

安室川における既設堰・ダム利用による フラッシュ放流実験と自然再生の効果検証

FLUSHING RELEASE EXPERIMENT AND EFFECT VERIFICATION
IN NATURE RESTORATION USING WEIR AND DAM ON YASUMURO RIVER.

浜野直樹¹・渡部秀之²・瀧健太郎²・眞間修一³・関基³

Naoki HAMANO, Hideyuki WATANABE, Kentaro TAKI,

Shu-ichi MAMA and Motoi Seki

¹兵庫県西播磨県民局県土整備部上郡土木事務所 (〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 2-25)

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)

Flushing release using existing weir and dam is one of the important measures of the 'Yasumuro River Nature Restoration Project' that is developed for river environmental restoration. *Thorea okadae* can be exuberant.

In this study, field experiment was figured out to assure effect and possibility of flushing release using existing weir and dam. It is determined that this method would be one of the nature restoration measures. As a result of this study, following two conclusions were obtained. First, a certain effect was confirmed for dragging riverbed deposit material and peeling attached algae, while the maximum capacity of this measure is correspond to the second or third largest flush in a year. Second, it is determined that appropriate operation of existing weir and dam would minimize the effect on the use of agriculture water.

Key words : *flushing release, nature restoration, disturbance, riverbed deposit material, attached algae, 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た。平成7年以降チスジノリの生育が確認されなくなったことから、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」が平成16年に策定された。

本検討は、自然再生計画のなかで河川管理者が実施する自然再生施策として位置付けられている「既設堰・ダムを利用したフラッシュ放流」について、技術的実施可能性を机上解析により評価し、この結果を踏まえ具体的

効果について現地実験を行い、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 の二級河川である。流域の年間降水量は1260mmである(アメダス上郡 1982-2001 年平均)。安室川の上流の特徴は、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。

上流エリア(安室ダム～既設堰群)は、1/100～1/400の河床勾配で上流山間部の様相を呈している。また安室ダム(洪水調節容量 1,800,000 m³、利水容量は 2,300,000 m³、ダム地点における計画高水流量 100m³/s のうち 15m³/s(最大 25m³/s)を放流)や堰群による連続した湛水域が形成されている。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)は、1/400～1/600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

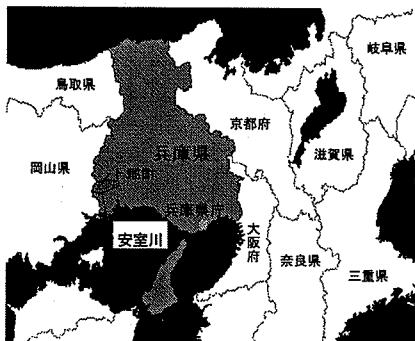


図-1 安室川の位置

アでは、合流点の堰により湛水域が形成されている。

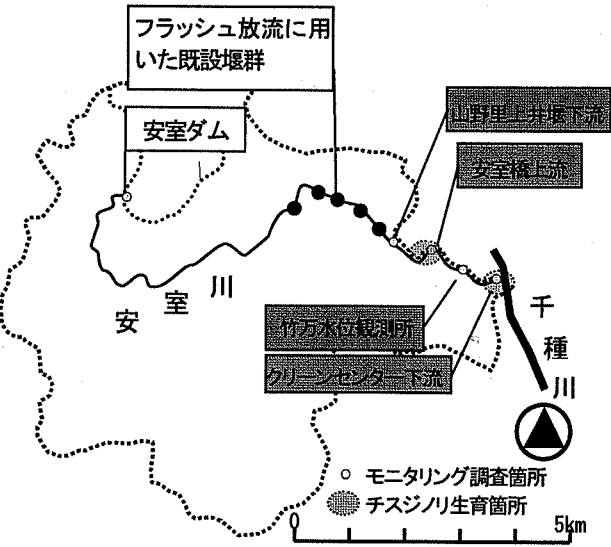


図-2 安室川流域とチスジノリ生育範囲

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70 m³/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基本条件是、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の環境は、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、瀬・淵の減少、掃流力の低下や、湧水の減少、栄養塩類の流出増による水質変化などが生じている。同時に水文環境の変化として、洪水発生頻度も変化している状況である。図-3には、チスジノリの生活サイクルと基質への着床を妨げる微細粒分堆積時期を整理した。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。

