

河岸が淵-平瀬区間の底質構造に及ぼす影響とその形成メカニズム

IMPACT OF RIVER BANK STRUCTURE ON SUBSTRATE CONDITIONS IN POOL-RUN SEQUENCE AND ITS FORMING MECHANISM

生川寛之¹・知花武佳²・山下貴美子³

Hiroyuki IKUKAWA, Takeyoshi CHIBANA and Kimiko YAMASHITA

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8685 東京都文京区本郷7-3-1)

²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 (〒113-8685 東京都文京区本郷7-3-1)

³学生会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8685 東京都文京区本郷7-3-1)

Pool, where the depth is considerable and the velocity is moderate, is important for fish. Especially, riverbed materials are used for refuge of aquatic creatures. Riverbed material in run is also important for spawning. However, the forming mechanism of substrate condition in pool-run area has not been clarified yet. Through field measurements, it was clarified that riverbed material structure in pool depends on the river bank structure. Especially, in a scoured pool in front of the foot protection of the bank, cobble bed which is suitable for refuge is formed and gravels and sand deposit at the inner side of cobble. The forming mechanism of this sorting structure is as follows. In flood period cobble, gravel and sand deposit in pool. Then in descending period, when the dry riverbed appears above the water surface, gravel and sand in pool is washed out by the strong secondary flow. This mechanism could be validated by the flume experiment. Moreover, riverbed material structure in run is also affected by the sediment movement in pool. The sorting structure should be preserved by protecting in front of foot protection.

Key Words : Pool-run, fish habitat, riverbed material, river bank, secondary flow

1. はじめに

河川中流域においては早瀬, 淵, 平瀬が連続する瀬-淵構造が発達し, それぞれが生物にとって重要な役割を果たしている. 中でも水深が深く流れの緩やかな淵は, 生息場, 休息場, 越冬場等として多くの魚類に利用されるが, 天敵からの避難の際には河床材料の隙間に逃げ込むこともあり, 淵の底質もまた重要な要素である. また, その下流に続く平瀬の底質も多くの魚類の産卵場等として重要な働きを担っている.

淵は洪水時の水衝部に形成されるため, 護岸整備などの治水対策の影響を強く受けており, 実際に淵の構造はこうした河岸の状況によって大きく異なることが明らかにされている¹⁾. さらに, その下流に続く平瀬の環境に関しても, こうした淵脇の河岸が影響を与えているとの指摘があるが²⁾, いずれの研究もその詳細な形成メカニズムを明らかにするまでは至っていない.

そこで本研究では, 淵-平瀬区間の底質構造を把握するために, 河岸の構造が異なる複数の淵-平瀬区間において現地観測を行い, 観測結果からその形成メカニズム

の仮説を立て, 水路実験により仮説の検証を行った. そして, それらの結果を踏まえて, 魚類に配慮した河岸整備のあり方について考察した.

2. 現地調査

(1) 調査地の概要

荒川水系高麗川と多摩川水系平井川における, 河岸の状況の異なる4箇所の淵-平瀬区間を対象に現地調査を行った. 4箇所の河岸の状況と地形を図-1に示す.

a) 高麗川万年橋下流側

直線的に設置されたコンクリート護岸の根固工が水面上に浮き上がっており, その前面が洗掘されて淵が形成されている. 護岸設置当初は, 河床は根固工より高い位置にあったはずだが, 河床低下により現在の状態に至ったものと考えられる. この構造は治水上問題ではあるが, 全国的に河床低下が起きている現在, このような構造は決して珍しいものではない.

