

砂州形成区間における 瀬-淵構造の形態的特徴とその規定要因

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF RIFFLE-POOL STRUCTURES ON GRAVEL BAR AND THEIR DETERMINING FACTORS

山下貴美子¹・知花武佳²・原田大輔³
Kimiko YAMASHITA, Takeyoshi CHIBANA and Daisuke HARADA

¹非会員 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 准教授 (〒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)

Riffle-pool structure is an important factor for river ecosystem. At the same time, the characteristics of riffle pool structure represents the condition of sediment transport dynamism in the river. Against such a background, type of riffle-pool structure was classified into two types thorough field measurements and the mechanism how the different type of riffle-pool structure is formed was analyzed. Based on the observations in the Aki River and the Iruma River, it was clarified that riffle-pool structure whose water surface width is constant in flow direction is formed in the area with thin sedimentary layer. On the thick sedimentary layer, usual riffle-pool structure that was formed by concentration and diversion of flow was observed. Moreover, even if the sedimentary layer is thick, gravel bars with low disturbance have the constant width type riffle-pool structure in the Nakatsu River. By carrying out flume experiments, it was clarified that constant width type riffle-pool structure was created when the interaction of strong water flow between thalweg and dry riverbed disappeared.

Key Words: riffle-pool structure, riverbed, gravel bar, width of water surface, sedimentary layer

1. はじめに

河川中流域には、瀬-淵構造と呼ばれる早瀬-淵-平瀬の3種の河床型が連続して存在し、生息場として利用されるだけでなく、物質循環に関わるあらゆる機能を有し、河道周辺の生態系の中で重要な役割を担っている。また、瀬-淵構造は、その川が有する土砂動態の特性を表す重要な要素であり、それらの形態的特徴を知ることは有益である。これまでも瀬-淵構造に関する研究は数多くなされてきた。実河川に基づいて、瀬や淵の特性を分析するような研究も行われており、早瀬、淵、平瀬、河原などの形態的特性が個別に扱われてきた^{1), 2), 3)}。しかし、それらの研究は瀬や淵の局所的な特徴を捉えたものであり、実河川における瀬-淵構造の特性をリーチスケールで捉え、そこから対象河川における土砂動態を推察するといったことには至っていない。

よって、本研究においては、実河川において、瀬-淵構造の形態的特徴を捉え、それらの規定要因を明らかに

することで、瀬-淵構造特性に表れているその場の土砂動態の特徴を読み取ることを目的とする。

2. 現地調査

(1) 対象河川概要

荒川水系入間川、多摩川水系秋川、相模川水系中津川の扇状地区間において、縦断的に調査を行った。これら3河川はいずれも関東を流れる主要一級河川の最大支流であり、河川規模がほぼ等しく、交互砂州が形成されているという特徴を持っている。また、3河川共に、横断構造物が多く設置されているため、各調査地は横断構造物の影響を受けた区間となっている。また、中津川は上流に宮ヶ瀬ダムを有しているが、入間川は小規模なもののみであり、秋川にはダムは存在しない。

