

### 1. はじめに

近年、河川の改修を行う際に、その事業が生態系に与える影響を考慮することが必須事項となっている。土木的視点からは、改修による物理環境の変化により、生息場がどのように変化するかを予測する PHABSIM などが用いられている。しかし、PHABSIM は微視的環境を対象としているため、調査の不安定性が高く、また汎用性の高いものを作ることが課題となっている。そこで、本研究においては、調査をよりマクロな視点で行い、さらに景観に関する指標を用いることによりこの問題に対処することを目的とするものである。

### 2. 調査対象

調査対象箇所として名古屋周辺を流れる中小河川から山崎川、扇川、天白川、香流川の4河川にあわせて18箇所の調査地点を設定した。対象地点の内訳は山崎川4箇所、扇川3箇所、天白川4箇所、香流川7箇所である。また、地点内でも物理環境が大きく変わる場所があり、分割が可能な場合はさらに細かいエリアに分割している。分割したエリアを含めた調査地点の総数は28地点である。

### 3. 景観解析

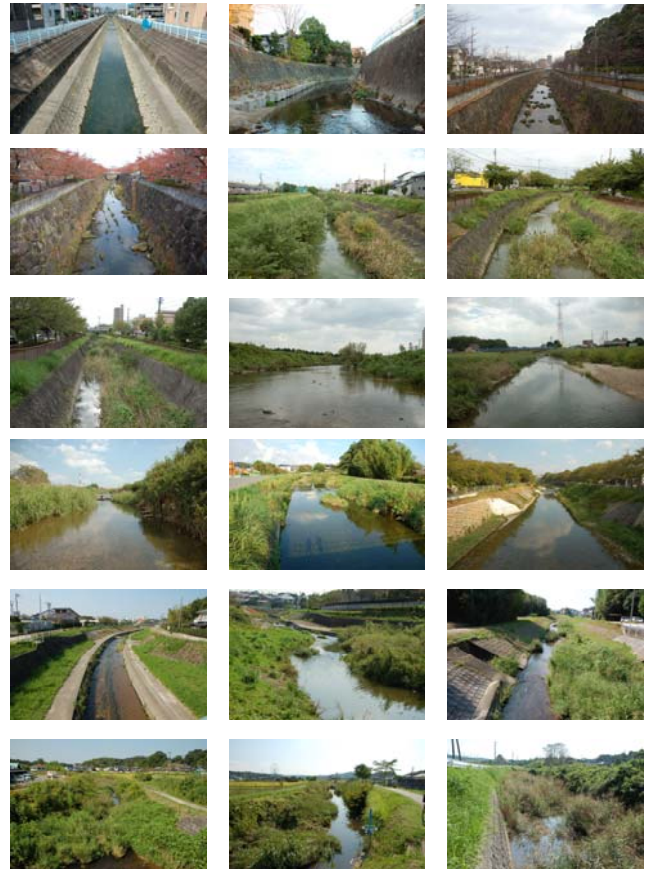
景観に関する指標として、フラクタル次元、フラクタルリティー、緑視率、水面率を算出した。フラクタル次元は街路設計などに用いられる、景観の複雑さを表す指標である。フラクタル次元の算出にはボックスカウント法を用いている。対象画像を格子状に分割し、エッジの含まれるボックスをカウントすることによりフラクタル次元を算出する。含まれるエッジの数は設定する格子の影響を受けるため、格子数の違う複数の分割を行ったものをプロットした直線の勾配をフラクタル次元  $D_0$  (ボックスカウント次元) とする。画像を覆う格子の一辺の長さを  $\gamma$  とし、エッジを含む格子の数を  $M(\gamma)$  とすると以下の式で表される。

$$D_0 = \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log M(\gamma)}{\log(1/\gamma)} \quad (1)$$

また、フラクタルリティーは  $M(\gamma)$  と  $(1/\gamma)$  との相関係数であり、景観のフラクタル性を示す。

解析に用いる画像はデジタルカメラを用いて撮影した画像であり、橋等から河川を流れの軸に沿って見通す方向に撮影したものである。解析に用いた画像を写真-1に示している。

画像解析の際にエッジ抽出の必要があるが、ここではのグレースケール画像の輝度の勾配をエッジとして検出する Sobel フィルタを用いて、エッジ画像を作成した。Sobel フィルタは標準的な  $3 \times 3$  のアパーチャサイズを用い、 $xy$  それぞれの方向に2回ずつエッジ抽出処理を実行している。



