

安室川自然再生における土砂動態の活性化による 瀬・淵形成の可能性検討

Possibility examination of forming riffles and pools by activation of sediment movement
in nature restoration on Yasumuro river.

眞間修一¹・古村幸三¹・堀江史生¹・坂之井和之²・中西宣敬²・浜野直樹³

Shu-ichi MAMA, Kouzo KOMURA, Fumio HORIE, Kazuyuki SAKANOI, Noritaka NAKANISI
and Naoki HAMANO

¹正会員 八千代エンジニアリング株式会社 (〒161-8575 東京都新宿区西落合 2-18-12)

²正会員 財団法人リバーフロント整備センター (〒102-0082 東京都千代田区一番町 8)

³兵庫県東播磨県民局加古川土木事務所 (〒675-8566 加古川市加古川町寺家町天神木 97-1)

The restoration of the various flow in which there are riffles and pools is one of the strategic policy in nature restoration projects on Yasumuro River. But the river shape in the regeneration sector of nature has been modified as the single cross section by river works, and it was difficult to set the low water channel which riffles and pools are formed. So we verified the way of the formation of riffles and pools by the two dimensional river bed deformation analysis which activates the sediment regime by digging the river bed. As the result of this analysis, we clarified the effect that the activation of the sediment regime contributes the formation of riffles and pools and that the transformation to the loose slope shape in the low water channel contributes the degree of freedom of the meander in the low water channel.

Key words : nature restoration, sediment movement, disturbance, riffles and pools, Thorea okadae

1. まえがき

兵庫県南西部を流れる二級河川千種川の支川安室川には、絶滅危惧種であるチスジノリが生育している。平成16年には、チスジノリ等貴重藻類の生育環境を含めた河川環境の保全・再生を目的に、「安室川自然再生計画」が策定された。

自然再生計画書では、「河床の攪乱促進を目的としたダム・堰を利用したフラッシュ放流」、「瀬・淵の再生を目的とした低水路の形成」、「自然再生への地域参加を目的とした勉強会」などが、早急に実施すべき重点施策として位置付けられている。本検討は、河川管理者が主体的に実施する自然再生施策である「瀬・淵の再生を目的とした低水路の形成」について、現地河川の河道特性、出水後の土砂動態を踏まえ、瀬・淵形成の具体的な手法とその効果について河床変動解析モデルにより検証したものである。

2. 対象河川の特徴

安室川は、兵庫県南部の最西端にある赤穂郡上郡町に位置し、千種川へ合流する流域面積65km²、流路延長17kmの2級河川である。

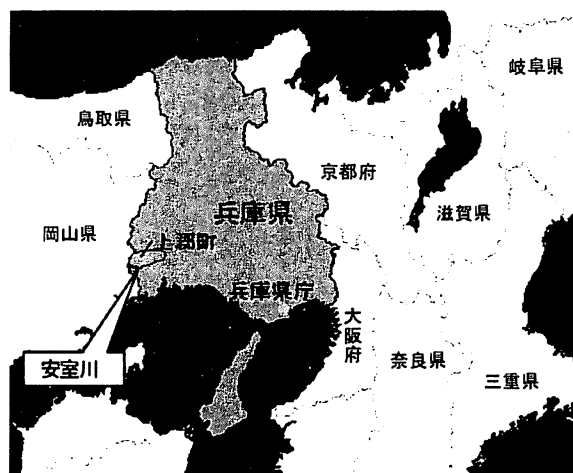


図-1 安室川の位置

流域の年間降水量は1260 mmである(アメダス上郡1982-2001年平均)。安室川の環境上の特徴は、河道内の湧水とチスジノリ・カワモズク等の貴重藻類の生育にあり、河川環境特性は、セグメント区分及び堰による湛水状況等より3つに分けることができる。

