

(24) 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

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FISH BEHAVIOR AIMING AT MANAGING ENVIRONMENT OF WATER AREA

関根雅彦*、檜崎寿晃*、浮田正夫*、中西 弘*

Masahiko SEKINE*, Toshiaki NARAZAKI*, Masao UKITA*, Hiroshi NAKANISHI*

ABSTRACT ; The purpose of our study is to estimate the influence of development activity on shallow sea ecosystems, especially on fish. Fish behavior, based on its preference was revealed to be an essential factor for this purpose. In this paper, fish preference was tested through experimentation on juvenile ocellate puffers. Two waterways were connected to each other at a narrow junction, and different environmental conditions were established for each waterway. Puffer could select the preferred waterway, and the distribution was counted using a video tape recorder (VTR) every minute for 50 minutes. Puffer showed less preference for shade than the shiner, river fish, and showed strong preference for the bottom. The results allowed for the fishes preference to be successfully formulated. This demonstrated the applicability of the formulation method for fish in sea. Then, shiner behavior was tested in a larger tank with several environmental conditions represented. The tank (118 cm long, 49 cm wide, 20 cm depth) was divided into 14 sections, and each section had a different depth, current velocity, plant stem, and shade level. 139 shiner were put in the tank and their distribution was counted using a VTR for 40 minutes. Calculated distribution of shiner by using the formula showed good accordance with observed situation. This result should support the efficiency of the formulation method.

KEYWORDS ; ecological model, preference, sea management, fish

1 はじめに

著者等は水域における開発行為が生態系、特に人間にとって直接的に影響の大きい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 (a 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の生理に関わ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選好性^{*}に関するモデル式の妥当性を検討した。また文献²⁾では山口県大海湾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⁾では農業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。文献^{4,5,6)}では淡水魚のタナゴを用いて魚の選好性を実験的に定式化する手法を検討した。

文献⁶⁾でも指摘したように、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、選好性による魚の移動を正しく評価することが是非とも必要である。本報告では、文献⁶⁾の後を受け、海域生態系モデルにおける魚類の生息量や分布の変化予測のための基礎資料とすることを目的としてトラフグの選好性を実験的に定量化することを試みた。また、本手法による選好性の定量化の有効性を検討するため、複数の環境条件を備えた大型水槽においてタナゴを用いた分布実験を行い、SSEMによるタナゴ分布の再現を試みた。(「選好」とは行動の計測・分析に関して計測制御分野で用いられている用語であり、“preference”と訳されている。)

2 トラフグを用いた選好性実験

2.1 実験方法

選好性実験装置は文献^{5,6)}と同じものである。Fig.1に実験装置の概要を示す。装置は透明塩化ビニール製で、

* 山口大学工学部社会建設工学科 〒755 宇部市常盤台2557

Department of Civil Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755 Japan

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10尾)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

