

行動モードを考慮した魚の生息環境 評価手法に関する研究

楊 継東¹・関根 雅彦²・浮田 正夫³・今井 剛⁴

¹学生会員 理修 山口大学大学院理工学研究科・博士後期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)
現在の勤務先:株式会社 エイトコンサルタント (〒700-8617 岡山市津島京町3-1-21)

²正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (同上)

⁴正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (同上)

摂餌, 休息, 逃避, 産卵の4つの行動モード別環境選好強度式と行動圏を組み込んだ魚の生息環境評価手法を提案した。本評価手法を用いて, 多自然型河川改修が実施されている山口市の2級河川古甲川におけるオイカワ分布の再現を試みた結果, 行動モードを考慮しない旧来の生息環境評価手法では正しく表現できなかった魚の分布が再現できた。本手法により, これまで正当に評価することのできなかった瀬と淵の組み合わせの価値の評価が可能となった。

Key Words : fish, behavioral mode, habitat, environmental preference, preference curves, habitat valuation

1. はじめに

(1) 既往の研究

従来の河川改修は, 主として治水と利水の観点から行われてきたが, 近年, 生態系を重視した魚の住みやすい川づくりや多自然型河川工法による河川改修が各地で試みられている。これに伴い, 瀬・淵の造成, 多孔質護岸や産卵床の設置などの手法が, 魚の生息環境として有効であるかどうかを客観的に評価する手法が求められている。

魚の生息環境評価に関しては, 欧米を中心に様々な手法が提案されてきた¹⁾。なかでも近年注目されているものに IFIM がある。1976年に発足した US Fish and Wildlife Cooperative Instream Flow Service Group (のちに, National Biological Service) は魚の生息環境の変化を水理モデルと関連づけ, IFIM (Instream Flow Incremental Methodology 流量増分生息域評価法)を開発した²⁾。IFIM は, Method ではなく Methodology と命名されていることからわかるように, 河川環境改変の計画から合意の形成にいたる手順を規定した大きなシステムであるが, この IFIM の核心部で生息環境の評価を受け持っているモデルは PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model) と呼ばれている。PHABSIM では魚の生息環境は, 通常次式のように重み付き利用可能面積 (Weighted Usable Area: WUA) として表現する³⁾。

$$WUA = \sum f(v_i) \times g(d_i) \times h(s_i) \times a_i \quad (1)$$

ここに, i : 河川を類似した物理環境ごとに2次元的に区分したセル, $f(v_i)$: 流速に対する選好値, $g(d_i)$: 水深に対する選好値, $h(s_i)$: 底質に対する選好値, a_i : 各セルの面積である。流速, 水深, 底質以外の環境因子の追加も可能であるが, 通常はこの3因子を取り扱うことが多い。各因子に対する選好値は, 例えば現地で魚の個体数とその位置での各因子の値を観測し, 個体数が2倍なら選好値も2倍になるように各因子と選好値の関係を選好曲線として整理することにより得る。

IFIM や PHABSIM は, 米国, カナダの多くの州では, その理論の明確さとある程度の汎用性から河川環境管理に実用されており, 現在では日本の河川への適用も試みられている。しかし一方で, 食物要素を扱っていない⁴⁾, 各環境因子のウェイトを考慮していない⁵⁾, 環境要素の配置パターンを評価できない, そもそも普遍的な選好曲線を作成するのは困難である, などの問題点^{6), 7), 8), 9)}が指摘され, PHABSIM に対する改良が求められている。筆者らも, ある河川で作成した選好曲線はその河川の魚の分布をよく説明できるが, これを別の河川の生息環境評価に適用すると, 評価の精度が大幅に低下することを見いだしている¹⁰⁾。この理由は, 現地調査に基づいて選好曲線を作成する場合, 注目する環境因子以外に魚の分布に影響する要因の効果を除去することが難しく, 河川固有の選好曲線となりがちだからであると考えられる。

一方著者らは, 河川環境管理を目的とした生態系モデルを構築した¹¹⁾。この中で, PHABSIM とは独立に, 生

物の環境選好性を表現する修正乗法形選好強度式を提案した。ある水域 (PHABSIM 流に言えば「セル」) に対する魚の総合的な選好強度 P^* は、因子 j に対する選好強度を P_j とすると、以下のように表現されるとした。

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{\frac{w_j}{W_{\max}}} \quad (2)$$

$$W_{\max} = \begin{cases} \max_{j \in J} (W_j) & V = \phi \\ \infty & V = \phi \end{cases} \quad (3)$$

$$V = \{j | (\exists i, i') (P_{j,i} \neq P_{j,i'})\} \quad (4)$$

ここに w_j は因子 j のウェイトである。 ϕ は空集合であり、 $P_{j,i}$ は環境因子 j についての水域 i における選好強度である。 V は少なくとも一組の代替案 (水域 i) 間で選好強度に違いが存在するような因子の集合を意味する。

PHABSIM における式 (1) と本式を比較すると、本式の方が複雑なように思われるが、本質的には双方とも各因子に対する選好強度を乗法形で結合したものであり、基本的な考え方は変わらない。式 (2) の P_j の最大値が 1 となるよう正規化することにより、 $P^* \times a_i$ を PHABSIM における WUA と同じように取り扱うことも可能である。本式の特徴については文献¹¹⁾ に詳しく論じているのでここでは概略を述べるにとどめるが、式 (1) との最も大きな違いは因子ウェイトを w_j/W_{\max} という正規化された形で導入していることである。これにより、通常は流速によって魚の分布が支配されているが、冷水の流入などがあると流速にはほとんど影響されずに水温だけで分布が決まってしまう、といった選好性のマスキングに対応できる。

筆者らの手法のもう一つの特徴は、選好強度式のパラメータを現地調査ではなく室内実験で定めていることである。室内実験では実験条件を自由にコントロールできるため、注目する環境因子以外の要因が実験装置内の魚の分布に与える影響をほとんど無視できる。これにより、より普遍性の高い選好強度式が得られていると考えられる。

本式を組み込んだ生態系モデルを用いて、実験室レベルでは魚の分布を十分表現できることを確認した^{12), 13)}。また、実河川の魚の分布を説明できた例もある¹⁰⁾。

(2) 行動モード

以上のように、我々の提案する修正乗法形選好強度式を用いた生息環境評価手法は優れた点を持っている。それにもかかわらず、2. で詳述するが、ある状況下では本手法により予測された魚の分布と実際に観察された魚の分布がまったく異なる場合があることが見いだされた。著者らは、摂餌や休息といった魚の「行動モード」の変化を考慮していないことがこの不一致の理由であると考えた。例えば、アユは日中瀬で盛んに摂餌行動を行って

