

魚類の生息環境評価に関する研究

A STUDY ON METHODOLOGY OF FISHES' PHYSICAL HABITAT

松崎浩憲*, 玉井信行*, 中村宇一*

Hironori MATSUZAKI*, Nobuyuki TAMAI* and Uich NAKAMURA*

ABSTRACT; This paper presents a new method for evaluating fish habitat environments. The proposal method is especially effective in the region like Japan where environments are various in each section along the river, and there are various fish species. Field observation data was analyzed by the principal component analysis method, mutual relation between environmental factors and the amount of fish habitat was clarified. And, this analysis result explains fishes' actual modes of life of each fish species. That is, how which environmental factors exert the influence on the amount of fish habitat is shown. Authors adapt the characteristic of such a principal component analysis for our proposal method by weighting factors according to the size of the vector of the factor loading. The method of fish habitat potential was calculated by using the weighted principal factor method and fishes' preference curves which are used also with the IFIM. In addition, a methodology of Choquet integral is able to evaluate fish habitat environments comprehensively by regarding the factor loading as the fuzzy measure.

KEYWORDS; IFIM, PHABSIM, principal component analysis, environmental factor, fuzzy theory

1. 緒論

人間活動が自然生態系へ与える影響が無視できなくなり、環境保全の議論が各分野で盛んに行われている。我が国の河川においても例外ではなく、「多自然型川づくり」といった河川整備が行われている。しかし、河川生態系の中心となる魚類の生息環境を的確に評価する手法がまだない。この分野の研究はまだ緒についたばかりで、河川的环境管理計画に役立つ評価方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。現在、最もよく用いられているものに IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)がある。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)は河川環境を代表する因子をいくつか抽出して、魚の生息ポテンシャルを予測する方法である。しかし、生息ポテンシャルが流量との一元的な関係でしか得られないため、魚種によっては適切な評価方法とはいえない。また、魚類に影響する環境因子を抽出する適切な方法がないのが現状である。

本研究では、まず現地観測結果を用いて魚類の生息環境を主成分分析によって解析した。そして、この分析結果を用いて、IFIM を改良した魚類の生息ポテンシャルを予測する手法を提案した。さらに、単なる生息量予測ではなく生物群集の多様性、曖昧さ、不確かさを反映した総合的な生息環境評価方法をファジィ理論を用いて提案した。

2. 現地観測

現地観測の対象とした河川は矢作川水系乙川(流域面積 271km², 河川延長 34km, 上流部の平均勾配 1/45, 下流部の平均勾配 1/350)で愛知県岡崎市を貫流している。魚類調査は河川のほぼ全域にわたる代表 10 観測区間で、1994 年の 6 月, 8 月, 11 月, 1995 年の 2 月と四季を通じて 4 回行なわれた。観測された魚種は全部で 29 種類であった。このうち、オイカワ、カワムツ、カワヨシノボリの 3 種は四季を通じて、多くの観測区間で観測された。

したがって、この 3 種を乙川を代表する魚種と判断し生息環境の解析をすすめた。観測区間の生息環境を代表する指標として、水深、流速、底質、植生値、植生カバー率、瀬淵距離の 6 種類を用いることにした。水深と流速はその観測区間の代表値である。底質は大きさによって 9 階級に分け、1~8 の値(1:デトリウス, 2:泥, 3:シルト, 4:砂, 5:細礫, 6:中礫, 6.5:大礫, 7:巨礫, 8:岩)と重量百分率を掛けたものを指標とし

* 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil Engineering, University of Tokyo

た。植生値は河畔の植生によって3階級に分け、0~2の値(0:植生なし、1:草、2:樹木)と観測区間の全水辺長さに対するその植生値の水辺長さの百分率を掛けたものを指標とした。植生カバー率は観測区間において河畔植生が川面に投影する影の割合である。これはステレオ写真測量によって算出した。瀬淵距離は河床形態を表す指標である。これは観測区間において対となった瀬と淵の距離の平均値を用いた。一般的に下流から上流に向かうほど瀬と淵の距離は小さくなっていく。