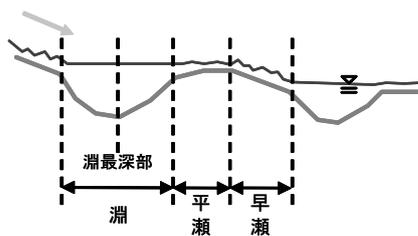


図-1 河床地形測量の測点

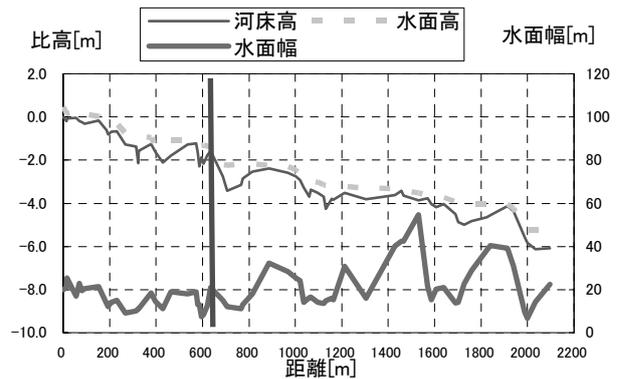


図-2 入間川における縦断地形と水面幅変動

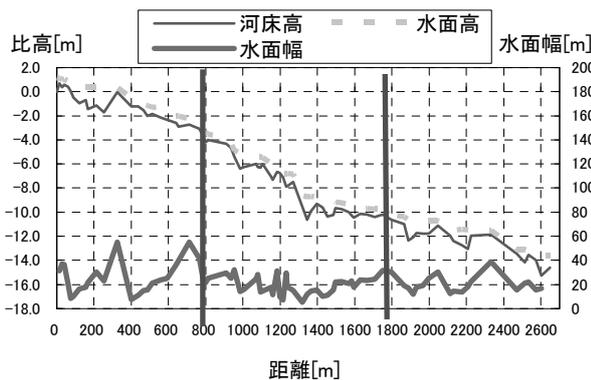


図-3 秋川における縦断地形と水面幅変動

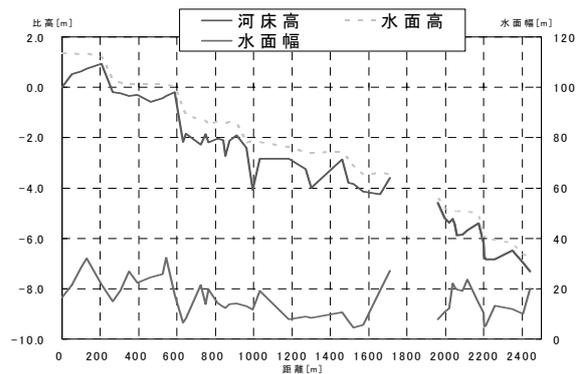


図-4 中津川における縦断地形と水面幅変動

(2) 調査項目

各調査区間において、縦断的に澗筋の河床高と水面幅を測定した。河床地形の測点は図-1に示したように、早瀬-淵-平瀬の境界と淵の最深部とした。また、それらの測点において、水面幅を測定した。

(3) 調査結果

各調査地の調査結果を図-2、図-3、図-4に示す。横軸は測量開始地点からの距離を示し、左が上流となっている。また、細線が澗筋の河床高、点線が水面高を示し、左側の縦軸で表され、太線が水面幅を示し、右側の縦軸で表される。図-4において線が途切れている場所は橋脚工事を行っていて測定不可能だった区間である。

3. 瀬-淵構造特性に関する分析と考察

各河川における測量結果を分析し、瀬-淵構造特性を把握するとともに、それらの特性の規定要因を考察する。ここで、瀬-淵構造の周期とは早瀬上流端から淵、平瀬を経て次の早瀬上流端までの距離のことで定義する。

(1) 各河川の瀬-淵構造特性に関する分析

図-2より、入間川の調査区間では、上流側で水面幅の変動が小さく、下流側で大きくなっていることがわかる。また、同様に瀬-淵構造周期も上流側で短く、下流側で長くなっていることがわかる。この境界も図-2に示す。ここで、上流側の区間をI1、下流側の区間をI2と呼ぶこととし、各区間の分析結果を表-1に示す。

同様に図-3より、秋川では中間の区間で水面幅の変動が小さくなっており、瀬-淵構造周期が短くなっている様子が見て取れる。ここでも上流から順にA1、A2、A3と呼ぶと、表-1からもA2区間で水面幅の変動が小さくなっていることがわかる。