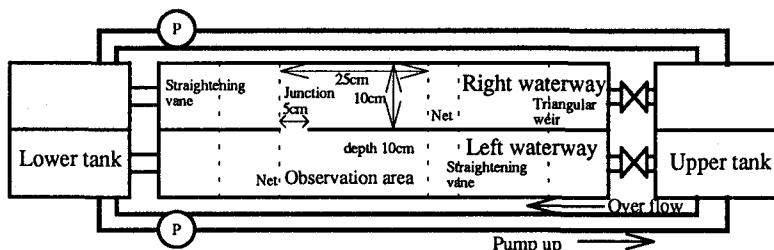


Fig.1 Waterway of preference level experiment

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。

使用した魚は養殖トラフグ稚魚である。トラフグを選定した理由は、代表的な砂底の魚の1つであり、また漁業対象種として重要だからである。SSEMによる生態系モデルの構成要素の一つである砂底の魚の生態パラメータを得ることが目的であって、トラフグという単一種の性質を精密に求めたいからではない。同様に、浮魚等他の性質の魚についても、適当な代表種を選定して順次実験を実施していく予定である。また、成魚ではなく稚魚を用いた理由は、稚魚期の環境条件が生残率に大きく影響するため、この時期の行動を把握することが重要だからである。体長3~4cmの稚魚を栽培漁業センターより200尾ほど入手し、60cm水槽にて室温(19~26℃)、塩分濃度30‰にて蕃養した。トラフグは全長5~6mmごろから狭い空間に多数収容すると、互いに激しく咬み合う習性がある。このため、蕃養の初期には尾びれ等を食いちぎられ死亡するものも見られ、最初の1週間で約90尾が死亡したが、それ以降はほぼ週4尾以内の減耗にとどまった。実験は7月中旬から開始したが、8月末時点で体長約5cmに達した。一方、8月末に新たに約50尾のトラフグを補充したが、この体長は約7cmであった。これらのトラフグの体長は11月初旬には9cmに達した。餌料としては体長3~5cmのものについては栽培漁業センターで用いられている「オトヒメ1号」(日清製粉、窒素含量 90mg-N/g-餌、直径0.3mm)、体長5~9cmのものについては同じく「オトヒメ3号」(直径1mm)を自動給餌器にて1日5回(10:40, 13:40, 16:40, 19:40, 22:40)、1.6gずつ与えた。実験では給餌直前の空腹状態のフグを用いた。実験に用いた海水は餌料成分の混入を避けるため、人工海水(「マリンアート」千寿製薬株)とした。

実験開始に先だて、蕃養水槽から実験水路にトラフグを移動させた直後の挙動をビデオ撮影し、約10分でトラフグの挙動が落ちつくことを確認した。分布率の決定にあたっては、トラフグ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10分後を実験開始とし、トラフグの行動をビデオカメラで自動撮影し、画像から1分毎のトラフグ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。基本的には1条件につき左右水路の条件を入れ替えて2回試行した。ブランク試験は2, 4, 6, 8cm/secの4段階の流速で実施した。結果をFig.2に示す。1分毎50回観察の4試行の左側存在比率の平均は0.50、標準偏差は0.15であった。

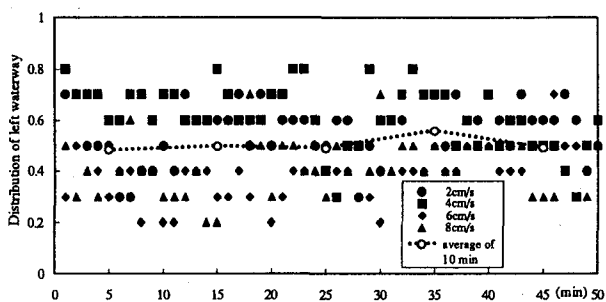


Fig.2 Result of blank test

この種の生物実験手法については、主に化学物質の忌避試験について文献(8,9,10,11)に概観されている。これらの文献から、試験魚数や実験時間がはっきりしている27ケースについて調べると、実験時間は5分から9日まで種々あるが、10分が5ケースで最も多く、20分、60分が各3ケースで続く。試験魚の数は1尾から50尾ま

であるが、1尾が10ケースで最も多く、次いで10尾の6ケースとなっている。試行回数は1回から30回までであるが、6～10回が11ケースと最も多く、他はすべて1ケースとなっている。ただし、試行回数6～10回の11ケースのうち6ケースは試験魚数が1尾のものである。逆に試験魚数10尾の6ケースのうち2ケースは試行回数7～10回、1ケースは試行回数1回、3ケースは試行回数の記述なしである。馴致時間は10分から1夜までであるが、30分と60分が共に3ケースで最多である。これから見れば、本実験の条件設定は試験魚数、実験時間についてはほぼ平均的なものであると言える。試行回数が少ないことが問題となるが、10尾の同時実験により個体間のばらつきをある程度相殺できること、50分間の50回の観察結果を平均していること、一つの環境条件因子を数段階に変化させた実験を行うことにより、結果の変化傾向から不正な実験結果を発見しやすいこと、トラフグの性質の厳密な定量化が目的ではなく、砂底を好む魚としてのおよその性質を把握することが目的であること等を考慮し、より多くの環境条件について情報を得ることを重視して試行回数を設定した。