b) 高麗川万年橋上流側

a)の区間の直上流に位置する区間で, 砂礫でできた自

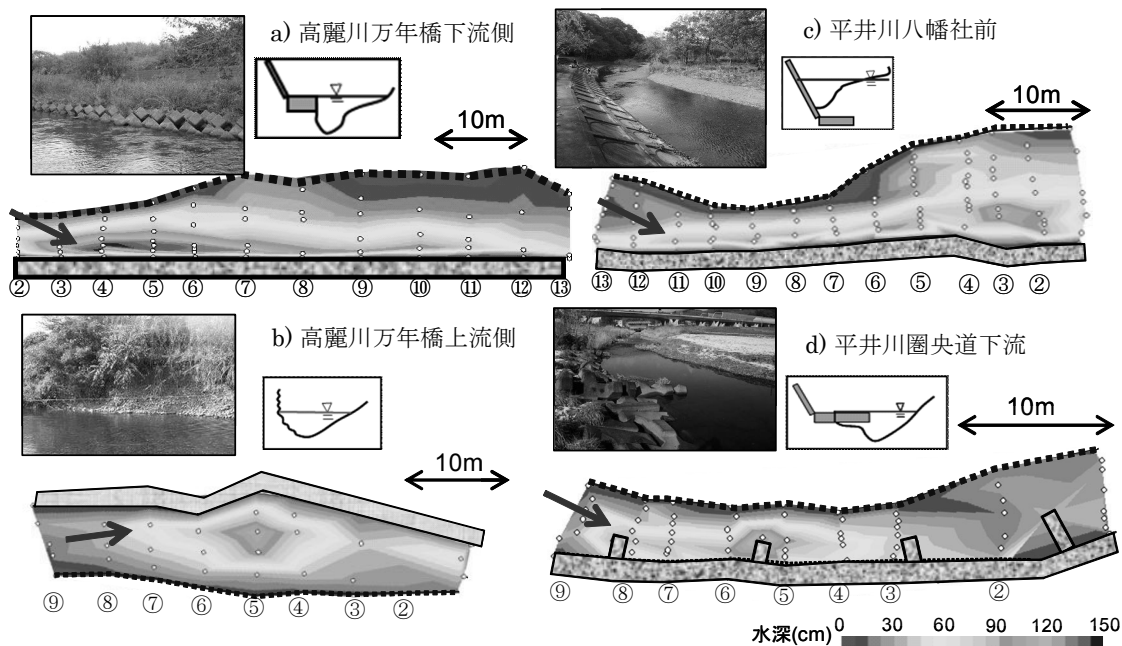


図-1 各調査地の河岸の状況と地形測量結果

然河岸に沿って淵が形成されている。河岸は洪水によって浸食され、線形はやや曲線的である。下流側のa)と比較すると、淵の最深部は低水路の中央寄りであり、河床の縦横断変化は緩やかなのが特徴である。

c) 平井川八幡社前

緩やかに蛇行した河道の根固工が入った護岸沿いに淵が形成されている。a)とは異なり、河床低下は生じておらず、河床は根固工よりも高い位置にある。淵の地形に着目すると、護岸沿いに一定水深の区間が縦断的に長く続いている。これは洪水時に根固工が露出し、流れが減衰しないため、縦断的に長い距離根固めの高さまで洗掘された結果だと考えられる³⁾。

d) 平井川圏央道下流

湾曲部に設置された水制の周りに淵が形成されている。水制は低水路幅の半分程度張り出している。水制周囲が局所的に洗掘れており、淵の規模は小さく、その分下流には平瀬が縦断的に長く形成されている。

(2) 調査項目

地形測量に加えて、流速計測、底質調査、魚類潜水目視調査を行った。底質調査においては、60cm四方の枠の中に、表-1 に示した各粒径範囲の河床材料が十分存在するか否かを目視で判定した。なお、本調査では枠内の面積の2割以上を占めていれば「存在する」と判定している。魚類潜水目視調査では、主な対象魚をウグイとした。1m四方の枠を想定し、1分間にその枠内に定位していたウグイの体長と個体数を記録した。

