

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

A STUDY OF A FISH HABITAT EVALUATION PROCEDURE FOR RIVER RESTORATION

楊繼東*, 関根雅彦*, 今井崇史**, 川本泰生*, 浮田正夫*
Yang Jidong*, Masahiko Sekine*, Takashi Imai**, Yasuo Kawamoto*, Masao Ukita*

ABSTRACT: This study focuses on the quantitative evaluation of the effect of environmental change caused by the river restoration work. Firstly, we investigated the fish distribution as well as the distribution of riffle-pool and attached algae in the Furukou River, Yamaguchi, in which restoration work is going on. Then we applied our former model of fish preference, including the factors of water depth, velocity, food and cover, to reproduce the observed fish distribution. The model is based on the laboratory experiments. The calculated fish distribution met the observation, but was not enough. The difference between the calculation and the observation might come from: (1) the experiences do not handle preference change according to the seasons, (2) some environmental conditions in the experiments do not represent the real river and (3) the model does not take into account the change of behavioral mode of fish in a day. Taking the third point into account, a new habitat evaluation model is proposed considering the fish home range and three fish behavioral modes of feeding, resting, and hiding. This comprehensive preference model was proved to be more effective in the real river.

KEY WORDS: river restoration, fish, habitat environments, environmental preference, ecological model

1 はじめに

従来の河川改修は、主として治水と利水との観点から行われてきたが、河川と水辺空間をより積極的に整備して地域住民の福祉に役立つように河川管理をしようというニーズが強まってきている。これに伴い、治水機能や利水機能だけでなく、自然環境の保全、創出にも重点を置く多自然型工法による河川改修の試みが最近各地で展開されてきている。

しかし、これまで工学的な河川改修を第一に追求してきた土木関係者にとって、多自然型工法が河川生態系の中心となる魚類の生息環境に与える影響は十分明らかになっていないとは言えない。そこで魚類の視座から河川改修の効果を予測することは是非とも必要である。そのため魚類の生息環境を的確に評価する手法が求められている。

欧米を中心に河川の生息環境評価手法は多数あるが、現在最もよく用いられているものの1つとして IFIM¹⁾ があげられる。この IFIM の中で物理環境の評価を受け持っている PHABSIM(Physical Habitat Simulation Model)は、魚の生息ポテンシャルを予測する方法である。しかし、オリジナルの IFIM はもっぱら流量変化が魚に与える影響に着目しているため、わが国で注目されている河川改修の效果に適用するには、以下のような問題点があげられる。

- ① 環境指標としては、流速、水深、底質の3つが考慮されることが多いが、計算結果としての WUA (重み付き利用可能面積) は式の性質上考慮した環境因子数が多くなるに従い小さくなっていくことが明らかである。一方、河川改修では護岸の形態や遮蔽などの因子も関係しており、これらの因子のいずれを考慮に

* 山口大学工学部社会建設工学科 Department of Civil Engineering, Yamaguchi University

** (株) オオバ Ooba

入れるかを明らかにする必要がある。

②魚類の生息数と河川の物理環境を関係づける選好曲線は実河川で測定されたデータに基づいて得たものであるため、一般に行われているような単純に魚密度の観察結果のデータ全体を注目する因子ごとに並べかえるといった選好曲線決定法では、ある因子に対する選好曲線の中にはその他の因子に対する選好の効果も含まれてしまう。したがって選好曲線は河川によってかなり変動が見られる。また河川改修などによって底質、水深等の河床条件まで大きく変化してしまうような場合には、改修前に求めた選好曲線が改修後には適用できなくなる可能性がある²⁾。

③著者らの実験³⁾より、複数の環境因子が合成された場合の選好性のマスキングの存在が明らかである。言い換えると、異なる環境因子毎に魚に与える影響の重要度が異なり、各環境因子のウェイトを考慮する必要がある。ところが、IFIM ではこれを考案していない。

