

4. 河床攪乱頻度と生息場評価

(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、砂利採取などによる供給土砂の減少から、河床低下、河床のアーマー化といった問題が顕在化している。こうした河川では生育・生息場が変化し、生態系が変質することが知られている¹⁾が、多くの生息場評価に関する研究がなされるようになった今日でも、これらの変化を十分に記述するまでには至っていない。

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、その中で PHABSIM (Physical Habitat Simulation) が多用されている。PHABSIM は、対象とする種の、対象とする生活史上の生息場適性を河川地形・水流の物理特性量と関連づけて評価する手法と言える。従って、水理モデルで記述し得る物理環境の変化であれば、適切な物理環境指標を選ぶことによって、ある河道区間における河道変化の影響を評価することが可能である。物理環境指標は、流速、水深、底質粒径とされることが多いが、最近では河川の瀬・淵構造が重要であるという認識から、その空間的微分(環境傾度)を考慮することもある²⁾。また、島谷ら³⁾及び野上ら⁴⁾は河川改修前後の調査結果から、魚類の生息場における浮き石帯、沈み石帯の重要性を指摘している。浮き石帯、沈み石帯、さらにはアーマー化のような河床構造の問題については、これまでの水理モデルにおける底質粒径という取り扱いでは不十分であり、評価する時点に至るまでの流量時系列を考慮した「河床攪乱頻度」の評価が必要になると考えられる。

本章では、生息場評価における物理環境指標として、新たに「河床攪乱頻度」の導入について議論を行い、河床のアーマー化が生じた河川における適正な生息場の評価手法を検討する。まず、こうした河川の事例として、矢作川中流域に着目し、河道地形、流量データ等の資料の整理と既往の文献^{5)・6)}に見られる生物相の変化から、河床攪乱頻度が生育・生息場を規定する要因であることを示す。さらに、河床攪乱頻度の重要性を瀬・淵構造との関連性から議論するために、矢作川現地形を想定した河道において平面 2 次元水理、河床変動解析⁷⁾を行い、交互砂州の形成、供給土砂減少によるその変形過程を再現した後、河床攪乱頻度の空間分布を算出し、矢作川中流域の代表種であるアユ (*Plecoglossus altivelis*)、オイカワ (*Zacco Platypus*) を対象として生息場の評価を行う。

(2) 矢作川中流域の河道動態と生息場の変質

矢作川は、幹線流路延長 117km、流域面積 1,830km²を有し、巴川、乙川などの支川を合わせ、三河湾に注ぐ 1 級河川である (図-4.1 参照)。流域は長野、岐阜、愛知の 3 県に及び、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いるが、洪水調節機能を有しているのは、1971 年に建設された矢作ダム (80km 地点) だけである。

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⁸⁾。本章では、越戸ダム (45.8km 地点) の下流に位置する 42km~44.4km 区間を対象とし、矢作



図-4.1 矢作川流域概要

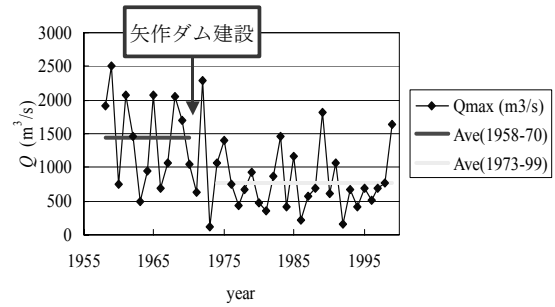


図-4.2 年最大流量の経年変化

表-4.1 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: m³/s)