一方で、中津川に関しては、図-4より全区間を通して水面幅の変動は小さく、瀬-淵構造周期は長いという特徴を持っている。

(2) 入間川・秋川に関する考察

入間川と秋川の瀬-淵構造特性に関しては多くの共通点が見られたが、その一つは共に2種類の瀬-淵構造が存在したことである。I1、A2区間では、水面幅が一定で瀬-淵構造周期が短く、瀬-淵の位置が砂州と対応していないという特徴を持ち、I2、A1・A3区間では、水面幅が変動し瀬-淵構造周期が長く、瀬-淵の位置が砂州（の前縁線）の位置と対応しているという特徴を持っていた。

表-1 各区間の分析結果

サイトID	縦断距離[m]	水面幅[m]		水深[m]		瀬-淵構造 周期の平均[m]	平均 河床勾配	平均 水面勾配
		平均	標準偏差	平均	標準偏差			
I全体	0~2096	19.680	9.709	0.490	0.275	195.7	1/400	1/400
I1	0~634	15.621	4.717	0.465	0.272	120.7	1/322	1/357
I2	634~2096	22.698	11.245	0.510	0.275	255.7	1/500	1/500
A全体	0~2602	21.659	9.866	0.806	0.436	205.9	1/164	1/164
A1	0~765	26.131	13.417	0.813	0.476	352.3	1/233	1/203
A2	765~1707	19.209	6.983	0.797	0.371	157.2	1/127	1/143
A3	1707~2602	20.680	7.118	0.844	0.481	242.1	1/244	1/233
N全体	0~2443	15.895	7.149	0.661	0.347	273.5	1/270	1/270

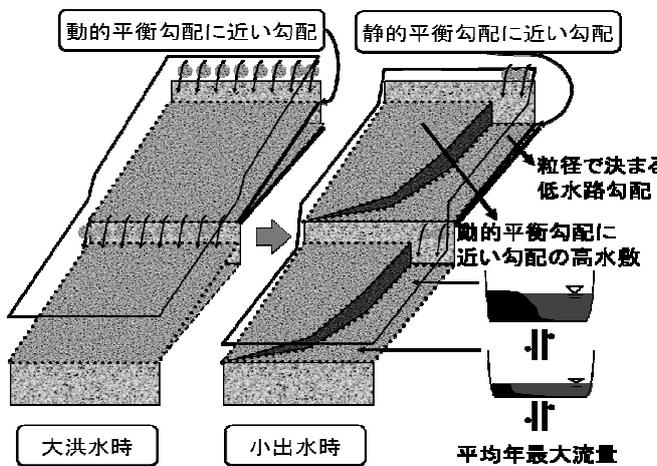


図-5 横断構造物で挟まれた区間に生じる複断面化⁵⁾

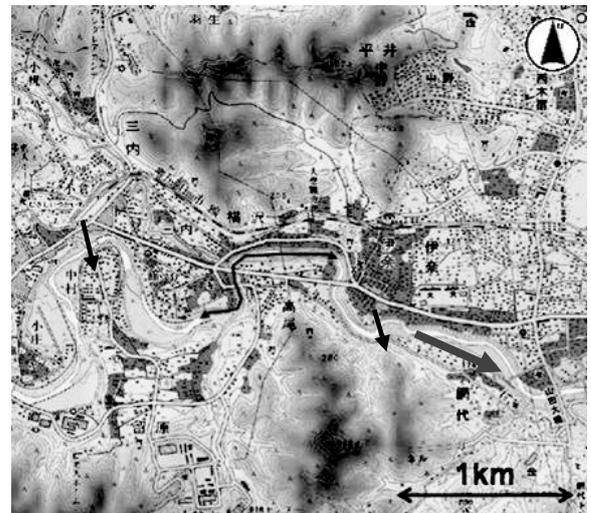


図-6 秋川調査区間の周辺地形とA2の谷幅狭窄部 (中央の両矢印区間)

これら2河川の瀬-淵構造の形態的特性とその規定要因を考える上で、「土砂堆積層」の厚さが重要であると考えた。「土砂堆積層」とは、動くことのない基岩層より上層にあり、洪水の外力で動く可能性がある河床材料の層のことを呼ぶこととする⁴⁾。

