

落差工下に形成される淵の魚類生息場特性

CHARACTERISTIC OF FISH HABITAT IN A POOL FORMED IN FRONT OF A DROP STRUCTURE

知花武佳¹・三重野貴之²・辻本哲郎³

Takeyoshi CHIBANA, Takayuki MIENO and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 講師 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²非会員 ジェイアール東日本情報システム (〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-2-2)

³正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 客員教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

It has been pointed out that the degradation of pools in a river has decreased the number of fishes. Especially in a small stream, many kinds of river works made the river course monotonous, and then deep pools can not exist. On the other hand, there is a scour hole only in front of the drop structure. However, it has not been clarified whether such kind of artificially created pool is a good habitat for fishes or not. Therefore, the characteristics of fish habitat in a pool formed in front of the drop structure were investigated. As a result, it was clarified that Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) preferred the area where the environmental gradient was high in a pool, but they did not stay in the center of a pool due to the circulation flow. After the field measurements, hydraulic experiments were also conducted in order to examine the countermeasure to control flow structure in a pool. Through this research, it is considered very difficult to adjust the flow condition in a pool and the best way to create fish habitat is to change the shape of drop structures.

Key Words : pool, drop structure, environmental gradient, fish, circulation flow

1. はじめに

河川における淵は、一部の魚類の生息場として機能するだけでなく、休息場、出水・渇水時の避難場、天敵からの避難場、越冬の場として、大半の魚に利用されている¹⁾。

しかし近年は、多くの淵が浅くなったり消失したりする傾向にあり、それに伴う魚類数の減少が指摘されている²⁾。特に中小河川では、固定堰や落差工と言った横断工作物が多く、これらに起因する河床形状の単調化が起因していることも多い²⁾。

ところが、このような横断工作物の下流は洗掘されやすいため、いわゆるS型の淵¹⁾が形成される。こうして形成された淵を観察すると、その水深は極めて深いことも多く、多数の魚類が生息している様にも見える。しかし、構造物下流に、言わば人工的に形成された淵に、自然に形成される淵に相等する生息場としての機能があるのか否かについては、未だ十分には調べられていない。

また、例えば落差工の本来の目的は、河床を安定させ、河川の縦断および横断形状を維持することであり、構造物下流の洗掘は好ましいことではないため、単に淵が形成されれば良いというものでもない。実際、落差工の下部が洗掘されることで、本来の機能が損なわれている事

例や、構造物自体が破損・変形した事例も見られたため、生息場としての機能を有しつつも、安全性は確保できる構造物を新たに設計する必要がある。

そこでまずは、魚類が横断工作物下にできる淵の中でどのような環境を選好しているかを理解することから始める。その際に、まず魚類生息環境評価モデルPHABSIM³⁾を用いて場を評価した後に、評価結果と実際の魚類分布の差異に注目し、水深や流速といった因子の他に生息環境を左右している条件が何かを検討する。次に、現地観測からは把握しきれない状況は水理実験により把握する。これらの結果を踏まえ、良好な魚類生息場を担保できる落差工を作るにはどの様にすればよいかについて考察し、横断工作物の多い中小河川で良好な淵を形成させる方法について検討する。

2. 現地観測の概要・結果

落差工下に形成される淵における魚類の生息状況を調査するため、現地観測を行った。対象としたのは多摩川支流の平井川(流域面積38.9km²)で、平水流量は0.5m³/sにも満たない小規模な都市河川である。この川には非常に多くの落差工が見られるが、落差工の工法や蛇行部との位置関係は様々である。そこで、蛇行部に位置

