北川の川坂砂州における地形変化と草本植生の相互作用について

Interaction between Topographic Changes and Herbaceous Vegetation of Sand Bar

平川隆一*・渡邊訓甫**・小南考輝***

Ryuiti HIRAKAWA, Kunitoshi WATANABE, and Takaki KOMINAMI

*博(工) 佐賀大学助教 工学系研究科都市工学専攻 (〒840-0027 佐賀県佐賀市本庄町1丁目)

** 工博 佐賀大学名誉教授 工学系研究科都市工学専攻 (同上)

*** 学生会員 佐賀大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (同上)

The sand-bar in the Kawasaka district of the Kita River was excavated with vegetation in 2001 through the special emergency project after the severe disaster due to flooding by Typhoon No.19 in 1997. A flood on Oct. 2004 destroyed again almost all vegetation in a recovery process on the sand-bar. Nowadays, herbaceous vegetation is restored over all the sand-bar because of no flooding since 2008. In the paper, the destruction of herbaceous vegetation by the topographical changes of sand-bar was described from field survey and simulated through the 2-D analysis of the riverbed evolution. It was considered from the field survey that almost all vegetation were lean in 1/3 the height. Moreover, destruction of herbaceous vegetation has been reproduced by the built model..

Key Words: sandbar, herbaceous vegetation, geomorphological process, hydrodynamic force

1. 序論

宮崎県の北川では、1997年9月台風19号に伴う最大流量 $5,067 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水により甚大な被害が発生し、河川激甚災害対策特別緊急事業(以下、激特事業という)に採択された。これにより、計画流量を安全に流下させるために、大規模な河川改修が行われ、主に築堤や樹林の伐採、高水敷の掘削などが実施された¹⁾。しかし、その実施規模が大きいことから、河川形態や生態系への影響が懸念された。その影響を最小限にとどめることが重要であることから、事業の実施中から、長期的な視点でモニタリングも行われている²⁾。河道内植生は、生態系に重要な役割を果たしている一方で、洪水時には通水阻害要因にもなり、土砂輸送にも影響することからその消長が河川管理上重要な視点となっている³⁾。河口から約13.6km付近の川坂地区の湾曲部内岸に形成された砂州も高水敷化しており、激特事業により樹林の伐採と平水位+1.0mの高さで掘削が行われたが、改修事業が終了し裸地化した後も洪水毎に砂礫が再び堆積するとともに植生の消長が繰り返されている。

河道内植生に関する研究はこれまでに数多く行われている。木本植生については、清水ら⁴⁾、服部ら⁵⁾、

福岡ら⁶⁾により、木本植生の倒伏や破壊機構、透過係数や粗度係数の推定の研究が行われ、草本植生についても、瀬崎ら⁷⁾や福岡ら⁸⁾により倒伏や破壊に関してその形態や条件等が明らかにされている。また、福岡ら⁹⁾や服部¹⁰⁾は高茎草本の倒伏モデルや粗度係数の推定法を提案している。このように河道内植生についてその破壊形態や流況に与える影響は明らかにされてきているが、砂州の地形変化に伴う植生の消長など、草本植生と河床変動との相互作用は今のところ不明である。

著者らは、北川の激特事業後、洪水に伴う砂州の地形変化と砂州上の植生変化について一連の研究を行ってきた^{11)~15)}。地形変化に伴う植生破壊については、2010年10月時点における川坂砂州の植生を対象として、過去の洪水を参考とした複数の模擬洪水による植生破壊状況について解析的な検討を行い、洪水規模の違いによる破壊状況の相違について明らかにした¹⁶⁾。

その後、2011年9月には北川の河川整備計画における目標流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{s}$ に対して推定最大流量 $3,552 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水により川坂砂州上の植生が破壊され、砂州の大部分が裸地化した。そこで、本研究では北川の川坂砂州を対象に出水前後の地形と植生の現地調査から砂州上の植生破壊状況を明らかにするとともに、これを基に構築した草本植生の破壊モデルを用いて植生を考慮

図-1 2011年9月台風15号に伴う出水による川坂砂州の河床変動量（実測値）

図-2 川坂砂州の植生繁茂状況

した河床変動解析を行い、植生の存在が地形変化や流況に及ぼす影響と、地形変化による植生破壊の状況について検討した。

2. 出水に伴う川坂砂州の変化

2.1 川坂砂州の概要

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。川坂地区における北川の平均河床勾配は約1/1,000であり、セグメント分類ではセグメント2-1に分類されている¹⁾。平均的な川幅は約200mで、湾曲部では最も幅が広く約250mとなっている。

