

空間スケールに着目した 水際部の流速多様性評価

EVALUATION ON DIVERSITY OF FLOW STRUCTURE BESIDE A BANK
FOCUSING ON SPACIAL SCALES OF PHYSICAL HABITAT

知花武佳¹・渡辺尚基²・本田隆秀³・力山基³・辻本哲郎⁴
Takeyoshi CHIBANA, Naoki WATANABE, Takahide HONDA, Motoi RIKIYAMA
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 助手
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 工修 共和コンクリート工業㈱技術部 (〒112-0006 東京都文京区小日向4-6-19)

⁴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)

Recently nature friendly river works are being promoted. In these works, bank condition is often focused, because bank protection has damaged stream habitats related to a riparian zone. But fish blocks and vegetation blocks can mitigate quite local conditions. In this study, we analyze the flow structure near a riverbank focusing on hierarchical structure of physical habitat. By classifying physical factors based on their scales, we delineated several factors that affect flow structure near a bank. On point scale, roughness on a riverbed affected the velocity profile, and most river works focus on this scale only. But shape of shoreline, height of bedrock, and slope of the bank affected velocity profile and its distributions. Such kinds of factors on subunit scale are important when we design a bank protection. As reach scale factors, shape of sand bar and discharge distribution in the river are also effective on flow structure. But these factors cannot be controlled, so we have to know the feature of these conditions.

Key Words : flow structure, hierarchical structure of physical habitat, bank condition

1. 研究の目的

これまで行われてきた多自然型川づくりは護岸に工夫を凝らしたものが多く¹⁾、魚巣ブロックの設置、自然石の活用、あるいは植生ブロックなど、環境の機能を補う様々な工法が提案され、これらは確かに有効な手段となることも多い。しかし、それらで本来河岸が有していた機能のすべてを補えるわけではなく、中には単なる見ための工夫に終始してしまっているものも数多くある。

そもそも河岸は水中の生息環境にとって様々な機能を担っている。水際の浅瀬では稚魚が成育するとともに、水生昆虫の羽化場所としても利用される。また、植生が繁茂すれば、水中へのカバー提供、リターの供給、水質形成などの役割を担うこともある。この様に、様々な機能が存在する中で、本研究は河岸が流れに与える影響に着目した。例えば、単調なコンクリート護岸では水際部でも流速は落ちないが、魚巣ブロックの内部ではほぼ止水環境が形成されている。では、自然状態が比較的残る水際部ではどのような流れの構造が生じ、護岸によりそ

れはどのように変質するのだろうか。また、そこにはどのような工夫が可能なのか。本研究では、まず河岸の状態が異なる複数地区で観測を行い、それぞれで流れの構造を把握する。そして、その地固有の、地質特性を活かした護岸整備はいかにあるべきかについて提言を行う。

2. 物理環境スケールの階層構造

一言で流れの構造を捉えると言っても、対象とするスケールによって、その扱いは大きく異なってくる。例えば、流速のばらつきを議論することも可能であるし、張り出した岩盤周りにおける流れの三次元構造を明らかにすることも可能である。しかし、前者の方法だけでは、地形が複雑である程、流れが多様であるということがわかるに過ぎず、現実的な対策を立てることができない。また、後者だけでは、その岩盤がどのような形状であるのか、あるいは河道内のどのような場所にあるのかによって、流れの構造は大きく変化するために、管理に活かすには詳細すぎる。そこで、本研究では対象とするスケ

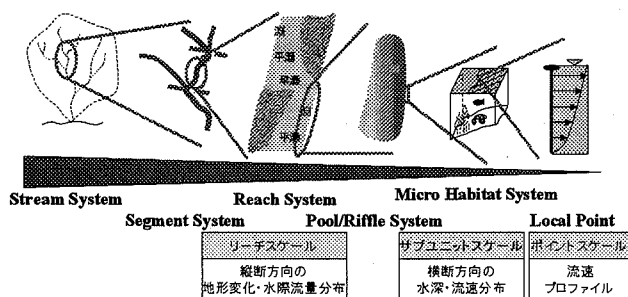


図-1 河川における物理環境の階層構造 (Frissell et al. 1986 を元に作成)