いる。この情報に基づいて、平瀬ばかりの続く河川改修を行うといったことが実際に行われてきたが、かならずしも成功していない。アユは夜間などには休息場としての淵も必要としており、平瀬ばかりの単調な河川構造では総合的な生息場としての価値が下がってしまい、結果的に魚の分布が少なくなると考えられるのである。著者らはこの考えに基づき、実験的に行動モードの存在を示し、オイカワ成魚について摂餌モード、休息モードの修正乗法形選好強度式を求めた¹⁴⁾。行動モードの存在は、生息環境として瀬と淵のリズムが必要な理由の一つであり、これを考えていないことが、これまでの生息環境評価手法では瀬と淵の組み合わせの重要性をうまく取り扱えない理由ともなっている。

(3) 本研究の目的

本研究の目的は、著者らが先の論文¹⁴⁾ で論じた行動モード別の選好強度式を用いて、行動モードを考慮した総合的な生息環境評価モデルを構築し、実河川に適用してその精度向上効果を確認することである。

本論文の構成は以下の通りである。まず2. では、行動モードを考慮していない既存の修正乗法形選好強度式による魚の分布の予測が、観察と一致しなかった調査について述べる。続いて3. では、行動モードを導入した総合的な生息環境評価モデルを構築する。4. では、行動モードを導入した生息環境評価モデルを2. で論じた河川に適用し、その妥当性を論じる。

なお、本論文で述べる生息環境評価モデルの改良のアイデアについては文献⁵⁾ で既に紹介しているが、その時点では行動モードの存在はあくまで仮定にすぎなかった。本論文では、実験に基づく行動モード別の選好強度式を用いて実河川の魚分布と詳細に比較を行った。

2. 古甲川調査

調査対象河川は山口県樫野川の支川である2級河川古甲川である。本河川は調査時の流量約 $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ 、流路延長約 5 km 、流路幅約 2 m の小河川である。古甲川の水質を BOD で見ると、春夏では $0.5 \sim 1.9 \text{ mg/l}$ 、秋冬では約 2.6 mg/l であり、良好な水質を示している¹⁵⁾。調査対象区間は樫野川合流点より $1580 \sim 2160 \text{ m}$ に位置する、多自然型河川改修が施工されつつある平均河床勾配約 $1/125$ の 580 m 区間である。

調査は石川らによる河川における魚類生息環境評価のための基礎調査方法¹⁰⁾ に従い、魚類生息量調査と同時に物理的な環境要素として水深、流速、底質及び遮蔽 (カバー; 隠れ場所) の4項目を計測した。その他、川幅や

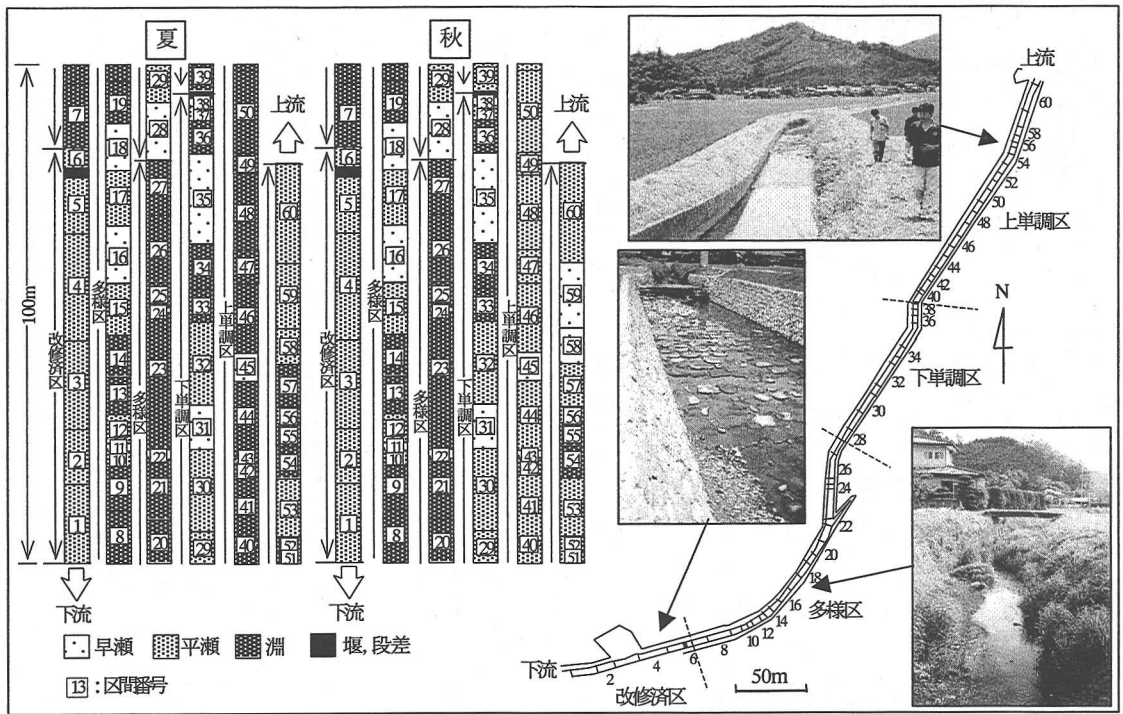


図-1 古甲川の瀬、淵の分布と区間分け

護岸形態、魚の餌量となる付着藻類等も同時に調査した。

なお、調査は1997年の夏秋両季節にわたって実施したが、この年の春から調査期間中にかけて改修工事は休止状態であり、工事は魚の分布に影響を与えていない。

(1) 生息環境調査

水深、流速、遮蔽は8月21, 29日および11月11, 12日に調査した。調査対象区間の瀬と淵の分布を図-1に示す。瀬と淵の区分は水野の分類法¹⁷⁾に従い、白波の立つ「早瀬」、しわのような波の「平瀬」、波の見られない「淵」に区分した。図中の区間番号は一定の特性を持つ区間に対し下流から付けた連番である。ここで測定した60区間を環境条件などから大きく改修済区(区間1~6)、多様区(区間7~27)、下単調区(区間28~38)、上単調区(区間39~60)の4区に分けた。改修済区は川幅が広く河床が平坦化されているのに対し、多様区は瀬と淵の対が多く、空石積み護岸や水生植物帯が存在している。上・下単調区は2面張り直線水路である。単調区を上と下の二つに分類したのは、区間38と39の間に堰があり水深、流速などの環境条件が若干異なるためである。夏には一見淵が多いが、河床自体が変化しているわけではなく、農業用水のための堰上げによる背水の影響である(図-2)。

