

多自然型河川整備のための魚類生息環境評価¹

Methodology on the Evaluation of Fish Habitat in the Nature Friendly River Works

知花武佳², 松崎浩憲³, 玉井信行⁴

Takeyoshi CHIBANA, Hironori MATSUZAKI, Nobuyuki TAMAI

1. はじめに

我が国において「多自然型川づくり」に代表される自然回復型の河川整備へ人々の関心が向けられだしたのは 1990 年代に入ってからであり、その歴史は浅い。北米においては 1976 年に IFIM という魚類生息環境評価手法が提案されたが、完全な手法ではなく、幾つかの欠点が指摘されている。また、北米生まれのこの手法は、多くの魚が複雑な地形に生息する日本の河川にはそのまま適用することは困難である。そこで、本研究ではこの手法を改善し我が国の河川に適用可能な魚類生息環境評価モデルを作成することを目的とする。

2. 現地調査

モデルの作成、検証に用いるデータは多摩川永田地区（河口より 51.7km 地点から、53.2km 地点まで）で得られたものを用いた。この調査は河川生態学術研究会多摩川グループの活動の一環として行われた。調査時期は、1996 年の 5 月 9、10 日（春）及び、11 月 7、8 日（秋）の 2 回行った。調査項目は、流速・水深・底質・河川形態（瀬、淵など）である。底質は次の表-1 の値を用いた。これらは入り混じっているが、その地点に存在する各材料の値を A、全体を占める割合を P として

$$\text{河床値} = \sum A \times \frac{P}{100} \quad (1)$$

という式により数量化した。また、それと並行して魚種、尾数、体長を調べる魚類調査を行うことで、各計測エリアにおける魚の分布が求まる。魚類の捕獲には、投網（一投あたり、約 10 m²）を用いた。

表-1 底質の数値化

粘土	(粒径 1/256mm 以下)	2
シルト	(粒径 1/256～1/16mm)	3
砂	(粒径 1/16～2mm)	4
細礫	(粒径 2～8mm)	5
中礫	(粒径 8～32mm)	5.5
粗礫	(粒径 32～64mm)	6
玉石	(粒径 64～256mm)	6.5
巨礫	(粒径 256mm 以上)	7
岩盤		8

1 キーワード：生息域適性曲線, PHABSIM, 複数種の評価

2 東京大学 大学院工学系研究科修士課程(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

3 株式会社建設技術研究所 東京支社河川本部(〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11) (前東京大学助手)

4 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

3. 生息域適性曲線

多摩川永田地区の調査結果より生息域適性曲線を作成する⁽¹⁾。生息域適性曲線は一季節、一魚種について

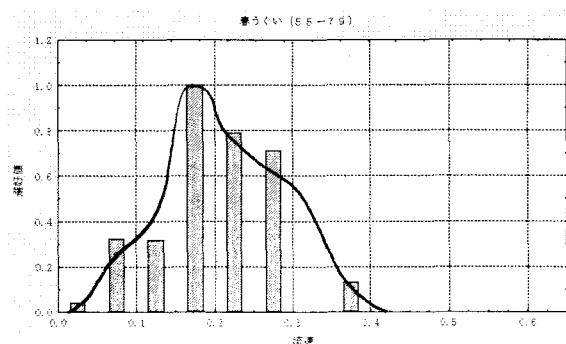


図-1 春-ウグイ (体長 55-79mm) - 流速
の生息域適性曲線

(春のウグイといった具合に) 一つの曲線を作成されることが多いが、ここではもう少し細かく分けた。すなわち春に関してはウグイ・オイカワ・アブラハヤ・アユ、秋に関してはウグイ・オイカワについて、体長とその捕獲数から稚魚・未成魚・成魚などの成長段階を推測し体長ごとにいくつかの段階に分けた。そして春秋ともにそれぞれについて生息域適性曲線を作成し、魚が半年後、一年後、一年半後と成長するにつれ生息域適性曲線にどのような変化が現れるかを見た。なお、生息域適性曲線はデータが少ない地点 (たとえば水深 X_m の地点が 2 点しかないといった場合) で、値が卓越することがある。