2.2 地形変化の状況

2011年9月台風15号に伴う出水前後の砂州の横断測量から得られた河床変動量を図-1に示す。洪水によって砂礫堆積が進行しており、下流域での堆積が著しい。特に13.4～13.55km付近の水際では最大堆積厚1.2mに

達した。なお、砂州上流域では局所的な洗掘も生じているが、いずれも堆積に比べ規模は小さく、最大洗掘深は0.7m程度であった。

2.3 植生破壊の状況

(1) 植生繁茂状況の変化

図-2に出水前6月と出水後11月の砂州上の植生繁茂状況を示す。なお、凡例で複数の植物が併記されている群落では、先頭に記した植物を優先種としてそれらが混在していることを意味している。出水前、水際に沿っては高さ約1.2～1.8mのツルヨシが群落を形成し、場所によっては高さ1.0m前後のアレチハナガサやアゼガヤ等が混在していた。13.40～13.55kmの法尻付近はアレチハナガサ群落とツルヨシ群落が形成され、砂州中央部には高さ1.4m前後のアメリカセンダングサとアレチハナガサが低密度で群落を形成していた。また、13.60kmより下流の水際付近には高さ約1.6～2.0mのハリエンジュが、13.75kmの水際付近には高さ約1.5～1.8mのノイバラが点在していた。

出水後、水際付近のツルヨシ群落は、13.30～13.40kmでは0.1～0.3m程度の堆積により根元が埋まって倒伏しており、完全に倒伏したアゼガヤが混在していた。13.40kmより上流では0.2～1.3m程度の堆積により根元が埋まり倒伏したことで植生高（地面から植生先端までの高さ）は0.2～0.6mとなり、13.85km付近の水際には基盤喪失により根が露出した状態で倒伏していた。13.95km付近では茎や葉が切断されて帯状に連なって完全に倒伏していた。

13.40～13.55kmの法尻付近のアレチハナガサ群落は一部が消失し、砂州中央のアメリカセンダングサとアレチハナガサの群落は消失した。また、13.8～13.9km間のアレチハナガサやススキは洗掘で完全に消失した。砂州上に点在していたハリエンジュやノイバラは、根元が埋まり倒伏したことで植生高が約0.7～1.4mとなった。

(2) 植生破壊の形態

ツルヨシやアレチハナガサ、アゼガヤ等は、ほとんどが堆積域において埋没した。洗掘域では基盤喪失による流出が、地形変化の小さい地点では流体力による抜根が起きたと思われる。消失には至らなかった若干のツルヨシは、土砂堆積により根元が埋まって流体力により茎や葉が切断され、倒伏角（直立状態を基準とする）が約60～70度で倒伏していた。ハリエンジュにもツルヨシと同様の破壊が起きたが、ツルヨシに比して葉は残っており、倒伏角は約50～70度でツルヨシよりも破壊されにくいようである。また、根元の表皮が剥離していたが、これは土砂による摩耗であると考えられる。堆積と洗掘の境界にあたって地形変化の小さい地点で消失には至らなかったノイバラは、流体力により葉や枝が切断され幹部分のみが倒伏角約70度で倒伏していた。砂州上に残存した完全に倒伏していない大半の植生の植生高は、出水によって直立時の1/3とな

ることが観測された。

3. 植生を考慮した河床変動解析モデル

3.1 流れ解析¹⁶⁾

基礎式には一般座標系の平面二次元流れの連続式と運動方程式を用いた。本研究で対象とした草本植生の場合、洪水時に植物群落完全に水没するため、流れ場は群落内と群落上とに区分されるが、対象洪水の最大水深は倒伏した植物高さの10倍にも及ぶことから流れ場には平面二次元の一層モデルを用いた。

