

水工学シリーズ 08-A-3

## 瀬一淵の地形特性とその底質構造

東京大学大学院 工学系研究科 講師

知花 武佳

土木学会  
水工学委員会・海岸工学委員会

2008 年 8 月

# 瀬一淵の地形特性とその底質構造

## Riverbed Structure in Riffle-Pool Sequence and the Substrate Conditions

知 花 武 佳

Takeyoshi CHIBANA

### 1. はじめに

山から供給された土砂は、山間部から扇状地を抜け、沖積平野へと運ばれ、いずれ海へと出る過程で、それぞれの場所の勾配、洪水規模、等に応じた粒径のものが、特徴的な地形を形成しつつ堆積し<sup>1)</sup>、それらが洪水のたびに更新されるという特徴を持っている。しかし近年、ダム建設や砂利採取に伴う河道内土砂量の変化に加え、ダムによる流況調整に伴う洪水波形、平水時流量の変化が生じることにより、土砂動態はかつての状態から大きく変化しつつあり、河床低下や海岸侵食が至る所で大きな問題として取り上げられている<sup>例え2) 3)</sup>。しかし、河川に生息する生物の生息環境の面からこのような問題を議論する上では、マクロな土砂の動態だけではなく、よりミクロな生息場スケールでの河床構造がどのような影響を受けているのかが重要になってくる。とはいえ、その影響を緩和するためには、直接生息場を造成しても持続的ではないため、結局ダムからの土砂供給量の調節や河川改修等、再びマクロなスケールでの流域管理方策を考えなければならず、特定のスケールに留まることなく、様々な空間スケールの土砂動態を階層的に扱っていくことが必要である。

このような背景を踏まえ、筆者らは河川中流域に形成された交互砂州上の単位形態である早瀬、淵、平瀬、河原の構造特性及び形成過程と、その上の河床材料の構造に着目しつつ、その生息基盤としての機能について研究を進めてきた。すなわち、一言で交互砂州といっても、その形状は様々であり、それによって生息環境も異なっているため、そもそもどのような地形がどのような条件下で形成されており、それぞれの表層にはどのような粒度組成の河床材料がどのように堆積しているのかを解析しつつ、それらを生息基盤とする河川中流域の生物の生息環境という観点から評価することで、生物の棲みやすい川づくり、あるいは河川再生の条件を探って行きたいと考えている。

上述した通り、生物の生息場を流域全体の土砂動態と結びつけて解析するためには、空間スケールの階層性の考慮が必要となる。本研究の場合、図 1.1 に示す物理環境の階層的なスケールを考えている<sup>4) 5)</sup>。まず砂州スケールの解析として、土砂供給量、河道の縦横断形状及び河道線形が砂州の形状に及ぼす影響について検討した後、それが瀬や淵の構造に与える影響について考察する。次に、微生息場スケールに注目し、洪水時あるいは洪水減水期における瀬や淵の内部での細粒土砂の動態が、瀬と淵内部の底質構造及びその分布に与える影響を把握する。すなわち、まずはマクロな視点から、河床変動に寄与する土砂動態を捉えた後、次にミクロな視点から、底質構造を左右する細粒分の土砂動態について検討することとする。そして、適宜それらの環境を生物の生息状況から評価していく。なお、本文に出てくる瀬と淵の位置や状態は、あくまでも調査時のものであり、現況とは異なる。

### 2. 交互砂州全体の地形特性

#### 2. 1. 交互砂州のタイプ分け

河床勾配、川幅、流量、河床材料の粒径が適度な条件で水が流れると、河道線形はまっすぐであっても、図 2.1 に示すような地形が形成され、河道の中には左右交互に高まりと深掘れが見られるようになる。また、高まりと深掘れの間には明瞭な段差が見られ、前縁線

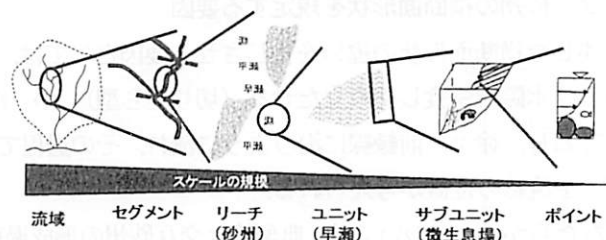


図 1.1 物理環境の空間スケールの階層構造  
(C.A. FRISSELL *et al.* 1986 を改変)

と呼ばれる。これが交互砂州の一般的な形状であり、これに伴って川の中には瀬と淵が形成される。なお、砂州の波長は川幅のおよそ 5~10 倍程度であり、河原の長さは川幅の 2~8 倍程度となる。

この「砂州の長さ（砂州波長）」に加え、「砂州の発達度（砂州波高）」と「砂州の横断形状」の二つが、交互砂州の形状を表す指標として挙げられる。「砂州の発達度」は、川幅水深比と相対水深（水深／河床材料の粒径）には影響を受ける<sup>6)</sup>が、とりわけ上流からの流下土砂量には大きく左右される。すなわち、上流からの流下土砂量が不十分であれば、それだけ河床低下が進むと共に、砂州は長く波高の低い曖昧な形状へと変化する<sup>7)</sup>。一方、「砂州の横断面形状」に関しては、現地の観察に基づき、以下の 2 つのタイプに分類することができる。

#### ①切り立ち型の砂州

河原の中ほどから下流寄りにかけて、砂州の前縁（平水時の水際）に横断方向勾配 20% を超える切り立ちが続き河原上部がほぼ平坦であるという台地状の砂州。

#### ②なだらかな型の砂州

砂州の前縁が切り立たず、河道横断方向にはなだらかな勾配を有しており、それが河原頂部まで続く山状の砂州。この場合、砂州の前縁の横断勾配（平水時の水際の勾配）は上流側ほど急で下流側ほどなだらかなになる。

ただし、いずれの形状でも河原の上流端部は、砂州の前縁線ではなく、砂州の上面の途中まで水が乗り上げてきたような状態であるため、勾配は緩く水際も曖昧となる。これらの違いを平面的に示したのが図 2.2 である。なお、河原に水が乗り上げたときに、「なだらかな型」では掃流力の大きい場所から小さい場所まで形成されるため、礫の粗い場所と細かい場所がきれいに分級するのに対し、「切り立ち型」では掃流力に大きな差が見られず、河原が少し水没する程度の出水では砂をかぶることもあるため、多様な粒径が混在した分級の悪い状態となる。これらの写真を図 2.3 に示す。

### 2. 2. 砂州の横断面形状を規定する要因

上述した横断面形状の違いを生じさせる要因としては、「洪水ピーク後比較的早い段階で主流線が砂州の前縁線に沿い、水際を侵食し切り立たせる（切り立ち型）」か「洪水ピーク後もしばらく主流線が砂州上で前縁線を超えており、徐々に前縁線に沿うように流れ、その過程で底質の分級も起こる（なだらかな型）」か、という洪水減水期の主流線の位置が考えられる。

「なだらかな型」については、典型的な交互砂州の形成過程で説明されているように、洪水時の主流線の位置が平水時の主流線の位置からずれており、減水期に徐々にシフトするという現象で説明可能である。一方、前者の「切り立ち型」については、例えば、洪水初期に複列砂州であっても通水中にモードが減少して交互砂州となる様な場

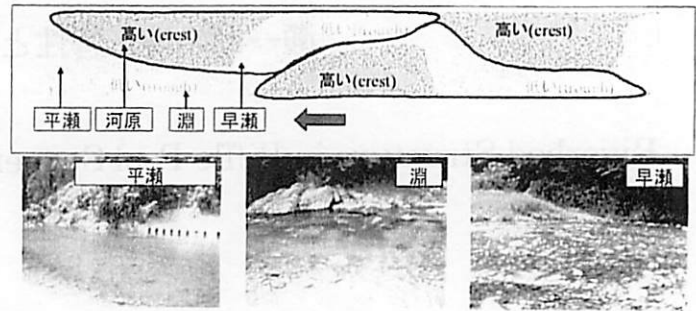


図 2.1 交互砂州の形状と平水時に見られる瀬－淵構造

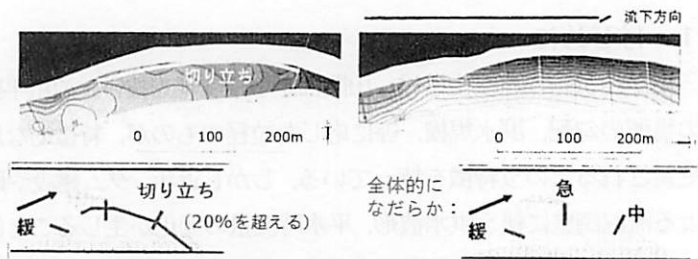


図 2.2 切り立ち型の砂州（左）となだらかな型の砂州（右）

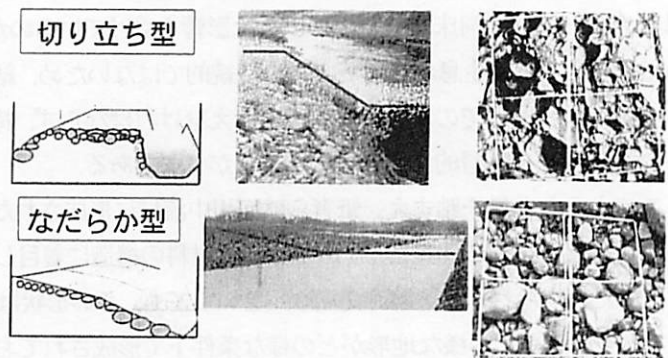


図 2.3 交互砂州の形状と前縁線・分級の違い

合に、洪水ピーク後比較的早い段階で流れが砂州の前縁線に沿うという現象が指摘されており<sup>8)</sup>、この場合、複列砂州と交互砂州との違いを分ける川幅水深比が、両者を分ける一つの要因であると推測される。実際、観察によっても、川幅の広い河川ほど切り立ち型の砂州が多く見受けられるようには思えるが、現段階で完全に検証できていないわけではない。

また、両者を分けるもう一つの要因が河道線形である。例えば、湾曲の内岸側の砂州と外岸側の砂州について、洪水時の砂州上流れの違いが生じることが指摘されている<sup>9)</sup>。すなわち、内岸砂州においては、その中程で砂州の前縁線を横切るような流れが強くなるのに対し、外岸砂州上では、外壁に沿いながら外岸砂州先端に向かう流れと河床形状のため分流して内岸へ向かう流れとの分合流が見られ、複列砂州における中州の様相を見せる。これから、内岸の砂州の場合は、水流が河原の上及び前縁線を比較的長く横切ることによって水際はなだらかになりやすく、外岸では中州的になり、水際が侵食されて切り立ちやすいと考えられる。さらに、洪水時は河道湾曲部のやや下流の外岸側で、流れが収束するため、洪水ピークから減水して低水に至るまでの流路が固定されやすく、その内岸側の砂州は切り立ち型になりやすいと考えられる。

このように、川幅水深比、河道線形、相対水深、流下土砂量といった要素により、砂州の形状及びその発達度が規定されていることがわかる。では、これらの要素によって決まる様々な砂州形状の上に、どのような瀬・淵構造が現れるのか、そこにどのような流況・底質構造が現れるのかについて、順にまとめていく。

### 3. 早瀬の地形特性とその底質構造

#### 3. 1. 早瀬のタイプ分け

河川中流域に見られる早瀬は交互砂州の前縁線を平水時の流路が横切る場所に形成されることが多く、我々の観測によれば、勾配は1/100～1/30程度、平均的なFr数は0.4以上であり、局所的に起こる跳水が白波となって景観を構成し、河床材料は礫間に細粒分がつかまっていない浮き石<sup>10)</sup>となるのが一般的な特徴である。このような河川中流域で見られる早瀬を、その平面形状に基づき分類すると、以下の3タイプにわけることができる<sup>11)</sup>。

##### ①縦長型 (Long type)

早瀬の形状は長方形で、横断方向に比べて流下方向の距離が長い。一般的な形ではあるが、砂州の形成に伴ってできるもの以外は含めない。

##### ②狭窄型 (Convergence type)

下流に行くにつれ水面幅が狭まっていく、逆三角形の早瀬。砂州の前縁線の一部を削り込んで流れている。

##### ③横長型 (Wide type)

早瀬の形状は長方形だが、流下方向の距離は短く横断方向に長い。

これらの代表的な景観を図3.1にまとめる。これらの他に、下流に行くほど水面幅が広がるという早瀬を見かける事もあるが、縦長型早瀬の下流端部が少し広がっているか、狭窄型や縦長型の下流端に洪水で運ばれた土砂がデルタ状に堆積し、後に水位が低下したことで早瀬になったもののいずれかである。前者の場合は平行縦長型と大差なく、後者の場合も水位上昇に伴い消滅する局所的な環境であるため、これらを別の区分としては扱わない。

これらの違いに注目しつつ、砂州形状との関係及びその上の底質構造について、現地観測結果を基にまとめていく。

#### 3. 2. 早瀬の現地観測と注目する指標

対象とした早瀬は、多摩川水系多摩川の河口より49km～53kmの区間に形成された全早瀬、及び同水系の秋川、及び浅川に形成された複数の縦長型早瀬であり、多摩川本川では上流から下流にかけての早瀬環境の変化を追うことで、マクロなスケールでの土砂動態が早瀬の構造に



図3.1 平面形状に基づく早瀬の分類

与える影響を中心に調査し、その他の早瀬については河道形状や土砂の粒度組成が異なる条件下でのデータを増やすと共に、比較的人為的影響の少ない上流部において出水後の時間的変化を追うことで、ミクロなスケールでの土砂動態が早瀬の底質構造に及ぼす影響を中心に調査している。