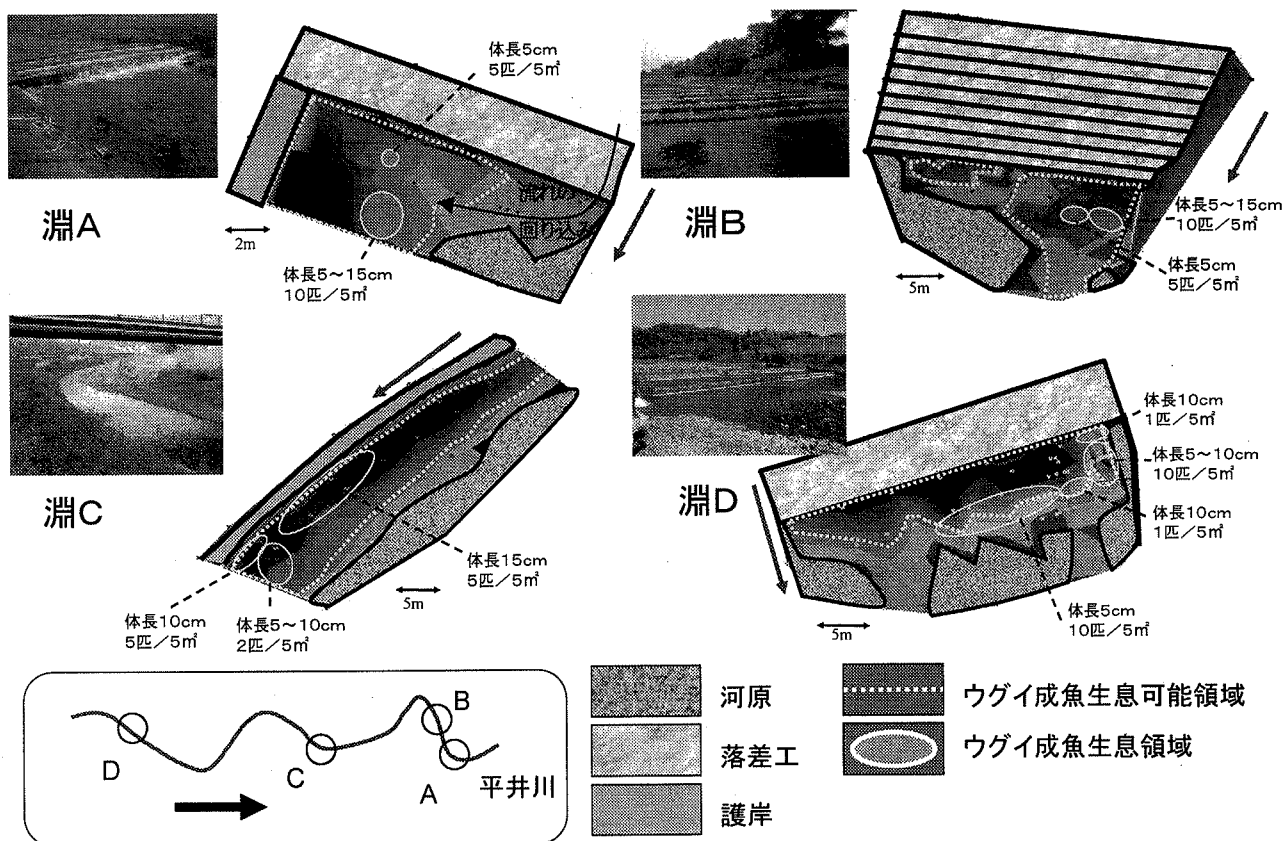


図-1 各観測地点の概要とウグイ成魚の分布

する落差工下に形成される淵（淵A），蛇行部よりやや下流の多段式落差工下の淵（淵B），直線部の落差工下の淵（淵D）を対象として研究を進める。さらに，比較のため，湾曲部に形成された淵（淵C）も対象とし，計4地点を選択した（図-1）。ただし，観測地Cの淵は湾曲部の淵ではあるものの，護岸及び根固めの影響で，淵は一定水深のまま長く下流に続いており，明瞭な淵尻は存在しない⁴⁾。

調査は2004年11月に実施した。調査内容は，測量・流速計測・水温計測・底質調査・魚類目視調査であり，淵を約5mのメッシュ状に区切り，その交点で計測を行った。対象魚はウグイとし，体長5cm以上を成魚，それ以下を幼魚として目視により観測点周り約5m²の範囲に存在する個体数を記録した。

その結果，ウグイの成魚に関しては，どの地点においても密度に大きな差が見られず，10cm大のウグイが15匹/5m²程度生息している群れが存在した（図-1）。しかし，落差工下の淵では生息魚種の大半がウグイであったのに対し，自然に形成された淵では，オイカワ，カワムツ，フナ，シマドジョウが確認され，種類数及び全魚種の総数にはかなりの差が見られた。