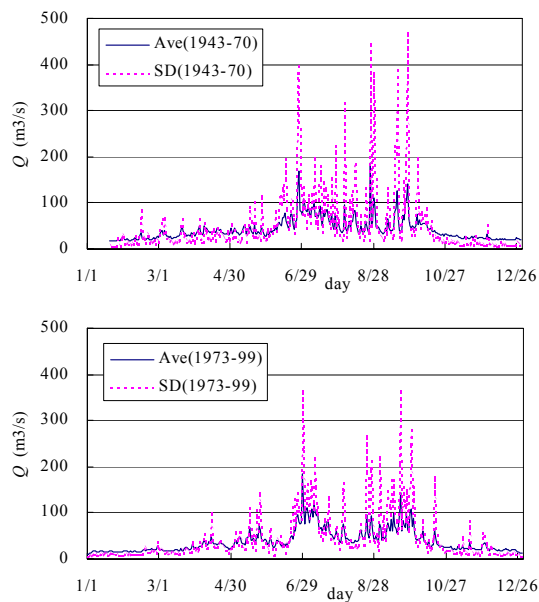


図-4.3 日平均流量の年間変動

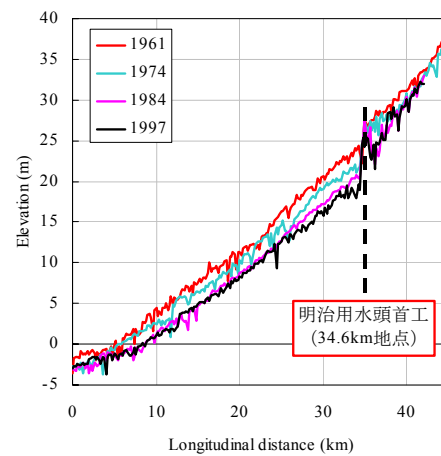


図-4.4 最深河床の縦断変化

川中流域における河床のアーマー化がもたらす河床攪乱頻度の低下に着目して、議論を進める。

流量特性の変化

中部電力越戸ダム管理所のゲート操作記録 (1943～1999) より、発電使用水量、ゲート放流量を調べ、それらの合計をもって対象区間の流量とした。こうして得られた日平均流

量、年最大流量（時間平均流量）を用いて、矢作ダム建設前後を比較する．矢作ダム完成は1971年3月であるが、その後の湛水期間を考慮して、ダム運用前（1970年以前）と運用後（1973年以後）に分けてデータ整理を行うこととした．図-4.2に年最大流量の経年変化、図-4.3に日平均流量の平均値（Ave）、標準偏差（SD）の年間変動を示す．

年最大流量は、矢作ダム運用前後で $1500\text{m}^3/\text{s}$ 程度から $800\text{m}^3/\text{s}$ 程度にまで落ち込んでいる．また、ダム運用前後における日平均流量は、平均値の有意な差は無いものの、標準偏差については顕著な違いが認められ、豊・平・低水流量（表-4.1 参照）についても低減されている．

河床縦断形状の変化

最深河床の縦断変化について、河口から42km地点までを図-4.4に示す．矢作ダムが建設された1971年以降、最深河床の低下が年々下流へ伝播しており、明治用水頭首工より下流では、最高で5m～6m程度の河床低下が起こっている一方、その上流における河床低下は2～3m程度の範囲にある．

河床構成材料の変化

平均粒径の縦断変化及び42km地点の粒度分布の経年変化をそれぞれ図-4.5、図-4.6に示す．これらの図から河床の粗粒化が年々進行している様子が分かる．平均粒径の縦断変化を見ると、明治用水頭首工（34.6km地点）、越戸ダム（45.8km地点）などのダム直下流における変化が特に顕著であり、上流から河床の粗粒化が伝播している．河床の粗粒化は、上流からの供給土砂の不足に起因しており、上流域での砂利採取、砂防整備、ダムによる土砂の抑止などの影響が考えられる．また、42km地点の粒度分布を見ると、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(2)で示した河床縦断形状の変化と併せて考えると、砂で覆われていた河床から、砂が輸送されて河床低下が起こり、2～3mm程度の砂層を洗掘し尽くした後に、玉石による残留礫層が露出してきたと考えることが出来る．すなわち、ここでのアーマー化は、粒径別の選択輸送が顕著である通常のアーマー化とは異なるものであると考えられる．