上段左から順に、

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| 1: 山崎川 st.1,  | 2: 山崎川 st.2,  | 3: 山崎川 st.3,  |
| 4: 山崎川 st.4,  | 5: 扇川 st.2,   | 6: 扇川 st.3,   |
| 7: 扇川 st.4,   | 8: 天白川 st.1,  | 9: 天白川 st.2,  |
| 10: 天白川 st.3, | 11: 天白川 st.4, | 12: 香流川 st.1, |
| 13: 香流川 st.2, | 14: 香流川 st.3, | 15: 香流川 st.4, |
| 16: 香流川 st.5, | 17: 香流川 st.6, | 18: 香流川 st.7  |

写真-1: 調査地点の解析画像

算出されたボックスカウント次元とフラクタルリティーの関係を図示したものが図-1である(図中の Group は後述するクラスター分析の結果である)。各地点ともフラクタルリティーは非常に高い値をとっている。しかし、扇川 st.2 と天白川 st.1 は他の地点に比べ相対的に低いフラクタルリティーとなった。フラクタル次元は香流川の上流部の調査点(st.4~st.7)で1.86付近の値、山崎川が st.4 を除いて1.74程度、天白川が st.2, st.3 で低く1.65程度の値をとっている。

解析の結果を群平均法、ユークリッド平方距離を用いてクラスター分析を行ったところ、図-1のように4つのクラスターが検出された。フラクタルリティーが小さい値をとっていた扇川 st.2 と天白川 st.1 はフラクタル次元の近いクラスターに分類されているが、フラクタルリティーの差が非常に小さいため今回はフラクタルリティーにはほとんど差がなかったものとみなし、この分類を採用する。

検出されたクラスターの特徴をみると、例外はあるも

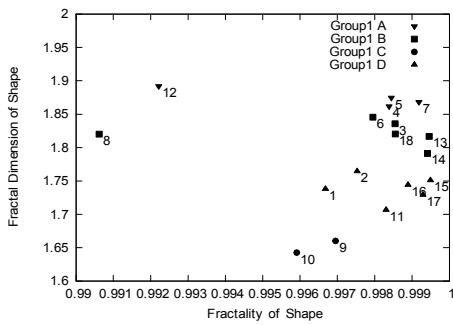


図-1 フラクタル解析結果

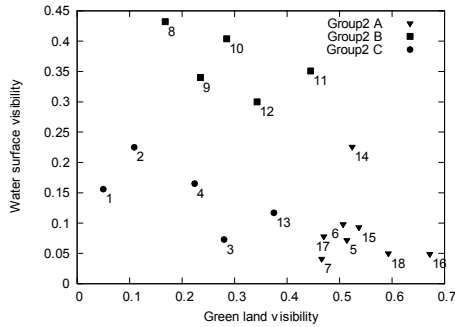


図-2 緑視率、水面率のプロット

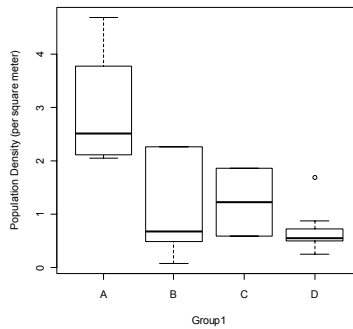


図-3 Group1と生息密度の関係

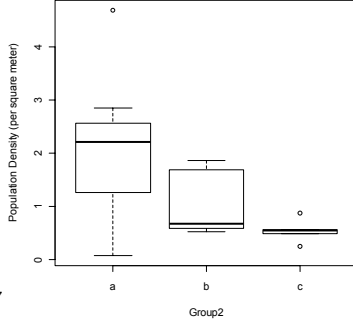


図-4 Group2と生息密度の関係

表-1 魚類調査結果

| 種名        | 採捕地点数 | 採捕数[尾] |
|-----------|-------|--------|
| オイカワ      | 19    | 807    |
| ヨシノボリ     | 20    | 458    |
| ヌマムツ      | 5     | 103    |
| カマツカ      | 11    | 67     |
| カダヤシ      | 8     | 64     |
| モツゴ       | 10    | 59     |
| ドジョウ      | 11    | 59     |
| フナ類       | 8     | 47     |
| ウキゴリ      | 10    | 43     |
| タモロコ      | 11    | 43     |
| スミウキゴリ    | 9     | 42     |
| コイ        | 10    | 32     |
| スジシマドジョウ  | 5     | 24     |
| ハゼ類       | 1     | 20     |
| ブルーギル     | 6     | 13     |
| ヌマチチブ     | 2     | 12     |
| ウナギ       | 4     | 10     |
| カワアナゴ     | 4     | 8      |
| ナマズ       | 2     | 3      |
| タイリクバラタナゴ | 1     | 2      |
| ブラックバス    | 2     | 2      |
| アユ        | 1     | 1      |
| メダカ       | 1     | 1      |

