

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

関根雅彦*・浮田正夫**・中西 弘**・
内田唯史***

河川開発による生態系への影響の定量評価を目的として、タナゴの環境に対する選好性を実験に基づいて定式化し、生態系モデリングツール SSEM によりモデル化した。定式化にあたっては、(1) 新たな環境因子を追加しても既存の選好強度式や因子ウェイトを変更する必要がない、(2) 選好強度式と因子ウェイトを個々に定めることができる、という優れた特徴を持つ正規化因子ウェイトを用いた乗法形選好強度式を提案した。本研究により短期的な魚の行動のモデル化手法を提示した。

Key Words : fish, ecological model, environment preference, river environment management

1. 序 論

著者らは浅海域における開発行為が生態系、特に魚を中心とした高次栄養段階生物に与える影響を評価することを目的とした生態系モデリングツール SSEM(Shallow Sea Ecological Model)を開発してきた。文献¹⁾では室内における養殖実験のモデル化を通じて SSEM の生理に関するモデル式の妥当性を、また長崎県平戸島の志々伎湾におけるマダイ稚魚の行動のモデル化を通じて環境に対する選好性(以下、単に選好性と呼ぶ)に関するモデル式の妥当性を検討した。また文献²⁾では山口県大海洋における埋め立てにともなうアサリの漁獲量変化を SSEM により解析した。文献³⁾では農薬による魚大量死亡事故の解析に SSEM を応用し、その柔軟な適用性を示した。

SSEM の大きな特徴として、環境変化による魚の逃避など、魚の選好性に基づく挙動が表現できることが挙げられる。文献¹⁾で明らかにしたように、同じ生理パラメータ値であっても選好性による移動の有無により結果として得られる生物量が全く異なっていた。魚は遊泳能力を持ち、自己の選好性に合致した水域に移動できるため、開発行為等による漁獲量や生態系への影響を評価しようとする場合、選好性による移動を正しく評価することが是非とも必要である。

生物の移動を実用的な観点から扱った研究は少ない。やや古い研究であるが、漁獲量管理モデル DYNUMES⁴⁾は大水域での魚の回遊を扱っている。これは差分計算に

おける格子間隔が 100km という大きな水域において、回遊を単純な餌に対する選好性を加味した強制関数として取り扱った生態系モデルであり、種々の環境インパクトの影響評価という SSEM の目的とは異なっている。最近では、ヘラジカの摂食行動を扱ったもの⁵⁾等が見られる程度である。

文献^{1)~3)}でも述べているように、SSEM はオブジェクト指向言語 Smalltalk によって実現されているため、移動の扱いはごく自然である。選好性に関する定式化は SSEM のシステム内部で定義されており、移動する生物は既存の定義を“継承”できるため、個々の魚毎のサブクラスで適切に選好性パラメータを定めてやることにより、どんな魚でも簡単に計算機中で“泳がせる”ことができる。

ただし、現段階で選好性の定式化が確立しているわけではなく、個々の魚についての選好性のパラメータ値が明らかになっているわけでももちろんない。生物の選好性に関しては動物行動学の分野でさまざまな研究^{6)~9)}が行なわれている。また、魚の生理・生態については水産学の分野においてばく大な情報が蓄積^{10),11)}されている。それにもかかわらず、これらの情報は精密すぎるか単純な局面に限定しすぎており、工学的応用という観点からは利用しやすい形にまとめられていない。先の文献¹⁾においても、経験的な魚の行動と合致するような選好性パラメータを任意に定めただけであり、SSEM が魚の移動を適切に表現する力を持っていることを示したにすぎない。

本論文では、SSEM を援用して、選好性に基づく魚の行動の合理的な評価方法を確立することを目標とし、河川における多自然型工法の採用やヨシ原保全の動き^{12),13)}を念頭において、これらの開発あるいは保全行為による魚の生息量や分布の変化を予測する基礎資料とするため、タナゴを用いて魚の選好性を実験的に定式化することを試みた結果について報告する。

* 正会員 工博 山口大学講師 工学部社会建設工学科
(〒755 宇都宮市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科
*** 財団法人 九州環境管理協会 主任研究員

† 「選好」とほぼ反対の意味を持つ言葉として「忌避」があるが、一般にこれらは別々の尺度であると考えられる。しかしながら、本論文ではその原因が「選好」であるか「忌避」であるかには関わりなく、2 つの異なる環境条件のうちより多く選択される条件を「選好性が高い」と表現した。

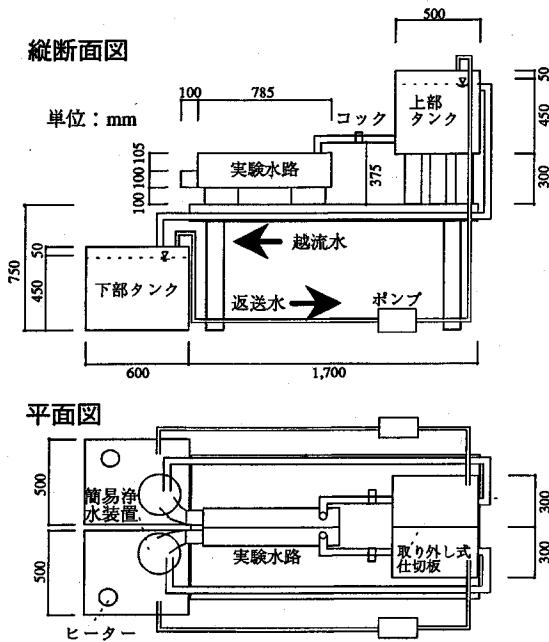


図-1 実験装置

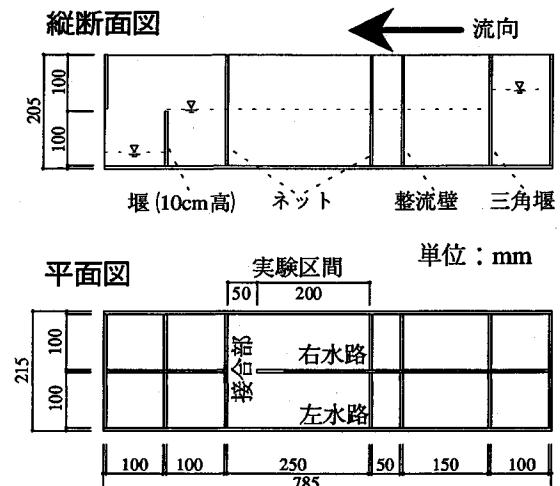


図-2 実験水路

面位置での照度は 360lx であった。この実験区間の左右の環境条件を種々変化させ、魚の左右の存在比率を求めた。使用した魚は、上流でダム建設が予定されており、今後の環境変化が予想される宇都宮市真締川で採取した体長 4 ~ 6cm のアブラボテ（コイ科タナゴ属、以下、単にタナゴと呼ぶ）である。タナゴは実験開始の 2 週間前に約 150 尾採取し、60cm 水槽にて水温 17 ℃で蓄養した。タナゴを水槽で飼育すると弱い個体が攻撃されることがあるが、本実験では高密度飼育のため攻撃行動は観察されなかった。このタナゴはその後 6 カ月に渡って蓄養したが、その間死亡はほとんど見られず、蓄養条件は適切であったと考えられる。