水面幅が一定で瀬-淵構造周期が短いI1, A2では、どちらも土砂堆積層が薄いという共通点を有していることに気づいた。そのように推定できる根拠を記す。まず入間川に関しては、横断構造物の存在が強く影響を及ぼしている。知花ら⁵⁾によると、横断構造物にはさまれた区間では、図-5のような地形が形成される。それは、大出水時には土砂が全体的に構造物を乗り越えるが、小出水時には土砂が構造物を乗り越えず、構造物の直下では土砂供給がなくなり、低水路が掘り込まれていくためである。今回の入間川調査区間でも同様の地形が形成されていた。すなわち、低水路の土砂堆積層を考えると、横断構造物の下流にあたるI1区間がI2区間より土砂堆積層が薄くなっているということが推定できる。

しかし、秋川に関しては、入間川同様横断構造物に挟

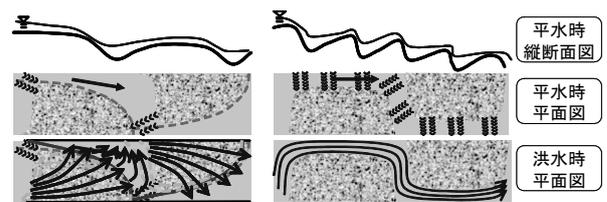


図-7 交互砂州の瀬-淵 (左) と水面幅一定の瀬-淵 (右)

まれた区間にも関わらず、調査区間の中ほどのA2区間で水面幅一定の瀬-淵構造が現れている。ただし、A2区間で河床の基岩露出が多く見られたことから、やはりA2区間の土砂堆積層は薄いと言える。しかし、ここでの土砂堆積層の規定要因は横断構造物ではなく河道周辺の地形にある。図-6に調査区間の周辺地形を示した。調査区間の上流端と下流端が矢印で示されており、中央の両矢印で表された区間がA2区間である。図-6より、A2区間において河道周辺の谷幅が極端に狭くなっていることがわかる。この区間の河道は、谷底に土砂を堆積させ、その上に現河床を形成している。鈴木⁶⁾によると、谷の横断

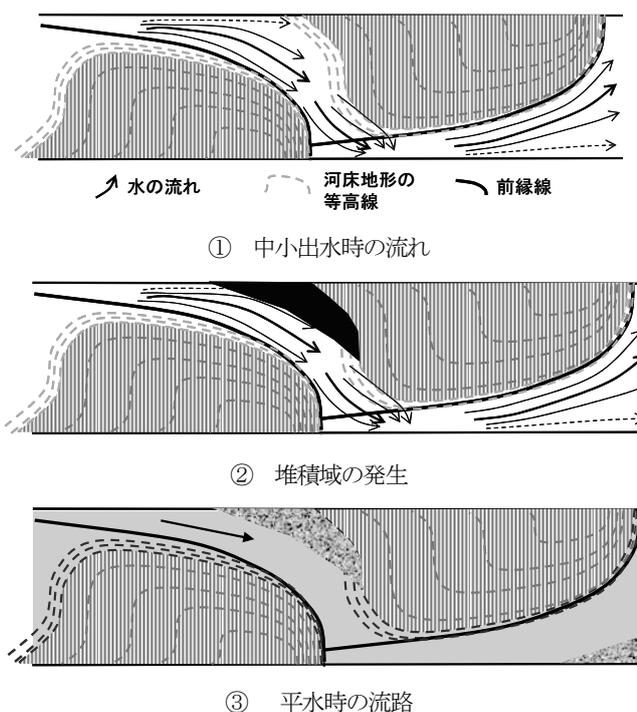


図-8 中津川の瀬-淵構造形成過程

面形をV字に近似することで、谷幅が広いほど谷底に堆積している土砂堆積層の厚さが厚くなっていることがわかる。よって、A2区間ではその上下流と比較して土砂堆積層が薄くなっていることが推定できる。