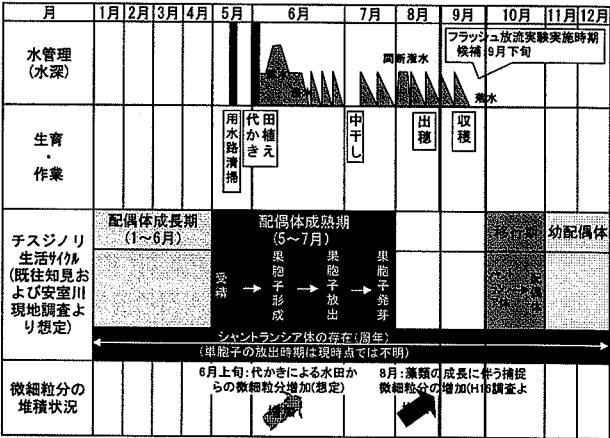


図-3 チスジノリの生活サイクルと環境要因の関係

4. 安室川自然再生計画

(1) 自然再生目標

自然再生では、安室川が本来有しているチスジノリの生育環境を、治水・利水上の機能とバランスさせながら引き出すと共に、多様な生態系の保全・復元を目指す。また、再生した状態の継続的維持には、地域の人々に再び川への関心を持ってもらうことが不可欠となる。

このような理由から、安室川の自然再生目標を次の2つとした。①チスジノリのよみがえる河川環境の再生、②人々と川がふれあえる魅力的な場の創出。

(2) 自然再生施策

チスジノリのよみがえる河川環境の再生に対応した施策を、チスジノリが減少した要因毎に推定し図-4にとりまとめた。このなかで、河川管理者が主導し早期取り組みが可能な施策を重点施策として位置付けた。

- ①既設堰・ダムを利用したフラッシュ放流
- ②低水路の形成

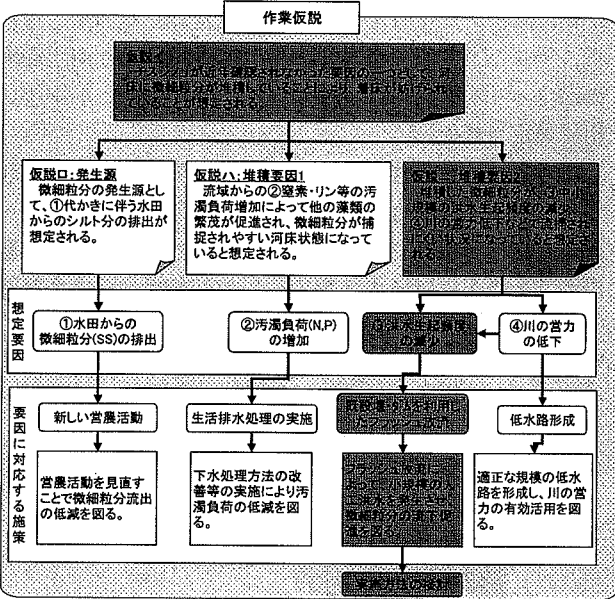


図-4 チスジノリ減少の推定要因と自然再生施策

(3) 既設堰・ダムを利用したフラッシュ放流の実現性

河床堆積物の掃流、攪乱、水質改善等を目的とした既往のフラッシュ放流は、全て洪水調節ゲートを有するダムの弾力的運用の一環として実施されているものである。

安室ダムは自然調節方式のダムであるため、非洪水時の放流量は利水放流管の能力 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ に制限される。これにより、所定のフラッシュ放流規模を確保するために、チスジノリ生息範囲の直上流に位置する 5 基の農業用井堰（合計貯水量約 10.7 万 m^3 ）の連続転倒により小洪水を発生させる手法を採用した。堰貯水量は、安室ダムからの補給により回復し、既得農業用水利用に影響を与えない計画とした。試算の結果、各井堰の転倒間隔を変えることで、シルト等の河床堆積物および付着藻類の剥離に必要な掃流力を確保可能であることが確認できた。しかし、河床材料を十分に攪乱させる掃流力は期待できないことも確認された。

