

## 農業水路の生息場評価に向けたタモロコの環境選好性の定式化

奥島修二\*・田中雄一\*\*・小出水規行\*・竹村武士\*

目 次			
緒 言 .....	175	1 単一因子・複合因子実験結果 .....	179
研究方法 .....	176	2 単一因子に対する選好強度の定式化 .....	180
1 供試魚 .....	176	3 環境因子間のウェイト .....	183
2 実験装置 .....	176	4 生息場ポテンシャルの評価 .....	184
3 実験方法 .....	177	結 言 .....	184
4 選好強度の定式化 .....	177	参考文献 .....	184
結果および考察 .....	179	Summary .....	186

## . 緒 言

圃場整備や機械化などの農業の近代化により、農業の生産性や農業者の生活水準は大きく向上した。その一方で、水田周りの水路環境は大きく様相をかえ、水路素材のコンクリート化による生息環境の悪化や水路間の落差工による魚類の移動経路の分断などにより水田やその周辺で普通にありふれていたホタル、メダカ、フナ、ドジョウなどの生き物が減少し(片野, 1998), 農村地域の豊かな生態系が失われつつあることが指摘された(中川, 2001)。農村のもつさまざまな機能の重要性が国民的コンセンサスとなり、自然環境や生態系の保全への配慮が農業農村整備において求められ、事業において具体的な取り組みが行われてきている。

近年、農業水路の環境配慮工法として、生態系ネットワークの保全に向けた水田魚道、魚巢ブロック、ワンドや護岸工等が取り入れられているが、計画、設計にあたっての理論的な裏付けは必ずしも十分ではない。ひとつには、魚類がどのような水路環境を嗜好するのか、または忌避するのかを定量的に評価するのが困難なことに起因している。また、事業の計画や事業効果の評価では、生態系配慮への取り組みに対する影響やその効果を客観的に比較・検討する手法が求められている。

河川分野では、定量的な生態環境評価手法として、IFIM (Instream Flow Incremental Methodology, 流量増分生息域評価法, Stalnaker et al., 1995) が注目されている。

\* 農村環境部生態工学研究室

\*\* 愛知県農業総合試験場 環境基盤研究部環境安全グループ

平成19年3月16日受理

キーワード: 環境選好性, タモロコ, 環境因子, 農業用排水路  
U迷路型実験水路

このIFIMの中核部で生息環境の評価を受け持つモデルは、PHABSIM (Physical HABITAT SIMulation Model, 物理的生息場シミュレーション) と呼ばれる。生息環境評価は重み付き利用可能面積として表現され、日本の河川にも適用が試みられている。このモデルで重要なのは、河川の物理量と魚類の生息数を関連づける選好曲線の作成である。このような選好曲線は、通常現地調査を通してその作成が行われる。一方、環境選好性を室内実験から定式化し、実河川での生息場評価や魚の分布数予測が試みられている(関根ら, 1994; 楊ら, 1999, 2001)。体長の異なるタナゴを対象に並列水路のU迷路型室内実験水路を使い、環境因子として流速因子、餌量因子、水温因子、濁度因子、遮蔽因子、鏡因子、生物量因子による単一因子実験、複合因子実験及び水生植生帯を想定した植生因子実験を行い、複合因子における選好強度の定式化、因子ウェイトを求めている。

このような手法は、農業水路構造の設計、現存する農業水路の魚類生息環境としての評価や改変が予想される農業水路の影響評価にも適用できると考えられる。平松ら(2003)、福田ら(2005)は、本手法をメダカ *Oryzias latipes* に援用し、選好性を定式化しているが、他の種についても取り組みが必要である。

本報告では、水田周りの水路改修や、環境配慮工法の導入を想定した生息環境について、水田域に生息する代表的な魚類であるタモロコ *Gnathopogon elongatus elongatus* を対象に、関根ら(1994)の選好強度パターンと正規化因子ウェイトを用いた修正乗法形選好強度式による定式化を行った。

なお、本魚種は、Katano et al. (2003) が指摘したその指標性、すなわちタモロコの出現場所では多様な魚種が出現していることや水田、農業水路が、タモロコにとって繁殖、仔稚魚の成育、移動分散に重要な役割を担っ