またウグイ成魚の分布に注目すると，湾曲部の淵Cでは最深部の河岸沿いで最も多かったものの，落差工下の淵B，Dでは淵尻の斜面付近を中心に特に河岸沿いに多かった。しかし，落差工の淵Aでは落差工左岸側を迂回した流れが露出した岩盤の上を流れ，淵へ流れ込んでお

り，この流れ込みの所で魚類が多く生息していた。

一方，幼魚に注目すると，落差工下の淵B，Dでは淵脇に形成される浅瀬を中心に幼魚が見られ，湾曲部の淵Cでは淵対岸の浅瀬で多く見られた。しかし，落差工下の淵Aでは，淵最深部に幼魚が多く，他の地点とは逆の傾向を示した。

このように，淵によってウグイの分布パターンが異なっていた理由について考察していく。

3. 落差工下の淵におけるウグイの生息場特性

魚類の生息条件を捉える際には，水深や流速と言ったある一点の状況のみならず，それらの変化率や空間的な広がり方など，より大きなスケールからも環境を捉える必要がある⁵⁾。特に今回のような比較では，対象はどれも淵であり，水深や流速のオーダーはほぼ等しいため，マクロなスケールでみた環境が生息環境の違いを規定していると考えられる。そこで，魚類生息環境評価法PHABSIMを用いることで，あらかじめ水深や流速が不適切でウグイが棲めないと考えられる場を対象から除外した上で，ウグイの成魚がどこを選好・忌避していたかについて解析を行う。PHABSIMは水深・流速・底質・水温などの物理環境因子に対するある対象魚の適性基準を設定し，その得点を掛け合わせることで魚の棲みやすさを評価する手法である。簡単で使いやすい反面，そこ

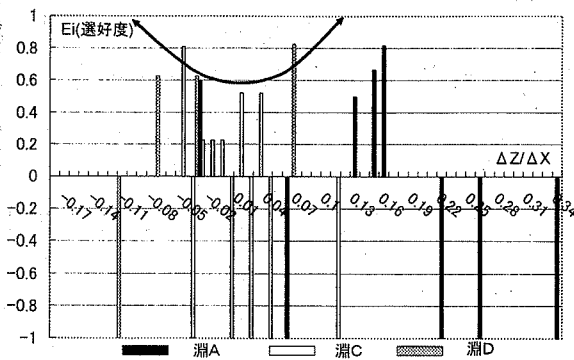


図-2 流下方向河床勾配に対するウグイの選好度

から求まるのはあくまでも生息可能範囲に過ぎず、選好条件までをこれら個々の物理環境因子だけで表現することはできない。そこで本研究では、このモデルを生息不可能領域の特定に用いる。

ウグイの適性基準としては、水深、流速に関しては知花ら³⁾のものを、底質、水温に関しては中村³⁾のものを、用いた。しかし、時期的にウグイの活性が落ちている³⁾ことも考えると、結果として水深のみが制限因子であると考えられ、30cm以上の領域すべてが生息可能であると判断した。この生息可能な領域を図-1中、破線で示してある。この図より、適性基準から導き出した生息可能範囲はかなり広く、その中で選好されている場所と忌避されている場所が存在する様子が見て取れる。

まず、水深や流速と言った条件以外に、水深変化率、及び流速変化率が重要であると考えた。ただし、流速変化は計算方法によって大きく変化する不安定な指標であるため、水深変化についてのみ検討する。この水深変化率に対する選好性、忌避性を分析する際には、次式(1)で表されるIvlevの餌選択指数を用いた⁶⁾。

$$E_i = \frac{(U_i - A_i)}{(U_i + A_i)} \quad (1)$$

ここで、 E_i : i という環境に対する魚の選好度、 U_i : i という環境下に生息していた個体数が全個体数に占める割合、 A_i : i という環境が対象区間内で占めている面積比率である。この値は-1~1の範囲で変動し、