ののおおむね以下のような特徴が当てはまる。Group1 A: 河道内に植生が繁茂し、水面が見えにくい状態となっている。Group1 B: 水面は見えるが、河岸にはある程度の植生がある。ただし、コンクリート護岸が見えるものも多い。Group1 C: 水面が開けており、河岸には植生がある。中流部景観に近い。Group1 D: コンクリート護岸が目立つものが多く、都市的景観である。

次に、緑視率と水面率による景観の分類を試みる。フラクタル解析で用いた画像と同様の画像をもちいて、画像中に緑の占める割合を求めたものが緑視率、水面の占める割合を求めたものが水面率である。それぞれを計測した結果を縦軸に水面率、横軸に緑視率をとって図示したものが図-2である。

植生の繁茂が著しいものが右下、水面の開けた中流部的景観のものがグラフ上方、都市的景観のものが左下に分布している。ここではそれぞれ順に Group2 A, Group2 B, Group2 C と呼ぶこととする。

#### 4. 現地調査

魚類の生息環境把握のために、生息状況調査と物理環境調査を行っている。生息状況調査は電気ショッカーを用い、立網で仕切った調査区間に3回ずつ採捕を行った。採捕した魚類はその場で種類の同定と全長の計測をして、速やかに放流した。生息状況調査の結果を表-1に示した。合計で23種1902尾の魚類が採捕された。

物理指標については表-2に示す項目について測定した。流速、水深は調査区間内に周辺物理指標を代表していると思われる点を3点から8点程度設定し、これらの点の計測値の平均をとった。流速・水深変異については先ほどの測定点の計測値の標準偏差を取ったものである。カバー割合、河床材料は目視による。浮石率は調査区間

に流下方向3mの測線を設け、この測線の両側10cmに存在する直径5cm程度以上の石について、棒で突いて簡単に動くものを浮石として定義して調査した。礫数は沈み石も含めた長径5cm以上の石の総数である。植生カバーについては植生の作るカバーの奥行きの高さによって、カバーなし(C0)、カバーあり-深さ50cm未満(C1)、カバーあり-深さ50cm以上(C2)の3段階に分けて調査を行った。巨石については、なし(S0)、あり(S1)の2段階の評価をしている。

#### 5. 景観グループと生息密度の関係

景観指標に基づいて分類した Group1 と Group2 の区分と全魚種を合計した生息密度との関係を図示したものが図-3、図-4である。どちらの分類においても緑量の多かった Group A の生息密度が高いことがわかる。次に、水面の開けている Group1 C, Group2 B の生息密度が高い。Group1 B はばらつきが大きく、最大値は Group1 D よりも大きい中央値はほぼ変わらない値となった。各群に差があるかを Kruskal-Wallis 検定により検定すると、群間の差は有意とはならなかった。しかし、Group A が他と比べて高いなど傾向的な差は認められるといえる。

グループを規定する要因を計測した物理指標で区分可能か検討するため、物理指標との相関関係を見るとカバーが景観グループに影響を与えていることがわかった。この観点から Group1 B の生息密度について考察すると、Group1 B のうち生息密度が高いものは、河道内に植生が

表-2 物理指標の調査項目

| 調査項目 | カバー割合              | 河幅水深比                    |
|------|--------------------|--------------------------|
| 流速   | 植生カバー (C0, C1, C2) | 礫数                       |
| 水深   | 巨石カバー (S0, S1)     | 河床材料                     |
| 流速変異 | 浮石率                | (シルトM、砂礫S、中礫MG、大礫LG、岩盤R) |
| 水深変異 |                    |                          |

