礫河原保全事業後の植生管理が出水時の流況に与える影響に関する基礎的研究

池田　裕一[1]・飯村　耕介[2]・幸村　智史[3]・木原　健貴[4]

[1]正会員　宇都宮大学大学院 教授　工学研究科地球環境デザイン学専攻

（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7－1－2）
E-mail:ikeda@cc.utsunomiya-u.ac.jp

[2]正会員　宇都宮大学大学院 助教　工学研究科地球環境デザイン学専攻
[3]学生会員　新潟県庁
[4]学生会員　宇都宮大学大学院博士前期課程　工学研究科地球環境デザイン学専攻

礫河原保全事業後に特に維持管理をしなければ，上流側に開いたU字型の植物群落が形成され．その周辺に細かな砂礫が堆積して外来種の侵入が顕著になり，礫河原固有種の生息域が損なわれていく．室内実験で出水時の流況を検討したところ，礫河原上を主水路側へ集中していく流れがU字型群落の中空部に入り込み砂礫の堆積を促していること，群落背後では流速が極めて遅く細砂が堆積しやすいことが明らかになり，これらの特徴を数値解析で再現することができた．さらに，実スケールにおいて，群落を部分的に伐採して維持管理する場合の数値解析を実施したところ，主水路側に向かう流れを遮断するU字型群落の「腕」部分よりも，砂州下流側のU字型の「底」部分を伐採するほうが，U字型群落が流れに与える影響を効果的に抑えることができることが示された．

Key Words : *large gravel bar, main channel, sub channel, plant community, vegetation management*

1.　はじめに

日本の急流河川の多くは，砂礫の生産や堆積が盛んなため，中流域に被植のまばらな砂礫質の河原が発達する．しかし近年，礫床河川の多くはダム建設や砂利採取による土砂供給量の減少，低水護岸の設置および築堤などの人為的インパクトを受けた．その結果，河岸侵食や局所洗掘などの治水上の問題だけでなく，礫河原固有植物の衰退や外来植物の侵入・拡大など，環境面についても多くの課題が指摘されるようになった[1)2)3)]．

例えば鬼怒川中流部は本来，網状あるいは複列蛇行の流路形態を呈していたが，現在では流路の単列化の進行に加えて水衝部の形成などの治水上の問題が起こっているだけでなく，外来種であるシナダレスズメガヤの分布域が拡大しいる一方で環境省レッドリストの絶滅危惧Ⅱ類に登録されている礫河原固有植物のカワラノギクのほとんどが消失しているなど，環境上の問題も起きている．その結果，鬼怒川固有の景観に変化が生じている[3)4)]．

このような問題の解決には，礫河原固有植物の保護や外来植物の駆除などの直接的な環境面の対策だけでなく，礫床河川本来の河床変動機構である 2 列，複列流路を復元・維持し，河道の安定化を図るなど，これらのシステム全体をよりよく機能させることが重要である[1) 5)]．そこで鬼怒川では，中流域に特有な大礫砂州の地形形成プロセスに着目し，砂州の切り下げによる冠水頻度の増加だけでなく，大礫堆の成形による流況の制御をも狙った礫河原保全事業[4)]を継続的に実施しているが，事業後は特に有効な維持管理を行っておらず，砂州上には細砂が多く堆積し，草地化および樹林化が進行しているのが現状である．

近年では，河原の切り下げによる植生抑制効果について網羅的な知見が積み重ねられ[6)]，礫河原固有種やシナダレススメガヤの生息環境についても検討が進められてきた[3)7)8)]．また地元の市民団体との協働の枠組み[9)]や河川の洪水営力を活用した外来種除去[10)]の提案もなされるようになった．しかし，礫河原における植物群落や出水時の流況および土砂堆積の特徴をパターン化して，あまり労力をかけずに効果的な維持管理のあり方を示したものはほとんど見られない．

筆者らはこれまで，礫河原保全事業が実施された大礫砂州の植生調査を経年的に実施し，保全事業後からのの植生遷移と砂州地形および土砂堆積状況との基本的な対応関係を検討してきた[11)12)13)]．その結果，大礫砂州において上流側に開いたU字型の植物群落が，砂州下流側の周縁をめぐるように形成され，それが出水時の流況や堆積環境に影響して植生遷移の重要な要因になっていると推察した．また，これについて室内実験を実施し，大礫砂州上のU字型植物群