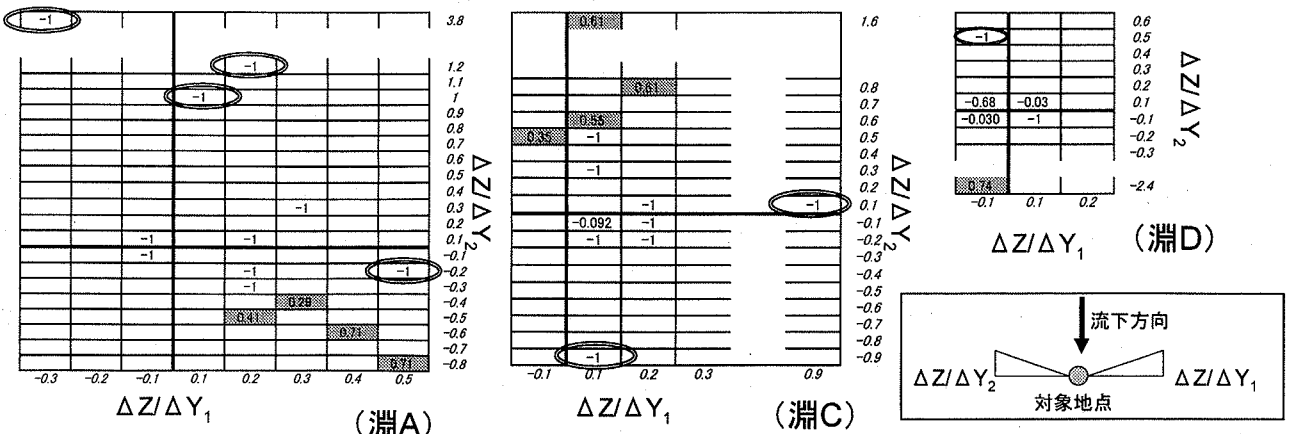


図-4 横断方向の河床変化率とウグイの選好度の関係 (灰色が選好されている領域)

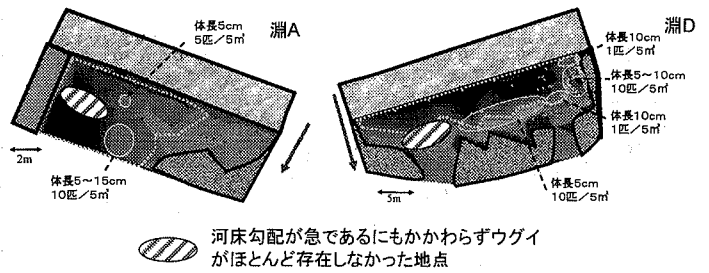
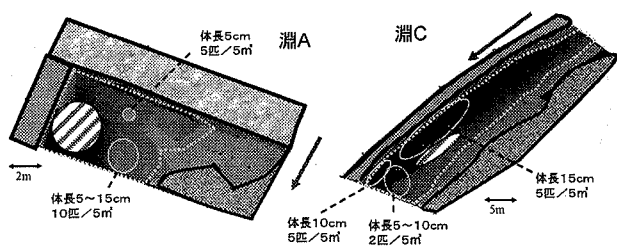


図-3 生息可能でかつ縦断方向の河床勾配が急であるのにウグイの選好度が低かった場所

選好すれば正の値、忌避すれば負の値となる特徴がある。

また、水深変化率を表すものとして、対象とする観測点から上流向き約5mの河床勾配 $\Delta Z/\Delta X$ を用いることとする。なお、観測点の水深がその上流よりも深くなる際に値が正となるよう符号を設定した。この指標を用いて、流下方向の河床勾配に対するウグイの選好度を示したものが図-2である。ただし、観測データが不十分であった淵Bは除去している。図-2に見られるおおよその傾向として、正負共に縦断方向の勾配が大きいほど、選好度が高い傾向にあることがわかる。しかし、淵Aでは、下流に向かってかなり深くなる区間 ($\Delta Z/\Delta X > 2.0$) が、ウグイに忌避されている様子が見て取れる。一方、淵Dでも、下流に向かって浅くなっている区間 ($\Delta Z/\Delta X = -0.1$) で忌避傾向が見られる。これら忌避されている領域を示したものが図-3である。これらの場所は、淵頭や淵尻ではあるが、流れの中心ではない。また、落差工直下に関しては、河床勾配を求めることはできなかったものの、変化が最も大きい領域である。しかし、落差工直下でウグイが選好する地点は全くなかった。