遮蔽は河畔植生や河岸などが川面に投影する影の割

合としてとらえ、目視で記録した。結果を図-3に示す。

底質については、夏と秋の変化は少ないと考え、1997年10月21日に調査し、文献¹⁶⁾に示す分類基準に従って、粘土(細かい、粘りけがある)、泥(0.074mm以下、細かい、水が濁る)、砂(2mm以下)、細礫(4mm以下)、中礫(64mm以下)、大礫(250mm以下)、巨礫(250mm以上)、岩盤(一枚岩)に目視で区分した。結果を図-3に示す。

付着藻類量は8月4, 21, 29日および11月11, 27, 12月5日に調査した。オイカワは主に付着藻類を摂食することが知られている^{18), 19), 20), 21)}。そのため、餌量の目安とすることが目的である。調査方法は文献²²⁾に従い、5cm×5cmの窓を開けた方形枠を石面に当てて印をつけ、方形枠外の付着藻類を歯ブラシでこすり落とした後、方形枠内の付着藻類を歯ブラシでこすり落として採取した。同一の区間で上記の作業を4個の石に対して実施し、石表面100cm²分の付着藻類を採取してChl-aを測定し、 $N(\text{mg})=0.007 \times \text{Chl-a}(\mu\text{g})$ ²³⁾により窒素量に換算した。調査結果を図-4に示す。調査していない区間の藻類量については環境条件等を考慮して推定した。夏の藻類量は多様区が最も多く、次に上単調区となった。秋の藻類量も同じ傾向が見られた。