落によって出水時の流況が変化し，現地調査で見られた土砂堆積環境が形成され得ることを明らかにした[14]．

本研究では，これまで実施した現地調査と室内実験の結果を踏まえて，平面2次元流れの数値解析を行い，室内実験との適合性を検討する．そのうえで，実スケールの模擬河川と植物群落にこの数値解析モデルを適用し，群落を部分的に伐採した際の流況変化を解析して，効果的な植生管理のあり方を検討する．

2. 礫河原上の植生分布の特徴[11)12)13)]

図-1は鬼怒川中流部，栃木県塩谷町の上平橋付近の大礫砂州の2013年度の植生分布を示したもので，礫河原再生施工が実施されてから2年後の状態である．この砂州は2列蛇行区間にあり，図中，平水時には水の流れない副水路を破線で示してある．この図より全体的な特徴として，上流に向けて開いたU字型の領域に多くの植物種が広く分布していることがわかる．

このU字型群落は，主としてイネ科の植物（オギ，ツルヨシなど）から構成されており，砂州地形と平水位との比高により形成されるものである．その内側に外来種のシナダレスズメガヤが繁茂し，外側にはカワラハハコのような礫河原に固有な植物が生息している．

U字型群落の内側では，群落の流水抵抗により出水時の流勢は弱められ，細礫や砂が多く堆積して，シナダレスズメガヤが定着しやすい基質が形成されたものと考えられる。これとは逆に，U字型群落の外側では出水時の流れが集中するために，流勢は内側よりも強くなり，細礫あるいはそれ以上の粒径の河床材料が堆積して，礫河原固有植物に適した基質となっているようである。このように，U字型群落が流れと堆積環境，そして植生遷移に大きな影響を与えているものと推察される．

3. 室内実験による流況の検討

実験には幅50cm，長さ8mの塩化ビニル製水路を使用し，ここに砂州1つの長さが100cmの2列蛇行地形8個分を成形した．河床形状は，sinカーブを組み合わせた人工的なものとした（**図-2**参照）．U字型群落には**写真-1**のようにプラスチック透過材を組み合わせたものを用いた．透過材の流水抵抗は透過係数[15]にして38cm/sである．実験条件を**表-1**に示す．流量は，2ケースとも水路全幅にわたり冠水する値に設定し，水路の上流側から5つ目の砂州地形上で，水深と流速を測定した（実験方法の詳細は参考文献[14]参照）．

図-3，**4**はそれぞれCase1，Case2の流速ベクトル図で，**図-4**中の破線は植生模型を表している．両者の全体的な流況は

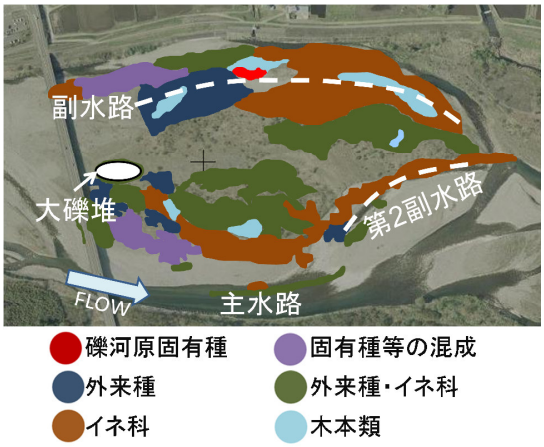

図-1 植生分布調査結果（2013年度）

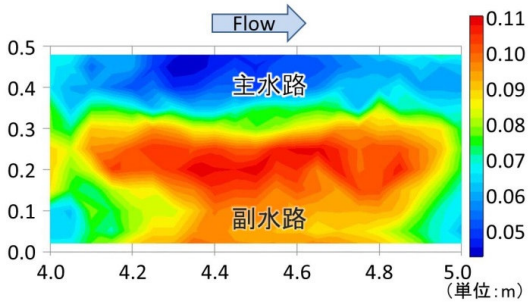

図-2 実験河床形状のコンター図（砂州１個分）
（数値は実験水路底面からの高さ）

表-1 実験条件

	Case 1	Case 2
植生模型	無し	有り
透過係数（cm/s）		38
平均河床勾配	1/1000	
砂州高さ（cm）	7.0	
流量（l/s）	5.79	
平均水深（cm）	4.79	5.34
平均流速（cm/s）	24.2	21.7

