ (堆積)のとき $P=p_{tk}$, $\partial Z_b/\partial t \leq 0$ (洗掘)のとき $P=p_{tk}$, E_m は交換層厚(初期粒度分布の D_{90} 程度の値), P_{bk} は交換層内の粒径階kの存在率, P_{tk} は交換層直下の層(遷移層という)内の粒径階kの存在率である。

なお,河床変動解析プログラムの構築にあたっては, 平野 13 ,浅野・藤田 14 ,鈴木ら 15 ,芦田ら 16 ,藤井 17 ,長 田ら 18 ,Simizu 19 ,竹林 20 ,国土技術研究センター 21 の研究を参考にした.

初期河床として、砂州が掘削当時の状態を維持していた2004年3月の河床を用いた。初期の河床材料の粒度分



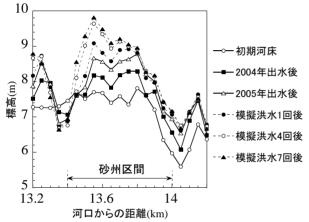


図-10 模擬洪水による砂州縦断形状の変化

布(平均粒径 d_m =4.2cm)は,現地調査結果 2)を参考にして作成 $^{22)}$ し,全格子点に一様に与えた.上流端では平衡流砂量を与えている.なお,植生の侵入・消長は考慮しないこととし,植生範囲,透過係数は河床変動に伴って変化しないものとした.

(2) モデルの検証

構築した河床変動モデルの検証のため、2004年出水による河床変動の再現を試みた. 図-8は、2003年11月~2004年11月間の河床変動量の実測値と計算値で、図中の点線は砂州域を示している。13.55km付近を前縁とする砂礫堆の形成、その前面の13.4km付近の洗掘、13.8km付近の堤防法先近傍における砂礫の堆積などが、本モデルで概ね再現できている。しかし、砂州上の最大堆積厚は、実測値の約1mに対し計算値は約0.5mとなるなど、砂礫の堆積厚は過小に見積もられている。

(3) 砂州地形変化の予測

模擬洪水による地形変化の状況を図-9に示す. ほぼ平 坦な状態であった川坂砂州には,2004年および2005年の 出水により砂州全体に砂礫が堆積し,13.6km付近にクレストを有する砂礫堆が形成され(b),図-4(c)に示す実測の状況を概ね説明している. その後の模擬洪水によりさらに砂礫が堆積し続け(c),砂州全体で河床標高が掘削以

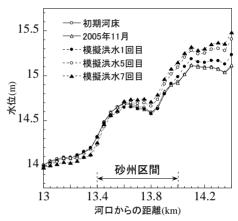


図-11 砂礫堆積による水位変化

前の状態に近づいていく様子が伺える(d). 図-10は、図-9(a)の一点鎖線上の縦断形状の変化を示したものである。初期河床では2004年出水、2005年出水により砂州は急激に堆積厚を増すが、その後の模擬洪水では地盤高の上昇率は小さくなっている。砂州地盤は模擬洪水4回後までで初期状態から約2~2.5m上昇するが、それ以降はほとんど変化がなく、模擬洪水4回後の地形がほぼ維持されている。堆積高の絶対値は、粒度構成や微地形による粗度の変化等の影響を受けるために確定的ではないが、平坦に掘削された川坂砂州は堆積傾向にあり、今後の出水によってさらに堆積が進行することが予想される。

(4) 砂礫堆積が洪水疎通能力に与える影響

各洪水の流量ピーク時における縦断水位を図-11に示す. 13.6kmから下流ではほとんど水位に変化はないが、砂州における砂礫堆積の増大に伴って上流域の水位は上昇しており、模擬洪水7回目で14.2km付近では約0.3~0.5m水位が上昇する. このように今後の出水による砂礫堆積は洪水疎通能力を低下させることがわかる.

砂州が冠水する流量に関して、横断水位で評価したものを図-12に示す。掘削直後の状態では流量が約300m³/sで砂州は冠水するが、模擬洪水7回後の河床では約1,000m³/sで砂州が冠水し、砂礫の堆積によって砂州冠水流量が増加する。冠水流量の増加は冠水頻度を減少させ

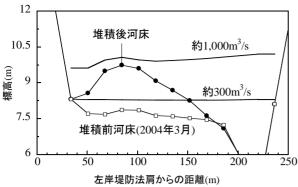


図-12 砂州冠水流量の変化(13.6km地点の横断水位)

るため、砂礫の堆積は通水能力の変化に影響を及ぼすだけでなく、洪水疎通の大きな阻害となる植生侵入を助長させることになると考えられる.