連続式

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{h}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{Uh}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{Vh}{J}\right) = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{M}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{UM}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{VM}{J}\right) = & -gh\left(\frac{\xi_x}{J}\frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J}\frac{\partial H}{\partial \eta}\right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho J} - \frac{f_{veg x}}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}(-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_y}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}(-\overline{u'v'h}) + \frac{\eta_x}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}(-\overline{u^2}h) + \frac{\eta_y}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}(-\overline{u'v'h}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{N}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{UN}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{VN}{J}\right) = & -gh\left(\frac{\xi_y}{J}\frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J}\frac{\partial H}{\partial \eta}\right) - \frac{\tau_{by}}{\rho J} - \frac{f_{veg y}}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}(-\overline{u'v'h}) + \frac{\xi_y}{J}\frac{\partial}{\partial \xi}(-\overline{v^2}h) + \frac{\eta_x}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}(-\overline{u'v'h}) + \frac{\eta_y}{J}\frac{\partial}{\partial \eta}(-\overline{v^2}h) \end{aligned} \quad (3)$$

上式中、 g は重力加速度、 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、 H は基準面からの水位、 τ_{bx} 、 τ_{by} は底面せん断応力の x 、 y 方向成分、 $f_{veg x}$ 、 $f_{veg y}$ 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。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn_b^2 u}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn_b^2 v}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 n_b はマニングの粗度係数である。植生に作用する流体力は水平方向に働くものとし、倒伏による投影高の変化を考慮して、単位面積当りの植生抵抗は次式で与える。

$$f_{veg x} = \frac{\rho g L}{K^2} u (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$f_{veg y} = \frac{\rho g L}{K^2} v (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (7)$$

ここに、 L は植生の投影高で、透過係数 K は次式で定義される。

$$K = \sqrt{2gs/C_d D} \quad (8)$$

ただし、 C_d は抵抗係数(=1.2)、 D は植生直径、 s は植生1本が河床に占める面積である。

3.2 河床変動解析¹⁶⁾

基礎式には一般座標系の二次元流砂連続式、粒径階別質量保存則を用いた。

流砂の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Z_b}{J}\right) + \frac{1}{1-\lambda}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{\sum q_{b\bar{\xi}}}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{\sum q_{b\eta k}}{J}\right)\right\} = 0 \quad (9)$$

ここに、 Z_b は河床高、 J は座標変換ヤコビアン、 λ は河床材料の空隙率(=0.4)、 $q_{b\bar{\xi}}$ 、 $q_{b\eta k}$ は ξ 、 η 方向の粒径別流砂量である。粒径別流砂量式は次式で求める。

$$q_{b\bar{\xi}} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \left\{ (u \cdot \xi_x + v \cdot \xi_y) q_{b\bar{\xi}k} + (-v \cdot \xi_x + u \cdot \xi_y) q_{b\eta k} \right\} \quad (10)$$

$$q_{b\eta k} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \left\{ (u \cdot \eta_x + v \cdot \eta_y) q_{b\bar{\xi}k} + (-v \cdot \eta_x + u \cdot \eta_y) q_{b\eta k} \right\} \quad (11)$$

ここに、 $q_{b\bar{\xi}k}$ は流線方向粒径別流砂量、 $q_{b\eta k}$ は流線の直交方向粒径別流砂量で、それぞれ以下のように芦田・道上の式¹³⁾、長谷川の式¹⁴⁾を用いた。

$$q_{b\bar{\xi}k} = 17 p_{bk} \tau_{*ek}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ek}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ek}}{u_*} \right) \sqrt{s g d_k^3} \quad (12)$$

$$q_{b\eta k} = q_{b\bar{\xi}k} \left(\frac{h}{r_s} N_* - \sqrt{\frac{\tau_{*ek}}{\mu_s \mu_k \tau_{*k}}} \frac{\partial Z_b}{\partial n} \right) \quad (13)$$

上式中、 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有効無次元掃流力、限界無次元掃流力、無次元掃流力、 u_{*ek} 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 は各粒径範囲の代表粒径、 r_s は流線の曲率半径、 N_* は2次流の強度を表す係数(=7)、 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。

粒径階別質量保存則

$$E_m \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{p_{bk}}{J}\right) + P \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Z_b}{J}\right) + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{q_{b\bar{\xi}}}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{q_{b\eta k}}{J}\right) \right\} = 0 \quad (14)$$

ここに、 $\partial Z_b / \partial t \geq 0$ (堆積)のとき $P = p_{bk}$ 、 $\partial Z_b / \partial t \leq 0$ (洗掘)のとき $P = p_{ik}$ 、 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_{ik} 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。