変化させた環境条件因子は、流速因子、餌量因子、水温因子、濁度因子、遮蔽因子、鏡因子、溶存酸素因子、底質因子、塩分濃度因子、硫化物イオン因子であり、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を実施した。餌量因子実験は粉末状にした「オトヒメ3号」を上部タンクに懸濁させたものである。予備実験においてトラフグが餌に明確な反応を示さないことが判明したため、トラフグをあらかじめ実験水路中で3～4日間蓄養し、できるだけ実験水路におかれることによるストレスを除去するよう努めた上で、実験前1日は餌を与えなかった。濁度因子実験ではカオリンを上部タンクに懸濁させた。溶存酸素因子実験では、上部タンクの一方は空気曝気、他方は窒素曝気を行い、あらかじめ所定のDO濃度に調整した上、1cm/sの低流速で実験をおこなった。硫化物イオン因子実験では、固体硫化水素を加熱して発生させた H_2S を海水中に曝気することにより高濃度の S^{2-} イオン含有海水を作成し、所定量上部タンクに添加した。実験前後で上部タンク中の S^{2-} 濃度を測定し、実験中の濃度変化が大きくないことを確認した。餌量因子、濁度因子、溶存酸素因子、硫化物イオン因子の各実験では、水路接合部で左右水路の水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。底質実験では、宇部市の地先海岸より採取した砂($D_{50}=390\mu m$)、泥($D_{50}=185\mu m$)、岩($\phi 30\sim 50mm$)を水路底部に敷いた。なお、これらの素材中に餌となる生物が含有している可能性があるため、洗浄のうえ一旦 $105^\circ C$ の炉中で乾燥させた。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、水路両側壁に鏡を貼り付け、水路内の個体数が魚からは多数に見えるようにして、群に対する選好性を調べようとしたものである。

2.2 実験結果

実験条件および結果をFig.3に示す。硫化物イオン因子実験においては、一見低濃度域では硫化物イオンが存在している方が選好されているように見えるが、実際には実験開始後5分間は硫化物イオンの存在する水路のトラフグは激しく泳ぎ回り、15分程度で横転するトラフグが現れた。この場合、明確な忌避行動は見られなかった。また、塩分濃度実験においても、低塩分が選好されているという結果が得られたが、実際には水路底部にうずくまり遊泳しないという状況が観察された。文献⁷⁾によれば、トラフグは環境の悪化や病気などで体に異常があると、砂泥質または砂礫質の水底に埋没し、じっと動かないという習性がある。このことを考え合わせると、硫化物イオン因子、塩分濃度因子などでは条件設定が激烈に過ぎ、適切な結果が得られていないと考えられる。また、餌量因子実験では、トラフグが餌に反応を示したのは最初の3分間だけであったため、Fig.3では実験開始3分間の平均値を示しているが、やはり明確な傾向は得られていない。この理由としては、ストレスが食欲に影響を及ぼしている可能性があるほか、粉末状の餌ではトラフグの興味を引かなかったことも考えられる。実際、トラフグの成長に従って餌料を変更していることから理解されるように、口のサイズに応じた餌でないと効率よく摂餌できない。また、文献⁷⁾には、トラフグの好適水温は $16\sim 23^\circ C$ であり、 $28^\circ C$ 以上では狂いだし仮死状態になる、との記述がある。本実験は $19\sim 26^\circ C$ (平均 $25^\circ C$)の条件下で行われており、水温的にもある程度のストレスを与えていたと考えられる。淡水魚であるタナゴを用いた実験⁶⁾では特段の問題は観察されなかったが、海水魚を用いた本実験においては、実験条件の不適切さ

