

河床攪乱頻度を指標とした生息場評価による 瀬・淵構造の変質に関する考察

DISCUSSION ON CHANGE IN RIFFLE-POOL STRUCTURE BY USING FREQUENCY OF DISTURBANCE ON RIVER-BED AS A HABITAT SUITABILITY INDEX

田代喬¹・辻本哲郎²

Takashi TASHIRO and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程学生
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科地圏環境工学専攻

In the middle reach of the Yahagi river, the frequency of disturbance on river-bed has been decreased, because of the changes in geomorphology and flow regime after the construction of the Yahagi dam. It relates to the change in the riffle-pool structures that were formed by developing alternate bars.

In the present study, we discuss the change in the riffle-pool structure by using 2D numerical simulation and habitat evaluation method. By employing the frequency of the disturbance on the river-bed as a habitat suitability index, what the typical geomorphology with alternate bars helps the habitat condition to be maintained has been explained.

Key Words : *Frequency of disturbance on river-bed, return period, habitat suitability, IFIM/PHABSIM, riffle-pool structure*

1. はじめに

近年, 我が国における多くの河川では, ダム建設による流況の平滑化, 供給土砂の減少から, 本来形成されるはずの砂州地形が変化し, 滞筋部における河床低下, 河床のアーマー化を始めとする多くの問題が顕在化している。こうした河川では, 生息場が変質してきている¹⁾が, 様々な要因が複雑に絡み合っているため, 現状ではこれらの変化を十分に説明出来ていない。

現在, 河川における生息場の評価手法としては, IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) が認知され, その枠組みの中で, PHABSIM (Physical HABitat SIMulation) が多用されてきている。PHABSIMを適用するに当たっては, 適切な物理環境指標を設定することが重要であり, 最近では, 従来からの流速, 水深, 底質粒径に加え, 瀬・淵構造や河床構造の重要性が注目され始め, 環境傾度 (空間的微分)²⁾や河床攪乱頻度³⁾といった新たな指標が導入されてきた。著者ら³⁾は既に, 矢作川中流域における資料の解析と1次元水理解析を用いた生

息場評価を行う中で, 砂州地形の変化による瀬・淵構造の変質と河床攪乱頻度を関連づけて議論することに有意性を見出している。しかしながら, 河床攪乱頻度は, 流況, 流れ場, 地形, 底質粒径など多くの要素から算出される指標であり, 矢作川における実現象に即した議論を進めたため, 砂州地形の変化が及ぼす河床攪乱頻度の変化についての議論は不十分であった。

本研究では, 砂州地形の変化が瀬・淵構造やそれによって形成される生息場の変質に及ぼす影響について, 河床攪乱頻度に着目して議論を進める。まず, 近年, 河床攪乱頻度が大幅に減少し, 生息場が変質してきた矢作川中流域の事例について, 流量, 河床地形, 底質粒径データを用いて解析を行い, その変質状況を整理する。続いて, 現地地形スケールを参考にした交互砂州を有する河道地形を設定し, 平面2次元水理解析を用いてその水理特性を把握した上で, 矢作川中流域の代表種であるアユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*), オイカワ (*Zacco Platypus*) を対象とした生息場評価を行うことによって, 河床攪乱頻度と瀬・淵構造, 更には生息場との関係について考察を行う。

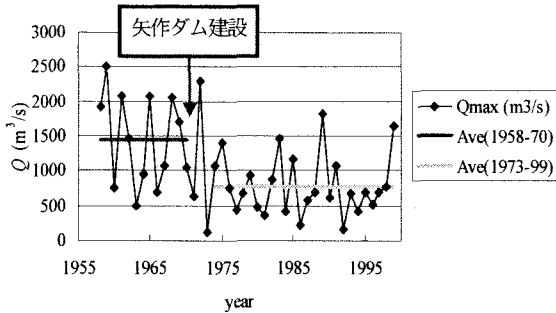


図-1 年最大流量の経年変化

表-1 矢作ダム運用前後の流況変化

年	豊水	平水	低水	渇水
1943-70	40	25	20	10
1973-99	35	20	15	10

(単位: m^3/s)