(2) 魚類生息量調査

魚類生息量調査は水深、流速、遮蔽の調査と同時に、区間1~60のすべてで実施した。タモ網などを併用した

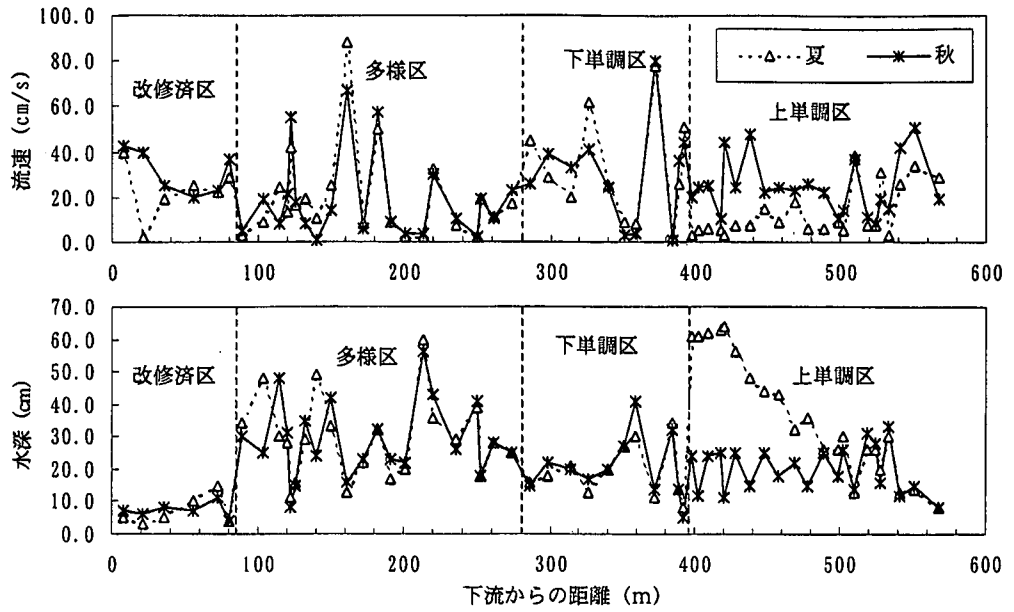


図-2 流速水深調査結果

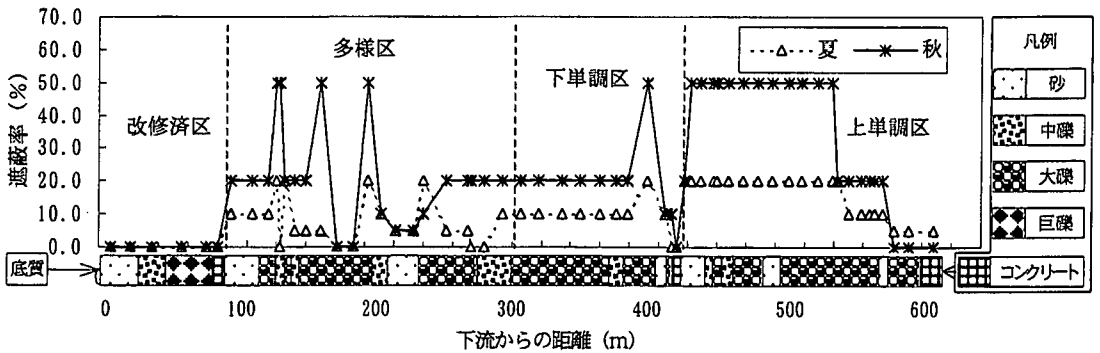


図-3 遮蔽及び底質調査結果

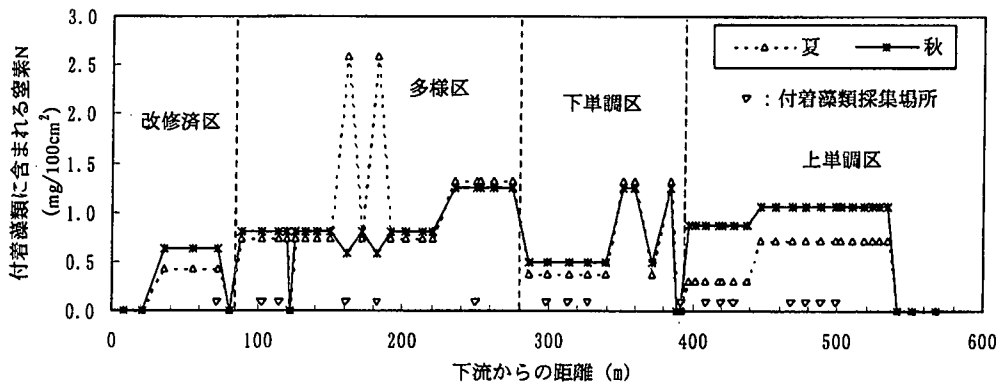


図-4 付着藻類調査結果

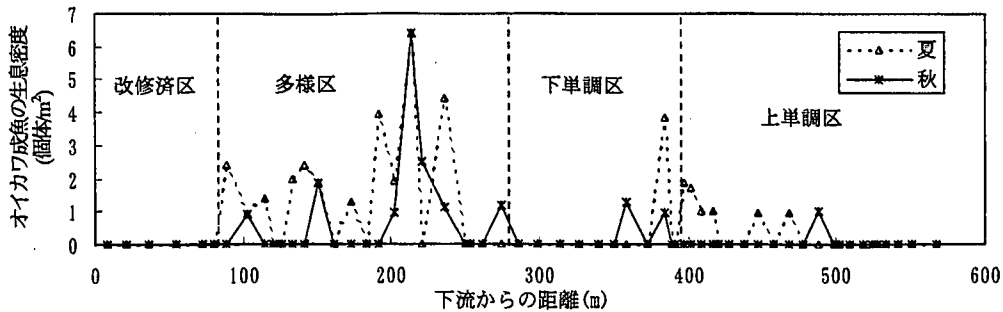


図-5 オイカワ生息密度調査結果

事前調査ではこの河川にはオイカワ、カワムツ、フナ、コイ、ヨシノボリおよびそれらの稚魚などが生息していたが、明らかな優占種であり、全区間で目視観察することができたオイカワ成魚を本研究の対象魚種とした。

生物量調査は、通常は投網などを用いて採捕することにより行うが、本研究では河川内に立ち込み、魚影が戻ってくるまで数分静かに待った後目視できるオイカワ成魚の尾数を5尾単位で記録した。目視できる範囲は経験より河川幅 (m) × 1.8 (m) の範囲であり、魚の目視数をこの面積で除して生息密度を求めた。本河川ではタモ網以外の採捕手段が認められておらず、また水深が浅く透明度も高いため、仮に投網が使用できたとしても採捕率は低いと予想され、迅速に調査できる手法の中では目視が最も確実な調査手法であった。

調査結果を図-5に示す。古甲川における魚の生息密度は河川縦断的に見ると、多様区が最も多かった。また改修済区においては、夏秋両季節とも魚を確認することはできなかった。自然石を用いた多自然型工法とはいいながら、川幅を広げすぎて水深や遮蔽物を確保できなかったようである。今後土砂の堆積物が進むと状況も変わってくると思われる。季節別に見ると、夏はオイカワの分布が分散的であるのに対し、秋は比較的淵に集中する。これは、季節によって生息場に対する選好性が異なることを示している。

(3) 魚の分布の予測と観察結果の不一致

以上の結果を用い、著者らの提案した修正乗法形選好強度式(2)～(4)を調査時の河川環境条件に適用した。計算に当たって考慮した環境因子は餌量、水深、流速及び遮蔽の4因子である。各因子のそれぞれの選好性パラメータと因子ウェイトは、季節や行動モードの変化を意識せずに90分間の室内実験より求めたものであり、文献⁵⁾で既に報告したものであるが、ここで図-6に再掲する。遮蔽については古甲川では水面の影の割合として観測されているため、影が100%の状態を1、影がない状態を全開放状態の0.35として内挿により選好強度値を求めた。

計算結果と生息量調査結果の比較を図-7に示す。図

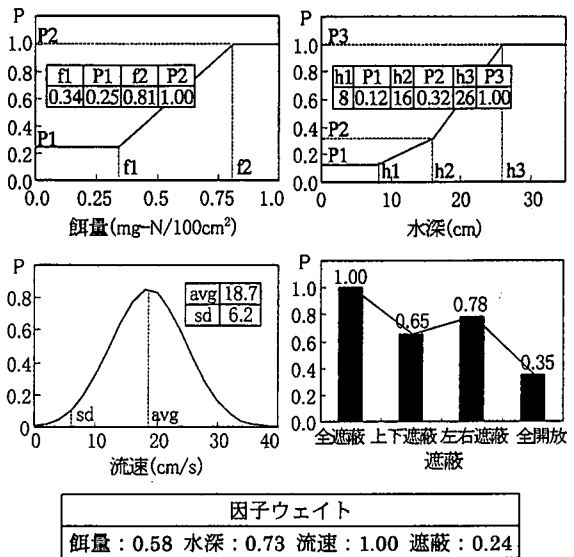


図-6 各環境因子の選好性パラメータ

中の左縦軸は計算した選好強度で表した魚の生息ポテンシャルで、右縦軸は調査した魚の生息密度である。図-7より、夏においては、観察ではオイカワが比較的少なかった上・下単調区において計算上は生息ポテンシャルが大きく、多様区の上流部でも計算値と観測値のずれが目立つ。秋も同様の傾向である。以上のように、既存の修正乗法形選好強度式そのままでは、観察された魚の分布を説明できなかった。

3. 行動モードを考慮した生息環境評価モデル

前節における計算値と観測値のずれは、1. で述べたとおり、魚の行動モードの変化を考慮していないためであると考えられる。本節では、行動モードを導入した総合的な生息環境評価モデルを構築する。