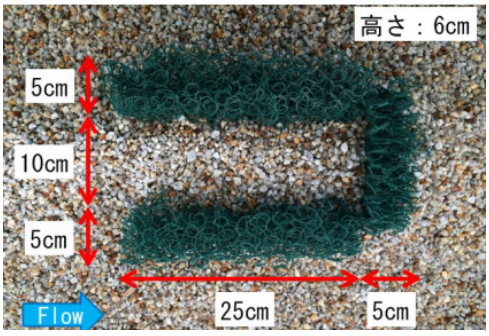

写真-1 植物群落模型

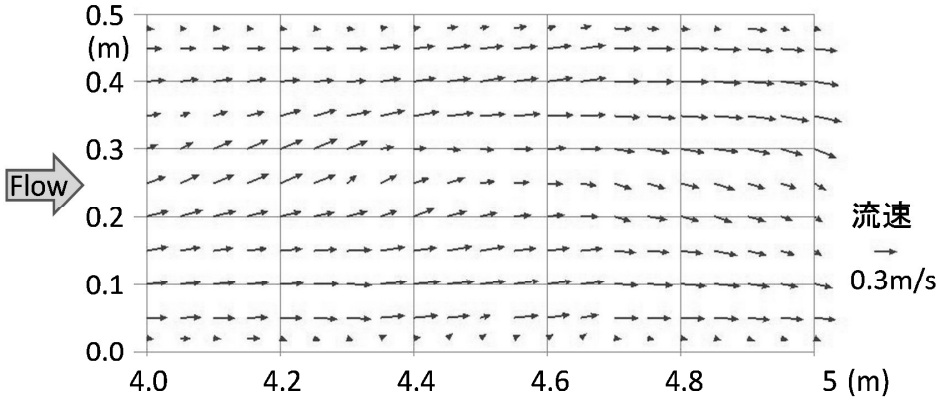

図-3 室内実験での流速ベクトル図 (Case 1)

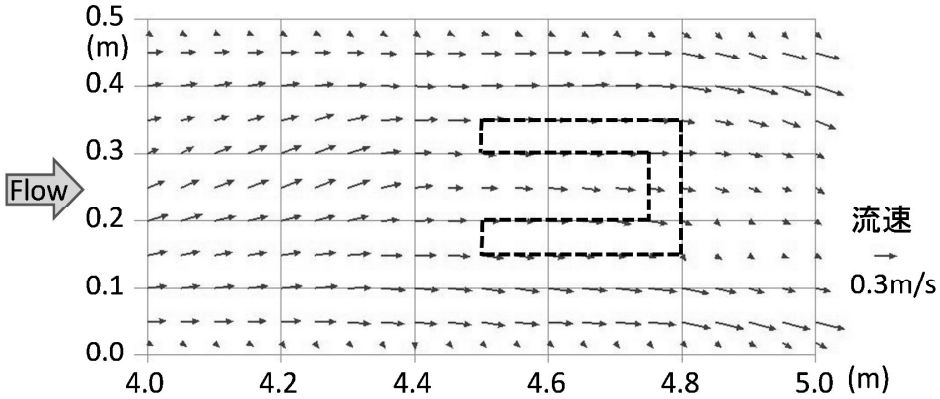

図-4 室内実験での流速ベクトル図 (Case 2)(破線は植物群落模型を表す)

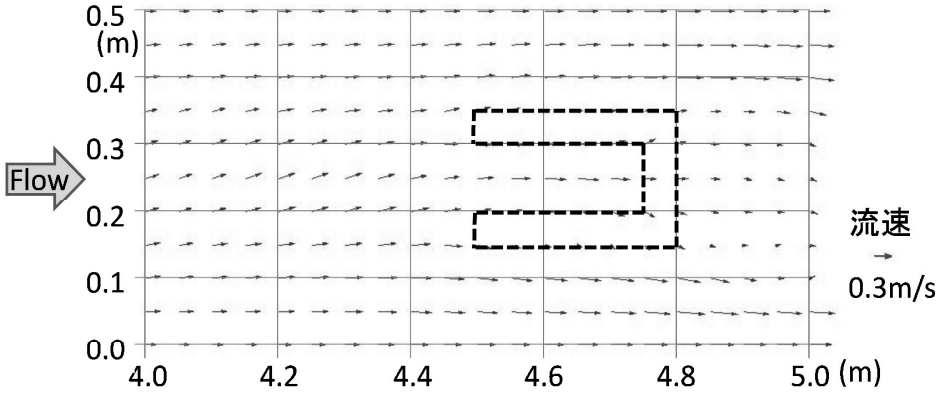

図-5 数値解析結果の流速ベクトル図 (Case 2)(破線は植物群落模型を表す)

