

2. 生活圏の連結性を考慮した魚類生息環境評価法と河道内微地形の役割

(1) はじめに

本章では、魚類の生活圏における様々な行動の側面に着目することによって、その生息環境を総合的に把握する手法を提案し、それを利用して河道内微地形の果たす役割について議論している。

魚類の生息環境評価手法としてはIFIM (Instream Flow Incremental Methodology)¹⁾が一般的であり、その中でPHABSIM (Physical Habitat Simulation)¹⁾が多用されている。著者ら²⁾は既に、石川県森下川で地形・水理、魚類生息調査を行うとともに、地形・底質、植生の存在を合理的に考慮することの出来る平面2次元水理解析（水深平均 $k \cdot \varepsilon$ モデル）と流砂・河床変動解析³⁾を適用し、また選好曲線(Preference curve)を適切に作成することによって局地的な物理環境と生息環境を関連づけ、流況に応じた生息環境適性の変化を記述できることを示した。また、ダムがもたらす生息環境の変質についても、同手法を用いることにより、底生動物の分布の変遷を物理環境の変化と結びつけることによって記述できることを示した⁴⁾。しかし、これら既存の研究例では、生息環境適性の変化を概ね把握できるものの評価はそれぞれの生物の種・サイズ、しかも生活の各ステージごとであり、生息環境を総合的に把握するまでに至っていない。すなわち、一般に魚類は種やその成長段階によって、摂餌、休息、逃避、産卵等の異なる行動状態を持つことが知られており⁵⁾、生息環境もそれに応じて時々刻々と変化するため、様々な行動の側面についての評価をどう総合化するのかという問題が残されている。楊ら⁶⁾はこの異なる行動状態に着目し、「行動モード」と定義付け、遊泳魚であるオイカワ (*Zacco platypus*)を用いた水路実験を行うことにより、各モード毎に流速、水深、遮蔽等の物理環境に対する選好性が異なることを示した。

魚類の生息環境を総合的に把握するためには、普段定位する場、摂餌する場、産卵する場、避難（洪水時或いは干ばつ時）する場といった生活する上で重要な場を想定し、それぞれの場が相互に連携し合うことにより、その生活圏が形成されているという考え方が重要である。そこで本研究では、定位する場を中心に、それぞれの場とのアクセス性を取り入れた評価を試みた。また、こうした観点から、瀬・淵構造、2次流路、河道内植生といった微地形が魚類生息環境に果たす役割について、考察を行った。

(2) 対象河道の概要

研究対象として、木津川交野砂州域（淀川との合流点から12km上流）を想定したが、河道地形は複雑であり、ワンド、たまり等により流水の連續性が遮断されることも多く、流れの解析では安定した解が得られないことが多い。本研究では、微地形要素を重要視し、その影響について論じるもの、現地形への適用そのものより手法の開発に重点を置き、水理計算が簡便になるよう、場を理想化した。すなわち、対象河道は現地形における瀬・淵、砂州域、2次流路等の微地形要素を単純化して取り入れ、次式で表せるモデル河床をもつ直線流路とした（図-2.1参照）。