ていると考えられることから本論文における対象魚種に選定した。

研究方法

1 供試魚

タモロコは、コイ科タモロコ亜科タモロコ属に属する魚類で、主として中部以西が自然分布域とされるが、関東平野にも広く分布する(細谷, 1989)。これは東京府水産試験場が1939, 1941年に移植放流したものが繁殖した(中村, 1955)ことによると考えられてきたが、それ以前にも利根川等での生息が確認されており(青柳, 1957)関東平野のタモロコが移植によるものか、自然分布によるものかは定かでない(細谷, 1989)。

一方、タモロコは農業水路や河川中・下流域の淀んだ水域の中層および底層を生息場とし、琵琶湖付近での産卵期は4~7月(中村, 1955)で水草や抽水植物の根などに不透明な沈性粘着卵を産みつける(細谷, 1989)。雌雄ともふつつ満1年で成熟するとされ、孵化後9月頃までに急速に成長、平均全長6~7cmに達し、その後翌年春まではほとんど成長せず、春に至って再び成長、満2年で9~10cmが普通の体サイズと考えられている(中村, 1969)。供試魚は体長の異なる体長1.5~2.0cmと4.0~5.0cmの2つの集団を用意した。

体長1.5~2.0cmの個体は、2003年6月に愛知県愛知郡長久手町の香流川にて採捕した約50個体である。採捕地点では、当該サイズの個体が優占した。そこは水深20~50cm程度で、中州付近はミゾソバ群落が発達し、流れはほとんどなく、また、川岸はクズなどの繁茂により、直射日光の当たらない日陰になっている。体長4.0~5.0cmの個体は、2003年7月に千葉県佐原市の旧圃場整備地区の農業排水路で採捕した約50個体である(Fig.1)。体長別に18cm×25cm×30cmの水槽で市販の淡水魚の餌を与えて約1~2ヶ月飼育し、実験に用いた。体長1.5~2.0cm個体は、当年に孵化した稚魚、体長4.0~5.0cm個体は、前年に孵化した成魚であると考えられる。以後、前者を稚魚、後者を成魚と呼ぶ。



Fig.1 タモロコの採捕場所  
Collection site of field goby

2 実験装置

実験には、Fig.2に示す透明アクリル製(厚さ10mm)の全長2m、幅10cm、高さ20cmの2本の水路が平行しているU迷路型水路を用いた。実験区間はネットで仕切ら

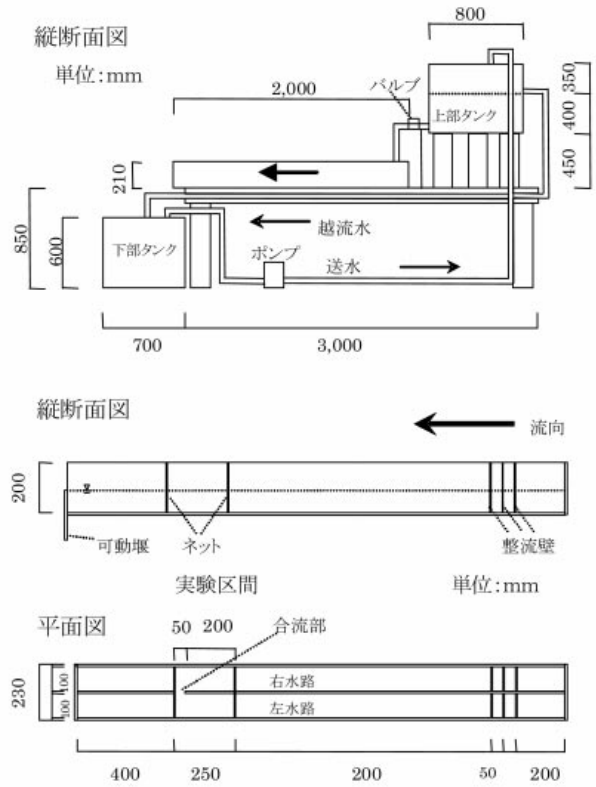


Fig.2 実験装置の概要

Schematic diagram of apparatus for open channel experiments

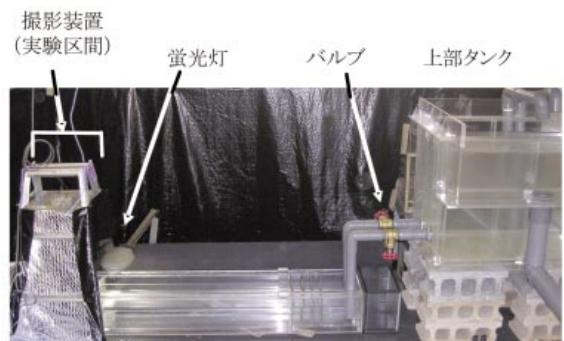


Fig.3 実験装置の概要

General view of experiment device

れた水路下流の全長25cm区間とし、区間下流の5cm部分に合流箇所を設け、供試個体が合流部から左右水路を自由に往来できる仕組みになっている。

実験水路への通水は、ポンプで下流タンクから上流タンクへ送水し、越流水を下流タンクへ戻し上流タンクを常に一定水位にすることで、実験水路への安定した流量を得た。上流水槽のバルブで流量調整を行い、水路下流部には、水位調整用の越流ゼキを設置した。