その場合には、その値を考慮する場合としない場合の二種類作成することにし、実際の生態にあっている方を用いた。さらに対象を淵のみに絞った場合についても生息域適性曲線を作成した。その一例を図-1 に示す。

4. PHABSIM の適用結果

PHABSIM とは Physical HABitat SIMulation System の略であり微視的生息域の環境評価手法である⁽²⁾。この PHABSIM においては各断面をいくつかのセルに区切り、セルごとの流速・水深・底質が必要となるが、実際には多数の横断面で流速・水深・底質を計測するのは困難である。そこで、断面形がわかっている場合にいろいろ流量を変化させると、その水深・流速がどう変化していくかを一次元不等流計算を用い、断面内平均流速が求まるようにした。区間は 52.3km から 52.7km において 100m 間隔の 5 断面を取り上げた。なお粗度係数は 0.045 を用いた。また変化させた流量は、 $0.3m^3/s$ 、 $0.7m^3/s$ 、 $1.5m^3/s$ 、 $2.6m^3/s$ 、 $4.0m^3/s$ の 5 ケースである。こうして求めた、流速・水深・底質に対する適性指数を読みとり式(2)に代入し、式(3)より WUA を求めた。

$$F[v,d,s]=f(v) * g(d) * h(s) \quad (2)$$

$f(v)$: 生息量と流速の関数

$g(d)$: 生息量と水深の関数

$h(s)$: 生息量と底質の関数

$$WUA = \sum F_i[v,d,s]a_i \quad (3)$$

(a_i : 各セルの面積)

また、それぞれの魚に対する評価値を多摩川永田地区の地形に重ね合

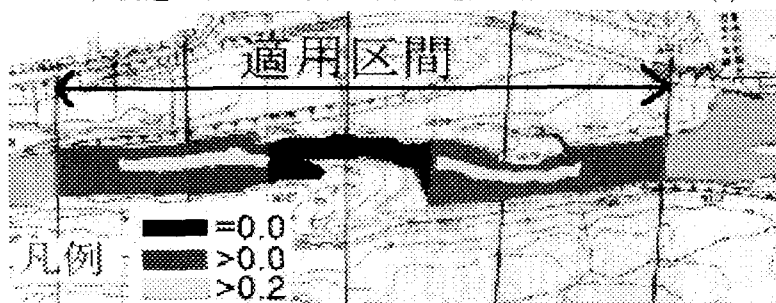


図-2 評価値を多摩川永田地区に重ね合わせた結果

わせ、色分けによって示したもの一例が図-2 である。魚種、体長、及び時期を限定した場合には生息環境の評価指標として有効であるが、多魚種が混在する場合などでは明確な指標とはならない。WUA の和を最大にするという手法をとっても犠牲となる種が出ることもとなるし、いったい何が生息に適さない要因なのか分からない。また、断面形がなだらかに変化する場合ならばよいが、複雑な地形を持つ河川においては断面形の間隔をもっと狭めて多くの横断面について検討しなければならない。また PHABSIM はそれぞれの環境因子の生息域適性曲線から求めた適性指数を掛け合わせて全体の評価値を求めるために、すべての環境因子を等価に扱っているという欠点を持っている。

5. 主成分分析を用いた評価法

この評価法が PHABSIM と比べて改善されている点は、先ず PHABSIM で組み込まれていなかった重み付きの環境因子を組み込んでいる点である⁽³⁾⁽⁴⁾。水深、流速、底質、及び魚の尾数について主成分分析を行う。すべての魚において第二主成分までの累積寄与率は 60%から 70%の間になることから、ここでは第二主成分までを採用する。ここから求めた因子負荷量を二次元の因子負荷量図にプロットすることにより、その魚に大きく影響する環境因子とそうでないものを一目で判別することができる。この結果の一例を図-3に示す。この xy 座標をウグイのベクトル方向に軸が来るように回転させる。そして、このウグイ軸に対する因子負荷量を求めることからその環境因子のウグイへの重要度が求まる。こうして求めた各因子の重要度のうち絶対値が最大のもので、他の重要度の絶対値を割ったものをその重みとする。(生息域適性曲線における適性指数と同じ要領。) この重みを生息域適性曲線から読みとられた適性指数に掛けたものを足しあわせ、環境因子の数で割ったものが生息環境評価式となる。すなわち、