表-3 採用モデルの説明変数と符号

|       | 平均流速 | 平均水深 | 流速変異 | 水深変異 | 浮石率 | 礫数 | 河床材料 | 植生カバー | 巨石カバー | 河幅水深比 | Group1 | Group2 | 交互作用 |
|-------|------|------|------|------|-----|----|------|-------|-------|-------|--------|--------|------|
| 全魚種   | +    | -    | +    | -    | +   | +  |      | △     | -     | -     |        |        |      |
| オイカワ  | +    | +    | -    | -    | -   | +  | ○    |       |       | -     | ○      |        | v    |
| ヨシノボリ |      | -    | +    |      |     | +  |      |       |       | +     |        | ○      |      |
| タモロコ  | +    |      |      |      |     |    | ○    | +     |       |       |        |        |      |
| モツゴ   | -    |      |      | -    | +   | -  |      | △     |       | -     |        |        |      |
| カマツカ  |      | +    |      |      | -   | +  |      |       | -     | +     | ○      |        | h    |
| ドジョウ  | +    | -    |      |      |     |    | ○    | +     |       | +     | ○      |        | v    |

「○」は採用されたことを示す。植生カバーの「△」は方向性が決まっておらず、C1のみに忌避性がみられた。v,hは流速、水深の交互作用である。

あり、水際と接している。しかし、低いものはコンクリート護岸となっているため、植生が河川内に与えるカバーの影響が小さかったためと考えられる。

## 6. 適性曲線

現地調査の結果から、生息状況の予測モデルを作成する。モデルには一般化線形モデル (GLM) を用いた。GLM は線形回帰を拡張したものであり、応答変数の確率分布として正規分布以外の分布を扱うことが可能である。モデルの基礎式を式 (2) に示す。

$$y = \exp(\beta_0 + \beta_i \cdot x_i + \text{offset}(\log(a_i))) \quad (2)$$

生息面積を offset 項として扱い、応答変数を生息数  $y$  としている。リンク関数として loglink を用い、応答変数の確率分布にはポアソン分布および負の二項分布を検討した。これは応答変数がカウントデータであるためである。モデルの選択は AIC を基準として選択を行った。説明変数には物理指標の調査項目と景観グループを用いている。ただし、景観グループとカバーには高い相関が見られたため、同時には説明変数として組み込まないものとした。これは説明変数間に高い相関をもつ変数が含まれていると回帰係数の値や符号が信頼できないものになる可能性があるためである。この問題は多重共線性と呼ばれる。そこで、初期投入変数の組み合わせを model A : 景観グループを説明変数としないモデル, model B: Group1 を説明変数とするモデル, model C : Group2 を説明変数とするモデルの 3 通り設定した。3 通りのモデルそれぞれで AIC による変数選択を行い、最適モデルを求めている。また、説明変数にはカバーと景観グループのほかにも相関の高い変数の組み合わせが存在した。カバー割合は植生や巨石カバーとの相関が高いために、今回のモデル選択ではカバー割合は投入候補変数から除外した。流速と流速変異にも相関が見られたが、これについては、変数選択前の段階で除外はせず、変数選択を行ってから採否を検討する。最終的に選択されたモデルにおいて VIF (分散拡大要因) によって、多重共線性の有無の確認を行ない、採用モデルを確定している。

モデル作成は全魚種の合計のほか、採捕地点数の多かったオイカワ、ヨシノボリ、タモロコ、モツゴ、カマツカ、ドジョウについて行った。各魚種において採用された、AIC 最小モデルの説明変数とその符号をまとめたものが表-3 である。表中の「+,-」は係数の正負を示す。交互作用については、魚類において流速や水深では選好の方向が値によって変化する場合があるためそれに対応するためのものである。生息密度との関係をプロットし、

| 変数名     | 係数    |
|---------|-------|
| 平均水深    | 2.42  |
| 河床材料M   | 1.55  |
| 河床材料MG  | 0.69  |
| 河床材料R   | 4.06  |
| 河床材料S   | 1.30  |
| 流速変異    | -5.00 |
| 水深変異    | -3.67 |
| 礫数      | 0.03  |
| group1b | -2.36 |
| group1c | -0.68 |
| group1d | -1.94 |
| 切片      | -0.76 |

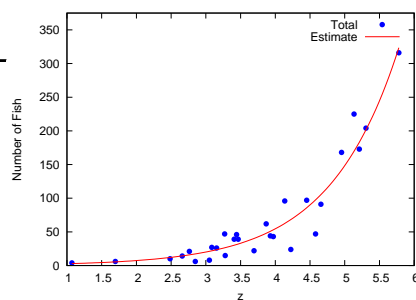


図-5 回帰結果

選好が変化していると思われる値に対応してカテゴリーを設定し、流速または水深との積を交互作用として取り込んでいる。これにより、ある程度選好の変化を表現することができる。また、全魚種の合計生息密度についての回帰結果をプロットしたものが図-5 である。