これらの早瀬において、地形測量と流速分布計測に加え、底質構造及び底質動態の調査を行った。ここで、底質構造としては、どれ位の大きさの礫が、どれ位の深さまで礫間に隙間を持って堆積しているのか（いわゆる「透かし礫層」の厚さ）に注目する。早瀬では、平水時の高い掃流力により表層が浮き石状態になることで、その礫間を多くの生物が生息場として利用できるようになるため、これらの指標は河床の生息環境を表現する上で重要な指標であると考えられる。これらの調査では、三宅ら<sup>1,2)</sup>によって提案された次の表層礫採取法を用いている。まず60cm四方の方形枠を対象とする観測点に設置し、その内部の表層に存在する中間径128mm以上の礫（以下、これを大礫と呼ぶが、実際の大礫の定義は64～256mm）のみをすべて取り出す。ここでいう表層の礫とは、周囲を掘り起こさずに片手で容易に採取できる河床表面のものであり、礫の表面積の内半分以上は細粒分（8mm程度以下）と接していないものと定義する。そして、対象範囲から大礫が採取できなくなると、方形枠の1/4区画（30cm×30cm）から中間径32～128mmの礫（以下、これを中礫と呼ぶが実際の中礫の定義は4～64mm）を大礫同様に取れる限り採集し、その全体重量を測定し、後にこれを四倍して総重量を求める。ここでも、半分以上が細粒分と接しているものは対象としない。なお、これらの礫サイズの境界は、河床の生物に影響を及ぼすと思われるサイズに基づき決定しているため、地質学での区分とは少しずれている。この手法を用いることで、河床表層で礫間に空隙を持って堆積している礫がどれくらいの厚さで堆積しており、大礫と中礫の比率がどれくらいであるのかを把握することができる。なお、河床表層での堆積厚さを測る際に、直接深さを計測するのは極めて困難でばらつきも多いため、上述したような重量による方法は有用であるが、空隙率の違いまでは見ていないため、その分は誤差として含まれてしまう。

また、底質動態としては、洪水後の掃流砂量に注目し、幅10cmで0.5mmメッシュのネットを張った流砂トラップを用いた。なお、落ち葉がつまるなどすると正確なデータが取れないため、常に状態を監視しながら15分間掃流砂を採取し、その全量を計測している。採取された試料は、110℃で3時間乾燥した後、粒径0.5mm以上の土砂のみの重量を計測した。また、底質の写真撮影を行い、河床表層に細粒土砂が存在するか、細粒土砂が存在しないかを判断した。

なお、いずれの底質調査でも、早瀬内で、流下方向に三断面、各断面に三点ずつの観測点を設け、計9箇所で行っている。

### 3. 3. 砂州形状と早瀬の地形特性の関係

まず、多摩川本川の49km～53km区間を対象に、砂州形状と早瀬形状の関係について考察する。この対象区間では、上流には羽村堰、下流には昭和用水堰が存在しているため、上流ほど顕著な河床低下が見られ、下流では河床が安定しておりむしろ河床上昇傾向であるのが特徴である。初めて本区間で調査を行った2002年5月の時点で、同区間におよそ10箇所で見つかった早瀬を確認する事ができたが、そのうち半分の五箇所の早瀬は、少し波立っているだけで水面勾配が極めて緩やかな小規模なもので、砂州との関係も曖昧であったため、残る五箇所の早瀬について検討する。これらの位置関係を示したものが図3.2である。

これら3タイプの早瀬の分布を見ると、対象区間の上流ほど、すなわち河床低下が進行する所ほど、今回対象から外した不明瞭な瀬が多く



図 3.2 多摩川（49km～53km）における各早瀬の分布（2002年5月）

なり、横長型早瀬が一箇所だけ存在している様子が見て取れる。この横長型早瀬は、中流部から下流部に差し掛かる所など、他の地区においても、砂州の形成されにくい領域でしばしば見かけられる。一方、対象区間の下流では、早瀬の出現頻度が増すと共に、狭窄型早瀬が二箇所で見られている。この狭窄型早瀬は、山地からの供給土砂が豊富な河道でしばしば見かけられる。そして、二つの狭窄型早瀬に挟まれた場所に、あまり発達していない砂州が存在し、ここではやはり横長型早瀬が形成されている。最後に縦長型早瀬は、対象区間の中央部の一箇所では確認できなかったが、他の河川中流域ではむしろ一般的に見られる形状である。

この結果をまとめると、流下土砂量の減少に伴う河床低下、及び河道線形や洪水時の川幅水深比といったその河道特性で砂州が発達しにくい条件にある場合や砂州が発達途上の場合には、横長型の早瀬が形成され、逆に土砂供給量が豊富で河床が上昇気味にあるか、湾曲部の影響などで砂州が発達しやすい条件にある場合は、狭窄型の早瀬が形成されやすいことがわかる。なお、縦長型はこれらの中間である。これらを模式的に示したものが図 3.3 である。す

なわち、砂州が平坦化すると前縁線乗り越える流れは左右に広がり、淵との比高差も小さいために流下方向には短い砂州が形成される。なお、このような場合には、砂州の前縁線が上下流方向に延びており、早瀬はその前縁線を横断するように形成されるため、流れの方向は河道法線と直角に近い。一方、砂州が発達すると砂州の前縁線の一部が流れが侵食し、流れが一箇所に集中するため、狭窄型の形状が形成される。

なお、早瀬の平面形状は、この様に砂州の状態によって決定されるために、早瀬の縦断方向河床勾配も又、平面形状ごとにある程度の特徴を有している。多摩川本川の対象区間で見られた狭窄型早瀬の勾配は、それぞれ  $1/27$  と  $1/30$  であり、実際におおよそ  $1/30$  程度が狭窄型早瀬の一般的な縦断勾配であると考えられる。一方の縦長型早瀬の勾配は、他の対象区間で計測したものを含め、 $1/50 \sim 1/100$  程度であり、比較的緩やかである。最後に、多摩川本川の対象区間で見られた横長型早瀬の勾配は、 $1/32$  と  $1/38$  であり意外と急勾配であった。これは、砂州の前縁線を削り込まずに、そのまま流れが乗り越えているために、砂州の前縁線の勾配がそのまま反映されたものであり、前縁線の勾配次第では、不明瞭な勾配をほとんど有さない状態まで、かなり幅広い勾配となるようである。

次に、早瀬の横断面形状に注目する。水際の横断方向の勾配が緩くなっている場合には、極めて広い範囲に浅い環境が形成され、少しの水位変動でも水際線が大きく変動する。そのため、稚魚や遊泳力のない魚の生息や移動には好ましい環境が形成されると予想されるが、同時に干上がりと水没が繰り返されるため、付着生物にとっては擾乱の多い環境となる<sup>13)</sup> など、環境特性を捉える上で重要な要素である。この水際環境に関して、早瀬の横断形状と、交互砂州の形状とを比較すれば、その一般的な傾向が理解できる。既に 2. 1. でも述べた通り、一般的に交互砂州の形成された河道では、河床の高い部分（平水時の河原）と河床の低い部分（平水時の淵）が左右交互に出現し、前縁線では河床高が急変する。そのため、なだらかな型の河原の場合、図 3.4 (a) のような測線で横断勾配を

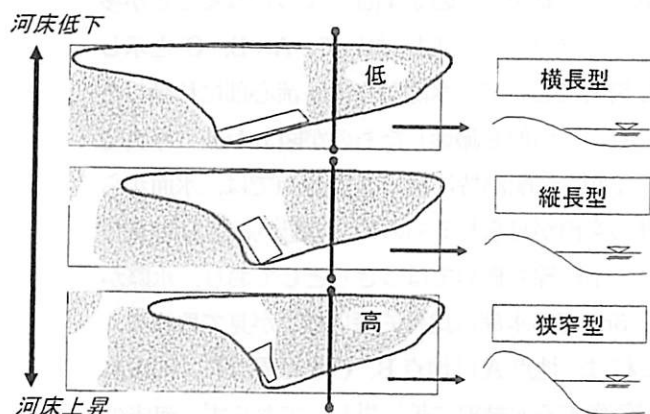


図 3.3 砂州の発達度と早瀬平面形状の関係

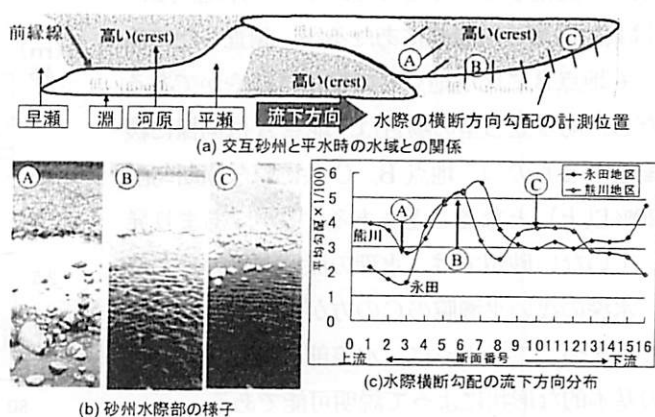


図 3.4 砂州の発達度と早瀬平面形状の関係  
(c)の永田地区、熊川地区の位置は図 3.2 参照

計測した結果は、図 3.4 (c) のようになることが多い<sup>11)</sup>。なお、この図において、A、B、C と示した箇所において、水際から 5m 流心部に移動した地点から河原を撮影したものが図 3.4 (b) の写真であるが、勾配が特に緩い A の地点では、水面から礫の突出が見られるものの、勾配が急な B 地点では、水際線も極めてはっきりとしており、水際から 5m でも水深は比較的深い様子が見て取れる。これは、地点 A は地点 B、C とは異なり、河床高が急変する前縁線に差し掛かっておらず、河床の最も高い場所から最も低い場所にかけて緩やかに河床高が変化していくためである。一方、地点 B、C は共に砂州の前縁線にあたるが、調査した二箇所とも地点 B に比べ地点 C の変化は緩やかである。ただし、切り立ち型の場合は、地点 A は同様に緩勾配となるものの、地点 B、C 共に急な横断勾配（20%以上）となることもある<sup>14)</sup> が、あまり発達していない砂州では、水深の深い淵脇の B よりも、水深の浅い平瀬脇の C の方が緩やかな勾配となりやすい。このように、水際部の横断勾配は砂州の基本的な形状によって説明可能である。

このような砂州形状の特徴のため、早瀬の左右岸では極めて異質な環境が形成され、その特徴は一般的に共通している。すなわち、図 3.5 (a) は早瀬の位置を交互砂州と対応させて記述したものであるが、右岸側の A と記した地点は、図 3.4 の地点 A に対応しており、勾配が最も緩い。一方、早瀬左岸は図 3.4 の地点 C のやや下流側であり、前縁線上の河床高急変点にあたるため、なだらか型の場合でも対岸よりは勾配がついており、切り立ち型の場合は極めて急勾配となっている。図 3.5 (b) に示した現地の写真と対応させると、地点 C 側では水際線が明確なのに対し、地点 A 側では水面から礫の露出が目立ち、水際線は曖昧である。ここで、水際が曖昧な方の河岸沿いでは、礫間に極めて遅い流れが生じており、糸状緑藻が大量に繁茂している様子が見られることも多い。しかしながら、例えば、過去の大きな出水で交互砂州が形成された後、幾度も小出水を繰り返す、特に水域の河床が低下しつつある場合は、河原の上流端（地点 A）が浸食を受けており、早瀬の両岸が切り立っているというものもよく見受けられる。

### 3. 4. 早瀬の地形特性と水理環境の関係

早瀬内の水理環境、すなわち水深、流速あるいはそれらの関数で求まる  $Fr$  数の分布特性は、そこへ流れ込む流量と地形で決まる。この地形は、横断面形状、縦断面形状（特に河床勾配）、平面形状で表現できるが、上述したとおり平面形状のタイプごとにおおよそ一定のパターンを有する。そこで、狭窄型と縦長型の典型的な形状を仮定した上で、簡単な水理計算を用いて水面形を比較したものが図 3.6 である。ここからもわかるとおり、狭窄型では、縦長型にくらべて、狭窄部直上流（瀬尻）における水深が深くなっている。また、狭窄型では、上流端の川幅が縦長型に比べて広く設定したために水深が浅くなっているが、実際には両者の間に大差はない。さらに、狭窄型では、堰上げられた水面からゆるやかに淵の平らな水面へと変化しており、早瀬から淵に移行する境界は不明瞭である。すなわち、水深が深く  $Fr$  数もやや低い、早瀬から淵への移行帯が存在することがわかる。このように、流下方向の水面形には違いが見られ、狭窄型の場合は瀬尻付近で水深が深く、 $Fr$  数が低くなるのに対し、縦長型では、瀬

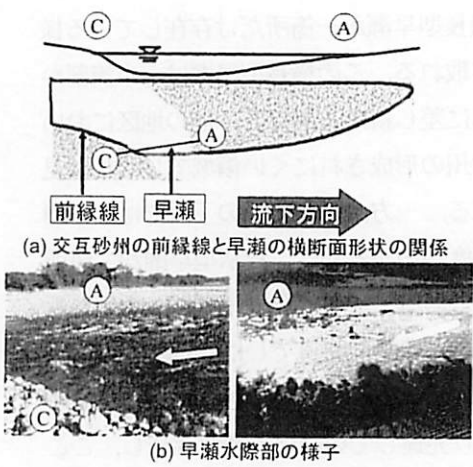


図 3.5 早瀬における非対称な断面形状

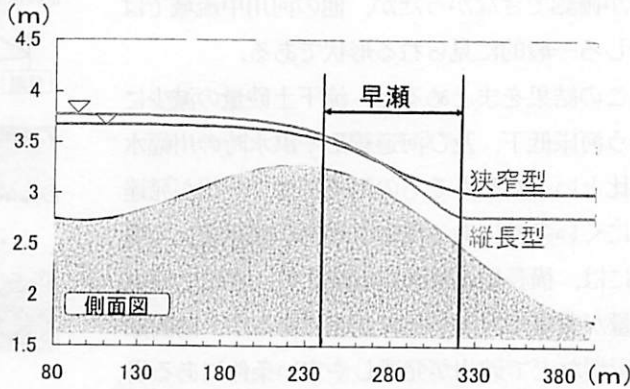


図 3.6 水理計算で求めた狭窄型と縦長型の水面形の違い

尻の河床勾配の急な所で浅くFr数が高い。なお、後ほど4. 2. で述べるように、水深とFr数は魚類の生息環境を評価する上で重要な指標となる。

### 3. 5. 早瀬の地形特性と河床構造の関係

まず、上述した表層礫採取法を用いて採取した表層礫の全重量に関して、早瀬内における平均値、標準偏差を狭窄型和縦長型で比較したものが表3.1である。この様に、狭窄型早瀬の方が表層礫の厚さは厚く、その厚さも多様である。これは、早瀬の河床勾配が縦長型に比べ狭窄型の方が急で高い掃流力が得られる上、狭窄型は縦横断の流速、水深変化が大きいことに起因していると考えられる。