実験開始に先立って、蓄養水槽から実験水路にタナゴを移動させた直後の挙動をビデオ撮影し、約 40 分でタナゴの挙動が安定することを確認した。また、実験装置の片側から約 83 ホン（C 特性）の騒音（ラジオ放送）を与え、音によってはタナゴの分布に特に偏りが生じないことを確認した。分布率の決定にあたっては、タナゴを所定の環境条件に設定した実験水路に移動させてから 40 分後を実験開始とし、タナゴの行動をスチルビデオカメラあるいはビデオカメラで自動撮影し、画像から 1 分毎のタナゴの左右分布を計数して 50 分間の平均分布率を一実験の結果とした。

変化させた環境因子は、流速因子、餌量因子、水温因子、濁度因子、遮蔽因子、鏡因子、生物量因子であり、これらのそれぞれを単独で変化させた単一因子実験およびこれらを組み合わせた複合因子実験、および実河川における水生植物帶を想定した竹棒実験、透明棒実験を実施した。竹棒実験、透明棒実験とは、図-3 に示すヨシの茎を模した装置を水路底面に設置したものである。水生植

実験装置を図-1、図-2 に示す。装置は透明塩化ビニール製で、2 本の水路が平行している。水路中央のネットで仕切られた 25cm の実験区間に魚を所定数（通常 7 尾）を入れる。実験区間の一部で水路が接合されており、魚は左右の水路を自由に往来できる。水路は白色の床面から 10cm 浮かせて設置し、魚が遮蔽物として感じられるものに近づけないように配慮した。また、水路部分を高さ 150cm、底面 60cm × 60cm のフレームで囲い、フレームを灰色の暗幕で覆って視覚的に刺激となるものを極力少なくし、内部を白熱電球 1 灯で照明した。実験水路水

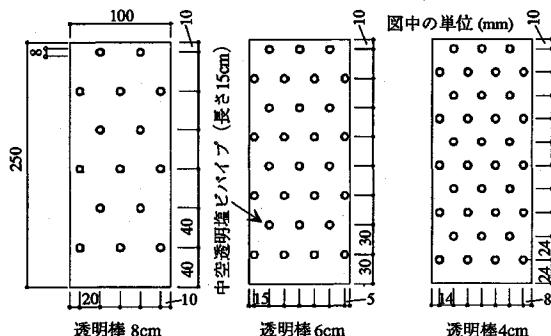


図-3 竹棒実験・透明棒実験で用いた実験装置(平面図)

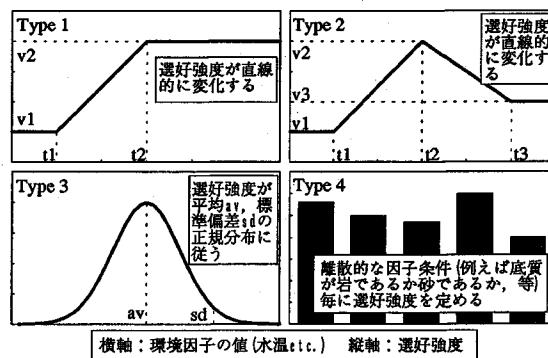


図-5 選好強度式のパターン

物帶は稚魚や小動物の格好の生息場となっている¹⁸⁾が、この理由として、餌量が豊富であること、水生植物の茎により流速が変化に富んでいること、茎による遮蔽効果などが考えられる。本実験では、茎による流速因子への影響と遮蔽因子への影響を分離し、流速因子のみに着目するため透明パイプを使用したものを透明棒実験、透明パイプ内に竹棒を挿入して遮蔽因子を付与したものを竹棒実験とした。餌量因子実験は粉末状のメダカの餌を上部タンクに懸濁させたものである。餌量に対する選好性は急速に減退するため、本実験においてはタナゴを所定条件に暴露してから直ちに実験開始とし、最初の10分間の分布をもって結果とした。濁度因子実験ではカオリンを上部タンクに懸濁させた。餌因子、濁度因子の実験では水路接合部で懸濁物が少量ながら混合されるため、ポンプによる水循環は行わずかけ流しとした。遮蔽因子実験では、接合部を除く水路の上下左右を黒色塩化ビニール薄板で覆ったものを全遮蔽条件、上下のみ覆ったものを上下遮蔽条件、側壁のみ覆ったものを左右遮蔽条件とした。鏡因子実験は、水路側壁の一方、もしくは両方に鏡を貼り付け、水路内の個体数が魚からは多數見えるようにして、群に対する選好性を調べようとしたものである。生物量因子実験は、一方の水路に遮蔽因子実験により選好性が高い事が判明した全遮蔽条件を設定し、どれだけ多数のタナゴを受容できるかを調べる事により環境容量を明らかにしようとしたものである。複合因子実験は、4. で述べるように単一因子毎の選好強度を互いに関連づけるために実施したものである。それぞれの単一因子について左右水路に別々の条件を設定し、選好性が低くなる水路側に選好性が高いことが判明している遮蔽条件を複合させて設定し、遮蔽条件が加わることによる選好性の変化を調べた。