表-3 より、ヨシノボリとタモロコでは流速が正の要因として働いていることがわかる。ヨシノボリでは流速そのものではなく流速変異であるが、今回の観測データでは流速と流速変異の相関が強かったため、ほぼ同じように扱うことができるとみなしている。ドジョウは河床材料のシルト、カバーに選好が表れている。オイカワは河床材料の砂に適性が見られた。また、モツゴは流速の遅いところを好むことが表れている。オイカワ、カマツカ、ドジョウにおいては Group1 が、ヨシノボリで Group2 が採用モデルの変数となっているため、景観グループを説明変数に加えることにより、モデルを向上させることができる可能性のあることがわかった。

次に魚種ごとに model A から C の採用モデルを比較することにより、対象魚類の景観に対する選好性を検討する。景観グループの区分間において、対象魚類の出現率がどの程度違うかを表したものが表-4 である。これは、相対リスクと呼ばれるものに相当し、表-4 の値は Group1 では D に対する各区分の出現率の比、Group2 では C に対する比である。たとえば Group D に対する Group A の出現率の比は以下の式 (3) により計算される。

$$P_A / P_D = (\hat{y}_A / \hat{y}_D) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_i \cdot x_i + \beta_A \cdot \text{GroupA})}{\exp(\beta_0 + \beta_i \cdot x_i + \beta_D \cdot \text{GroupD})} = \exp(\beta_A - \beta_D) \quad (3)$$

表-4 景観グループの選好特性

|       | Group1    |      |           | Group2    |           |
|-------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|
|       | A         | B    | C         | A         | B         |
| 全魚種   | 6.76      | 1.55 | 1.33      | 6.41      | 2.1       |
| オイカワ  | 10 $\geq$ | 1.23 | 10 $\geq$ | 10 $\geq$ | 4.59      |
| ヨシノボリ | ( 3.02    | 0.45 | 0.64 ) *  | 9.15      | 3.13      |
| タモロコ  | ( 3.48    | 0.26 | 5.89 ) *  | 1.66      | 10 $\geq$ |
| モツゴ   | 10 $\geq$ | 0.42 | 0         | 1.67      | 0         |
| カマツカ  | 10 $\geq$ | 2.66 | 1.71      | 10 $\geq$ | 0.46      |
| ドジョウ  | 0.12      | 0    | 0.04      | 2.53      | 0.07      |

\*変数選択ではGroupが採択されなかったが、参考のためエリア別データの値を記載

表-4より、オイカワは植生被度の高い景観と開けた景観を好んでいる。これはカバーとの関連が強いことを示すとともに、本種が中流部に多いことを表している。また、ヨシノボリは植生被度の高い景観を好んでいる。ヨシノボリは中流部でもよく見られる魚であるため、開けた景観への適性が Group A に比べてあまり高くないことが意外に思われるかもしれないが、本調査においてヨシノボリをヨシノボリ類として種の区別を行っていないことに起因すると思われる。中流部でよく見られるのはトヨシノボリであり、本調査では比較的上流部を生息域とするカワヨシノボリなどが多数採捕されているためである。このほか、タモロコは開けた景観を好むが、モツゴは忌避している傾向にある。ドジョウは Group1D の適性が最も高いという結果になっている。しかし、ドジョウは採捕エリアでみると扇川で採捕されていないことを除けば比較的どの景観グループのエリアでも採捕されており、河床やカバーの条件がそろえば景観への適応力が高い種とも考えられる。

### 7. 生息環境の解析

ここまで地点ごとの写真より解析した景観について、景観との生息密度の関連を検討したが、さらに小さいスケールの景観として瀬・淵構造がある。瀬淵構造について、水理計算によって検討する。また、マクロなデータから作成した適性曲線を地点内の水理量分布という微視的なデータに適用して妥当な分布が得られているかどうかについても確認する。水理計算は今回調査を行った地点の一部に対して、測量調査を行った河床形状をもとに解析を行う。なお、水理計算には二次元浅水流モデルを用いている。

