旭川祇園地区における経年変化を考慮した 礫河原再生効果の検討

EVALUATION OF GRAVEL BAR RESTORATION CONSIDERING SECULAR CHANGE AT THE GION AREA IN THE ASAHI RIVER

前野詩朗¹・吉田圭介²・平井康隆³・岩城智大⁴・山口華穂⁵・藤田駿佑⁴
Shiro MAENO, Keisuke YOSHIDA, Yasutaka HIRAI, Tomohiro IWAKI,
Kaho YAMAGUCHI and Syunsuke FUJITA

- 1 フェロー会員 博士(工) 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)
2 正会員 博士(工) 岡山大学大学院准教授 環境生命科学研究科 (同上)
3 正会員 修士(工) 株式会社 建設技術研究所 九州支社 河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)
4 学生会員 岡山大学大学院環境生命科学研究科 社会基盤環境学専攻 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)
5 学生会員 岡山大学環境理工学部 環境デザイン工学科 (同上)

Forestation on the bars in the middle reaches of the Asahi River has fairly progressed in recent years. The forestation reduces flood flow capacity and increases the water level during flooding. As countermeasure works of the forestation, tree's trimming and removal of deposited sand were conducted at the bar of the Gion area. Although the restored gravel bar was maintained for several years, reforestation has been confirmed there. In this study, the effect of a combination of two countermeasure works as sand removal of the bar and backfilling sand of low-water channel was evaluated using annual scale flood flow analysis over the next several years. Numerical results show that the combination of works is more effective against the reforestation.

Key Words : Elevation change, forestation, gravel bar restoration, excavation of channel

1. はじめに

近年, 全国の多くの河川で砂州の急速な樹林化が問題となっている. 本研究で対象としている旭川も, 1980 年代以降, 砂州の樹林化が著しく進行し, 礫河原が減少している. そのため, 旭川を管理する国土交通省は 2004 年 3 月に大原試験区, 2005 年 3 月に祇園試験区で, 試験的に砂州上の植生伐採と砂州の切り下げを実施した(図-1). その後, 大原試験区では渡辺ら¹⁾によって, 整備後の調査, 分析が行われており, その結果, 切り下げ箇所では 2~3 年程度で植生の再繁茂が確認された. 一方祇園試験区では, 数年にわたって動的な礫河原が維持されたが, その後大きな洪水がなかったため, 2015 年現在, 両試験区ともに砂州の河岸沿いで植生が再繁茂している(写真-1). また, 鬼怒川や加古川でも, 礫河原の再生や樹林化の抑制を目的とし, 切り下げの試験施工が実施されている^{2), 3)}. しかし, 旭川同様, 施工箇所の一部では植生の再繁茂が確認されている. このように植生が再繁茂した箇所については, 伐採等の人為的な管理が必要となる. しかし, 伐採を繰り返し行うには多大な労力と費用が掛かるため, なるべく一度の施工によって, 自律的に礫河原が回復・維持され,

樹林化が抑制されることが望ましい.

以上の背景を考慮して, 近年では, 樹林化抑制や礫河原再生策として, 砂州の切り下げに加えて他の施工を組み合わせた工法が提案されている. 例えば, 阿河ら⁴⁾は, 高水敷の切り下げと間伐の組み合わせによって維持管理の省力化を検討した. 長田ら⁵⁾は, 砂州切り下げと低水路の埋戻しに加えて, 高水敷を造る組み合わせにより, 治水上問題の無い河道条件下での樹林化抑制効果を検討した. また, 八木澤ら⁶⁾は, 切り下げ, 埋戻しを含めたいくつかのパターンを初期地形条件として 30 年間の植生動態解析を行い, 各ケースが樹林化期待値に及ぼす影響を比較し, 切り下げのみの場合の方が効果が大きいことを示した. これらの研究により対策工の組み合わせによる樹林化抑制の有効性等が確認されているが, 礫河原再生箇所が, その後の土砂の堆積や植生の繁茂等で施工前の状態にどの程度の期間で戻るかどうかにについては検討されていないのが現状である. 施工の長期的な効果を評価するためには, 少なくとも数年にわたる洪水による河床変動や植生の入植状況の変化についても考慮する必要がある.