ールを整理し、各スケールに於いて流れの構造をパターン化することとする。こうしておけば、水際部の環境を考えると、どのスケールでどのような工夫が可能かを考察することが可能となる。

まず、河道内の物理環境を階層化して示したものが図-1である²⁾。筆者らは、こうした階層構造を考慮した魚類生息環境評価手法を提案して来たが³⁾、それを参考に本研究では各スケールを以下のように定義することとする。

ポイントスケール：魚が定位する場における流速、水深あるいは、河床表面の藻類や底生昆虫に働く掃流力を評価する。水深や平均流速に加え、水深方向の流速分布形をも扱う。そのため、平面的にはある一点を対象とすることになる。

サブユニットスケール：潤辺（河岸・底質）の状態を評価する。河岸の空隙や河床の浮き石帯が存在したときに、魚が瞬時にそこへ避難できる範囲、あるいはその中に生息する藻類や底生昆虫の種組成が大きく変わらない範囲を扱うこととなり、河岸の状態、河岸からの距離、及び底質の分級構造を基に境界を決める。後述するユニットスケールの区分に加え、横断方向にも河道を区分することとなり、いわゆる瀬脇、流心、瀬尻、淵頭などと対応する。

ユニットスケール：早瀬、淵といった単位に該当する。評価に際しては、水深、流速、底質の最大、平均、分散などを扱う。河床勾配の変曲点を基に主に縦断方向に区分することとなる。

リーチスケール：交互砂州の形状とその中での流れの集中・発散状況を評価する。瀬淵が二組はいる範囲にあたり、河床波としての単位であるため、地形上での境界ははっきりしている。

ただし、本研究は河岸近傍の環境のみを対象とするため、ユニットスケールで見ることとはせず、ポイントスケール、サブユニットスケール、リーチスケールで流れの特徴を捉え、それらの相互関係を理解することとする。ここで扱う因子も図-1 下部に示してある。

3. 対象区間及び現地観測の概要

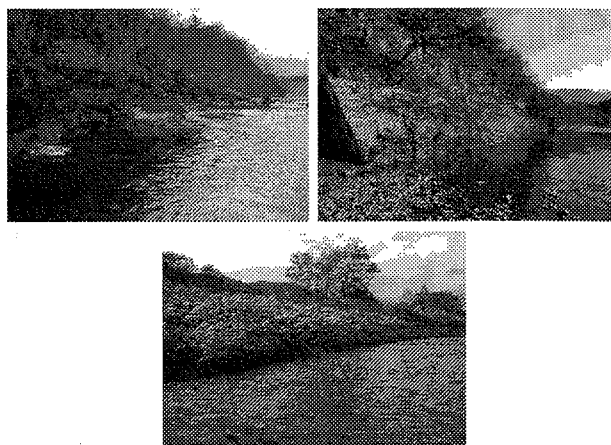


図-2 各対象区間の河岸の様子
左上：荒川久那地区、右上：荒川佐久良橋地区、
下：多摩川永田地区

現地観測は、低水路河岸に軟岩を有する地区、及びそこに護岸を施した地区を対象とした。軟岩を対象とした理由は、地質によってその形状や特性が大きく変化するために、それぞれに特徴的な流れの構造が見られるにも関わらず、護岸の対象となることが多いからである。そこで、地質の違いや護岸の有無といった観点から、荒川久那地区、荒川佐久良橋地区、多摩川永田地区の3つの場所を観測地として選択した。

まず、荒川久那地区は地質が第三紀シルト層であり護岸されておらず、水際線が入り組んでいるのが特徴である。次に、荒川佐久良橋地区は久那地区のすぐ下流に位置しており地質は同じく第三紀シルト層であるが、コンクリートブロックで護岸がされている区間である。最後に多摩川永田地区は、地層が第三紀土丹層と呼ばれるものであり、護岸はされていない。しかしながら、水際線が単調であることや、軟岩中に玉石が含まれていることなどがその他の二地区と異なる特徴である。各地区の景観を図-2に示す。