(1) 行動モード毎の選好強度式

本研究では、餌を求めて広く動きまわる摂餌モード、

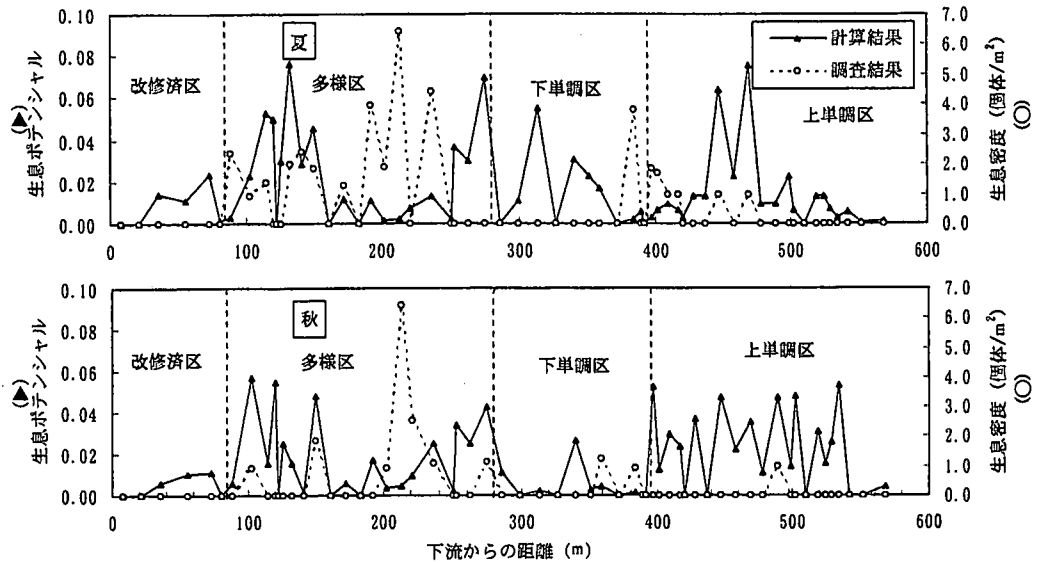


図-7 行動モードを考慮しない計算結果と調査結果の比較

摂餌後や休息時の休息モード、外敵から逃避したり洪水などで増水した時に避難する逃避モード、産卵に適した場所を求める産卵モードの4つの行動モードを考える。

摂餌モード、休息モードに対する選好強度式は既報¹⁾で実験的に求めた。ただし、この研究では摂餌モード、休息モードとも流速、水深、遮蔽の3環境因子のみを考慮しており、摂餌モード時にも餌量の効果を考慮していなかった。そこで本研究では、餌量について文献⁵⁾で報告した選好強度式を100cm²あたりの窒素量に換算して用いることにした。餌量の因子ウェイトは文献⁵⁾と文献¹⁾で共通して取り扱っている流速を基準として正規化した。餌量の選好強度式は行動モードを意識せずに求めたものではあるが、昼間に行われた実験であり、摂餌モード時の実験と考えると差し支えない。また、摂餌モードで最も因子ウェイトの小さい遮蔽因子は考慮しないことにした。このように、自由に取り扱う環境因子を加除できることが著者らが提案する修正乗法形選好強度式の特長である。

逃避モードについては実験的検討を行っていないため、休息モードから遮蔽と水深の選好強度式を援用し、さらに多孔質護岸とコンクリート護岸に対する選好性を、常識的な判断によりそれぞれ1.0, 0.1と与えた。因子ウェイトについては、遮蔽と水深の関係は休息モードと同じ比率とし、これらと護岸との比率を次節の計算で実測値をよく説明するよう任意に定めた。

産卵モードについても実験的検討は不十分であり、種々の文献より得たオイカワの産卵場の諸元(表-1)を参考に選好強度式を定めた。水深については正規分布関数と仮定し、文献でよく見られた5~20cm区間の中央

表-1 オイカワ産卵場の諸元

産卵期	水深 (cm)	流速 (cm/s)	底質
5月下旬	10 ²⁴⁾	5~10 ²⁴⁾	流れのゆるい
~	5~10 ^{25),26)}	0~30 ²⁸⁾	平瀬の
8月下旬	5~20 ^{18),27),28)}	5~30 ^{18),27)}	砂礫底 ^{18),25),28)}

値12.5cmを正規分布の平均値 (avg) とし、このデータ区間を95%の信頼区間と見なし、標準偏差を求めた。流速についても同様に定めた。底質については、文献情報に基づく常識的判断から、砂礫:1, 砂, 礫それぞれ0.5, それ以外では0.01とした。それぞれの因子ウェイトは、次節の計算で実測値をよく説明するよう任意に定めたものである。

表-2に各行動モードの各環境因子についての選好強度式を示す。

環境因子毎の選好強度式を統合した行動モード毎の総合選好強度式は式(2)にならって記すと

$$P_m = \prod_{j=1}^J (P_{m,j})^{\frac{W_{m,j}}{W_{m,\max}}} \quad (5)$$

$$W_{m,\max} = \begin{cases} \max_{j \in J'} (W_{m,j}) & V_m \neq \phi \\ \infty & V_m = \phi \end{cases} \quad (6)$$

$$V_m = \{j | (\exists i, i') (P_{m,j,i} \neq P_{m,j,i'})\} \quad (7)$$

ようになる。ここに、

P_m : 行動モード $m = \{F, R, H, S\}$ における総合選好強度。ただし、Fは摂餌、Rは休息、Hは逃避、Sは産卵の各行動モードを表す。

表-2 行動モード毎の選好強度式

行動モード	環境因子	選好強度式	因子ウェイト
摂餌モード	餌量 (mg-N/100cm ³)	$P_{F_f} = \begin{cases} 0.25 & f \in [0, 0.34] \\ 0.75 \cdot \frac{f-0.34}{0.47} + 0.25 & f \in [0.34, 0.81] \\ 1.0 & f \in [0.81, \infty) \end{cases}$	0.58
	流速 (cm/s)	$P_{F_v} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 12.54} e^{-\frac{(v_i-19.01)^2}{2 \cdot 12.54^2}}$	1.00
	水深 (cm)	$P_{F_h} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 9.98} e^{-\frac{(h_i-15.1)^2}{2 \cdot 9.98^2}}$	0.67
休息モード	遮蔽 (%)	$P_{R_c} = \begin{cases} 0.64 \cdot \frac{c}{100} + 0.36 & c \in [0, 100] \end{cases}$	1.00
	水深 (cm)	$P_{R_h} = \begin{cases} 0.12 & h \in [0, 7] \\ 0.88 \cdot \frac{h-7}{35} + 0.12 & h \in [7, 42] \\ 1.0 & h \in [42, \infty) \end{cases}$	0.65
	流速 (cm/s)	$P_{R_v} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 7.55} e^{-\frac{v_i^2}{2 \cdot 7.55^2}}$	0.50
逃避モード	護岸	$P_{H_s} = \begin{cases} 1.0 & \text{多孔質護岸} \\ 0.1 & \text{コンクリート護岸} \end{cases}$	1.00
	遮蔽 (%)	$P_{H_c} = \begin{cases} 0.64 \cdot \frac{c}{100} + 0.36 & c \in [0, 100] \end{cases}$	0.75
	水深 (cm)	$P_{H_h} = \begin{cases} 0.12 & h \in [0, 7] \\ 0.88 \cdot \frac{h-7}{35} + 0.12 & h \in [7, 42] \\ 1.0 & h \in [42, \infty) \end{cases}$	0.49
産卵モード	底質	$P_{S_s} = \begin{cases} 0.01 & \text{泥} \\ 0.5 & \text{砂} \\ 1.0 & \text{砂礫} \\ 0.5 & \text{礫} \\ 0.01 & \text{巨礫以上} \end{cases}$	1.00
	流速 (cm/s)	$P_{S_v} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 6.38} e^{-\frac{(v_i-17.5)^2}{2 \cdot 6.38^2}}$	0.80
	水深 (cm)	$P_{S_h} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 3.83} e^{-\frac{(h_i-12.5)^2}{2 \cdot 3.83^2}}$	0.80