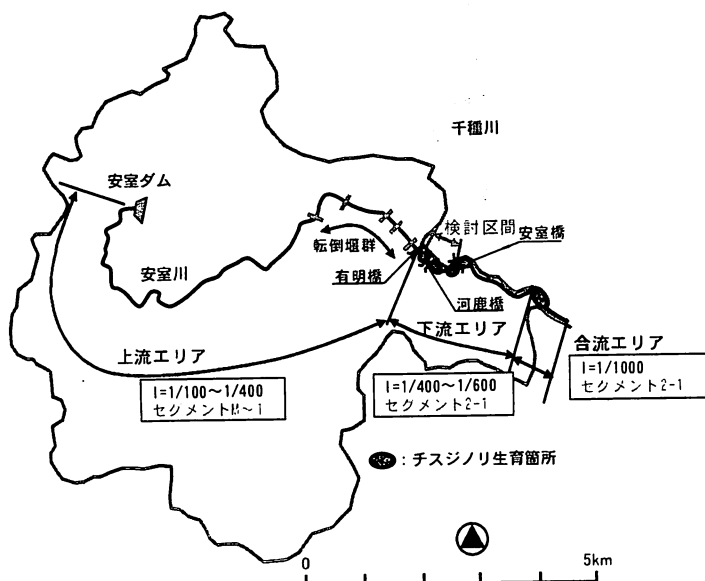


図-2 検討区間とチスジノリ生育範囲

上流エリア（安室ダム～既設転倒堰群：セグメント1）は、 $1/100 \sim 1/400$ の河床勾配で上流山間部の様相を呈している。チスジノリの生息範囲を含む下流エリア（有明橋～千種川合流点：セグメント2-1）は、 $1/400 \sim 1/600$ の河床勾配で河川沿いに低平地が分布する。この区間に堰はなく、一部に湧水が確認されている。千種川合流エリアでは、合流点の堰により湛水域が形成されている。

3. チスジノリの生育環境

(1) 安室川におけるチスジノリの確認状況

昭和30年代から「珍しい藻」として地元で知られていた藻類が存在したが、チスジノリとして科学的に確認されたのは、平成3年11月¹⁾である。平成7年3月を最後に未確認状態となったが、平均年最大流量 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ を超過する規模の出水が生じた翌年の平成16年1月以降は、生育が継続的に確認されている。

(2) チスジノリの生育環境と流域の影響

経年的な生育環境調査により、チスジノリ生育に必要な条件は、適度な水深・流速、湧水等による安定した水温²⁾があげられる。また、配偶体成長の条件として、配偶体等から放出される胞子が着床できるきれいな基質（礫・護岸等）が必要であると推測されている。

しかし現在の安室川的环境は、河道改修、ダム・堰等による流況調節や営農形態の変化、土地利用の高度化等により大きく改変され、結果として、掃流力の低下や瀬・淵の減少、湧水の減少、水質悪化などが生じている。同時に、洪水発生頻度も減少している状況である。

河床堆積物や付着藻類が増加し、それらが攪乱されにくい河川環境へと変化したことが、近年、チスジノリの生育が確認できなかった原因の一つであると推測された。

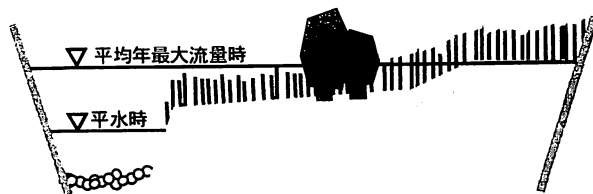


図-3 安室川現況河道横断の状況

4. 低水路形成による瀬・淵再生の可能性

(1) 低水路形成の初期方針

低水路幅や出水時の掃流力を適切に設定することで、河道内に瀬・淵が自立的に形成されることが経験的に知られている。瀬・淵の形成は、河道内に適度な攪乱が生じた結果であり、チスジノリの胞子着床に適したきれいな基質（河床の礫）出現に寄与すると考えられる点で、河川環境及びチスジノリ生育環境の改善に繋がる。

本検討では既往文献³⁾⁴⁾⁵⁾より、平均年最大流量 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ を対象に単列砂州が発生しかつ砂州が攪乱される下限値として、次の値を目標に断面設定を行う方針とした。