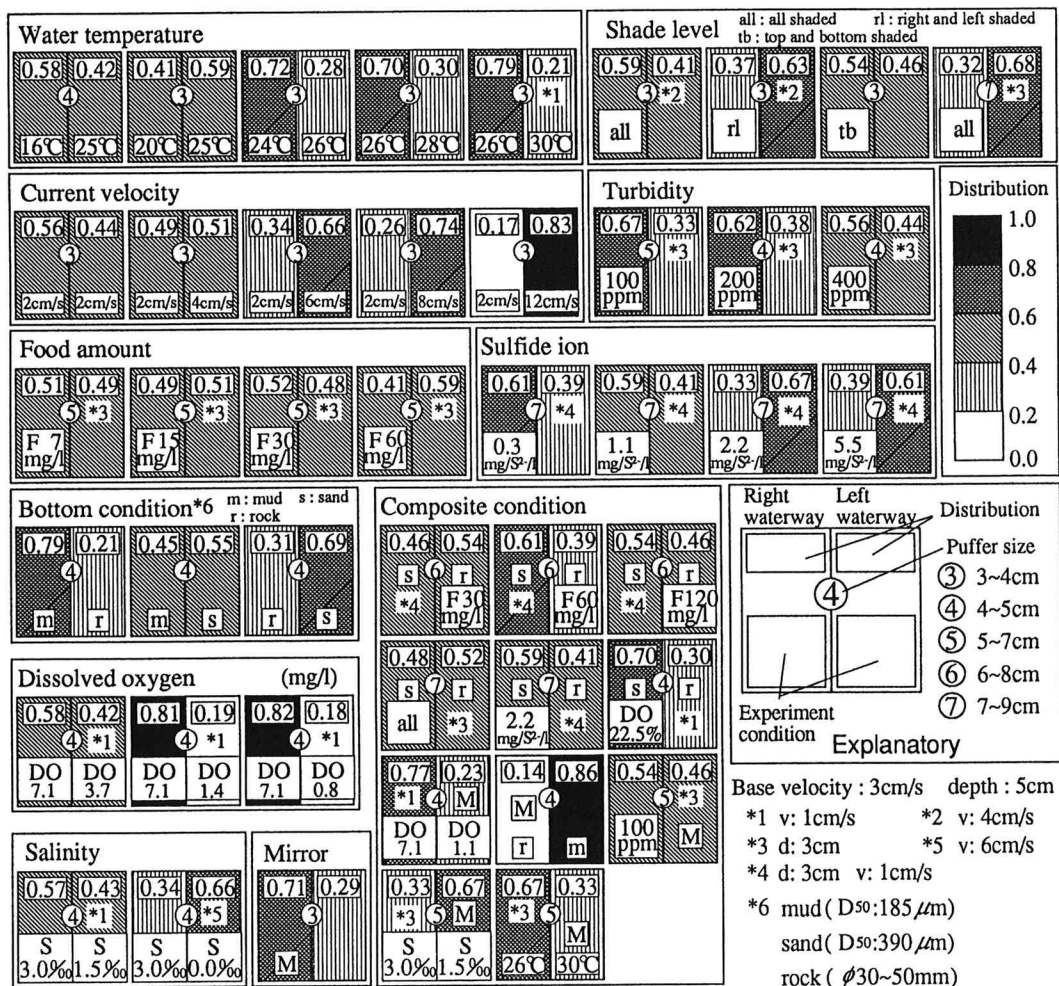


Fig.3 Preference level experiment result

により以上の3実験において有意な結果は得られていないと考えられ、あらためて生物実験の難しさを認識した。ちなみに、水温因子実験では実験時の蓄養水槽の水温である26℃を基本として実験を行ったが、やはり高温を忌避する傾向は読みとれる。しかしながら、26℃より低い領域においては、24℃に対してやや高い選好性が見られる他は明確な傾向は見いだせず、26℃という水温が問題となる可能性は小さい。従って、その他の実験において水温によるストレスの存在は否定できないものの、観察上不審な挙動が見られない場合、適切な結果が得られていると判断した。

タナゴの実験結果と比較した場合、トラフグでは遮蔽因子に対する選好性が弱い事が特筆される。遮蔽因子と関係の深い濁度因子についてもタナゴより選好性が低い。これは人目につきやすい河川と開放的な海洋という生息場所の特性による性質の違いを表しているとも考えられ、興味深い。また、底質に対する選好性が明確であり、岩は好まれない。これはトラフグの生息場所の知見とも合致している。溶存酸素因子、鏡因子についても明確な選好性が見られた。

複合因子実験については、単一因子実験において明確な選好性が見られたもののうち、実験条件の設定しやすい鏡因子を他の因子と複合させて実験した。ただし、8月末に新たなトラフグを補充した際、鏡因子に対する選好性が弱くなったため、一部の環境因子については底質因子を基準として複合実験を行った。残念ながら鏡因子と底質因子の関連は得られなかったため、次節で述べる因子ウェイトは2グループに分かれている。

成長の速い稚魚で実験を行う際には、成長に伴う選好性の変化にも留意しなければならないという教訓を得た。

2.3 選好強度の定量化

単一の環境因子の値に対する選好強度の表現には、Fig.4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。本研究では、複数の水域*i*における魚の分布率 D_{ji} は、水域*i*における環境因子*j*についての選好強度 P_{ji} を用いて

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

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

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

で表現されたと考えた⁶⁾。ここに W_j は因子*j*についてのウェイトである。

本式は、

- 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

という極めて優れた特徴を持つ。本水路における単一因子実験の場合、水域(*i*)の数は2であるから、式(1)よりある因子*j*についての分布率 D_{ji} は

$$D_{ji} = \frac{P_{ji}}{\sum_{i=1}^I \{P_{ji}\}} \quad i=1,2 \quad I=2 \quad (4)$$