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-4.7 参照）に着目する．

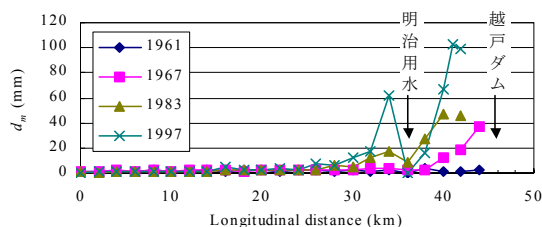


図-4.5 平均粒径の縦断変化

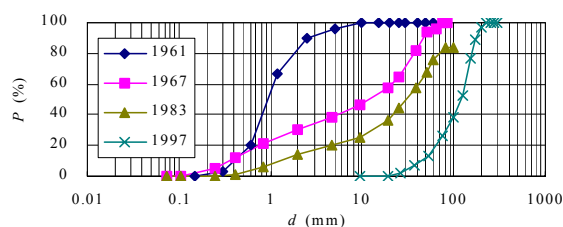


図-4.6 42km 地点における粒度分布

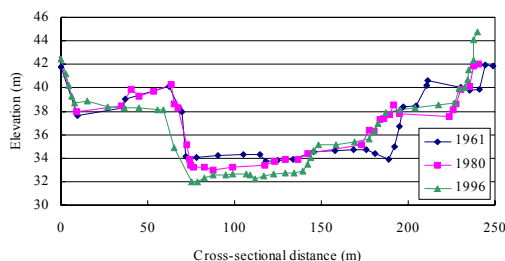


図-4.7 42km 地点における横断面の経年変化

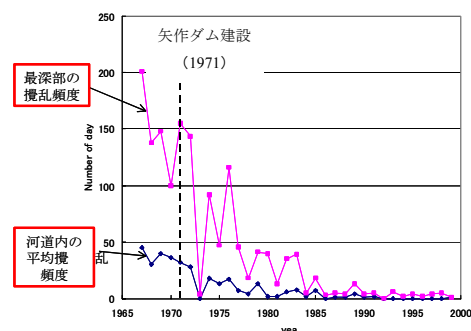


図-4.8 河床攪乱頻度の経年変化

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。この当時の低水路には、波高が小さいながらも砂州が発達している様子が伺えるが、1967～83 年当時の対象区間は、年最大流量の水利条件下で、黒木ら⁹⁾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いる。

河床攪乱頻度の変化

上記までで流量、河床材料、横断面の経年変化をもとに、42km 地点に着目して、1 年当たり、どの程度河床材料が移動するかを 1 次元等流計算を行って推測する。流量には日最大流量の時系列を、河床材料としては図-4.6 に示した平均粒径を、断面形状は図-4.7 に示した横断面を想定した。抵抗則には Manning 則を用い、Strickler の式によって等価粗度 k_s を平均粒径 d_m と結びつけるものとする（ここでは、 $k_s = 2.5d_m$ とした）。

砂粒レイノルズ数の十分大きい条件下で、混合砂礫床の場合、無次元限界掃流力 τ_{mc}^* の値は、均一粒径の場合のそれ ($\tau_{mc}^* = 0.05$) よりも小さくなる¹⁰⁾。ここでは、 $\tau_{mc}^* = 0.03$ とし、算出した τ 時系列から、その超過日数を年毎に整理し、図-4.8 にまとめた。

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。

生育・生息場の変質

矢作川中流域における生物相について、既往の研究から魚類相、付着藻類相の変遷をまとめる。

山本⁶⁾は、アユを指標とし、その釣果の記録から魚類相の変遷を考察する中で、古巣地区 (44km 地点付近) における 1980 年代と 90 年代の釣果に有意な差があることを見出し、アユの生息場の悪化との関連性を指摘している。このような変化は (5) で示した河床攪乱頻度の変化と一致している。

古巣地区において、糸状藻類カワシオグサ (*Cladophora glomerata*) は 1990 年代から繁茂している。内田^{5), 11)}は、矢作川中流の広域にわたって、1995 年 4 月から 1999 年 2 月に行った付着藻類調査の結果をまとめており、その中で、1995 年春から 1998 年冬の期間、

カワシオグサの分布は春及び秋に拡大し、夏及び冬に縮小する傾向にあったが、1998 年夏以降は顕著な消長はなく、広域に継続して発生したと報告している。Petts¹²⁾によれば、カワシオグサを始めとする付着性緑藻の異常繁茂は、富栄養化しさらに河床の攪乱が減少した河川に於ける一般的な傾向であるとされており、アユ釣果の減少と併せて鑑みるに、河床攪乱頻度の変化は生物相の変化とよく対応している。

(3) 供給土砂の減少による交互砂州の変質

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が形成される。矢作川越戸ダム下流部では、近年、河床のアーマー化が進行し、河道内の瀬・淵構造、生育・生息場が変質されてきた。

本章では、生育・生息場としての重要な役割を果たしている河床攪乱頻度を瀬・淵構造との関連性で議論するために、後藤ら⁷⁾の手法による平面 2 次元水理、河床変動解析を用いて議論を行う。すなわち、まず、交互砂州の形成過程を再現した後、上流からの供給土砂を減少させ、その変質状況について考察を行う。