川幅水深比 $B/H > 10$

無次元掃流力 $\tau_* \geq 0.06$

今回は、上流エリアと下流エリアの接続地点に位置する有明橋下流の約800mを検討区間（図-2参照）とし、低水路形状を検討した。なお、本検討内で示す数値は、準二次元不等流計算による断面平均値として算出した。

(2) 低水路設定による瀬・淵形成の可能性

前出の方針に従い、検討区間における低水路形状の設定による、瀬・淵形成の可能性を検討した。

検討区間下流には改修予定の無い橋梁（安室橋）があり、検討区間内の河道掘削だけでは、所定の掃流力確保に必要なエネルギー勾配が確保できない。この結果、現状の高水敷き部分（図-3参照）を砂州として維持するのは困難と判断した。

5. 安室川の土砂動態

(1) 土砂動態把握方針

先の検討で、安室川の検討区間では、護岸間の河道全体を持続的に瀬・淵が形成される河道として設定することは困難であることが分かった。

しかしその一方で、平成18年7月出水時に小規模ながら低水路内に砂州が出現し、結果的に瀬・淵が形成されている状況も見られている。これより、近年における出水後の河道内の土砂動態を参考に、安室川における瀬・淵形成の新たな方法を検討することとした。

(2) 出水時の土砂動態観測結果

安室川では、近年平均年最大規模の出水が減少（図-4参照）し、低水路も固定化の傾向にあった。

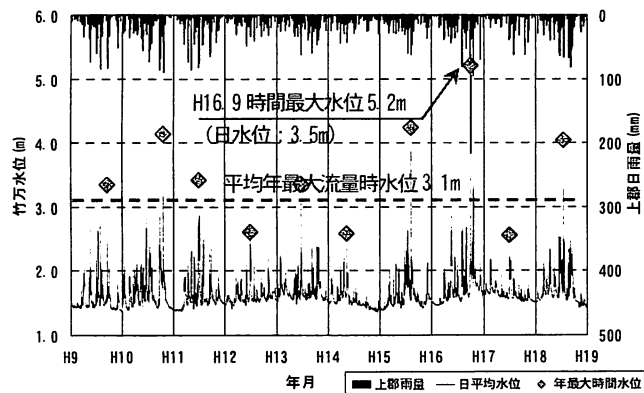


図-4 安室川における近年の出水状況

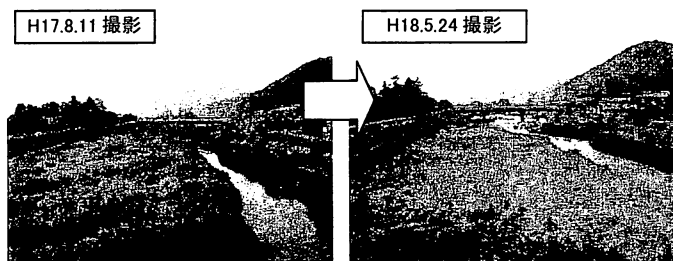


図-5 有明橋下流における維持管理（表土掘削）の状況

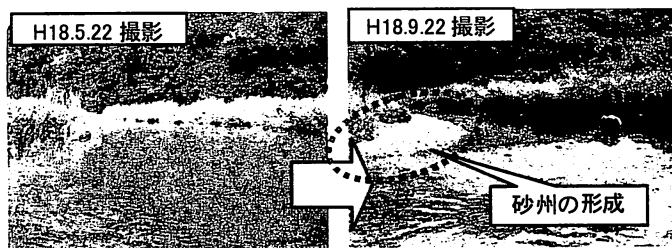


図-6 平成 18 年 7 月出水後の検討区間の砂州出現状況

表-1 出水・工事状況と有明橋下流の土砂動態

年度	出水・工事状況	土砂動態	有明橋下流の 水理諸量
H.16	9月に台風21号により大規模出水(270m ³ /s、最大水位5.2m)発生(図-4参照)	セグメント1から2-1の変化点、かつ連続する転倒堰の末端に位置する有明橋下流に礫河原が出現。	データなし
H.17	7月に小規模出水(30m ³ /s)発生 H.18年3月に表土掘削工事実施	特に変化なし。 有明橋下流地点で流下能力確保の維持工事として表土掘削を実施(図-5参照)。	データなし
H.18	7月に中規模出水(160m ³ /s)が発生	試験施工予定区間に小規模な礫河原出現(図-6参照)。	d ₆₀ ＝45mm τ _* ＝0.03