ただし、同じ縦長型早瀬でも、秋川上流部に形成された早瀬では、多摩川中流域の早瀬に比して厚い表層礫が形成されており、その厚さも多様である様子が見て取れる。ここで早瀬自体の勾配には差が見られないため、流況と関係があると考え、多摩川水系多摩川、秋川、浅川に見られたすべての縦長型早瀬を対象とし、早瀬内の平水時の単位

幅流量の平均（簡単のため早瀬内9箇所の測点における流速×水深の平均値）と、表層礫厚さの関係を求めた結果が図3.7である。これを見ると、表層の大礫に関しては、地点間の平均粒径の差や、掃流されずに残存している巨礫の影響を受け、明確な傾向が見られないものの、中礫に関しては単位幅流量との間に明確な相関関係が見られる。すなわち、流量が多いほど礫間の細粒分が洗い流され、厚い表層礫が発達している。

このように、平水時であっても早瀬内の流況が礫構造に影響している可能性が示唆されたが、特に、表層礫を左右するのは砂などの細粒分の動態であるため<sup>15)</sup>、出水のピークが過ぎて早瀬の地形がおおよそ決まり、大粒径の礫が停止した後の細粒土砂の動きを把握する必要がある。そこで、出水後まだ流量の多い状態及び、平水時に戻ってからの、早瀬内の細粒土砂の動態と表層礫の厚さの関係について検討する。ここでは、秋川上流の南秋川笹平地区及び北秋川小岩地区の縦長型早瀬を対象に、出水後の時間の経過による細粒土砂の輸送量の違いを見る。なお、両地区共に最も流速が速く水深も深い滞筋はほぼ中心部であるが、北秋川の下流端断面のみ、右岸側に滞筋が偏っている。また、早瀬上流では左岸側が水衝部、下流では右岸側が水衝部となっている点も共通している。調査は、増水直後と完全に流量が下がった後（減水後）の二回ずつ行っているが、実際は後者の調査を平水時に行った後、増水直後に前者の調査を行っている。この間、大きな地形変化は生じていない。調査時の流況を図3.8に示す。

まず、掃流砂の有無、河床表層の砂の有無を基に、図3.9に示す四つの状態に区分する。ここで、「掃流砂有及び表層砂有」という状態については、その上流の観測点でも砂が流れているか否か、すなわち上流から砂が供給されているか、その場の砂が持ち出されているか、に基づきさらに二つに区分している。ただし、上流端

表3.1 各早瀬における表層礫と縦断河床勾配

|                               |      | 狭窄型   |       | 縦長型  |      |
|-------------------------------|------|-------|-------|------|------|
|                               |      | 早瀬C   | 早瀬F   | 早瀬B  | 早瀬G  |
| 表層礫重量<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | 平均   | 124.6 | 167.4 | 75.7 | 87.7 |
|                               | 標準偏差 | 52.5  | 98.1  | 21.3 | 28.6 |
| 河床勾配                          | 河床勾配 | 1/30  | 1/27  | 1/55 | 1/94 |

|                               |      | 縦長型   |       |
|-------------------------------|------|-------|-------|
|                               |      | 北秋川   | 南秋川   |
| 表層礫重量<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | 平均   | 114.9 | 112.8 |
|                               | 標準偏差 | 72.8  | 30.2  |
| 河床勾配                          | 河床勾配 | 1/72  | 1/55  |

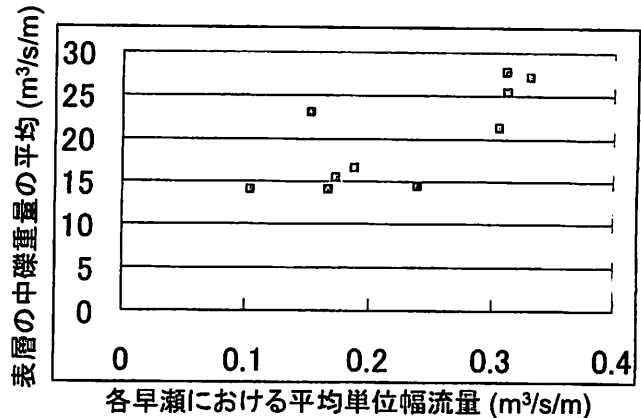


図3.7 早瀬の単位幅流量と表層における中礫重量の関係

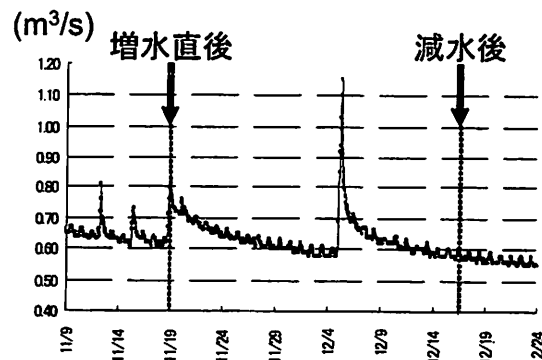


図3.8 北秋川・南秋川における調査時の流況（2004年）

の観測点で掃流砂が確認された場合は、その上流でも砂が輸送されているものと判定した。また、表層砂の有無は、その砂が止まっているか動いているかと無関係に判断しているため、掃流砂有で表層砂無という組み合わせは存在しない。このような河床の状態区分に基づき、早瀬内の9つの観測点での状況を簡易化して示したものが図3.10である。図中矢印は流砂が流れているか否かを、背景の色は流砂量の大小関係を示している。

増水直後と減水後の早瀬の状態を比べると、当然ながら増水直後に比べ減水後の方が量的にも面的にも掃流砂が見られにくくなっていることがわかる。ここで、砂が停止するのは、基本的に勾配の緩い瀬頭から勾配のきつい瀬尻の順であり、南秋川の右岸側及び中心部や北秋川の左岸側では、上流から完全に砂が抜け落ち、減水後に礫のみの掃流砂の無い河床が形成されていく様子が顕著に見て取れる。しかし、逆に南秋川の左岸側や北秋川の右岸側では、減水後にまだ砂がある状態で瀬頭から流砂が停止し始めており、瀬尻における流砂量は減水後も比較的多い。これらの地点は、増水直後の流砂量が最も多かった所であり、砂の流入が多く平水時も滞筋とはならない地点の瀬頭では砂が抜けきらない状態で安定している。このように、流砂量が最も多い所が滞筋だというわけではなく、砂が早瀬河床に残存する領域もでてくるが、滞筋では瀬尻を中心に、減水後、上流からの流入が停止した後も砂が多く流れており、深くまで砂が持ち出されている様子が見て取れる。

すなわち、砂の流入が少ない瀬脇では、減水時に表層の砂のみが洗い流され、すぐに礫だけの状態になるのに対し、砂の流入が多い瀬脇では、瀬頭では表層の砂がすべて洗い流されことなく流砂が停止し、瀬尻は減水後しばらく持ち込まれた流砂を下流へと流していることがわかる。一方、滞筋では砂の流入量にかかわらず、その掃流力の高さ故に減水後も砂が持ち出されている。よって、流入の割に持ち出される量の多い滞筋では、表層礫の厚さが厚くなり、流入量と流出量が共に少ない瀬脇や、共に多い瀬脇では表層礫の厚さが薄くなる事がわかる。

最後に、このような土砂動態によって、どのような微生物場が形成されるのかを、表層の礫構造に焦点をあてて捉える。図3.11は平水時に観測された表層礫の総重量を、中礫と大礫の比率がわかるように示したものである。まず、瀬頭には大半の礫が砂に埋没しているか、薄い礫層しか形成されていないため、表層の礫と呼べるものの量が少ない。これが瀬尻に移るにつれ、徐々に表層の礫の量は増加している。このことは、上述した砂の掃流期間と対応しており、瀬頭で砂が停止した後も、瀬尻付近では長い間砂が抜け落ち続けているのがその原因である。特に、

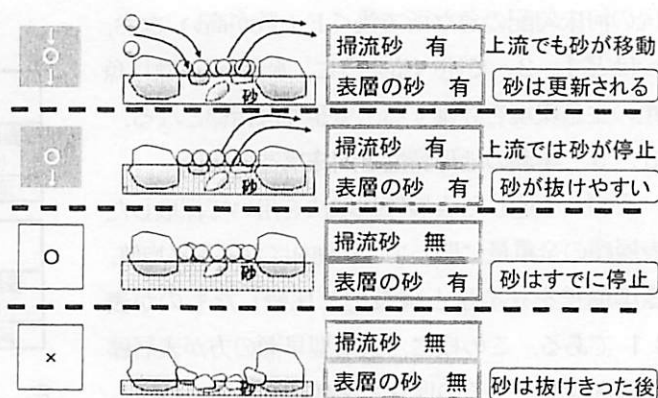


図3.9 掃流砂と河床における砂の有無に着目した分類

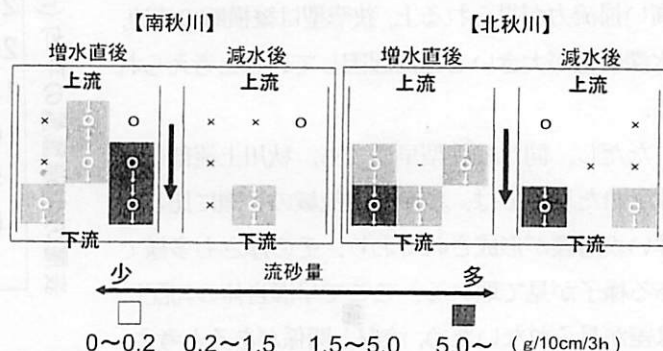


図3.10 増水直後および減水後における掃流砂の状態

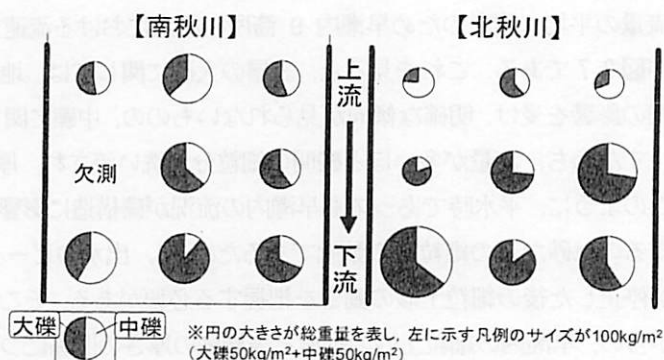


図3.11 早瀬に見られる表層の大礫と中礫の割合及び総重量の空間分布

図 3.11 中、瀬尻の両脇に注目すると、南秋川でも北秋川でも、多量の大礫、中礫が表層に存在しており、砂が抜け落ちた事を示唆している。一方、滞筋に目を向けると、上流から下流に行くにつれ、大礫に比べ中礫の割合が低下している傾向が見て取れる。これは、掃流力の大きな滞筋では、砂だけでなく中礫サイズの礫も同様に洗い流されたためであると考えられる。このように、早瀬にみられる表層礫の構造の分布傾向は、増水後の掃流砂の動態と対応している。

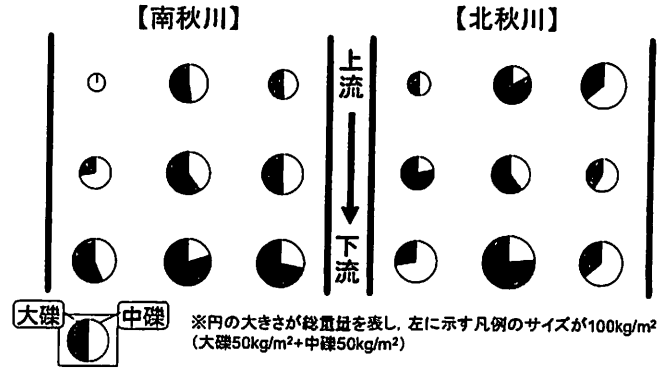


図 3.12 増水直後における表層礫の重量

また、砂の掃流期間を考えれば、洪水が終わっ

た後も早瀬における礫間の砂は時間と共に徐々に流出し、河床の状態は時間と共に変化していき、浮き石帯が安定するにはかなりの時間を要すると考えられる。そこで、増水直後に同様の調査をした結果を図 3.12 に示すが、ここで増水直後の状態に注目すると、減水後に比べて表層礫は少なく、大礫と中礫の比率も面的に変化が少ない。このように早瀬の多様な礫構造は、出水後数週間程度の時間をかけて徐々に形成されているものであることがわかる。

### 3. 6. まとめ

ここまで述べてきた早瀬の特徴を以下にまとめる。

- ・上流からの供給土砂量によって砂州の発達度は大きく影響を受け、結果として早瀬の平面形状が変化する。発達した砂州では、狭窄型早瀬、平坦化した砂州では横長型早瀬が見られ、縦長型早瀬はその中間である。
- ・早瀬における左右岸の環境は非対称で、一方は礫間を僅かに水が流れるような状態、もう一方は切り立った河岸沿いを速い流れが生じる状態となるのが一般的である。ただし、砂州が発達しなければ、その差は小さい。
- ・早瀬における表層礫の厚さ（浮き石の度合い）は、狭窄型早瀬の方が縦長型早瀬よりも厚かった。また、同じ縦長型早瀬でも単位幅流量が大きくなるほど、細粒分が洗い流されやすく厚みを持った表層礫が存在している。
- ・早瀬における礫構造は、出水時の砂の流入量と出水後の砂の流出量のバランスで決まる。出水後の砂の流出は、少なくとも数週間程度続き、礫構造は徐々に形成される。よって、出水直後の礫構造は比較的単調で、浮き石は全体的に発達していない。また結果として、瀬頭より瀬尻の方で表層礫が発達しやすい。

