

淵環境を回復した低水路水制の設計と その環境機能の評価

DESIGN OF LOW-WATER GROIN TO RECOVER ENVIRONMENT OF POOL AND THE EVALUATION OF ENVIRONMENTAL FUNCTION

福留脩文¹・藤田真二²・福岡捷二³

Syubun FUKUDOME, Shinji FUJITA and Syoji FUKUOKA

¹正会員 株式会社西日本科学技術研究所 (〒780-0812 高知市若松町 9-30)

²株式会社西日本科学技術研究所 (〒780-0812 高知市若松町 9-30)

³フェロー会員 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The structure of pool was naturally restored by setting up the groin of two different shape in the place slightly refracted in the river channel made the straight line of the mountain river. After construction, it experienced many floods, but the shape and environment of the pool that had been planned at first were maintained. In addition, the kind and the living density of fish achieved the result similar to the natural pool.

It is judged that the gushing out of the river-bed water consequentially achieved and the retention effect on the groin area contribute to improving the habitat and also bio-diversity.

Key Words: groin, shoots, pools and sand bars, river-bed water, bio-diversity

1. 序論

河川の伝統工法である水制工は、近年の生態学的な環境復元を図る工法として、スイスでは早くから応用されていた¹⁾。わが国でも、九州地方整備局²⁾から多自然川づくりにおける水制工を活用した新たな淵の創出を図る技術指針が出されている。また国の設計指針³⁾として、今日、伝統工法の水制は、従来の治水機能に加えて多様な水環境を形成することから、設計にあたってこの効果を十分に活かすことが薦められている。

これに対して、山本⁴⁾は、「生態系の保全・復元を目的とした護岸・水制は、その目的を達成できる形状・構造であり、かつその耐用年数内において流水に対して破壊されない構造として、あまり原則にこだわらず、河岸侵食防止の重要度からみた河岸のランク区分に応じて、設計外力の緩和措置、設計寿命の短縮など、適切な対応を取る」こととしている。また、水制工は護岸以上に理論上の解釈を与えて設計することが難しい⁵⁾といわれる中で、福岡⁶⁾は河道平面形状に対する水制工周辺の流れや河床変動の解析法を示して、水制工の効果的な配置について設計法の基本的な考え方を提案している。

一方、こうした過去の知見・経験や研究を通して、新しい目的の水制工が試行錯誤しながらも開発されている。例えば、伝統的には水制工前面の河床を無闇に掘らせる

ことを基本的に戒めている⁶⁾が、福留⁷⁾は逆に実際の河川において、水制工で河床を許容範囲に洗掘させて淵を創出し、同時に蛇行する濬筋の安定化と河岸の安全化を図る現場を設計して、直接、試験施工を行っている。

その実際の現場で、筆者らが自然河岸に設置した水制によって伏流水が湧出して、創出した水制域に一定の水温域が形成されている。夏季には周りよりも冷たい水温域、冬季には逆に温かい水温域が生れて、天然の淵の環境と同等の、魚の生息密度や種数の増加現象が現れている。本研究では、その水制の構造と機能を考察した。

2. 淵の機能を回復する安田川の山地河道

(1) 経緯

安田川は高知県安芸郡の稗己屋山に源を発し、南流して土佐湾に注ぐ流程約 30km の二級河川である(図-1)。本川の上流域に位置する馬路村は、ユズの産地として全国に知られ、夏には川遊びや釣りを楽しむ人たちが賑わっている。しかし、集落中心地でユズ工場が立地する日浦地先前後の約 500m の河道は、かつての河川改修でほぼ直線化されて、早瀬・平瀬が連続して明瞭な淵のない河床が続いていた(写真-1、図-2)。そのため、魚の棲みづらい環境となり、地元の村と、高知県安芸土木事務所との協議により、新たな淵を創出することが決定された。

(2)現場の立地条件と創出する淵の位置の設定

a)現場の河道状況 (写真-1, 図-2 参照)

対象区間の上下流にある湾曲部には、水深 3mを越す淵①,②が存在している。その間に立地するほぼ直線的な河道は、中間点で河道が若干屈折(角度約 15 度)して、左岸側には河床低下により浮き上がった根固工の下流に、旧河床と思われる土砂の堆積域(高低差 1m前後)が続き、低水路は一部に岩盤が露出している。その低水路上に交互砂州が形成されて、早瀬・平瀬が連続していたが、深い淵は存在していない。河床勾配は 1/130 である。