次に、同様の解析を横断方向の河床勾配についても行う。ここで、観測地点の河床高をその左岸側のものと比べて求めた河床勾配をX軸に、右岸側のものから求めたものをY軸にとったグラフ上にウグイの選好度を示したものが図-4である。共に、観測地点の方が左右岸より深い場合に、値は正となる。よって、図-4で原点から遠い点ほど、横断方向の勾配が急であることを示している。ここからもわかるように、横断方向にも勾配がついてい



河床勾配が急であるにもかかわらずウグイがほとんど存在しなかった地点

図-5 生息可能でかつ横断方向の河床勾配が急であるのにウグイの選好度が低かった場所（図-4中の楕円で囲んだポイントはすべてこの範囲内にある。）

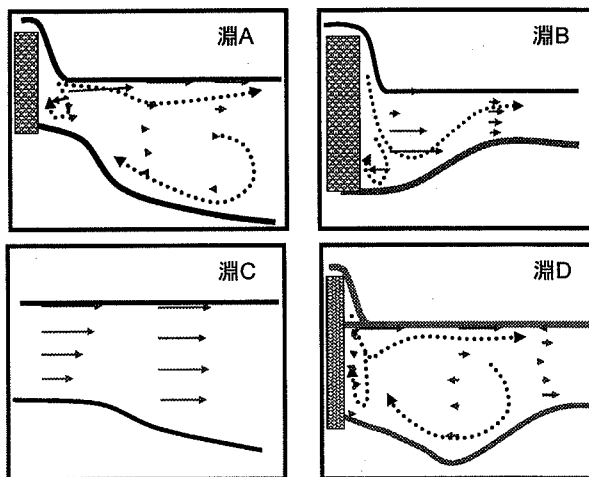
るほど、ウグイの選好度は高くなる傾向が見られる。しかし、図-4中楕円で囲んだポイントのように、横断方向に勾配がついていても、ウグイに忌避される領域が存在する。これらの位置を示したものが図-5である。まず、淵Aに関しては、先程図-3で示したのとはほぼ同じ場所である。すなわち、この地点は縦横断に変化する地点であるにもかかわらず、ウグイには利用されていない。また、淵Cにおける忌避の理由は、はっきりとはわからないものの、この忌避領域は自然の傾斜ではなく、壊れたふとん簞が沈んでいるためについた局所的な段差であるという点で他と異なっている。また、水深も40cm以下であり、近くより深い淵を利用しているとも考えられる。淵Dの結果は図には示していないが、淵Dで勾配が急であるにもかかわらず利用されていなかった点は、落差工の直下であった。

このように、縦断方向についても横断方向についても、ウグイは河床勾配の変化する領域を利用する傾向にある。これは、流下物食の魚類が底層付近に定位しつつ、多くの流下物を含む速い流れの中で採餌をするという既往の研究結果⁷⁾とも対応する。とはいえ、河床に傾斜があっても、落差工の直下や主流部から外れた淵頭・淵尻は、ほとんどウグイに利用されていない傾向が見られた。そこで、淵内部の鉛直二次元的な流れに注目し、ウグイの利用度が低い原因について検討する。

4. 落差工下流の淵に見られる流速分布

図-6は現地で計測された流速分布とそこから想定される流れの構造を模式的に示したものである。流速の計測は各横断面の最深部を結ぶ線に沿って、縦断方向二、三点で行い、それぞれ二割、四割、六割、八割の各水深で計測した。

まず図-6より、淵A、B、Dの落差工直下では、落ち込みに伴い、小規模で上下に長い循環が生じている様子が見て取れる。このような領域は空気混入率も高く、流れが乱れているのが特徴である。このような落差工直下が利用されない理由としては、魚類は遡上するために水



→ 実測の流速(50cm/s) 想定される循環流

図-6 それぞれの淵における縦断面流速分布

の流れに逆らって進む性質を持っているため、このような場では方向感覚を失ってしまうことが考えられる⁸⁾。

また、淵A、Dでは、淵表層部のみ強い流れが生じており、底層部では流速10cm/s以下の弱い循環流が生じている。これらの淵の河床にはデトリタスの堆積が目立ち、ウグイのみならず底生魚もほとんど見られなかった。このように、深い淵であっても流れのほとんど無い場が忌避される傾向にあることは、すでに指摘されてきており¹⁹⁾、今回もその傾向が見られた。