6. 結論

本研究では、大規模は河川改修が砂州地形や流況に与える影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 改修後の砂州上には砂礫堆が形成され、出水の度に 発達・前進している.砂州の標高は掘削直後に比べ 2006年11月には最大約2m高くなった.
- 2) 2004 年出水で形成された砂礫堆は、上流域で約 0.5m の水位上昇をもたらす抵抗を生じさせたと推 定される.
- 3) 河床材料の粒度分布を考慮した一般座標系の平面二次元河床変動モデルにより,2004年出水による川坂砂州の地形変化を概ね再現することができた.
- 4) 模擬洪水による河床変動解析によると、川坂砂州では今後さらに堆積が進行し、またそのことで洪水疎通能力の低下と上流域での水位上昇をもたらすことが予想される.

以上のように平坦に掘削された砂州上に再び砂礫が堆積しており、今後さらに堆積が進行することが想定される. 比高の増加による冠水頻度の減少は植生の繁茂を促し、抵抗や土砂動態にも影響を与えるため、砂州域における植生状態の変化を考慮した検討が必要である. 特に、植生が草本類から木本類に遷移すれば高水敷化を加速して改修以前の状態に向かうことになる. 高水敷掘削による河川改修の際には、当該河川における土砂動態の把握と河床変動予測に基づく河川管理のあり方を検討しておくことが肝要である.

謝辞:本研究は、北川における河川生態学術研究会の総合的な調査研究の一部として実施したものである。国土交通省国土技術政策総合研究所および延岡河川国道事務所、宮崎県土木部から貴重な資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉尾哲, 渡邊訓甫:北川における砂州の地形変化と植生域 変化に関する検討, 水工学論文集, 第48巻, pp.985-990, 2004
- 2) 杉尾哲, 渡邊訓甫, 小川陽平, 森川真伍, 平川隆一: 北川 の川坂砂州における植生変化について, 河川技術論文集, 第13巻, pp.195-200, 2007.
- 3) 杉尾哲, 渡邊訓甫:北川本村砂州における植生状況の変動 解析, 水工学論文集, 第49巻, pp.1435-1440, 2005.
- 4) 服部敦,瀬崎智之,福島雅紀,伊藤政彦,末次忠司:五ヶ瀬川支流北川における河道掘削による河原形成システムの変質について,水工学論文集,第48巻,pp.991-996,2004.
- 5) 九州地方建設局, 宮崎県, (財)リバーフロント整備センター: 五ヶ瀬 川水系北川 北川「川づくり」検討報告書, 1999.
- 6) 長田信寿:水理学公式集例題プログラム集平成13年度版, 土木学会, 2001.
- 7) 舛屋明芳, 森川真悟, 岩戸祐馬, 渡邊訓甫, 平川隆一, 杉 尾哲:北川河川改修事業における流況および河道の変化, 平成17年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, II-61, pp.305-306, 2006.
- 8) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の 樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, pp.607-612, 2007.
- 9) 杉尾哲, 渡邊訓甫:北川本村砂州における植生状況の変動 解析, 水工学論文集, 第49巻, pp.1435-1440, 2005.
- 10) 芦田和男, 道上正規:移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 11) 長谷川和義:沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究,北海道大学学位論文,1984.
- 12) Frank Engelund: FLOW AND BED TOPOGRAPHY IN CHANNEL BENDS, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.100, No.11, pp.1631-1648, 1974.
- 13) 平野宗夫: Armoringを伴う河床低下について, 土木学会論 文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.
- 14) 浅野富夫,藤田光一: 水理公式集例題集, 土木学会, pp.152-164, 1988.
- 15) 鈴木幸一,加藤幸一,鈴木哲,羽野敦之:混合砂礫河床変動の数値シミュレーションについて,愛媛大学工学部紀要,第12巻,第2号,pp.67-77,1991.
- 16) 芦田和夫, 江頭進治, 劉炳義: 二層モデルによる複断面河 道の流れおよび河床変動の数値解析, 京都大学防災研究所, 第35号, B-2, pp.41-62, 1992.
- 17) 藤井孝藏:流体力学の数値計算法,東京大学出版会,1994.
- 18) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄:河岸侵食を伴う河道変動の 特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.621 II-47, pp.23-39, 1999.
- Y. Shimizu: MUTUAL EFFECTS OF BED AND BANK DEFORMATION IN CHANNEL PLANE FORMATION, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol.22, No.2, pp.25-35, 2004.
- 20) 竹林洋史:河川中・下流域の河道地形, ながれ, 24, pp.27-36, 2005.
- 21) (財)国土技術研究センター:河床変動計算システムマニュアル、2006.
- 22) 中田哲二, 大崎頌太, 渡邊訓甫, 平川隆一, 杉尾哲: 宮崎県北川における砂州の河床変動解析, 平成19年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, II-40, pp.245-246, 2008.

(2011. 5. 19受付)