実験条件および結果を図-4に示す。図より、遮蔽因子実験、濁度因子実験など、隠れ場の存在に対する選好性が明確であることが読みとれる。透明棒条件は忌避の傾

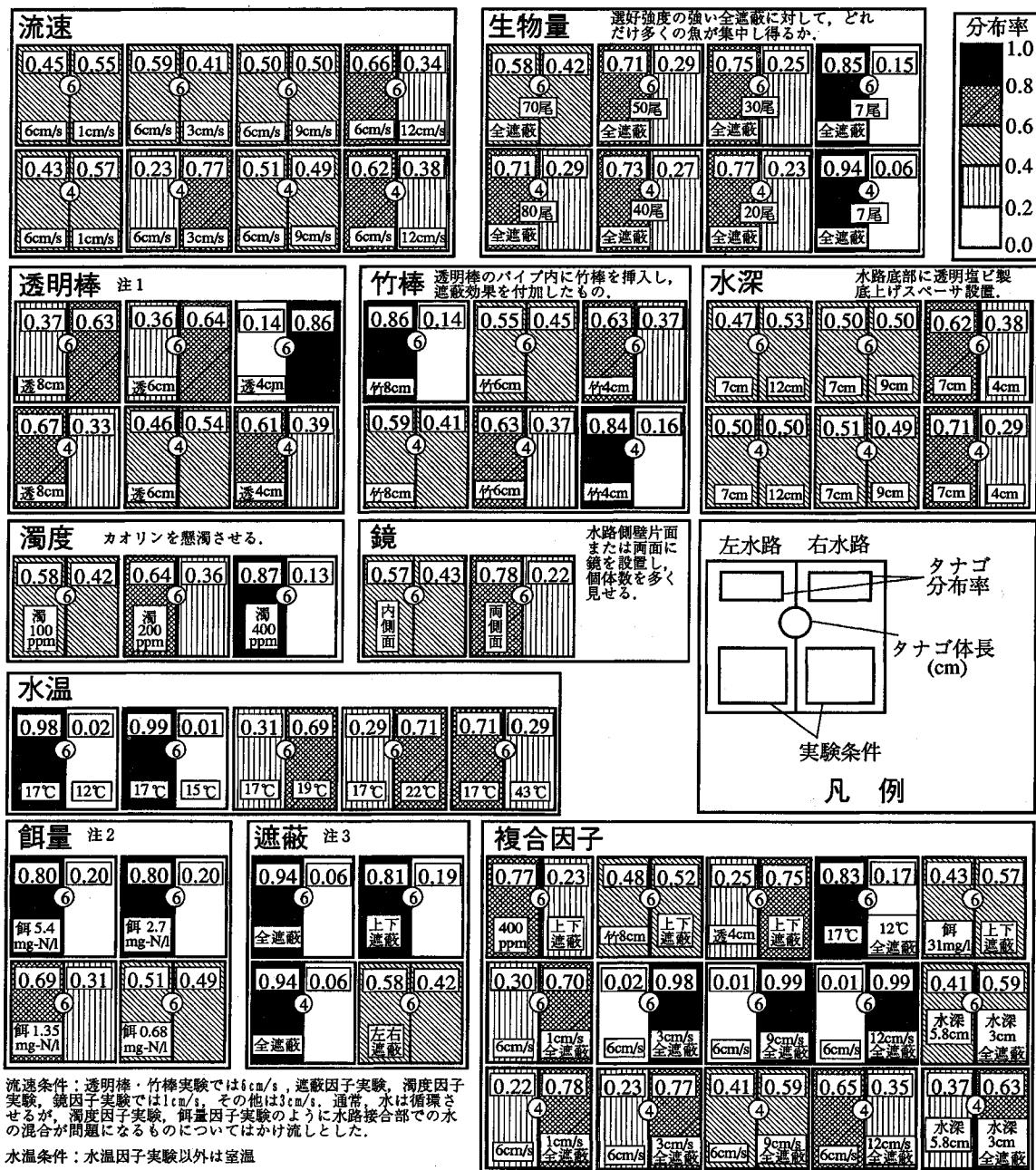
向が見られるのに対し、竹棒条件ではむしろ選好されていることからも、水生植物帯に魚が多く分布する理由の一部は魚が植物の茎を遮蔽物として利用しているためであると理解される。水温因子実験では、低温に対する忌避が強い事が読み取れる。水深因子に関しては、本実験装置の最大水深の制約から十分な情報が得られたとは言えないが、あまり上下に余裕のない水深は忌避されるようである。その他の因子やその複合条件に関してはそれぞれ興味深い結果が得られたが、ここでの目的はタナゴの生態を明らかにすることではないので詳述しない。必要に応じて図-4を参照されたい。

3. 単一の環境因子に対する選好強度の定式化

单一の環境因子の値に対する選好強度の表現には、図-5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), 横軸は環境因子の値である。Type2 は Type1 を包含しているが、環境因子の値に対する選好強度の挙動をわかりやすくするために区別してある。図に示した以外にも様々な選好強度の定式化があり得るが、本研究においては実験精度や実験実施数に対する定式化精度のバランスを考慮し、単純性を重視した式形とした。

本研究では実験水路の魚の左右分布は各水路の選好強度の比によって決定されると考えた。ここで R_j をある環境因子 j についての実験下での左右水路の魚の個体数の比、 $P_{j,i}$ ($i = \{\text{右, 左}\}$) を環境因子 j に対する右、左の選好強度の値であるとすると、

である。 R_j は単一因子実験より得られるので、 P_j のTypeを適切に選定すればそのパラメータ値を定めることができる。なお、式(1)より明らかのように、単一因子を考えた場合 P_j の絶対値には意味はなく、Type1, Type2 にお



流速条件：透明棒・竹棒実験では 6cm/s 、遮蔽因子実験、濁度因子実験、鏡因子実験では 1cm/s 、その他は 3cm/s 。通常、水は循環させるが、濁度因子実験、餌量因子実験のように水路接合部での水の混合が問題になるものについてはかけ流しとした。

水温条件：水温因子実験以外は室温

注1 ヨシの茎を模した外径 8mm の塗ビ透明パイプを千鳥に配置。パイプによる流速低減効果と遮蔽効果を分離するため、透明パイプを使用した。前後列間、左右列間のパイプ中心間の距離は、「 8cm 」では 4cm 、「 6cm 」では 3cm 、「 4cm 」では 2cm 。千鳥配列のため、「 8cm 」、「 6cm 」、「 4cm 」等の数字はパイプ間に体を曲げないで留まることのできる魚のおよその最大体長を示している。

注2 粉末状の餌を懸濁。窒素濃度。餌に対する選好性は急速に減退するため、初期10分間の分布率を表示。

注3 全遮蔽・上下遮蔽・左右遮蔽：それぞれ水路の上下左右、上下のみ、左右のみを水路接合部を除き黒塗ビ板で覆った。

図-4 選好強度実験結果

けるパラメータ値 v_1, v_2 、および Type2 における v_3 は、相互の比率にしか意味はない。通常は v_1, v_2, v_3 のうち最大のものを 1 とするように値を定めれば良い。Type4 における離散的な因子条件毎の選好強度値についても同

様である(図-5参照)。また、4.節で述べる本実験で採用した複合因子実験に対する解析法の制約から、 $P_j > 0$ でなければならない。 P_j は無限に 0 に近付けても良いから、この制限はさほど重大なものではない。