交互砂州の形成過程

矢作川 42km 地点付近の直線河道区間における河道規模を参考に、河幅 120m、河床勾配 1/670 をもつ矩形断面水路を初期状態とし、解析を行う。流量は、矢作ダム建設以前の年平均最大流量である 1500m³/s、河床材料は、1967 年当時の平均粒径を対象とし、簡単のため 1.9cm の一様砂とする。なお、長田¹³⁾にならい、砂州発生のきっかけをつくるために、上流端で単位幅流量の横断方向分布の微小擾乱を与えるものとする。

550 時間後には、砂州波長 L_M は 1500m、砂州波高 H_B は 4.1m の平衡状態に達する(図-4.9 (①) 参照)。砂州波長・波高について、砂州の形状特性に関する既存の研究¹⁴⁾で知られている数値と本解析における数値を比較すると、本解析における L_M はやや長く、 H_B はやや大きい。

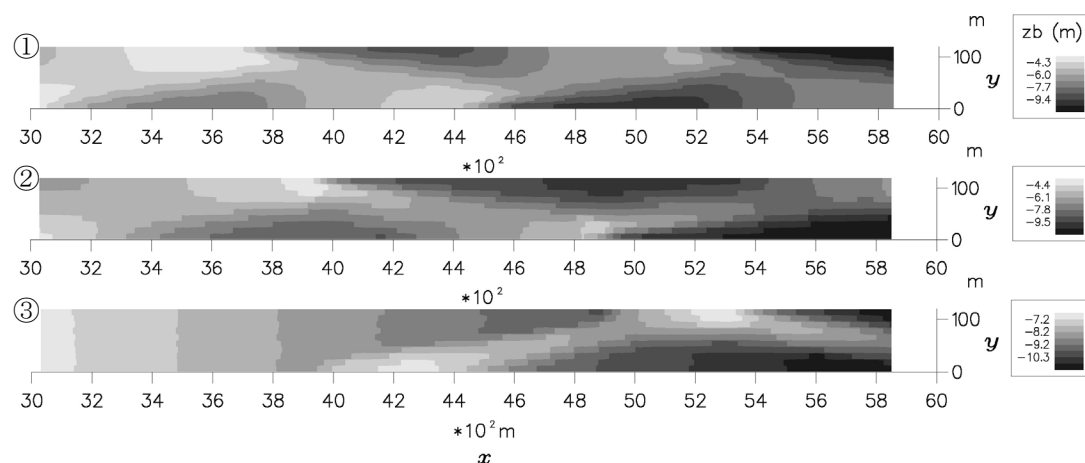


図-4.9 対象河道の河床高コンター図

表-2 対象河道の河道特性

	波長 L_M (m)	波高 H_B (m)	河床勾配 I_0	基盤層露出度 (%)
①	1500	4.1	1/671	0.0
②	1920	4.0	1/831	5.4
③	2040	2.8	1/727	54.4

供給土砂の減少による交互砂州の変質

矢作川中流域におけるアーマー化は、10～30cm 程度の残留礫によって構成される基盤層による影響が大きく、通常のアーマー化と区別して考える必要がある。そこで、本解析では、図-4.9①の、平衡状態にある交互砂州の河床地形を初期条件に、河床低下が一定深度以下で制限される場合を対象として、供給土砂を減少させた解析を行った後、交互砂州の変質状況について議論を行う。

図-4.9 (②, ③) に、基盤層を平均河床高から 2.5m の深度に設定した条件により得られる河床高コンター図を示す。また、河床低下の進行レベルに応じて選択した 3 ケースの河床 (図-4.9 参照) について、表-4.2 にその河道特性をまとめる。

基盤層の露出率が小さいうちは、河床低下の進行に応じ、砂州波長は大きく、砂州波高は小さくなっていくが、上流から基盤層が露出し始めると、僅かに残存していた起伏も消失していく。すなわち、河床低下の進行に応じ、瀬・淵が曖昧で、アーマー化した河床になっていく様子が分かる。