しかし、平成 16 年 9 月の台風 21 号で 270m³/s の近年では最大規模の出水が生じた際、連続する転倒堰の下流端に位置する有明橋下流(図-7 参照)に、大規模な礫河原が出現した。これは、転倒堰群上流区間に堆積していた土砂が出水により当該地点まで流出してきたものである。

表-2 検討区間の砂州出現についての作業仮説

- ① 近年の洪水頻度減少で、主として転倒堰の上流域(図-2 参照)に粒径の大きい土砂が堆積傾向にあった。
- ② 平成 16 年 9 月の近年では最大規模(平均年最大流量の 3 倍)となる 270m³/s の出水時に、堆積土砂が一気に掃流され、セグメント変化点(セグメント 1→2-1)となる有明橋下流地点に堆積し、礫河原を形成した。
- ③ その後、有明橋下流に堆積した土砂上にツルヨシ等が繁殖し、土砂は固定化された(図-5 左写真)。
- ④ 平成 17 年非出水期に維持管理として、有明橋下流区間で表土掘削が実施された(図-5 右写真)。この結果、ツルヨシ等の高茎草本類も除去され、砂礫分が移動しやすい状況となった(図-7 参照)。
- ⑤ 裸地化により、無次元掃流力 $\tau_* \geq 0.06$ 程度で掃流される河床材料が十分に表出した状態となったことから、平成 18 年 7 月出水時に、検討区間において小規模な瀬・淵が形成された。有明橋直下の $d_{60} = 45\text{mm}$ に対して、検討区間の d_{60} は 10mm 未満であることから、この関係が裏付けられる(図-8 参照)。

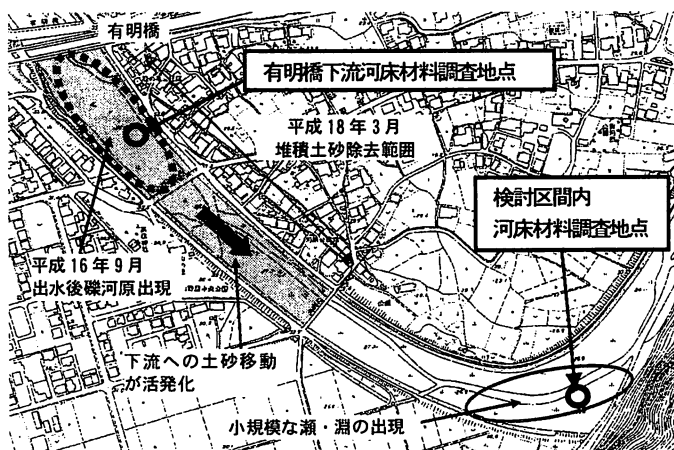


図-7 表土掘削範囲と砂州出現の位置関係

その後、平成 18 年 7 月の平均年最大規模以上の出水時に、下流区間で小規模な砂州が形成された。この期間の土砂動態を表-1 にとりまとめた。特徴的なことは、平成 18 年 7 月出水時は、有明橋直下における断面平均の無次元掃流力 τ_* が 0.06 未満である 0.03 の状況で、下流区間で瀬・淵が形成された点にある。

(4) 安室川下流部の土砂動態の特性

安室川には、沿川の耕作地へ用水を供給するために多くの固定堰、転倒堰が配置されている。このため、堰上流は通常時は流域から流出した土砂が堆積するポケットとして機能しており、特に有明橋上流に連続している 5 つの転倒堰の貯水量は合計で約 90,000m³ あり、土砂の貯留効果も大きいと推定できる。