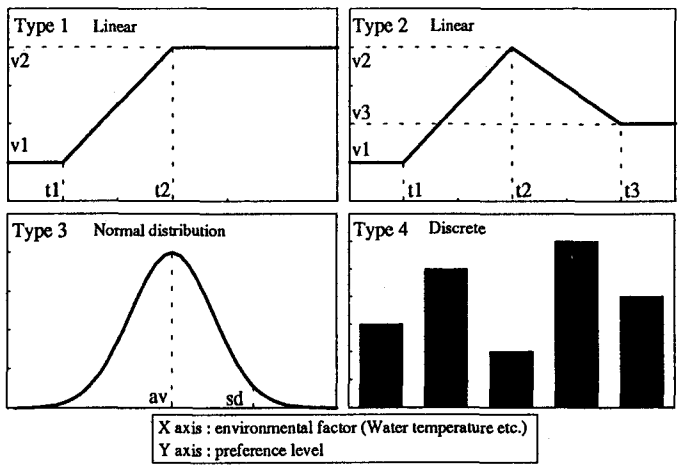


Fig.4 Pattern of preference level

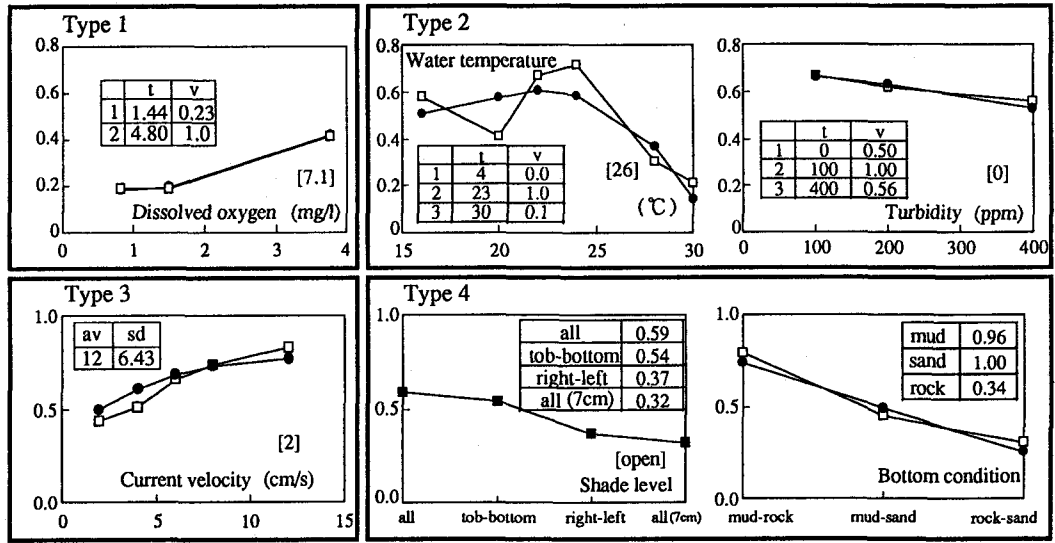


Fig.5 Observed and calculated preference level

と表記される。 D_{ji} は単一因子実験結果より知ることができるため、式(4)を用いて P_i の未知パラメータ値を定めることができる。

Fig.5に実験値と計算値の比較を、得られたパラメータ値と共に示す。次に、得られた P_{ji} を式(1)に代入し、複合因子実験より得られた D_{ij} を用いることにより、 W_j を定めることができる。求められた W_j をTable 1に示す。

以上のように、トラフグにおいても実験条件が不適切であった3因子を除いてタナゴと同様に選好性を定量化することができた。

3 タナゴを用いた分布実験

3.1 実験方法

前節では海水魚であるトラフグの選好性に基づく挙動を定量化したが、この定量化の有効性を実際の水域において確認した例はまだない。実際の水域では生物の移動はおろか生物量の測定自体が極めて困難である。本研究では、選好性実験で用いた水路より大型の複数の環境条件を備えた実験水槽を用いて魚の分布を測定し、生態系モデリングツールSSEMに得られた選好強度式を組み込んでシミュレーションすることを試みた。本実験において用いた魚は文献5,6)において選好性パラメータを定めたタナゴである。Fig.6に示す水槽に、6cmのタナゴを72尾、4cmのタナゴを67尾投入した。水槽は灰色塩ビ製で、水槽内の浅瀬は十分年月を経たコンクリートブロックにより作成した。Box12部分には羽根車を設置し、水槽内に流れを起こした。また、白熱電灯2灯を用い、水槽内にできるだけ明暗差がで