観測では瀬と淵が一对含まれる範囲（砂州半波長分）を対象とした。そして、対象区間を15断面前後に分割し、凹岸側水際部の流速測定、平板測量、レベル測量、底質状態の写真撮影を行った。なお、ここで言う水際部とは、荒川佐久良橋地区では水際から2.0mの範囲、多摩川永田地区では水際から1.5mの範囲としたが、荒川久那地区において水際線からの距離で範囲を設定すると、大半が止水域になることから、完全な止水域と流水域の境界を基準とし、そこから1.5mの範囲を対象とすることとした。これらの範囲は、水面幅のおよそ5%程度にあたり、今後はこの範囲を水際部と定義する。流速は各区間とも横断方向50cm間隔、水深方向2,4,6,8割（水深が浅ければ、6割のみか2割8割のみ）で計測した。

4. ポイントスケールでの解析結果

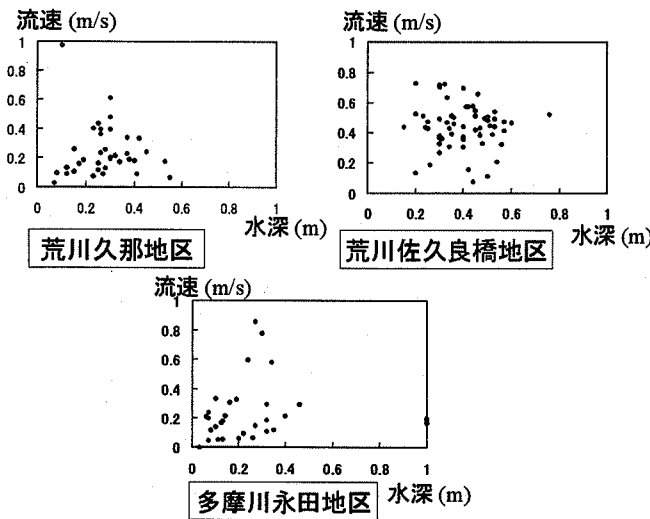


図-3 各地区の水際部における水深流速分布

まず、ポイントスケールの解析として、各地区の水際部における水深、平均流速の分布に着目する(図-3)。どの地区でも、水深は60cm以下、流速は60cm/s以下に大半の点が散らばっている点では類似している。ただし、久那地区と永田地区は比較的分布形が似ており、水深と共に流速も増加している様子が見取れるのに対し、佐久良橋地区では、浅く遅い領域があまり見られず、水深に寄らず流速がほぼ一定であることがわかる。これは、久那地区や永田地区では河岸沿いが浅く流速が落ちているのに対し、佐久良橋地区では水際部ですぐに水深が深くなっており、流れも速いことに起因している。護岸された佐久良橋地区でも水深は様々であるが、これは河道縦断方向に水深が変化しているためであり、横断方向にはあまり変化していない点で他の地区とは異なる。このように、縦横断の地形変化が水深、流速分布の多様性に結びついている様子はここからわかる。

次に、水深方向の流速分布に着目する。ここでは、その分布形を以下の4つのタイプに分類することとした。

一定型：河床付近から水面付近にかけて流速がほぼ一定であるタイプ。河床の粗度が小さい場合や、流れが加速域にあたる場合などに見られる。

漸増型：河床付近では流速は小さいが水面に近づくにつれて徐々に大きくなっていくタイプ。河床の粗度が大きい場合や、流れが減速域にあたる場合に見られる。

下膨らみ型：水面付近よりも河床付近で流速が大きいタイプ。二次流の影響を強く受ける場合に見られる。

止水型：分布形状ではないが、流速がほとんどないタイプ。平均流速が10cm/s未満のものをすべてこれに含めることとした。

図-4には、これらの典型例を示してある。なお、これらの半閉川には、2割水深流速と8割水深流速の差を水深の6割の値で除した総括的流速勾配という指標を用いることとした⁴⁾。この勾配が0.4以上を漸増型、-0.2未満を下膨らみ型、その間を一定型と定義している。なお、