そこで本研究では, 大原試験区の上流側の砂州には車の乗り入れによる人為的影響が少なからずある

図-1 対象河道

ため、人為的影響のない祇園地区を対象に、写真-1の現在を初期条件として砂州の切り下げと低水路の埋戻しを組み合わせた3つの地形ケースについて今後5年間年平均最大流量(1000m³/s)規模の洪水が毎年1回来ることを想定し、植生消長シミュレーションを行った。具体的には、まず平面2次元河床変動モデルにより得られる砂州上の2015年の無次元掃流力を計算した後、植生消長モデルによって、洪水後の1年間の植生繁茂状況を解析した。得られた結果を2年目の地形と植生の初期条件として同規模の洪水を発生させて河床変動解析を行った。これを5年分行った後、施工箇所の無次元掃流力と河床変動、植生繁茂状況の結果から、施工の持続性についても検討した。

2. 対象河道の概要

本研究では、岡山市を流れる一級河川旭川を対象とした。図-1に示すように、祇園地区は旭川河口から約14.6km~15.2km間の中州に位置している。解析では祇園地区を含むように河口から14.3km~16.3kmの区間で解析を行った。各区間の河道幅は約300m、平均河床勾配は1/670、河床材料の平均粒径は30mm程度である。

著者らは祇園地区で2008年から2010年、2013年から2015年まで、木本類・草本類を対象とした植生調査、砂州上の河床変動調査、河床粒径調査を行っており、本解析における河床材料の粒度分布や植生消長モデルに反映している。

3. 解析概要

(1) 解析モデル

解析には河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアであるiRICに含まれている平面二次元ソルバーのNays2DHを用いた。本研究では、河床変動解析で混合粒径を取り扱うため、河岸侵食は考慮していない。また、河床変動解析は掃流砂のみを考慮し、渡邊の式⁷⁾を用いた。植生抵抗は、植生の抗力係数と単位体積に占める植生の遮断面積、植生高を用いて計算し

写真-1 祇園試験区の整備後の最初の洪水後と現在の様子
(赤点線：礫河原再生箇所)

ている。なお、ここで用いる抗力係数は1.0とし、植生の倒伏を考慮するため、倒伏状態に応じて植生高と遮断面積を適宜変更している。交換層の厚さは低水路の D_{90} 粒径の3倍の値(0.3m)を与えた⁸⁾。

植生消長モデルについては、前野ら⁹⁾が提案したモデルを用いた。このモデルは、iRICによる解析で得られた流速、河床変動量などの結果を用いて、植生の流失、倒伏の判定を行い、植生種や平水位との比高差、河床の維持年数等の関係から、植生の成長と入植の計算ができるものである。これらの条件は現地調査の結果と、末次ら¹⁰⁾、渡辺ら¹¹⁾の知見を基に設定している。また、植生は倒伏する草本群落と倒伏しない木本群落に区分しており、倒伏樹木からの再萌芽は考慮していない。なお、植生の入植条件については一部モデルの改良を行った。既往のモデルでは、河床の維持年数6年目で、水際以外の比高差2m以内の箇所に、ツルヨシに代りヤナギが入植するが、祇園地区の現地調査結果から、ヤナギの入植を考慮していない。

本研究では、5年間繰り返し河床変動解析を行うことから、上記の考えを基に、植生抵抗の値を毎年更新するものとした。

Nays2DHへの適用性については、2011年(ピーク流量3403m³/s)と2013年(ピーク流量1884m³/s)に発生した既往洪水を対象に解析を行い、水位は概ね観測値を再現できている。また、河床変動量は、洪水前後の現地調査データがある2013年洪水を対象に比較を行い、砂州上において洪水後の河床高が概ね再現できていることを確認した。