5. フラッシュ放流実験計画

(1) チスジノリ再生を目指した放流諸元設定

チスジノリの生育環境の改善を達成するために、チスジノリ胞子の着床を妨げている他の付着藻類の剥離と堆積微細粒分を掃流可能な放流波形を設定する必要がある。

両者の剥離・掃流に必要な掃流力のうち、より大きい値となる付着藻類の剥離に必要な掃流力 $\geq 1.6 \text{ N/m}^2$ ⁴⁵⁾（摩擦速度 4 cm/s 程度、流速 0.8 m/s 程度）を目標掃流力とした。掃流力 $\geq 1.6 \text{ N/m}^2$ は箱石ら、戸田らの研究による成果で、珪藻類、緑藻類を対象に掃流力の異なる複数の室内実験より把握された藻類が剥離する（剥離傾向が増加する）掃流力である。

この目標掃流力が、井堰下流の一連区間で確保され、かつ剥離した藻類や微細粒分が下流まで流下するのに十分な時間が確保できる放流波形として、安室川最下流地点で $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 規模が、1 時間以上継続する波形を設定した。

(2) 地域と連携した実験計画

本施策は、農業用取水堰の利用、河川利用の制限等があり、河川管理者が単独では実施できない。そのため、実験では農業従事者、地域住民、漁協等、複数の主体と連携した体制づくりが重要であった。特に農業従事者、漁協に関しては、放流実施がそれぞれの生業に大きな影

表-1 放流実験における課題と対応

課題	関連主体	対応策
農業用水利用への影響	農業従事者	水利用が少なくなる 9 月下旬以降で実施
モクズガニ漁への影響	漁協	漁の本格開始となる 10 月前に実施する。
井堰容量回復時の下流流況の悪化	漁協	渇水時の流況調査より問題ないことを確認
河川利用の制限	地域住民	利用の少ない平日に実施
安全性	河川管理者	巡回体制の強化、事前周知

響を与えることから、実験日程は両者に支障の少ない 9 月 21～22 日と設定した。また、この時期はチスジノリが配偶体に成長する直前の時期と想定されており、施策実施による生育環境の改善効果が高いと考えられる。

(3) 井堰転倒方法の検討

井堰運用方法は、井堰管理者への負担軽減、放流波形の制御に着目し、①転倒は操作の簡便な自然転倒、②必ず下流井堰から転倒させる、③放流波形制御は、各井堰の転倒間隔の変更で対応させる、ことを基本方針とした。

目標放流波形に達成可能な井堰転倒パターンは、フラッシュ放流水理解析モデルによる下流地点放流波形で設定した。

a) 水理解析モデル

水理解析モデルは、「井堰放流量算定モデル」と「河道モデル」の二つで構成される。

井堰放流量算定では、フラッシュ放流で利用する 2 種類の井堰（鋼製起伏堰とゴム引布製起伏堰）でそれぞれ放流量を設定した。

鋼製起伏堰は堰の越流公式を基本に、堰湛水部の水収支計算によって堰からの放流量を算定した。

$$Q = CBh^{1.5} \tag{1a}$$

$$C = 1.758 + \left(0.00295 \sqrt{h} + 0.237 \frac{h}{W} \right) (1 + \varepsilon) \tag{1b}$$

ここで、 Q ：越流量 (m^3/s)、 B ：堰幅 (m)、
 h ：越流水深 (m)、 C ：越流係数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
 W ：水路底面から堰縁までの高さ (m)
 ε ：修正高 ($W \leq 1 \text{ m}$: $\varepsilon = 0$ 、 $W > 1 \text{ m}$: $\varepsilon = 0.55(W - 1)$)

連続式：
$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \tag{1c}$$

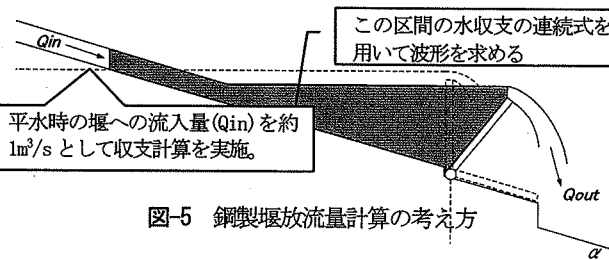


図-5 鋼製堰放流量計算の考え方

ゴム引布製起伏堰からの放流波形は、平成 16 年度のゴム堰放流量調査による実績波形を採用した。

また、河道の水位・流量算定は、表-2 に示す一次元不定流モデルを採用した。

表-2 一次元不定流モデル計算条件

項目	計算条件
河道条件	区間 ◆千種川合流点～船坂上井堰
	断面 ◆H15.8 測量断面(50m ビッチ)
	粗度係数 ◆低水路：0.030
	◆高水敷(植生)：0.040
境界条件	上流端 ◆植生は死水域と設定(既往洪水の植生倒伏調査より)
	下流端 ◆基底流量を $1 \text{ m}^3/\text{s}$ と設定
	井堰放流量 ◆檜原井堰 H-Q
	◆各井堰地点で流量ハイドロをあたえた
計算手法	水位 ◆一次元不定流計算