そこで、土砂堆積層厚と瀬-淵構造の形態的特性との関連についての仮説を説明する。I1やA2では、水面幅がほとんど変動しないという特徴を持つ。すなわち、図-7のように、瀬-淵構造を形成する洪水流であっても、平水時と大きく流れ方は変わらず、安定的な川幅を形成していることを示唆している。洪水流が左右に収束発散しながら三次元的に動いていないということである。実際、図-7の砂州状の部分は、A2における湾曲部のポイントバーやI1における高水敷化した河原であり、比高が高く安定している。特に前者は過去の空中写真を見てもその位置や大きさに変化がない。洪水流が河道内で左右に振れない理由は以下の2点である。

①土砂堆積層が薄い河道では、洪水時に土砂が掃流され平水時以上に基岩の露出箇所が多くなる。すると、河床・河岸共に粗度が小さくなり、主流線が張り付いて固定されてしまう。一般に、洪水時左右に振れる流れというのは、河岸にぶつかった流れが下方へもぐりこみ、二次流を発生させることで対岸へ向かう。しかし、コンクリート護岸が設置されている場所などでは、河岸にぶつかった流れが下方へ潜り込むこともできず、そのまま粗度の小さい護岸からしばらく離れることなく流下する。土砂堆積層が薄い河道では、河床の粗度も小さくなるため、よりその傾向が強くなる。そのため、土砂堆積層が薄い現在の流路（低水路）から、主流線が移動しなくなるのである。

②また、河床に粗度の小さい基岩が露出することで、上流から土砂供給があってもその場に土砂が堆積しにくくなる。更に、洪水時も主流線が移動しないことによって、流路はますます浸食される。これらのことから、平水時の流路と陸域の比高はますます大きくなり、流れが乗り上げることができなくなってしまうのである。

(3) 中津川に関する考察と仮説

一方で、中津川に関しては他2河川とは異なり、両者の中間的な特徴を持つ。調査区間全域で瀬-淵構造特性はほぼ変化せず、瀬-淵構造周期は長く、砂州の位置と一致しており、基岩の露出は見られない。それにも関わらず、水面幅は一定であり、河原の比高が高く安定的である。つまり、入間川・秋川とは異なるメカニズムで瀬-淵構造特性が規定されていると考えられ、空中写真による経年変化から構築した仮説を説明する。

① 出水頻度の低下、ダムによる洪水調整などにより、洪水時にも砂州に水が乗り上げなくなり、安定化する。しかし、低水路の土砂堆積層は厚いため、流れが張り付くことはなく、小さな二次流とともに流れの収束発散は生じる（図-8①）。

② 平水時には平瀬となって水面幅が広がる場所で、出水時にも流れが発散するが、その流れは砂州に乗り上げず、平水時の滲筋に沿って曲げられるため、運ばれてきた土砂が砂州の上流端に堆積してしまう。また、もともと前縁線が明瞭に形成されている場所で、低水路と砂州の比高差が大きくなったため、主流線は前縁線に沿うこととなる。よって、図-8②で塗りつぶした部分が土砂の堆積域となる。

③ 減水後②の堆積域が礫河原として現れる（図-8③）。

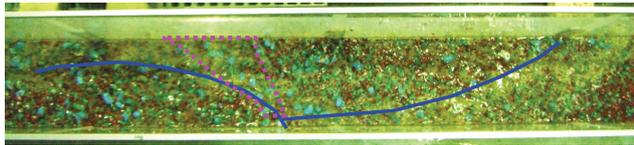
実際に、空中写真による瀬-淵構造の経年変化を追うと、中津川では1977年当時既に水面幅一定の瀬-淵構造が形成されていたが、その後、1982年、83年に三度の大きな洪水を経験し、一度は水面幅の変動する瀬-淵と植生で覆われていない部分が広く残る砂州に戻っている。しかし、その後大きな洪水を経験しないうちに、再び水面幅一定の瀬-淵構造に戻っている。なお、1999年に大きな洪水が来ているものの既に進行した河床低下の影響で、再び水面幅の変動する交互砂州に戻ることはなかった。このようなことから中津川の瀬-淵構造形成メカニズムに関する仮説を構築することができた。