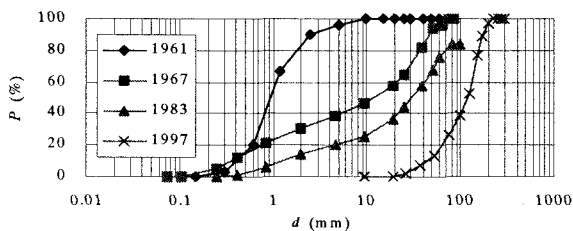


図-2 42km地点における粒度分布

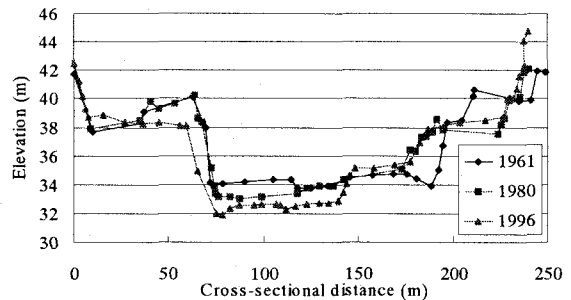


図-3 42km地点における横断面の経年変化

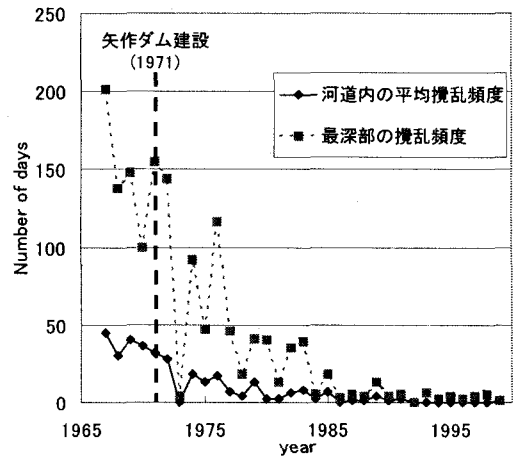


図-4 河床攪乱頻度の経年変化

2. 矢作川中流域における河床攪乱頻度の変化

矢作川は、幹線流路延長117km、流域面積1,830 km^2 を有する1級河川で、河口から34km～80km地点の本川区間に7つのダム・低堰堤が建設されており、矢作ダム（80km地点、1971年建設）のみが洪水調節機能を有している。愛知県中部を流れる本川中流域では、近年、アユ漁獲高の減少、糸状藻類の異常繁茂などの問題が顕在化し、矢作ダムを始めとするダム・低堰堤群の影響と憶測されている⁴⁾。本章では、越戸ダム（45.8km地点）の下流に位置する42km地点を対象とし、矢作川中流域における河床攪乱頻度の低下に着目する。

(1) 流量特性の変化

本研究の対象地区における年最大流量を整理すると、矢作ダム運用前後では、約1500 m^3/s から約800 m^3/s に低下しており（図-1参照）、さらに、日平均流量を整理すると表-1のように表される。これらから、矢作ダムによる流量調節によって流況が平滑化されている様子が分かる。

(2) 河床構成材料の変化

42km地点の粒度分布の経年変化を図-2に示す。1967年以前には河床表層に全く存在しなかった粒径10～30cm程度の「玉石」が、1983年に出現し、1997年には大半を占めている。このことと近年の河床低下の傾向

（図-3参照）を併せて考えると、砂で覆われていた河床表層が、河床低下によって失われた結果、玉石による礫層が露出してきたと推測出来る。すなわち、ここでのアーマー化は、粒径別の選択輸送に基づく通常のアーマー化とはプロセスの異なるものであると考えられる。

(3) 河床横断形状の変化

42km地点における横断面の経年変化（図-3参照）に着目する。1960年代以前、低水路内は起伏が乏しく、流路は単一化されていなかったが、1960年代後半から左岸側の河床が低下し、ここに流れが集中した結果、低水路や砂州が単一化し、1990年代には固定化した。1967～83年当時の現地形は、年最大流量の水利条件下で黒木ら⁵⁾の中規模河床形態の領域区分に照合すると、交互砂州の領域に属しており、この間、砂州の発達過程として地形が経年的に変化してきたものと推測される。