(3) 調査結果

淵におけるこれらの調査結果を図-2 に示す。図-2 中

表-1 粒径と名称

名称	粒径(mm)
大・巨礫	128～
中・大礫	32～128
粗砂利	8～32
細砂利, 砂	～8

の円グラフは、各測点における河床材料の粒径を示したものである。円が一色の場合はある粒径範囲の河床材料のみで構成されていることを示し、円が数色で分割されている場合は、異なる粒径範囲の河床材料が混在していることを示す。ただし、割合は示していない。なお、これ以降は表-1 の大・巨礫、中・大礫を「礫」、粗砂利を「砂利」、細砂利、砂を「砂」とする。

まず、砂礫でできた自然河岸に形成されるb) 高麗川万年橋上流側の淵では、淵底全体に礫、砂利、砂が混在して堆積していた。また、水制周りに形成されるd) 平井川圏央道下流の淵も、水制周辺の小規模な淵内部に礫、砂利、砂が混在して堆積していた。一方、根固工の入った護岸沿いに形成されるc) 平井川八幡社前の淵では、礫が2割程度存在する点があるものの、その量は他の調査地に比べて少なく、河床が全体的に砂利で覆われているのが特徴である。そして、根固工前面に形成されるa) 高麗川万年橋下流側の淵では、断面④から⑦にかけて右岸側の淵底に砂利や砂がほとんど存在せず、礫が浮石状態で堆積していた。さらに、断面⑥より下流側では礫の堆積場の内岸側には砂利が、砂利の内岸側には砂がそれぞれ帯状に堆積しており、図-3 に示すように境界が非常に明確な分級構造が見られた。こうした明確な分級構造は他の3箇所の調査地では見られなかった。

図-2 には、それぞれの淵の淵頭において計測された、

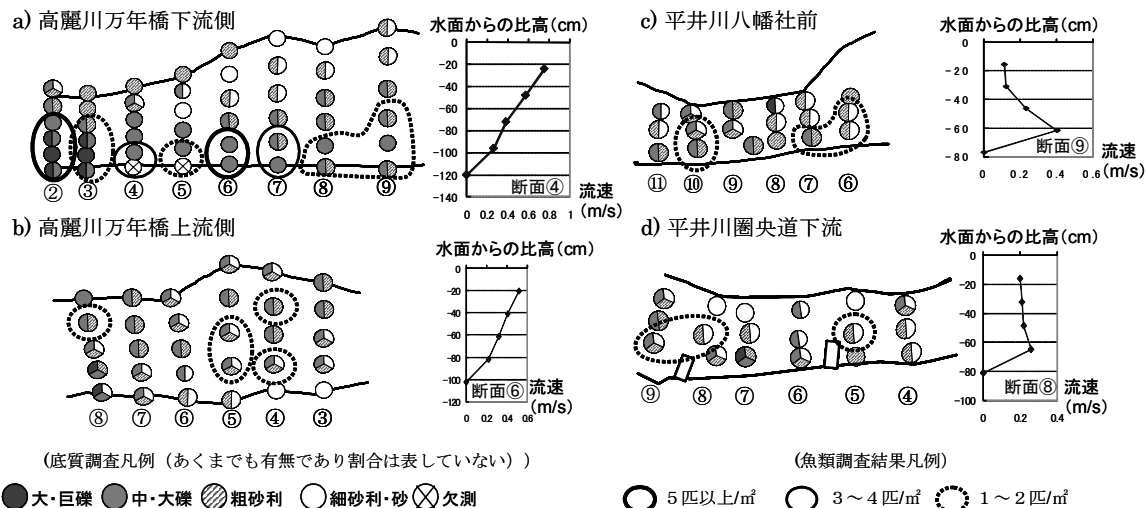


図-2 淵の底質調査結果，流速調査，魚類調査の結果



図-3 礫の堆積場と砂利の堆積場の境界

(すべて流れは左から右. b) のみ淵が左岸側.)