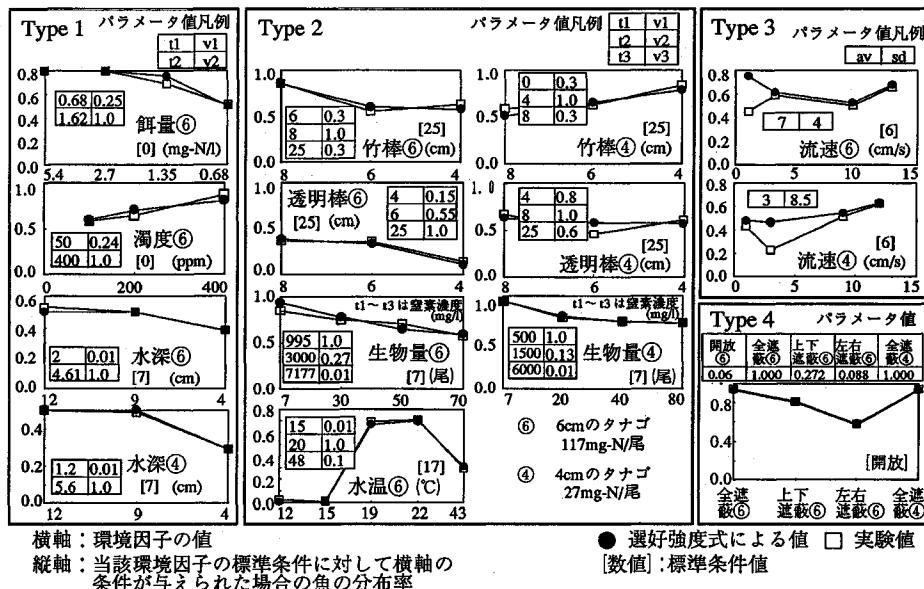


図-6 魚の分布についての実験値と計算値の比較

図-6に実験値と計算値の比較を、計算値を実験値に一致させることにより求めたパラメータ値と共に示す。各環境因子のType(図-5参照)決定にあたっては、一つの環境因子に対する実験数が限られていることから、実験結果を考慮しつつ常識に反しないものを定めた。また、パラメータ値の決定にあたっては、準ニュートン法等の数理計画手法¹⁹⁾を用いたものもあるが、実験数が限られていることやパラメータ数が少ないと等の理由から、実験値と計算値の合致度をグラフ上における目視で判断した場合もある。特に、水深因子実験のように実験装置の制約から十分な条件の変化を与えられなかった場合には、常識に反しないようなパラメータを用いて外挿した。本研究の目的はある特定の年齢のタナゴの生態を精密に求めることではなく、河川における小型魚一般の特性を得ることであるため、このような取り扱いで十分であると判断した。タナゴの生態についてのより精密な議論は専門家に期待したい。なお、鏡因子実験については、興味深い実験結果が得られたものの有効な定式化法を見いだすことができなかつたため、図-6には示していない。また、2節で述べたように竹棒実験、透明棒実験は単一因子実験とは言えないが、ここでは簡単のため棒間隔を因子の値として単一因子と同等に扱った。生物量因子実験の解析には4節で述べる複合因子における解析手法が必要になるが、図-6には生物量因子が遮蔽因子と同等の重みを持つとして解析した結果を掲示してある。

4. 複合した環境因子に対する選好強度の定式化

(1) 加法形の問題点

実際の環境条件は複数の環境因子が複合したものであるから、3節で得られた個々の環境因子に対する選好強度式をなんらかの方法で統合する必要がある。これは多数の因子が関係するいくつかの代替案の順位を求める問題といえる。これについてはさまざまな領域で研究されているが、一般的には総合的な選好強度 P^* を

$$P^* = \sum_{j=1}^J W_j P_j \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

という加法形で表現する場合が多い。ここで、 J はある環境条件を構成する因子の数、 P_j は因子 j についての選好強度、 W_j は因子 j についてのウェイト (以下“因子ウェイト”と呼ぶ) である。

人間の感性に関する計測技術の研究²⁰⁾などが加法形の範疇に入る。文献²¹⁾では加法形におけるあいまい選好判断の問題点を解消するために新たなファジイ項を導入しているが、加法形を基本としている点に変わりはない。土木・建築の分野でも、通勤経路選好特性に関する研究²²⁾などがこのタイプである。デザインの心理評価に関するSD法²³⁾は因子分析の一種であるが、因子分析の根本は因子の線形回帰であるから加法形であるといえる。

この加法形を用いて本複合実験結果を解析することを考える。式(1)にならって $R_{\text{実験条件}}$ をある実験条件に対する左右水路の魚の個体数の比とすると、例えば水温因

子・流速因子についての複合因子実験の場合、

$$R_{\text{水温・流速}} = \frac{W_{\text{水温}} P_{\text{水温, 右}} + W_{\text{流速}} P_{\text{流速, 右}}}{W_{\text{水温}} P_{\text{水温, 左}} + W_{\text{流速}} P_{\text{流速, 左}}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。 $R_{\text{水温・流速}}$ は実験より定まっており、 $P_{j,i}$ ($j = \{\text{水深, 流速}\}$, $i = \{\text{右, 左}\}$) は3.節で求められているから、式(3)より $W_{\text{水温}}/W_{\text{流速}}$ を求めることができる。

一方、水温についての単一因子実験を考えると、

$$R_{\text{水温}} = \frac{P_{\text{水温, 右}}}{P_{\text{水温, 左}}} \dots\dots\dots (4)$$

と表記できる。ここで、水温・流速についての複合因子実験において左水路と右水路の流速が等しい場合を考えると、

$$R_{\text{水温}} = R_{\text{水温・流速}}|_{\text{右流速}=\text{左流速}} \dots\dots\dots (5)$$

とならなければならぬ。すなわち、式(3)と式(4)より

$$\frac{P_{\text{水温, 右}}}{P_{\text{水温, 左}}} = \frac{W_{\text{水温}} P_{\text{水温, 右}} + W_{\text{流速}} P_{\text{流速, 右}}}{W_{\text{水温}} P_{\text{水温, 左}} + W_{\text{流速}} P_{\text{流速, 左}}} \Big|_{\text{右流速}=\text{左流速}} \dots\dots\dots (6)$$

ところが一般に、

$$P_{\text{流速, 右}} = P_{\text{流速, 左}} \neq 0 \Big|_{\text{右流速}=\text{左流速}} \dots\dots\dots (7)$$

であるから、式(6)は通常成立しない。このことは、加法形では単一因子実験で求めた選好強度式を複合因子実験に適用できず、すべての j に対する W_j と P_j を一組の値として同時に定めなければならないことを意味している。このことは同時に、新たな環境因子 j をつけ加えた場合には、すべての W_j や P_j を変更しなければならないことをも意味している。