3. 生息環境の評価方法

3.1 主成分分析による生息環境の解析と指標化

(1)主成分分析

生態学の分野では、環境因子と生物群集の関係付けは多変量解析手法を用いてよく行われている。多変量解析の一方法である主成分分析は、多くの変量によって表された情報を、できるだけ情報の損失を少なくして、少数の変量に圧縮して代表させる方法である。すなわち、観測されたある魚種について p 個の環境因子 $x_1, x_2, \dots, x_p$ を m 個の新しい主成分 $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ に集約する。これによって、その魚種に対する影響の大きい環境因子を意味づけすることが容易にできる。主成分の重要度を表すのが固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ である。式①の係数 a_{ki} を固有ベクトルという。

①

$$\begin{aligned} Z_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p \\ Z_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2p}x_p \\ &\dots \\ Z_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mp}x_p \end{aligned}$$

重回帰分析や判別分析などの目的変数を用いる多変量解析手法では、説明変数相互に高い相関があるとマルチコという問題が生じてしまう。しかし、主成分分析は数量データであれば、どんな変数を採用してもよく、相互に高い相関があっても全く問題がない。したがって、採用する環境因子の変数選択のためのプロセスを省くことができる。

(2)累積寄与率と主成分の数

主成分をいくつ採用するかということが問題となる。一般的には各主成分の説明力を示す寄与率を足し合わせた累積寄与率が 60%~80%になるまでの主成分を採用する。情報が p 次元よりも少ない m 次元に要約されたことによって、多少の情報の損失が生じる。しかし、一般的に観測された生物群集のデータは、観察される個々の種個体群の偶然誤差に由来する変動を含んでいる。これは分析には邪魔なノイズである。したがって、主成分分析によってこれらのノイズを除き本質的な情報のみ抽出できれば、情報の損失はかえって望ましいともいえる。

(3)主成分負荷量と環境因子の影響度合い

固有ベクトルに固有値の平方根を掛けた値 $\sqrt{\lambda_k} \cdot a_{ki}$ を主成分負荷量という。採用した主成分を座標軸とするグラフ上で、魚種 i の主成分負荷量をプロットすると、原点を中心とする半径1の円内に散布する。プロット点の位置が円周に近い因子は、この2つの主成分によって大部分が説明されることを意味する。したがって、この散布図を利用すれば魚種 i の生息密度と関係の深い環境因子を読みとることができる。また、これらの環境因子と魚種 i の生息密度のベクトル方向の大きさ l_{ki} は関係の深さを示す指標となる。すなわち、主成分負荷量のベクトル図を用いると、ある魚種の生息に大きく関与する環境因子とその重みを知ることができる。また、複数の環境因子の重みは合成ベクトルの大きさとして定義する。

3.2 ファジィ理論による評価方法

(1)ファジィ理論の適用

主成分分析によって選別された環境因子の重みは、対象が生物群集であるかぎり、ある程度のゆらぎをもち普遍的な値ではない。なぜなら、生存競争や外部からの攪乱によって生息の場は拡大し遷移するからである。つまり、ある魚種の生息に大きく関与する環境因子への適用性、選好性は状況によって変動する曖昧な値、ファジィ数であるといえる。言い換えれば、魚種の集合と環境因子の集合はファジィ関係にあるといえる。

ある河川のある区間で、ある魚種に対する生息環境を総合的に評価するためには、環境因子のあらゆる組合せに対する基準値、すなわち測度が定まっていなければならない。前述したように、この測度は生物群集の複雑な振舞いに依存していて同定不可能である。しかし、主成分分析結果の重みは、総合評価値にその環境因子の寄与する割合、貢献度とみなすことができる。これは加法性をもたないが測度に類似したもの、フ