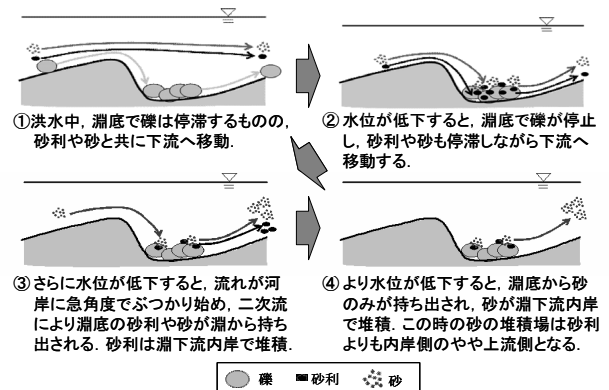


図-4 根固め工前面の淵における分級メカニズム

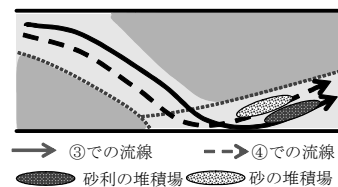


図-5 洪水減水時の主流線の移動

水深方向の流速分布を示してある．高麗川の二箇所では，水面から底面に向かって流速が直線的に減少しており，減速域にあたる淵頭に典型的な流速分布である．一方，平井川の二箇所では，底面付近の方が流速は速く，平水時に二次流が生じていることがわかる．流下物を捕食する魚類にとっては，前者の方が底面付近に定位しエネルギーを消費せずに，流下する餌を多く捉えられる点で有利だと考えられるが，水制があったり，早瀬の位置が河岸に流れを急角度でぶつける位置であったりすると，この様な二次流が発生する．

これら4箇所の調査地において魚類潜水目視調査を行ったところ，分級構造が見られたa) 高麗川万年橋下流側の礫の堆積場においてウグイの個体数が最も多く，最大で9匹/m²が確認された．図-2 で示した地形と淵頭における流速分布をみると，高麗川万年橋の上下流の淵で大きな差はないものの，魚類調査の結果には大きな差があり，魚類が生息する上では底質が重要であることが伺える．また，a) 高麗川万年橋下流側の淵における砂の堆積場では砂地を生息場とするカマツガが観察された上，ここに形成されている砂利の堆積場は魚類の産卵場に適している様にも見受けられる．このように，根固工前面に形成された淵が最も多様な底質を有しており，魚類にとって適した環境を提供していた．

3. 淵の底質構造の形成メカニズム

(1) 根固め前面が洗掘された淵における分級メカニズムに関する仮説

高麗川万年橋下流側の淵に見られた分級について，洪水時から水位が徐々に低下して平水時に至るまでの過程での淵内の流況と，それに伴う土砂動態の変化に着目して，以下のような形成メカニズムの仮説を立てた．ここで，河原が水没している段階をStep1，河原が水面の上に現れる段階をStep2とする．

Step1-1: 交互砂州が形成される．

砂州形成に伴って淵は深く掘れる．

Step1-2: 淵底に礫が停滞する． (図-4 ①)

河道内では砂から礫までほとんどの粒径の河床材料が

移動している。このとき、上流から運ばれてきた礫は淵で掃流力が低下して一時的に停滞し、いずれ下流へ流出する。従って、淵底には常に礫が一定量存在する。一方、砂利や砂は淵に停滞せず下流へと通過する。

Step1-3: 淵底に砂利と砂が停滞する。(図-4 ②)

Step1-2からさらに水位が低下すると、礫は淵底で停止する。一方で、砂利や砂はまだ活発に移動している。このとき、Step1-2に比べて淵での掃流力が低下しているため、今度は砂利が淵に一時的に停滞し始める。そしてさらに流量が低下すると、砂利の一部は堆積すると共に、砂も淵に停滞し始める。従って、この段階では、淵底には礫と砂利と砂のいずれもが存在する状態である。

Step2-1: 淵底の砂利が二次流によって運ばれ、淵下流部の内岸側に堆積する。(図-4 ③)