(4) 河床攪乱頻度の変化

(1)～(3)で把握した流量、河床材料、横断面の情報をもとに、1年当たり、どの程度河床材料が移動するかについて、1次元等流計算を用いて推測する。流量には日最大流量の時系列を、河床材料としては図-2から得られる平均粒径を、断面形状は図-3に示した横断面を想定した。抵抗則にはManning 則を用い、算出した無次元掃流力 τ_* の時系列から、無次元限界掃流力 τ_{*c} を超過する日数を年毎に整理し、図-4にまとめた。なお、ここでの τ_{*c} は、混合砂礫の場合に平均粒径に対する τ_{*c} の値が小さくなる

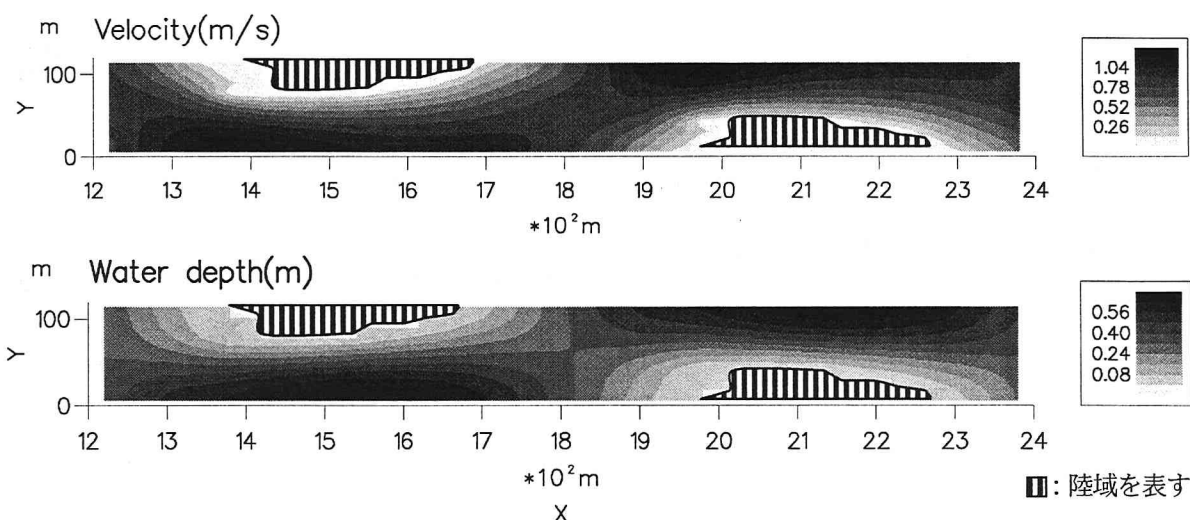


図-5 流速、水深コンター図 (ケース1)の例

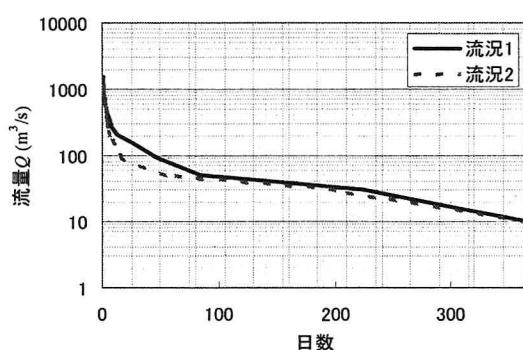


図-6 計算対象の流況曲線

ことを考慮して、0.03とした。矢作ダムが完成した1971年以降、減少し続けてきた河床の攪乱頻度は、1990年以降、特に小さくなり、河床が動きにくくなってきた様子が分かる。

本章では、流量、河床材料、横断地形データから河床攪乱頻度を算出したが、それが劇的に変化した要因を明らかにするためには、各要素がそれぞれどの程度の影響を与えているかを検討する必要がある。そこで次章以下では、平面2次元水理解析を用いて、砂州特性の差異に着目した議論を進める。