ファジィ測度と定義することができる。ファジィ測度はその非加法性によって、部分集合間の相互作用、すなわち環境因子の組合せによる効果を表している。

(2) ショケ積分による評価

いまファジィ測度空間において、図-1 に示す正值単関数を式②のように定義する。

②
$$f(x) = \sum_{i=1}^n r_i \chi_{D_i}(x)$$

f の μ に関するショケ積分は式③のように定義される。

③
$$(c) \int f d\mu = \sum_{i=1}^n (r_i - r_{i-1}) \mu(A_i)$$

ここで、 $0 = r_0 \leq r_1 < \dots < r_n, A_i = D_i \cup D_{i+1} \cup \dots \cup D_n$

これは図-2 のように示される。横軸に環境因子のファジィ測度の値を適用すると、縦軸は評価得点と見なすことができる。つまり、 f の μ に対するショケ積分値は総合評価値に他ならない。

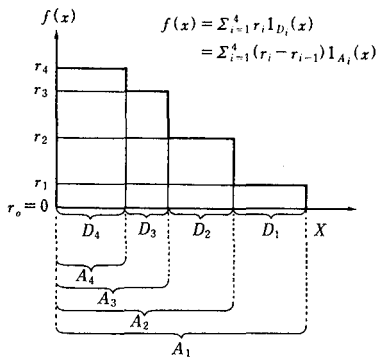


図-1. 正值単関数 f

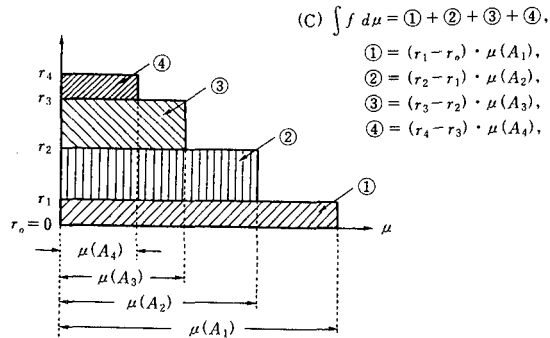


図-2. 正值単関数 f のショケ積分

4. 解析結果と考察

4.1 主成分分析の妥当性

表-1 に代表魚種 3 種に対する主成分分析の第 2 主成分までの累積寄与率を示す。また、図-3 に分析結果の一例を示す。

表-1. 第 2 主成分までの累積寄与率 (%)

魚種	春	夏	秋	冬
オイカワ	68.7	69.4	65.5	62.9
カワムツ	68.3	70.9	64.3	67.9
カワヨシノボリ	69.8	69.3	70.7	67.8

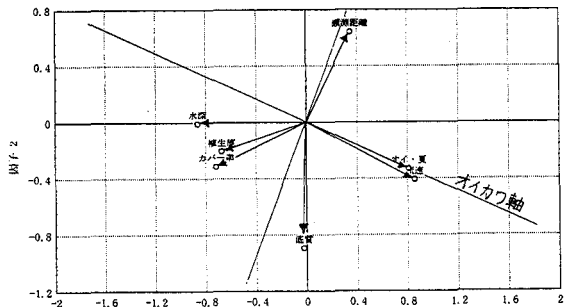


図-3(1). 主成分負荷量のベクトル図
(オイカワ[夏]の場合)

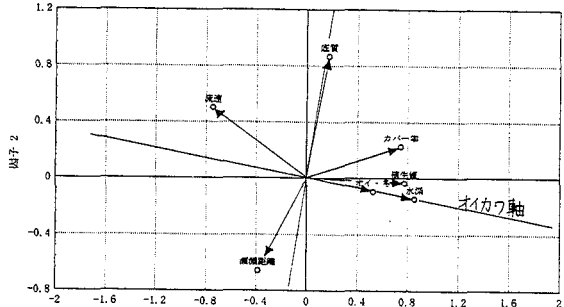


図-3(2). 主成分負荷量のベクトル図
(オイカワ[冬]の場合)