図-6に示した淵Aの縦断面図中、弱い循環流が見られる淵中央部は、ウグイの稚魚に利用されるものの、成魚には忌避される様子が確認された。その他の淵では淵脇の浅瀬を稚魚が利用し、成魚が深みを利用するにも関わらず、この淵だけ逆になった理由として、図-1にも示したとおり、落差工を迂回した流れが浅瀬に流れ込んでいたため、浅瀬で1m/s近い流速が生じており、稚魚が唯一流速の遅い淵中央へと移動し、逆に成魚は流れに変化のある浅瀬側へと移動したことが考えられる。

一方淵Bに関しては、逆に底層付近に速い流れが生じている。これは、魚類の遡上に配慮し、多段式落差工の天端の一部が少し切り下げられており、流れが滞筋に集中し単位幅流量が増加しているためである。さらに、多段式落差工では下流部の洗掘深が浅く、水深が淵A、Dに比べ浅いのもその原因である。ここで、図-1を見てもわかるとおり、淵Bでも淵中央部は利用されておらず、淵尻付近に群れが見られる。すなわち、底層付近が速い流れというのあまり選好されないものと考えられる。

さらに図-6に示した淵Dの縦断面図中、淵尻付近がウグイの利用場所に該当するが、同じ淵尻でもウグイが忌避していた場所の流速は図-6のDよりも遅く、流速変化に乏しかったのが忌避の原因であると考えられる。

表-1 実験流量より換算した現地流量 (単位 m^3/s)

	Case A	Case B
淵A	6.0	2.4
淵B	2.2	0.9
淵D	9.1	3.6

5. 流量増加時に見られる流速分布

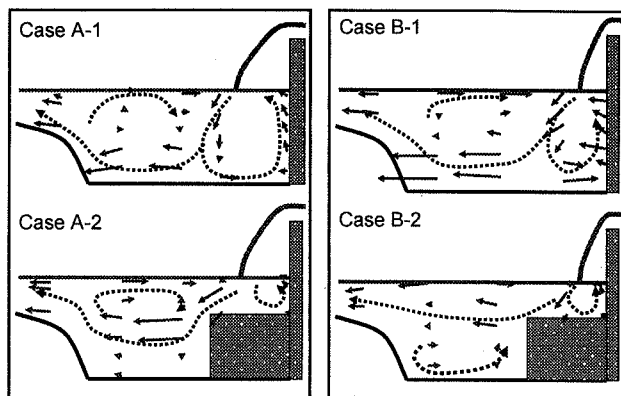
これまで見てきたとおり、落差工下の淵では流れが分散し、淵の水深の割に単位幅流量が少なくなるため、表層付近にしか流れが生じない。この場合、河床にはデトリタスの堆積が見られ、魚類にとって好適な環境とはならない。しかし、淵Bのように、淵の水深に比して流量が多い場合にも、越流した流れは淵に真上から入り込むため、底層付近に速い流れが生じ、やはり魚類の選好度が低い様子が見て取れた。そこで、もし越流幅を狭めるなどして、単位幅流量を増やすことができたとして、淵の形状に工夫することで、魚類に好適な環境を作ることができるのか否かについて検討するため、簡単な水理実験を行った。

実験には、越流部の幅が1.7mの固定堰を用い、流量として $0.05\text{m}^3/\text{s}$ (Case A)と $0.017\text{m}^3/\text{s}$ (Case B)の2パターンを与えた。これらをFr相似則に従い、現状の落差工で同じ流況をもたらすと考えられる流量に換算した場合、表-1のようになる。この様に同じ河川であっても、落差工越流部の幅によって、同じ流況を生む流量がかなり異なっており、越流部の幅が重要であることがわかる。なおこれらの流量は、平井川では年一回程度は起こる規模であり、増水時の状況を表しているとも見ることができ、越流幅を狭めた場合の平水時の状況と考えることもできる。

実験は、水量に加えて川底の形状の違いによる流れの違いを見るために、落差工直下が深掘れしている場合 (Case 1)と落差工下部に護床工が設置されており、その下流が洗掘される場合¹⁰⁾ (Case 2)の2ケースを想定した。