(2) 対象洪水

本研究では、年平均最大流量1000m³/s規模の洪水を対象とした。これは、年1回程度発生する洪水によって砂州上の河床攪乱が生じれば、砂州上の樹林化抑制に効果があると考えたためである。そこで、近年旭

図-2 流量ハイドログラフと水位(2005年 下牧観測所)

図-3 解析に使用した粒度分布

川で発生した洪水の中で、対象洪水規模に近い2005年9月の洪水(ピーク流量 $1003\text{m}^3/\text{s}$)のハイドログラフデータを解析に用いた。解析対象時間は26時間である。H-Q式に基づく下牧観測所(河口から19.0km地点)の流量ハイドログラフと解析区間下流端の14.3km地点の水位を図-2に示す。

(3) 解析条件

解析格子は、縦断方向に189分割、横断方向に57分割した。メッシュの格子間隔は約10mである。

境界条件については、上流端流量は、下牧観測所での前述の流量ハイドログラフを用いた。また、下流端水位は、河口から11.6km~17.5kmの区間で、三野観測所(河口から11.6km地点)の観測値を下流端水位に与えた解析を行い、その結果から、14.3km地点の水位を与えた。

河床高は、2013年に行われた縦断200m間隔の定期横断測量のデータを内挿し、さらに祇園地区については2015年6月に実施したドローンによる写真測量データを用いて砂州の地形を修正した。

粒度分布は、低水路では、2013年に行われた岡山河川事務所の河床材料調査結果を用いた。高水敷では中州の河床材料のデータがなかったため、著者らがを行っている現地調査で採取した河床材料の粒度分布(2015年)を用いた。それぞれの粒度分布は図-3に示す。また、埋戻し箇所は低水路の最大粒径(125mm)を一様に与えた。

地被抵抗は、マンニング式で扱い、低水路のマンニング係数の値を $0.028\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、高水敷のそれを $0.026\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。これらの値は前野ら¹¹⁾の研究例を参考にした。また、埋戻し箇所では表層の粒径を低水路の最大粒径(125mm)に設定したため、Manning-Strickler¹²⁾の式より、 $0.031\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。

植生データは、吉田ら¹³⁾が植生消長モデルを用いて得た2013年の植生分布を基に、2015年6月に撮影さ

(a) 植生高

(b) 密生度

図-4 解析に用いた植生分布図

れた航空写真データを用いて修正した。その際、人為的な植生伐採の影響は考慮できないため、岡山河川事務所より情報を得て、適宜、植生分布データを修正した。得られた植生データについては現地で確認した結果、概ね植生高や植生密度が一致していた。図-4に表-1のCase1の解析で用いた植生データを示す。

(4) 解析ケースの説明

(a) 切り下げ、埋戻しの方針

本研究では、以下の3つの方針を基に切り下げ量、埋戻し量を設定した。①河積は増減しないようにする。②今後の洪水によって低水路の河床低下が生じないように、埋戻し箇所には低水路の最大粒径を与える。③切り下げ箇所が平水時に冠水しないようにする。

(b) 解析ケースの設定

表-1に示す通り、切り下げ、埋戻し、植生伐採を組み合わせた3つのケースを設定した。Case1は現況地形、Case2は中州中央を切り下げた地形である。図-5に切り下げ、埋戻しの箇所、図-6に切り下げ箇所縦断面図(図-5の赤枠内の橙色のライン)と、各ケースの15.0km地点の横断面図を示す。左岸側の低水路に集中していた流れを解消するために、図-5の黄線の枠で囲まれた箇所においては必ず伐採と河床高8.0m(平水時に冠水しない高さ)までの切り下げを行った。また、14.8km地点の掘削箇所左岸側に低水路の一部が入り込んでいたため、ここから掘削路内の流れが分断される傾向が見られた。これにより、この地点から下流側での掘削路の掃流力の低下が懸念されたため、この箇所でも一部埋戻しを行った。各ケースで対象洪水を発生させ、砂州上で生じた河床変動を比較して対策工の効果について検討した。また、植生消長モデルで洪水後の地形の植生繁茂状況を再現し、翌年の地形の初期条件として同規模の洪水を発生させた。このサイクルを5年分行い、施工箇所の河床変動と植生繁茂状況の結果から、礫河原の持続性を評価した。