(4) 生息場の評価

上述の検討により、矢作川中流域では、ダム建設を主因とする供給土砂の減少、流況の平滑化によって、河床のアーマー化が進行し、河床の攪乱頻度が減少したことと対応して、近年、糸状緑藻カワシオグサが繁茂し、アユが減少するなど生育・生息場が変質してきた ((2) 参照)。中でも、付着藻類の生育場は、河床の攪乱頻度に強く依存し、それを餌とする魚類も同様であると考えられる。こうした考えに基づき、本研究では、(3) で行った河床変動解析の中から、河床低下の進行レベルに応じて選択した 3 ケースの河道 (図-4.9 参照) について、付着藻類を主食とするアユ、オイカワを対象とし、生息場の評価を行う。

1 次元解析による水理特性の把握

対象河道は、低水路が単一であり、瀬・淵などの河床形態については、流れに沿った縦断的な変化が水理量に対して支配的であることから、1 次元解析によって流れ場を再現し、水理特性の変化を把握する。

図-4.10 上段に、平水 (30m³/s) 時のフルード数と河床攪乱頻度の縦断変化を示す。フルード数は瀬・淵の水理特性を表すパラメータと考えられるが、河床の低下、平滑化に伴ってその変動幅は小さくなっている様子が分かる。また、ここで河床攪乱頻度は、その再帰期間 (return period) によって表すものとする。すなわち、矢作川越戸ダム下流部における日最大流量時系列の整理から、各流量値の出現確率を算出し、解析によって得られる無次元掃流力の時系列と照合して、河床攪乱頻度を算出する。河床攪乱頻度を平水時のフルー

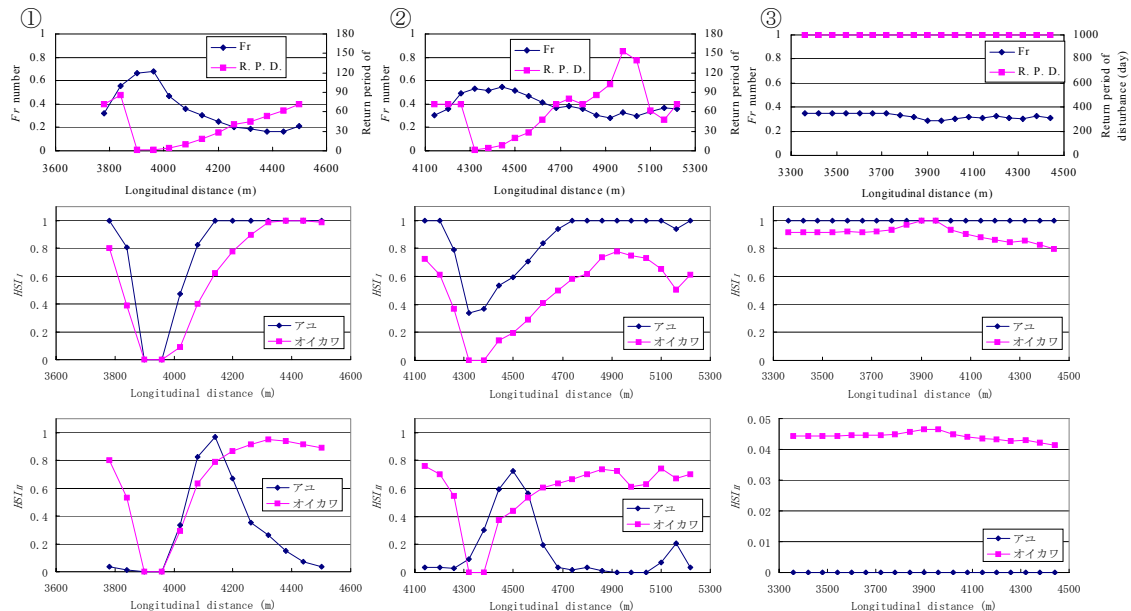


図-4.10 対象河道（①～③）における水理特性と生息場適性評価値の縦断分布

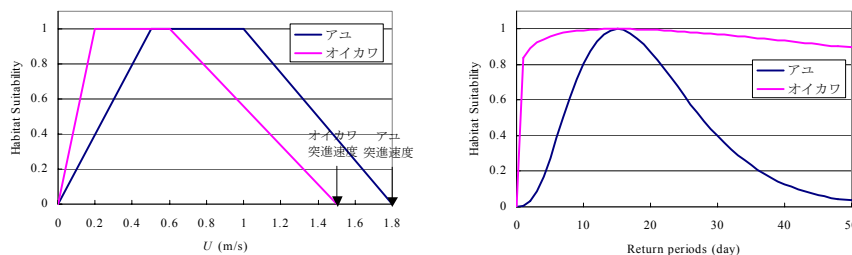


図-4.11 流速，河床攪乱頻度に対する選好曲線

ド数と照合すると、「瀬」で大きく、「淵」で小さくなっており，河床低下の進行に伴い，攪乱されにくくなっていく様子が分かる。

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．本研究では，従来からの指標である流速と河床攪乱頻度（再帰期間）について選好曲線を設定する（図-4.11 参照）。