その河道状況で、淵を創出できる可能性のある地点として、中間点の屈折区間を検討した。

b)創出する淵の位置の設定 (写真-1, 図-2 参照)

中間点の屈折部が、淵の創出を図る上で有利と考えられる条件を、以下のように整理した。

- この屈折区間では、湍筋が左岸に寄った後、やがて右岸側に流向を転じている。高水時の河道一杯に流れる洪水が、この屈折部に直進していることが窺える(図-2 の矢線で右岸 B.C~P2)。
- 縦断方向での流況は、淵①の淵尻から屈折区間の起点での左岸 B.C 付近までが水深 30cm 程の早瀬で、そこから屈折部を過ぎて直線区間に入る P3 辺りまでが水深 50cm 内外の流れとなり、P3 を過ぎると再び水深 30cm 程の早瀬となり、淵②に向かっていった。左岸 B.C~P3 間の水深はこの上・下流よりも深い。河床に露岩はなく、大粒径の礫が 10m 程の間隔で横に並んで、白波が立つ平瀬の環境となっている。
- 左岸(図-2 の P2~P3)に堆積した砂礫層の表面とその水際の植生には、若干の侵食跡が認められた。
- 地元の話では、昔はこの屈折点付近に、通称「こぶち」と呼ばれる深い淵があったということである。

この緩い屈折区間は、現状では蛇行の曲がり度が弱く、淵になりきれていないが、河床の洗掘を促す工作物を設置すれば、新たに淵が形成できると判断した。

c)淵を創出する手段の検討

川那部ら⁸⁾は、淵の形態を、流れの曲る蛇行点に形成される淵(M 型)、流れが巨大な岩に当たってその周囲が掘

られる淵(R 型)、川底の固さが異なると軟らかい方が掘られてできる淵(S 型)に分類している。

筆者らは、淵の復元または創出を図ろうとするとき、水制(R 型モデル)や横断的な小落差の石組み(分散型落差工と称する; S 型モデル)を用いてきた。そのとき、最も効果的に深い淵を形成するのは、湍筋の蛇行を生かした M 型と、R 型または S 型との併用モデルであった。

ここでは地域住民の安心を得るために、2 基の水制で治水対策を講じつつ、M・R 型の淵を創出することにした。なお、隣接する民家からの「自宅の前を掘らないで欲しい」との要望で、淵頭の位置は想定した淵の最深部の地点 P2 辺りに下げて、淵の規模も半分ほどに縮小した。