類似しており，当該砂州の上流にある砂州の主水路(右岸側)から当該砂州の主水路(左岸側)に向かう流れがあり，それに続いて，当該砂州の下流にある砂州の主水路(右岸側)へ向かう流れが見られる．ただしCase2では，U字型群落の流水抵抗によって，流れが左右岸側に集中し，主水路および副水路の流速がより加速され，最大流速位置もCase1よりも下流側になっている．また群落の背後では，流速がかなり遅くなっており，土砂が堆積しやすいと推察される．実際，現地調査でも，この部分に極めて細かい砂の堆積が見られた．

図-5は，室内実験Case2に数値解析モデル(後述)を適用した結果である．計算格子は水路全長8mを160分割，幅50cmを40分割した．河床形状は**図-2**のデータを左右交互に周期的に配置し，粗度係数は予備実験より0.018とした．両者はよく類似しており，特に，左右岸への流れの集中と最大流速位置や群落背後の低速領域などの特徴がよく再現できている．Cese1についても同様であった(紙面の都合で省略)．本研究で適用した数値解析モデルの適合性は良好といえる．

4. 数値解析による流況の検討

(1) 数値解析手法および条件

室内実験では，実河川と異なり水路幅に対して水深を小さくとれないため，実河川スケールでの数値解析を実施する．数値解析には，河川の流れ・河床変動解析ソフトiRIC[16]に同梱されているNays2DH（二次元流解析ソルバ）を用いた．この解析モデルの良好な適合性は，前章で確認した通りである．

現地調査を参考にして，長さ800m，幅400mの砂州地形（図-6参照）が8個連続した直線河道を解析対象とし，これを縦断方向640×横断方向40に格子分割した．砂州地形は室内実験と同様のもので，図-7にその横断形状を示す．図中，x は河道上流端からの長さ（x=3200～3600mの砂州上にU字型植物群落を配置），yは河道右岸からの横断距離，z' は平均河床高からの偏差である．平均河床勾配と粗度係数はそれぞれ，鬼怒川中流域を想定して1/200，0.042[17]とした．流量は鬼怒川の平均年最大流量をやや超える1500 m^3/sとした．

図-8は解析格子上のU字型群落を示したもので，現地の状況（例えば図-1）を考慮して，主水路側（左岸側）をやや広く空けるようにした．群落の抵抗特性は，オギを想定して参考文献[18]をもとに，抗力係数は1，単位体積に占める植生の遮断面積（密生度）は0.49m^{-1}とした．また効率的な維持管理を検討するために，群落の一部を伐採した場合の流況も解析することにした．基本的には，室内実験で見られた上流側の砂州の主水路（図の右岸側）から当該砂州の主水路（左岸側）に向かう流れを遮るU字型の「腕」の部分（①および②），あるいは流下方向の流れ全体を阻害する「底」の部分（③）の伐採の効果を検討する．群落の伐採状況と数値解析Caseとの対応は，表-2に示す通りである．

(2) 解析結果および考察

数値解析の結果，すべてのCaseで砂州地形全体が冠水した．その水深コンターと流速ベクトルを図-9～12に示す．ただしCase N3は，Case N4と大きな相違がなかったので省略した．

図-9を見ると，左右の流向変化が室内実験より顕著であることがわかる．これは水深が非常に浅い部分があるために，地形の影響が強く現れたためである．ただし全体的な流れの構造は室内実験と同様である．図-10を見ると，群落全体の流水抵抗により，やや広めにした主水路側への流れの集中が大きく，そのすぐ下流の群落背後に低速領域が見られる．また左岸向きの流れが群落の主水路側の「腕」の内側に沿って誘導され，その奥のU字型「「中空部」で減速されているのがわかる．これらの個所で土砂堆積が促されることが推察されるが，これは現地調査とも一致する特徴である．