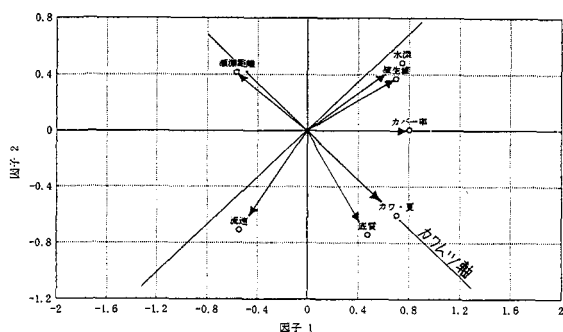


図-3(3). 主成分負荷量のベクトル図
(カワムツ[夏]の場合)

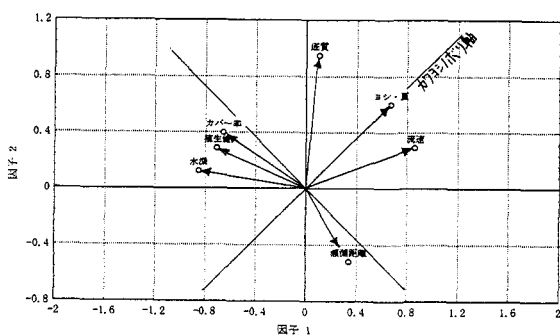


図-3(4). 主成分負荷量のベクトル図
(カワヨシノボリ[夏]の場合)

表-1 をみるとほとんどすべての値が 65%~70%の間にあることがわかる。つまり、第 1 主成分と第 2 主成分で表された平面上のデータは、もとのデータの 65%~70%を説明しているということになる。この程度の累積寄与率で十分だと判断した。実際、第 3 主成分まで採用すると累積寄与率は 80%程度になるが、図-3 は 3 次元空間となり直感的に環境因子間の構造を知ることが困難になる。また、前述したようにもとのデータ自体にノイズが含まれているので、むやみに累積寄与率を上げることに意味はない。

図-3 をもとに因子構造を調べた結果、各季節ごとにオイカワの生息密度に影響する環境因子に影響の大きい順に並べると表-2 のようになった。ただし、それぞれの環境因子のベクトルの正方向は、それぞれ、流速：大、底質：粒径大、瀬淵距離：大、植生カバー：大、植生値：大きいほど高木性、水深：大であり、負方向はこの逆である。

表-2. オイカワの生息に影響する環境因子の序列

季節	大	← 影 響 →	小
春	流速 (正)	底質 (正)	水深 (負) 植生値 (負)
夏	流速 (正)	水深 (負)	植生値 (負) 植生カバー (負)
秋	底質 (正)	植生カバー (正)	瀬淵距離 (負)
冬	水深 (正)	流速 (負)	植生値 (正) 植生カバー (正)

こうして求めた結果が、オイカワの生活行動をどれほど反映しているかを、魚類生態図鑑をもとに、季節別のオイカワの生活形態と比べて調査した結果を表-3 に示す。

表-3. オイカワの生活行動と主成分分析結果との比較

季節	生活行動と分析結果の比較
春	オイカワの産卵は 5 月から 8 月にかけて行われる。したがって、春の調査が行われた 6 月は産卵期にあたり、オイカワは産卵に適した条件の場所が多く採取されたはずである。産卵場所は浅く、砂と礫の入り混じった柔らかいところである。そのため主に平瀬の岸寄りが産卵場所となる。分析結果の速い流れ、水深小は妥当だと考えられる。産卵は柔らかい砂地に行われるために粒径の小さい底質が好まれるはずである。しかし、分析結果は底質大となっている。この原因として考えられるのは、この時期に見られるのは、前年に生まれた満 1 年魚と産卵を行う満 2 年魚である。産卵をしない満 1 年魚が上流より生息しているためだと考えられる。実際、体調の調査結果をみると上流のオイカワの平均体長が小さく満 1 年魚の割合が高いことがわかる。生活年齢によって行動様式が異なる場合には分析の際に考慮しなければならない。
夏	8 月になると産卵期も終わりに近づき、産卵後 2 週間程度で卵から孵化した稚魚が現れる。これと同時に満 2 年魚は死ぬ。これは観測データの平均体長が小さくなることからわかる。分析結果によるとこの時期、オイカワは速い流れ、水深小、低い植生、少ない植生カバーとどれも平地流の平瀬を表す結果となっている。これは餌となる礫に付着した藻類が豊富な時期の特徴とよく合っている。
秋	10 月になるとオイカワの主食である藻類が減少するため、落下昆虫を食べる割合が大きくなる。この時期オイカワの摂食量は一年中でもっとも多くなる。したがって、生息場所も平瀬中心から淵中心へ、より上流部へ移動するが雑食性が強くなるため広い範囲にわたって分布する。分析結果の粒径の大きな底質、落下昆虫が多くなるため高い植生カバー、近い瀬淵距離はこのような生態をよく反映している。
冬	オイカワは冬の間、ほぼ成長がとまっている。生息場所は淵で活動はおとなく淵にとどまるようになる。分析結果をみると、水深大、遅い流れ、高い植生、高い植生カバーとなっており、いずれも上流部の淵を表しており、生活行動と合致している。