これらの点を総合してみれば、多自然型河川改修効果の予測手法として、現状の IFIM は改善の余地を残している。

一方、著者らは河川環境管理を目的とした生態系モデルにおける生物の環境選好性を表現する選好強度式を提案し³⁾、本式を組み込んだ生態系モデルを用いて、環境変化に対する生物の選好—逃避などの挙動を予測することを試み、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^{4,5)}。本手法は本来の生態系モデルでの利用のほか IFIM における選好曲線にも応用できる可能性を持つものである。

本研究は、著者らの提案する選好強度式の実河川への適用を試みたものである。ここでは、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とし、河川改修による環境変化が河川の魚に与える影響を選好強度式により説明できるかどうか調べた。まず、河川現状を把握した上で、既存の環境選好強度式³⁾に水深、流速、餌量及び遮蔽等の環境因子を組み込み、魚の分布の再現を試み、実河川における環境選好強度式の妥当性について検討を行った。さらに、本環境選好強度式をもとに、魚の行動圏及び魚の行動モードを考慮する生息環境評価手法を提案した。同時に本評価手法の有効性を検証してみた。

2 対象河川調査

調査対象河川は山口県榎野川に流入する2級河川古甲川である。河川改修が実施されている区間は榎野川合流点より1580～2160mの区間である。1997年夏秋両季節において、改修予定区間における瀬、淵の分布や流速、水深、河床材、水草の有無、護岸形態等を調査した。古甲川を環境条件などから大きく改修済区間、多様な区間、下単調区間、上単調区間の4区間に分けた。瀬淵の分布及び区分けは図-1に示す。図中の測定番号は下流からの20m間隔の連番で、4～14の間は空石積み護岸や水生植物帯が存在し生態的に多様な空間を形成しており、多様な区間と呼ぶ。14～29の間は2面張り直線水路で、単調な区間となっている区間である。単調な区間を2つに分類したのは区間と区間の間に堰と段差があり、魚の往来が困難なためである。

生物量分布調査は1997年8月下旬、11月中旬それぞれ2回ずつ行った。観察することができた魚はオイカワであった。調査結果(図-2)をみると空石積み護岸や水生植物帯が存在し生態的に多様な区間が最も生物量が多かった。また、改修済区間においては、夏秋両季節、魚を確認することはできなかった。

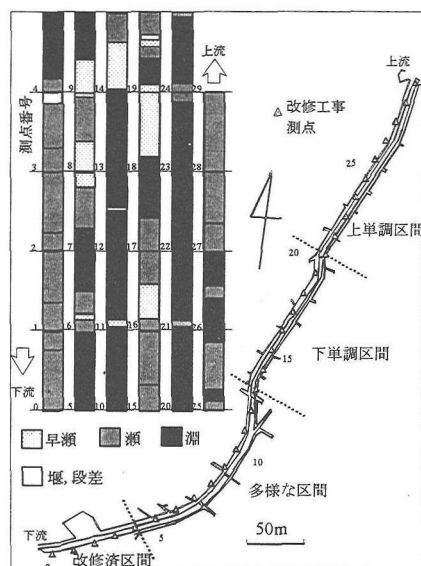


図-1 古甲川の瀬・淵の分布と区間分け

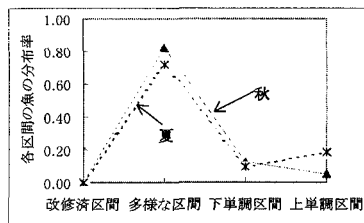


図-2 生物量調査結果

表-1 付着藻類量調査結果

夏季	改修区間	多様な区間	下単調区間	上単調区間
藻類量(kg)	4.01	9.3	2.28	6.34
表面積(m ²)	561.75	460.3	255.05	530.45
単位表面積当たりの藻類量(g/m ²)	7.14	20.2	8.94	11.95
秋季	改修区間	多様な区間	下単調区間	上単調区間
藻類量(kg)	2.97	3.41	1.55	3.21
表面積(m ²)	707.6	460.3	255.05	530.45
単位表面積当たりの藻類量(g/m ²)	4.2	7.41	6.08	6.05

