

中流域における平瀬の物理特性とその評価

Clarifying and Evaluating Physical Characteristics of Runs in the Middle Reach

林融¹・知花武佳²

Tohru HAYASHI, Takeyoshi CHIBANA

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 (〒113-8656 東京都文京区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 (〒113-8656 東京都文京区7-3-1)

To understand the dynamics of the bar's structure and river bed materials is essential in order to protect and revitalize the river environment in the middle reach. Up to this date, there has been much research that focused on the structures and their potential as eco-habitats of gravel bars, riffles, and pools, but not runs. Generally runs are considered as a uniform environment, but some studies show that runs are rich environment for some species. This research focuses on runs' structure and potential as eco-habitat.

As a first step, we have done field researches to clarify the relationship between runs and surrounding topography such as a pool or a sand-bank. Then numerical model that is called River2D was used to estimate the river flow in the flood condition. Based on the results of these analyses, the followings are clarified. Fine gravels tend to deposit in the inner bank, and the amount of the fine gravels is related to the types of gravel bars. Sands also tend to deposit in the inner banks, but the amount of sands in the runs are related to the types of pools and bank protection.

Key Words : Run, Fine gravel, sand, Shape of gravel bar

1. はじめに

河川中流域の生態系を保全・再生するためには、その基盤となる砂州の形状及び河床材料の動態を把握し、土砂供給量の調節や河川改修等の際に工夫を行う必要がある。そこで、これまで筆者らは、砂州上の単位形態である河原、早瀬、淵の構造及び形成過程と、その生息基盤としての機能について研究を進めてきたが^{1), 2), 3)}、残る平瀬については未だ詳細な検討ができていない。なお、この平瀬という場合は、河川改修に伴う「平瀬化」という言葉があるように単調な場のイメージが強く、注目されないことも多いが、一方ではモンカゲロウの産卵場を始め、多くの生物に利用される重要な場でもある^{4), 5)}。しかし、平瀬と呼ばれる環境の中にも多くの生物に利用される場もあれば、そうでない環境も存在するはずである。そこで本研究では、平瀬の構造パターン及びそれぞれの形成条件と生息基盤としての機能を解析することを目的とする。

なお、本研究に先駆けて複数の平瀬を踏査した結果、平瀬の中にも様々な底質構造が存在することを見出し、この違いが生息基盤としては重要であると考えたため、平瀬内部で砂利や砂が堆積する過程を現地観測結果から解析し、その結果見られる底質構造の特徴解明に重きを置いている。

2. 現地観測の概要・結果

そもそも、平瀬内の底質構造にはどのようなものが存在し、その分級の形成過程には、周辺の地形がどのように影響しているのかを確認するために、現地観測を行なった。対象地区を選ぶ際には、上流にある淵の構造や、河原の比高・形状、河道の蛇行度を考慮した。なお、ここで言う河原の形状とは、鈴木ら(2006)⁶⁾による分類を用い、前縁線の切り立ち度合いに注目している。すなわち、平水時の水際部周辺において河床高が急変し、横断方向の勾配が20%を越える切り立った前縁線を有する河原と、水中から河原頂部まで緩やかに比高が増加するなだらかな河原を区分した。その結果、東京都を流れる一級河川である多摩川の永田地区、陸橋下流地区と、埼玉県を流れる一級河川荒川支流の入間川の柏原地区、岩沢運動公園前地区、の計4箇所を調査を行うこととした。これらの区間における平水時の流量は1~3m³/sであり、河道の大きさにも大差はない。これら四箇所の地形を図-1に示す。

多摩川永田地区はかつて扇状地特有の平坦な礫河床であったものが、近年複断面的な河床へと変化し、それに伴い高水敷の冠水頻度の減少と樹林化が進行する一方で、低水路河床の低下が続き、河床や水際部での粗礫化や基