このように主成分分析の結果はオイカワの季節ごとの産卵、捕食といった生活行動をよく表していることがわかった。このことは他の代表魚種であるカワムツ、カワヨシノボリにもいえた。主成分分析による生態環境の解析方法はかなりの一般性をもつものと判断できる。

4.2 生息量予測モデル

IFIM における PHABSIM の基本的な考え方は、生息密度といくつかの環境因子との選好曲線を利用して、小分割した河川横断面ごとに流量を増加したときのそれぞれの選好値の積の総和から生息数を予測するものである。最終的には生息可能量と流量の関係図が得られる。この手法は、環境因子の選択方法に言及していない点、流量との一元的な関係図のみで生息ポテンシャルを表現している点が欠点である。今回の主成分分析結果を用いて、環境因子を選択し、その環境因子をそのまま取り入れた生息量予測式を考案した。

生活行動から判断して、オイカワについては夏と冬、カワムツとカワヨシノボリについては夏の分析結果を利用すれば、四季を通じて適用可能な予測モデルとなる。予測モデルは、生息に大きく関係する環境因子を変数に、その重みを係数とする一次結合式を基本とする予測方法である。図-3 に示す生息密度ベクトル軸にそったベクトルをもつ環境因子が生息に大きく関係する環境因子で、生息密度ベクトル軸に対するその環境因子ベクトルの正射影を重みとする。重みは最大のものを 1.0 として変換する。この予測方法による生息ポテンシャル S を式④のように定義する。

④

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{a_i \times f_i\}$$

ここで、 N ：抽出した環境因子の数、 a_i ：環境因子の重み、 f_i ：環境因子の選好曲線による選好値
表-4 に生息に関係する環境因子とその重みを算定した結果を示した。

表-4. 生息に関係する環境因子とその重み

魚種	流速	水深	底質	植生カバー	植生値	瀬淵距離
オイカワ（夏）	1.00	-0.82				
オイカワ（冬）	-0.94	1.00		0.80	0.89	
カワムツ			1.00	0.71		-0.83
カワヨシノボリ	1.00	-0.67	-0.77			

したがって、オイカワ（夏）の場合を例にとれば、生息ポテンシャル予測式は式⑤のようになる。

⑤

$$S = \frac{1}{2} \{1.00 \times f(v) + 0.82 \times g(d)\}$$

ここで、 $f(v)$ ：流速の選好曲線、 $g(d)$ ：水深の選好曲線

この手法を用いれば、対象とする魚種と河川の特徴にあった適切な環境因子を抽出できて、生息可能量の予測も流量のみに依存しない。しかし、IFIM も提案した新しいモデルも代表断面における魚類の生息量あるいは生息可能量の予測方法であって、総合的な生息環境の好適性を評価するものではない。また、基本式は線形であるため、環境要因のいずれかが極端に低かったり、高かったりするとこれらの予測方法は不安定なものになってしまう。つまり、単独の種が卓越している河川においては、成立するが、実際には多種の魚種が生息していることが一般的であるため、現実から乖離した予測結果となる。なぜなら、多種類の生物が生息する環境では、生存競争が起こり生理的にあまり好ましくない環境でも生息しているからである。したがって、このような生物群集の曖昧さを加味した総合的な生息環境を評価する方法が必要となる。