次に図-11を見ると，群落の主水路側の「腕」を伐採しても，図-10で見られた群落の影響はさほど改善されていないことがわかる．これは，もともと地形の影響が強いうえに，U字型の「底」部分の流水抵抗により，その上流側がどうしても減速されてしまうためと考えられる．一方，図-12を見ると，U字型の

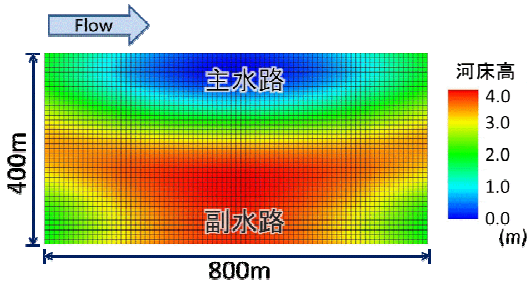

図-6 実スケール数値解析の河床形状コンター図（砂州 1 個分）

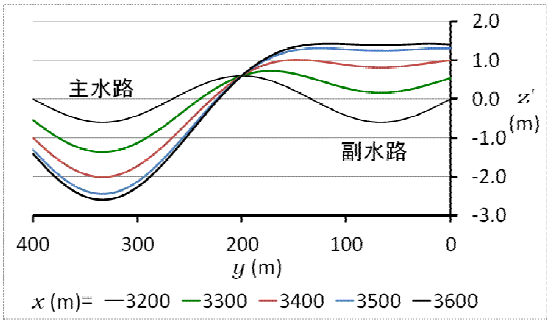

図-7 実スケール数値解析の河床横断形状
（流下方向は砂州の 1/2 の長さまで）

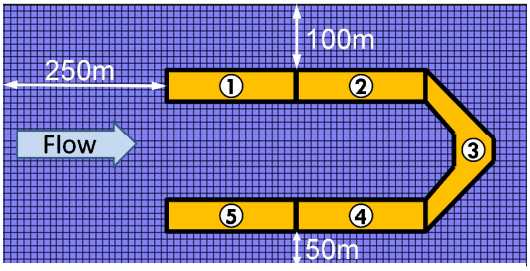

図-8 実スケール数値解析の植物群落の配置と伐採区分

表-2 実スケール数値解析条件

Case	N1	N2	N3	N4	N5
群落形状	無し	全て有り	①のみ伐採	①と②を伐採	③のみ伐採
密生度		0.49 [1/m]			
河床勾配	1/200				
砂州高さ	4.0 [m]				
粗度係数	0.042				
流量	1500 [m^3/s]				

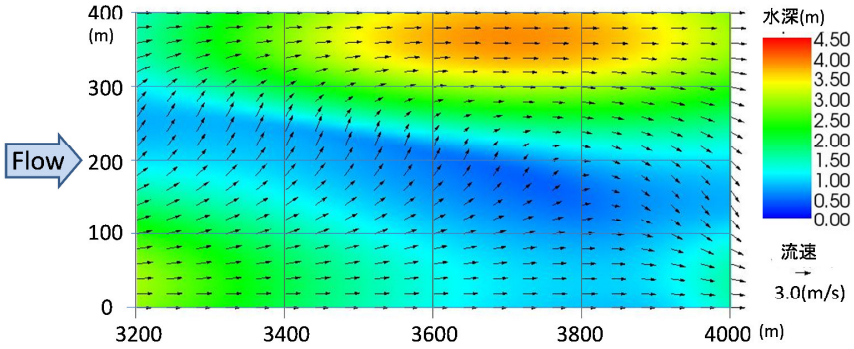

図-9　数値解析結果の流速ベクトル図と水深コンター　(Case N1)