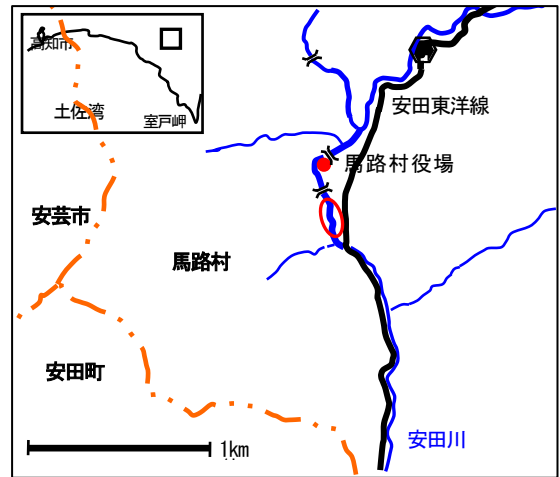


図-1 淵の復元を試みた位置

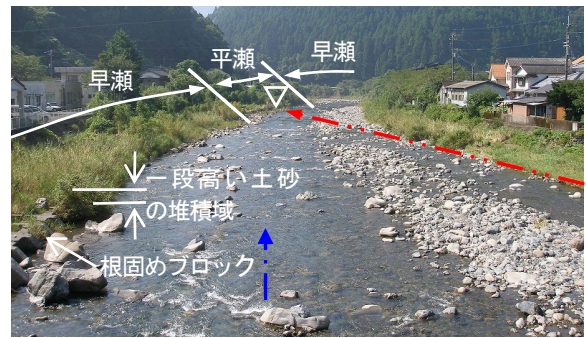


写真-1 安田川での対象区間。▽印が水制の施工現場

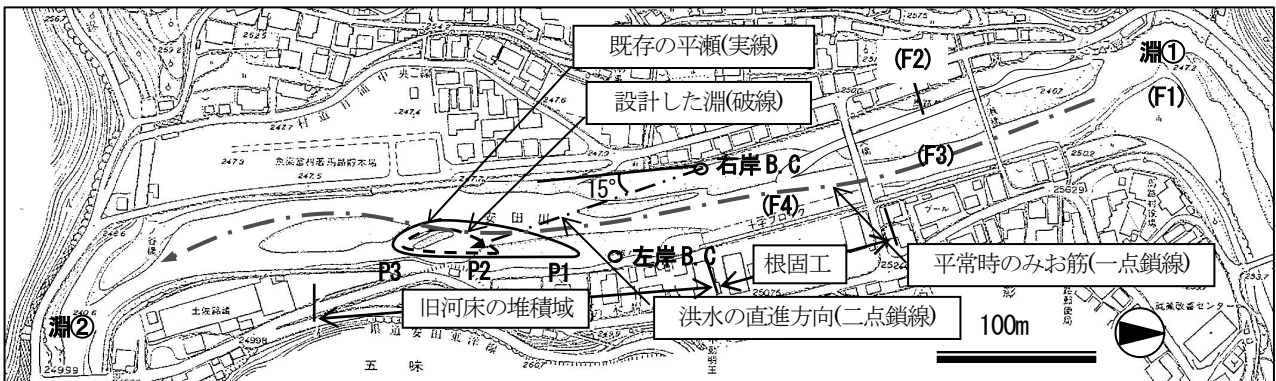


図-2 対象区間平面図(F1~F4 は魚類の調査地点を示す)

3. 淵の創出と水制の設計

2 基の水制は、治水機能上、淵を低水路河岸から離して水制工先端に生じさせるよう、平面的には水制工の向きをやや上流に向けて、以下のように求めた(図-3)。

(1) 上流側の水制

上流側水制は急深な淵頭を形成する目的で、洪水流が最も強く当たる P2 付近に設置して、洪水時の河床洗掘力を高めるため、洪水流に対して抵抗の大きい角張った構造とした。そしてその頭部沖に独立した置石群二基を設置して、その向きは水制の向きより上流に曲げて、この間を通過する流れを岸から離すようにした(図-3a, b)。

実際には、水制頭部の高さを平水位プラス 0.3m、頂部の高さを岸より若干下げて 1.2m とした。水制胴部は河岸(堆積土砂)の肩から水中に約 3.5m 突き出し(河床上長さ約 3.0m で川幅比約 0.06)、根元は 1.5m ほど河岸に貫入した。一方、河床が過洗掘されて河岸が大きく侵食されることのないよう、水制頭部と置石の間の河床には、水深 90 cm を維持できる高さの捨石護床工を施した。

(2) 下流側の水制

河道の屈折は屈折角が小さく、現時点では河床も河岸も安定している。しかし、上流側水制を設置すると、その前面を通過する勢いの強まった流れの一部が、下流岸に強く当たることが推察される。そこで、その当る前に河岸を護る目的の下流側水制を設置した。位置は上流側水制の長さ 3.0m の 4 倍で 12m 下る地点とした(図-3a, c)。

また下流側水制の位置は、水深が徐々に浅くなる淵尻を形成する場所であり、河床・河岸を極力攪乱しない、流れに対して抵抗の少ない構造として、頭部を低く、根部を河岸堆積部の高さへ緩やかに変化させた。そして、高水時に岸へ向かう洪水の勢いを、2 基の水制間に発生する滞留域(反転流)で和らげるため、水制間の岸に堆積していた土砂を奥へ 1m 程削り、弧状の水際地形とした。