付着藻類量調査はオイカワの餌量の指標を得るために実施したもので、1997 年夏秋両季節それぞれ 3 回ずつ行った。オイカワは主に付着藻類を食うことが知られている(中村; 1952, 水野ほか; 1958, 名越ほか; 1962, 水野; 1964 など)。そこで珪藻、藍藻、緑藻の 3 種類の付着藻類に含まれるクロロフィル a をオイカワの餌量の指標とした。調査結果を表-1 に示す。夏の藻類量は多様な区間が最も多く、次に上単調区間となった。秋の藻類量も同じ傾向が見られた。

3 生息環境評価手法

3.1 魚の環境選好性に基づく生息環境評価

単一の環境因子に対する選好強度の表現には、図-3 に示す 4 種類のパターンを用いた。各グラフの縦軸は選好強度 P_j (j : ある環境因子)、横軸は環境条件の値である。異なる環境因子が魚の選好に及ぼす影響は異なる。因子 j についてのウェイト W_j を導入し、ウェイトのうち最大値をとるウェイトを $W_{\max}$ とすると、魚が複合した環境因子に対する総合的な選好強度 P^* を

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_{j,i})^{\frac{W_j}{W_{\max}}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$W_{\max} = \begin{cases} \max_{j \in J} (W_j) & V \neq \phi \\ \infty & V = \phi \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2)$$

で表現されると考えた³⁾。ここに ϕ は空集合、 V は一組の代替案(水域 i)間で選好強度に違いが存在するような環境因子の集合を意味する。また本式により複数の水域 i における魚の分布率 D_i を求める式は

$$D_i = \frac{\prod_{j=1}^J (P_{j,i})^{\frac{W_j}{W_{\max}}}}{\sum_{i=1}^I \left\{ \prod_{j=1}^J (P_{j,i})^{\frac{W_j}{W_{\max}}} \right\}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。

図-3 に示す単一因子に対する選好強度式のパラメータ及び因子毎のウェイト値の決定にあたっては、文献³⁾で報告した方法を用いて、U 字迷路型水路によるオイカワの選好性実験⁶⁾に基づいて求めた係数及びウェイト値を表-2 に示す。

なお、本選好強度式は、本来生態系モデルにおいて生物量を求め、その分布を予測するために開発されたものである³⁾。このため、本論文においても生息環境評価結果を「魚の分布率」という形で表現している。しかし、

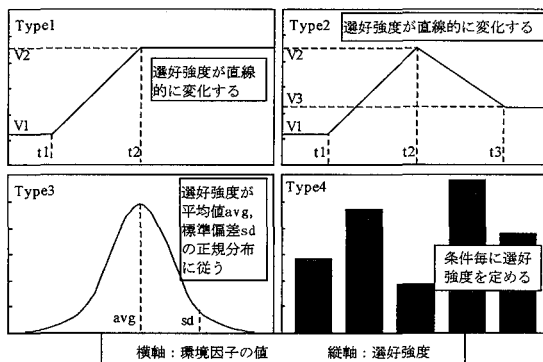


図-3 選好強度式の 4 パターン

$$V = \{j | (\exists i, i') (P_{j,i} \neq P_{j,i'})\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

表-2 各因子選好強度式 Type、パラメータ及びウェイト値

Type1	t1	v1	t2	v2	ウェイト		
餌量	0.68	0.25	1.62	1.00	0.58		
Type2	t1	v1	t2	v2	t3	v3	ウェイト
水深	8	0.12	16	0.32	26	1.00	0.73
Type3	avg	sd	ウェイト				
流速	18.7	6.2	1.00				
Type4	全遮蔽	上下遮蔽	左右遮蔽	全開放	ウェイト		
遮蔽	1.00	0.65	0.78	0.35	0.24		