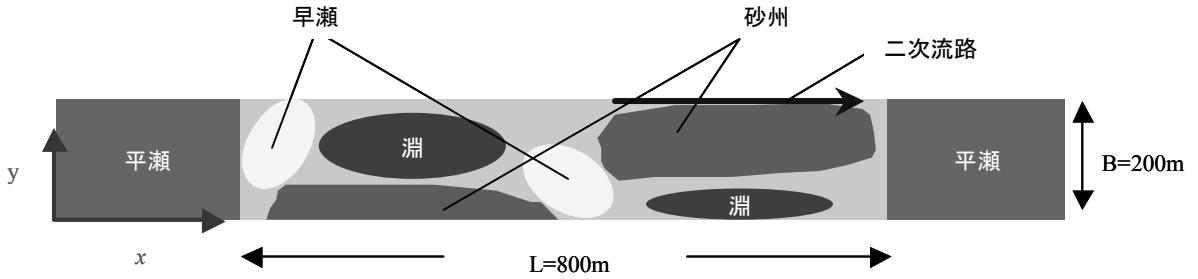


図-2.1 モデル河道の概要

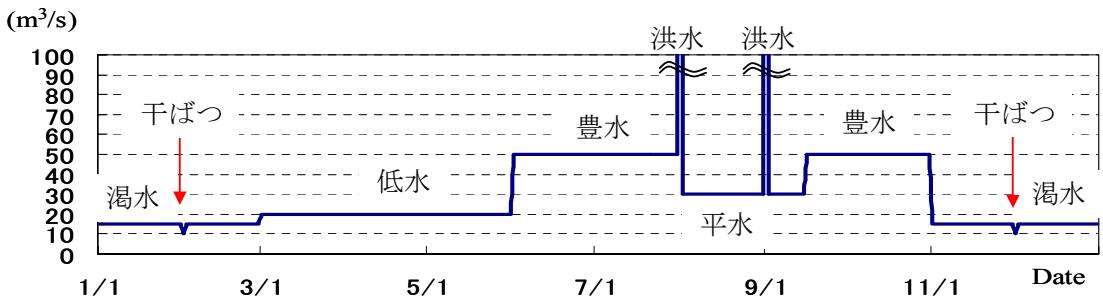


図-2.2 流量時系列

$$z_b(x, y) = -i_b x + A \cos\left(\frac{3\pi}{2B} y\right) \sin\left(\frac{2\pi}{L} x\right) \quad (2.1)$$

ここに, $z_b(x, y)$: 河床高, x : 縦断方向距離, y : 横断方向距離, i_b : 平均河床勾配 (1/1000), A : 砂州の半波高 (1.5m), B : 河幅 (200m), L : 蛇行区間長 (800m) であり, 括弧内の数値は現地スケールと対応させて設定したものである. 流況については調査地点における最近 10 年間のデータ (年平均 $33.7 m^3/s$) を参考に図-2.2 のように設定し, 洪水時を想定した年最大流量は $1000 m^3/s$, 干ばつ時を想定した流量は $10.0 m^3/s$ とした.

河道内の植生域, 底質は生息環境について議論をする上で重要な要素である. 河畔の植生は, 魚類の餌となる流下昆虫の供給源となる⁷⁾し, 冠水すれば流速を減じるので, 平常時に遊泳力の弱い魚の生息場を, 洪水時に避難場を提供する. 東⁸⁾はラジオテレメトリー法を用いて, ウグイ (*Leuciscus hakonensis*) の増水時における挙動を調査し, ワンドや河畔林等に避難することを示した. そこで, モデル流路における植生繁茂域については, 図-2.1 の河床に $20.0 m^3/s$ の流量が流れた際, 冠水しない砂州域全般に均等に植生を配置するものとした. また, 底質は魚類にとって主に産卵場として重要な役割を担っている. 底質を分類する要素としては, 河床の状態 (浮き石, 沈み石, アーマー化等), 平均粒径, 砂・泥占有土 (細粒分の割合) 等が挙げられるが, 流れの数値解析において, 底質を考慮する際には, 河床の平均粒径を用いることが多い. 本来, 河床は洪水時の流れによって変質し, 粒径分布もそれに大きく依存するが, 本研究では, 河床表層部における粒径分布を重視し, 流れ場の解析から流量ごとに求められる移動限界粒径をもって, 河床材料の平均