下流側水制の前を過ぎた後の流軸は、P3 辺りで右岸方向へ離れており、3 基目の水制は必要がないと判断した。

4. 対象区間の河床・河岸の環境変化

水制を設置して(2007年12月24日)1年9ヶ月を経た2009年9月3日に、施工区間の上流100mから施工区間の下流70mまでの間を簡易測量し、平面形状と滞筋の地盤高等を把握した。また、2基の水制設置箇所と水制間、およびその上・下流に各横断測線(計5測線)を設け、各測線上の1~3m間隔で地盤高、水深、流向・流速を測定した。さらに、施工区間周辺(約50m区間)では目視により主体となる河床材料の粒径を巨礫(25cm以上)、玉

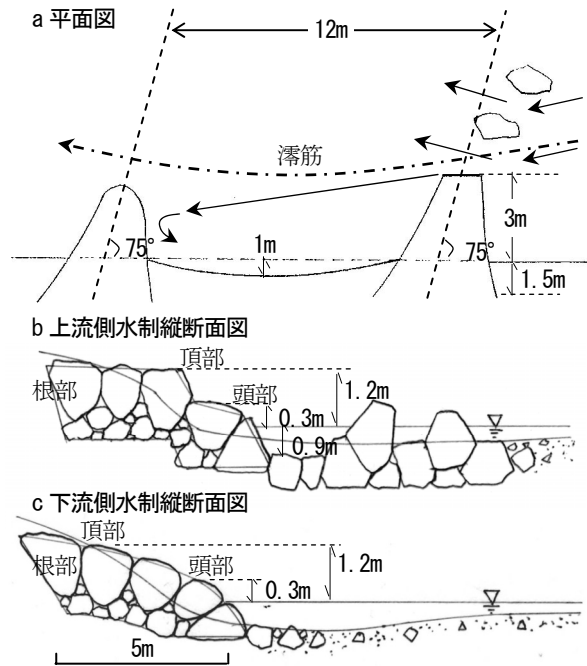


図-3 水制の配置と縦断構造

石(6~25cm)、砂利(0.2~6cm)、砂(0.2cm以下)に区分し、その分布範囲を記録した。これら調査結果(図-4, 5)から、対象区間での淵の復元状況等に関して検討する。

(1) 工事後の出水履歴

水制施工後の出水履歴を、安田川流域の馬路村魚梁瀬での日降水量の推移(気象庁データ)から推測すると、以下ようになる。

施工後での、日降水量が100mmを超える降雨は8日あり、日50mmの降雨は高頻度に生じて、中程度以上の出水は多くの頻度で経験していると判断できる。なかでも、施工半年後の2008年6月29日の日降水量は334mmに達し、この際には最大時間雨量93mmに達する豪雨により相当規模の出水が生じたといえる。さらに、施工後1年8ヶ月を経た2009年8月9日には日降水量228mmの降雨があり、その翌日まで続いた総雨量は450mmに達した。この出水は河床等を調査した約一ヶ月前であった。

以上から、水制は設置後、現在に至るまで少なくとも2度の大規模な出水を経験したほか、小~中規模出水の影響は高頻度に及んでいたことが分かる。

(2) 対象区間の状況

a) 施工区の上流域

施工区の上流域では、最深部は河心付近から徐々に左岸側に寄っている。河床材料の分布は、横断的には一様に左岸側へ大粒径が偏り、巨礫、玉石、砂利の縦列状態となっていた。河床はその上流から水深40cmほどの白波の立つ早瀬が続いてくるが、施工区の20mほど上流からその上流に向けてずっと縦断方向に、2~3m幅の帯状で岩盤が露出して、その岩盤の罅穴に玉石や砂利が堆積し

ていた。その河床の横断方向には、半分ほど埋没した粒径1~2m程度の巨礫と、粒径50cm内外の巨礫が連結して、礫列構造が形成されて、安定した平瀬の河床となっていた。流向流速はほぼ一様に下流側へ直進していた。(図-4, 5)

左岸側の水際には、幅2~4m、高さ1mほどの堆積が続き、所々に直径20cm前後の玉石を多く含む層が見えて、その上部にはヨシ群落が発達した状態で、外観上は水制の設置前と変化はなかった。