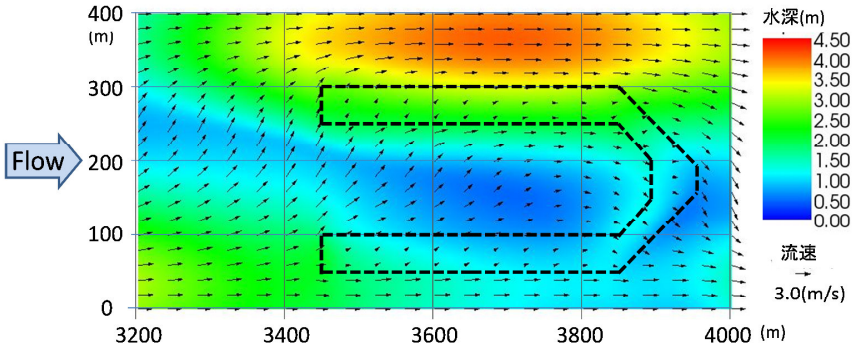

図-10　数値解析結果の流速ベクトル図と水深コンター　(Case N2)

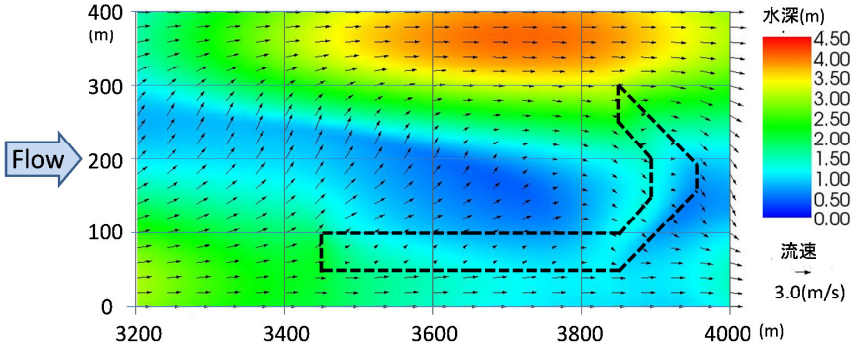

図-11　数値解析結果の流速ベクトル図と水深コンター　(Case N4)

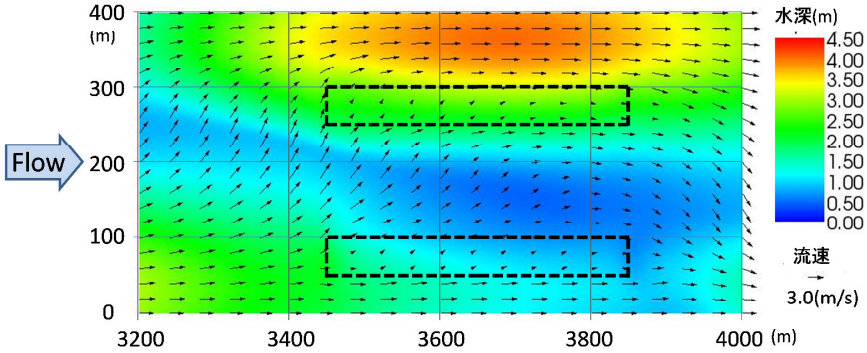

図-12　数値解析結果の流速ベクトル図と水深コンター　(Case N5)

「底」が抜けたことにより，群落背後およびU字型「中空部」の低速状態が解消されたことがわかる．残された群落の「腕」の上流部分周辺では，流れが減速して土砂堆積しやすい領域が多少残っているが，**図-9**と合わせて考えると，砂州の上流側半分（ここではx≦3600m）に群落が拡大しないようにすれば，じゅうぶん効果的であることがわかる．

5. おわりに

本研究では，現地調査で見られた大礫砂州上のU字型植物群落が出水時の流況に与える影響について，平面2次元流れの数値解析を実施し，室内実験との適合性が良好であることを確認した．そのうえで，実スケールの模擬河川において砂州上のU字型群落を部分的に伐採した際の流況変化の数値解析を行った．その結果，U字型群落の「底」を伐採するとともに，群落が砂州の上流側半分に拡大しないようにすれば，細粒土砂の堆積およびシナダレスズメガヤの定着を効果的に抑制し得ることがわかった．