b) 井堰転倒パターンの設定

水理解析モデルによる転倒間隔を変更した解析の結果、実験時の転倒パターンは目標放流波形を達成可能な20分間隔を採用した。

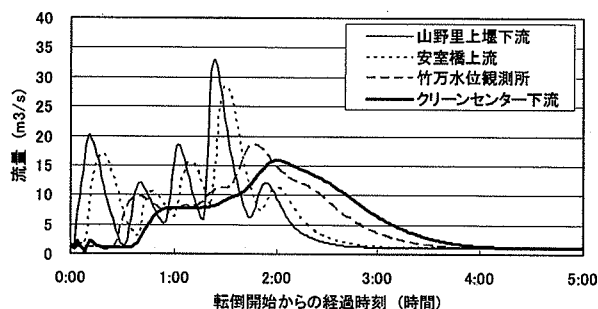


図-6 想定放流波形 (20 分間隔)

6. フラッシュ放流実験結果と効果検証

(1) モニタリング調査項目

実験時のモニタリング調査は、水理諸量の変化を確認するための調査として水位調査、流速調査、井堰水位変動調査および河川流況調査（ビデオ撮影）を実施した。

放流の効果検証するための調査としては、土砂捕捉用のトラップ箱設置による移動粒径調査、藻類を繁茂させた平板設置による剥離調査（強熱減量）、よどみ箇所の水温・水質調査、河川水温・水質調査を実施した。

また、転倒間隔変更による放流波形の変化傾向確認のために、実験を2回実施した。2回目の転倒間隔は、1回目の実験後に安全上問題がないことが確認されたことから、ピーク流量規模が若干大きくなる15分間隔を採用した。

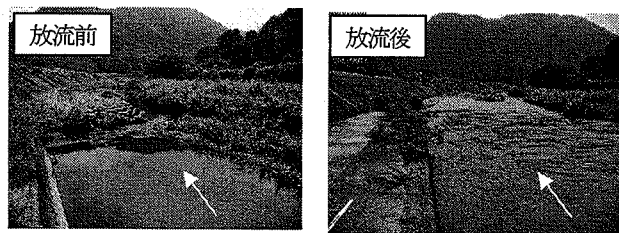


図-7 フラッシュ放流時の状況 (竹万水位観測所)

(2) モニタリング調査結果

a) 移動粒径調査結果

河床に土砂捕捉用のためのトラップ箱（縦横60cm×深さ30cm程度）を河床に設置し、フラッシュ放流によって移動した土砂の粒度分布を確認した。また、2回目の放流時には着色した約5～15cmの粒径別の砂利をトラップ箱横の流心付近に浮き石（河床材料のように土砂が噛み合っていない）状態で設置し、転石調査として移動状況を確認した。

流心部からやや外れていたトラップ箱では粒径2cm～10cm程度の礫が捕捉されていた。また、流心付近で実施した転石調査では、全ての調査地点で10cm以上の礫の移

動が確認された。

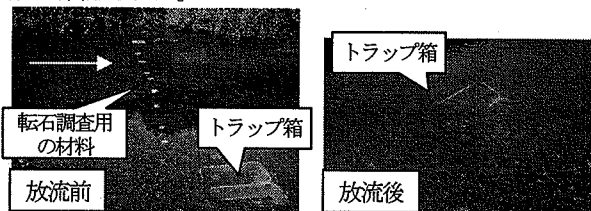


図-8 移動粒径調査の状況

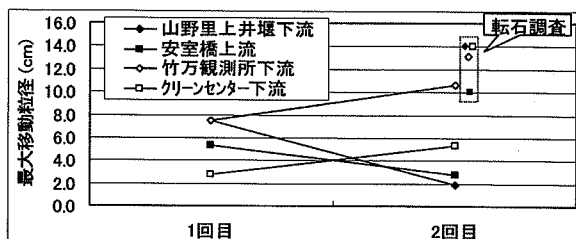


図-9 最大移動粒径

b) 藻類剥離調査

事前準備として放流の約1ヶ月前に安室川へ素焼きタイルの平板（0.3m×0.3m）を設置し、藻類を自然に付着させた。放流による藻類剥離を確認するために、平板を4分割し、付着物を放流前後で1サンプル採取し、強熱減量調査を実施した。