## 4. 淵の地形特性とその底質構造

### 4. 1. 淵のタイプ分け

河川中流域に見られる淵は交互砂州の発達に伴い、洪水時の水衝部に形成されるのが一般的ではあるが、その他にも様々な要因によって形成される。また、交互砂州に伴う淵だけを対象としても、水衝部の河岸の状況によってもその形状は様々に変化する。そこで、まずは文献<sup>10) 16)</sup>で紹介されている形成要因に基づく淵の分類を参考にした上で、それぞれの形状についてまとめていく。今回は、淵をその形成要因に基づき以下の 4 タイプに分類することとした。

#### ①砂州型 (Bar type)

砂州の形成に伴い、河床が最も洗掘される部分に形成される淵。なお、河岸の状態には、「粘性土」、「砂礫」、「岩盤」、「根固め護岸」等があり、それぞれ縦横断面形状が異なる。4 タイプの中では縦断距離がもっとも長く幅の狭い縦長の平面形である。また、砂州の前縁線にあたる淵頭は急勾配であるのに対し、砂州上の淵尻は緩勾配となる。

②の蛇行型に含められることの方が多いが、ここではそもそもの河道線形が直線でもできる砂州型と、河道線形が蛇行していなければできない蛇行型を区分することとする。すなわち、砂州型の内岸にできるのは交互砂州や複列砂州であるが、蛇行型の内岸にできるのはポイントバーであるという違いである。

#### ②蛇行型 (Meander type)

河道自体が湾曲している場合、外岸の水衝部に形成される淵。岩盤によって河道線形が規定される山間部と河道が大きく湾曲した中下流部に見られる。淵の外岸部は深く流れが速いのに対し、内岸部は浅く流れが遅いという左右非対称の断面形になる。これも縦長の平面形を有する淵であり、淵頭は急勾配、淵尻は緩勾配となる。

### ③岩型 (Rock type)

河道に張り出した巨礫の周りが洗掘されてできた淵。巨礫だけでなく、橋脚、水制、張り出した植生の根の周りなどにも同様の淵が形成される。淵の形は馬蹄形になり、水深の割に縦横断距離は短く局所的な淵になる。そのため、淵頭だけでなく、淵尻も急勾配である。

### ④基底変化型 (Substrate type)

岩盤下流の滝壺や、床固め下流の淵がこれに該当する。すなわち、川底が堅い部分から砂礫床へと急変する場合に、その下流側が洗掘されてできるものである。淵の形は横断方向に長く縦断方向に短い横長の平面形となる。また、淵頭はほぼ垂直に落ち込み、淵尻はやや急勾配である。

なお、これらの他にもダム湖や堰によって堰上げられたダム湖をダム型とする場合があるが、自然状態では土砂が堆積し維持されないものであるため、今回は除外する。また、ワンド状のものが含まれることもあるが、完全な止水環境はここに含めないこととする。

## 4. 2. 淵の現地観測と注目する指標

調査の対象とした淵は、多摩川水系多摩川に形成された砂州型の淵及び同水系平井川に形成された砂州型、及び岩型の淵である。なお、蛇行型や基底変化型については今回の対象とはしない。なお、基底変化型の特徴については、既往研究<sup>17)</sup>で別途まとめている。多摩川で対象とした淵Aは、上述した河床低下が進行する区間に位置する永田地区（河口から 52km 地点付近）であり、砂州は形成されているもののあまり発達していない。また、河岸は基盤となる土丹層（更新世に堆積した軟岩）が露出した上で浸食を受けており、凹凸がほとんど無い状態で切り立って特徴である。一方、平井川は小規模な都市河川であり、固定堰や落差工が多く見られ、基底変化型の淵が多い。こうした中で、Bは砂州型の淵であり、一般的なコンクリートの法覆工で護岸されている。また、Cは小規模ながら消波ブロックでできた水制周りに形成された岩型の淵である。これらの地形及び流況について計測を行った。

これらのうち、多摩川本川の砂州型の淵 A で、出水前後の地形変化で淵の流況がどの様に変化したかを追うと共に、平井川の淵 B、C も含め、河岸の状態が淵の構造及び流況に及ぼす影響を解析することとする。ただし、淵に関しては、河床材料特性について十分なデータが取得できていないので、今回は対象外とする。ここで、流況については、魚類の生息環境の観点から評価を行うこととし、魚類調査を行うと共に PHABSIM<sup>18)</sup> と呼ばれる魚類生息環境評価手法を若干修正して適用した。PHABSIM は、水深、流速、底質等の各環境因子に対する対象魚種の適性を、作成された適性基準に基づきそれぞれ定量的に評価し、最終的にすべての評価値を掛け合わせることで、対象領域における対象魚種の棲みやすさを定量的

に表現する手法である。ここで、対象魚としては、中流域でごく一般的に見られ、生息場が地形や流況に依存するウグイ (*Tribolodon hakonensis*) を選定した。また、ウグイの水深・流速に対する適性基準としては、筆者らが作成した図 4.1 の適性基準<sup>19)</sup>を用いた。この適性基準では、過去の調査結果や文献等に基づき、ウグイ成魚の生息場には最低 30cm の水深があると設定し、それ以下の水深は幼魚の生息場として使われるとしている。さらに、水深が 30cm 以上ある場合にも、その流速によって停滞域、生息適性領域、高流速生息域、

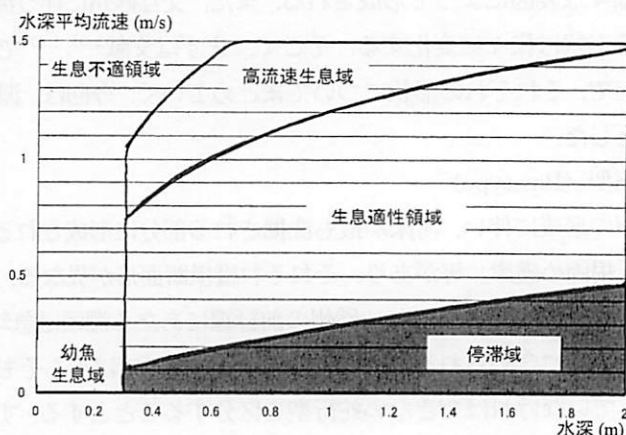


図 4.1 水深、流速に対するウグイの適性基準<sup>19)</sup>

生息不適領域という四段階に分けている。これは、一般にウグイは餌が多く供給される速い流速の領域の近くに生息する一方で、自らは定位のエネルギーを減らすために遅い流速の領域に生息するという特徴を考慮したものである。すなわち、底層付近は流速が遅く、表層付近はある程度流速のあるところが環境としては好ましく、完全に流速の遅い領域は忌避されるため、こうした流れの遅い領域を停滞域として区分している。これは、ダム等で流量が減少した区間では、ウグイが淵中央部に生息せず淵頭のみで見られるという報告<sup>20)</sup>とも合致している。また、生息に適した領域を生息適性領域と高流速生息域として区分しているが、後者は夏場等の活性が高い時期や大型魚の生息場となるのに対し、前者は多くの魚が年間を通して利用する生息場であるという違いを表現している。そして、これらに加えあまりに流速が速すぎると生息できないということを一枚の図にしたものがこの適性基準の意味である。

これら、適性基準上の各領域の境界線は、鉛直方向の流速分布が対数則に当てはまるという仮定の下で、計算を行い、例えば平均流速が速くとも底面付近には低流速が生じるという条件を考慮して作成したものであるが、実際には  $Fr$  数を一定とする水深・流速の関係と大差はなく、データの精度や簡便性を考えればこちらを用いた方が便利である。そこで、停滞域と生息適性領域の境界を  $Fr=0.1$ 、生息適性領域と高流速域の境界を  $Fr=0.4$ 、高流速域の上限を  $Fr=0.6$  として設定する。上述した通り、早瀬の  $Fr$  数は 0.4 以上であるので、早瀬の水深が深い部分では高流速域と生息不適領域が中心となり、淵や平瀬の水深が深い部分では生息適性領域と停滞域が中心となる。

#### 4. 3. 淵の地形特性と水理環境との関係

上述した通り、形成要因によって淵の平面形は大きく異なり、砂州型や湾曲型は流下方向に長い縦長形状、基底変化型は横断方向に長い横長形状、岩型は局所的である。

これらのうち、砂州型の淵の環境は、やはり交互砂州形状の影響を受ける。ただし、後述する通り、淵の水深自体に関しては河岸の影響が大きく、砂州波高自体の影響ははっきり見受けられないが、早瀬の平面形状の変化の影響が大きい。図 4.2 は、地形測量によって得られた淵 A 周辺の水際線と早瀬の位置を、洪水前後で比較したものである。この間に生じた出水により、砂州が平坦化したことで、横長型早瀬の川幅が一層広がっている様子が見取れる。よって、早瀬から淵頭へ流れ込む単位幅流量が減少することになった。この結果を、上述したウグイの適性基準を用いて評価した結果が、図 4.3 である。この様に、洪水前には生息適性領域が広がっていたものの、洪水後には停滞域へと変化している様子が見取れる。実際、淵の水深はほとんど変化しなかったが、流速が著しく低下し、洪水前は淵頭に多く見られたウグイが洪水後は減少したことも確認した。この様に、砂州形状の変化に伴う、早瀬形状の変化が、結果として淵内部の流況に影響を及ぼすことがわかる。

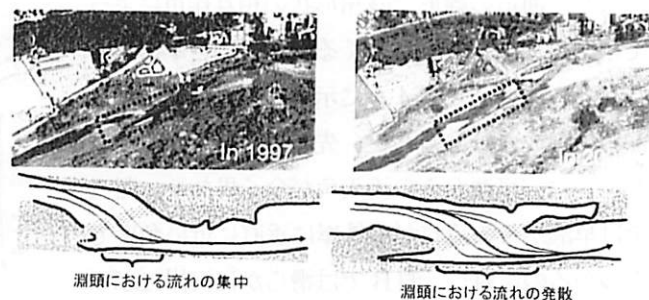


図 4.2 出水前後における淵の流れの比較

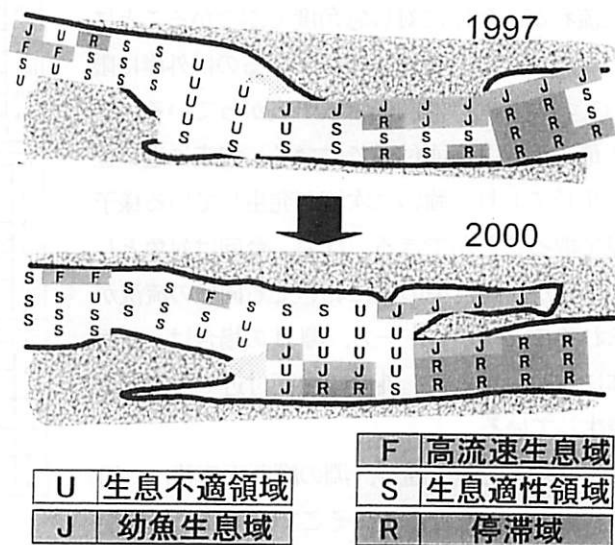


図 4.3 出水に伴うウグイの生息環境の変化

また、河道の線形と砂州形状の相互作用によって早瀬から淵へ流入してくる流れの向きが影響を受ける。例えば、図 4.4 に示す通り、緩やかな湾曲部に形成された淵 B と、先程述べた洪水後の淵 A とでは、早瀬からの流入角が全く異なり、淵 A では早瀬からの流れが淵外岸に垂直に近い角度でぶつかるのに対し、淵 B では滑らかに河岸にぶつかるため、淵内部での流れの構造が全く異なる。

すなわち、砂州が平坦化し、前縁線乗り越えてきた流れが、河岸に対し急角度でぶつかることになった淵 A では、流速が生じているのは外岸に限られており、内岸には死水域が広がっている。また、最大流速は水面付近ではなく、河床に近い位置に生じており、強い二次流が発生している様子を見て取ることができる。なお、今回は対象としていないが、蛇行型の淵においても同様の流況が見られることが多い。一方、淵 B の場合は、断面全体に流速が見られ、外岸の水面付近で最大流速が発生している。

さらに、上述した通り、淵の縦断面形状は、河岸の状態の影響を受ける。そこで、河岸に岩盤が露出した砂州型の淵 A と、典型的なコンクリート護岸がされた砂州型の淵 B と、水制が設置された岩型の淵 C のそれぞれについて、滞筋に沿った縦断面形を比較したのが図 4.5 である。淵 A では、河岸が岩盤であるものの、浸食を受け比較的直線的である。そのため縦断面形の変化は緩やかで、河岸が僅かに張り出した部分が最も深くなっている。しかしながら、護岸された淵 B の場合、急勾配の淵頭と淵尻を除き、その水深はずっと一定であり、その長さも長く、通常淵下流に見られる平瀬がほとんど見られなくなっている。また、この様な場合、先程の図 4.4 にも現れている通り、淵の横断面形状は明確な複断面形状となり、河岸に沿った部分のみが深掘れし、内岸部で河床が急に高くなるという傾向がある。同様の傾向は、別の河川を対象とした既往研究<sup>2)1)</sup>によっても報告されている。この様に一定水深の淵が長く続くのは、洪水時には根固めの高さまで侵食され、自然河岸に比して流れがあまり減衰せず、また河岸からの土砂供給もないことが原因であると考えられる。また、それと対照的なのが、岩型の淵 C であり、淵頭、淵尻共に急勾配であり、その長さは同じ河川内に形成された淵 B に比してかなり短くなっており、淵下流の平瀬は長く続いている様子が見て取れる。

#### 4. 4. まとめ

ここまで述べてきた淵の特徴を以下にまとめる。

- ・淵は砂州に起因するものに加え、河道の蛇行によるもの、河岸の突出によるもの、横断構造物や岩盤の露出によるものなどが存在するため、その形成要因によって分類でき、それぞれ形状が大きく異なる。
- ・砂州型の淵の場合、やはり砂州の発達度の影響を受ける。この場合、淵の水深自体は河岸の影響を受けるため、砂州波高自体の影響ははっきり見受けられないが、早瀬の平面形状の変化の影響が大きい。すなわち、砂州波高が減少し、横長型早瀬の川幅が一層広がると、単位幅流量が減少し、淵頭で流れが淀む結果となる。
- ・河道の線形と砂州の位置の関係によって、早瀬から淵への流入の角度が変化し、結果として淵内の流況は大きく異なる。早瀬からの流れが淵に対して垂直に近い角度でぶつかる場合は、強い二次流が生じ、内岸部には死水域が