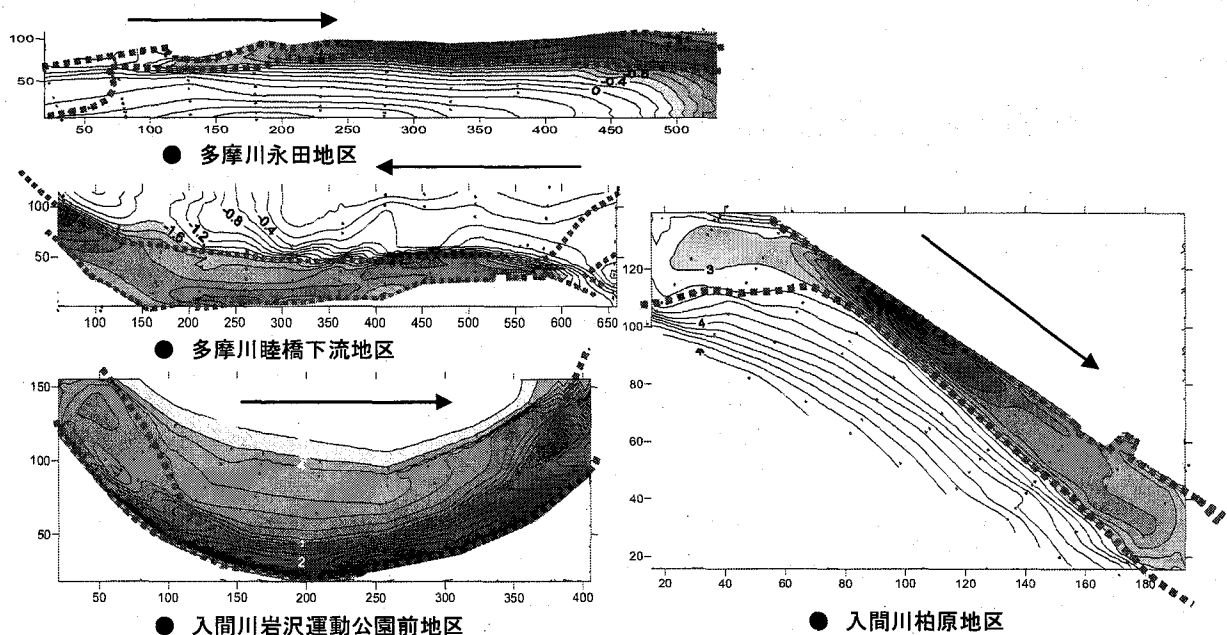


図-1 各調査地の測量結果（コンターの間隔はすべて20cm、破線は調査時の水際線と一致）

盤の露出が見られる区間である。そのため、深い淵は見られない。また、上流での土砂供給の影響もあり、河原の比高は徐々に高くなりつつあるが河床上昇は生じていない。また、砂州の前縁線、ここでは調査時の水際付近における河床高の変化がある程度見受けられるものの、中小の洪水においても、主流線が河原の上を乗り越えると考えられ、前縁線がなだらかな河原タイプに属する。

一方の永田地区より下流の陸橋下流地区は、その下流に設置され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、比高の高い砂州の冠水頻度も少ない。そのため、河原の水際部は中小出水のたびにしばしば浸食されており、前縁線が切り立っているタイプである。上流部には湾曲部外岸の護岸沿い（図-1中最も右側の水面幅の狭い領域）に深い淵が形成されており、この区間に設置された水制によりはねられた水が、右岸側内岸側の砂州前縁線にぶつかることにより、河原の一部を浸食しており、内岸部の河原側に淵が形成されている。この淵は護岸に接しておらず、流れは乱れていないが、護岸沿いの上流側の淵では、流れがやや乱れているのが特徴である。

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、永田地区同様に水際はなだらかであり、多少の出水でも砂州を乗り越える流れが生じていると推察される。この区間には、洪水時の流れが護岸にぶつかることで形成された深い淵が存在するが、低水時の流れがほぼ垂直に護岸へぶつかるために、流れが非常に乱れているというのが特徴である。

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、外岸部の護岸沿いは一定の

深さまで浸食されており、外岸部のみ水深の深い平瀬が形成されている。ここでも淵の水深は極めて深く、規模も大きい。

これらの地区において、測量調査に加え、流速計測、底質調査、及び河床の柔らかさを表す貫入度試験を2006年11月から12月にかけて実施した。底質調査は、三宅ら(2004)¹⁾の礫調査方法を用い、60cm四方のコドラート内に存在する表層の礫のうち、大礫(12.8cm以上)、中礫(3.2cm-12.8cm)の重量を計測した。また今回は、それらを取り除いた後に、河床表層に残存する砂(4mm以下)にも注目し、30cm四方の範囲内をブラシで掃き、100g/900cm²以上を砂がかぶっている状態としたが、調査方法には課題が多い。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。