調査結果は、平板の付着物が不均一であったという課題があるものの、目視レベルで最も均一性が高い山野里上井堰下流地点の調査結果では、①1回目の放流後では概ね強熱減量および強熱残量ともに減少傾向であったこと、②2回目後は1回目からほぼ変化がみられなかったこと、③1ヶ月後調査では、強熱減量および強熱残量ともに実験前よりも増加した、ことが確認できた。

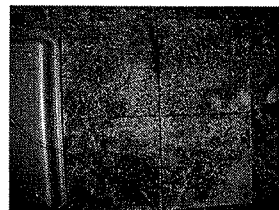


図-10 平板の藻類等付着状況 (山野里上井堰下流)

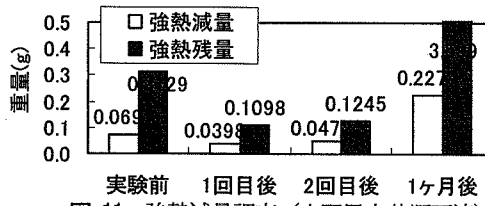


図-11 強熱減量調査 (山野里上井堰下流)

c) 井堰容量回復状況

フラッシュ放流後、安室ダムより最大利水放流能力の2m³/sで井堰へ用水補給された。夜間は安全性を考慮して、1m³/s程度に放流を制限したが、翌日の早朝には5基全ての井堰容量は回復していた。回復に要する時間は12時間～18時間程度であり、ダムとの連携により農業用水利用への影響を最小化することが可能である。

(3) 水理解析モデルの再現性検証

水理解析モデルによるフラッシュ放流想定水位波形を検証した結果、ピーク水位発生時刻および水位波形の再現性が低いことが確認された。

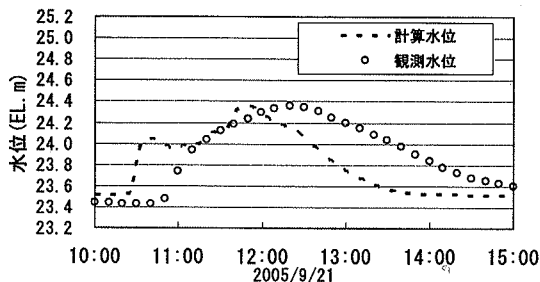


図-12 竹万水位観測所地点水位 (1 回目)

この原因として、観測結果で確認された河道内の貯留現象がモデル上再現されていないこと、井堰からの放流に係わる条件（転倒時間、初期容量）が当初想定していた条件と異なったこと、の2点を仮定し、表-3に示す改良を実施した。

表-3 解析モデルの改良

課題	要因	改良方法
河道内貯留現象	河道の急縮	内挿断面追加
	高水敷植生	植生を死水域とせず粗度係数で反映 ⁶⁾
	よどみ箇所	粗度係数で反映
	蛇行した低水路流下に伴う流路長増	低水路延長の計測 (1/2500 地形図)
井堰	鋼製堰転倒時間	実転倒時間を採用
	初期貯水容量	実験前水位より設定

モデル改良の結果は、図-13に示す通りでありピーク水位誤差は0.1m程度となり、改良によって河道貯留状況も再現された。

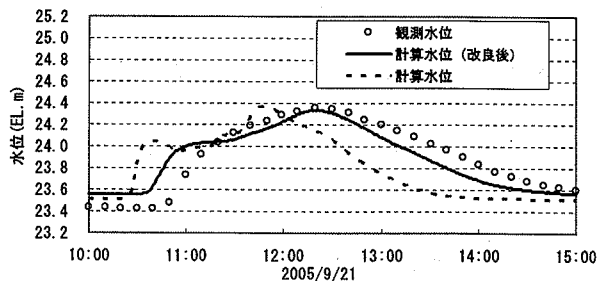


図-13 竹万水位観測所地点水位 (1 回目)