表-1 解析ケース

	切り下げ	埋め戻し	植生伐採	方針適用	備考
Case1	×	×	×	—	現況地形
Case2-1	○	×	○	③	中州中央切り下げ
Case2-2	○	○	○	①～③

図-5 祇園地区 切り下げ（赤）、埋戻し（青）箇所掘削路縦断ライン（橙）

4. 解析結果と考察

(1) Case1の解析結果

図-7に現況河道におけるピーク流量時の流速と水深の平面図を示す。この図を見ると、中州の左岸側に流れが集中していることが分かる。また、ピーク流量時においても中州上の冠水深は小さく、流速も小さく一様でない。以上から、現況河道のままでは、今後、年平均最大流量規模の洪水では、植生を流出させることが難しく、砂州上に細粒土砂が堆積し更なる樹林化が懸念される。

(2) 切り下げ、埋戻し効果の検討

切り下げと埋戻し効果を無次元掃流力の比較によって検討する。なお、ここで検討する無次元掃流力は、85%粒径における値としている⁹⁾。これは、前述の植生消長シミュレーションモデルにおいて、85%粒径における無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回ったと同時に、植生高と河床変動量に応じて植生の消失や倒伏の判定を行うためである。なお、本研究における無次元限界掃流力は、使用した粒度分布を基にEgiazaroff式によって導いた値である0.04を用いた。また、現地調査の結果から、河床変動が発生していない箇所でも植生の倒伏が見られたことから、田中・佐々木の抗力モーメントの式¹⁴⁾を用いた植生の倒伏判定も別途行っている。

図-8、図-9には各々、掘削路縦断ライン上と15.0kmにおける横断ライン上の無次元掃流力を示した。

まず、図-8を見ると、植生伐採と、切り下げを行ったCase2-1では、無次元掃流力が大幅に上昇したものの、450mから下流側において無次元掃流力が0.04を上回ることはなかった。一方、切り下げに加えて左右岸の低水路を埋戻したCase2-2では、縦断ライン上のほとんどが無次元掃流力が0.04を超えており、掘削路内への植生入植を防ぐことが出来ると考えられる。これは、低水路を埋戻したことによって、左岸に集中していた流れが高水敷に乗り上げやすくなったことが原因と言える。

(a) 祇園地区切り下げ箇所縦断図(0m 地点が下流側)

(b) 祇園地区 15.0km 横断図

図-6 切り下げ、埋戻し縦横断図

図-7 Case1 流速-水深（赤枠が祇園地区砂州）

次に、図-9を見ると、Case2-1はCase1と比べ、左右岸の低水路で掃流力が低下し、掘削箇所で大規模な上昇が確認された。また、Case2-2ではCase2-1と比べて低水路での掃流力が上昇しているが、これは、埋戻しによって水深が浅くなり、それに伴い流速が上昇したことが原因と考えられる。さらに、Case2-2では横断距離100～130m付近で掃流力が大幅に上昇していることが確認された。これは左岸側の埋戻しによって洪水流が高水敷に乗り上げやすくなったことが原因と言える。これによって、大規模な洪水が発生した際に、掘削路以外の箇所でも植生が流出する可能性があると考えられる。