$$s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{a_i \times f_i\} \quad (4)$$

s : 評価値 N : 抽出した因子の数 a_i : 因子の重み f_i : 適性指数

となり、図-3 より因子負荷量は表-2 の様に求まる。これによりこの場合の評価式は(5)の様に求まる。

$$s = \frac{1}{3} \{1.00 h_1(v) + 0.18 h_2(d) + 0.18 h_3(s)\} \quad (5)$$

表-2 各因子の因子負荷量と因子 1,2 の寄与率

	因子1	因子2		
水深	0.799971	0.323561	水深の重み	0.176437
流速	-0.75749	0.244931	流速の重み	1
底質	-0.59984	-0.44899	底質の重み	0.179507
ウグイ	-0.43428	0.788961		
寄与率	0.440538	0.247185	寄与率合計	0.687723

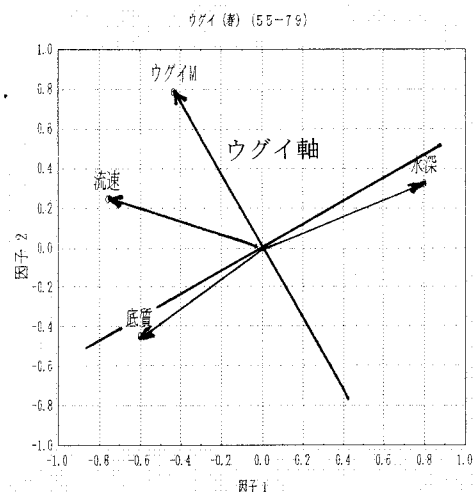


図-3 春-ウグイ (体長 55-79mm) の主成分分析による魚類生息環境評価

6. ファジィ積分による評価法

主成分分析による評価法においては、あらゆる環境因子を線形モデルで組み込んでいたが、対象が自然界であるためそこから求まる値もクリスプなものではないと考え、これを非線形モデルで扱ったのがこのファジィモデルである⁽⁵⁾。すなわち、主成分分析においては加法性を仮定していたが、ファジィ理論においてはこれよりも緩やかな単調性のみを仮定している。ここでは λ -ファジィ測度を用い、 $g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B)$ (ただし $-1 < \lambda < \infty$) とする。 $g(A)$, $g(B)$ …はファジィ測度であり、非加法性を用いた各環境因子の重みが入る。ここでは常に $\lambda=1$ とする。また、 $g(A)$, $g(B)$ の比は主成分分析から求めたものを用い、全体集合 $g(X)$ が1という条件から表-3のように値を求めた。ただこれらのファジィ測度間には相関がないことが前提となっているので主成分分析により、相関が高いと判断された因子に関してはそれらのうちもっとも影響の大きいものを選び後は切り捨てるという方法を用いる。こうして求めた λ -ファジィ測度を用いてショケ積分により、総合評価値を計算する。環境因子 $x_1 x_2 \cdots x_n$ (ここでは水深、流速、…) に対する評価値 $h_1 h_2 \cdots h_n$ を大きいもの順に並び替え、添え字も付け替えて、 $h_1 \geq h_2 \geq \cdots \geq h_n$ となるようにする。さらに、

$$H_1 = \{x_1\}, H_2 = \{x_1 \cap x_2\}, \cdots, H_n = \{x_1 \cap x_2 \cap \cdots \cap x_n\} = X \quad (6)$$

として、各 $g(H)$ を先に述べた λ -ファジィ測度を用いて計算し、式(7)の値(図-4の面積)を評価値とする。

$$(C) \int h d g = h_n g(H_n) + \{h_{n-1} - h_n\} g(H_{n-1}) + \cdots + \{h_1 - h_2\} g(H_1) \quad (7)$$