また、図-14に示す水位・水理諸量縦断面図を見ると、水理計算によって算定された移動限界粒径とモニタリング調査で移動が確認された移動最大粒径は、地点毎に差異はあるが、比較的良好な関係であった。したがって、改良した水理解析モデルは妥当なものと判断した。

(4) 水理解析により把握されるフラッシュ放流の効果

客観的な観点から言える実施効果は、井堰下流一連区間における①微細粒分の流下促進効果、②付着藻類の剥離促進効果、の2点である。

a) 微細粒分流下促進効果

井堰下流から千種川合流点区間において微細粒分(粒径数mm程度)を掃流させることは十分可能である。ただし、粒径数十cmの石を全域で動かすほどの掃流力は得られない。

b) 付着藻類剥離促進効果

井堰下流から千種川合流点における約98%区間(3.98km/4.08km)で付着藻類剥離の目安である 1.6N/m^2 を超えることから、藻類剥離効果促進に一定の効果があると考えられる。

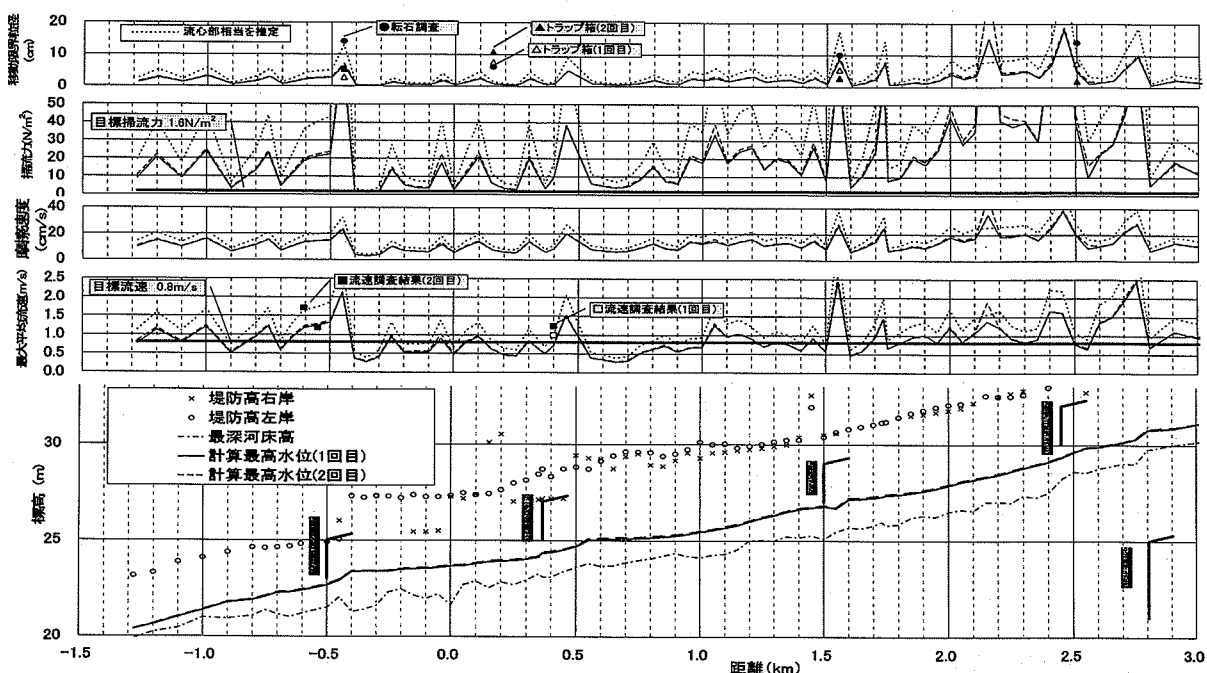


図-14 水位・水理諸量縦断面図

7. 考察

本検討で得られた成果を以下にまとめる。これら成果により、フラッシュ放流は安室川自然再生において河川環境の改善に効果的な施策の一つとして位置付けることができた。

(1) 施策の能力と効果

実験によって妥当性が確認された水理解析モデルにより把握される施策の実施効果は、①井堰下流一連区間における数mm程度の微細粒分流出促進効果、および②同一連区間ほぼ全域で藻類剥離の目安となる 1.6N/m² が確保され、付着藻類の剥離に一定の効果が期待できる点である。これらは、本実験による現地モニタリング調査においてもその効果を確認することができた。