3.3 植生モデル

本研究では、現地調査結果で観測された植生の破壊形態として流体力による倒伏、土砂堆積による埋没、基盤喪失による流出、ツルヨシの流体力による抜根を河床変動解析に考慮した。草本植物種の特長として、種毎の枝葉の状態をモデル化することは困難であるため、ここでは群落の繁茂状況を群落の平均的な植生高と透過係数で表現することにした。透過係数 K は、出水前後の砂州上で最も優占的に繁茂していたツルヨシ、アメリカセンダングサおよび左岸堤防法面の竹林については、現地調査から得た茎径と植生密度から式(8)により算出した。その他の植生群落については、実測し

L_0 : 初期植生高, L : 投影高, ΔZ : 河床変動量,
 $\bar{u}$: 合成流速, h : 水深

図-3 植生モデル

た植生高 L_0 をもとに水深・植生高比との関係¹⁷⁾から推定した粗度係数を用いて抵抗のつり合い式(15)から逆算した。

$$n_i = \sqrt{n_b^2 + h^{1/3} L_0 / K^2} \quad (15)$$

ここに, n_i は合成粗度, n_b は底面粗度である。

抵抗に寄与する投影高 L は, 図-3 に示す植生のモデルのように植生が直立, 倒伏した状態に河床変動量を考慮し, ツルヨシについては他とは異なる倒伏条件と流体力による抜根を考慮した。図-3(a) に示すように, 直立状態の植生の植生高は初期植生高 L_0 であり, 抵抗に寄与する投影高は水深とする。流水による倒伏(水深が直立状態の植生高に達すると直立時の 1/3 に減少)を考慮し, 図-3(b) に示すように土砂が堆積した場合は, 地盤が上昇した分植生高が小さくなり, 堆積厚が植生高を上回ると植生は砂礫に埋もれて消失するものとした。また, 図-3(c) に示すように洗掘により土壌から根が露出した場合は, 露出した根長分だけ植生高が大きくなり, 植生高は直立時の植生高と根長の合計した長さの 1/3 になるものとした。現地調査結果によると川坂砂州における植生の根長の多くは 0.18m 以下であることから¹¹⁾, 洗掘量が 0.18m に達すると根が土壌から完全に露出し, 植生は基盤喪失によって流出するものとした。

出水前後の砂州上で最も繁茂し他の草本植生に比べて破壊されにくい特性を持つツルヨシについては, 図-3(d) に示すように福岡らの研究^{8), 9)}を参考として流速が 0.4m/s 以上で, かつ水深が初期植生高の 0.75 倍以上で倒伏するものとした。また, 杉尾ら¹¹⁾は現地における引張試験から 1 本のツルヨシが抜根される耐抜根荷重 (58.8~156.8N/1 本) を求めており, 本解析では植生抵

図-4 初期地盤高

(a) 13.85km より下流 (b) 13.85km より上流

図-5 川坂砂州の粒度分布(2010年6月)

図-6 初期植生高

抗則式 (6), (7) で与えられる流体力が現地調査による密度から得られる単位面積当たりの耐抜根荷重 (2,353N/m²) を上回ればツルヨシが抜根されるとした。

3.4 計算条件

解析区間は 13.0~14.4km とし, 上流端, 下流端にそれぞれ流量と水位を与えた。解析メッシュは, 河道を流下方向に 50m 間隔, 横断方向に 30 等分割し, ダミーメッシュも含めて流下方向に 33 点, 横断方向に 33 点の格子点で構成した。図-4 の点線で囲んだ砂州範囲の初期地盤高には, 砂州範囲に 2010 年 6 月の実測値を, それ以外の箇所には 2004 年 3 月の測量図面より読み取った値を用いた。なお, 2009 年 12 月に 13.5~13.7km で, 2011 年 5 月に 13.7~13.85km で行われた砂利採取により, 13.85km 地点で最大 1m 程度の段差が生じている。

河床材料については, 2010 年 6 月に砂州上の 5 箇所 (図-4 の①~⑤地点, 13.5~13.9km 間) と 2011 年 6 月に砂州上の 1 箇所 (図-4 の⑥地点, 13.8km) で地表から最大粒径程度の深さまで採取した土砂の粒度分布を求めた。図-5 に示すように①~③, ⑥地点では細かい粒度分布, ④, ⑤地点では粗い粒度分布であった。そこで, 13.85km より下流域には粒度分布 A (図-5(a)) を, 上流域には粒度分布 B (図-5(b)) を与えた。また, 粒度分布 B は砂利採取と整地が実施された箇所のものであるため, 低水路には人為的攪乱のない粒度分布 B を与えた。