以上の結果から、河床と水際とも、施工前の状況からほとんど変化していないと判断した。

b) 施工区域とその周辺

施工区域での最深部は、二基の水制頭部の先端を結ぶ線上にあり、上流側水制の6mほど上流から急深になって、2m下流で水深90cmの最深部が維持されていた。そして、その最深部から下流側水制の先端に向けて上り勾配で漸次浅くなり(水深60cm)、そこからさらに10m下がると水深20cm位まで浅くなって淵尻に至り、その先の河床は下り勾配で瀬につながっていた。(図-4, 5)

横断形状を見ると、水際地形は、上流側水制の設置場所では頭部先端が急勾配で最深部を形成しているが、その下流では緩勾配の堆積地形で、下流側水制の先端を過ぎればさらに遠浅となっている(図-4c)。そして、二基の水制間で円弧状の入り江状態が維持されている。その下流でヨシの生えている水際に幅数十cmの侵食跡が確認されたが、これは水制設置前にも確認されている。ともに水際には砂泥や砂礫が堆積し、静水域が形成されていた。このことから、水制による河岸の侵食は大きく受けていないと判断した。

また水制域内には多様な流向と流速が見られ、岸沿いには反転流もできていたが(図-5)、上流側水制の河岸に貫入させていた石組みの間隙から、水温の異なる湧水が出て、水制下流にその滞留域が形成され、ここに魚類の蝸集が確認できた(後述)。そして、旧河床と思われる左岸側の堆積土砂はここでも安定して、上面を覆うヨシや灌木が岸寄りの淵の水面に影を落としており、魚の生息環境に好影響を与えていると判断した(写真-2)。

一方、淵の中の河床材料は、施工区上流の瀬のみお筋上に沿って、上流側水制の頭部と置き石の周辺へ巨礫が堆積し、続いて下流側水制に向けて玉石が堆積するのが見られた。そして、駆け上がり部からその周辺の水深の浅場では砂利層となり、水際には砂泥が堆積して、流速の違いによって分級作用が起きていることが窺えた。上下流の瀬の環境と比べると、多様性の高さが窺われる。

c) 施工区の下流域

工事前に施工区の10mほど下流に瀬頭(淵尻から瀬に続く勾配の変化点)が形成されていたが、工事中にこの環境を破壊しないよう、重機の移動には注意していた。その瀬頭の形状はほぼ維持されている(図-4b, 5)。瀬に入ると、創出した淵に比べて河床材料の分布や流向流速は単