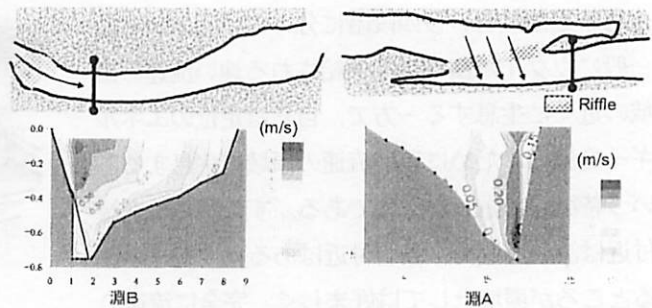


図 4.4 河道の線形と淵断面内の流速分布との関係

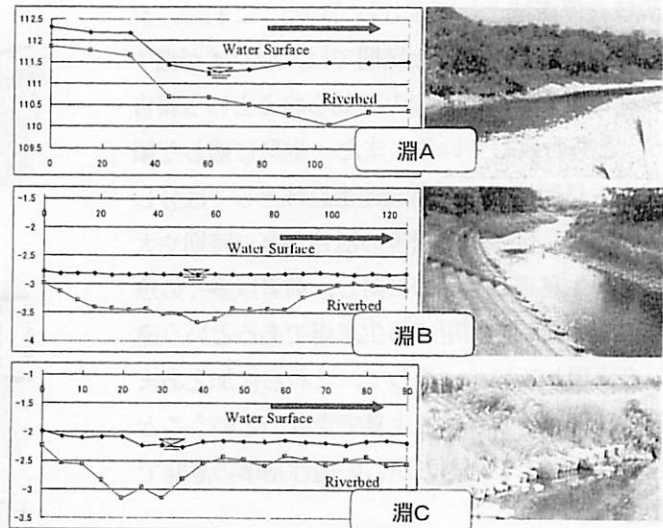


図 4.5 河岸の状態と淵の縦断面形状との関係

広がるのに対し、その角度がゆるければ淵内部全体に乱れない流れが見られる。すなわち、蛇行型の淵の場合は、前者の流況となる。

・河岸の状態によって淵の縦横断面形が大きく変化する。護岸がされていない河岸の場合、淵頭では急勾配で、その後ならかに河床高が変化するが、根固めを伴うコンクリート護岸の場合は、一定水深の淵が下流方向に長く続き、横断面形は河岸沿いのみが深掘れした複断面形となる。また、岩型の淵の場合、河岸の突出部周りだけが局所的に掘れるため、水深は深いが、縦断的な淵の長さは短くなる。

## 5. 平瀬の地形特性とその底質構造

### 5. 1. 平瀬のタイプ分け

河川中流域に見られる平瀬は、砂州に伴って形成されるものだけでなく、そもそも全く地形が形成されないような河道に見られる浅くて平坦な河床自体が平瀬と呼ばれる。すなわち、「河川改修に伴い、平瀬化した」という言葉があるように、浅くて単調な場のイメージが強い。しかし、このように地形が形成されない場の平瀬と、砂州の発達に伴い早瀬と淵の間に形成される平瀬とは、そもそも状態が異なり、後者の場合は早瀬や淵同様に、砂州の状態や周辺環境によってもその構造が影響を受けている。

そこで、地形が形成されない場の平瀬は今回対象とせず、砂州に伴う平瀬を以下の2つに分類し、その違いを見ていくこととする。

#### ①切り立ち型砂州の平瀬

砂州の前縁線が切り立った場所で形成された平瀬。外岸部のみならず内岸部も水際が切り立っており、浅瀬を伴わない。

#### ②なだらかな型砂州の平瀬

砂州の前縁線がなだらかな場所で形成された平瀬。外岸部は切り立っているが、内岸部はなだらかな斜面であり、左右非対称の横断面形となる。内岸部には浅瀬が形成され、幼魚の生息場として利用されることが多い。

### 5. 2. 平瀬の現地観測と注目する指標

対象とした平瀬は、多摩川水系多摩川の永田地区（河口から52km地点付近）、睦橋下流地区（河口から49km地点付近。図3.2中、最下流端の早瀬Eの直下）と、荒川水系入間川の柏原地区、岩沢運動公園前地区、の計4箇所である。これらの区間における平水時の流量は1～3m<sup>3</sup>/sであり、河道の規模にも大差はない。これら四箇所の地形を図5.1に示し、これらの砂州の特徴を以下順に記す。

多摩川永田地区は、河床低下が進行している区間であり、明瞭な早瀬や深い淵は見られず、上述した淵Aもこの近傍である。また本砂州は内岸部に形成されており、主流線が河原の上を乗り越えろと考えられる、なだらかな型砂州の平瀬となっている。

多摩川睦橋下流地区は、その下流に設置され

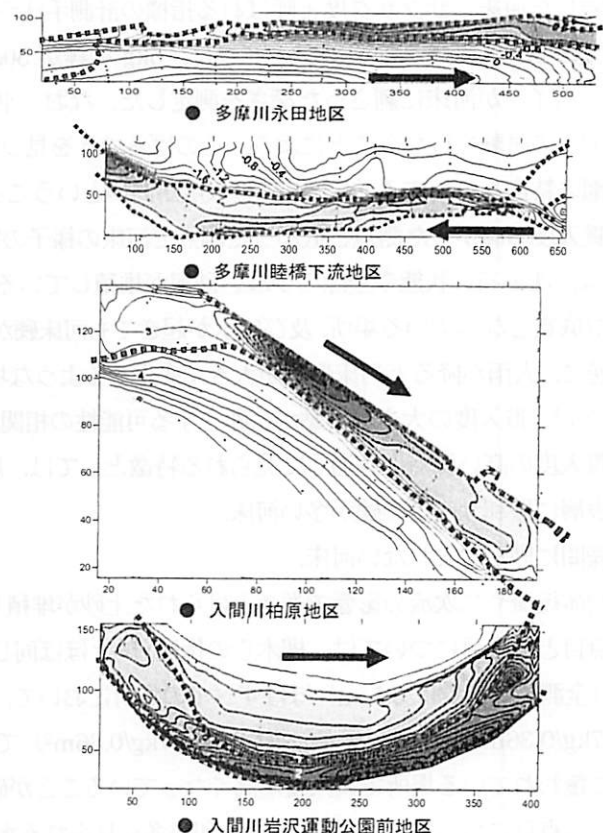


図5.1 各調査地の地形

(コンター間隔は20cm, 破線は平水時の水際)

た堰や支川の合流の影響で、河床が上昇気味で砂州も発達しており、狭窄型の早瀬が見られる。また、洪水時の流れも滞筋に集中しやすく、切り立ち型砂州の平瀬となっている。平瀬直上流は、ゆるい湾曲部の外岸にあたり、砂州型と水制に伴う岩型の複合的な深い淵（図 5.1 中最も右側の水面幅の狭い領域）が形成されているが、この水制で勿ねられた水が、内岸側の砂州にぶつかることで、上流の外岸から下流の内岸にかけて淵が形成されるという、少し変わった形状となっている。

入間川柏原地区では、河道が湾曲している内岸側に砂州が形成されている。砂州の比高は低く、横長型早瀬を伴い、多少の出水でも砂州を乗り越える流れが生じるなだらかな型砂州の平瀬である。この区間でも河床が低下しており、そもそも根固めとして設置された布団籠が、平水時の水面付近に存在する。そして、低水時の流れは、この布団籠にほぼ垂直に護岸へぶつかるために、流れが非常に乱れており、布団籠自体が根固めであり、その前面には河床を固める構造物がないため淵は深い。

最後に岩沢運動公園前地区は、河道が大きく蛇行している区間であり、出水時に生じる直線的な主流線が砂州を乗り越えやすく、水際にはなだらかな水際を有する河原が形成されている。また、淵は根固めを伴う護岸沿いに形成された砂州型の淵であるので、一定の深さまで浸食される上、それが上下流に長く続くため、平瀬においても外岸沿いだけは淵的な環境となっている。

これらの平瀬においても地形・流況調査に加え、底質調査を実施した。この底質調査では、早瀬同様の表層礫採取法を用いているが、それらを取り除いた後に、方形枠の 1/4 区画（30cm 四方）に残存する砂（ここでは、4mm 以下とする）にも注目し、この中をブラシで掃き、100g/900cm<sup>2</sup>以上を砂がかぶっている状態としたが、定量化にはやや課題が残る。そして、最後に残った砂利（4mm-3.2cm）の量については、写真から定性的に判断し考察に用いている。

このような粒度組成の調査に加え、河床の柔らかさを表す貫入度試験を実施した。この貫入度試験は槻木ら<sup>2,2)</sup>が定義した河床のザクザク度と呼ばれる指標の計測手法や、成田ら<sup>2,3)</sup>が実施した同様の調査手法に倣っている。本研究の場合、直径 2.3cm の鉄パイプに、5kg の錘が 50cm の高さから自由落下する衝撃を加えるという手法を用い、パイプが河床に刺さった深さを測定した。なお、平瀬内に均等に設定された各測点において、近接する 4 箇所でのこの試験を行なうことにより、そのばらつきを見つづ、それらの平均値を貫入度と定義した。

平瀬の特徴を解析する前に、この貫入度が高いということが、どのような河床構造を表しているのかを確認するため、貫入度の高かった測点と低かった測点で河床の様子を写真と比較することから始めた。なお、槻木らの研究<sup>2,2)</sup>では、沈み石の状態や空隙の少ない砂泥が堆積している場所、石、巨石などが砂の中に埋まっているような不均質な底質となっている場所、及び出水が起きても河床礫があまり移動しない場所で貫入度が低くなるとされており、逆に、大雨が降ると河床形態が大きく変化するような場所では貫入度が高いとされている。また、成田らの研究<sup>2,3)</sup>では、貫入度の大きさと鮎が産卵をする可能性の相関関係が確認されている。一方、筆者らの解析<sup>2,4)</sup>によっても貫入度の高い測点に共通して見られる特徴としては、以下の点が確認された。

- ・表層に砂利サイズの礫が多い河床。
- ・礫間に砂が含まれない河床。
- ・物体後流や二次流の影響で巻き上げられた土砂が堆積した河床。

一点目と二点目については、槻木らの指摘<sup>2,2)</sup>とほぼ同じである。まず、一点目について、貫入度が 5cm を越える（全測点の平均は 3.5cm）ほぼすべての場所において、表層には大礫が全く見られず、中礫以上の礫の合計重量が 7kg/0.36m<sup>2</sup>未満（全測点の平均は 18.7kg/0.36m<sup>2</sup>）であるという結果となり、表層がこれらよりも小粒径のもので覆われている場所で貫入度が高くなっていることが確認できた。

次に二点目について、比較的表層に砂利が多く見られる水際の測点において必ずしも貫入度が高いわけではなく、礫間に砂が多く含まれるような環境では、貫入度が低くなっていた。

さらに三点目について、堆積の形態も貫入度に影響を与えている。例えば、掃流されてきた砂利や砂が限界掃流力を下回る場で停止していれば、早瀬の底質構造の説明でも述べた通り、より細かい粒子が抜け落ちつつ、ある程

度締め固まるが、逆に物体後流で巻き上げられた後沈降したものは、非常に緩い状態で堆積する。すなわち、砂や砂利の堆積には、①水面幅の急拡や早瀬から淵への落ち込みなどにより場の掃流力が限界掃流力を下回ることによって、停止する場合と、②二次流等の影響で浮遊砂状態にある土砂が、流量の低下や湾曲の内岸部や植生域等の緩流部に取り込まれて堆積する場合、の二種類が存在するが、後者の方が貫入度は高くなる。例えば、実際の平瀬河床において貫入度が3cm程度であった砂利の堆積場を選定し、その河床をかき乱した後、もう一度貫入試験を行うと、貫入度は7cmまで上昇することを確認している。また、テトラポットの下流側で洪水時に生じた巻き返しにより砂利が堆積している箇所では、貫入度が34.5cmとなり、他の観測点での最大値12cmを大きく上回ったが、粒度分布には特に差が見られなかった。このように、仮に同じ粒度分布であったとしても、一般的な河床に見られる堆積形態の①に比べ、蛇行あるいは構造物等の影響により巻き上げられて堆積した堆積形態②の方が貫入しやすくなることが確認できた。また、こうした違いは、出水後の期間と河床構造の関係にも表れる。洪水直後は比較的貫入度が高くなるような軟らかい河床が多く見受けられるが、徐々に砂が抜け落ちていくことで、河床も堅くなっていくという特徴がある。

### 5. 3. 平瀬の地形特性と底質構造との関係

全地点における河床状況を観察したところ、平瀬の河床としてはおよそ下記の三種類に区分できる。

- (1) 中礫以上の粗粒の礫が表層を覆っている状態
- (2) 中礫と砂利が混ざり合って堆積している状態
- (3) 砂利のみが堆積している状態

さらにこれらの状態で礫間に砂がつまるかつまらないかを考慮すると、およそ6種類の状態に分類できる。図5.2には、多摩川陸橋下流地区、入間川柏原地区、入間川岩沢運動公園前地区における平瀬部分（全区間図5.1に示した範囲のおおよそ下流半分）を抜き出し、底質の状態を上記三段階に分類すると共に、砂の堆積状況を表したものを模式的に示し、図には貫入度が高い地点も示してある。なお、河床低下の進む永田地区は、他と傾向が異なるため後ほど示す。

多摩川陸橋下流地区では、すでに述べたとおり外岸側（左岸側）の水制ではねられた水が内岸側（右岸側）にぶつかり、こちらでも淵を形成しているため、断面5～8の右岸部が淵尻に該当する。ここでは、淵からまっすぐ下流向きに流れ出てきたと見られる砂が、砂利帯の隙間に堆積している。断面6から下流では、滞筋沿いに中礫が少し混ざり、右岸部では砂利だけとなっている。上述したとおり、砂利の量が他の地区よりも多いのが特徴である。貫入度に関しては、砂混じりの砂利帯では低く、滞筋側の中礫混じりの砂利帯で高くなっている。