P_{mj} : 行動モード m の時の環境因子 j に対する選好強度。
 ただし、 $j = \{f, v, h\}_{m=F}$, $j = \{c, h, v\}_{m=R}$, $j = \{b, c, h\}_{m=H}$,
 $j = \{s, v, h\}_{m=S}$ である。ここに、 f は餌量、 v は流速、
 h は水深、 c は遮蔽、 b は護岸、 s は底質の各環境因子を表す。
 W_{mj} : 行動モード m の時の環境因子 j に対する因子ウェイトである。
 V_m : 少なくとも一組の代替案 (区間) 間で選好強度に違いが存在するような環境因子の集合。 $P_{m,ij}$ は行動モード m 、環境因子 j についての区間 i における選好強度である。

(2) 行動圏の導入による行動モード毎の選好強度式の統合

生息環境評価のためには、前項で導入された個々の行動モード時における選好強度式をなんらかの方法で統合する必要がある。ここで、「行動圏」を導入する。魚は摂餌モード時には摂餌場で過ごし、休息モード時には休息場で過ごす、というように、ある行動域²⁹⁾を持って活動している。この魚の行動範囲を行動圏³⁰⁾ (Home range³¹⁾) と呼ぶ。

摂餌場、休息場、逃避場、産卵場などの生息場は、現在魚が存在する場所から遠ざかるほど生息場としての価

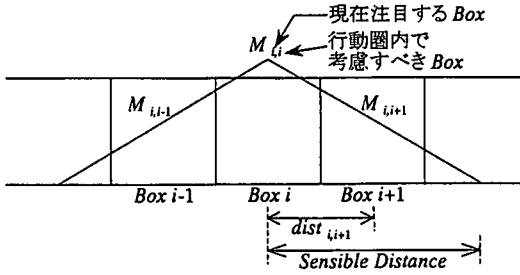


図-8 感知ウェイト M_{ik} の概念図

値が低下し、行動圏を越えると感知することもできないという考えに基づき、基準となる Box i からみた Box k の感知ウェイト M_{ik} を式(8)のように定義した。 M_{ik} の概念を図-8に示す。

$$M_{i,k} = \max\left(1 - \frac{dist_{i,k}}{Sensible\ Distance}, 0\right) \quad (8)$$

$\max(a,b)$ は a, b のうち大きい方をとる関数

Sensible Distance : 感知距離

$Dist_{i,k}$: Box i の中心から Box k の中心までの距離

オイカワの行動圏については Minns³¹⁾ の研究成果に基づいて、式(9)を用いて推定した。式(9)で用いる WT は鈴木³²⁾ によるオイカワの体重-体長式〔式(10)〕によった。なお、式(9)では行動圏を面積としてとらえているが、本研究では魚が遊泳して環境条件を把握できる河川の縦断距離が行動圏であると考えて、これを感知距離(Sensible Distance)と呼んでいる。Sensible Distance は式(11)で得る。

$$\text{Log}_e[\text{Home range}(m^2)] = 3.43 + 0.53 \times \text{Log}_e WT \quad (9)$$

$$WT(\text{魚体重 } g) = (\text{標準体長 } \text{cm})^3 / \text{体重係数} \quad (10)$$

オイカワの体重係数 : 65

$$Sensible\ Distance\ (m) = \text{Home range}\ (m^2) / \text{河川幅}(m) \quad (11)$$

この感知ウェイト M_{ik} を用い、水域 i に対する総合的な選好強度モデルを式(12)で表現した。

$$P_i = \sum_m \left\{ W_m \left(\frac{\sum_k M_{i,k} \times P_{m,k} \times A_k}{\sum_k M_{i,k} \times A_k} \right) \right\} \quad (12)$$

$$\sum_m W_m = 1 \quad (13)$$

ここに、 P_i は、生息場 i に対する行動モードを考慮した総合的な選好強度、 $P_{m,k}$ は Box k における行動モード $m = \{F, R, H, S\}$ 毎の選好強度、 A_k は Box k の面積である。 W_m は行動モード m のウェイトであり、注目する季節に注目する魚が各行動モードで過ごす時間の比率であると考えられることができる。

摂餌モード($m=F$)を例にとると、 $P_{F,k}$ は Box k だけに注目した時の摂餌場としての価値、 $M_{i,k} \times P_{F,k}$ は、 Box i にいる魚にとっての Box k の摂餌場としての価値であり、

表-3 摂餌モードと休息モードのウェイト

季節別	摂餌モード W_F	休息モード W_R
夏	0.33	0.67
秋	0.23	0.77

$$\frac{\sum_k M_{i,k} \times P_{F,k} \times A_k}{\sum_k M_{i,k} \times A_k}$$

は注目する Box i にいる魚の行動圏内すべての Box の摂餌場としての価値を荷重平均した摂餌場としての総価値となる。

例えば、現在魚のいる Box i は淵であって摂餌場としての価値は低いが、両隣の Box は瀬であって摂餌場としての価値が高い場合を考える。この場合、 Box i そのものの摂餌場としての価値は小さくても、両隣の Box は摂餌場としての価値が高いため、式(12)によれば Box i の摂餌場としての価値も高くなる。

同様の計算を関連する他の行動モードについても行い、各行動モードで過ごす時間の比率 W_m で重み付き平均したものが総合的な選好強度となる。

4. 古甲川へのモデルの適用

以上に提案したモデルを調査時の河川環境条件に適用した。まず、ほとんどのモデルパラメータを実験結果より定めることのできた摂餌モードと休息モードの2つの行動モードのみを考慮した計算結果を示し、次に、パラメータに推定値の多い逃避モードと産卵モードを含めた4つの行動モードを考慮した計算結果を示す。

(1) 摂餌モードと休息モードのみを考慮した場合

この計算は、式(12)、(13)の m として $\{F, R\}$ の2つのみを用いることに相当する。 W_m は、夏においては夏の室内実験結果¹⁴⁾、秋においては、夏と冬の室内実験結果¹⁴⁾の平均値を用いた(表-3)。

図-9の白抜き四角(□)でプロットしたものが計算結果である。また、白抜き丸(○)でプロットしたものが生息密度の調査結果である。図中の左縦軸は計算した総合的な選好強度で表した魚の生息ポテンシャル、右縦軸は調査した魚の生息密度である。式(12)からも予想されるように、計算結果は行動圏内で移動平均をとったのと類似の平滑化された値を示す。この値と比較しやすいため、調査結果を図-9に記入するにあたっては、図-5に示した生息密度を行動圏内の Box 面積に応じて