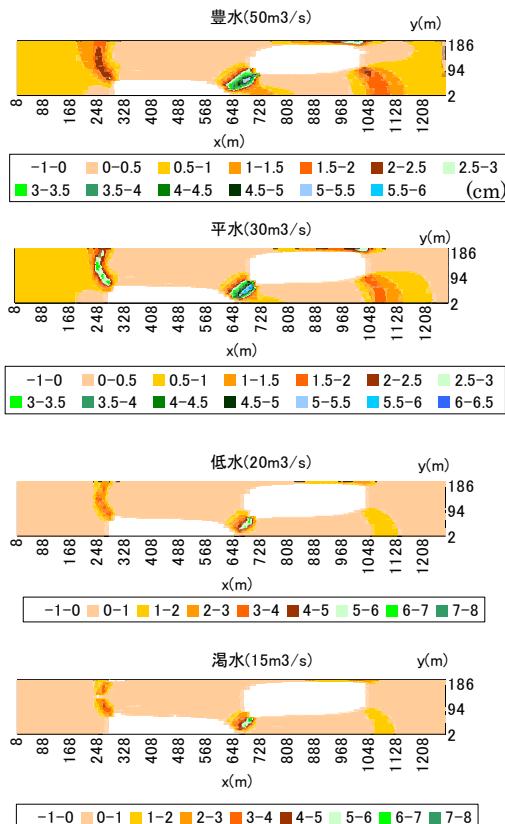


図-2.3 河床材料粒径分布

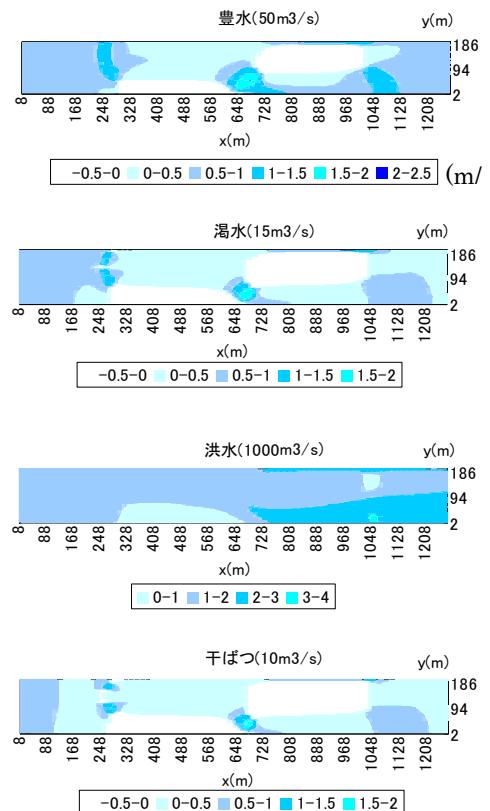


図-2.4 流速コンタ

粒径分布とした（図-2.3 参照）。これは、充分な土砂供給源があり、自然状態に近いアクティビティな河川の状況であるが、人為的影響が大きくなると異なる様相（アーマー化等）も想像されよう。

以上の条件をもとに、本研究では、植生、地形、底質の影響を取り込んだ水深方向に平均された平面2次元解析で、乱流モデルとしては $k-\varepsilon$ モデルを使用した。図-2.4 に解析結果の一例として、流速コンターを示した。

(3) 選好曲線の作成

対象魚種

本研究では、生息環境評価を行う対象魚種について、遊泳魚であるカワムツ (*Zacco temminckii*)、底生魚であるカワヨシノボリ (*Rhinogobius flumineus*) を選択した。両者とも対象地点において、一般的に生息している魚で、仔稚魚期、成魚期とともに摂食、産卵

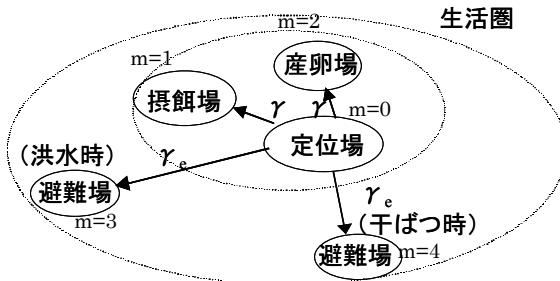


図-2.5 生活圏概念図

表-2.1 対象魚の生態的特徴と環境支配要素

魚種	体長(cm)	生活場		定位(m=0)		摂餌(m=1)		産卵(m=2)		避難(m=3)		避難(m=4)	
		行動圏S(m)	支配要素(j)	餌	支配要素(j)	産卵環境	支配要素(j)	支配要素(j)	支配要素(j)	支配要素(j)	支配要素(j)	支配要素(j)	支配要素(j)
カワムツ (遊泳魚)	仔稚魚	-	8.6m	U,h,d	底生藻類・動物	U,h,d				U	h		
	成魚	11~13cm	12.9m	U,h,d	流下昆虫	✓	流れの緩い砂礫底	U,h,d	U	U	h		
カワヨシノボリ (底生魚)	仔稚魚	-	4.7m	U,h,d	底生藻類・動物	U,h,d				U	h		
	成魚	4~5cm	7.2m	U,h,d	底生藻類・動物	U,h,d	沈み石の下面	U,h,d	U	U	h		