生物は極めて多くの環境因子の影響を受けていると考えられるが、研究の目的に応じて少数の環境因子だけに注目することが通例である。このような場合にも、加法形であれば判明している環境因子すべてを考慮しなければならない。本実験を例に取れば、流速だけを変化させた実験の解析に水温や餌量まで含めた式を用いなければならないのである。さらに実際には、あらたな環境因子 j が加わることも十分考えられる。たとえばある魚についてこれまで考えられていなかった微量化学物質がその挙動に大きな影響を及ぼすことが判明した場合などである。このような場合には、それまで求められていたパラメータ値を放棄しなければならない。このように考えると、加法形は本実験結果の解析の上でも、また式の発展性・応用性という意味でも、極めて都合が悪い。以上の考察より、加法形は本実験の解析には不適切であることが理解される。

(2) その他の手法の問題点

多数の因子が関係するいくつかの代替案の順位を求める問題に対する別のアプローチとして、初期の SSEM¹⁾ でも採用していた多基準分析²⁴⁾がある。これは政策決定時の代替案の優劣を評価することを目的として開発されたもので、因子が比尺度、間隔尺度、順序尺度のいずれ

のデータであってもおかまいなく一つの配列として表現し、因子間のウェイトを適切に設定することによって代替案の順位付けを行うものである。入力データとして順序尺度を許していることから、魚の底質に対する選好性など、はっきりした比例関係が定めにくい生物の選好性を取り扱うには適していると考えられた。しかし、順序尺度を許していることはすなわち評価結果も順序尺度にしか過ぎないことを意味しており²⁵⁾、本研究のように複合した環境因子に対する選好強度が計量データとして得られる実験の解析には適していない。

最近ではエキスパートシステムを用いた方法²⁶⁾等もあるが、本研究ではモデル全体の精度に比して選好強度判断部が複雑になり過ぎるとの判断から利用の検討はしていない。

(3) 乗法形の検討とその問題点

次に、あまり例を見ないが、個々の選好強度式を乗法形で結合する方法を検討した。例えば、式(2)にならって記すと、

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{W_j} \dots\dots\dots (8)$$

のように表現する。これを加法形と同様に水温・流速についての複合因子実験を例にとって検討すると、

$$R_{\text{水温・流速}} = \frac{(P_{\text{水温, 右}})^{W_{\text{水温}}} (P_{\text{流速, 右}})^{W_{\text{流速}}}}{(P_{\text{水温, 左}})^{W_{\text{水温}}} (P_{\text{流速, 左}})^{W_{\text{流速}}}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここで

$$P_{\text{流速, 右}} = P_{\text{流速, 左}} \neq 0 \dots\dots\dots (10)$$

の場合を考えると、式(9)は

$$R_{\text{水温・流速}} = \frac{(P_{\text{水温, 右}})^{W_{\text{水温}}}}{(P_{\text{水温, 左}})^{W_{\text{水温}}}} \dots\dots\dots (11)$$

となって流速項が消える。このことは、もしある因子の値が左右水路で同じ値を取るならばその因子は R^* の算定に影響しなくなるため、影響因子を自由に加除できるということを意味しており、加法形に比べて極めて都合が良い。

ところが一方では、一般に

$$\frac{P_{\text{水温, 右}}}{P_{\text{水温, 左}}} \neq \frac{(P_{\text{水温, 右}})^{W_{\text{水温}}}}{(P_{\text{水温, 左}})^{W_{\text{水温}}}} \dots\dots\dots (12)$$

であるから、乗法形でも W_j と P_j を分離して考えることはできず、単一因子の場合でもウェイト W_j を式中に含めておかなければならぬ。単一因子実験から P_j と W_j を独立に定めることは不可能であり、乗法形においてもパラメータ値の決定が難しい事になる。

(4) 正規化因子ウェイトを導入した乗法形の提案

ここで、代替案 (i) 間で選好強度に違いが存在する因子に対するウェイトのうち最大値をとるウェイト W_{max} を導入し、これを用いて因子ウェイトを正規化した次式を提案する。

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{\frac{W_j}{W_{max}}} \dots \dots \dots \quad (13-a)$$

$$W_{max} = \begin{cases} \max_{j \in V}(W_j) & V \neq \phi \\ \infty & V = \phi \end{cases} \dots \dots \dots \quad (13-b)$$

$$V = \{j | (\exists i, i')(P_{j,i} \neq P_{j,i'})\} \dots \dots \dots \quad (13-c)$$

ここに, ϕ は空集合であり, \exists は存在記号である。式(13-c)は V の定義式であり, V は少なくとも一組の代替案(水域)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

$$D_i = \frac{\prod_{j=1}^J (P_{j,i})^{\frac{W_j}{W_{max}}}}{\sum_{i=1}^J \left\{ \prod_{j=1}^J (P_{j,i})^{\frac{W_j}{W_{max}}} \right\}} \dots \dots \dots \quad (14)$$

となる。

式(13-a)を用いて水温・流速についての複合因子実験の場合を説明しよう。式(9)にならって記すと,

$$R_{\text{水温}\cdot\text{流速}} = \frac{(P_{\text{水温}, \text{右}})^{\frac{W_{\text{水温}}}{W_{max}}} (P_{\text{流速}, \text{右}})^{\frac{W_{\text{流速}}}{W_{max}}}}{(P_{\text{水温}, \text{左}})^{\frac{W_{\text{水温}}}{W_{max}}} (P_{\text{流速}, \text{左}})^{\frac{W_{\text{流速}}}{W_{max}}}} \dots \dots \dots \quad (15)$$

今仮に $P_{\text{流速}, \text{右}} \neq P_{\text{流速}, \text{左}}$, $P_{\text{水温}, \text{右}} = P_{\text{水温}, \text{左}}$ であるとすると, $W_{max} = W_{\text{流速}}$ となり, 式(15)は

$$R_{\text{水温}\cdot\text{流速}} = \frac{P_{\text{流速}, \text{右}}}{P_{\text{流速}, \text{左}}} = R_{\text{流速}} \dots \dots \dots \quad (16)$$