このような砂州出現による小規模な瀬・淵形成に至った経緯について、表-2 に示す作業仮説を立てた。

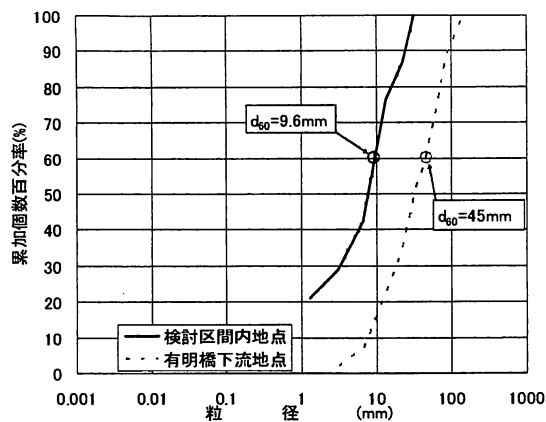


図-8 有明橋下流と検討区間内の河床材料粒径分布

6. 瀬・淵形成の手法検討

(1) 検討方針

自立的に瀬・淵が形成される低水路形成の代替手法として、安室川下流区間における土砂動態の活性化による瀬・淵形成の可能性を検討するにあたり、先に立てた作業仮説の次の事象を検証するため、植生抵抗を考慮した平面二次元河床変動モデルを構築した。

- ① ツルヨシ等高茎草本類の繁茂で河床面の掃流力が低下し土砂移動が困難となること（作業仮説③）。
- ② 高茎草本類除去で無次元掃流力 $\tau_* = 0.06$ で掃流される河床材料が充分に表出し、現況河道の低水路形状においても平均年最大流量程度の出水時に、瀬・淵が形成されること（作業仮説④、⑤）。

(2) 河床変動モデルの構築

a) 河床変動モデルの概要

表土と高茎草本類除去による土砂動態の活性化を表現するために、流況解析の運動方程式において、 F_v で示される植生抵抗（高茎草本類ツルヨシを対象）を考慮した。植生抵抗は、既往研究⁹⁾に基づき草丈・茎径・水深により決定した。この式で算出された摩擦速度を流砂量式（芦田道上式・長谷川式）と浮遊砂量式に代入して流砂量を得る。流砂量を流砂の連続式に代入し河床高を算出し、この河床高を初期条件として次ステップの流況解析を行う過程を計算終了まで繰り返した。また、実際の計算は、一般座標系で実施した。

底面粗度係数は、裸地状態および高茎草本類以外の植生被植状態から決定した。河床材料は5箇所の現地調査結果に基づき、8つの粒径階に分類し、初期設定値を高水敷と低水路の二分類とした。

$$\text{連続式} \quad : \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\text{運動方程式} : \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{F_x}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{F_y}{\rho h}$$