4.3 ファジィ理論による評価方法

代表3魚種の集合 U と生息に関係する6個の環境因子の集合 V は式⑥に示すようにファジィ関係 R にあるといえる。

⑥

$$R = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{オイカワ(夏)} \\ \text{オイカワ(冬)} \\ \text{カワムツ} \\ \text{カワヨシノボリ} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & -0.82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.94 & 1 & 0 & 0.80 & 0.89 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.71 & 0 & -0.83 \\ 1 & -0.67 & -0.77 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

流速

水深

底質

植生カバー

植生値

瀬淵距離

図-3における環境因子の重みをファジィ測度 μ とする。このファジィ測度は支援システムやファジィ制御などに用いられるメンバーシップ関数に相当するものである。環境因子が2個の場合の例としてオイカワ（夏）の場合を示すと、各環境因子の組合せの寄与率は式⑦のようになる。また、環境因子が3個以上の場合の例として、カワムツの場合を示すと式⑧のようになる。環境因子2個の組合せのファジィ測度は、ベクトルの合成値をもとに決定する。このとき合成によって大きさが小さくなる場合には、一方の象現を移動して合成値を求める。式⑦、式⑧から明らかなように、個別の環境因子のファジィ測度を足し合わせても1.0にならず、ファジィ測度は加法性をもたないことがわかる。

$$\textcircled{7} \quad \begin{cases} \mu(\{\text{流速, 水深}\}) = 1.0 \\ \mu(\{\text{流速}\}) = 1.0 / 2 = 0.5 \\ \mu(\{\text{水深}\}) = 0.82 / 2 = 0.4 \end{cases}$$

$$\textcircled{8} \quad \begin{cases} \mu(\{\text{底質, 植生カバー, 瀬淵距離}\}) = 1.0 \\ \mu(\{\text{底質}\}) = 0.5 \\ \mu(\{\text{植生カバー}\}) = 0.3 \\ \mu(\{\text{瀬淵距離}\}) = 0.4 \\ \mu(\{\text{底質, 植生カバー}\}) = 0.7 \\ \mu(\{\text{底質, 瀬淵距離}\}) = 0.8 \\ \mu(\{\text{植生カバー, 瀬淵距離}\}) = 0.6 \end{cases}$$

このファジィ測度 μ によって個別の環境要因の評価得点を式③の定義に従って、ショケ積分した値が生息環境の評価得点となる。個別の環境要因の評価得点は、河川全体あるいは特定の区間において、観測された環境因子の分布と選好曲線との適合度、つまり重なり合っている割合を得点化したものとする。選好曲線がない場合には、魚類生態図鑑などにもとづいてカテゴリー分類し得点化してもよい。

カワムツの生息環境を評価する場合を例にとり以下に説明する。このとき底質についてのみ選好曲線が得られていて、植生カバーと瀬淵距離については魚類生態図鑑などから判断する場合であると過程する。

図-4に示すように、底質の選好曲線と観測区間の底質調査結果の適合度が50%であったとき、得点は10点満点で5点であるとする。

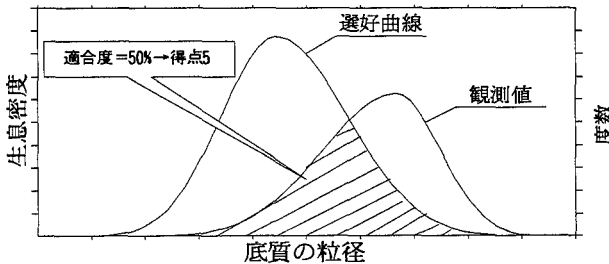


図-4. 底質の選好曲線と観測値の重ね合わせによる評価得点の算定

また、植生カバーと瀬淵距離を表-5のようにカテゴライズする。カワムツの生活行動の特徴は、木に覆われ瀬と淵が細かく明瞭に分かれるような環境を好み、落下昆虫が主食である。したがって、観測区間の植生カバー率が7.2%、瀬淵距離が230mであると得点はそれぞれ7と3である。つまり、各環境因子の評価得点は、