となって、加法形あるいは乗法形に見られた複合因子実験に対する式と単一因子実験に対する式の整合性がとれないという問題は解消されている。つまり、本式には、

- 新たに環境因子をつけ加えても、それ以前に求めた選好強度式や因子ウェイトを変更する必要がない。
- 選好強度式と因子ウェイトを別々に定めることができる。

という優れた特徴がある。

さらに、もう一つの本式の特徴を示そう。水温に対する因子ウェイトが流速に対する因子ウェイトよりも大きい、すなわち $W_{\text{水温}} \gg W_{\text{流速}}$ である場合を考えよう。加法形の式(3)において、 $P_{\text{水温}, \text{右}} = P_{\text{水温}, \text{左}}$, $P_{\text{流速}, \text{右}} \neq P_{\text{流速}, \text{左}}$ である場合には、 $P_{\text{流速}}$ と $P_{\text{水温}}$ の値が同じオーダーの場合、 $R_{\text{水温}\cdot\text{流速}} \approx 1$ となってしまう。ところが、生物の選好性を考えてみると、たとえ流速に対する因子ウェイトが小さくとも、 $P_{\text{水温}, \text{右}} = P_{\text{水温}, \text{左}}$ である場合には $P_{\text{流速}}$ の違いに影響を受けて分布が決定されるだろう†。このような性向は常識に合致するばかりでなく、流速 6cm/sec , 12cm/sec と全遮蔽の複合因子実験結果(図-4 参照)からも支持されるものである。しかしに加法形で

† 密度には魚の生理に大きな影響を与えるような極端な水温ではたとえ $P_{\text{水温}, \text{右}} = P_{\text{水温}, \text{左}}$ でも魚の行動に影響を与えると思われるが、ここではそのような極端な状況は考えていない。

表-1 実験より求めた因子ウェイト値

遮蔽	0.3	濁度	1.0
流速	0.03	環境容量	0.3
流速*	0.12	水温	0.3
竹棒	0.32	水深	0.63
透明棒	0.17	水深*	0.58
餌量	0.26		

*印は 4cm のタナゴ、無印は 6cm のタナゴについての因子ウェイト

はこの傾向が表現できない。一方、本式(13-a)では、たとえ $W_{\text{水温}} \gg W_{\text{流速}}$ であっても $P_{\text{水温}, \text{右}} = P_{\text{水温}, \text{左}}$ の場合には $R_{\text{水温}\cdot\text{流速}} = P_{\text{流速}, \text{右}}/P_{\text{流速}, \text{左}}$ となり、前述の性向がうまく表現されている。

ここで述べた加法形の問題は、文献²¹⁾において問題とされている「選好判断の非推移性向」に通じるものであり、一般的な加法形ではうまく表現できないものであるようだ。式(13-a)の選好性研究における位置づけを明確にすることは本論文の目的ではないが、文献などから判断するかぎりでは式(13-a)は選好判断の非推移性向の表現に対する一つの解答になっているのではないかと感じている。これについては専門家の検討をお願いしたい。

以上の定式化を用い、複合因子についての実験結果を用いて因子ウェイトを決定した。例えば、図-4より、6cm のタナゴについての水深-全遮蔽複合実験では、

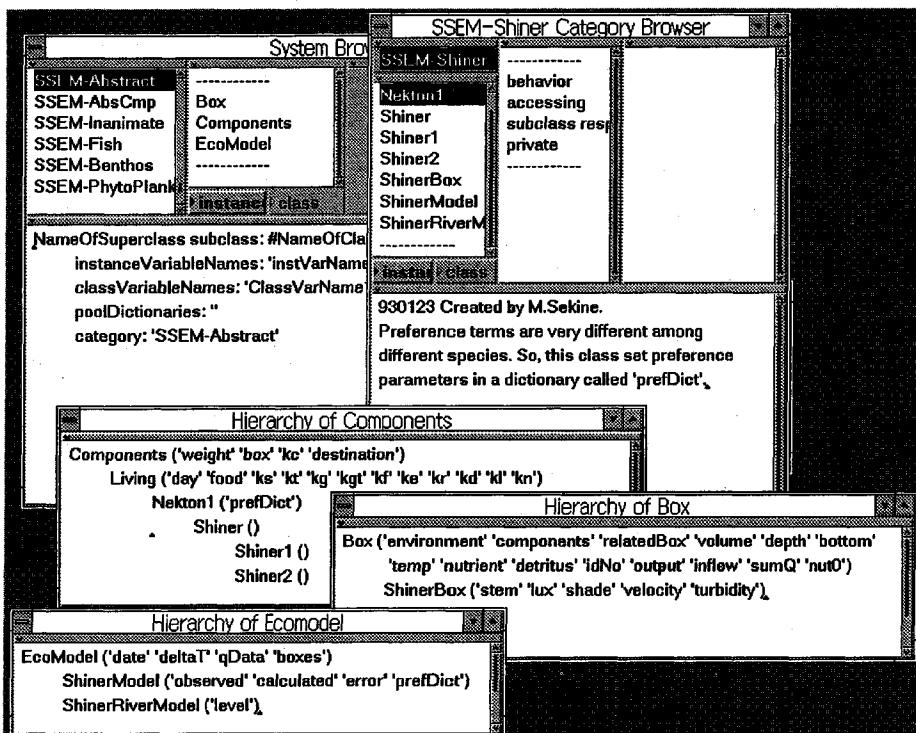
$$R_{\text{水深}\cdot\text{遮蔽}} = \frac{0.59}{0.41} = 1.44 \dots \dots \dots \quad (17)$$

である。図-6に示した水深、遮蔽に関する選好強度式のパラメータ値より、 $P_{\text{水深}}(3\text{cm}) = 0.39$, $P_{\text{水深}}(5.8\text{cm}) = 1.0$, $P_{\text{遮蔽}}(\text{全遮蔽}) = 1.0$, $P_{\text{遮蔽}}(\text{開放}) = 0.064$ である。従って、式(15)にならうと、

$$\begin{aligned} R_{\text{水深}\cdot\text{遮蔽}} &= \frac{(P_{\text{水深}(3\text{cm}), \text{右}})^{\frac{W_{\text{水深}}}{W_{max}}} (P_{\text{遮蔽}(\text{全遮蔽}), \text{右}})^{\frac{W_{\text{遮蔽}}}{W_{max}}}}{(P_{\text{水深}(5.8\text{cm}), \text{左}})^{\frac{W_{\text{水深}}}{W_{max}}} (P_{\text{遮蔽}(\text{開放}), \text{左}})^{\frac{W_{\text{遮蔽}}}{W_{max}}}} \\ &= \frac{\frac{(0.39)^{\frac{W_{\text{水深}}}{W_{max}}}}{W_{\text{水深}}}}{(1.0)^{\frac{W_{\text{遮蔽}}}{W_{max}}}}}{\frac{(1.0)^{\frac{W_{\text{水深}}}{W_{max}}}}{(0.064)^{\frac{W_{\text{遮蔽}}}{W_{max}}}}} \\ &= 1.44 \dots \dots \dots \quad (18) \end{aligned}$$