図-7 2011年9月洪水のハイドログラフ

図-8 最大流量時の流速

図-9 最大流量時の掃流力

底面粗度は相当粗度に平均粒径を用いて Manning・Strickler の式から求め、粒度分布 A (平均粒径 $d_m=21.8\text{mm}$) を与えた箇所では $n_b=0.022$ 、粒度分布 B (平均粒径 $d_m=74.0\text{mm}$) を与えた箇所では $n_b=0.027$ とした。ただし、低水路では洪水時に発生する河床波を考慮して $n_b=0.031$ とした¹⁾。

本解析では、図-2 に示した 2011 年 6 月時点における砂州区間の植生群落の分布に応じて、各群落の平均的な植生高 L_0 (図-6) と透過係数 K を与えた。なお、砂州区間外における植生の繁茂状況は航空写真や現地視察に基づいて判断した。

4. 再現計算

2011 年 9 月台風 15 号に伴う最大流量 $3,552\text{m}^3/\text{s}$ (推定流量) の洪水による地形変化と植生破壊について、現地調査結果を基に植生を考慮した河床変動解析の再現性を検討した。図-7 に境界条件として観測値から得られた流量 (推定値) と水位 (暫定値) を示す。図-8,

図-10 河床変動量と植生破壊の状況 (計算結果)

9 は最大流量時における砂州上の流速と掃流力の計算結果である。最大流量時、砂州上流端から砂州中央を縦断するように高速流が生じ、それに伴って掃流力も砂州中央で大きくなり、砂州上では土砂輸送が生じていると思われる。また、観測結果における植生破壊の状況と計算結果における流速分布から、13.95km 付近のように流速が約 5m/s を超えると、ツルヨシは茎や葉が切断されて完全に倒伏し、13.35km 付近のように流速が約 4m/s 以下では倒伏するが、茎や葉は切断されずに群落を保つことが想定される。

図-10 に河床変動量と植生破壊の状況の計算結果を示す。解析による植生破壊の状況を点の色により区別して示した。点が無い地点は、出水前から裸地であった。計算による砂州下流部の堆積域の位置は、図-1 の実測結果と概ね一致したが、最大堆積厚は 0.8m ほど過大であった。砂州中央部の洗掘域は、実測結果に比して 100m ほど下流に移動して範囲も拡大しているが、最大洗掘深は 0.9m 程度で概ね一致した。計算結果における植生破壊の状況は、13.6km より下流の砂州中央の下半部および 13.85km より上流の砂州上流部の堆積域において植生の完全埋没が、また、13.75km 付近の洗掘域で基盤喪失による流出が生じていることがわかる。法尻付近と水際付近では地形変化が小さく植生は倒伏し一部埋没した状態で残存した植生が再現できた。

以上のように、図-2 に示す洪水による植生の破壊状況を本解析によりある程度再現できたが、解析では実測に比して上流部の洗掘域が若干下流に移動拡大したため、破壊形態が相違し、また水際付近では実際ほど顕著な地形変化が生じなかったことから広範囲に植生が残存することとなった。水際の植生はほとんどがツルヨシであったから、砂州上流部水際付近でのツルヨシの抜根は本解析では再現できなかった。ツルヨシは数十本のまとまりで抜根される傾向があり、抜根機構を再検討する必要がある。また、本解析で実測に比して堆積厚が過大となったのは、13.85km 以下に与えた粒度 (粒度分布 A) が過小で、大量に生じた洗掘土砂の流送によるものと思われる。

砂州上のほとんどの草本植生は地形変化により消失しており、本研究で構築したモデルで洗掘・堆積による草本植生破壊の状況を概ね再現できたと思われる。

図-11 2004年10月洪水のハイドログラフ

5. 地形変化と植生破壊の相互作用に関する検討

激特事業後最大規模であった2004年10月台風23号に伴う洪水を模擬洪水として、2011年6月時点の砂州地形変化と草本植生の相互作用について考察を行った。図-11に観測値から得られた2004年10月洪水の流量、水位を示す。最大流量は $4,916\text{m}^3/\text{s}$ で、激特事業の契機となった1997年9月洪水と同規模である。