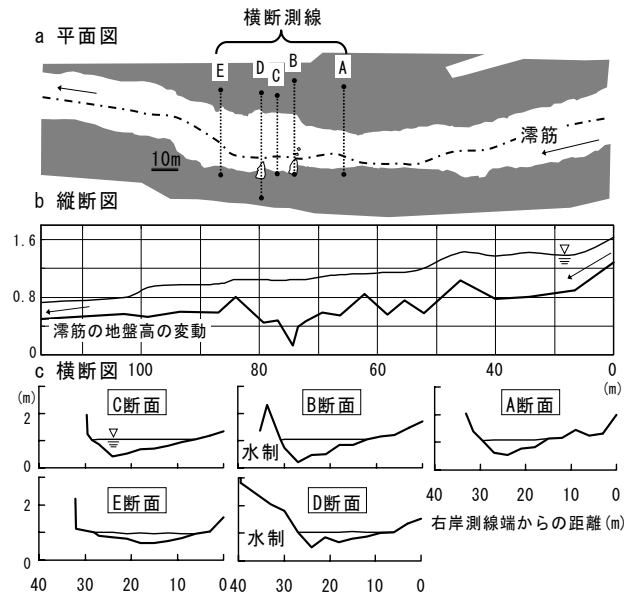


図-4 施工区周辺の平面、縦断横断形状

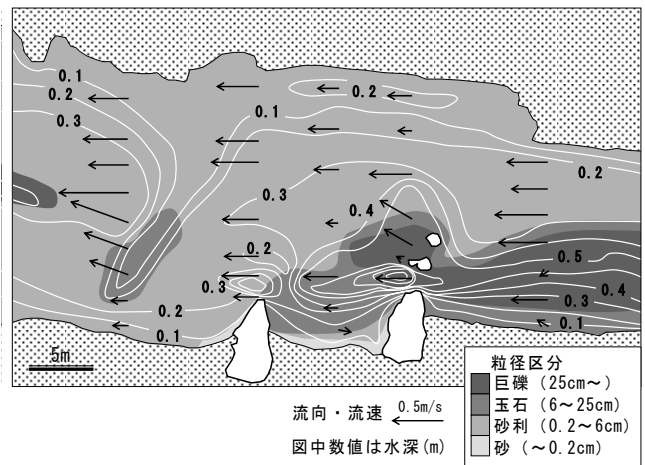


図-5 施工区周辺の水深、流速、河床材料



写真-2 完成した2基の水制(▽印)とその前面に創出した淵調になっている。工事後も施工区の上流と同様に、元の瀬の形状や流況は変化していないと判断した。

5. 環境機能の評価

(1) 魚類の生息状況

緩い角度の屈折部に、水制によって復元した淵の環境機能を評価するため、魚類の生息状況を含めて以下の調査を実施した。

a) 調査時期と方法

調査は2007年7月27日(水制設置前), 2008年7月28日(設置約0.5年後), 2009年7月24日(設置約1.5年後)の3回, いずれも魚類の活動が活発となる夏季に統一して実施した。調査は図-2に示したF1~F4および施工区の5地点において実施し, このうち, 施工区での後2回(事後)の調査では水制域と水制頭部域に区分して以下の観察を実施した。

各地点において水中眼鏡とシュノーケルを用いて潜水し, 移動しながら一定面積内に分布する魚類の個体数を種別(目視により種を同定)に計数, 記録した。この計数値を観察面積で除すことにより, 単位面積(1m²)当たりの魚種別生息密度を算出した。

b) 水制設置による魚類の生息密度の変化

各調査地点で3年に亘り観測した魚類の生息密度の変化を図-6に示した。魚類全体の生息密度は, 水制設置前の2007年が0.77~2.89尾/m²であったのに対し, 設置後の2008年には1.94~4.58尾/m²まで増加した。さらに, 設置後1.5年経過した2009年時には4.81~9.11尾/m²となり, 年を追う毎に増加する傾向を示した。

このような経年的な増加傾向は, 水制設置区以外の場所でも同様にみられる点から, 気象等の河川全体に及ぶ環境条件の変化に起因した可能性が高い。特に, 2009年では両側回遊魚であるアユがそれ以前に比べ大きく増加しており, この原因は海域から河川内への遡上数の増加と考えるべきである。したがって, 海域も含めた広範囲な環境条件の年変動が関与しているのは間違いない。

水制設置による変化に着目すると, 施工後半年の2008年夏季において, 施工区での生息密度が地点中最大を示し, 水制周辺への魚類の蝟集傾向が確認できる。中でも水制頭部域でのアユと水制域でのアマゴの生息密度が周

辺に比べ顕著に高いことがわかる。これらは水制設置による効果と考えてよい。特に, アマゴの水制域への蝟集は後述する水制周辺での湧水現象と密接な関連が認められた。これら蝟集個体は全長約12cmで, 計30尾程が水制域の中でも上流側水制の根部で2m²程の狭い範囲に集結していた(写真-3)。この際の水温を計測すると, 水制域外の水温が27.3℃であったのに対し, 水制根部では21.7℃であり, 水制域内に湧出した冷水塊にアマゴが集合していたと判断できる。この年の夏季は連日気温30℃を越す真夏日が続いたため, 水深の浅い瀬が長く続く当区間では特異的に水温が上昇したと推察される。その条件下で水制域内に形成された冷水域は, 年間通じて水温20℃以下の溪流域に生息するとされるアマゴ⁹⁾が, 辛うじて生存できる貴重な水域であったと考えられる。

一方, 気温が平年値と大差なかった2009年では, アマゴの集合現象は認められなかった(図-6)。しかし, 当年においても施工区の生息密度は上流のF1(淵)の密度と大差なく, 魚種構成もカワムツやアユが相対的に豊富な点で両者はよく類似していた。したがって, 水制設置によって淵特有の生息環境が成立したと評価できる。中でも, 2009年では淵の緩流部等を好むカワムツの生息密度が水制域で2008年に比べ顕著に増大しており, 水制域の環境条件が変化しつつある状況が確認できる。