となる。 $W_{max} = W_{\text{水深}}$ であるか $W_{max} = W_{\text{遮蔽}}$ であるかは直ちには判断できないが、最大 2 回の試行錯誤により $W_{max} = W_{\text{水深}}$, $W_{\text{遮蔽}}/W_{\text{水深}} = 0.48 (= 0.3/0.63)$ を得る。

同様の手法で遮蔽因子と他の環境因子との因子ウェイト比を求め、濁度を 1 として正規化した因子ウェイト値を表-1 に示す。式(13-a)からも明らかのように、因子ウェイトは相互の比較にしか意味はない。また、図-4における単一因子実験結果では濁度より水温や遮蔽因子に対して明確な選好性を示しているように見えるが、表-1 における因子ウェイトは濁度が最も大きくなっている。この



左上のウインドウは、SSEM における基本的な 3 つのクラス、Box (生物が住む水域の 1 区画), Components (魚など、モデル中で存在量を持つもの), EcoModel (生態モデル全体のコントローラ) を表示している。右上のウインドウは、本研究で新たに定義したクラスを表示している。下部の 3 つのウインドウ、Hierarchy of Components, Hierarchy of Box, Hierarchy of Ecomodel は、既存の基本クラスと新たに定義したクラスの階層関係を表示している。

図-7 新たに定義したクラス階層

ように、因子ウェイトは単一因子実験結果からは予測できないものである。

5. SSEM による仮想河川のモデル計算例

3.節、4.節で求めた選好強度式を SSEM に組み込み、仮想的な河川環境に流速変化を起こした場合の魚の移動を計算した[†]。SSEM はオブジェクト指向言語 Smalltalk により実現されている。このため、SSEM の特殊な状況への適用は、文献³⁾でも紹介した通り、極めて簡単である。まず、自由に環境因子を追加できるよう、選好性に関わるパラメータを Dictionary (辞書形式で参照でき、動的に追加、削除できる配列) 形式とし、本論文で提案した新しい選好強度式を組み込んだ Nekton1 を生物を表す既存のクラスである Living のサブクラスとして定義した。次いで、SSEM に標準で備わっている水深、餌量、水温、底質の他に、遮蔽度、生物量、濁度、流速、水生植物の

茎に対して選好性を持つ Shiner を Nekton1 のサブクラスとして定義した。さらに、Shiner のサブクラスとして体長 6cm のタナゴ Shiner1 と体長 4cm のタナゴ Shiner2 を定義した。Shiner1 と Shiner2 の違いは、パラメータ定義メソッドである setCoef のみである。

また、SSEM では標準の環境条件として temp(水温)、bottom(底質)、depth(水深) しか考えていないので、新たに stem(水生植物の茎間隔)、shade(遮蔽度)、velocity(流速)、turbidity(濁度) をインスタンス変数として持つ ShinerBox を Box のサブクラスとして導入した。また、これらの環境条件の変化を制御する EcoModel のサブクラス ShinerRiverModel を導入した。図-7 にこれらのクラス階層を示す。

計算に用いた仮想河川平面図を図-8 に示す。右岸側ほど水深が小さく、浅瀬には水生植物が繁茂している河川を想定し、10m の流下区間を取り出して流下方向に平行な 4 Box でモデルを構成した。強制関数として与えた水位の経日変動を図-9 に示す。降雨等による増水を想定し、水位変動に応じて各 Box の流速、濁度を図中の式により

[†] 本節では、選好強度式を用いて生態系モデルを計算する方法に展望を与えることが目的である。このため、SSEM の詳細については説明していない。必要に応じて文献^{1)~3)}を参照されたい。

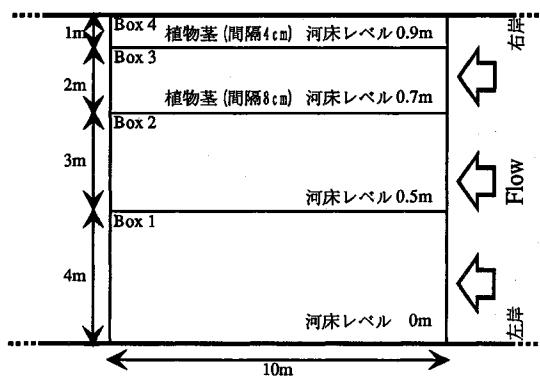
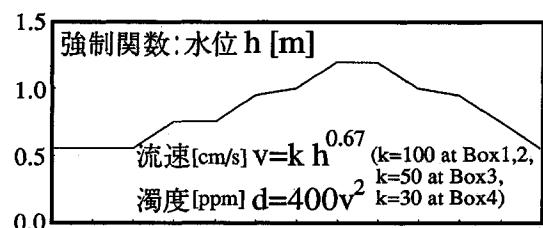


図-8 仮想河川区間(平面図)



* 水位 h は 図-8における河床レベルと同じ基準面からの水面高。上図は水位 h の経日変動を与えている。

図-9 仮想河川計算における強制関数

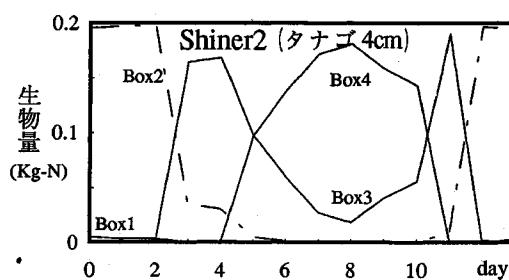
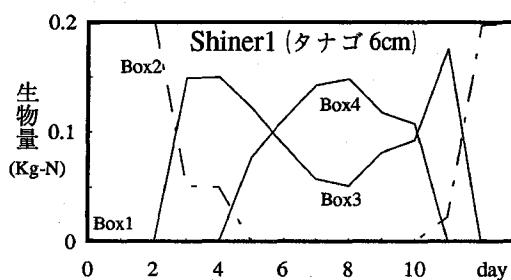


図-10 仮想河川計算結果

変化させた。本計算ではタナゴはこのモデル区間の外部には移動しない。

計算の結果得られた各 Box におけるタナゴの生物量の経日変化を図-10に示す。水位、流速、濁度の変化に対応し、増水時にタナゴが浅瀬(Box 3 から Box 4)に移動する様子が計算された。これは小型魚が増水時に生息域から下流してしまわないとすると一般的に理解されている行動と合致している。本計算は選好強度式をモデルに組み込み、その動作を確認するための仮想的なものであり、結果の検証は今後の課題である。

6. 結 論

河川開発が河川生態系に及ぼす影響の定量評価を目的として、タナゴの環境に対する選好性を実験に基づいて定式化し、生態系モデリングツール SSEM によりモデル化した。