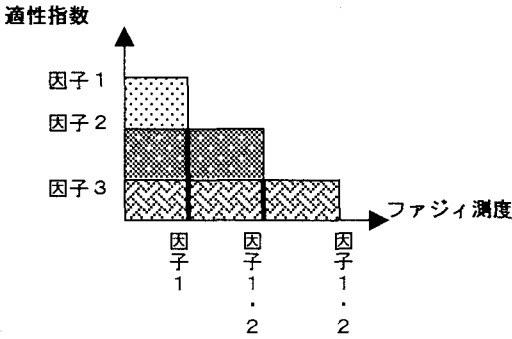


図-4 ファジィ積分

表-3 春-ウグイ-（体長 55-79mm）の場合のファジィ測度

$g(d)$	0. 11142
$g(v)$	0. 619
$g(s)$	0. 11142
$g(d, v)$	0. 799389
$g(d, s)$	0. 235254
$g(v, s)$	0. 799389
$g(d, v, s)$	1

d :水深 v:流速 s:底質

7. 各種評価法の比較

このようにいろいろな計算による評価法を述べてきたが、これらにどのような差が出ているのかを見ることにする。図-5 の左の図は調査地点 10 点で、評価値と捕獲された魚の数を比較したものである。それぞれの評価値のオーダーは異なるため、最大となる値を 1 として基準化してある。右の図はさらに河川形態を淵に、対象をウグイの成魚に限定した場合の比較である。ここから次のことがわかる。

- ① 生息域適性曲線は細かく分けない限りその精度は上がらない。
- ② 重要なのは生息域適性曲線の適性指数であり、現段階においてはどの計算が当てはまっているかを決定できるほど精度はよくない。

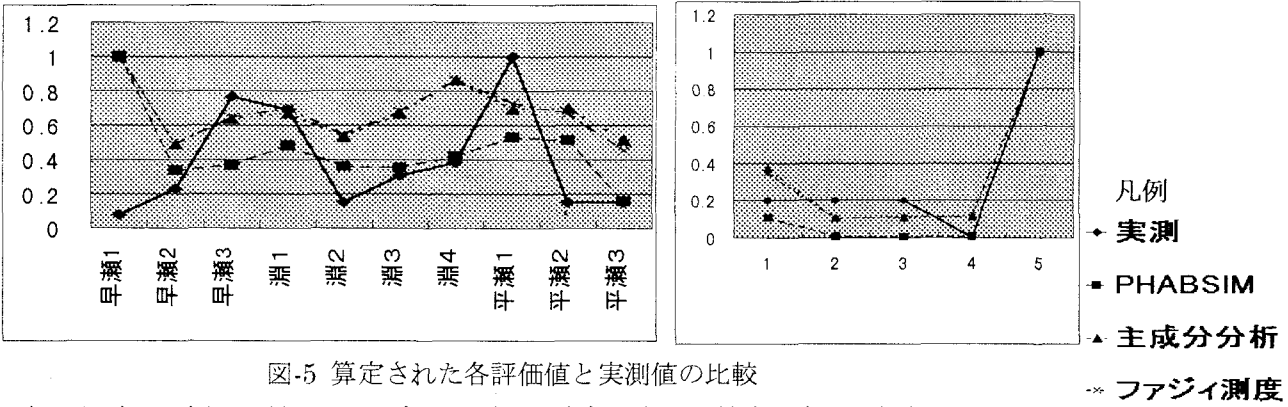


図-5 算定された各評価値と実測値の比較

春のウグイ（左）と淵における春のウグイの成魚（右）で精度は大きく異なる。

- ①より、生息域適性曲線は非常に細かく分けなければならないことがわかる。しかし、そうすると全体的な評価はなお難くなる。そこで、細かく分けた生息域適性曲線を情報のロスが少ないように合成することを考えなければならない。また②より、現段階においては水深〇〇点、流速〇〇点…、といった評価を求めることだけを考え、総合点計算の手法については考えない。こうした点をふまえて新しい複数種の評価法を考案した。

8. 複数種の評価手法

前章で述べたように生息域適性曲線の段階ですべての曲線を足しあわせれば、多くの魚種にとって望ましい環境因子の度数分布が求まるのではないかと考えた。これらを足しあわせる際に、そのまま重ね合わせるのではなく、それぞれの魚種ごとの生息面積比率を考慮して足しあわせる方法を考えた。まず、生息域適