流速に対する選好曲線については，中村ら¹⁵⁾の言うところの第 1 種評価基準を採用する．河床攪乱頻度については，付着藻類の生育場，底生動物の生息場と密接に関連することから，対象魚種であるアユ，オイカワの食性・餌環境を考えて，選好曲線を作成する．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，それを中心としながらも雑食性で

あることが知られている。一方、付着藻類の増殖・遷移過程を調べた既存の研究^{16),17)}によると、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。これらから、生息場としての適性を考えるに、河床攪乱の再帰期間が10~20日ならば、良好な生息場が形成、維持されと考えられる。そこで、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)で与えた。

生息場の評価

本研究では、新たな物理環境指標の有効性を検討する意味合いから、(Ⅰ)流速のみを指標とした場合、(Ⅱ)流速、河床攪乱頻度を指標とした場合について、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。

$$\Xi_k = \sqrt[p]{\prod_{j=1}^p f_j(\xi_{jk})} \quad (4.1)$$

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、河床攪乱の再帰期間)、 $f(\xi_j)$: 選好曲線、 p : 指標の個数、 k : 位置を表す添字である。

図-4.10 中段に、(Ⅰ)の評価値 HSI_I の分布を、下段に(Ⅱ)の評価値 HSI_{II} の分布を示す。上段の水利特性の変化も併せて見ると、瀬・淵が曖昧になるにつれ、 HSI_I は大きくなるのに対し、 HSI_{II} は小さくなっている様子が分かる。また、 HSI_{II} の分布に着目すると、瀬と淵の存在によってアユとオイカワの棲み分けが確保されているように推察される。これらから、河床攪乱頻度の導入によって得られた評価値 HSI_{II} の分布は、実際の河川で起こっている生息場の変質と定性的な一致を見ている。

(5) まとめ

本研究では、矢作川中流域における河床のアーマー化の事例を通して、生育・生息場の変質を河床攪乱頻度の変化と関連付けて議論出来ることを示した。

さらに、この河床攪乱頻度を新たな物理環境指標として IFIM/PHABSIM に導入し、生息場の評価を試みた。その結果、流速のみを指標とした場合よりも、流速、河床攪乱頻度を指標とした場合の方が、実際の河川で起こっている生息場の変質に対応した結果が得られた。

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要因によるものを考慮する余地がある。さらに野外観測、実験を行い、物理環境の適切な把握を重視した検討を行うことによって、より適正な生息場評価を与えることが期待できる。

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

- 術に関する論文集, Vol.6, pp.161-166, 2000.
- 3) 島谷幸宏・小栗幸雄・萱場祐一：中小河川改修前後の生物生息空間と魚類相の変化, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.337-344, 1994.
 - 4) 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, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.95-100, 2000.
 - 5) 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物の基礎, 矢作川研究, No.1, pp.59-80, 1997.
 - 6) 山本敏哉：アユ釣りの記録からたどった釣果の変遷, 矢作川研究, No.4, pp.169-176, 2000.
 - 7) 後藤孝臣・田中良樹・北村忠紀・辻本哲郎：低堰堤堆積土砂のフラッシュに関する数値解析, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.327-332, 2000.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 山本晃一：沖積河川学, 山海堂, 1994.
 - 11) 内田朝子：矢作川における付着藻類と底生動物その 4, 矢作川研究, No.4, pp.5-18, 2000.
 - 12) Petts, G. E. : Impounded Rivers, Perspectives for Ecological management, Wily, J. & Sons, pp.150-157, 1984.
 - 13) 長田信寿：流路変動過程の数値解析法とその応用に関する研究, 京都大学学位論文, pp.47-83, 1998
 - 14) 中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理, 技報堂出版, 1986.
 - 15) 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.
 - 16) 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, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.113-118, 2000.
 - 17) 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, 河川技術に関する論文集, Vol.6, pp.119-124, 2000.