選好性実験においては、実験装置の工夫により、流速因子、餌量因子、水温因子、濁度因子、遮蔽因子、鏡因子、生物量因子についてタナゴの選好性を定量的に評価し得た。タナゴは遮蔽因子、濁度因子など、遮蔽に関わる因子に対し明確な選好性を示した。河川の水生植物帶に魚が多い理由の一端も水生植物の茎による遮蔽効果にあることが示唆された。

選好性の定式化に当たっては、正規化因子ウェイトを用いた乗法形選好強度式を提案した。本式には、(1)新たに環境因子をつけ加えても、それ以前に求めた選好強度式や因子ウェイトを変更する必要がない。(2)選好強度式と因子ウェイトを別々に定めることができる。という優れた特徴がある。選好性実験結果を用いて本選好強度式のパラメータ値を決定した。この乗法形選好強度式は選好性の研究一般に応用し得る可能性もある。

本選好強度式を SSEM に組み込み、実験より得られたパラメータを適用することにより、仮想河川におけるタナゴの挙動をシミュレートした。現段階では検証データを持たないが、タナゴの移動を適切に表現できたと思われる。

もちろん本研究だけで河川における魚の行動がすべて説明できるわけではない。異なる年齢、異なる魚種、異なる環境因子に対する選好性パラメータの決定をはじめとして、かならずしも最適でない環境条件に長期間暴露された場合の生理パラメータの変化、工事工法と環境因子の関係の定量評価、そしてなにより、実水域における本モデルの検証など、様々な課題が残されている。本研究はようやく第一歩を踏み出したばかりである。しかしながら、河川環境管理に活用するための短期的な魚の行

動のモデル化への道は開かれたと考えている。

謝辞 実験にあたっては当時の学生である橋嶋亮介君に多大な協力を頂きました。また、本研究は文部省科学研究費(奨励(A))および財団法人河川環境管理財団河川整備基金の補助を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sekine, M., Nakanishi, H., Ukita, M. and Murakami, S.: A shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language, Ecological Modelling, Vol.57, pp. 221-236, 1991.
- 2) Sekine, M., Nakanishi, H., Ukita, M. and Kanehiro, E.: A shallow sea ecological model to assess the impact of coastal development, Extended abstracts of the 4th international conference on computing in civil and building engineering, Tokyo, Japan, pp. 189(1-4), 1991.
- 3) 関根雅彦・中西弘・浮田正夫:水域生態系モデリングツール SSEM を用いた水門工事に伴う魚のへい死事故の解析, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp. 99-108, 1994.
- 4) Laevastu, T. and Larkins, H. A.: Marine Fisheries Ecosystem Its quantitative evaluation and management, Fishing News Books Ltd, Farnham, Surrey, England, 1981.
- 5) Saarenmaa, H., Stone, N. D., Folse, L. J., Packard, J. M., Grant, W. E. and and, M. E. M.: An artificial intelligence modelling approach to simulating animal/habitat interactions, Ecological Modelling, Vol.44, pp. 125-141, 1988.
- 6) K. ローレンツ:ソロモンの指輪—動物行動学入門—, 早川書房, 1987.
- 7) マリアン S ドーキンス:動物行動学・再考, 平凡社, 1989. 山下恵子, 新妻昭夫 訳.
- 8) ドナルド R グリフィン:動物は何を考えているか, 自然誌選書, どうぶつ社, 1989. 渡辺政隆 訳.
- 9) ロバート P マッキントッシュ:生態学 概念と理論の歴史, 思索社, 1989. 大串隆之, 井上弘, 曽田貞滋 訳.
- 10) 財団法人日本水産資源保護協会:水生生物生態資料, 1981.
- 11) 財団法人日本水産資源保護協会:水生生物生態資料(続), 1983.
- 12) 鈴木興道:魚類の生息密度と多自然型河川工法に関する研究, 環境システム研究, Vol.20, pp. 65-73, 1992.
- 13) 君塚芳輝:魚類の生息環境としての河川工法の評価, 環境システム研究, Vol.20, pp. 52-57, 1992.
- 14) 日高秀夫・立川涼:魚類による化学物質の忌避試験法(1), 生態化学, Vol.7, No.4, pp. 17-25, 1985.
- 15) 日高秀夫・立川涼:魚類による化学物質の忌避試験法(2), 生態化学, Vol.8, No.1, pp. 17-27, 1985.
- 16) 日高秀夫・立川涼:魚類による化学物質の忌避試験法(3), 生態化学, Vol.8, No.2, pp. 31-40, 1985.
- 17) 日高秀夫・立川涼:魚類による化学物質の忌避試験法(4), 生態化学, Vol.8, No.3, pp. 31-38, 1985.
- 18) 関根雅彦・浮田正夫・中西弘・城田久岳:抽水植物, 沈水植物が河川水質に与える影響, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp. 131-139, 1994.
- 19) Sekine, M., Ukita, M. and Nakanishi, H.: Determination of nutrient transformation pathways in rivers using a mathematical programming method, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.9, pp. 189-206, 1992.
- 20) 田村坦之・森好宏・中村豊:不確実性を考慮した価値関数による選好のモデル化, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.1, 1987.
- 21) 中村和男:あいまい選好判断の非推移性とファジィ効用モデル, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.6, pp. 706-713, 1989.
- 22) 谷明良・宮武信春:通勤経路選好特性の計量化手法, 土木学会論文報告集, Vol.287, pp. 83-87, 1977.
- 23) 中園真人・鈴木昌次・古川浩平・中川浩二:トンネル坑門デザインの心理評価構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.474/VI-20, pp. 85-94, 1993.
- 24) Nijkamp, P.: Theory and Application of Environmental Economics, Vol. 1 of Studies in Regional Science and Urban Economics, NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY, Amsterdam, New York, Oxford, 1977.
- 25) 米田稔・深海悟・ミッセルグラビッシュ:意志決定支援システムにおけるファジィ評価と決定, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.9, pp. 1125-1134, 1992.

(1994. 4. 8 受付)

DETERMINATION OF ENVIRONMENT PREFERENCE OF FISH IN AN ECOLOGICAL MODEL FOR MANAGING RIVER ENVIRONMENTS

Masahiko SEKINE, Masao UKITA, Hiroshi NAKANISHI and Tadashi UCHIDA

The purpose of this study is to estimate the influence of development activity on river ecosystems, especially as regards to fish. Fish preference was formulated based on experiments using shiner. A new formula was introduced with two strong points: First, it is not required to change the values of the preference parameters when a new factor that influences fish behavior is introduced. Second, parameter values for the preference equation and weight values for the factors can be decided separately. By using this formula in a Shallow Sea Ecological Model (SSEM), shiner behavior in a model river was successfully simulated.