性曲線は成長段階と河川形態でわけることとする。ここでは、春のウグイ・オイカワ・アユにとって理想的な淵の水深分布について考えることにする。これらの魚種の各成長段階ごとの適性指数を表にしたものが次の表-4である。但しここでは、最大値を1にするのではなくそれぞれのトータルが1になるように基準化してある。すなわち全体の何割がその水深のところにいるのかを示す。

表-4 基準化した適性指数（春の淵における水深の場合）

春淵水深 魚種 魚 齡 体 長	ウグイ 未成魚 ~54(mm)	ウグイ 二年魚 55~79(mm)	ウグイ 三年魚 80~(mm)	オイカワ 未成魚 ~49(mm)	オイカワ 二年魚 50~74(mm)	オイカワ 三年魚 75~(mm)	アユ
0. 2	0	0. 090361	0. 131579	0	0. 192308	0. 090909	0
0. 3	0. 352113	0. 436747	0. 361842	0	0. 576923	0. 136364	0. 695652
				途中略			
1. 4	0. 093897	0	0	0	0	0	0
1. 5	0. 070423	0. 060241	0. 065789	0. 769231	0	0. 181818	0
2	0. 093897	0. 165663	0. 098684	0	0	0	0

これをそのまま行列と見なす。仮にこれを適性指数行列(M_{ij})と呼ぶ。

これにそれぞれの魚の理想的な利用面積に当たる7行1列の行列をかける。この比を表す行列は次のように考えた。それぞれの魚の体長変化と生存率変化を生物図鑑など⁽⁶⁾を参考に一般的な値をプロットし、近似曲線で結ぶ。これでその時期の魚の体長と、時期による個体数の比の目安がわかる。次にその行動範囲は体長の二乗に比例すると仮定した。生まれてから*i*年目の春を迎えた魚の体長を L_i とし、その時の生存率を S_i とする。*x*種の*i*時期が占める利用面積比率は

$$x_i = \frac{L_i^2 \times S_i}{\sum_i (L_i^2 \times S_i)} \quad (8)$$

である。これに各魚種(*x,y,z*)ごとにそこに生息するべき個体数の比(α, β, γ)をかけたものをならべて (9)の様な行列を求める。

$$A_{ji} = \begin{pmatrix} \alpha & x_i & \beta & y_i & \gamma & z_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

ウグイ(*x*)・オイカワ(*y*)・アユ(*z*)の個体数の比率を、(α, β, γ)=(8, 4, 3)と仮定すると、(9)は(10)の様になった。

$$A_{ji} = \begin{pmatrix} 1.943 & 2.590 & 3.466 & 2.330 & 1.040 & 0.630 & 3.000 \end{pmatrix} \quad (10)$$

これと先の適性指数行列を掛け合わせた結果、表-5のように求まった。この $M_{ij} \cdot A_{ji}$ が複数種に対する理想的な利用面積比率となる。

次に一年を通した値を考える。ここでは、春と秋の合成を考えるので、秋についてもここまで同じことをする。ただ個体数の比は年間を通して考える。すなわち春のウグイ：春のオイカワ：春のアユ：秋のウグイ：秋のオイカワが、先の生存率なども考慮して8：4：3：24：7となったならば、個体数比は24：7を用いる。この結果が表-6である。こうして水深*x*に対する、度数の値 $\mu(x)$ をそれぞれの季節で求め、最大のものを採用する。ここでは、春と秋の値から表-7のようになった。これが、ウグイ・オイカワ・アユに適した淵の水深分布である。この総和が1になるようにすればその比率となる。この方法から求められた水深の度数分布と、永田地区の淵における実際の度数分布をなだらかな曲線で結んだものを図-6に示す。共に、その面積が1になるようにしてある。

同様の手法で、淵の流速・底質も求まる。これらを、とろ・平瀬・早瀬の適性指数で行えば3種の生息にあった河川形態が求まる。また評価値を求める時には、実際の度数分布との重なり面積を求めればよい。

ただし求めたものは決して適性指数ではなく度数分布である．すなわちヒストグラムの最大値が一番重要なのではなくて、一番多く必要だということである．これにより環境因子のどの値が不足しているかが一目でわかる．