次に、貫入度試験は、槻木ら(1998)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に倣って実施した。なお、同様の調査は、成田ら(2006)によっても実施されている。槻木ら(1998)²⁾によれば、ザクザク度は、それが小さい場合には、沈み石の状態、空隙の少ない砂泥が堆積している場合、あるいは石、巨石などが砂の中に埋まっているような不均質な底質状態となっている場合、また出水が起きても河床礫があまり移動しない状態であり、それが大きい場合には、大雨が降ると河床形態が大きく変化するような場所である、とされている。また、成田ら(2006)³⁾は、貫入度の大きさと鮎が産卵をする可能性の相関関係を確認している。

そこで、本研究では、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

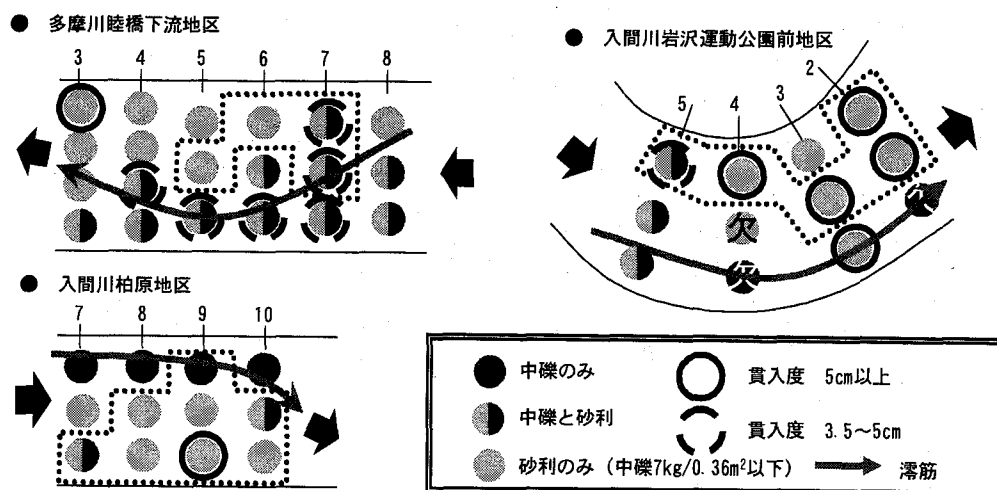


図-2 睦橋下流地区、柏原地区における砂利分布の模式図

(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を表す。)

する4箇所での試験を行なうことにより、そのばらつきを見つつ、それらの平均値を貫入度とした。

3. 貫入度と河床状況の関係

まずは、調査結果から貫入度の高かった測点では、河床がどういった材料により構成されており、その他にどういった特徴があ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。

その結果、貫入度の高い測点に共通して見られる特徴として、表層に砂利サイズの礫が多いという点が挙げられた。実際、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/0.36m²未満(全測点の平均は18.7kg/0.36m²)であるという結果となり、表層が比較的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わかる。なお、砂利が多かったのは、永田地区では上流半分の水際付近、睦橋地区の平瀬全体、柏原地区の水際付近、岩沢運動公園前地区では護岸沿いの滞筋を除く水際の広い範囲であった。すなわち、河原が発達し、水際の切り立っている睦橋地区では全体的に量が多く、それ以外の地点では、砂利が水際部のみに見られるという違いがあった。この理由については後ほど考察する。

しかし、比較的表面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。これは、前述した既往研究の報告⁹⁾とも合致する。

さらに、河床構成材料以外にも貫入度試験結果に影響を与えているものとして、堆積の形態が考えられる。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、より細かい粒子が抜け落ちつつ、ある程度締め固まると思われるが、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と考えられる。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。これらの貫入度の差を確認するため、現地において簡単な調査を行った。

まず、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まで上昇した。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、今回の観測点での最大値12cmを大きく上回ったが、これらの間に粒度分布の差は見られなかった。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、人為的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。