以上のように, 水制設置によってその前面に多様な水深と河床材料構成, および緩流域が形成された結果, 魚類相が明らかに変化し, 目標とした自然に近い淵としての環境機能が復元されたと判断できる。加えて, 水制間の静穏域には想定外の湧水が滞留し, 高水温下の溪流魚にとって貴重な冷水域が創出, 維持されていた。当現象は復元された淵としての環境機能をさらに向上させたと評価できよう。

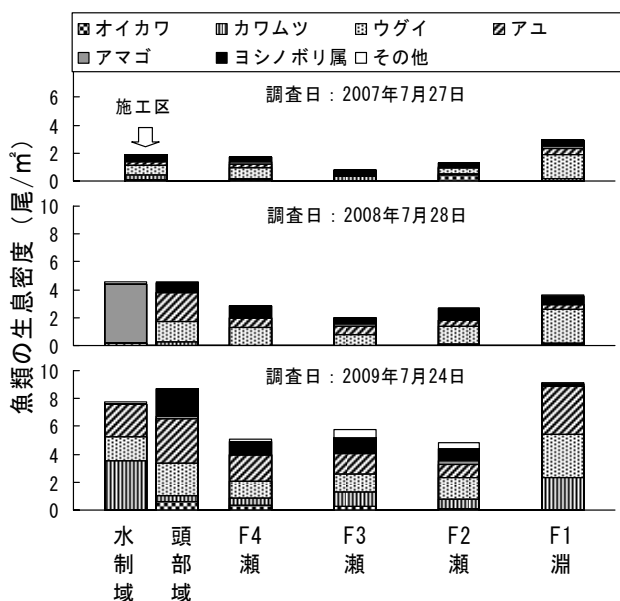


図-6 各調査地点における魚類の生息密度

(2) 水制周辺での湧水現象

前節で確認された水制域内での湧水現象の詳細を把握するため, 以下の調査を実施した。

a) 調査時期と方法

水制設置区周辺での伏流水の湧出状況を把握するため, 調査は湧水と河川水の水温差が明瞭となる冬季(2009年1月3日)と夏季(2009年7月24日)にそれぞれ実施した。水温測定は水制設置区周辺のほぼ全域の水温分布が把握



写真-3 2008年夏季に確認された水制域内でのアマゴの集合現象

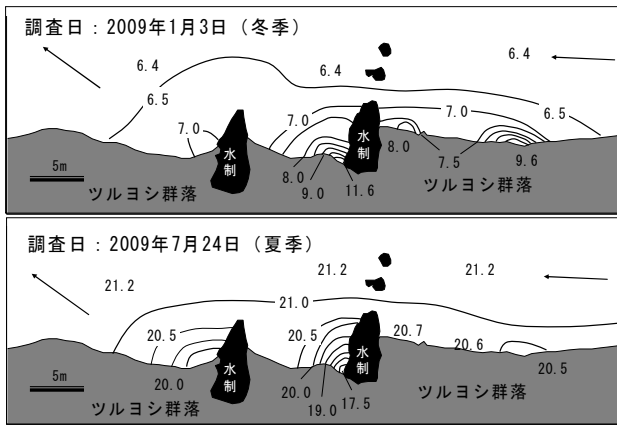


図-7 水制設置区周辺における2009年冬季と夏季の水温(図中数値)の分布状況

できるよう、範囲内に任意設定した30箇所程度で実施し、測定値を平面図上に記録した。測定は全て底層水温とした。なお、冬季調査時には潜水目視観察により水制周辺における魚類の分布概要を補足的に把握した。

b) 水制設置区周辺における水温分布

水温の測定結果に基づき、水制設置区周辺における2009年冬季と夏季の水温状態を図-7に整理した。その結果、上流側水制の根部から、冬季は周辺より5°C以上暖かい湧水があり、夏季には前年のアマゴの集合現象時と同様、冷水の湧出が維持されている状況が確認された。

一方、この水制域上流の瀬でも、堆積土砂の水際から水温差のある湧水が観測されたが、前面の速い流れに攪拌されてその温度差は相対的に小さく、しかもその水域は手の平ほどもない範囲に限られていた。なお、冬季にカワムツやウグイの稚魚が水制周辺の湧水箇所へ蟄集している状況が確認された。低水温期に湧水現象により水制域内に形成された温水帯が、周辺に生息する主要な魚類の越冬場所として利用されていたと評価できる。