$$\text{植生抵抗} : F_v = \frac{1}{2} C_d \lambda_v (u^2 + v^2) h_v$$

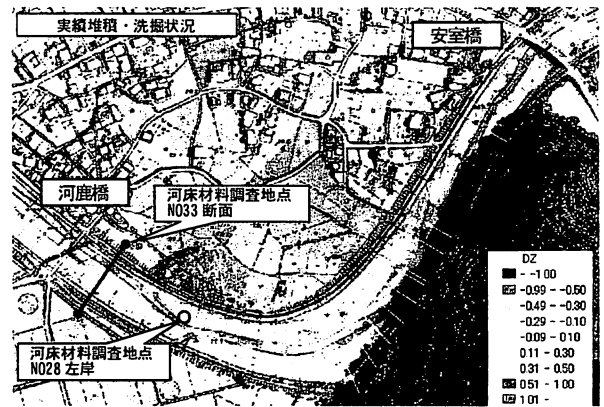


図-9 堆積・洗掘傾向の再現性検証地点

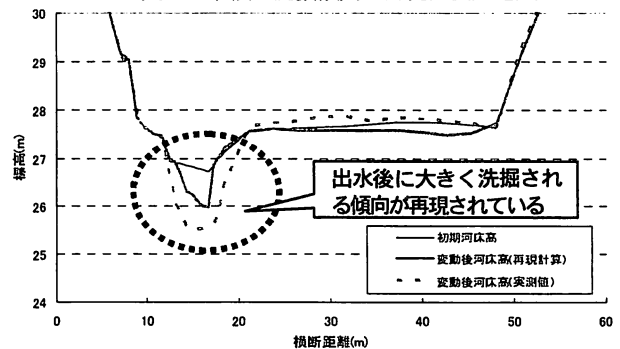


図-10 No33 断面の堆積・洗掘傾向の再現性

ここに、

x, y : 河道縦断方向、横断方向にとった座標軸

u, v : x, y 方向の流速(m/s)、 h : 水深(m)、 H : 水位(m)

t : 計算時間(s)、 g : 重力加速度(m/s²)

ε : 水平渦動粘性係数

C_d : 形状抗力係数(=1.0)、 h_v : 植物の浸水深(m)

λ_v : 植生の密度で茎径×1m² あたりの本数

$$\text{流砂の連続式} : \frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0$$

ここに、

z : 河床高、 λ : 空隙率

q_{Bx} : 単位幅当たりの x 方向の流砂量

q_{By} : 単位幅当たりの y 方向の流砂量

b) モデル構築範囲

解析モデルは、図-9 に示すとおり上流からの土砂供給源となる有明橋下流区間から検討区間を含め、かつ境界条件となる水位データを把握している安室橋までの概ね 1, 200m 区間とした。

(3) モデルの検証

モデルの妥当性は、解析範囲内の水位データが取得されかつ、平均年最大流量規模という条件を満足する平成 19 年 7 月出水を外力に洪水前後の主要な堆積・洗掘状況と河床材料分布特性の再現性により評価した。この結果、当該モデルは解析に必要な精度を有していると判断した。

a) 堆積・洗掘傾向の再現性

洗掘が生じた付近の河道横断について、出水前後の状況を比較し、図-10 に示した。堆積量に差は見られるが、

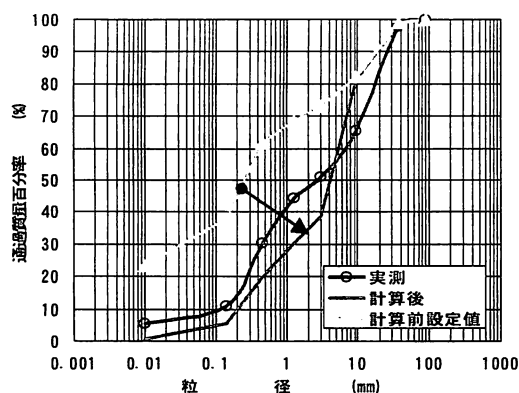


図-11 No.28 左岸河床材料分布の再現性

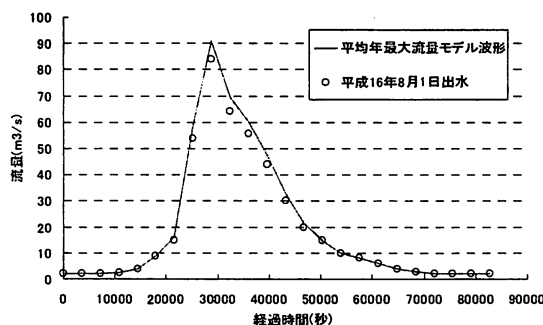


図-12 検討対象洪水波形

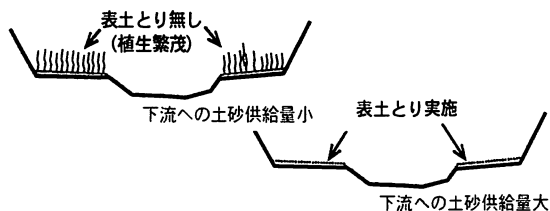


図-13 表土掘削のイメージ

概ね堆積・洗掘状況は再現されていると判断した。

b) 河床材料分布の再現性

洗掘が生じた箇所に近いNo.28 地点の、出水前後の河床材料分布を図-11 に示す。初期設定した河床材料分布が、計算後に粗粒化し、実績値に近似した値に変化している状況を表現している。この結果より、解析区間の土砂動態が再現されていると判断した。