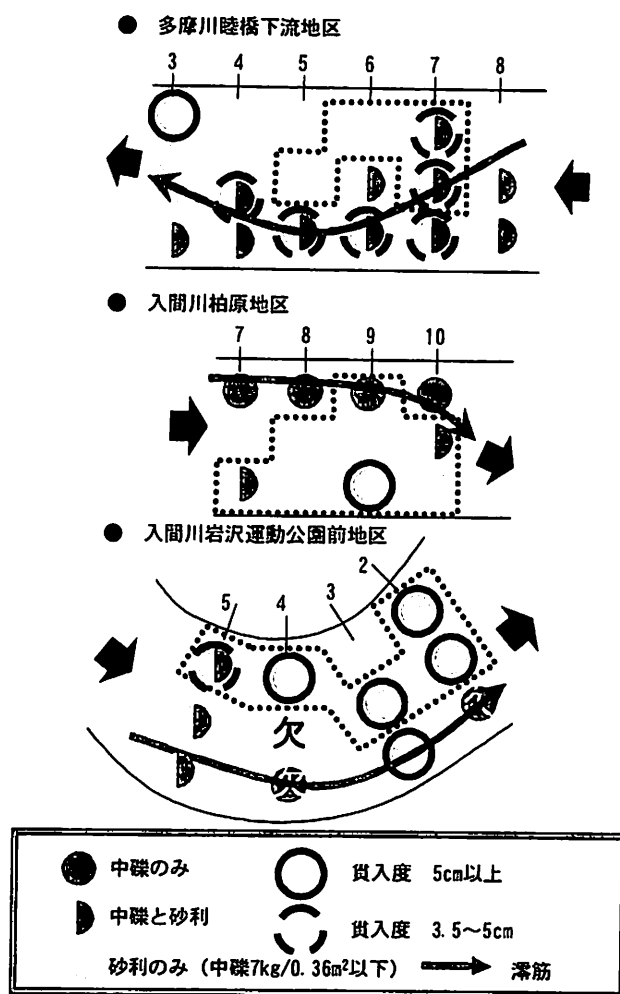


図5.2 三地区の平瀬における分級と貫入度  
(点線の部分は砂をかぶっている場所であり、岩沢運動公園地区の「欠」は貫入度試験が実施できなかった地点。)

入間川柏原地区では、睦橋地区に比べれば砂利の総量が少なく、護岸に沿った滞筋では砂利が見られず、中礫が浮き石状に積み重なっている。しかし、右岸側水際部では、睦橋同様に砂利がまとまって堆積している。ただし、砂利の堆積場において、睦橋と大きく異なるのは、砂が全体的に広く堆積している点である。結果として、中礫ばかりの滞筋でも、砂のつまった内岸部でも貫入度は低く、全体的に堅い河床となっている。

最後に入間川岩沢運動公園地区では、柏原地区同様、護岸に沿って中礫の浮き石帯が多く見られ、内岸部は砂利に砂が混ざった状態である。ここで、中礫の浮き石帯の部分については、淵的環境である上計測も困難であったため対象としていないが、内岸部に関しては、砂利の隙間に砂が含まれているにもかかわらず、貫入度は他の二地点よりも大きくなっていた。

これらの違いが生じた原因として、平瀬内の砂利の分布とその脇にある河原形状の関係について考えることから始める。ここで、砂州の形状については既に述べたとおり、切り立ち型となだらかな型が存在するが、これらの大きな特徴の違いとして、増水時の流況があげられる。そこで、River2Dと呼ばれる2次元不等流計算プログラムを用い、出水時の流速分布と、その時に2cm以下の砂利が動くと考えられる範囲を可視化したものが図5.3である。ここでは、簡単のため、睦橋下流地区と柏原地区の結果のみ示している。まず、河原が発達し、切り立ち型砂州の睦橋下流地区では、流量が多少増加しても、水域の範囲はほとんど変化しない。よって、小出水程度では、上流から流下する砂利や砂が河原に乗り上げることはなく、淵から平瀬の内部に堆積していると推察できる。そして、平瀬の滞筋に沿っては掃流力が高くその他では低いため、水際部付近では細かい砂利や砂が堆積しており、滞筋に沿っては一部中礫混じりの砂利になっている。一方、柏原地区をみると、増水時の主流線が平水時の河原を乗り越えている様子が見て取れる。そのため、ちょっとした出水でも、河原の上の細粒土砂が移動する状況が生じると考えられる。すなわち、睦橋下流地区では水域内だけで分級が生じていたのに対し、柏原地区では平水時の河原上まで含めて分級が生じ、砂や砂利は河原の上にも乗り上げており、滞筋に沿っては中礫のみの河床となっている。もう一つの特徴としては、睦橋下流地区と異なり、柏原地区では、掃流力が淵部で大きくなっている点が挙げられる。これは、柏原地区の河岸が根固めの布団籠であり、その前の河床が深く洗掘されて幅も狭くなっているためであり、実際に図5.4に示す通り、睦橋下流地区の淵に比して、柏原地区の淵の方が大粒径の礫で河床が構成されている。

また、岩沢運動公園前地区の流況に関しては、基本的になだらかな型の柏原地区と同様であると考えられるが、大きな違いとしては、蛇行の影響が挙げられる。洪水時には強い二次流が生じ、外岸部の砂利や砂が巻き上げられ、内岸部に堆積すると考えられ、他の平瀬内岸部とは堆積の形態が異なるため、締め固まっていない状態で砂利が堆積し、結果として貫入度が高くなったと思われる。

次に平瀬内の砂の分布と周辺環境の関係について考える。砂は平水流量より少し多い流量で充分移動できるため、植生の背後や砂州の下流端を除き、砂利の堆積場に比べて比高の低い滞筋側にまとまって堆積していることが多い。ここで、図5.2に示した睦橋下流地区の場合、掃流力が小さく、内岸側に形成され二次流の影響も小さい淵に堆積

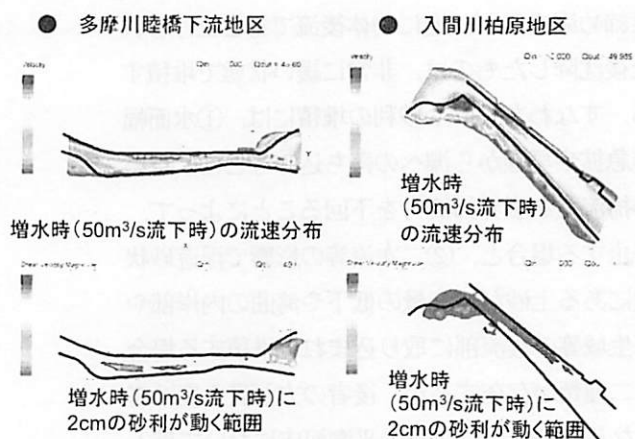


図 5.3 切り立ち型砂州（左）となだらかな型砂州（右）の洪水時流況の違い

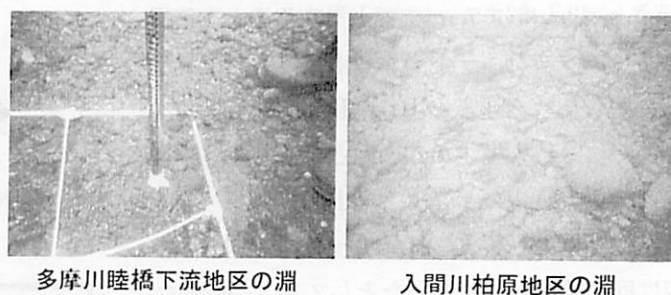


図 5.4 護岸のない淵（左）と護岸のある淵（右）の底質

した砂が下流へと帯状に流れ出しているために、砂の堆積場は量的にも面積的にも規模は小さめである。しかし、柏原地区の様に、護岸等の影響で淵の掃流力が高くなっており、さらに淵の項でも述べたように流れが護岸に垂直に近い角度でぶつかる場合は、洪水時だけでなく平水時にも、淵内部に強い二次流が生じており、低い流量によっても砂が淵底から巻き上げられる。結果として、砂は淵に堆積せず下流側内岸部の広範囲に堆積している。

以上の結果をまとめると、まずなだらか型の砂州の場合は、砂利が平水時の陸域に堆積しやすく、切り立ち型の砂州の場合には、平水時の水域に堆積しやすいという違いがある。そして、砂に関しては、いずれも平水時の内岸部周辺に堆積する。これを模式的に図 5.5 に示す。ここで、砂と砂利が重なると貫入度が低くなりがちで、砂利のみが堆積している所で貫入度が高くなる（図 5.2 の陸橋下流地区および柏原地区）。さらに、護岸の影響で淵内の掃流力が強められている場合や、特に流れが河岸にぶつかり強い二次流が発生している場合には、砂が淵に堆積しにくく、平瀬における砂の量が増加する。ただし、陸橋下流地区も護岸前の淵ではあったが、水制の影響で淵が内岸側へと延びており、砂は内岸部の淵に堆積できるため、平瀬への影響が少なくなっていた。なお、湾曲の影響で洪水時にも大規模な二次流が発生する場合は、砂利もまた淵から巻き上げられ、平瀬内岸部に緩い状態で堆積するため、砂利と砂が混ざっていても貫入度が比較的高くなると考えられる。これらを模式的に示したものが図 5.6 である。

最後に、河床低下による河床の粗礫化が見られる永田地区での調査結果を分析する。まずは、図 5.2 同様に永田地区における砂利の分布を模式的に示したものが、図 5.7 である。ここからわかる通り、永田地区の平瀬には大礫が点在している。これは、アーマー化した底質が滞筋沿いに露出していることを表している。永田地区はなだらか型砂州の平瀬であるので、こうした滞筋沿いには砂利の堆積が見られない。結果として、内岸にあたる右岸側では貫入度が高い場所もあるが、滞筋沿いの貫入度は低い。また、右岸側に砂の存在が確認されているが、これは深い淵が形成されていないために、砂が貯留されないことが原因である。それにも関わらず上流半分の右岸側の貫入度が高くなっているのは、ちょうどこの対岸が水衝部であるためであり、そもそも河床低下がなければこの上流半分の左岸側が淵、右岸側が浅瀬となっていたはずである。すなわち、平瀬と言うよりは淵の性質に近いものが、河床の平坦化に伴い平瀬の一部になっているのが原因である。早瀬、淵、河原は交互砂州が形成されて初めてできるものであるのに対し、そもそも地形が形成されないような環境も平瀬と呼ばれるが、これまで見てきたことを考えると、河床の状態は大きく異なることがわかる。

#### 5. 4. まとめ

ここまで述べてきた平瀬の特徴を以下にまとめる。

- ・貫入度が高いのは、中礫以上の礫が表層にあまり存在せず、砂利程度の粒径のみが、礫間に砂分をあまり多く含まない状態で堆積している底質構造である。

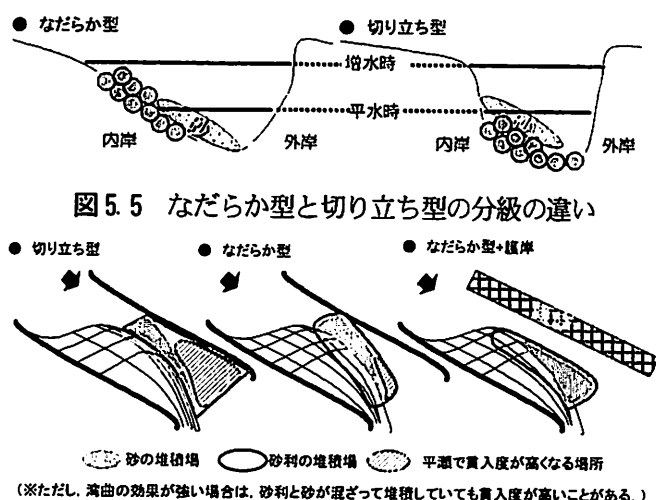


図 5.5 なだらか型と切り立ち型の分級の違い

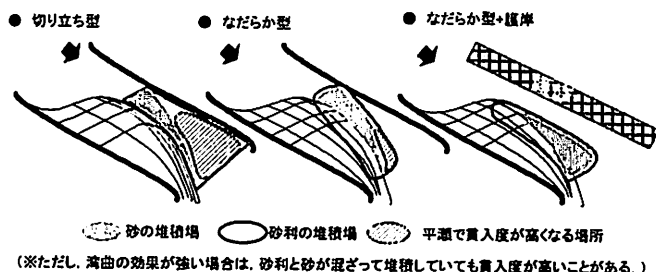


図 5.6 平瀬の貫入度と分級の関係

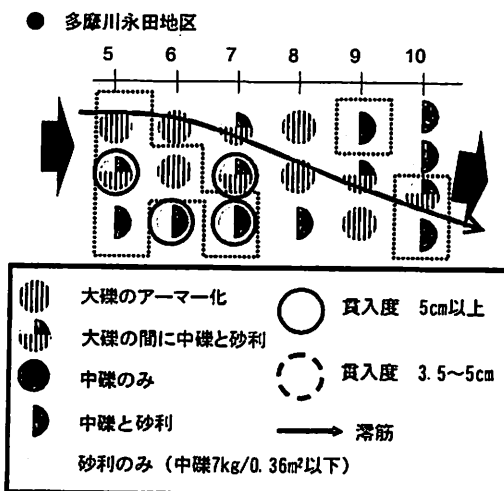


図 5.7 多摩川永田地区の平瀬における分級と貫入度

・砂や砂利の堆積メカニズムには、場の掃流力が限界掃流力を下回ることによって停止する場合と、二次流等の影響で浮遊砂状態にある土砂が、流量の低下や湾曲の内岸部や植生域等の緩流部に取り込まれて堆積する場合、の二種類が存在するが、仮に粒度組成が同じであっても後者の方が河床は軟らかい。