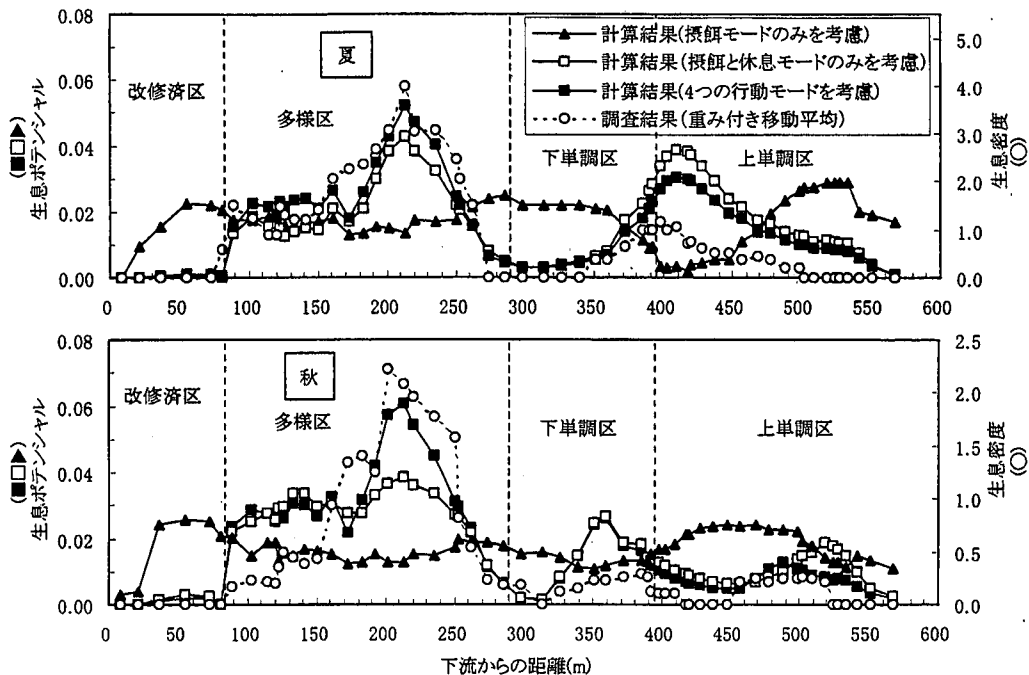


図-9 魚の生息ポテンシャル計算結果

重み付き移動平均したものを用いた。また、行動モードと行動圏を考慮しない旧来の修正乗法形選好強度式と摂餌モードの選好強度パラメータを用いて生息ポテンシャルを計算し、調査結果と同様に重み付き移動平均した結果を黒三角(▲)でプロットしてある。

図-9より、旧来の修正乗法形選好強度式では、図-7で示したものと同様に、計算結果(▲)は調査結果(○)と大きく異なる分布傾向を示している。一方、摂餌モードと休息モードを考慮した場合、摂餌場としては価値が高くとも休息場のない上単調区の魚の分布はより小さく評価され、摂餌モードのみの場合(▲)と比較して計算結果(□)は調査結果(○)の分布傾向をうまく再現できていることが明らかである。この結果より、本研究で提案した生息環境評価手法の有効性が示された。

(2) 逃避モードと産卵モードを加えた4つの行動モードを考慮した場合

この計算は、式(12)、(13)の m として $\{F, R, H, S\}$ すべてを用いて計算を行うことに相当する。行動モード毎のウェイト W_m の決定にあたっては、オイカワ成魚の生活様式の文献情報¹⁸⁾と著者の研究成果^{5), 14)}を参考に、夏においては、以下の制約条件の下で計算値を調査値に合致させることによって、行動モード毎のウェイトを定めた。

$$\textcircled{1} W_F : W_R = 0.33 : 0.67$$

表-4 行動モード毎のウェイト

季節別	摂餌モード W_F	休息モード W_R	逃避モード W_H	産卵モード W_S
夏	0.25	0.51	0.10	0.14
秋	0.10	0.87	0.03	0.00

$$\textcircled{2} W_H < W_F$$

$$\textcircled{3} W_F, W_R, W_H, W_S > 0$$

$$\textcircled{4} W_F + W_R + W_H + W_S = 1$$

①は、摂餌モードと休息モードの比率は夏の実験結果と同じである、との考え、②は、逃避モードは摂餌モードに付随して発生する、との考えに由来している。得られた夏のウェイト値を、次に述べる秋のウェイト値とともに表-4に示す。

一方秋においては、夏のウェイト値の知見をもとに、以下の制約条件を用いた。

$$\textcircled{1} W_F < 0.25$$

$$\textcircled{2} W_R > 0.51$$

$$\textcircled{3} W_S = 0$$

$$\textcircled{4} W_H < W_F$$

$$\textcircled{5} W_F + W_R + W_H = 1$$

①、②は、水温が低くなるため、夏に比べて摂餌モードで過ごす時間が短く、休息モードで過ごす時間が長くなると想定したもの、③は、秋には産卵期が終わることを考

慮したものである。最終的に用いたウェイト値を表-4に示す。

計算結果は図-9に黒四角(■)でプロットしたものである。4つの行動モードを考慮した場合(■), 2つの行動モードのみを考慮した場合(□)より再現性が向上している。本研究では先述のとおり, 逃避モード, 産卵モードの選好強度パラメータには推定値が多く含まれているが, これらのモードを考慮することにより, 生息密度をよりよく評価できる可能性が示された。

5. おわりに

本研究では, 多自然型河川改修が実施されている山口市の2級河川古甲川を対象河川とし, 生物の環境選好強度式に摂餌, 休息, 逃避, 産卵の4つの行動モード及び行動圏を組み込んだ魚の生息環境評価手法を提案した。

本評価手法を用いて, 古甲川におけるオイカワ分布の再現を試みた結果, 行動モードを考慮しない旧来の評価手法では観察された魚の分布と大幅に異なった評価値を与える場合でも, 実験に基づく選好強度パラメータを用いた摂餌, 休息の2つの行動モードを考慮した評価手法で魚の分布特性がよく再現できることが示された。また, 推定された選好強度パラメータを多く含むものの, 逃避, 産卵を加えた4つの行動モードを考慮した評価手法では魚の分布特性の再現性がさらに向上することが示された。

行動モードを考慮しない場合, 近年生態系にとって好ましくないことが明らかとなってきた瀬ばかりが続く河川でも良好な環境として評価されがちであったが, 本手法を用いる事により瀬と淵の組み合わせの価値を正しく評価できるようになった。