ここでは特に香流川 st.5 の調査データについて紹介する。香流川 st.5 は今回の調査地点の中で最も瀬淵が明確であった地点である。

縦断方向 2m 横断方向 0.5m 間隔の測量調査によって得た、断面データを基に、2次元浅水流モデルを用いて水理計算を行う。計算された水理量から河床材料を推定する。河床材料は無次元掃流力に対応する河床材料が分布しているものと仮定した。単一粒径の場合、無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  は  $\tau_{*c}=0.05$  が用いられるが、今回は混合粒径を考慮して、 $\tau_{*c}=0.03$  とした。このとき、河床材料の最大粒径  $d_{max}$  は式 (4) となる。

$$d_{max} = \frac{n^2 v^2}{0.03 \cdot 1.65} R^{7/4} \quad (4)$$

さらにこれらの値を用いて、瀬淵の分布の推定を行った。瀬を波立つエリアと定義し、岩本ら<sup>1)</sup>の研究に基づいて、以下の Airy 条件によって水面の波立ちを判定した。

$$Fr = \sqrt{\tanh kh / kh} = h / d_{max} \quad (5)$$

式(5)を満たす  $Fr$  以上のとき、水面に波立ちが発生するものとする。ここで  $k$  は波数であり、 $k=2\pi/L$  である。波の波長  $L=10\text{cm}$  とした。淵については  $Fr=0.2$  以下かつ水

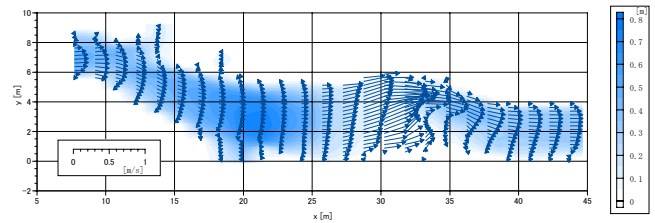


図-6 水深・流速分布

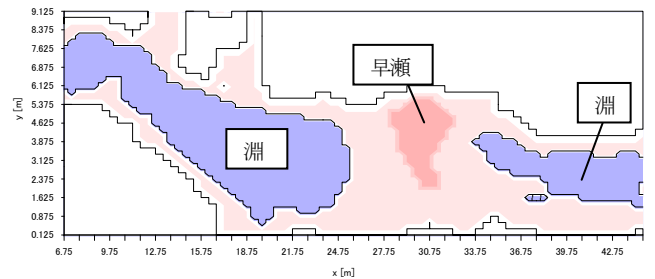


図-7 瀬淵分類結果

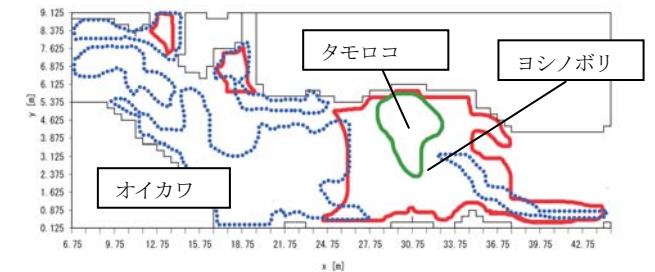


図-8 適性領域の分布

深 30cm 以上の領域を淵と定義した。これらの条件のもと現地物理環境の計算を行ったものが図-6、図-7 である。上流部に淵が存在し、下流部に早瀬、その下に淵が形成されていることがわかる。

主な魚種について適性曲線による評価を行い、適性の高かったエリアをまとめて図示したものが、図-8 である。種によって、適性領域の違いが現れており、オイカワは淵部分に、タモロコ、ヨシノボリは早瀬付近に分布していることがわかる。このほか、カマツカは淵部分、ドジョウは水深の浅い部分に分布する結果となった。これは現地調査の状況ともおおむね一致した。全体として瀬、淵の分布と対応した位置に適性をもつ魚種が多く、瀬淵の重要性を確認することができる。

### 8. おわりに

今回の調査により、景観指標を取り入れることによって、モデルを向上させられる可能性が示された。また、その特性より、河川整備においてはカバーとの関係を重視しながら、フラクタル次元が高くなるように整備することが望ましいと考えられた。マクロなデータから作成した適性曲線によって魚類の微視的な分布を表現することについても、今回の結果からある程度可能であることがわかった。

### 参考文献

- 1) 岩本秀仁, 知花武佳, 辻本哲郎: 早瀬の波立ちに着目した環境特性の把握, 河川技術論文集(2005)