表-5 春の望ましい水深分布 表-6 秋の望ましい水深分布 表-7 春秋の望ましい水深分布

水深 (春)		水深 (秋)		水深 (春秋)	
0. 2	0. 947511	0. 3	1. 323409	0. 2	0. 947511
0. 3	5. 842912	0. 5	1. 732252	0. 3	5. 842912
0. 4	1. 351555	0. 6	10. 11417	0. 4	1. 351555
0. 5	0. 58026	0. 7	3. 274936	0. 5	1. 732252
0. 6	0. 028635	0. 8	3. 925272	0. 6	10. 11417
0. 8	0. 028635	0. 9	2. 20317	0. 7	3. 274936
1	1. 087203	1. 1	4. 203627	0. 8	3. 925272
1. 1	0. 169451	1. 2	4. 223162	0. 9	2. 20317
1. 2	0. 869017			1	1. 087203
1. 3	0. 531083			1. 1	4. 203627
1. 4	0. 182444			1. 2	4. 223162
1. 5	2. 4276			1. 3	0. 531083
2	0. 953693			1. 4	0. 182444
				1. 5	2. 4276
				2	0. 953693

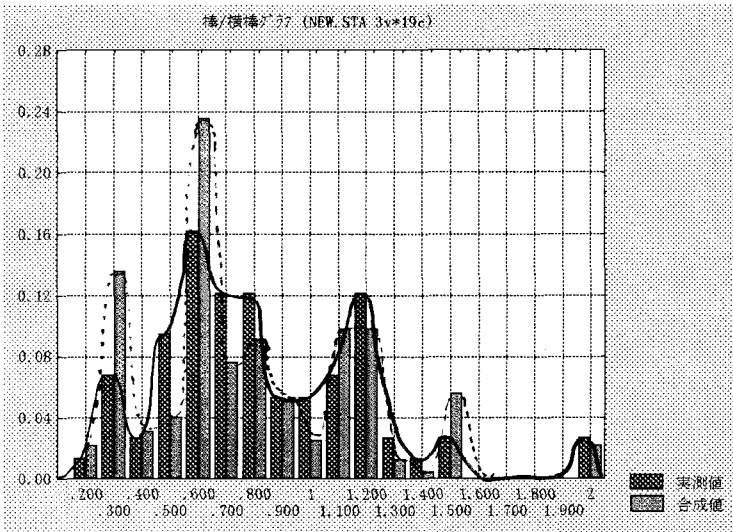


図-6 実際の水深分布と合成したものとの比較

9. 結論

既存の評価手法は、環境因子のどの値を魚がもっとも好むかだけで評価していたために単調な河川ほど高い評価値を得やすかった．しかるに、今回提案した手法においては生息域適性曲線をその体長と個体数で重み付けして足しあわせ、これを理想の分布と見なすことでこのような問題を解消した．また多魚種を評価できるとともに、どの因子が不足しているかということで、河川改修の際の目安ともなる．現在考えている評価体系は魚相が決まったときに河川形状はどうなるか、河川形状が決まったときにその魚相はどういったものが望ましいか、を双方向で考えるものである．後者に関しては数値シミュレーションによりその安定性を解析することを考えているが、前者の評価法の改善とともにこれからの課題である．

謝辞

魚類調査に協力して下さった君塚氏をはじめ、河川生態学術研究会多摩川グループの共同研究者に心より感謝いたします．

参考文献

(1)石川雅朗：選好曲線作成例，第一回河川生態環境評価法セミナー，1995．
(2)National Biological Service, U. S. Department of the Interior：The Instream Flow Incremental Methodology；A Primer for IFIM, Biological Report 29, 1995.
(3)松崎浩憲，玉井信行，中村宇一：魚類の生息環境評価に関する研究，第24回環境システム研究，1996.
(4)小林四郎：生物群集の多変量解析，蒼樹書房，1995.
(5)Tamai, N. and Matsuzaki, H.：Estimate of Fish Habitat for Determination of Ecological Instream Flow, The 27th Congress of the international Association for Hydraulic Research, Proceedings of Theme B, vol.1, 1997.
(6)宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦：原色日本淡水魚図鑑，保育社，1996.