以上の点から、切り下げに加えて埋戻しを行うことで、掘削路内で無次元掃流力が増加し、より高い樹林化抑制効果が得られると言える。

(3) 礫河原の持続性の検討

Case2-1, Case2-2において、年平均最大流量規模の洪水を5回発生させ、掘削路が維持されるかどうかを河床変動量と、植生入植の観点から検討する。

まず、河床変動に関する考察を行う。図-10に掘削路の下流端を起点とした掘削路縦断ラインにおける

図-8 無次元掃流力(縦断ライン)

図-9 無次元掃流力(15.0km 横断ライン)

Case2-2の河床高の経年変化とCase2-1の最終年の結果を示す。また、図-11にCase2-2の前年と比較した河床変動量の経年変化とCase2-1の最終年のそれを示す。図-10を見ると、両ケースとも掘削路上流側で洗掘傾向、下流側で堆積傾向である。これは、上流側で洗掘された土砂が徐々に下流側に流されているからであると考えられる。5年目終了時点を見るとCase2-1では掘削路の400mより下流の大部分で堆積しており、Case2-2の切り下げと埋め戻しを組み合わせの方が掘削箇所の礫河原が維持されやすいことが分かる。また、図-11を見ると、いずれも縦断ライン上において洗掘と堆積が交互に発生しているがCase2-2の方が各年の洗掘堆積量が多いことが分かる。

次に、植生入植に関する考察を行う。図-12にCase2-2の縦断ライン上の無次元掃流力の経年変化とCase2-1の最終年の結果を示す。これを見ると、Case2-1の5年目では150mより下流側において掃流力が無次元限界掃流力0.04を下回っている。一方、Case2-2では、いずれの年においても上下流端を除いて縦断ラインのほとんどの範囲で無次元限界掃流力を超えていることが分かる。以上から、切り下げに加えて埋め戻しを行うと掘削路が維持されやすいと考えられる。また、図-13、図-14にCase2-1と2-2の最終年の植生高を示す。これを見ると、いずれのケースにおいても掘削路内に植生が入植することはなかったが、切り下げなかった砂州上で図の破線で示すように若干の違いが見られた。植生流失効果の大きい方を赤色、小さい方を黒色で示している。15.2kmの掘削路の左岸寄りでCase2-2で植生の入植が確認された以外は、若干ではあるがCase2-2の方が良好な結果が得られた。

以上のように植生繁茂抑制についてはCase2-2の方が若干よくなるが大きな違いは見られなかった。

図-10 河床高の経年変化(縦断ライン)

図-11 前年と比較した河床変動量(縦断ライン)

図-12 無次元掃流力の経年変化(縦断ライン)

しかし、現地において過去10年で $2000\text{m}^3/\text{s}$ 規模洪水が3回、 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 規模洪水が2回発生したことを考慮すると、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ の攪乱の少ない洪水が数年続いた後に攪乱規模の大きな洪水が発生した場合にどちらが効果があるかを検討することも必要である。そこで、5年目において近年発生した大規模な洪水である2011年の洪水(ピーク流量 $3403\text{m}^3/\text{s}$)が発生したと仮定してCase2-1とCase2-2で植生の流出の様子を比較した。図-15、図-16に各々洪水後の植生高を示す。この図より、Case2-2の掘削に加えて低水路埋め戻しを実施した場合には図-14で示した15.0km付近の砂州上で繁茂しかけた植生が流失(オレンジ色破線部)しているだけでなく、赤色破線部で示すように掘削路下流端付近や砂州左岸水際においても河床攪乱の効果により植生が流失し易くなっていることが分かる。これらはいずれも埋戻しによって洪水流が中州に乗り上げやすくなったことが原因と考えられる。

5. 結論

本研究では、樹林化を抑制し、自律的に礫河原を維持、再生させることを目的として旭川祇園地区を対象に礫河原再生効果の持続性を検討した。得られた結論を以下に示す。

図-13 Case2-1 最終年植生高 (赤枠が掘削路)

図-14 Case2-2 最終年植生高 (赤枠が掘削路)