きないように照明したが、羽根車の下に陰ができることは避けられなかった。水槽のBox諸元をTable 2に示す。タナゴについては遮蔽、流速、餌量、濁度、水温、水深、環境容量、および水生植物の茎の8つの環境条件因子について選好性パラメータが定められているが、本実験装置では遮蔽、流速、水深、環境容量、水生植物

Table 1 Obtained factor weight

Factor	Weight	Note
Mirror	0.15	Calculated from Mirror standard experiments.
Dissolved oxygen	1.00	
Water temperature	0.13	
Turbidity	0.25	Calculated from Bottom condition standard experiments.
Shade level	1.00	
Bottom condition	0.84	

Weights obtained from Mirror standard experiments and Bottom condition standard experiments could not be combined each other.
It was because the preference level for Mirror changed according to the growth of puffer, and the composite condition experiment of Mirror and Bottom condition did not make sense.

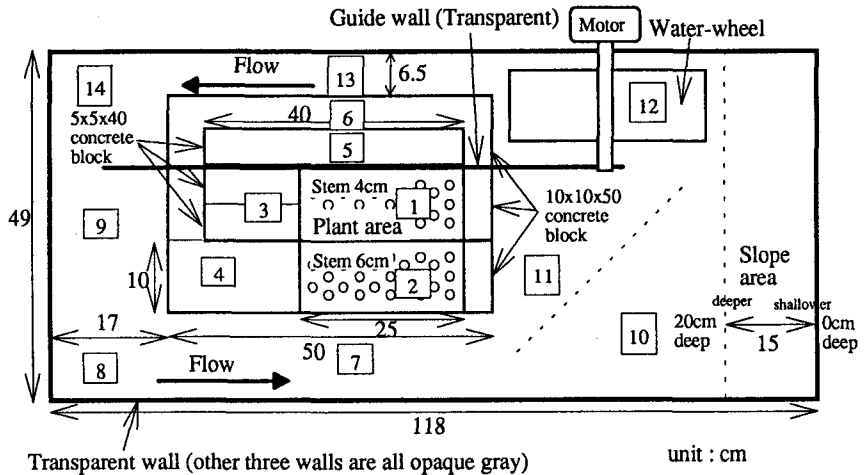


Fig.6 Water tank for shiner distribution experiment

Table 2 Features of boxes

	depth (cm)	water area (cm ²)	water volume (cm ³)	stem (cm)	current velocity (cm/s)
Box1	5	250	1250	4	0.03
Box2	10	250	2500	6	0.04
Box3	5	150	750		0.03
Box4	10	250	2500		0.04
Box5	5	200	1000		0.37
Box6	10	300	3000		0.3
Box7	20	575	11500		0.075
Box8	20	196	3910		0.085
Box9	20	340	6800		0.085
Box10	20	803	12521		0.045
Box11	20	803	16065		0.045
Box12	20	842	14974		0.138
Box13	20	325	6500		0.165
Box14	20	281	5610		0.085

の茎の5因子が作用する。タナゴを投入して1時間放置した後40分間ビデオ撮影し、1分毎のタナゴの分布をBox毎に計数し、40分間の平均値をもってタナゴの分布率とした。ビデオ映像によれば、タナゴは散発的に水槽内を移動するが、全体的にはほぼ一定位置に定直し、水槽内を群れをなして泳ぎ回ることにはなかった。なお、Box12に分布する魚は羽根車の陰となり計数困難であったため、投入尾数から他のBoxに分布する尾数を減ずる事により推定した。