$$\textcircled{9} \quad \begin{cases} f(\text{底質}) = 5 \\ f(\text{植生カバー}) = 7 \\ f(\text{瀬淵距離}) = 3 \end{cases}$$

である。ショケ積分を行うと、

$$\textcircled{10} \quad (c) \int f d\mu = 1.0(3-0) + 0.7(5-3) + 0.3(7-5) = 5.0$$

したがって、観測された区間におけるカワムツの総合評価値は10点満点で5.0点であるということが出来る。この評価方法は河川環境の客観的な指標となる。たとえば、河川の全体あるいは特定の区間において、

代表魚種すべての評価得点を6.0以上にすることを目標に、河川改修を行う場合とか、どの河川あるいはどの区間が魚類にとって好適な空間であるかを比較する場合などである。

表-5. 植生カバーと瀬淵距離の階級別得点表

植生カバー (%)	瀬淵距離 (m)	得点
0.0~1.0	400~	0
1.0~2.0	300~400	1
2.0~3.0	250~300	2
3.0~4.0	200~250	3
4.0~5.0	160~200	4
5.0~6.0	120~160	5
6.0~7.0	80~120	6
7.0~8.0	50~80	7
8.0~9.0	20~50	8
9.0~10.0	10~20	9
10.0~	0~10	10

今回提案した2つの手法は主成分分析の結果が現実の魚類生態をよく表現していることを前提としている。したがって、他の魚種にも主成分分析が適用できるかどうかをもっと検証する必要があるが、多数の魚種について、影響が大きい環境因子とその重みを事前に調査しておけば、対象とする河川で、実際に魚類調査を行わなくても生息環境の評価が可能である。環境因子とその重み、すなわちファジィ測度と得点は魚類の専門家によって設定されてもよい。

5. 結論

愛知県乙川で観測された魚類の生態調査結果をもとに生息環境について、解析と考察を行い新たな評価方法を提案した。結論は以下の3点に要約できる。

1. オイカワ、カワムツ、カワヨシノボリの代表3魚種について、主成分分析によって生息量に影響の大きい環境因子の抽出を季節別に行った。実際の生活行動と比較することによって、分析結果の妥当性を確かめた。
2. 現在よく用いられている魚類の生息量予測方法であるIFIMの欠点を改良した新しい生息量予測方法を提案した。この予測モデルは、主成分分析の結果から抽出された生息に関与する環境要因とその影響度合いを取り入れている。
3. 魚類群集の曖昧さを考慮した総合的な生息環境評価方法をファジィ理論にもとづいて提案した。この評価方法を用いると河川全体あるいは特定の区間の環境管理計画に役立つと考えられる。

謝辞

乙川の生態調査結果を快くご提供くださった愛知県河川課と岡崎土木事務所のみなさまに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) John M. Nestler, Robert T. Milhous, and James B. Layzer(1989): Instream Habitat Modeling Techniques, James A. Gore and Geoffrey E. Petts editors, Alternative in Regulated River Management, CRC Press, Boca Raton, Florida
- 2) 小林四郎(1995): 生物群集の多変量解析, 蒼樹書房
- 3) 益田一, 小林安雄(1994): 日本産魚類生態図鑑, 東海大学出版会
- 4) 小寺平治(1995): 入門ファジィ数学, 遊星社
- 5) 日本ファジィ学会編(1993): ファジィ測度, 日刊工業新聞社
- 6) 片野修(1995): 新動物生態学入門—多様性のエコロジー, 中公新書
- 7) 川那部浩哉(1996): 曖昧の生態学, 農文協