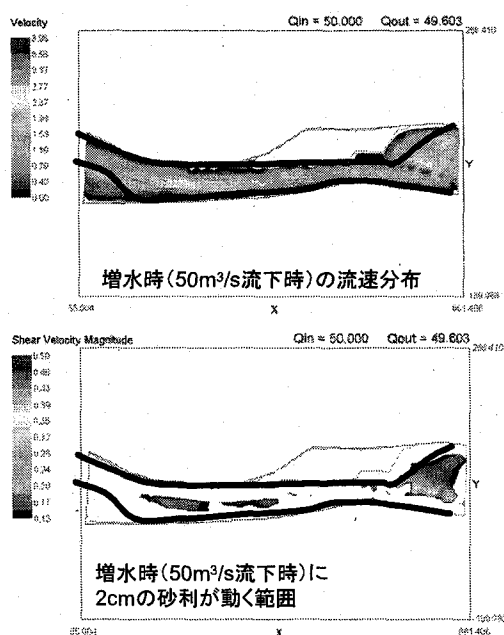
4. 平瀬における底質の分級と貫入度分布

これまでの調査を通じて、平瀬における代表的な河床の状態としては、

- (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

という三段階に分けることができ、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-2には、睦橋下流地

● 多摩川陸橋下流地区



● 入間川柏原地区

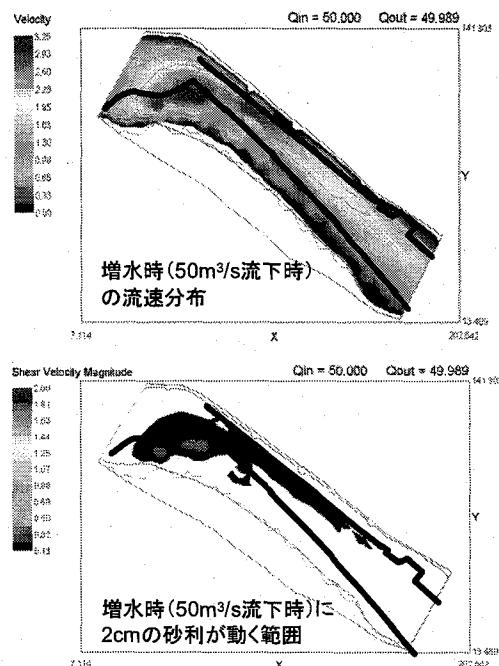


図-3 陸橋下流地区と柏原地区におけるRiver 2Dの計算結果 (実線は平水時の水際線)

区、柏原地区、岩沢運動公園前地区における平瀬部分（全区間図-1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す。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。

陸橋下流地区では、すでに述べたとおり水制ではねられた水が内岸側（右岸側）にぶつかり、もう一度淵を形成しているため、断面5～8の右岸部は淵尻に該当する。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、砂混じりの砂利帯よりも、滞筋の中礫混じりの砂利帯の方が高くなっている。

柏原地区では、陸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、陸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、陸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、水深が深く貫入度を確かめられなかったが、

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。これについては、堆積の形態との関係で後ほど考察する。

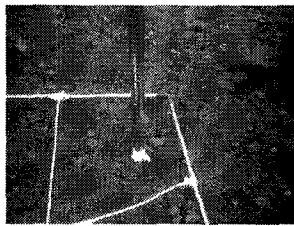
5. 河道地形が平瀬の底質構造に及ぼす影響

次に、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とする。ここで、砂州の形状については既に述べたとおり、前縁線が切り立っているものとなだらかなものが存在するが、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。

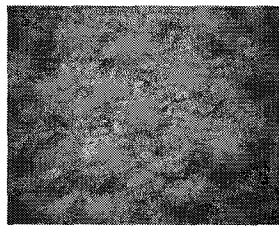
そこで、River2Dと呼ばれる2次元不等流計算プログラムを用い、出水時の流れを可視化したものが図-3である。ここでは、簡単のため、陸橋下流地区と柏原地区の結果のみ示している。