また、本施策は井堰の転倒間隔を変えることで放流規模をある程度調整することが可能である。最大の放流規模は、すべての井堰を同時に転倒させた場合である。シミュレーションの結果、最大規模の水位は年2〜3回程度の頻度で発生する規模であることを確認した。

表-4 転倒間隔別の放流規模 (竹万水位観測所地点)

転倒 間隔	ピーク ^{*1} 水位 (m)	差分 ^{*2} (m)	移動限界 ^{*3} 粒径 (cm)	差分 ^{*2} (cm)	発生頻度	9月 発生頻度
20分	24.34 (2.44)	-	0.9	-	年4回 程度	1〜2年に 1回程度
15分	24.39 (2.49)	0.05	0.9	0.0	年4回 程度	1回程度
10分	24.48 (2.58)	0.14	0.9	0.1	年2〜3回 程度	2〜3年に 1回程度
5分	24.58 (2.68)	0.24	1.0	0.2	年2回程度	2〜3年に 1回程度
0分	24.64 (2.75)	0.31	1.1	0.3	年2回程度	2〜3年に 1回程度

*1 竹万水位観測所水位 (標高換算値) ()内は観測値ベース (標高換算していない)
*2 転倒間隔20分を基準
*3 ピーク流量時の諸元で算定 (流速は断面平均流速)

(2) 地域連携による実施

本実験は、河川管理者、上郡町、地域住民、農業従事者、漁協等、複数主体の協力によって安全かつ適切な実施が可能となった。実施前に課題とされた、農業水利用、地域との連携、安全性に関して、施策運用上の全く問題となら無いことを確認することができた。

8. 課題

(1) モニタリング調査手法の改善

今回の実験で実施した移動粒径調査および平板設置による付着藻類剥離調査では、次の課題があげられた。

移動粒径調査では、トラップ箱が流心から外れていたため、放流による最大規模の掃流力を確認できなかった (補足調査として2回目の放流時に転石調査を実施)。今後、実施する場合にはトラップ箱を流心付近に設置する必要がある。

また、付着藻類剥離調査では、平板の藻類付着や土砂堆積状況が不均一であったこと、実験前後で各1サンプルずつしか試料を採取しなかったこと、これらの原因により放流による藻類剥離効果を定量的に評価できなかった。今後、実施する場合には実験前後でのサンプル数を複数個採取する必要がある。

(2) 実施時期の検討

今回の実験は、複数の主体との調整によって9月下旬を実施時期とした。9月実施は当初、チスジノリにとっても効果的な時期と想定されていたが、実験直前の9月中旬に安室川でチスジノリの生育が初めて確認された。

フラッシュ放流を河川環境改善目的として実施する場合には問題ないと考えるが、チスジノリの生育への寄与を目的に実施する場合には、9月実施は遅いと考えられる。今後、チスジノリ生態調査結果を踏まえて、実施時期を再検討する必要がある。

(3) 他施策との連携

安室川自然再生施策の一つである河床攪乱効果を目的とした「川を耕す・磨く」施策 (人が河床の石をひっくり返したり、磨いたりする) は、チスジノリ生態解明の一手法として、現在実験実施中の施策である。この施策は、人力によって河床攪乱、藻類剥離を実施するため、エリアは限定されるが常に一定規模以上の攪乱効果を得ることが可能な施策である。今後、チスジノリの生態が解明され、有効な施策であることが確認された場合には、フラッシュ放流施策と連携した施策実施が望ましい。

9. 謝辞

本実験を実施するにあたり、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安室川自然再生検討会の委員の先生方、実験にご協力いただいた兵庫県上郡町役場のご担当の方々、および本調査にご協力くださった関係者の方々にこの場をお借りして深くお礼申し上げます。

参考文献

1) 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:瀬戸良三・右田清治・真殿克麿・熊野茂(1993)

2) チスジノリがよみがえる川づくり (兵庫県安室川) 辻光浩、水野雅光、齋藤重人、池田正、眞間修一: リバーフロント研究所報告第15号,2004.9

3) 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、真殿克麿、辻光浩、水野雅光、他: 日本藻類学会第29回大会,2005.3

4) 水流による藻類の剥離に関する実験的研究 箱石、塚原: ダム技術No.173,2001

5) 糸状藻・非糸状藻の増殖・剥離・種間競争に関する室内実験 戸田、西村、池田: 河川技術論文集第10巻, 2004.6

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

(2006.4.6受付)