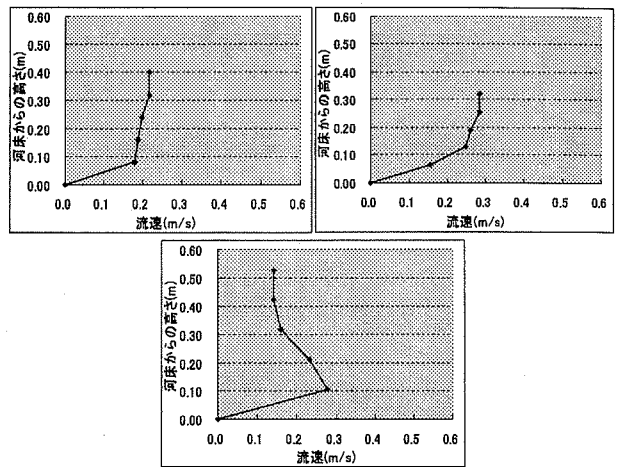


図-4 分類された流速分布形

(左上：一定型、右上：漸増型、下：下膨らみ型)

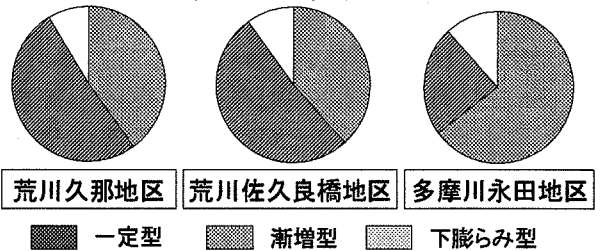


図-5 各地区の水際に見られた流速分布形の割合

同じ水深及び平均流速の場合、下膨らみ型、一定型、漸増型の順に掃流力は大きく、水面付近の流速に注目すればこの逆になる。実際、落ち葉などは下膨らみ型の所には堆積せず、下流方向へ流されていく様子が観察された。また、水面の流下物はこの順に流れにくい。この様に、流速分布形は魚類や底生昆虫の餌となる有機物の状態や、棲み場の状態に大きく影響を与える。

図-5はこれらの流速分布形が、全観測点に占める割合を地区ごとに円グラフで示したものである。なお、この図では止水型の割合を除いている。

まず、久那地区と佐久良橋地区では、その流速分布形の分布が極めて類似している。もっとも、漸増型と一定型の境界をどこに設定するかで、この比率は多少異なったが、さほど大きな差とはならなかった。ここで、漸増型と一定型の比率が類似した原因は、流速の分布形自体は、河床粗度に規定されるところが大きく、護岸の有無の影響をさほど受けていないことがあげられる。確かに、コンクリートの根固めでは粗度が低い、シルト岩にも凹凸はないため、粗度としては大きな違いが見られない。そして、両地区共に礫が堆積している所も存在し、こういった所では漸増型となっていた。一方、永田地区では、大半は漸増型となっている。これは、河岸の第三紀土丹層には玉石が含まれており、粗度が大きくなる上、河岸が削られることでこの玉石が河床へ供給され、岩盤を覆い隠していることが多いことが原因である。この永田地区でも一定型の流速分布が見られるが、これは局所的に深ぼれが生じ、水深が1mに達している場所で流れが淀

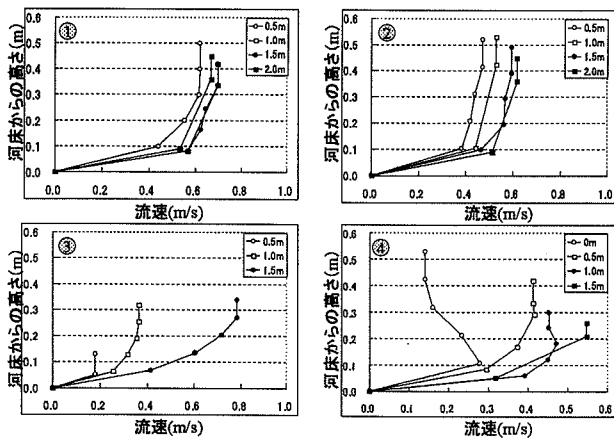


図-6 流速プロファイルの横断分布の例

(凡例の距離は水際からの距離を表す。0m というのは、止水域との流水域の境界で計測したもの。)