選好強度 P を最大値が 1 となるよう正規化する、といった方法により、 P^* に河床面積を乗じたものを IFIM における WUA と同様の位置づけで考えることも可能である。

式(1)～(4)を調査時の河川環境条件に適用し、オイカワ分布の再現を試みた。ここでは水深、流速、餌量、遮蔽（現地観測では木などが水表面に投影する影の面積がその区間の水表面積に占める割合という形で表現する）の環境因子を組み込んで算定を行った。計算結果と調査結果の比較を図-4 に示す。夏においては、計算の結果得られた各区間におけるオイカワ生物量の変化傾向が調査結果と一致した(図-4(夏)、「行動圏無」参照)。秋においては、上単調区間で観測値より計算値がかなり大きくなり、その他の区間の生物量分布は調査結果と同様な傾向が示された(図-4(秋)、「行動圏無」参照)。計算結果を子細に検討すると、夏において多様な区間の値は大きくなったが期待したほどではない。また秋においても実際調査ではオイカワが極めて少なかった上単調区間において計算上は最も高い分布率となった。両季節において適切に生息環境評価ができたとは言い難い結果となった。

この原因として考えられるのは、①室内実験では選好性の季節変化を十分に意識したものになっていない。実験時期により魚の選好性が変化することは観察されているが、この情報を体系的に生かすには至っていない。②室内実験における実験条件と実際の河川環境の対応がはつきりしないものがある。例えば遮蔽条件は室内では黒プラスチック板により水路を覆うことで実現したが、実河川では岩かげ、陸性植物の木かげなどさまざまなパターンがある。③魚は瀬での採餌、淵での休息というように時間的に異なるモードで活動しており、自己の行動圏内でそのモード毎に適した場所に移動している⁷⁾と思われる。この点が考慮できていない。例えば上記の観測結果が示すように、休息場の少ない上単調区間の魚が実際には少ないにも関わらず、計算ではモードや行動圏が考慮できていないために、単純に流速条件などから魚が多いという評価がなされたものと思われる。

3.2 魚の行動圏を導入した生息環境評価手法の提案

本節では、魚の行動圏とモードを選好強度式に導入し、3.1 で述べた環境選好強度式を拡張した評価手法の提案を行った。

魚の生息環境において、採餌場、休息場・逃避場（隠れ場、避難場）、産卵場の存在及びそれらの配置関係がたいへん重要であると言われている。河川には瀬と淵があり、瀬には魚の餌になる付着藻類や水生昆虫が淵より豊富に存在しており、瀬は魚の採餌場として重要であるが、淵は水深が深く、流速の遅い空間で休息場として重要である。魚は瀬で採餌し活動して、淵で休息する⁸⁾。

逃避場は休息場と共通している部分が多い。休息場は採餌後や休眠時に休む場所で、逃避場は外敵に襲われた時や洪水などで増水したときに避難する場所である。休息場・避難場は採餌場の近くにあるとそれぞれの価値が高くなる。休息場が近くにあると、採餌・休息の一連の行動を繰り返すことができる。避難場が近い場合の利点は、採餌中、外敵に襲われた時に迅速に逃げ込むことができることである。

また産卵期において、どのような生息場が利用されるのかも生息環境を評価する上で考慮する必要がある。

多自然型河川改修における瀬淵の造成、多孔質護岸の実施や産卵床の設置等の効果を予測しようとする場合、魚の行動圏に基づく採餌場、休息場・逃避場、産卵場の間の距離配置関係を考慮しなければならない。

(1) 単一モードに対する選好強度式の定式化

ここでは魚の行動圏を考慮するとともに、餌を求めて活動する活動モード、採餌後や休息時に休む休息モード、外敵から身を守ったり洪水などで増水した時に避難する避難モードの 3 つのモードによって生息環境を評価することを試みた。なお、産卵モードは本研究では考慮しなかった。