3. 砂州波高の変化に伴う水理特性の変化

河川の中流域では、しばしば交互砂州が発達し、瀬・淵に代表されるような多様な空間の形成が促進される。矢作川越戸ダム下流部では、近年、河床低下や滞筋の固定化などにより交互砂州が変質し、それに伴って河道内の瀬・淵構造、生育・生息場が変質してきた。こうした砂州の変質を議論するためには、本来、移動床過程を考慮した河床変動解析モデルを用いる必要があるが、実際の河川で起こっているような交互砂州の変質を記述することは困難であるばかりか、様々な要因が絡み合っている

ことも多く、現象を把握しにくくなることも考えられる。そこで、本章では、解析上の簡便性も考慮し、次式で与えられる河床形状を設定し、平面2次元水理解析を用いて議論を進める。

$$z_b = -i_b x + A \cos \left\{ \left(\frac{2\pi}{2B} \right) y \right\} \sin \left\{ \left(\frac{2\pi}{L} \right) x \right\} \quad (1)$$

ここに、 z_b ：河床高さ、 x ：縦断方向距離、 y ：横断方向距離、 i_b ：平均河床勾配 (1/670)、 A ：砂州の半波高、 B ：河幅 (120m)、 L ：砂州波長 (1200m) であり、河床材料については平均粒径 d_m を1.9cmとした。これらの数値は、矢作川現地形における河道スケールを参考に設定したものである。砂州の半波高については、1)0.5m、2)1.5m、3)3.0mの3ケースを設定し、砂州波高の変化による水理特性の違いを検討する。なお、交互砂州の波高特性に関する既往の研究⁹⁾から、矢作川中流域におけるダム建設前の年平均最大流量 (1500m³/s) を流入条件とすると、砂州波高は2.48mであり、上述したケース2)は、標準的な砂州地形を近似したものと考えられる。

流れの基礎式は、非定常3次元流れの運動方程式、連続式を水深方向に積分して得られる平面2次元流れの保存形で記述された基礎式を用いる。水平方向の渦動粘性係数は、局所水深と摩擦速度に比例するモデルによって与える (比例定数は0.1とする)⁷⁾。河川の境界に適合する境界適合格子状において、有限体積法によって基礎式を離散化する。離散化式は、次のアルゴリズムによって解かれる。すなわち、①運動量の輸送方程式中の水面勾配項を除く項を時間積分して仮の線流量を得て、②これを連続式に代入して得られる水位に関するポアッソン方程式を解くことにより水位を求め、③これをもとに線流量を補正する。これにより各時間ステップで運動量の輸送方程式と連続式をほぼ同時に満たしながら時間発展させることにより解を得る。流れ場の時間変化が無くなった時点で定常解が得られたものと見なす。