砂州上に植生がある場合の計算結果から、地形変化による草本植生の破壊について時系列に注目して検討、考察を行った。砂州地形は、流量が約 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ で変動し始め、図-12(a)に示すように砂州中央部で堆積が、砂州上流域で洗掘が起きている。砂州上の植生はほぼ倒伏しているが、消失はしていない。流量が約 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ になると、図-12(b)に示すように土砂堆積が砂州中央から下流域にかけてと砂州の上流端で生じており、洗掘が砂州中央部より上流域で生じており、流量増加に伴いそれぞれ範囲を拡大させているが、変動量の絶対値に顕著な変化は見られない。このため、砂州上の植生は、堆積域では一部埋没し倒伏した状態で、洗掘域では根が露出し倒伏した状態で残存していることがわかる。流量約 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ では、図-12(c)に示すように、砂州中央で河床変動量が大きくなり、それに伴って一部の植生は完全埋没と基盤喪失による流出で消失しているが、砂州上の植生はほとんどがまだ残存している。最大流量時の約 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ では、図-12(d)に示すように変動量はさらに大きくなり、砂州中央以外でも植生の消失が起きる。特に、砂州の上流端では植生が埋没によりほぼ消失している。減水期に入ってから堆積・洗掘は進行し、図-12(e)に示すように流量が $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を下回った時点で河床変動はほぼ終了して最終形状(図-12(f))に近い地形となっている。この段階では、すでに植生が消失した砂州中央部の河床のみが変動するため、水際付近に植生が残る結果となった。このように、砂州上の草本植生は地形変化によってほとんどが消失し、残存した植生は一部埋没、および根が露出した状態で倒伏しており、高さ $1.0\sim 2.0\text{m}$ 程度の草本植

図-12 植生が有る場合の河床変動量 (計算結果)

図-13 植生が無い場合の河床変動量（計算結果）

図-14 最大堆積地点における地盤高と植生高の時間変化

図-15 最大洗掘地点における地盤高と植生高の時間変化

生は、そのほとんどが地形変化によって大きく破壊された。

次に、植生の有無による砂州の地形変化や流況の違いに注目する。図-12(f)に示す砂州上に植生がある場合と図-13に示す砂州上に植生が無い裸地の場合の最終

図-16 最大堆積地点における水深と植生高の時間変化

河床変動量を比較すると、植生の存在による影響はほとんど認められず、最大流量 $5,000 \text{ m}^3/\text{s}$ クラスの洪水の場合は、洪水の初期段階で植生のほとんどが破壊されてしまうため、草本植生が地形変化に与える影響は極めて小さいことがわかる。

図-14に最大堆積地点における地盤高と植生高の時間変化を示す。草本植生は植生高が小さいため洪水の初期段階で倒伏するが、その時点ではいずれの場合もまだ河床変動は生じていない。10時頃流量が約 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ に達すると堆積が生じ始めるが、植生が無い場合に比べて植生がある場合は土砂堆積が抑制された状態で進行するようである。いずれの場合も最大堆積厚を経た後 0.7m ほど洗掘を生じて河床変動を終了するが、最大流量となる15時頃には、植生は完全に埋没してしまうため、その後は地形変化への植生の影響がなく、植生が完全埋没する15時頃までの堆積状況の違いにより両者の堆積の進行に若干差が生じたと思われる。計算終了時には植生が無い場合に比して、植生が存在する場合の地盤高は約 3cm 高くなった。

図-15に最大洗掘地点における地盤高と植生高の時間変化を示す。洗掘が開始される10時頃すでに植生は倒伏しているが、河床低下によって植生の投影高の増加による抵抗増大が洗掘を若干抑制している。この地点では13時頃植生が流出して裸地化するが、両者でその後の洗掘の進行に相違が残る、河床変動終了時には植生が無い場合に比して、植生が存在する場合は最大洗掘深が約 5cm 小さくなる結果となった。

図-16は最大堆積地点における水深と植生高の時間変化を示している。植生が倒伏した辺りで水深に若干の差が見られるが、増水期においてほとんど違いはなく、最大流量時に最も差が生じている。減水期に入り徐々に差は無くなり、植生の存在が水面に影響を与えていることがわかる。

これらから、本研究で対象とした草本植生では、その存在が地形変化や流況に与える影響は極めて小さい

と思われる。

6. 結論

本研究では北川の川坂砂州を対象に現地調査と植生を考慮した河床変動解析を行い、植生の存在が地形変化や流況に及ぼす影響と、地形変化による植生破壊の状況について検討した結果として、以下に得られた知見を述べる。