3.2 実験結果のシミュレーション

本実験結果の解析は、単に式(1)~(3)を計算するだけでもある程度可能であるが、ここでは、文献6)で述べたタナゴに対し拡張した生態系モデリングツールSSEMを使用して数値シミュレーションを行った。初期条件として水槽全体にタナゴが均等分布するとし、タナゴが本水槽全域の環境条件の違いを感知できるとした場合と、隣り合ったBoxについてのみ環境条件の違いを感知できるとした場合について計算を行った。実験結果と計算結果の比較をFig.7に示す。ビデオの観察においては4cmのタナゴと6cmのタナゴの区別は困難であったため、単に尾数の比率が存在量の比になると考えた。また、SSEMの計算においては4cmと6cmを区別しているが、Fig.7では合計値を表示している。当初Box12は水流発生のための羽根車の回転のために忌避されると考えたが、実際には遮蔽効果により選好される結果になった。SSEMによるシミュレーションにおいてもBox12に全遮蔽の条件を与え、他のBoxにはすべて遮蔽因子はなしとすることによりほぼ観測に近い分布が得られた。魚は隣り合ったBoxについてのみ環境条件の違いを感知できるとして計算した場合のほうがいくぶん観測値に近い分布を示しており、常識に合致している。計算結果を子細に検討すると、実際にはほとんどタナゴが存在していなかったBox1~4においても計算上はいくぶんタナゴの分布が見られる等の問題点もある。しかしながら、Box12に全遮蔽の条件を与えた以外はすべて実験より得られた選好性パラメータ値および測定された水槽の環境条件をそのまま用いて計算しており、特段のキャリブレーション操作を行っていない事を考えると、本計算結果は現段階としては満足できるものと考えられた。

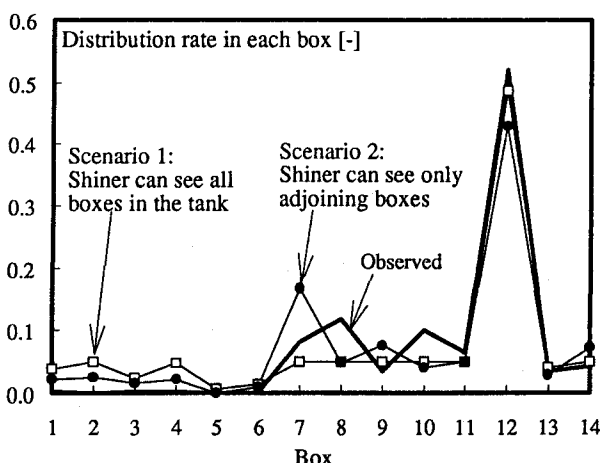


Fig.7 Observed and calculated result of shiner distribution experiment

4 おわりに

別報に報告したタナゴに引き続き、海水魚であるトラフグを用いて実験的に選好強度を定量化した。川魚であるタナゴが遮蔽因子に強い選好性を示したのに対し、海魚であるトラフグは遮蔽因子にあまり影響されなかった点が興味深い。本選好強度定量化手法がタナゴ以外にも適用できることを示すと同時に、生物実験の難しさを再認識する結果ともなった。また、より大型の水槽を用いて複合因子に対するタナゴの分布実験を行い、選好性実験により得られた選好強度式を用いてタナゴの分布を適切に再現することができた。これにより選好強度の定量化の有効性が支持されるものと考えられた。

海域の魚の行動予測に本手法を用いるためには、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、まだまだ遠い道のりが待ち受けている。筆者ら単独の研究組織で達成できるものでは到底ない。本手法の有効性を示していくことにより、水産研究者等の専門家の関心を喚起していきたいと考えている。また、

筆者らの力の及ぶ範囲での本手法の応用として、多自然型河川改修の効果予測などを手がけている。

謝辞 実験・解析にあたっては岩本典丈君(現、中電技術コンサルタント㈱)、山本義男君(山口大学工学部)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))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) M. Sekine, H. Nakanishi, M. Ukita, S. Murakami: A shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language, *Ecological Modelling*, Vol.57, 221-236, 1991
- 2) M. Sekine, H. Nakanishi, M. Ukita, E. Kanehiro: A shallow sea ecological model to assess the impact of coastal development. *Proc. 4th ICCCBCE*, 189, 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, 99-108, 1994
- 4) 関根雅彦、戸村 大、兼広栄治、中西 弘: 水生植物帯の魚の生息場としての評価に関する基礎的研究. 第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, 30-131, 1992
- 5) 関根雅彦、檜橋亮介、中西 弘: 河川環境管理への応用を目的とした魚の嗜好による行動の実験的定量化, *土木学会第48回年次学術講演会講演概要集*, II, 486-487, 1993
- 6) 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選好性の定式化. *土木学会論文集*(投稿中)
- 7) 松原喜代松, 落合明 *水産学全集* 19 魚類学(下), 恒星社厚生閣, 1973
- 8) 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*, 7(4), 17-25, 1985
- 9) 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*, 8(1), 17-27, 1985
- 10) 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*, 8(2), 31-40, 1985
- 11) 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*, 8(8), 31-38, 1985