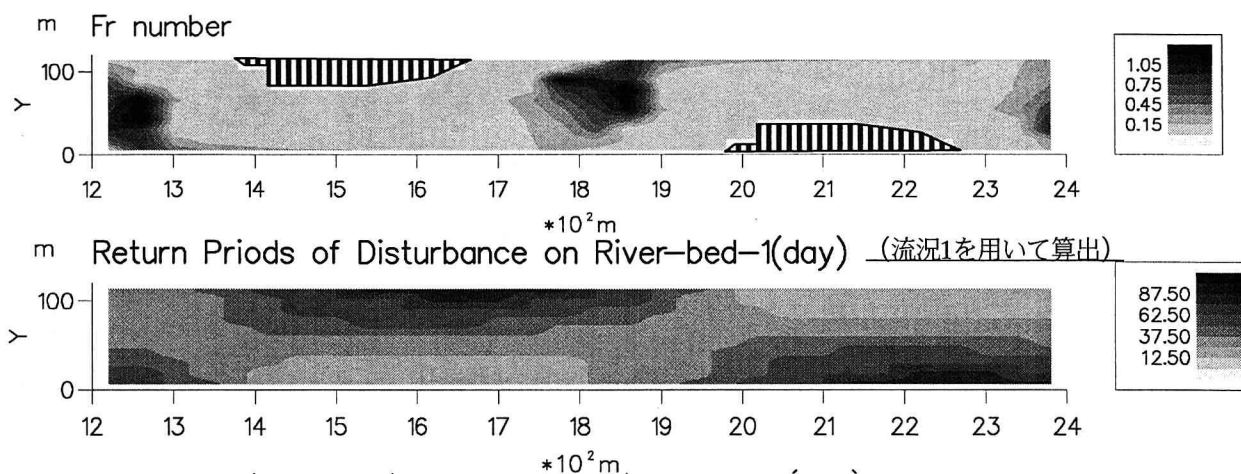
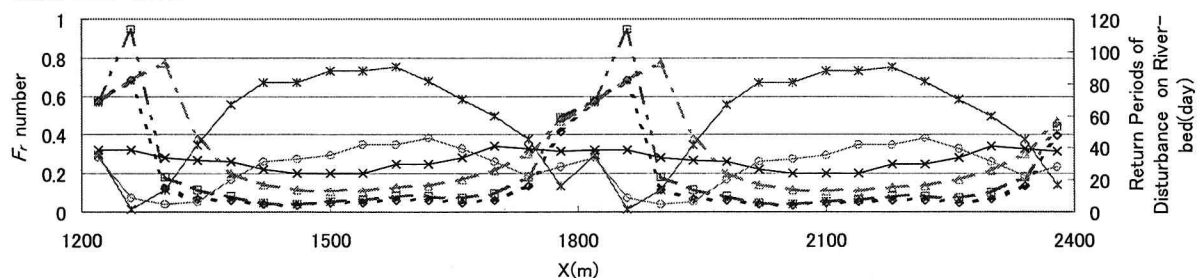
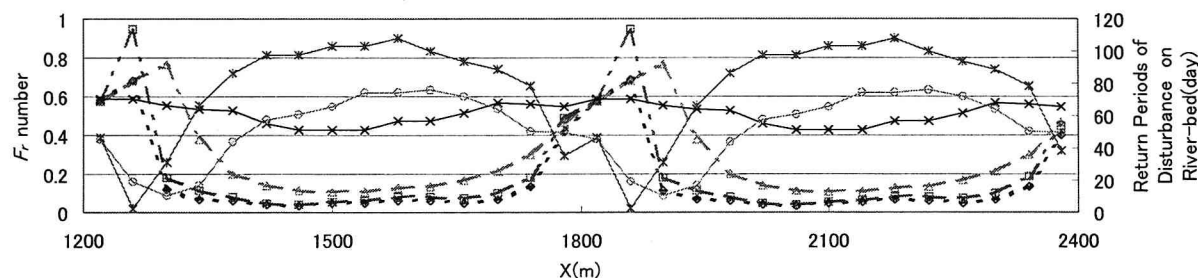


図-7 フルード数 (30m³/s) と流況1を用いて算出された河床攪乱頻度 (平面分布 (ケース1) の例)

流況1を用いて算出



流況2を用いて算出



—○— Fr-(1) —△— Fr-(2) —□— Fr-(3) —×— RPD-(1) —◇— RPD-(2) —*— RPD-(3)

図-8 フルード数 (30m³/s) と河床攪乱頻度の縦断変化

実際に計算を行う区間は、砂州3波長分 (1200m×3) とその下流の矩形断面区間を合わせて縦断方向に4000mとし、計算流量に応じた等流水深を下流端で与えるものとする。また、これより示す計算結果は、中心部1波長分を取り出して示すものとする。図-5には、矢作川の現地流況で言うところの平水時 (30m³/s、表-1参照) の計算例を示す。

本章では、砂州波高の変化に伴う水理特性の変化を記述するために、フルード数と河床攪乱頻度を算出する。

フルード数 ($Fr = u/\sqrt{gh}$, u : 流速, g : 重力加速度, h : 水深) は、流れの特性を表す無次元パラメータであり、最近では、瀬・淵構造との関連性から上げられること⁸⁾も多い。また、河床攪乱頻度は $\tau_s > \tau_{sc}$ となる再帰期間 (return period) によって表記するので、流量時系列