これら (Case A-1,2) 及び (Case B-1,2) の計4パターンにおいて実験を行った結果を図-7に示す。まず、護床工が無く流量の大きなCase A-1について見れば、底層付近に速い流れが見られ、表層付近では逆流している様子が見て取れる。ここから、流量を減らしたCase B-1に関しても、落差工直下の循環流がやや弱まるものの、やはり二つの循環が見られる。これらは、淵Bにおいて観測された状況と一致している。しかし、ここから流量を低下させると、すぐにこれまで見てきた淵AやDのような流速分布となるため、結局底層の流速は極めて速いか、流れないかのいずれかになりやすく、適度な流速を生じさせる流量というのは限られている。

一方、護床工の下部が洗掘されたCase A-2の状況につ



← 実測の流速 (50cm/s) ←..... 想定される循環流

図-7 実験より得られた落差工下部の流速分布

いて見る。Case A-2では、越流した水が護床工の下流端部でたたきつけられ、適度にエネルギーを失い、その下流の淵では、中層付近に強い流れが生じることで、自然な流況に近づいている様子が見て取れる。しかしながら、流量が減少しCase B-2の様な状況になると、越流した流れは一度護床工にたたきつけられ、そこから表層だけを下流方向へ流れていく。そのため、護床工下流部の底層では、ほとんど流れのない弱い循環流が生じ、結局淵AやDの状況と類似した環境が見られる。

このように、越流してきた流れを護床工で適度に弱めることで、淵内部に適度な流速を生じさせられるが、そのために必要な護床工の長さは流量によって異なるため、調整は難しい。

6. 落差工下流の淵の生息場としての可能性

ここまで見てきたとおり、落差工下流部に形成された淵では、護床工があろうと無かろうと、魚類にとって最適な流速を形成する流量が極めて限られており、幅広い流量に対応するのが極めて困難であることがわかった。

このような淵において、底層付近が遅くそこから水面に向かってなだらかに流速が増加する図-6の淵Cの様な流速分布は、淵尻から下流で徐々に見られるようになる (図-6及び図-7参照)。それ故に、今回確認された多くのウグイは傾斜がついていても淵頭や淵中央部を利用することなく、適度に流れのある淵尻付近に多かったと考えられる。唯一魚が群れていた淵Aの淵頭は、迂回した流れが岩盤の上を越流し、ゆるやかに淵へ注ぎ込むところであることもこれを裏付けている (図-1参照)。

よって、このような落差工下流部の淵を生息場として活用することを考えるには、落差工を越流した流れを、垂直に淵へ落とし込むのではなく、緩やかな勾配をもった斜面を越流させて、淵へ落とすことが重要であると考えられる。勾配が緩やかであれば、流量が大きいときも小さいときも、淵の底層付近が速すぎたり遅すぎたりする現象はかなり抑えられる。これは、自然に形成される

瀬淵の形状に近いことから理解できる。落差工を迂回した流れが横から落ち込む淵Aの淵頭は、湾曲部であっても地形変化の小さい淵Cの淵頭以上によく利用されていたが、このように河川中流域の淵で、淵頭をウグイが選好する現象はかつてより多く報告されている¹⁷⁾⁹⁾。

また、落差工及びその下流の淵は横断方向に長く、流れが横断方向に分散するため、単位幅流量はかなり小さくなりがちである。そこで、平水時にも流れが分散せず、淵全体に行き渡るには、流下方向に長い淵と本来の目的に影響が出ない程度に天端の一部を切り下げたものが望ましい。

このように考えると、図-8のような湾曲斜め堰の形状が最適なものの1つであると考えられる。低水時は水が一箇所に集まり、緩やかに淵へと注ぎ込んでいるが、増水時は堰全体を越流するため、淵の底層に高流速が生じることもないと考えられる。また、この湾曲斜め堰も自然に形成される砂礫堆の形状そのものであるが故に¹¹⁾、下流に形成される淵の形状は自然な淵に類似し、横断方向よりも縦断方向に長い淵を形成できるものと考えられ、形状も理想的である。この他、施工の容易さや出水時の強度の面からも湾曲斜め堰には多くの利点があることが三輪¹¹⁾の研究によっても明らかとなっている。この湾曲斜め堰下流に形成される淵の特性についても今後検討する必要があると思われる。