(4) 土砂動態の活性化による瀬・淵形成の可能性検討

構築したモデルを用い、土砂動態の活性化による瀬・淵形成の可能性について推定した。

a) 検討対象洪水

検討対象洪水は平均年最大流量規模 (91m³/s) とし、洪水波形は同規模出水であった H16. 8 洪水の波形を使用した。(図-12 参照)

b) 検討対象区間上流表土掘削の効果

上流部の表土掘削 (図-13 参照) による土砂動態を定量的に把握するために、掘削を実施しない場合と実施した場合について河床変動解析を実施した。



図-14 上流表土掘削「無」の場合の堆積・洗掘の解析結果



図-15 上流表土掘削「有」の場合の堆積・洗掘の解析結果

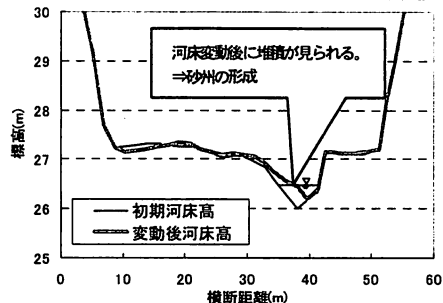


図-16 解析結果による上流表土掘削時の横断形の変化

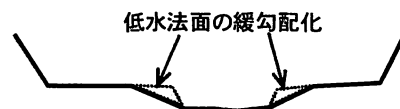


図-17 低水路河岸緩勾配化のイメージ

上流区間における表土掘削を行わない場合 (図-14 参照) に比較し、表土掘削に伴い高茎草本類を除去した場合 (図-15 参照) は、堆積・洗掘が広範囲に広がる。図-16 のNo.26 断面の横断形状変化に示すように、低水路内左岸側に砂州が形成されている状況も確認され、土砂供給源の出現により、瀬・淵が形成される状況になったことが分かる。従って、瀬淵の形成にとっては、上流区間の土砂動態を活性化させることは効果的と考えられる。

c) 低水路法面緩勾配化の効果

図-17 に示すような低水路河岸を緩勾配化 (1:10) による土砂動態把握のため、現況との比較を河床変動解析により検討した。低水路河岸の緩勾配化に伴い、湾曲部で外湾となる右岸側の洗掘傾向が進み、将来的には右岸側へ低水路が遷移する傾向が見られた。(図-18 参照) 従って、低水路河岸の緩勾配化により水路蛇行の自由度を高め、瀬・淵の形成と合わせて、河道形状の多様化に寄与する可能性のあることが把握できた。

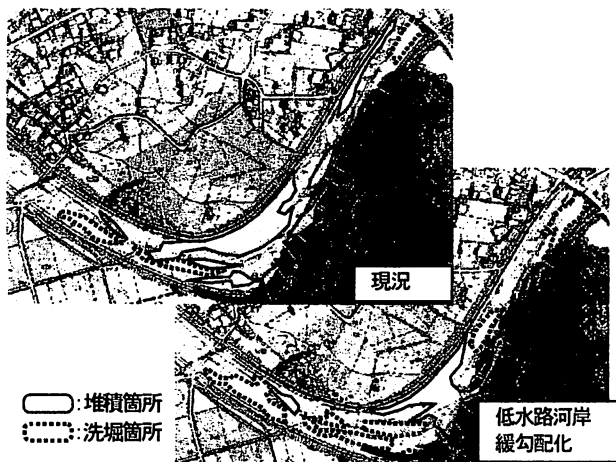


図-18 低水路河岸緩勾配化による堆積、洗堀の解析結果

(5) 維持管理に関する基礎的検討

検討区間上流の表土掘削などの維持管理方針について、表土掘削後の現地状況の変遷から基礎的な検討を行った。

前述のとおり検討区間上流の表土掘削により小規模な瀬淵が出現した。その後、表土掘削箇所では高茎草本類が回復しているが、検討区間に形成された瀬淵は同規模程度に維持されており、下流への土砂供給は掘削3年後でも概ね確保されていると考えられる。(表-3 参照)