によって変化する。図-6には、計算を行った流量と各流量の超過確率との関係から作成した流況曲線を示す。図中の流況1は、矢作川中流域における矢作ダム建設以前 (1958-70年) の日最大流量時系列から作成したものであり、流況2は、流況1を基準としながらも、現地地形 (図-3参照) の低水路満杯流量に相当する500m³/s程度以下の中小規模出水の起こる確率を小さく、平常時流量の確率を大きくして設定したものである。

図-7に、本解析の結果として得られるフルード数 (平水 (30m³/s) 時) と河床攪乱頻度の空間分布の一例を示し、図-8には、それぞれについて水域内の横断平均をとって、その縦断的变化を示す。各数値の正確性については確認していないが、ここでは、地形変化に応じて変化する数値分布の傾向を重要視し、考察を加えることとする。図中に破線で示すフルード数の分布を見ると、標

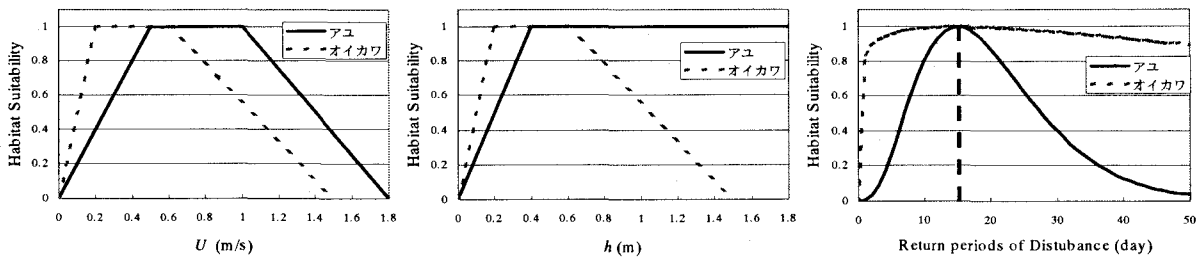


図-9 流速、水深、河床攪乱頻度に対する選好曲線

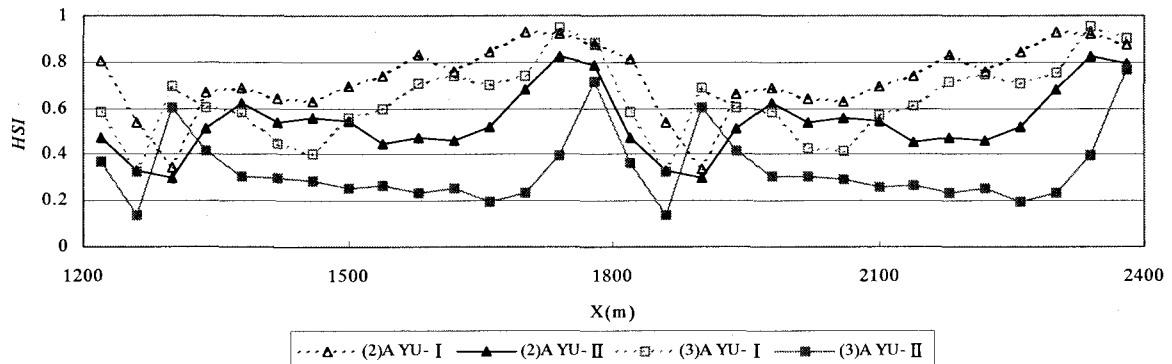


図-10 砂州波高の差異によるアユのHSI評価値の縦断変化 (ケース2, 3)を比較

準的な波高を有するケース2)は他の2ケースと比べ、フルード数が相対的に大きな区間が長く、「瀬」の占める割合がやや大きい。また、実線で示す河床攪乱頻度の分布を見ると、波高の小さいケース1)では変動幅が小さく、「瀬」よりむしろ「淵」で攪乱され易く、フルード数の分布が示すような瀬と淵の明確な差が見られない。それに対し、他の2ケースではフルード数の分布特性に応じて変化しており、「瀬」での攪乱頻度が卓越している。さらに、流況を変化させた際の応答に着目すると、全体的に攪乱頻度は減少しているが、波高の比較的大きいケース2), 3)の「瀬」では、攪乱されやすい場が保たれていることが分かる。