活動モードにおける選好強度式は水深と流速の複合条件式(P_R)、休息モードにおける選好強度式は水深と流速の複合条件式(P_R)、逃避モードにおける選好強度式は遮蔽、護岸形態の複合条件(P_H)とした。 P_R 、 P_R 、 P_H の式形は(1)式の P^* に相当する。

活動モード時における水深や流速等の単一因子に対する選好強度式の係数、各因子のウェイト値は活動モード時に行った実験結果のもの、休息・逃避モードの選好強度式の係数、ウェイト値はそれぞれのモード時の実験

方法がまだ確立していないため推定値とした。休息モード時、水深の係数については調査時の河川環境を参考に推定したもの、流速の係数については活動モードの式を流速の遅い方にスライド($avg=0$)させたものを用いた。選好強度式の係数と因子ウェイト値を表-3に示す。

表-3 各モード時の選好強度式の係数及び因子ウェイト値

モード	因子	係数						因子ウェイト
活動モード	水深	t1 8	v1 0.12	t2 16	v2 0.32	t3 26	v3 1.00	0.73
	流速	avg 18.7	sd 6.2					1.00
休息モード	水深	t1 30~40	v1 0.2	t2 100	v2 1			0.73
	流速	avg 0.0	sd 6.2					1.00
逃避モード	護岸	flat 0.10	rugged 1.00					1.00
	遮蔽	t1 0.05	v1 0.05	t2 1.00	v2 1.00			0.10

(2) 魚の行動圏を考慮した総合的な選好強度のモデル化

オイカワの行動圏についてはMinns⁹⁾の研究成果に基づいて、式(5)を用いて推定した。式(5)で用いるWT(魚の体重)は鈴木¹⁰⁾によるオイカワの体重-体長式〔式(6)〕によった。なお、(5)式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、これを感知距離と呼んでいる。ここでは、感知距離=行動圏/河川幅とした。

$$\text{Log}_e[\text{Home range}(m^2)] = 3.43 + 0.53 * \text{Log}_e WT \quad \cdots \cdots (5)$$

$$WT(\text{魚体重 } g) = (\text{標準体長 } cm)^3 / \text{体重係数} \quad \cdots \cdots (6)$$

オイカワの体重係数: 65

行動圏内でのある水域*i*に対する総合的な選好強度モデルは、基準となるBox*i*からみたBox*k*の感知ウェイト*M_{i,k}*を求める式(7)を用いて、3つのモード時における選好強度式を統合し、式(8)で表現されると考えた。

$$M_{i,k} = \max \left(1 - \frac{dist_{i,k}}{\text{Sensible Distance}}, 0 \right) \quad \cdots \cdots (7)$$

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*からBox*k*までの距離

$$P_i = W_F \left(\frac{\sum_k M_{i,k} \times P_{Fk} \times A_k}{\sum_k M_{i,k} \times A_k} \right) + W_R \left(\frac{\sum_k M_{i,k} \times P_{Rk} \times A_k}{\sum_k M_{i,k} \times A_k} \right) + W_H \left(\frac{\sum_k M_{i,k} \times P_{Hk} \times A_k}{\sum_k M_{i,k} \times A_k} \right) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$W_F + W_R + W_H = 1 \quad \cdots (9)$$

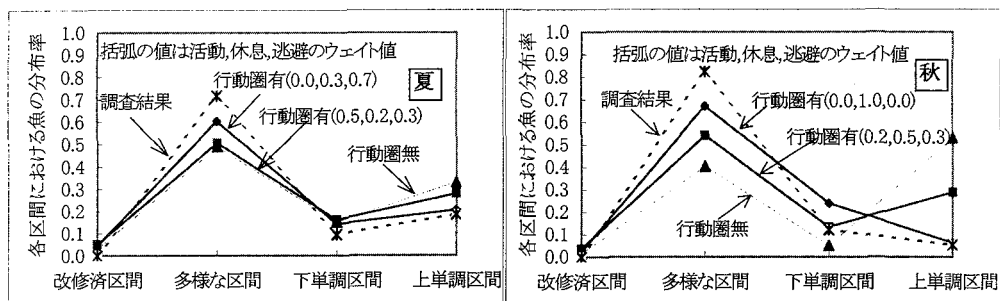
P_{Fk}, P_{Rk}, P_{Hk} : Box*k*におけるモード毎の選好強度, A_k : Box*k*の面積