等の生態が知られており⁷⁾、それぞれについて選好曲線を作成する。表-2.1にその生態的特徴を示す。

魚類の生活圏

魚類はその生活史の中で、摂餌、産卵、避難等の様々な行動モード⁶⁾をとる。本研究では、魚類の生息環境を議論する上で、その行動モードに応じて、摂餌場、産卵場、避難場といった生活場を想定し、定位の場を中心にこれらの生活場とのアクセス性に着目した。図-2.5にその概念図を示す。

選好曲線の作成

本研究では、先に想定したそれぞれの生活場に対し、流速(U)、水深(h)、粒径(d)等の環境支配要素(表-2.1参照)を決定し、それを指標とした選好曲線を作成する。

定位場、産卵場の選好曲線については、中村ら⁹⁾の言うところの第一種評価基準を採用した。

摂餌場について、底生藻類・動物を餌とするものは、水生昆虫の生息環境を評価する選好曲線をもって代用することとし、その作成については、著者の一人が参加した水源地生態環境研究会議・流況変動研究会(委員長:池淵周一(京都大学))の活動による比奈知ダム(木津川水系名張川)下流域で行われた底生動物調査結果から、生息密度の累積分布をとる方法⁴⁾によって作成した。流下昆虫を餌とするものについては、砂州植生域からの落下が多く、流れが集まるところに多いと考え、①冠水していない植生域からの距離と②流線の集中度を指標として選好曲線を作成する。なお、流線の集中度を表すには以下の手法によった。先ず、注目するメッシュとそれに隣接するメッシュの平均から流線方向 \bar{s} 、流速の

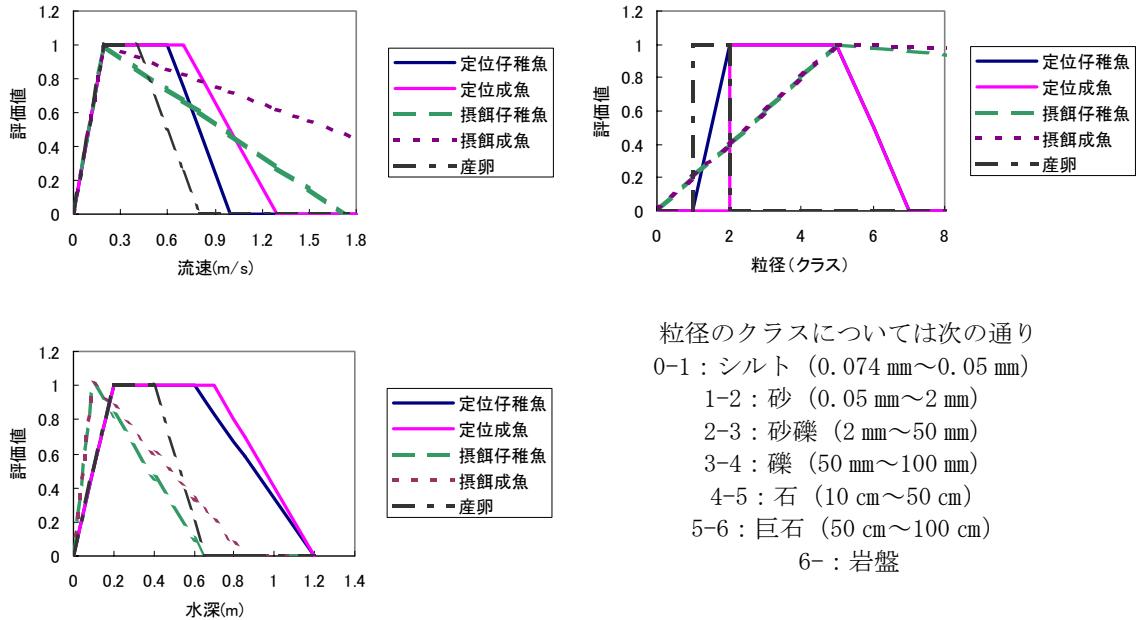


図-2.6 カワヨシノボリ選好曲線

変化分 ΔU , ΔV を決定し, 流速ベクトル $\vec{U}(U,V)$ の流線方向微分の絶対値, さらにその 2 階微分に着目する (式(2.2), (2.3)).