Step1で述べたように、水位が低下すると河道内の掃流力は全体的に低下する。しかし、水位が低下して河原が水面の上に現れ始めると、それまで比較的まっすぐであった流れが図-5に示すように左右に振れ始め、ちょうど淵の脇で河岸にぶつかる。このとき河岸にぶつかった流れが淵底に沈み込み大規模な二次流が発生するため、淵底の掃流力はむしろ強くなる。そのため、砂利と砂の淵への流入量よりも淵からの流出量の方が大きくなり、淵底に存在する砂利と砂の量は減少し始める。淵から流出した砂利と砂は下流内岸側へ運ばれ、砂利は堆積するが、砂は流下する。

Step2-2: 淵底の砂が二次流によって運ばれ、淵下流部の砂利よりもさらに内岸側に堆積する。(図-4 ④)

さらに水位が低下すると、砂も堆積し始める。このとき、Step2-1と同様に二次流によって淵底の掃流力は強く、淵底に存在する砂の量は減少し始める。また、淵から流出した砂は下流の内岸側に運ばれて堆積するが、図-5に示す通り、Step2-1に比べて主流線が上流側に移動しているため、砂利よりも内岸側に堆積する。

以上の過程を経て、淵底には浮石状態の礫の堆積場が、下流内岸側に砂利と砂の堆積場がそれぞれ形成されるといふ分級構造となるものと考えた。この仮説について次章で検証する。

(2) その他の淵の底質構造の形成メカニズム

砂礫でできた自然河岸に形成されるb) 高麗川万年橋上流側の淵でも、交互砂州形成に伴って淵が深く掘れるため、分級構造形成過程のStep1と同じ過程を経る。しかし、その後水位が低下し河原が水面より上に現れ、流れが左右に振れる段階においては、すでに水衝部の河岸が浸食されているために、流れが河岸にぶつかる角度も緩くなり大規模な二次流は発生しないと考えられる。よって、減水期に淵底に停滞していた砂利や砂が下流へ流出せずにそのまま平水に至るため、礫、砂利、砂が混在した構造となる。もちろん、河岸からの土砂供給も、礫、砂利、砂が混在している一因であると考えられるが、

表-2 水路の諸元と実験に用いた砂

水路長 (m)	水路幅 (m)	勾配	河床材料粒径(mm)	
			細砂(白)	粗砂(黒)
7.4	0.3	1/100	0.7	1.0

表-3 通水流量と通水時間

流量(l/s)	0.8	0.6	0.45	0.33	0.25
通水時間(分)	6	8	10.5	14	19

淵下流内岸側に砂利や砂の堆積場が形成されていないことから、淵底の砂利や砂を流出させるような大規模な二次流が生じないことが重要だと考えている。

水制周りに形成されるd) 平井川圏央道下流の淵の場合、洪水中から流れが水制にぶつかることで周辺に二次流が発生し深い淵が形成されるものの、むしろ減水期にはその規模は小さくなっていき、淵底から細粒分を流し出すというStep2の段階が生じない。よって、自然河岸の淵と同様に、礫、砂利、砂が混在した底質構造となる。

根固工の入った護岸沿いに形成されるc) 平井川八幡社前の淵は縦断的に河床高が一定であり、これは上述した通り、洪水時に根固工が露出し流れがここで減衰しないことを示している。つまり、交互砂州が形成されるような高い水位においても淵は深く掘れないために淵で掃流力があまり低下せず、粗度も低いため礫は淵に停滞できずに下流へと通過してしまう。そのため、減水期にここで停滞した砂利がうっすらと堆積するだけである。