4. 水路実験による検証

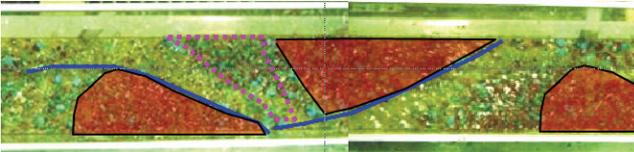
(1) 実験の概要

中津川における瀬-淵構造形成メカニズムの検証を行うために水路実験を行った。

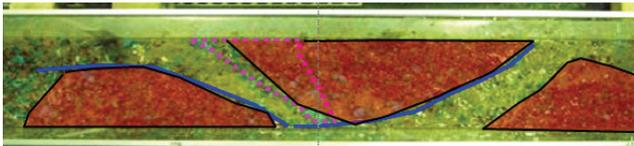
河床材料は色分けした4種の粒径のものをを用い、実際の中津川調査区間の粒径分布に近似して配合し、水路底



(a) Q1通水後(全面的に冠水)



(b) Q2通水後(赤く着色した部分が非冠水部)



(c) Q3通水後(赤く着色した部分が非冠水部)

図-9 流量変化に伴う河床形態の変化

(左が上流, 青い実線が砂州前縁線)

部が露出しない十分な量を均等に敷き詰めた。また、中津川の状況を再現するため、大出水後、中小出水が起こるといったケースを想定して通水した。はじめに、大出水に相当するQ1 (10.0ℓ/m) を一定時間通水し砂州を形成させ、その後中小出水にあたるQ2 (8.8ℓ/m) , Q3 (5.3ℓ/m) とそれぞれ一定時間通水した。

(2) 結果と考察

通水開始直後は全ての大きさの河床材料が活発に移動していたが、Q1の流量を約3分通水すると、交互砂州が形成され、河床材料の移動は落ち着いてきた。砂州の比高が高い部分には大きい河床材料が、主流線の部分には小さい河床材料が見られた。Q1を通水しているときは、川幅一杯が冠水していた。その後、河原が水面のわずかに下にあるQ2の流量を流した。2～3分通水すると礫の移動量は小さく安定してきたため、その後続いてQ3の流量を流した。

このように流量を変化させたときの一連の地形変化の様子を以下に記す。各流量において、河床がある程度安定したときに撮影した河床の様子が図-9である。

① Q1 通水後

図-9(a) 中央部分の、主流線が前縁線を乗り越えて右岸にぶつかる箇所では、その上流部分である平水時の平瀬下流から早瀬にかけて(図中点線で囲まれた部分)、粒径の大きな礫から小さな礫まで混在している。この部分では、左岸と右岸で粒度分布に大きな違いがなく、また、水の流れは川幅一杯が冠水している。

② Q2 通水後

Q2を通水すると、砂州の比高が高い部分(図-9中で赤く着色した部分)の水深が浅くなり、流れが弱まっ

表-2 観測区間の代表粒径 (d_{60})

調査地	入間川	秋川	中津川
代表粒径[m]	0.041	0.047	0.094

て冠水しなくなった。反対に、主流線の流れはQ1の時よりも強くなり、滞筋から大礫(青色礫, 8mm)が持ち出されるようになった。また、図-9(b)からも分かるが、主流線に沿った領域から大礫が持ち出され、点線で囲まれた領域に乗り上げるようにして、大礫や中礫が堆積した。また、主流線が上流側砂州の下流端を削り込んで、やや上流側へと移動した。以上の現象から、主流線部分と他の部分の比高差が拡大すると共に、低水路の湾曲はより大きくなった。