まず、河原が発達し、前縁線の切り立った陸橋下流地区では、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。また、その中で淵における掃流力は特に小さく、上流から供給された砂利や砂は、小出水程度では淵に堆積すると考えられる。一方で、平瀬の滞筋に沿っては掃流力が高くその脇では低いという特徴が見られるため、平瀬の水際部では細かい砂利や砂が中心となり、滞筋に沿ってはやや粗く一部中礫混じりの砂利になっているという現地の状況とも合致する。

しかし、一方で柏原地区をみると、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



睦橋下流地区の淵



柏原地区の淵

図-4 護岸が淵に与える影響の検討

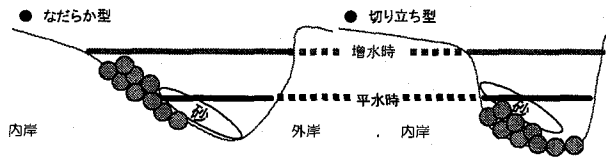


図-5 断面形状と砂利・砂の分級の関係

徴としては、睦橋下流地区と異なり、掃流力が淵部で大きく、平瀬部において小さくなっている点が上げられる。すなわち、護岸の影響で幅の狭められた淵においては砂利や砂が堆積しにくく、それが下流の平瀬へと流れ出しているということが考えられる。実際に両地区で淵の底質を比較したものが図-4であるが、内岸側に形成された睦橋下流地区の淵では砂や砂利が堆積しているのに対し、柏原地区の淵に細粒土砂は見られない。

また、岩沢運動公園前地区の流況に関しては、基本的に砂州形状の類似する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、蛇行の効果が考えられる。洪水時には三次元的な流れが生じ、外岸部の砂利や砂が巻き上げられ、内岸部に堆積することと考えられる。すると、他の平瀬内岸部とは堆積の形態が異なり、締め固まっていない状態で砂利が堆積することとなり、3章で述べた堆積形態と貫入度の関係を考えれば、図-2に示した内岸部での高い貫入度も理解できる。

ここまでは、砂や砂利をまとめて細粒土砂として扱ってきたが、最後に砂と砂利の分級について少し区別して考察する。図-3に示す計算結果を始め、これまでは2cm程度の礫が動くような増水時の状況を想定していたが、砂は平水流量より少し多い流量で充分移動するため、砂利よりも滞筋側にまとまって堆積していることがある。

例えば睦橋下流地区のように、掃流力が小さく流れの乱れも小さい淵に堆積した砂は、そこからまっすぐと帯状に流れ出しているが、量的にも面積的にも規模は小さめである(図-2睦橋下流地区の砂の堆積位置を参照)。

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ると、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と考えられる。特に、流れが護岸に垂直に近い角度でぶつかる場合は、洪水時でも平水時でも、淵内部に強い二次流が生じるため、砂は淵底からより巻き上げられやすい。

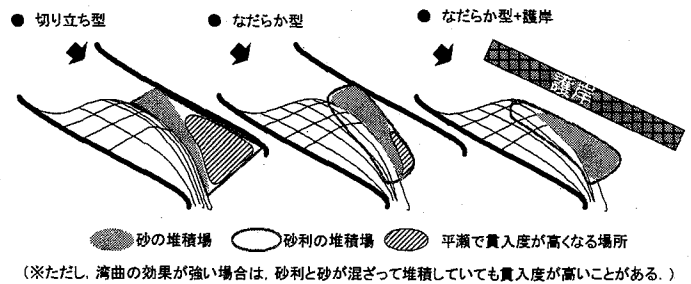


図-6 砂州形状・護岸と砂利・砂の分級の関係

以上の結果をまとめると、まずなだらかな前縁線を有する河原の場合は、砂利が平水時の陸域に堆積しやすく、切り立った前縁線を有する場合には、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に示す。ここで、砂と砂利が重なり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-2の睦橋下流地区および柏原地区も参照)。

次に、護岸の影響で洪水時に淵内の掃流力が強められている場合には、砂利が淵内に堆積しにくく、平瀬に持ち込まれる量が増加する。そして、流れが河岸にぶつかり強い二次流が発生すれば、平瀬における砂の量はなお増加すると考えられる。ただし、睦橋下流地区ではその砂が内岸部の淵に堆積したため、平瀬への影響が少なくなっている。

さらに、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、平瀬内岸部にルーズな状態で堆積すると考えられる。よってこの様な場合は、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。これらを模式的に図-6に示す。