んだためであり、粗度の影響ではない。

次に、下膨らみ型の比率に着目すれば、全区間でほぼ同じ比率を有していることがわかる。まず、自然河岸で水際線が複雑に入り組んでいる荒川久那地区では、河岸が滯筋方向に張り出した場所で二次流が発生することが原因である。一方、水際線が比較的まっすぐな佐久良橋地区や永田地区で同様の流速分布が見られるのは、早瀬からの流れが急な角度で河岸にぶつかり、二次流が発生するためであり、久那地区とは原因が異なっている。

最後に、円グラフには表していないが、止水型について述べる。止水型は、久那地区では至る所に存在し、永田地区では、観測点の3割程度が止水型となっており、佐久良橋地区では全く見られなかった。また、久那地区の止水型は河岸が入り組むことで、水深が深いにも関わらず流れがない領域が目立ったが、永田地区においては上述したように河岸から供給される玉石が河床に堆積することで、水際が極めて浅くなり流れがなくなったことが原因である。

これらをまとめると、ポイントスケールでの水理環境を支配するものは、岩盤・河床礫の粗度、縦横断の地形勾配、流れと河岸のぶつかる角度であり、例え同じ流速分布形であっても、その原因は異なることに注意が必要である。ただし、これらだけでは、河道の構造が見えてこないためより上位のスケールで解析を行うこととする。

5. サブユニットスケールでの解析結果

サブユニットスケールでの解析では、前章でまとめた水深、流速、流速分布形が横断方向にどの様に変化しているのかに着目することから始める。観測結果を見た所、変化のパターンとしては、

- ①横断方向に水深も流速もその分布型も変化しない。
- ②横断方向に水深も流速分布型も変化しないが、流速

の大きさが変化する。

③横断方向に水深、流速が変化するが、その分布型は変わらない。

④横断方向に水深も流速もその分布型も変化する。

という4つで大半の断面を説明できた。これらの代表例を図-6に示す。ここで、横断方向に変化しているか否かは、水際と定義した範囲において、流速の最大値と最小値の差が10cm/s以上、水深の最大値と最小値の差が10cm以上あるか否かで判断している。

まず、久那地区では①が最も多く、ついで④が多かった。①は、久那地区の中でも岩盤が入り組んでおらず、比較的滑らかな形状をした場所で顕著に見られた。こういった領域では、河床部の岩盤にも凹凸が少なく、断面内での水深変化が小さいことが原因である。また、岩盤の粗度が低いため流速分布型も変化しない。次に、④が多いのはこの岩盤が入り組んでいる場所であり、河岸に近い点ほど乱れの影響を受けて下膨らみ型の流速分布形が見られるようになる。また、この入り組みはもう少しマクロに見れば粗度として働き、河岸近くほど流れにくいため、横断方向に流速が変化することになる。また、河道中央部に近づくと岩盤は露出せず、礫が見られるようになり、流速分布は漸増型に変化する。

佐久良橋地区では①または②のみであった。これは、護岸の根固め及び岩盤の影響により、同じ断面内で横断方向に水深が変化しないためである。また、②のタイプであっても、流速のばらつきは20cm/s以内におさまる場合が大半であった。

多摩川永田地区では③のタイプが最も多く、ついで①となった。③が多い理由は、河岸からの碎屑物である礫が横断方向に緩やかな傾斜をつくり、その上の粗度も一定であることによる。①は平瀬下流の極めて浅くなっている領域で見られた。河岸からの礫供給の影響を受けておらず、横断方向にあまり水深差がつかなかったのが原因である。