・平瀬内の砂利の量には、河原の形状が影響を与えている。なだらかな型の砂州の場合はちょっとした出水でも主流線が河原に乗り上げ、砂利はむしろ河原の上に堆積しがちであるが、切り立ち型の砂州の場合は平水時の水域内にすべて留まるため、平瀬内の砂利の量が多くなる。

・河道が大きく湾曲している場合は、砂利が巻き上げられて堆積するため、平瀬内岸部の砂利堆積場は、砂が混じっていても貫入度は高い。

・平瀬内の砂の量と分布には、その上流にある淵の状態が強く関係している。護岸等の影響で淵の掃流力が高くなっている場合、淵の中に強い二次流が生じている場合、あるいはそもそも淵が存在しない場合は、平瀬に大量に砂が堆積しやすい。しかし、乱れが少なく砂が淵底に沈降しやすい場合は、平瀬中に帯状の砂の堆積場ができる程度で、量的にも少ない。

・河床低下が進行すると、河床でアーマー化が生じ、貫入度は低くなる。

## 6. 河原の地形特性とその底質構造

### 6. 1. 河原のタイプ分け

河川中流域に見られる河原も砂州の形成に伴って形成される。そのため、河原に関しては、砂州のタイプ分け通りであり、以下の二つに分けることができる。

#### ①切り立ち型砂州上の河原

#### ②なだらかな型砂州上の河原

ただし、中には上流がなだらかな型で下流が切り立ち型というものも多い。これは、例えば湾曲部のやや下流側の内岸で、洪水時の主流線が河原の上流部を横切るような場合に見られる。ただし、後述するように、発達途上の砂州の場合、やや不規則な形状を表す場合も多い。さらに、ここでも砂州の発達度は、河原の水面からの比高を規定するため、重要な要素である。

### 6. 2. 河原の現地観測と注目する指標

対象としたのは、多摩川水系多摩川永田地区および熊川地区、多摩川水系浅川、荒川水系入間川の中流部に位置する河原である。これらの形状は大きく異なっており、多摩川熊川地区は、3.2.で述べたあまり発達していない砂州であり、砂州波高が低く横長型早瀬（図3.2の早瀬D）を伴うなだらかな型の砂州であるが、河原の上流半分から下流部水際付近にかけて高くなっており、下流半分の河岸側が少し低く溝状になった不規則な形状の河原である。多摩川永田地区はこれまでも述べてきた通り、河床低下の進む区間のなだらかな型の砂州上にあり、入間川及び浅川は切り立ち型の砂州上にある。ただし、入間川では、上流の方がなだらかな横断面形状になっているのに対し、浅川では、全体的に切り立ち型である。

これらの各調査地区において、地形測量、底質調査を実施した。底質調査では、河原上に設けられた複数の測点において、表層礫採取法で用いる60cm四方の枠を設置した後、その内部の礫の状態を写真撮影し、約10cm以上の礫と約2mm以下の砂のそれぞれの有無に基づき四種類に分類することで、河原全体での分級を簡略化してまとめた<sup>25)</sup>。次にその枠内に存在する表層礫を採取する際には、16mm以上のすべての礫を「表層礫」として暑かった。これは、水中の場合、水生昆虫や魚類のすみ場を想定して、空隙がある程度大きくなる粒径を対象としたが、陸上の場合、これら表層礫の下層にある細粒土砂に含まれる種子が発芽するか否かが重要になると考え、少し小さめの粒径を対象としたためである。

また、これらに加え、河原の構造をイネ科植物の定着状況から評価することとし、イネ科植物を対象としたベルトトランセクト調査を行った。すなわち、砂州形状とその上の底質構造の違いを、その上に見られる植生分布から把握するのが目的である。なお、ここで言うイネ科植生とは、多摩川熊川地区では越年生の一年生草本であるネズ

ミムギ (*Lolium multiflorum* Lam), 浅川では一年生のメヒシバ (*Digitaria adscendens*) のみを対象としており, 多摩川永田地区, 入間川ではまだ植生が成長しておらず, 同定できなかったため, イネ科と見られる特定の株のみを対象としたが, いずれも同様の繁茂形態を示すことから今回はイネ科植生としてまとめている。ただし, 生理, 生活史は異なるため, より詳細な検討が必要である。ベルトランセクト法は, 2m×2m の方形枠を 2m ずつずらしその内部の植生を調査するもので, 結果として河原上に引いた断面上を 2m の幅を持たせて隙間なく調査したことになる。調査では, まず真上からの写真撮影により方形枠内に存在する全植生を対象とした植生被度を把握すると共に, イネ科植生の平均高さを測定した。次に, 枠内のイネ科植生株数を数えている。なお, 前者は, 植生の成長しやすさを表しており, 後者はイネ科植生種子の漂着数と発芽率が複合したものを表していると考えられる。

さらにこれらの現地観測結果のみでは, 植生が存在しない場所の制約条件が, 種子の漂着数なのか発芽条件なのかを分離することが難しい

ため, 植生種子の漂着については水理実験を行うことで, 河原上の洪水時の流れと種子の漂着数の関係を把握することとした<sup>26)</sup>。ここでは, 現地観測によって得られた地形データをもとに, 平面的に約 1/200 縮尺 (調査地区によって多少異なる) の模型を作成した (図 6.1)。ただし, 高さ方向には約 1/50 程度となり, 地形の凹凸が強調されたひずみ模型であり, 水路の幅は 1.2m, 勾配は 1/100 である。次に, 浮いているイネ科植生種子の代わりに, 模型等に用いられる細かい粉を用いた。この粉は, 完全に水に浮くもので, 実験中は上流から供給し続けた。さらに, 模型の上を流す流量は, 河原全体が水没する流量 (10l/s) から 15 分かけて完全に水面から出る流量 (3l/s) まで下げている。

### 6. 3. 河原の地形特性と底質構造・植生分布との関係

まず, 河原の形状が複雑で, 種々の漂着パターンを確認することができると考えられる, 多摩川熊川地区を対象として調査結果の検討を行う。この調査地区の砂州の地形をその分級状態と共に図 6.2 に示す。上述したとおり, 上流側の水面からの比高は下流側に比べて全体的に高く, 上流左岸側から下流右岸側に向かって一本の尾根が通っている。また砂州上流側 4 つの断面における底質は, 細砂が一切含まれず, 粗めの材料のみであるのに対し, 下流側 2 つの断面は全体的に細砂で覆われている。

この河原上では, 大半の領域でネズミムギは 3 株/m<sup>2</sup> 以下であるにも関わらず, 一部の領域のみそれ以上の密度で繁茂しており, 最大 13 株/m<sup>2</sup> 程度が確認された。この比較的密に繁茂している領域 (ピークゾーン) は, 図 6.2 に示すとおり, 上述した尾根の左岸側に沿うような形で線状に延びている。

次に, この地区の増水時の流れの特徴を水理実験で確認したところ, 洪水の減水期には, まず河原上流側の比高の高い部分から尾根沿いが露出し, 下流側では河原の頂部を回り込むように右岸から左岸に向かって流れ始め, その後上流から徐々に尾根の干出部が広がっていった (図 6.3 a)。その状況は出水時の植生の倒伏状況や二次元の

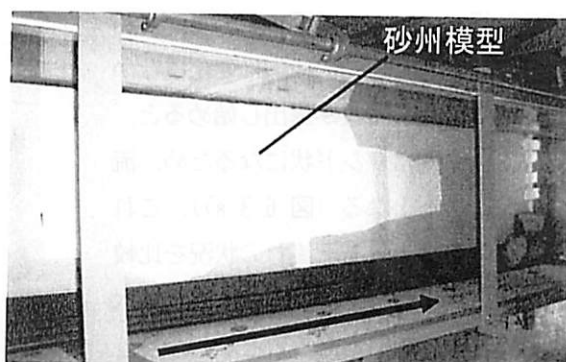


図 6.1 水理実験で用いた砂州の模型

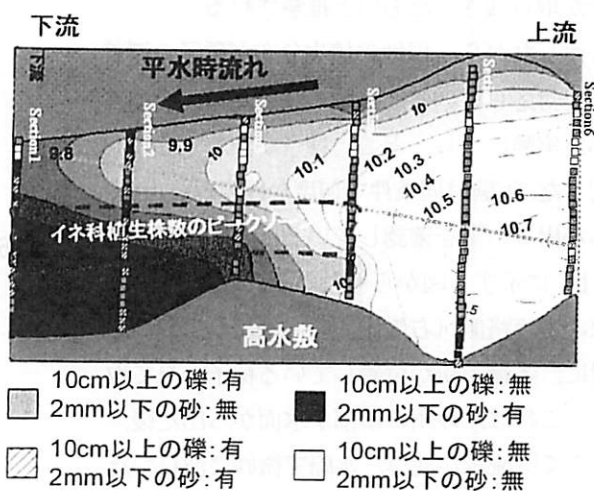


図 6.2 多摩川熊川地区における砂州地形と分級  
(コンター間隔 10cm)

非定常数値解析によっても確認しているが、ハイドログラフを変えてもこの傾向に変化はなかった。ここで、上流から尾根が露出し始めると、河原下流部の左岸側はワンド状になるため、流れはここで淀むこととなる（図 6.3 a）。これら、現地における植生分布と流れの状況を比較すると、ネズミムギのピークゾーンは洪水減水期に流れが淀む場の脇にあたることがわかり、淀んだ領域で徐々に水が引く際に、その水際に種子が取り残されたものと推察される。

しかしながら、現地の植生分布が種子の漂着分布と対応しているとは限らないため、模型を用いた実験により、どこに種子が漂着するかを確認した。実験は同条件で何度か繰り返す行い、違いが出ない事を確認している。この結果を図 6.3 b) に示す。図からもわかるとおり、まず、河原の主流路側（右岸側）の水際より少し高い位置に、多量の粉が付着している様子が見て取れる。これは、砂州の頂部が水面から出た後、しばらくは流れが淀み、水際に微妙に波打つため、ここへ漂着したものである。また、左岸側の砂州頂部下流のくぼみでは、水位が低下し砂州頂部が出た直後に完全に流れが止まり、その後流れのない状態で徐々に水位が低下するため、種子の流れの止まった時点での水際に漂着したものである。すなわち、後者の分布は現地で把握したネズミムギのピークゾーンと一致している。

ただし、図 6.2 に示す現地観測結果と比較すると、左岸側の淀み脇に見られる帯状の植生分布は比較的うまく再現されているものの、現地で主流路側に見られたネズミムギはごく僅かであり、観測範囲には含まれていない上流の早瀬脇に少し固まって存在するのみであった。ただし、実験で粉が漂着した主流路側の領域は、現地においてゴミや枯れ枝などの漂着が見られた位置とも類似しており、流下物が漂着しやすいことは確かであると思われる。

この様な違いが生じた理由としては、①実際には種子がそこまで輸送されていない、という可能性と、②実際にも種子は漂着しているのだが、発芽できる状況になかった、という可能性が挙げられる。①に関しては、洪水の減水期には、上流の早瀬脇では大きな礫の間を縫うように流れていることから、ここで種子が引っかかっている可能性が考えられ、実際、図 6.4 に示すように早瀬に並行に形成された幾筋かの溝に沿ってネズミムギが一直線に並んでいることが多いことも、その可能性を裏付けている。また、砂州の模型上の早瀬に該当する部分にガーゼを装着し、そこで流れが少し伏流するよう工夫をすれば、そこで粉が早瀬で濾し取られてしまい、主流路側の水際には全く粉が付着しなかった。②に関しては、発芽に必要な条件である、水分条件、光条件が河床材料の状態で制限されてしまった可能性が考えられる。実際、すでに成長したネズミムギだけを観察しても、上流と下流では植生の成長度が異なり、植生株数がほとんど変わらないものの、ピークゾーンの上流部では、全体の植生被度が低く、ネズミムギの高さが平均して 70cm 程度であるのに対し、下流部では、植生被度が高く、ネズミムギも 100cm 以上に成

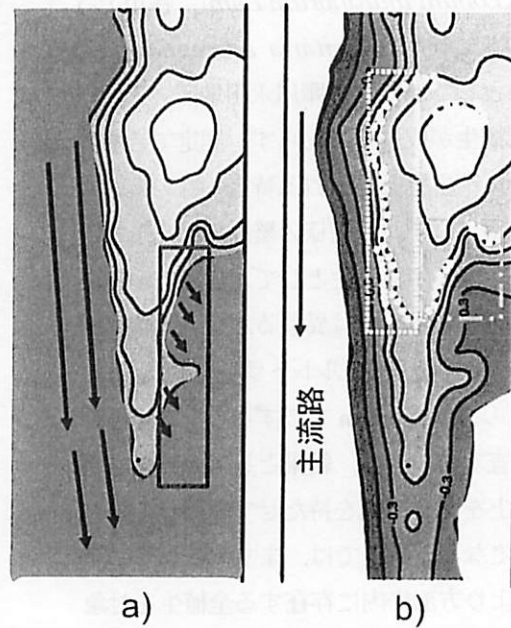


図 6.3 a) 砂州模型上の減水期の流れと b) 粉の漂着



図 6.4 早瀬の脇で筋状の溝に沿って繁茂する植生

長しており、条件は河原の場所によって大きく異なることがわかる（図 6. 5）。そこで、植生株数と表層礫厚さの関係を調べた所、16mm 以上の礫の総重量が  $5\text{kg}/60\text{cm} \times 60\text{cm}$  を超えると、ほとんどネズミムギが見られないということも明らかとなった（図 6. 6）。この 16mm 以上の礫の総重量が  $5\text{kg}/60\text{cm} \times 60\text{cm}$  以上のデータは、河原の上流半分に集中しており、それは、全く植生が繁茂してない場所と対応している。ただし、仮に礫間に細粒分がつまっており、表層礫厚さが薄かったとしても、株数の少ない所が存在しており、当然底質だけでも説明はでき

ない。このような状況を考えると、種子が河原上に漂着したとしても、その漂着場の表層礫厚さが厚く、種子にとって十分な光・水分条件を満たしてない場であれば、種子は発芽すらできないものと考えられ、主流路側の水際もやはり表層礫が厚く、条件的には悪いため、漂着してはいるが発芽できずにいる可能性も否定できない。この様に、ここではどちらが卓越しているかを見出すことはできなかった。