$$\left| \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \right| = \left| \frac{\partial}{\partial s} (U, V) \right| = \left| \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\Delta U}{\Delta x}, \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\Delta V}{\Delta y} \right) \right| \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial s^2} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\Delta U}{\Delta x}, \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\Delta V}{\Delta y} \right) = \Delta \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial U}{\partial s}, \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial V}{\partial s} \right) \quad (2.3)$$

流線の収束位置を知るのに, 式(3)の 2 回微分を行い, その結果, 負の値になるメッシュについて, 式(2.2)を適用し, その値を 0~1 に規格化した上で, さらに次式に示すように, それを 1 から差し引いた ψ を流線の集中度を表す指標とした.

$$\psi = 1 - \left\{ \left| \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \right| / \left| \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \right|_{\max} \right\} \quad (2.4)$$

避難場については, 洪水時に適切な流速のみ確保され, 干ばつ時に必要な水深のみ確保されるように設定した.

以上の条件から, 環境指標 ξ_j を横軸に, 0~1 で表す評価値を縦軸にとり, 図-2.6 に示す様な選好曲線 $\mathcal{A}(\xi_j)$ を作成した (カワヨシノボリについての例を示す).

(4) 生息環境の評価手法の提案

生活場ごとの評価

(3) で示した選好曲線を用いて、PHABSIM を適用し、物理環境（流速、水深、粒径）と生息環境適性を結びつけた。カワムツ、カワヨシノボリの仔稚魚、成魚それぞれについて、各生活場における *HSI* (Habitat Suitability Index) を次式により求める。

$$\Xi_k^{(m)} = p \sqrt{\prod_{j=1}^p n_{jk}^{(m)}} = p \sqrt{\prod_{j=1}^p f_j^{(m)}(\xi_{jk})} \quad (2.5)$$

ここに、 Ξ_k : 生息環境適性評価値 (*HSI*)、 m : 生活場に応じて決定する数 (図-2.5 参照)、 ξ_j : 環境指標 (ここでは、流速、水深、粒径等)、 η_j : 評価値、 $f(\xi_j)$: 選好曲線を表す評価関数、 p : 指標の個数、 k : 位置を表す添え字である。

アクセス性の評価手法

本研究では、定位場の *HSI*を中心として各生活場の *HSI*とのアクセス性、すなわち *HSI*分布の空間的連結性に配慮して、生息環境を総合的に評価する手法を考える。アクセス性を評価するのに重要なのは、魚が移動しうる範囲、行動圏のスケールであると考えられる¹⁰⁾。Minss¹¹⁾の研究成果によれば、魚類の行動範囲 $S^2(m^2)$ は次式で求まる。

$$\ln S^2 = 3.43 + 0.53 \cdot \ln W_T \quad (2.6)$$

ここに、 W_T : 魚の個体質量(g)である。 W_T の推定については宮地ら¹²⁾の手法を援用した。算定された行動圏 $S(m)$ を表-2.1 中に示す。この行動圏の範囲内ならば、魚は移動可能、すなわち、複数の生活場の *HSI* 分布を結合させる際、行動圏内の *HSI* 値は相互に影響を及ぼし合うと考えられる。そこで、式(2.6)で表される行動範囲内において、 (x,y) での値が $(x-\xi, y-\eta)$ (但し、対象河道内水域) 値に及ぼす影響は、関数 γ によって決められると考えた。

$$\gamma(\xi, \eta) = \exp\left(-\frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{\Lambda}\right) \quad (2.7)$$