4. 生息場評価による瀬・淵構造変質に関する考察

3では、波高を変化させた3ケースの砂州地形を対象とした水理解析を行い、フルード数、河床攪乱頻度に着目することによって、流況、砂州特性の変化による水理特性の変化を表現した。しかし、瀬・淵構造は、水域を利用する生物の生息場と密接に関わっており、その変質を議論するためには、水理特性の変化を記述だけでなく、生息場の変質をも視野に入れる必要があると考えられる。そこで本章では、3で得られた水理量をもとに生息場評価を行い、瀬・淵構造の変質を議論する。

(1) 選好曲線の作成

PHABSIMを適用し、生息場を評価するには、評価の対象とする生物 (ここでは、アユ、オイカワ) に対して適当な物理環境指標を選び、それぞれの指標について生

息適性を0~1の数値で表した選好曲線を作成する必要がある。従来、この指標には流速、水深、底質粒径が選択されてきたが、瀬・淵構造の変質を十分に記述できていない。そこで本研究では、従来からの指標である流速、水深に加えて、河床攪乱頻度 (再帰期間) について選好曲線を設定する。

流速、水深に対する選好曲線については、中村ら⁹⁾の言うところの第1種評価基準を採用し、河床攪乱頻度については、アユ、オイカワの食性・餌環境を考慮した北村ら³⁾の研究成果を用いた (図-9参照)。アユは、非糸状藻を専食する傾向が強いのにに対し、オイカワは、それを中心とする雑食性であること、非糸状藻は、河床表面に何も生じていない状態から10~20日を経て、繁茂状態がピークに達し、その後、糸状藻に遷移すること^{10), 11)}を考慮し、河床攪乱頻度に関わる選好曲線は、再帰期間が15日で適性値が最大 (1.0) となるようなベル型曲線 (ガンマ分布の密度関数) となっている。

(2) 生息場の評価と瀬・淵構造変質に関する考察

本研究では、(I)流速、水深を指標とした場合、(II)流速、水深、河床攪乱頻度 (流況1をもとに算出) を指標とした場合、(III)流速、水深、河床攪乱頻度 (流況2をもとに算出) を指標とした場合の生息場の評価を行う。生息場適性評価値 (Habitat Suitability Index) の算出には、次式を用いる。

$$\Xi_k = \sqrt[p]{\prod_{j=1}^p f_j(\xi_{jk})} \quad (2)$$

ここに、 Ξ_k : 生息環境適性評価値 (HSI), ξ_j : 物理環境指標 (ここでは、流速、水深、河床攪乱の再帰期間),

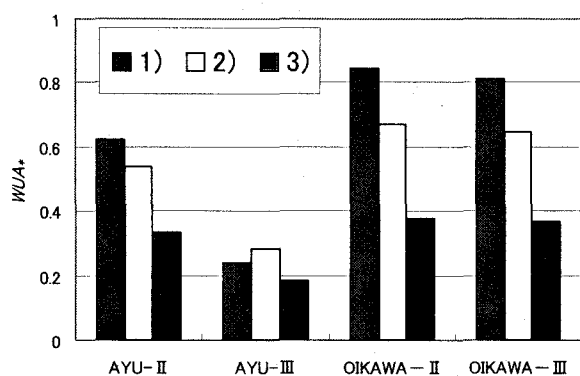


図-11 流況変化によるWUA.の変化

$f(\xi_j)$: 選好曲線, p : 指標の個数, k : 位置を表す添字である. なお, 水域内の評価値 HSI の空間平均をとり, 規格化された WUA . (weighted usable area) についても算出し, ここでの議論に用いるものとする.

まず, 砂州波高の差異による生息場の変化に着目する. 図-10に, 算出された評価値 HSI の縦断分布の一例を示す. 標準的な波高を有するケース2)と比較的波高の大きなケース3)を比較すると, (I)による評価値 HSI_I (以下, HSI_I とだけ表記. (II), (III)についても同様) は, 両者にはっきりとした差が見られないが, HSI_{II} では, ケース3)の方が小さくなっている様子が分かる. この時の WUA .を比較すると, (I)では, ケース2)で0.73, ケース3)で0.64であるの対し, (II)では, それぞれ0.54, 0.33となっており, ここでも顕著な差が見られる. これらから類推するに, 河床攪乱頻度を指標に加えることによって, 砂州波高の増大による生息場の変質をより明確に記述出来る可能性があると言える.