このように、水深方向及び横断方向の流速分布に着目すれば、各地区で特徴的なタイプが見られ、それらは主に河岸の入り組み方、横断勾配、河床粗度によって規定されていた。そこで、各地区で同様の流速分布パターンを有すると考えられる範囲を面的に区切ることによって、河岸沿いの環境をいくつかのサブユニットに分割したものが、図-7である。三地区の各サブユニットで典型的な流速分布パターン①～④及びその特徴を順に記す。

a) 荒川久那地区

I (断面 1～4) : パターン①。河床が礫のため漸増型の流速分布を示し、横断方向には変化がない。水際にはまとまった大きさの止水域が存在する。

II (断面 5～7) : パターン④。流速分布は様々で、最も水際寄りが下膨らみ型、河床が岩盤の範囲が一定型、滯筋寄りが漸増型となるサブユニット。水際には止水域が多く見られる。

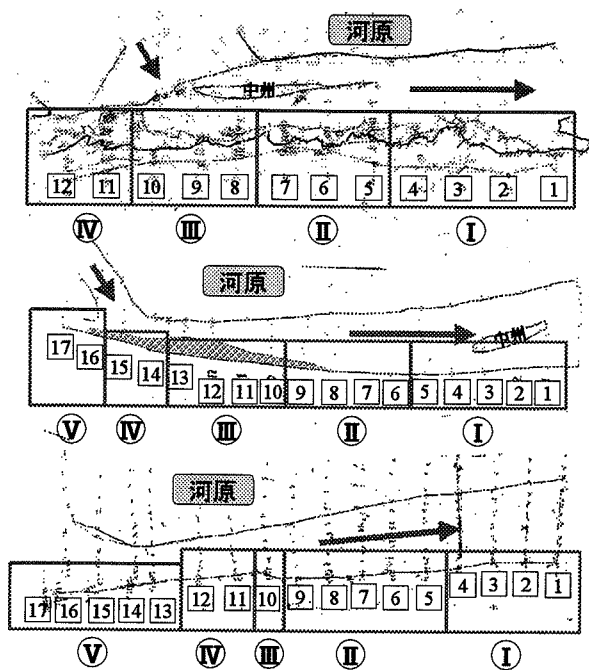


図-7 各地区における水際のサブユニット分割
(上から久那地区, 佐久良橋地区, 永田地区)

III (断面 8~10) : パターン①. 局所的な早瀬で, 河床は岩盤のため一定型の流速分布. 横断方向に流速は変化せず, 止水域も存在しない.

IV (断面 11~12) : 完全な止水域.

b) 荒川佐久良橋地区

I (断面 1~5) : パターン①. 河床が礫のため漸増型の流速分布を示し, 横断方向には変化がない.

II (断面 6~9) : パターン①. 根固めの高さが礫の堆積面より高くなり, 根固めの影響で一定型の流速分布を示し, 横断方向には変化がない.

III (断面 10~13) : パターン①, ④. 一定型と下膨らみ型が混在する. 早瀬から来た流れがこの上流で河岸にぶつかることから, 所々に下膨らみ型が見られたと考えられる. 河床には岩盤が露出しているため, 粗度が低く漸増型はあまり見られない.

IV (断面 14~15) : パターン②. 粗度は低いが, 浅くて速い流れが生じるために漸増型となっている.

V (断面 16~17) : 完全な止水域.

c) 多摩川永田地区

I (断面 1~4) : パターン①. 河床が礫のため漸増型の流速分布を示し, 横断方向には変化がない.

II (断面 5~9) : 水深が 10cm に満たない領域. 河床に露出した岩盤の上に, 河岸からの碎屑物が載っていると考えられる.

III (断面 10) : パターン①. 河岸の張り出しの周囲が洗掘され, 局所的に水深が 1m となっている. 流れが淀むため一定型となり, 横断方向の変化は無い.