6. 河床低下の進行する区間での平瀬環境

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-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-7である。図-2と大きく異なるのは、図-7に示すとおり永田地区には大礫が点在する点である。

永田地区において大礫が河床に露出している箇所は、滞筋に沿っており、本地区上流での土砂供給にもかかわらず、未だにアーマー化した底質が露出している状況が見て取れる。また、滞筋に沿っては砂利が全く見られず粒径が粗くなっている。結果として、上流右岸側では貫入度が高くなっているが、下流左岸側では貫入度はさほど高くない。しかしながら、上流右岸側には砂の存在も確認されている。また、永田地区では深い淵が形成されていないために、砂が貯留されず、量的にも多い。それにも関わらず貫入度が高くなっている理由としては、この対岸が水衝部に当たり、本来であれば淵が形成される

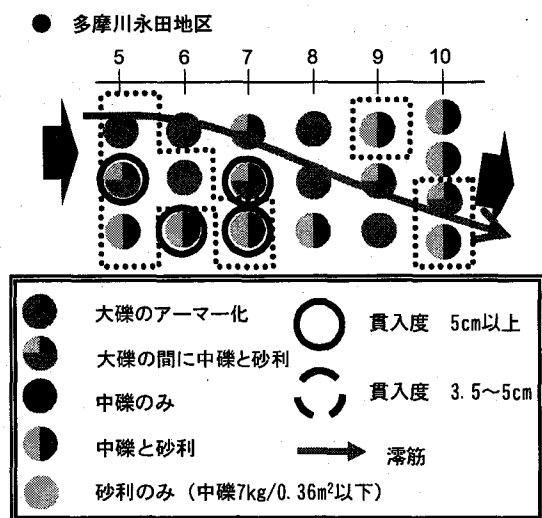


図-7 永田地区における砂利分布の模式図
(点線の部分は砂をかぶっている場所)

べき位置でもあるため、岩沢運動公園前地区同様に巻き上げられた砂と砂利が堆積しており、平瀬と言うよりは淵の性質に近いためだと考えられる。

7. まとめ

本研究では、平瀬の物理特性について以下のことを明らかにした。

- ・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った。
- ・砂や砂利の堆積メカニズムには、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、の二種類が存在し、仮に粒度組成が同じであっても②の方が①よりも貫入度が高くなる。
- ・平瀬内部では内岸側に砂利と砂が多く堆積し、外岸（漂筋）側では砂利と中礫が多く堆積するという特徴は、どの区間でも共通していたが、砂や砂利の量に関しては、平瀬によって大きく異なっていた。
- ・平瀬の内岸部には砂利が堆積するが、ここには砂も堆積するために、貫入度は砂の量にも影響される。
- ・平瀬内の砂利の量には、河原の形状が影響を与えている。河原の形状は、平水時の水際付近の河床高が陸域から水域に向かってなだらかに変化しているものと水際付近が切り立っており急激に河床高が変化するものの二種

類に分類できるが、前者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。しかし、後者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における貫入度は大きくなる。

・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か、あるいはさらに淵の中に強い二次流が生じている場合は、砂は淵底から巻き上げられ下流の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、量的にも比較的少ない。また、そもそも淵が形成されない場合には、平瀬全体に満遍なく堆積している。

謝辞：本研究は多摩川河川生態学術研究会の研究の一環として行われたものであり、関係者の皆様に感謝いたします。また、中央大学研究開発機構の福岡捷二教授にも、御指導、御支援頂きました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岡滋晃, 知花武佳, 辻本哲郎, 玉井信行, 小池俊雄: 淵縦断面形状が生息場に与える影響の数値的解析, 河川技術に関する論文集vol.10, pp405-410, 2004.
- 3) 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.
- 4) 田中武志, 山田浩之, 竹門康弘, 池淵周一: 河床間隙水域の物理化学的特性とモンカゲロウ卵の孵化率・死亡率の関係, 応用生態工学会, 第8回研究発表会講演集, pp.131-134, 2004.
- 5) 槻木玲美, 北川禮済: 間隙生物に注目する, 応用生態工学会, 第2回研究会講演集, pp.27-30, 1998.
- 6) 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.
- 7) 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.

(2007.4.5 受付)