ここに、 $\Lambda = \alpha \cdot S$ ($\alpha = 0.3 \sim 1.0$) であり、本研究では、 $\alpha = 1.0$ とした。また、緊急時である避難時の行動圏は、図-2.5 に示すように、摂餌時、産卵時のそれよりも大きいと考えられるから、突進速度 V_{fe} と巡航速度 V_{fm} の比を用いて、関数 γ_e を設定した。

$$\gamma_e = \gamma \cdot \frac{V_{fe}}{V_{fm}} \quad (2.8)$$

従って、定位場の *HSI* 分布と他の各生活場における *HSI* 分布の対応するメッシュ同士、さらに式(2.7)、あるいは式(2.8)の関数を掛け合わせることによって、アクセス性を考慮した行動モードの実状を評価することが出来る。これを *CI* (Connectedness Index) と名付け、次式に示す。

$$CI^{(m)}(x, y) = \Xi^0(x, y) \iint \Xi^{(m)}(x - \xi, y - \eta) \cdot \gamma_x(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (2.9)$$

ここに、 γ_x : 影響関数 γ 、あるいは γ_e を表す。この式から算出された *CI* コンターを図-2.7 に示す。この図から、魚類が河道内の様々な環境を利用している様子が伺えるが、この *CI*

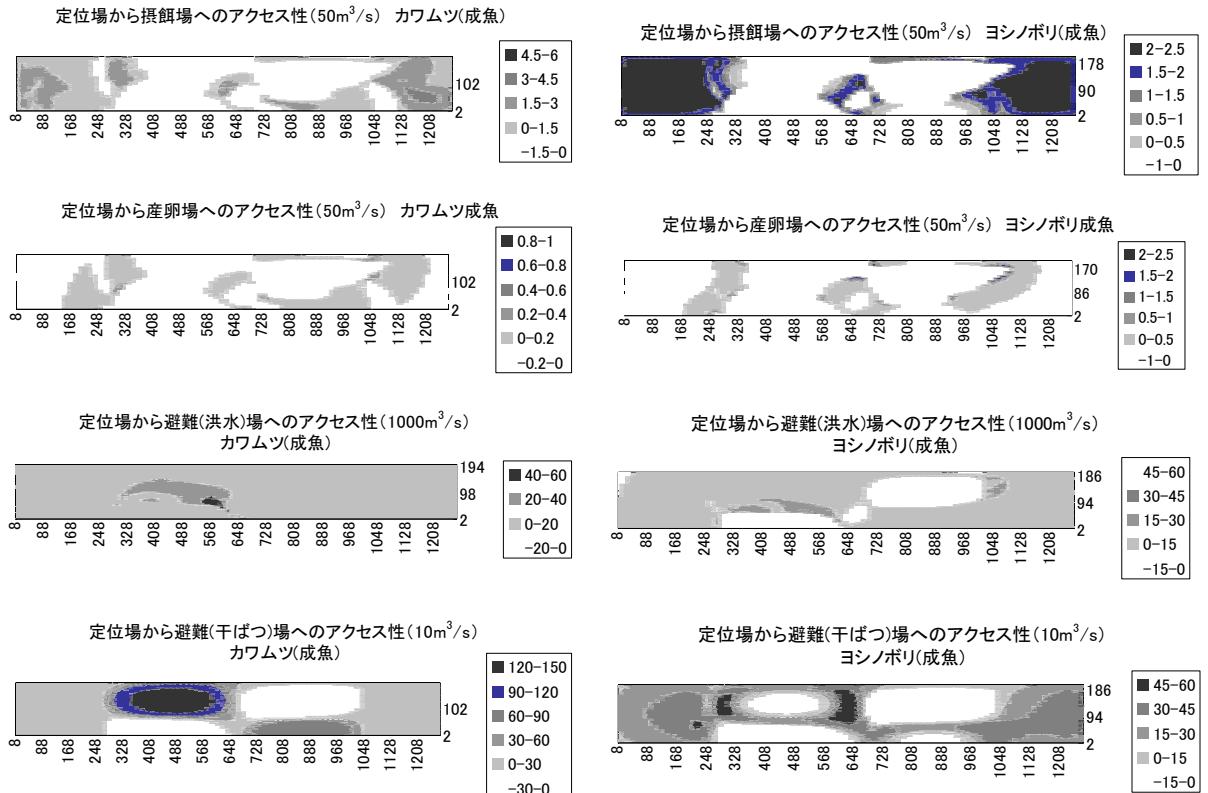


図-2.7a カワムツ成魚 CI/コンター

図-2.7b カワヨシノボリ成魚 CI/コンター

は HSI のように 0~1 で表示されていないため、コンター図同士を比較しても傾向を把握しきれないことから、区間全体の合計値 CI_{SUM} を定義して、考察を行うこととした。これによって、相対的ではあるが様々な比較を行うことが出来る。なお、本研究では実行していないが CI を 0~1 に規格化すると、以下の CI^* で表せる。