IV (断面 11~12) : パターン④. この上流が早瀬となっており, 流れが河岸にぶつかるため水際部では下膨らみ

表-1 各サブユニットの特徴を規定していた要素

サブユニット名	特徴を規定する要素
久那地区 I, 佐久良橋地区 I, 永田地区 I	交互砂州における相対的な位置
久那地区 IV, 佐久良橋地区 V	交互砂州における相対的な位置
久那地区 II	入り組んだ水際線
久那地区 III, 佐久良橋地区 IV, 永田地区 II	礫の堆積面より高い基盤岩の高さ
永田地区 III	張り出した河岸周りの洗掘
永田地区 V	緩やかな横断方向の勾配
佐久良橋地区 III, 永田地区 IV	早瀬からの流れがあたる角度
佐久良橋地区 II	単調な水際線と河床面

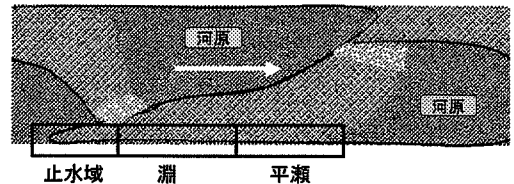


図-8 交互砂州に典型的な水際部サブユニット

型が見られ, その他は漸増型となる.

V (断面 13~17) : パターン③. 漸増型の流速分布を示し, 横断方向には水深と共に平均流速が増加していくタイプとなる.

このように, 様々なサブユニットが見られたが, その特徴が何によって規定されていたかをまとめたものが表-1である. ここに示したとおり, サブユニットスケールでは, 水際線の線形, 横断方向の勾配, 礫面と基盤岩の高さの関係と言ったものが岩盤の特性に依存する要素であった. なお, パターン②があまり見られなかったことから, 横断方向に水深が変化せず, 河岸に流れがあたり乱れが生じなければ, 例え河岸に粗度があっても, 横断方向の流速分布には変化がつきにくい事がわかる. さらに, 水際への流れ込み方や, 砂州の形状も, サブユニットスケール環境を規定する要素であったため, これらをリーチスケールで捉えることとする.

6. リーチスケールでの解析結果

もし一般的な形状を有する交互砂州が形成されている場合, 水際は図-8の様に少なくとも3つのサブユニットに分類できると考えられる⁵⁾. すなわち, 早瀬からの流れ込み上流にワンドが形成され, その下流の水衝部は深ぼれして淵となり, その下流は平瀬で浅くなるというパターンである. そして, ワンドでは流れが無く, 淵では水深が深く, 流れは河岸よりに集中しており, 平瀬部では浅く流れも発散していくという特徴がある. これが, 表-1において, 「交互砂州における相対的な位置」に規定されていると書いたサブユニットである.

しかしながら, 図-8の淵ユニットに対応するものは局所的な永田地区のIIIだけしかなく, これも張り出した河岸の周囲が局所洗掘されたものであり, 砂州に起因するものではない. このように, 淵ユニットができない理由としては, 久那地区と永田地区は砂州が平坦化し, 高低差があまり無いことが挙げられる. 一方の佐久良橋地区

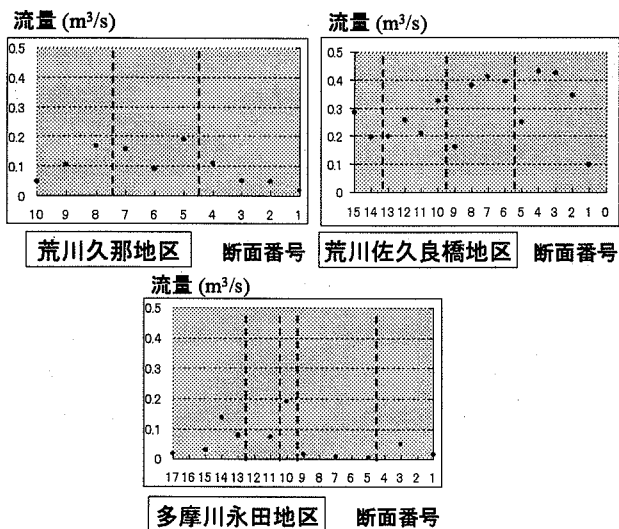


図-9 各地区における水際部流量の縦断変化
(破線はサブユニットの境界)