これらの検証については、いずれも今後の課題である。

4. 水路実験による検証

(1) 実験の概要

根固め工前面の淵における分級メカニズムを検証するために水路実験を行った。実験にはアクリル板を加工して作成した表-2で示す諸元の矩形断面水路を用いた。河床材料は細砂(0.7mm)と粗砂(1.0mm)を5:1の割合で混合し、両者の判別がつくように、粗砂を油性スプレーで黒色に着色した。実験水路は実寸の1/100を想定している。そして、実験の開始時にはこの混合砂を厚さ3.5cmに敷き詰め平坦河床を作った。

分級メカニズムの仮説においては交互砂州が形成されることを前提としているため、実験においても黒木ら⁴⁾の砂州発生領域区分図を参考にし、1.5l/sで長時間通水して交互砂州を十分に発達させた後、表-3に示すように段階的に流量を低下させ、淵内の土砂動態や河原の浸水程度を定性的に観察した。なお、実験では1.5l/s通水時のみ下流端から排出される土砂を上流端に供給した。

(2) 結果と考察

まず、1.5l/s通水時に半波長が1m程度の交互砂州が形

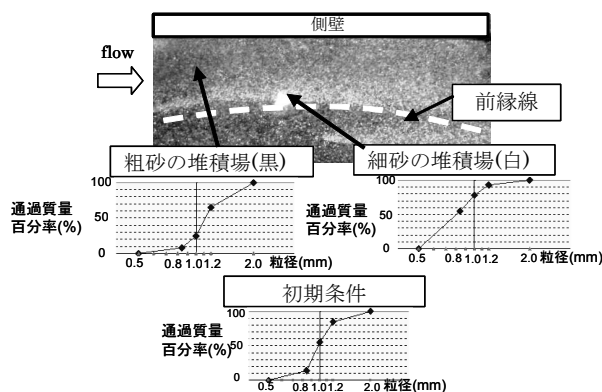


図-6 実験終了時の河床の様子(上から)と表層河床材料の粒径加積曲線

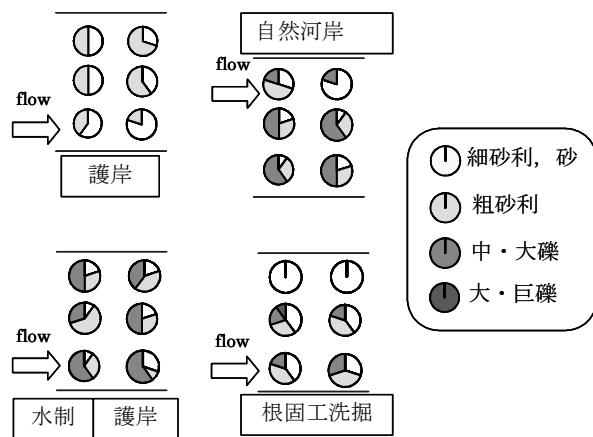


図-7 平瀬の底質調査結果例(円グラフの占める面積は各粒径が表層を占める割合を示す)

成され、これがStep1-1に相当する。次に、0.8l/s通水時には河道全体が浸水しており、河原上の広い範囲を土砂が移動していた。前縁線を乗り越えた土砂は淵へ流入し、そこでいったん停滞した後、淵からは土砂が壁面に平行な向きを中心に左右に発散しながら流出していた。この時点では分級は見られなかった。これはStep1-2から1-3に相当する。

流量が低下し0.45l/s通水時には、河原の下流側4分の1程度が水面の上に現れ、河原上の土砂の移動はほとんどなく、淵へ流入する土砂はほとんど無かった。しかし、淵内からは依然として活発に土砂が流出していた。このとき細砂は壁面に平行な向きではなく、内岸側に向かって流出して淵下流の内岸側に堆積した。この段階は河道全体では掃流力が低下している中で、淵では二次流が発生し掃流力が強くなっているというStep2に相当する。なお、0.6l/s通水時は、0.8l/sと0.45l/sの両者の中間的な土砂動態が見られた。