- 1) 最大流量約 $3,500\text{m}^3/\text{s}$ の中規模な洪水による川坂砂州での草本植生の破壊形態として、土砂堆積による埋没、基盤喪失による流出、流体力による茎や葉の切断、抜根および倒伏が観測された。砂州上の草本植生は、洪水による地形変化によって大規模に破壊されることを示した。また、完全に倒伏していない状態で残存する植生は、倒伏角約 $50\sim 70$ 度で倒伏し、植生高は直立時の約 $1/3$ となることがわかった。
- 2) 本解析モデルによる再現計算の結果、砂州の洗掘範囲は実測結果よりも拡大しているが、堆積範囲については砂州中央から下流域にかけて概ね一致しており、定性的に再現できた。また、砂州上の草本植生については、地形変化による消失、一部埋没、流体力による倒伏などについて観測された破壊状況を概ね再現できた。
- 3) ツルヨシの破壊の状況と流速分布の計算値から、流速が約 5m/s を超えるとツルヨシは茎や葉が切断されて完全に倒伏し、流速が約 4m/s 以下では倒伏するが、茎や葉は切断されずに群落を保つことが想定される。
- 4) 大規模な洪水（最大流量約 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ の模擬洪水）によるシミュレーションから、地形変化の進行に伴う草本植生破壊の状況を検討し、砂州上の草本植生は地形変動量が大きくなるにつれてほとんどが消失し、水際に残存した植生は埋没や根が露出した状態で倒伏することを明らかにした。
- 5) 最大流量 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ クラスの洪水の場合は、洪水の初期段階で植生のほとんどが破壊されてしまうため、河床変動が植生破壊に与える影響は大きいが、草本植生が最終的な砂州地形に与える影響は極めて小さいことが明らかとなった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省延岡河川国道事務所および宮崎県延岡土木事務所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) 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。

- 2) 藤本国博，柴岡博明，大塚法晴，杉尾哲，狩野晋一：北川激甚災害対策特別緊急事業の河川環境モニタリング，河川技術論文集，第10巻，pp.495-500，2004。
- 3) 辻本哲郎：河道植生と流路変動，第37回水工学に関する夏期研修会講義集，A コース，A-06，20p.，土木学会，2001。
- 4) 清水義彦，小葉竹重機，吉川武志：出水によるハリエンジュ樹林地の破壊とその規模推定に関する考察，水工学論文集，第46巻，pp.953-958，2002。
- 5) 服部敦，瀬崎智之，吉田昌樹：礫床河道におけるハリエンジュ群落の出水による破壊機構と倒伏発生予測の試み，河川技術論文集，第7巻，pp.321-326，2001。
- 6) 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。
- 7) 瀬崎智之，服部敦，近藤和仁，徳田真，藤田光一，吉田昌樹：礫床上草本植生の流失機構に関する現地観測と考察，水工学論文集，第44巻，pp.825-830，2000。
- 8) 福岡捷二，島谷幸宏，田村浩敏，泊耕一，中山雅文，高瀬智，井内拓馬：水流による高水敷上のヨシ原の倒伏・変形と粗度係数に関する現地実験，河川技術論文集，第9巻，pp.49-54，2003。
- 9) 福岡捷二，成田一郎，服部敦，狩野晋一：洪水時の高茎草本の挙動と粗度係数，河川技術論文集，第11巻，pp.237-242，2005。
- 10) 服部敦：流れによる変形を考慮した高径草本植物の抵抗則，土木学会論文集，No.782/II-70，pp.65-80，2005。
- 11) 杉尾哲，渡邊訓甫，田上篤志：植生の回復過程にある砂州での洪水による草本植生破壊の検討，水工学論文集，第47巻，pp.1003-1008，2003。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 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。
- 15) 平川隆一，渡邊訓甫，杉尾哲，中田哲二，小南考輝：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，河川技術論文集，第17巻，pp.143-148，2011。
- 16) 平川隆一，渡邊訓甫，小南考輝，山下剛史：北川における砂州の地形変化と草本植生に関する解析的検討，水工学論文集，第56巻，2012。
- 17) 財団法人国土技術センター編：河道計画検討の手引き，pp.114-115，2002。

(2012年3月8日 受付)