では、砂州は発達しているものの本来淵ユニットとなるはずのⅢからⅣにかけて水際河床に基盤岩が露出したことで、淵が河道中央部にシフトしたことが原因である。

このような砂州の特徴の違いにより、河岸への流れの集まり方がどの様に異なるかを見るために、水際部における流量が縦断方向にどう変化しているのかを見たものが図-9である。どの地区も砂州形状と対応しており、早瀬から流入が生じる場所で流量が増加しており、佐久良橋地区や永田地区ではここで下膨らみ型を有するサブユニットとなっていた。ただし、水際部が河岸から供給される礫によって浅くなっている永田地区では全体的に流量は極めて少ない。久那地区、永田地区では、平瀬部にさしかかったあたりから流量が減少していく様子が見て取れるが、佐久良橋では、水衝部に基盤岩が露出している影響で、上流で流量が増えきっておらず、基盤岩の影響の無くなる下流に向かって徐々に増加している。

これらをまとめると、リーチスケールでは、砂州の発達度合いと河床における基盤岩の露出状態で、流れの集まり方が規定されていると言える。

7. 護岸整備の際の配慮

このように、階層的に場を捉えることで、様々な要素が水際部の流れ場を規定していることが明らかとなった。これを踏まえ、護岸整備の際に、どのような工夫が可能であるかについて述べる。

まず、リーチスケールでの制御は難しいため、砂州の発達度や特性を理解する必要がある。これにより、図-9に示すような、水際部の流量はどの程度縦断方向に変化するのか、洗掘深はどの程度なのか、流れが河岸にあたるのはどこかを把握する。次に、サブユニットスケールでは、縦断方向にどのようなサブユニットを配置させる

かが重要である。永田地区のようにほぼ直線河岸でありながらも、横断勾配を縦断方向で変化させるという工夫で水深、流速に多様性を持たせるという工夫もある。また、久那地区のように水際が入り組むことで、止水域が形成されると共に、そこへ流れがあたることで、下膨らみ型の流速分布も生じ、流速のみならず、河床の堆積物にも多様なパターンが生じる。さらに、岩盤や根固めの露出と礫の堆積域が混在すれば、横断方向に粗度が変化することで流速やその分布形が変化する。

この様に考えると、これまでの護岸はどのようなブロックを用いるかというポイントスケールレベルでの工夫に留まっていたように感じられる。そのため図-6における③や④の流速分布は見られない。今後は、リーチスケールで流れや地形の状況を把握しつつ、護岸の線形や勾配、河道への張り出しと言ったサブユニットスケールでの工夫が望まれる。

8. まとめ

これまで護岸による環境変化としては、空隙や植生の消失が挙げられ、魚巢ブロックや植生ブロックにみられる局所的な対策が講じられてきた。しかし、本研究は、流れの構造に焦点を当てる事で、局所的な工夫の不十分さを指摘した。この流れの構造は、元々植生や空隙といったものがない軟岩の河岸帯では、極めて支配的な要素となる。スケールの階層構造に注意しつつ流れの構造、及びその支配要因を解析した結果、単に水際が入り組んでいけばよいと言うのではなく、地質や地形に起因するその地特有の環境が存在することを指摘した。そして、今後の護岸整備においてはサブユニットスケールレベルでの工夫が必要であるという点を主張した。

参考文献

- 1) 玉井信行：二十一世紀の河川改修に求められているもの、国づくりと研修、全国建設研修センター、pp12-15, 2001
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 岡滋晃, 知花武佳, 玉井信行：鉛直流速勾配に着目した生態環境評価方法に関する考察, 第5回応用生態工学研究会研究発表会講演集, pp.89-92, 2001.
- 5) 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回応用生態工学研究会研究発表会講演集, pp.231-234, 2003.

(2004. 4. 7受付)