1) 砂州切り下げを行うことによって掘削路内の無次元掃流力は増加する。また、切り下げに加えて低水路の埋戻しを行うことで掘削路の掃流力をさらに増加させることが分かった。

2) 砂州掘削だけの場合と低水路埋戻しを加えた場合について年平均最大洪水流量程度が数年続く場合の植生消長シミュレーションの結果、若干低水路埋戻しをした場合の方が河岸沿いの植生は流失し易くなるが、両者の差は小さいことが分かった。

3) 過去10年間で2回発生した3000m³/s規模洪水が数年の小規模洪水後に来ることを想定した場合には、明らかに切り下げのみよりも埋戻しを同時に行うことでより植生が流出し易くなることが示された。

謝辞: 本研究を行うに当たり、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所から多数の貴重なデータを頂いた。また、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金、基盤研究(B) (題目: 河川環境の自律的再生を誘導する河道の維持・改修技術の体系化、代表者: 道奥康治, 課題番号: 26289164), 及び若手研究(B) (題目: 効率的な河道管理を目指した、河道内植生の動態に関する水理学的研究, 代表者: 吉田圭介, 課題番号: 26820203)の援助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃, 宮崎貢, 眞田淳二: 旭川における礫河原再生と樹林化抑制に関する現地試験による検証, 水工学論文集, 第50巻, pp.1201-1206, 2006.
- 2) 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, pp.9-18, 2010.
- 3) 鈴木良徳, 平野寿謙, 北村聡: 河川営力を活用した加古川における樹林化抑制対策とその効果と課題, (一社)建

図-15 Case2-1 3400m³/s 洪水後植生高 (赤枠が掘削路)

図-16 Case2-2 3400m³/s 洪水後植生高 (赤枠が掘削路)

設コンサルタント協会近畿支部研究発表会, 第47回, 2014.

- 4) 阿河一穂, 道奥康治, 神田佳一, 魚谷拓矢: 河道の経年変化から見た樹林化の要因分析と持続的な河川管理のための方策, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.1745-1750, 2012.
- 5) 長田健吾, 濱井宣明, 青木朋也, 藤本雅信, 嘉田功, 川田健人: 交互砂州河道における効率的な植生管理策に関する研究, 河川技術論文集, 第20巻, pp.181-186, 2014.
- 6) 八木澤順治, 田中規夫: 砂礫州切り下げ後の長期植生動態解析に基づく樹林化抑制効果の確率論的検討, 河川技術論文集, 第21巻, pp.319-324, 2015.
- 7) 渡邊明英, 福岡捷二, 安竹悠, 川口広司: 河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法, 河川技術論文集, 第7巻, pp.285-290, 2001.
- 8) 関根正人: 移動床流れの水理学, 共立出版株式会社 p.161, 2005.
- 9) 前野詩朗, 吉田圭介, 松山悟, 藤田駿佑: 旭川大原試験区における植生消長シミュレーションモデルの構築と検証, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.1369-1374, 2014.
- 10) 末次忠司, 藤田光一, 服部敦: 流れによる変形を考慮した高茎草本植物の抵抗性, 国土技術政策総合研究所資料, No.158, 2004.
- 11) 前野詩朗, 渡辺敏, 藤塚佳晃: 簡易に得られる植物特性値を考慮した数値解析モデルの精度向上の提案, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.91-104, 2005.
- 12) 椿東一郎, 荒木正夫: 水理学演習下巻11版, 森北出版 pp.7-10, 1995.
- 13) 吉田圭介, 前野詩朗, 藤田駿佑, 松山悟, 岩城智大, 平井康隆: 旭川における植生分布の経年変化を考慮した洪水流の数値解析, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp.1039-1044, 2015.
- 14) 田中規夫, 八木澤順治, 佐々木寧, 福岡捷二: 河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違, 水工学論文集, 第52巻, pp.649-654, 2008.

(2015. 9. 30受付)