③ Q3 通水後

Q3を通水すると、さらに多くの部分(図-9中で赤く着色した部分)が冠水しなくなった。しかし、主流線部分における礫、特に小礫(黄色礫, 1mm)の移動は活発で、流路の河床低下は進行し、図-9(c)にも表れているように、小礫が河床に見られるほぼ一定幅の滞筋が形成された。しかし、Q1通水後に形成されていた前縁線は残っており、前縁線を乗り越える部分には大礫が堆積して早瀬を形成している。

以上より、大出水後に、交互砂州の比高が高い部分が冠水しないような中小出水を経験することで、砂州の固定化が起こり、平水時の平瀬下流の水面幅拡幅部に礫の堆積が生じて、土砂堆積層が厚い河道でも水面幅一定の瀬-淵構造が形成されるというメカニズムを、水路実験において再現することに成功した。

しかし、上記のような出水を経験した河道であれば、必ずしもこのメカニズムによって、水面幅一定型の瀬-淵構造を形成するわけではないことに留意しなければならない。

表-2に各観測区間の代表粒径を示したが、この表から中津川の観測区間は粒径が大きいことがわかる。つまり、中津川の観測区間の河床材料が大きいことが、上記の瀬-淵構造形成メカニズムに大きく寄与しているのである。形成メカニズムの②③の段階で、主流線部分の掘り込みが進行したが、その際、大礫が重要な役割を担っていた。主流線が上流側の砂州を侵食した際、小さい礫だけを選択的に運び出し、大礫が表層を固めたことで、急勾配で落差が大きくなってでも前縁部分が安定的に残存した。また、下流側、点線の下部にも大礫を中心とした礫の堆積が生じたため、主流線に向けて急勾配の河床が形成され、比高差が大きくなった。もし、大礫がなかったならば、低水路の両岸を急勾配で安定させることはできず、崩れた礫が低水路に堆積し、比高差は大きくならなかったと考えられる。

以上より、洪水履歴とともに、河床材料が大きいこと

も、中津川で見られた瀬-淵構造が形成されるためには、必要な条件であることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、まず多摩川水系秋川と荒川水系入間川の観測を通して、洪水流が左右に収束発散を繰り返して形成された一般的な交互砂州に起因する瀬-淵構造と、平水時流路が水面幅一定で交互砂州とは対応しない瀬-淵構造の二種類が存在することを見いだした。そして、原因は異なるものの、堆積層の厚さが厚い場合は前者に、薄い場合は後者になるという可能性が周囲の状況から示唆された。

その後、相模川水系中津川の観測を通して、堆積層の厚さが薄いという状況に加え、大礫が存在する河道で河原が攪乱されない程度の中小洪水で大礫が河原に打ち上げられて比高差が増大するという状況も、水面幅一定の瀬-淵構造を形成することを見いだした。

すなわち、いずれの場合も水面幅一定の交互砂州が形成されているということは、洪水時においても流れが濡筋に集中し、河原を攪乱できていないことの証であり、こうした瀬-淵構造の観察は、その河道がどれだけ安定してきているのか、河原への攪乱が落ちているのかの目安となり、樹林化の恐れのある河原を見つけ出す有用な情報であることがわかった。

謝辞：本研究の一部は河川生態学術研究会多摩川研究グループの研究の一環として行ったものである。関係者の皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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，第44回，ppA-3-1-24，2008.
- 2) 沼田真監修，水野信彦，御勢久右衛門：河川の生態学，築地書館，1993.
- 3) 生川寛之，知花武佳，山下貴美子：河岸が淵-平瀬区間の低底質構造に及ぼす影響とその形成メカニズム，河川技術論文集，第16巻，pp.201-206，2010.
- 4) 国土技術政策総合研究所：ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方 一下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて一，2009.
- 5) 知花武佳，山下貴美子，工藤美紀男，柳沢亘：横断構造物が河川地形に及ぼす影響とそこに見られる治水・環境両面の特性，河川技術論文集，第15巻，pp.231-236，2009.
- 6) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段地・丘陵・山地，古今書院，2000.

(2012. 4. 5受付)