続いて, 流況の差異 (図-6参照) による生息場の変質に着目する. 図-11は, 流況を変化させて算出した HSI_{II} と HSI_{III} のそれぞれの空間平均から得られる WUA .を, 対象砂州地形, 対象魚種ごとに整理したものであり, 砂州波高が大きくなる (1) → 2) → 3)) につれて, WUA .は小さくなる傾向が認められる. 流況の差異に着目すると, オイカワについては流況の差異による WUA .の変化が有意でないために, 評価時点での水理量分布で生息場が決定されることが推測される一方, アユについては, 砂州波高の小さなケース1)では, WUA .の低下の度合いが大きく, 砂州波高の大きなケース3)では, WUA .の低下の度合いが小さいために, (III)では, ケース2)の WUA .が最大となっている. これらから考えるに, 標準的な波高を有するケース2)では, 流況が変化してもある程度良好な生息場が保持されるものと考えられ, 標準的なスケールの交互砂州は, 適度な瀬・淵構造を提供し, その地形特性が変化しないとするならば, 流況が変化しても比較的良好な生息場を維持しうると推測される.

5. おわりに

本研究では, 矢作川中流域における河床攪乱頻度の劇的な変化について, 既存の資料を用いた解析を行う中で, 砂州地形の変化が瀬・淵構造及び生息場の変質に与える影響に着目し, 平面2次元水理解析を用いて水理特性を把握し, 生息場を評価することによって, 河床攪乱頻度と瀬・淵構造の重要性を関連付けて考察を行った.

その結果, 河床攪乱頻度を指標とすることによって, 砂州波高の変化による生息場の変質をより明確に記述しうることを示した. また, 既存の研究で示された標準的な交互砂州は, 適度な瀬・淵構造を提供し, その地形特性が変化しないとするならば, 流況が変化しても比較的良好な生息場を維持しうることが示唆された.

しかしながら, 今回, 議論を行った河床攪乱頻度は, 河床砂礫が動くか否かという基準のみに基づいて算出しており, 河床のフラッシングなど他の攪乱要因については考慮していないことや, 解析を行った対象地形が, 実際の砂州を近似したものであることなど, 改良の余地がある. 今後は, より適正な生息場評価を目標とし, 十分な野外観測, 数値解析を行うことによって, 瀬・淵構造と河床物理環境に着目した検討を進めていきたい.

参考文献

- 1) 御勢久右衛門, 水野信彦: 河川の生態学, 築地書館, 1992.
- 2) 知花武佳, 玉井信行: 環境傾度を考慮した魚類生息環境評価法に関する研究, 河川技術論文集, Vol.6, pp.161-166, 2000.
- 3) 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, 河川技術論文集, Vol.7, pp.297-302, 2001.
- 4) 田中蕃: 砂利投入による河床構造回復の試みとその効果, 矢作川研究, No.1, pp.175-202, 1997.
- 5) 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, pp.87-96, 1994.
- 6) 中川博次, 辻本哲郎: 移動床流れの水理, 技報堂出版, 1986.
- 7) 土木学会水理委員会基礎水理部会: 水工学における計算機利用の講習会講義集, 1999.
- 8) 野上毅, 渡邊康玄, 新目竜一: 真駒内川における魚類の生息環境, 河川技術論文集, Vol.6, pp.95-100, 2000.
- 9) アメリカ合衆国内務省, 国立生物研究所 (テリーワドゥル, 中村俊六訳): IFIM入門, 財団法人リバーフロント整備センター, 1999.
- 10) 赤松良久, 戸田祐嗣, 池田駿介: 河床付着性藻類の増殖と剥離に関する実験的研究, 河川技術論文集, Vol.6, pp.113-118, 2000.
- 11) 浅枝隆, Duong Hong Son, 藤野毅: 河床のペリファイトンの遷移過程の解析, 河川技術論文集, Vol.6, pp.119-124, 2000.

(2001. 10. 1受付)