0.33l/s通水時以降は河原と同様に淵においてもほとんど土砂の移動はなく、実験終了時には、図-6のように淵底には黒色の粗砂の堆積場が、淵下流内岸部には白色の細砂の堆積場が形成され、二粒径ではあるが、現場の状況を再現することができた。

以上より、河原が水面に現れる段階で流れが河岸にぶつかり、二次流が発生して淵底の掃流力が強まり、それによって分級構造が形成されるという仮説を検証できた。

5. 淵の土砂動態が平瀬の底質構造に与える影響

次に、淵の土砂動態がその下流に続く平瀬の底質構造に与える影響を明らかにするために、これまで対象としてきた高麗川対象地a) b) の下流約2kmの区間内に存在していた様々な河岸を有する平瀬合計10箇所と、唯一水制を有する淵であったd) 平井川圏央道下流の調査地の平瀬1箇所において河岸の状況と淵の底質を観察し、平瀬

の底質調査を行った。平瀬の底質調査の際には、60cm四方の枠の中に、表-1に示した各粒径範囲の河床材料がどれだけの割合を占めているかを目視で判定した。その結果、河岸の構造に応じて、平瀬の底質の状態も異なっている様子が確認されたため、各河岸タイプに典型的な平瀬の状況を最も表していると考えられる4サイトでの結果を図-7に示す。

まず、根固工の入った護岸沿いに形成される淵下流の平瀬では、図-7に示すように礫は存在せず、河床全体が砂利や砂で覆われていた。これは、洪水時に根固工が露出して淵が十分に深く掘れず、礫だけでなく砂利や砂も少量しか淵に留まることができないため、洪水の減水期においても、平瀬に多くの砂利や砂が運ばれ、堆積するからだと考えられる。これは既往研究²⁾において、コンクリート護岸がなされると淵の底に砂利や砂が留まらず、平瀬で増加すると指摘されていることとも合致する。

一方、砂礫でできた自然河岸と水制周りに形成される淵下流の平瀬では礫が存在し、根固工の入った護岸沿いに形成される平瀬に比べて砂利や砂の量が少なく、平瀬らしい載り石の礫床が形成されていた。これは、洪水時に淵底に砂利や砂が停滞する分平瀬に運ばれる砂利や砂の量が少なくなるからと考えられる。

そして、根固工の前面が洗掘されて形成される淵の下流では、平瀬の外岸側では砂礫の自然河岸や水制周りに形成される淵下流の平瀬同様に載り石の礫床が形成されていたが、内岸側では砂利や砂で覆われていたエリアが形成されていた。すなわち、淵と同様に内岸と外岸で分級が生じていた。これは、まず洪水時には淵底に砂利や砂が停滞することで、自然河岸や水制の場合同様、平瀬に運ばれる砂利や砂の量は少なくなるが、淵の底質の所で述べた通り、減水期には淵底の砂利や砂が二次流によって内岸側に流出するために、平瀬の内岸側では砂利や砂の河床となる。ただし、淵ほどには砂利と砂が明確に分級せず、混在して堆積している場所が多く見られたが、これは淵から下流に行くにつれて両者の堆積場が重

なり合うためだと考えられる。以上により、河岸が淵の土砂動態に影響を及ぼし、淵の土砂動態は淵の底質構造だけでなく、その下流の平瀬の底質構造にまで影響を及ぼしていることが明らかになった。そして、自然河岸や水制が設置された区間では、平瀬らしい載り石の河床となるのに対し、根固めがしっかりと設置された区間では、細粒分の多い平瀬となっていた。これらに対し、根固め前の洗掘された区間では、淵の場合同様に内岸と外岸で分級が見られ、平瀬らしい載り石の環境も形成されていることが明らかとなった。