ここに W_F, W_R, W_H は各モードのウェイトであり、その季節にどの程度、魚がそのモードで過ごすかによって決めることができる。各モードのウェイト値は魚の生活史¹¹⁾及び付着藻類調査結果をもとに、夏においては、餌が欠乏して餌を求める時間が長い、餌が豊富で餌を求める時間が短い、という2つの状況を想定して、 W_F, W_R, W_H を0.5, 0.2, 0.3並びに0.0, 0.3, 0.7の2通り定めた。秋においては水温が低くなり、休息モードで過ごす時間が長くなるため W_F, W_R, W_H を0.2, 0.5, 0.3並びに0.0, 1.0, 0.0の2通り定めた。

式(8)により複数の水域Box*i*における魚の分布率*D_i*は

$$D_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^I \{P_i\}} \quad \cdots \cdots (10)$$

と表記される。



行動圏無：行動圏を考慮せずに魚の分布率を計算した結果
 行動圏有：行動圏を考慮して魚の分布率を計算した結果

図-4 オイカワ分布計算結果

以上に提案したモデル式(7)～(10)を用いて、調査時の河川環境条件におけるオイカワの分布を算定した。図-4に計算結果を示す。行動圏を考慮しなかった場合に比べ、両季節とも多様な区間の値が大きくなり、行動圏無の場合より合致した。拡張した選好強度モデル式は魚の行動圏と行動モードを考慮することにより観測値に近い分布が得られた。

4 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、別報²⁾に報告した生物の環境選好強度式の実河川への適用を試み、その妥当性を検討した上で、環境選好強度式に行動圏や行動モードを組み込んで、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を提案した。実河川におけるオイカワ分布の再現を試みた結果、本手法の有効性を示した。今回提案した生息環境評価法では採餌、休息、逃避の3つのモードを考慮したが、産卵モードは考慮しなかった。また、餌を求めて活動する活動モードに対しても、魚の餌量に対する選好性の定式化を行っていたが餌量の成長を考慮しなかった。なおモード毎のウェイト値や、休息・逃避モードに対する選好強度式のパラメータ及び環境因子毎のウェイト値は推定値であった。今後は、これらパラメータやウェイト値を明確にすると同時に、産卵場や餌量の成長などの要素を考慮することにより、更に生息環境評価の精度を高め、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も行いたい。

参考文献

- 1) Stalnaker, C., et al. (1994). The Instream Flow Incremental Methodology. National Ecology Research Center National Biological Survey.
- 2) 川本泰生・関根雅彦・楊継東・今井崇史・浮田正夫：IFIMにおける河川生態環境評価法の精度と普遍性に関する一考察、環境システム研究、1998.
- 3) 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.
- 4) 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, 1996.
- 5) 関根雅彦・楢崎寿晃・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, 225-232, 1994.
- 6) 中西努・関根雅彦・浮田正夫：河川改修の影響評価のための魚の行動の実験的解析、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、第2A巻、256-257, 1995.
- 7) MATHENY M P IV, RABENI C F, Patterns of Movement and Habitat Use by Northern Hog Suckers in an Ozark Stream. Transactions of the American Fisheries Society, 124 (6), 886-897, 1995.
- 8) 水野信彦、魚にやさしい川のかたち、信山社、1995.
- 9) Charles K. Minns, Allometry of home range size in lake and river fishes. Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 52, 1995.
- 10) 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)、26-68, 1992
- 11) 名越 誠ほか、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、1-19, 1962.9.