本評価手法では摂餌, 休息, 逃避, 産卵の4つの行動モードを考慮したが, 逃避モード, 産卵モードに対する選好強度式のパラメータに関してはまた推定による部分が多い。今後は, これらの行動モードに対するパラメータの実験的評価や, その他の魚種についての選好性パラメータの決定など, 上記の問題点を踏まえてさらに研究を進めながら, 魚にとって住みやすい生息環境を創り出す工法の提案などに結びつけていきたい。

謝辞: 現地調査にあたっては当時の山口大学工学部の学生である今井崇史君及び川本泰生君に多大な協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)河川環境管理財団: 河川生態環境評価基準の体系化に関する報告書, pp.89-118, 1996.
- 2) Stalnaker, C., Lamb, B.L., Henriken, J., Bovee, K. and Bartholow, J.:

The Instream flow Incremental Methodology, A primer for IFIM, National Ecology Research Center National Biological Survey, Colorado, pp.7-40, 1994.

- 3) 中村宇一, 玉井信行: 河川における魚類生息場の評価法に関する研究, 環境システム研究, Vol.25, pp.77-82, 1997.
- 4) Milhons, R.T.: The Physical Habitat-Aquatic Population of Relationship, presentation at the 1988 meeting of the Colorado-Wyoming Section of the American Fisheries Society, 1988.
- 5) 楊継東, 関根雅彦, 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態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.
- 6) Mathur, D., Bason, W.H., E.J.Purdy, Jr. and Silver, C.A.: A critique of instream flow incremental methodology, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.42, pp.825-831, 1985.
- 7) Orth, D.J.: Ecological considerations in the development and application of instream flow-habitat models. *Regulated Rivers* 1:171-181, 1987.
- 8) Gore, J.A. and Nestler, J.M.: Instream flow studies in perspective, *Regulated Rivers* 2:93-101, 1988.
- 9) Allan, J.D.: Stream ecology-structure and function of running water. Chapman and Hall, pp.388, 1995.
- 10) 川本泰生, 関根雅彦, 楊継東, 小林宏正, 浮田正夫: IFIMにおける魚の選好曲線の河川間の互換性に関する検討, 環境工学研究論文集, 第36巻, pp.271-276, 1999.
- 11) 関根雅彦, 浮田正夫, 中西弘, 内田唯史: 河川環境管理を目的とした生態系モデルにおける生物の環境選好性の定式化, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.177-186, 1994.
- 12) 関根雅彦, 榑崎寿晃, 浮田正夫, 中西弘: 水域環境管理への応用を目的とした魚の行動の実験的解析, 環境工学研究論文集, 31, pp.225-232, 1994.
- 13) 関根雅彦, 中西努, 浮田正夫: 河川における魚の分布に対する環境条件の影響の実験的検討, 第33回 環境工学研究フォーラム講演集 B-12, pp.78-80, 1996.
- 14) 楊継東, 関根雅彦, 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.
- 15) 山口県山口土木建築事務所: 古甲川河川局部改良工事に伴う環境調査業務委託第一工区中間報告書, 1994.
- 16) 石川雅朗, 中村俊六, 築坂正美, 東信行, 中村綴徳: 河川における魚類生息環境評価(IFIM適用)のための基礎調査, 木更津工業高等学校紀要, No.29, pp.23-32, 1996.
- 17) 水野信彦, 御勢久右衛門: 河川の生態学, 築地書館, pp.5-13, 1972.5.
- 18) 名越誠, 川那部浩哉, 水野信彦, 宮地伝三郎, 森圭一, 杉山幸丸, 牧岩男, 斉藤洋子: 川の魚の生活, III. オイカワの生活史を中心にして, 京都大学理学部 生理・生態学研究業績, 82, pp.1-19, 1962.

- 19) 牧岩男, 中恭子, 浦本彰夫: 貴志川(和歌山県)におけるオイカワ (*Zacco platypus*, CYPRINIDAE) の摂食量の季節ならびに発育に伴う変化, 和歌山大学教育学部紀要-自然科学-20, pp.43-54, 1970.
- 20) 鈴木清, 木村清志: オイカワ属魚類の摂餌に関する形態学的研究, 魚類学雑誌, Vol.24, No.4, pp.251-260, 1978.
- 21) 水野信彦: 魚にやさしい川のかたち, 信山社, 1995.
- 22) (財)ダム水源地環境整備センター: 水辺の環境調査, 技報堂出版, pp.343-350, 1994.12.
- 23) O'Connor, F.B.: in Doeksen, J. and J. van der Drift(eds.), *Soil Organisms*. North-Holland publ. Co. Amsterdam, pp.32-48, 1963.
- 24) 駒田格知: 魚類, 主として稚魚の生活環境, 環境・70, pp.12-14, 1995.
- 25) 宮地博三郎, 川那部浩哉, 水野信彦: 原色日本淡水魚類図鑑(全改訂新版12刷), 保育社, pp.138-141, 1992.
- 26) 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六: 河川生態環境工学, pp.90-91, 東京大学出版社, 1995.
- 27) 全国内水面漁業協同組合連合会: 内水面漁場環境・利用実態調査報告書-魚のすみよい川への設計指針(案), 1987.
- 28) 北川明, 鈴木研司, 神庭治司: 魚類と河川流量の関係, 環境システム研究, Vol.16, 1988.
- 29) 水野寿彦: 動物生態の観察と研究, 東海大学出版会, pp.55, 1992(第4刷).
- 30) 同29), pp.96.
- 31) Charles K. Minns: Allometry of home range size in lake and river fishes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.52, pp.1499-1508, 1995.
- 32) 鈴木興道: 多自然型河川工法と魚類の生息環境の保全, 水利科学, 36(204), pp.26-68, 1992.

(1999. 9. 30 受付)

A STUDY OF A FISH HABITAT EVALUATION BASED ON THE BEHAVIORAL MODE

Jidong YANG, Masahiko SEKINE, Masao UKITA and Tsuyoshi IMAI

We propose a new evaluation procedure of fish habitats by considering the environmental preference with four behavioral modes (feeding, resting, hiding, spawning) and considering the fish home range. The procedure is applied to Furukou River, Yamaguchi Pref., in which restoration work is going on. The calculated fish distribution by this procedure successfully reproduces the observed fish distribution, whereas a method without behavioral modes fails to reproduce it. By using this procedure, we can evaluate the importance of the combination of pools and rapids, which we could not evaluate properly before.