以上のことから、河岸の厚い砂礫堆積層に水制根部を貫入した結果、ここでの伏流水の湧出量は他の湧出箇所よりも多くなり、かつその水温差のある湧水は、水制域に形成される静穏な緩流域で攪拌されず、相対的に長時間、広範囲に滞留していると推察できる。水制設置による伏流水の湧出誘導とその滞留効果も、環境機能の向上に大きく寄与する役割の一つとして指摘できる。

6. まとめ

山地河川の直線化された河道で、わずかに屈折した場所に二つの異なる形状の水制を設置して、自然に近い淵の構造を復元した。工事完成後、多くの出水を経験したが、河床に過洗掘や自然河岸への攪乱は見られず、治水機能は発揮されていたと判断できる。また、当初に計画した淵の形状と環境は維持され、蟄集した魚類の種類や生息密度も、天然の淵と同様の成果が得られた。さらに、

結果的に得られた伏流水の湧出と水制域への滞留効果は、生物の多様性を高める上で効果は大きいものと判断する。得られた成果を以下にまとめる。

a) 水制により河道の湾曲部に淵を形成しつつ治水上の安全を図るには、洪水時の岸に強く当る流れを想定して設置場所を選定し、以下のような河床・河岸形態を維持する水制の構造(形状と規模)を選ぶことが有効である。

- ・ 淵頭から淵の最深部にかけては侵食作用を許容範囲で受け入れて、水深を深く維持する水制として、流れの抵抗を大きくする頭部勾配が急な構造とする。
- ・ 最深部から淵尻にかけては、洪水のピークが過ぎた後、堆積が起きることを妨げない水制で、流れの抵抗がより少ない頭部勾配の緩やかな構造とする。
- ・ 水制頭部の先端で流速を高めて、深い水深を維持して生物スケールの流れの多様性を高めるには、水制頭部の近くに置き石を設置すると効果がある。

b) 伏流水の在る河岸堆積物や砂州があり、これに空石積みみの水制根部を貫入させると、四季を通して恒温水が湧出し滞留する水域づくりに有効で、地球温暖化で河川水の水温上昇が懸念される今日、この水制の機能は生物多様性を保持するうえで有効である。なお、この伏流水を持続的に維持することは、今後の研究課題としたい。

謝辞：本事業は馬路村役場、馬路村農業協同組合が発案し、実施に当っては高知県安芸土木事務所の認可を受け、工事は上記二者のほか、岩城組、石工頭領の小松総一氏、西日本科学技術研究所が参加し、事後調査に西日本科学技術研究所の平賀洋之氏・小松豊氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) イヴァン・ニキティン、「水制の理論と計算」—近自然河川工法の発想を助けるために—、信山社サイテック、1995。
- 2) 国土交通省九州地方整備局河川部、「低水水制の設計参考資料(二次案)」、1997。
- 3) 建設省河川局監修・社団法人日本河川協会編、「建設省河川砂防技術基準(案)同解説/設計編[Ⅰ]」、山海堂、pp.44-48、2005。
- 4) 山本晃一、「護岸・水制の計画・設計」—一歩先そして一歩手前—、山海堂、1996。
- 5) 福岡捷二、高橋晃、渡邊明英、「水衝部対策工としての水制工の新しい配置法」、土木技術資料、第31巻、第12号、pp.38-43、1988。
- 6) 社団法人農山漁村文化協会刊、「川除仕様帳」、日本農書全集、第65巻 開発と保全2、pp.10-12、1997。
- 7) 福留脩文：水と緑の生態学的保全・復元について—鳥居川を事例として—、全国治水砂防協会主催「第4回緑のゼミナール」テキスト、2000。
- 8) 川那部浩哉・宮地伝三郎・森主一・原田英司・水原洋城・大串竜一：遡上アユの生態—とくに淵におけるアユの生活様式について—、京大生理生態業績、79、pp.1-37、1956。
- 9) 中野繁、田口茂男、柴田勇治、古川哲夫：サツキマス・アマゴ、川那部浩哉、水野信彦編、日本の淡水魚、pp.169-178、山と溪谷社、1989。