$$CI^*(x, y) = \frac{CI(x, y)}{\iint d\xi d\eta} \quad (2.10)$$

(5) 河道内微地形の役割評価

瀬・淵構造、2 次流路、植生等の微地形要素は、自然状態の河川に多く存在しており、それぞれが魚類の生息環境にとって、摂餌、避難、産卵する上で重要な役割を果たしている⁷⁾。しかし、これまでの多くの生息環境評価法では、生活場についての考慮がなかったため、例えば遊泳力の大きな魚類では、凹凸のない平坦な河床の流路が、その魚類にとって

て“良い”生息環境と成ることが予想されるなど、微地形要素についての適正な評価はなされていないと考えられる。そこで、前述の CI_{SUM} という指標を用いることで、生活場とそのアクセス性を考慮し、議論することとした。

表-2.2 CI_{SUM} の比較による河道内微地形の役割評価

カワムツ仔稚魚(CI_{SUM})	現モデル地形	瀬・淵構造なし	2次流路なし	植生なし
定位場→摂餌場	$1.91 \times 10^2(100)$	$4.15 \times 10^2(217)$	$1.84 \times 10^2(96)$	$2.58 \times 10^2(135)$
定位場→避難(洪水)場	$9.28 \times 10^2(100)$	$5.97 \times 10^2(6)$	$9.41 \times 10^2(101)$	0.00(0)
定位場→避難(干ばつ)場	$1.24 \times 10^5(100)$	$3.27 \times 10^5(263)$	$1.22 \times 10^5(98)$	$1.24 \times 10^5(100)$
カワムツ成魚(CI_{SUM})	現モデル地形	瀬・淵構造なし	2次流路なし	植生なし
定位場→摂餌場	$2.54 \times 10^3(100)$	$3.49 \times 10^3(137)$	$2.59 \times 10^3(102)$	$4.27 \times 10^3(168)$
定位場→産卵場	$3.79 \times 10^3(100)$	0.00(0)	$3.08 \times 10^3(81)$	$3.08 \times 10^3(81)$
定位場→避難(洪水)場	$1.54 \times 10^4(100)$	$3.65 \times 10^4(237)$	$1.54 \times 10^4(100)$	0.00(0)
定位場→避難(干ばつ)場	$1.20 \times 10^5(100)$	$3.38 \times 10^5(28)$	$1.22 \times 10^5(102)$	$1.20 \times 10^5(100)$
カワヨシノボリ仔稚魚(CI_{SUM})	現モデル地形	瀬・淵構造なし	2次流路なし	植生なし
定位場→摂餌場	$4.02 \times 10^3(100)$	$3.49 \times 10^3(87)$	$1.37 \times 10^3(34)$	$1.47 \times 10^3(37)$
定位場→避難(洪水)場	$1.54 \times 10^3(100)$	$5.40 \times 10^3(351)$	$1.57 \times 10^3(102)$	0.00(0)
定位場→避難(干ばつ)場	$3.67 \times 10^4(100)$	$5.41 \times 10^4(147)$	$3.66 \times 10^4(99)$	$3.69 \times 10^4(100)$
カワヨシノボリ成魚(CI_{SUM})	現モデル地形	瀬・淵構造なし	2次流路なし	植生なし
定位場→摂餌場	$1.47 \times 10^3(100)$	$8.52 \times 10^3(580)$	$3.83 \times 10^3(261)$	$4.04 \times 10^3(275)$
定位場→産卵場	$1.31 \times 10^2(100)$	0.00(0)	$1.11 \times 10^2(85)$	$1.20 \times 10^2(91)$
定位場→避難(洪水)場	$1.14 \times 10^4(100)$	$2.91 \times 10^4(254)$	$1.09 \times 10^4(96)$	0.00(0)
定位場→避難(干ばつ)場	$7.69 \times 10^4(100)$	$1.16 \times 10^5(151)$	$7.63 \times 10^4(99)$	$7.69 \times 10^4(100)$