6. 魚類に配慮した河岸整備方法に関する考察

根固工前面に形成される淵には、淵底には浮石状態の礫の堆積場が、その内岸側には砂利と砂の堆積場がそれぞれ形成されるという明確な分級構造が見られ、多様な環境が形成されていた。実際にウグイが礫間を利用している様子やカマツカが砂地に生息している様子なども観察できた。そして、その下流に続く平瀬の底質も自然河岸と同様の平瀬らしい載り石の礫床がやや狭い範囲ではあるが形成されており、砂や砂利からなる底質も別の場所に形成されていた。根固工前面が洗掘されているという状況は治水上問題があり、今後なんらかの対策が必要ではあるが、同時に見た目は悪くても多くの魚類の生息場を形成するという特徴を有していた。

また、魚類の生息環境を評価する上では、底質だけでなく流況も重要である。根固め工の前面が侵食されていた高麗川万年橋下流の淵は直線的に護岸されており、こういう状況は平水時にも流れがぶつかり二次流が発生しやすく、図-2 中の平井川のように淵底に高速流が生じやすい条件である⁹⁾。今回の調査時には、早瀬の位置がたまたまこうした二次流を発生しにくい位置に形成されていたためその様な現象は見られなかったが、砂州の位置によってはこのような流れが生じることもあり、これは魚類にとって望ましい状況ではないが調節は難しい。

この様に見てくると、根固工前面が洗掘された状況には治水上問題があるとしても、根固め工を施工しない代わりに、根入れを深くとった護岸にしておくことで、上述した多様な底質構造が淵や平瀬に形成されるということが推測される。しかしながら、こうした多様性を議論する空間スケールには注意すべきである。今回、砂礫からなる自然河岸の前の淵やその下流の平瀬は、確かに単調な底質構造を有していたが、自然河岸と一言で言っても、実際には、倒木のあったところ、植生に覆われたところ、粘土質を含むところなど場所によって様々で、それぞれに違った特徴を有していた。この様に、本来はより

大きなスケールで多様な淵が形成されていたはずであり、今回のように淵の中に多様性を持たせるというのは、周辺に良い環境が無くなってしまった時に取りうる代償策だと考える方が良いように思われる。

7. まとめ

本研究より、河岸の構造によって、その前の淵と平瀬には以下のような環境が形成されることがわかった。

- ・ 根固工前面が洗掘された場合、淵底には浮石状態の礫の堆積場が、淵下流内岸側には砂利と砂の堆積場がそれぞれ形成されており、魚類にも利用されていた。この分級構造は、洪水時に淵底に停滞した砂利や砂が減水期に流れが河岸にぶつかって生じる大規模な二次流によって下流内岸側へ流出し堆積することで形成される。この影響は下流の平瀬まで続き、平瀬外岸側では自然河岸と同様の載り石の礫床、内岸側では砂利や砂で覆われた河床となる。すなわち、淵にも平瀬にも多様な底質構造が形成されていた。
- ・ 砂礫でできた自然河岸や水制周りに形成される淵では、減水期においても大規模な二次流が生じず、洪水時に淵底に停滞していた砂利や砂が流出しないまま平水に至るため、礫、砂利、砂が混在した底質構造となる。そのため、下流の平瀬では砂利や砂の量が少なく、河床は載り石の礫床となる。
- ・ 根固工の入った護岸沿いに形成される淵では、そもそも洪水時に淵が深く洗掘せず礫が停滞できないため、礫が少なく砂利で覆われた河床となる。そのため、下流の平瀬で砂利や砂の量が多く、河床は砂利や砂で覆われる。

参考文献

- 1) 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, 応用生態工学会, 第7回研究発表会講演集, pp231-234, 2003.
- 2) 林融, 知花武佳: 中流域における平瀬の物理特性とその評価, 河川技術論文集vol.13, pp153-158, 2007.
- 3) 山口高志, 島宗暁: 瀬と淵の縦横断特性, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第2部, pp446-447, 1999.
- 4) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第342号, pp87-96, 1984.
- 5) 知花武佳: 瀬・淵の地形特性とその底質構造, 水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, 第44回, pp1-24, 2008.

(2010.4.8受付)