ここまで落差工下流に形成される淵内部の構造に焦点を当てて議論を進めてきた。しかし、その上流が早瀬でないということは、自然の淵との最も大きな違いである。通常早瀬と淵はセットで存在するものであり、魚は瀬と淵を行き来したり、早瀬から流下してくる剥離した付着藻類や底生昆虫を餌としたりするのが一般的である¹⁷⁾。上述した様に、淵Cでのみ魚類の多様性が保たれている背景には、上流の早瀬の存在も理由の1つであると考えられ、落差工下の淵が完全に自然の淵の役割を担えるわけではないことに注意が必要である。

7. まとめ

本研究より以下の点が明らかとなった。

- ・ウグイは、生息可能な水深、流速が保たれた環境では、河床勾配の急な、変化のある環境を選好する。
- ・落差工直下は、流れが乱れ上下方向の循環流が生じるため、魚には利用されない。
- ・落差工下流の淵では、表層付近だけを水が流れ、底層付近は流れが無くデトリタスの堆積が目立つことも多い。また、流量が大きいときは底層付近に速い流れが生じ、いずれにせよ魚類に利用されない。結果として、適度に流れのある淵尻付近に利用が限られる。
- ・護床工の存在は、生息環境に有利に働くこともあるが、不利に働くこともある。

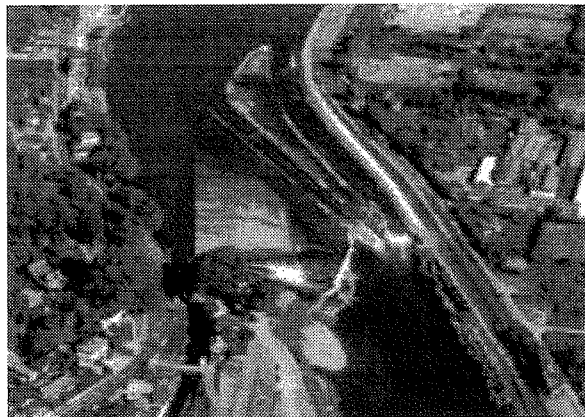


図-8 湾曲斜め堰の例 (筑後川山田堰)

(国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所ホームページより引用)

・落差工下流の淵で魚類にとって好適な流速分布を形成するのは非常に難しい。ただし、越流部をなだらかにし、縦に長い淵が形成されれば、好適な環境を創出できる可能性がある。

参考文献

- 1) 沼田真, 水野信彦, 御勢久右衛門: 河川の生態学, 築地書館, 1995.
- 2) 田中倫之・知花武佳・辻本哲郎: 秋川における瀬-淵の変質パターンの解明〜漁業関係者の認識を通して〜 河川技術論文集vol.9, pp427-432, 2003.
- 3) アメリカ合衆国内務省/国立生物研究所 原著, 中村俊六, テリーワッドル訳: IFIM入門, 財団法人 リバーフロント整備センター, 1999.
- 4) 知花武佳, 佐々木学, 辻本哲郎: 交互砂州が形成された河道に生じる水際環境に関する研究, 第7回応用生態工学会研究発表会講演集, pp.231-234, 2003.
- 5) 知花武佳・辻本哲郎・玉井信行: 物理環境の階層構造を考慮した魚類生息場評価法の開発 水工学論文集, 第46巻, pp1145-1150, 2004.
- 6) 佐原雄二: 魚の採餌行動, 東京大学出版会, 1993.
- 7) Tetsuo Furukawa-Tanaka: Optimal Feeding Position for Stream Fishes in Relation to Invertebrate Drift, Humans and Nature, No.1 pp63-81, 1992.
- 8) 中村俊六: 魚道のはなし, 財団法人リバーフロント整備センター
- 9) 知花武佳, 玉井信行: 瀬-淵の質に着目した生息環境評価法の提案, 河川技術に関する論文集vol.8, pp79-84, 2002.
- 10) 川口広司, 諏訪義雄, 高田保彦, 末次忠司: 護床工下の河床材料の抜けだし及び下流跳水の非定常性と護床工の応答特性, 河川技術論文集vol.8, pp243-248, 2002.
- 11) 三輪式: 砂レキ堆形成からみたわん曲斜めゼキの合法則性, 農業土木学会論文集第76号, pp61-66, 1978.

(2005. 4. 7 受付)