本研究では各微地形要素の役割を考察するため、図-2.1に示したモデル流路と、その流路から瀬・淵構造、2次流路、植生のそれぞれ一つの要素を欠落させた流路を想定し、合計4パターンの流路の CI_{SUM} を比較し、河道内微地形の役割について評価した。その結果を表-2.2に示す。なお、表中の括弧内には CI_{SUM} について、図-2.1の現モデル地形の値を100とした数値を目安として記述した。表-2.2より、微地形要素を欠落させた流路では、定位場から摂餌場、産卵場、避難場へのアクセスに大きな影響を与えていていることが分かり、微地形要素の重要性が示されたものと考えられる。

(6) まとめ

本研究では、魚類生息環境を、定位する場所から摂餌場、産卵場、洪水時及び干ばつ時の避難場所への連結性に着目して評価するという考え方を提示した。すなわち、それぞれの種、サイズについて定位、摂餌、産卵、洪水時・干ばつ時の避難場所の適性を従来の生息環境適性評価と同様に固有の選好曲線を作成して評価し、行動圏スケールを用いたaccessability指數を用いて定位場所からのそれぞれの行動モードの場への連結性を求めることで生息環境を評価した。行動圏スケールは従来の研究から生物質量と関係付け、また緊急時と平常時のスケール違いを突進速度と遊泳速度の比で与えた。一方、摂餌環境は餌生物の場合その生息環境とみなした。これによって複数生物の生息場の空間性を食物連鎖で連関させる展望を得た。また落下流下物については河畔林の存在や流線の集中によって評価した。

本研究で提案した生活場の連結性を含む評価法を、砂州河川の特徴を有するモデル河川リーチに適用し、砂州河川のさまざまな微地形要素(瀬・淵構造、2次流路、植生域等)の生息環境としての役割の重要性、とくに産卵環境や避難場所としての機能が評価できた。

参考文献

- 1) Nestler, J. M., R. T. Milhaus and J. B. Layzer : Instream habitat modeling techniques, *Alternative in Regulated River Management*, edited by J. A. Gore and G. E. Petts, CDC Press, 1989.
- 2) 辻本哲郎・永禮大：魚類生息環境変質の評価のシナリオ、水工学論文集、第 43 卷, pp. 947-952, 1999
- 3) 辻本哲郎・北村忠紀：植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程、水工学論文集、第 40 卷, pp. 1003-1008, 1996
- 4) 辻本哲郎・増田健一・寺本敦子・田代喬：試験湛水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュの効果の評価、河川技術に関する論文集, Vol. 5, pp. 81-86, 1999.
- 5) 島谷幸宏・萱場祐一・渡辺昭彦：水辺における生物生息空間創成技術及び生物保全工法に関する研究、環境保全研究成果集, Vol. 1995, No. Pt 2, pp. 83. 1-83-10, 1996.
- 6) 楊繼東・閔根雅彦・浮田正夫・今井剛：行動モードを考慮した魚の環境選好性に関する実験的研究、土木学会論文集, No. 636/VII-13, pp. 35-45, 1999.
- 7) 御勢久右衛門・水野信彦：河川の生態学、筑地書館, 1992.
- 8) 東信行：ラジオテレメトリーを用いたウグイにおける河川空間利用の時間的変化、河川生態環境評価基準の体系化・平成 9~10 年度科学研究費補助金（基礎研究(A)(1)）研究成果報告書, pp. 155-181, 1998.
- 9) 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) 楊繼東・閔根雅彦・今井崇史・川本泰生・浮田正夫：多自然型河川改修効果予測のための魚の生息環境評価手法に関する研究、環境システム研究, Vol. 26, pp. 61-66, 1998.
- 11) Charles K. Minns : Allometry of home range size in lake and river fishes , *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 52, 1995.
- 12) 宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦：原色日本淡水魚類図鑑、保育社, 1992.