ただし，まだ流況変化のみによる判断であり，今後はこうした部分伐採が実際の土砂堆積に与える効果を検討していく必要がある．

参考文献

1) 須賀如川：大礫を含む混合粒径河川における河道システムの本質に関する考察，河川技術論文集，vol.10，pp.95-100，2004.
2) 須賀如川：大きい河岸侵食力を有するクランクフローの基本的事項に関する考察，水工学論文集，vol.49，pp.955-960，2005.
3) 村中孝司・鷲谷いづみ：鬼怒川砂礫質河原における外来牧草シナダレスズメガヤの侵入と河原固有植物の急激な減少：緊急対策の必要性，保全生態学研究，vol.6 (2)，pp.111-122，2001.
4) 増子輝明，前村良雄，森川陽一，後藤勝洋：鬼怒川中流部における礫河原再生について，リバーフロント研究所報告，第 21 号，2010.9.
5) 須賀如川，三品智和，長谷部正彦，池田裕一：大礫中州と 2 列蛇行の水理特性に関する考察，水工学論文集，vol.52，pp.775-780，2008.
6) 大石哲也，萱場祐一：河川敷切り下げに伴う初期条件の違いが植生変化に及ぼす影響に関する一考察，環境システム研究論文発表会講演集，vol.41，pp.351-356，2013.
7) 松間充：鬼怒川における外来植物シナダレスズメガヤと河床物理環境との関係，リバーフロント研究所報告，第 16 号，pp.18-24，2005.
8) 赤松弘治，浅見佳世，田村和也：円山川浅倉地区におけるカワラハハコ個体群の生育立地，人と自然 Humans and Nature，No.18，pp.45-49，2007.
9) 宇根大介，前村良雄，千葉潤一，阿部充，都築隆禎，伊藤将文：地域と連携した鬼怒川中流部の外来植物対策について(第 2 報)，リバーフロント研究所報告，第 23 号，pp.104-111，2012.
10) 都築隆禎，勢田昌功，高橋達也，池田正，宮脇成生，荒木隆：吉野川における礫河原の管理方針について ～シナダレスズメガヤの抑制対策～，リバーフロント研究所報告，第 17 号，pp.92-98，2006.
11) 池田裕一，宍戸彩，飯村耕介，亀田涼，石ヶ森渉：急流礫床河川の大礫砂州上における植生分布に関する基礎的調査，環境システム研究論文発表会講演集，vol.41，pp.365-360，2013.
12) 池田裕一，幸村智史，亀田涼，飯村耕介：鬼怒川における礫河原保全事業後の維持管理のあり方に関する基礎的調査，環境システム研究論文発表会講演集，vol.42，pp.171-176，2014.
13) 池田裕一・幸村智史・飯村耕介・佐藤雄斗：鬼怒川における礫河原再生事業後の植生遷移に関する基礎的研究，環境システム研究論文発表会講演集，vol.43，pp.117-122，2015.
14) 池田裕一・木原健貴・飯村耕介・幸村智史：急流礫床河川の大礫砂州上の植物群落が出水時の流況に与える影響に関する実験的研究，環境システム研究論文発表会講演集，vol.43，pp.229-234，2015.
15) 池田裕一，岩松優二郎，：高木群落の鉛直構造による流速分布の遷移に関する基礎的研究，応用力学論文集，Vol.12，pp.807-815，2008.
16) iRIC ホームページ(http://i-ric.org/ja/)
17) 国土交通省：美しい山河を守る災害復旧基本方針，2014.
18) 福岡捷二ら：オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性，第 3 回 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，pp.245-250，1970.

(2016. 8. 26 受付)

BASIC STUDY ON EFFECTS OF VEGETATION MANAGEMENT AFTER GRAVEL BED RESTORATION ON WATER FLOW DURING FLLOD

Hirokazu IKEDA, Kosuke IIMURA, Satoshi KOMUA and Toshiki KIHARA

After gravel river bed restoration, without effective maintenance activities, U-shaped plant community will be formed on the gravel bar and cause deposition of fine sand and gravel, which results in the invasion of exotic plants and the decline of endemic plants to gravel bed. Laboratory experiments clarified that the flow during flood concentrates to main-channel-side on the gravel bar and runs into the hollow part of the U-shape, which may induce deposition of fine sand and gravel, and that the downstream region of the U-shape has very slow water velocity, which may induce deposition of very fine sand. These characteristics were satisfactorily re-simulated in numerical analyses. The same numerical method was applied to actual scale model of gravel bar and U-shaped plant community. It was shown that the partial removal of the “bottom” part of the U-shape will be more effective for suppressing the influence of U-shaped plant community on flood flow rather than the partial removal of the “arm” part on the main-channel-side of the U-shape.