このように、ネズミムギの種子が漂着するタイミングは、河原の比高の高い部分が突出した

後から平常時の流量に下がるまでの、洪水減水期であると考えられる。すると、河原のどの部分が洪水後最初に水面から出るのが、流れが淀む場を規定し、最終的な植生分布に大きな影響を与えていると考えられる。そこで、河原の形状が異なる他の地区においても同様の現地観測及び模型を用いた水理実験を行い、その結果について考察する。

#### （1）典型的ななだらか型砂州上の河原の場合（多摩川永田地区）

図 6. 7 に結果を示す。この場合、現地で見られた植生分布と水理実験結果の粉の付着位置はほぼ一致している。このような形状を有する河原の場合、まず砂州の中央部が水面上に現れ、全体的に徐々に水位が下がっていく。この際に、河原中央部からどの方向を向いても、水際まで緩やかな斜面が続いているため、減水の過程で淀む場が形成されにくい。そのような状況にあって、唯一流れが淀むのが砂州上流端であり、下流に存在する高まりのために流れが多少淀むことになる。ここでは底質の条件も悪くなかったために、発芽したものと考えられ、その分布はやはり線状である。

#### （2）切り立ち型砂州ではあるが上流部がややなだらか型砂州の性質を持つ河原の場合（入間川）

図 6. 8 に結果を示す。この場合も現地、水理実験共に、砂州の上流端で植生繁茂又は粉の漂着が見られ、多摩川永田地区と同様のメカニズムであることが確認された。しかしながら、水理実験では砂州の下流部水際にも漂着が見られる。これに関しても、多摩川熊川地区同様、ガーゼを張り付けた早瀬効果の検討と、漂着場における礫構造の検討の両方を行ったが、やはり早瀬の部分にガーゼを張り付けると漂着は上流のみとなり、漂着場における表層礫総重量も  $5\text{kg}/60\text{cm} \times 60\text{cm}$  を大きく超えている地点であったために、ここでもどちらが効いているのかを判断することはできなかった。

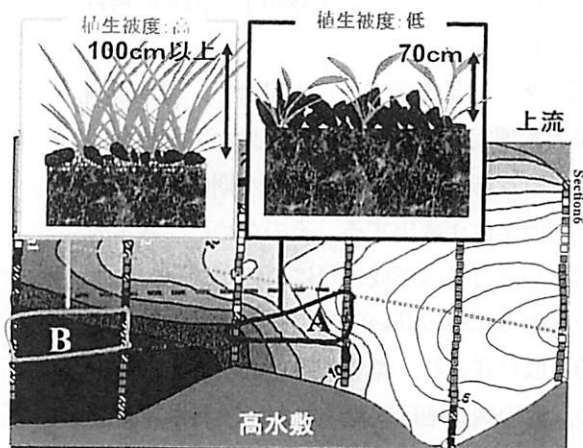


図 6. 5 ピークゾーン上下流での植生繁茂状況の違い

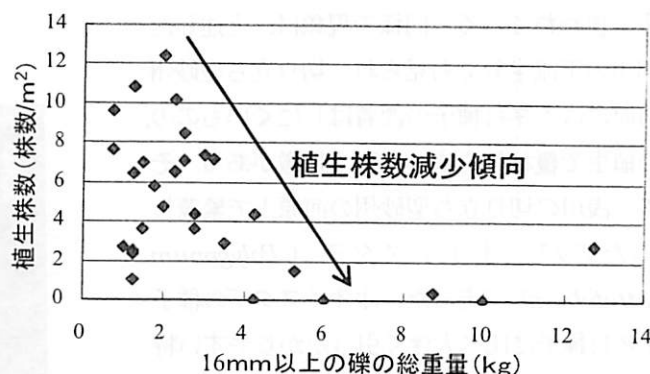


図 6. 6 表層礫の厚さとイネ科植物の株数の関係

### (3) 典型的な切り立ち型砂州上の河原の場合 (浅川)

図 6.9 に結果を示す。この場合も、現地観測結果と水理実験結果で同様の結果が得られた。このような形状の場合、洪水減水期の途中で一気に河原全体が露出する。そのために、基本的に流れが淀む場は形成されにくい。が、一気に水面から出る比高の高い部分の一部には、種子が面的に取り残され、漂着することがある。そのため、他の調査地区で見られたイネ科はライン状に繁茂しているにも関わらず、このような河原形状では、面的に繁茂することとなる。しかし、このような河原では、実際は河原一面が他の植生で覆われている。同様の現象は、上述した入間川の下流半分でも見られ、切り立ち型砂州の河原にはイネ科種子の漂着はしにくいものの、他の植生で覆われやすいという特徴がある。そして、浅川の切り立ち型砂州の河原上で繁茂していたのが、オオイヌタデ (*Polygonum lapathifolium*) であった。オオイヌタデの種子はイネ科種子に比べ大きく引っかかりやすい特徴があるため、漂着の過程が少し異なっている。オオイヌタデは、このように河原全体に面的に分布することもあれば、水際に沿って繁茂していることも多く、イネ科とは異なったメカニズムで種子が定着している。この詳細なメカニズムについては、本論文では割愛する。また、経年的に観察すると、まずオオイヌタデで覆われた河原は、その後大きな攪乱を受けなければ、徐々に異なる植生へと遷移が進んでいくようである。

#### 6. 4. まとめ

ここまで述べてきた河原の特徴を以下にまとめる。

- ・ 水に浮いているイネ科植生種子は、洪水減水時に砂州の頂部が水面からでた際に、流れが淀む場の脇である。そこで、徐々に水位が低下する過程でその水際に漂着する。
- ・ 河原において淀みができるか否かは、河原の高まりの位置がどこにできるかに大きく左右される。
- ・ その漂着場の表層礫層さが厚く、種子にとっ

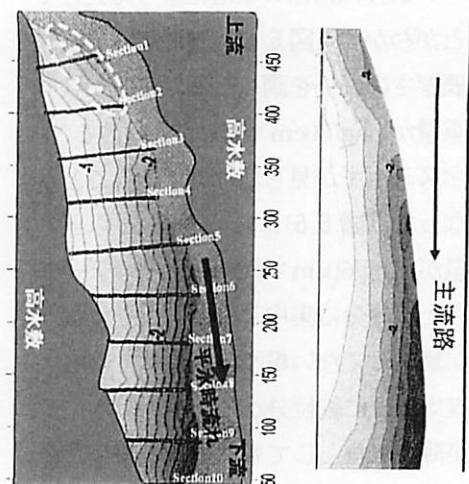


図 6.7 多摩川永田地区における植生分布 (左) と漂着実験の結果 (右)

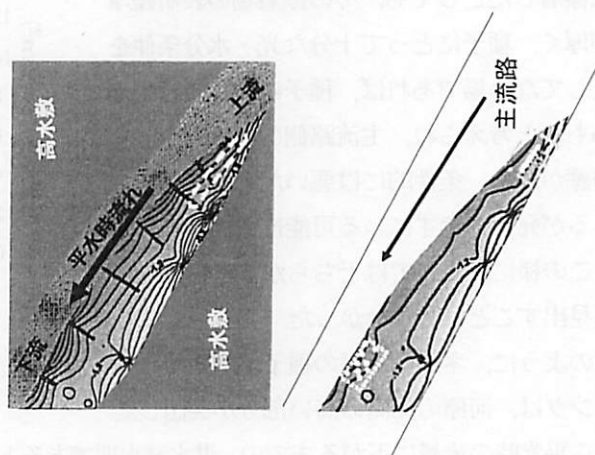


図 6.8 入間川における植生分布 (左) と漂着実験の結果 (右)

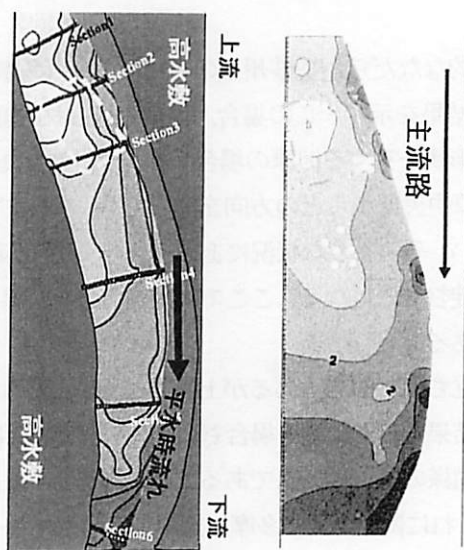


図 6.9 浅川における植生分布 (左) と漂着実験の結果 (右)

て十分な光・水分条件を満たしてない場であれば、種子は発芽することができないと考えられる。実際、発芽していても成長は悪い。

- ・早瀬の脇におけるこしとりの効果が水際の種子漂着数を左右している可能性がある。
- ・全体的に比高の高い切り立ち型砂州上の河原では、イネ科種子は一部に面的に取り残されるだけであるが、オオイヌタデ等は全面的に定着しやすい。一方なだらかな型砂州上の河原では、淀みができにくく、植生が着きにくく、局所的に線状に分布する程度である。

## 7. おわりに

洪水時の流況と、流下する土砂の量と粒度組成、及び護岸や横断構造物と河道線形が複合的に作用することにより、河川中流域には様々な形状の砂州が形成される。そして、砂州の形状が異なれば、その上に形成される早瀬、淵、平瀬、河原の構造が異なる。そして、これらの構造が異なれば、その内部の流況や底質の分級構造もまた異なり、結果として、その中で暮らす生物相に影響が及ぶ。このような一連の相互作用系が解明できれば、現在目の前にある河相は、どの様な影響を受けているのか、本来どの様な姿であったのか、何をすればどの程度人為的な影響を緩和できるのか、が見えてくるのではないかと考え、これまで述べてきたような研究を行ってきた。ただし、注目してきた河川の特性はあくまでも限られた範囲の、限られた期間の状況に過ぎない。今後も、様々な流域で、これまでまとめて来た内容を確認しつつ、場合によっては修正し、生息場スケールを考慮した河道特性の解明を続けていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，1994.
- 2) 島谷幸宏，高野匡裕：多摩川永田地区における学術研究と河道修復（順応的管理の実践と課題），河川技術に関する論文集第7巻，pp381-386，2001.
- 3) 宇多高明，竹村具美，水野正樹，小川義忠：流砂系の観点から見た安倍川の治水安全度の確保と静岡・清水海岸の海岸保全の検討，河川技術に関する論文集第6巻，pp339-344，2000.
- 4) CHRISTOPHER A. FRISSELL, WILLIAM J. LISS, CHARLES E. WARREN, MICHAEL D. HURLEY: A Hierarchical Framework for Stream Habitat Classification, Viewing Streams in a Watershed Context, Environmental Management, Vol.10 No.2, pp199-214, 1986.
- 5) Stanley,V.G., Frederick,J.S., W.Arthur,M., and Kenneth,W.C.: An Ecosystem Perspective of Riparian Zones. Focus on links between land and water. BioScience., Vol.41, No.8, pp540-551, 1991.
- 6) 池田駿介：交互砂州の波長と波高，第27回水理講演会論文集，1983.
- 7) 北村忠紀，田代喬，辻本哲郎：生息場評価指標としての河床攪乱頻度について，河川技術に関する論文集第7巻，pp297-302，2001.
- 8) 渡邊康玄，桑村貴志：複列砂州のモード減少過程に関する水理実験，水工学論文集，第48巻，997-1002，2004.
- 9) 永納栄一，福岡捷二，山坂昌成，竹内聡：湾曲水路の交互砂州，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集（第2部），551-552，1982.
- 10) 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.
- 11) 知花武佳，林融，三宅基文：「河川中流域における土砂の動態が早瀬の物理環境に及ぼす影響」水文・水資源学会誌vol.20, No.4, pp362-372, 2007.
- 12) 三宅基文，知花武佳，辻本哲郎：早瀬における礫の分級構造の解明，河川技術に関する論文集 vol.10, pp399-404, 2004.
- 13) 岡田久子，知花武佳，岡滋晃：多摩川の早瀬における *Cladophora glomerata* の分布に対する流量変化の影響，日本陸水学会第67回大会講演要旨集，pp76，2002.

- 14) 鈴木高, 知花武佳: 河道形状が河原水際の物理環境に及ぼす影響, 第61回年次学術講演会講演概要集, CDROM, 2006.
- 15) 福島雅紀, 末次忠司, 瀬崎智之: 透礫層の形成とその充填機構に関する研究, 水工学論文集, 第50巻, CDROM, 2006.
- 16) 鈴木幸一, 水野信彦, 渡辺政広: 瀬と渚の形成要因とそこでの水生生物相に関する研究報告書, 河川整備基金助成事業, 1994.
- 17) 知花武佳, 三重野貴之, 辻本哲郎: 落差工下に形成される淵の魚類生息場特性, 河川技術に関する論文集 vol.11, pp465-470, 2005.
- 18) アメリカ合衆国内務省/国立生物研究所 原著作・発行 中村俊六, テリーワドゥル訳: IFIM 入門, 1999.
- 19) 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48巻, pp1567-1572, 2004.
- 20) 水野信彦: 淵の水深と魚の生態, 第三応用生態工学シンポジウム講演集, pp35-48, 1996.
- 21) 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.
- 22) 槻木玲美, 北川禮済: 間隙生物に注目する, 応用生態工学研究会, 第2回研究会講演集, pp.27-30, 1998.
- 23) 成田正喜, 土田恒年, 今野清文, 堀田井孝正, 笹本誠, 堺茂樹: 米代川におけるアユの産卵床と河道特性の関係, 河川技術論文集, 第12巻, pp.359-364, 2006.
- 24) 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, 河川技術に関する論文集 vol.13, pp153-158, 2007.
- 25) 佐々木学, 知花武佳, 辻本哲郎: 砂州水際に形成される生息場の物理特性に関する研究, 河川技術に関する論文集 vol.9, pp469-474, 2003.
- 26) 田所奈美, 知花武佳: 河原における植生の種子漂着場に関する研究, 河川技術に関する論文集 vol.12, pp465-470, 2006.