しかし、植生繁茂がさらに進行した場合、再び土砂が固定化され土砂供給量が減少していくことが予想される。このため、瀬・淵維持のためには4～5年毎に表土掘削を実施することが望ましいと考える。今後現地状況をモニタリングし、上流の高茎草本類繁茂状況、土砂堆積状況と検討区間における瀬淵の状態を把握し、現地状況に沿った維持管理実施の時期と頻度を決定する必要がある。

7. 考察

本検討の成果は次の2点である。

①適切に選定した区間の表土掘削と、これに伴う高茎草本類の除去により現況河道に堆積した土砂の動態を活性化することで、自然再生対象区間における瀬・淵の形成促進効果が期待できる。河川環境改善の一手法として試行されている「置き砂」と同種であるが、さらに簡易化、コスト縮減を図った方法と捉えることができる。

ただし、表土掘削を実施する区間については、自然再生対象区間への土砂供給の可能性について充分検討する必要がある。その条件としては、対象河川の河道特性を踏まえた土砂堆積区間と対象地点へ土砂が掃流されうる位置関係にあることが挙げられる。

②低水路の河岸形状を工夫(緩勾配化)することで、低水路を旧河川のように蛇行させる可能性がある。

ただし、この手法による蛇行自由度の向上については、本検討では右岸側が山付きであり、治水安全上の問題がなかったこと、旧版地図等により旧河道では零筋が右岸側に寄っていたことから採用した経緯がある。

表-3 検討区間上流表土掘削箇所および瀬淵形成箇所の状況

検討区間上流	対象区間内湾曲部
H17.8.1(表土掘削前)	H18.5.22(表土掘削後、出水前)
H18.5.24(表土掘削後、出水後)	H18.5.24(表土掘削後、出水後)
H20.7.24(表土掘削2年3ヵ月後)	H20.12.16(表土掘削2年8ヵ月後)

このように採用にあたっては、対象河川の特長や治水上の条件を考慮したうえで判断することが重要と考える。

謝辞

本検討は、安室川自然再生検討委員会での協議を踏まえ取りまとめたものであり、貴重なご助言、ご指導をいただいた委員長の道奥康治神戸大学教授をはじめとする検討会の委員の先生方にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 瀬戸良三・右田清治・真殿克磨・他：兵庫県安室川産の淡水産紅藻チスジノリとチスジノリ属2種の日本における分布(1993)
- 2) 辻光浩、水野雅光、齋藤重人、池田正、眞間修一：チスジノリがよみがえる川づくり(兵庫県安室川) リバーフロント研究所報告第15号、2004.9
- 3) 土木学会：水理公式集 平成11年版, pp. 184-185, 1999.
- 4) 山本晃一：沖積河川学, pp. 449-455, 1994.
- 5) 服部他：河床変動の観点で捉えた河原を支える仕組みの復元 河川技術論文集 第9巻, 2003. 6
- 6) 高茎草本の洪水時の挙動と河川管理上の留意点 河川における草本類管理に関する検討会, 2004.3
- 7) 兵庫県上郡町・安室川の流況変化と淡水産紅藻チスジノリ(*Thorea okadae*)の出現 佐藤裕司、横山 正、真殿克磨、辻光浩、水野雅光、他：日本藻類学会第29回大会、2005.3
- 8) 瀧健太郎、渡部秀之、遠井文大、眞間修一、杉野伸義：チスジノリがよみがえる川づくり(兵庫県安室川) リバーフロント研究所報告第17号, 2006. 9
- 9) 中西宣敬、坂之井和之、永井徹男：チスジノリがよみがえる川づくり(兵庫県安室川) 第5報, リバーフロント研究所報告第19号, 2008.9

(2009. 4 9 受付)