視覚的刺激により供試個体の行動が影響を受けないように、実験区間と水路側壁を暗幕または黒色板で覆った。実験区間の上流側に蛍光灯を設置し、水面の照度を1,600~1,800luxに調整した(Fig.3)。

供試個体の行動記録には、実験区間の50cm上部に設

置したネットワークカメラ（日本ビクター社VN-C30）を用いた。所内LANに接続し、実験室とは別の場所でモニタリングするとともに、画像データを1秒毎にPCに録画した。

3 実験方法

環境因子として、生息環境に大きく影響を及ぼす流水要素である水深、流速、空間要素である遮蔽、植生を選定した。実験は、片側水路の条件を一定（標準条件）とし、もう一方の水路の条件を変化させた。環境因子を単独で変化させた単一因子実験と環境因子を組み合わせた複合因子実験を行った。

実験は、2003年7月～8月にかけて、午前9時から午後6時までの間に行った。実験区間に放流するタモロコは5個体とし、1条件に対し4反復の試験を行い、2反復毎に左右水路の条件を入れ替えた。また、供試個体は同一条件実験につき一度だけ使用した。予備試験により、タモロコは実験水路に放流後しばらくは警戒し、水路隅で身を隠そうとするが、約10分後に水路内を泳ぎ回ることが確認された。そのため、放流15分後に実験開始し、その後45分間を観測対象期間とした。ネットワークカメラで撮影した画像から1分毎の左右水路の分布個体数を計数し、左右水路への分布率を得た。単一因子および複合因子実験条件をTable 1に示す。

Table 1 単一因子および複合因子実験の実験条件  
Experimental conditions for a single-factor and composite-factor experiments

実験名	Run No	実験条件							
		水深 (cm)		流速 (cm/s)		遮蔽		植生 (棒間隔)	
		左水路	右水路	左水路	右水路	左水路	右水路	左水路	右水路
水深	1	7	4	0	0	開放	開放	なし	なし
	2	7	10	0	0	開放	開放	なし	なし
	3	7	12	0	0	開放	開放	なし	なし
	4	7	15	0	0	開放	開放	なし	なし
	5	7	18	0	0	開放	開放	なし	なし
流速	1	7	7	10	2	開放	開放	なし	なし
	2	7	7	10	4	開放	開放	なし	なし
	3	7	7	10	6	開放	開放	なし	なし
	4	7	7	10	14	開放	開放	なし	なし
	5	7	7	10	16	開放	開放	なし	なし
	6	7	7	10	18	開放	開放	なし	なし
遮蔽	7	7	7	0	0	開放	全遮蔽	なし	なし
	8	7	7	0	0	開放	上下遮蔽	なし	なし
	9	7	7	0	0	開放	左右遮蔽	なし	なし
植生	10	7	7	2	2	開放	開放	なし	5cm
	11	7	7	2	2	開放	開放	なし	6cm
	12	7	7	2	2	開放	開放	なし	8cm
水深 + 遮蔽	13	12	7	0	0	開放	上下遮蔽	なし	なし
流速 + 遮蔽	14	7	7	6	10	開放	上下遮蔽	なし	なし
植生 + 遮蔽	15	7	7	2	2	開放	上下遮蔽	6cm	なし

・各RUN（同一条件）で、4反復（2回毎に左右条件交換）実施  
・稚魚、成魚ともに、RUN1～15の条件で選好性実験を行った。

a 水深因子実験

標準条件を水深7cmとし、もう一方の水路の水深を4, 10, 12, 15, 18cmとした。下流ゲートと厚さ1cmの透明アクリル板を水路底に複数枚敷くことで水深の設定を行った。左右水路の流速は0cm/sとした。

b 流速因子実験

標準条件を10cm/sとし、もう一方の水路の流速を2, 4, 6, 14, 16, 18cm/sとした。流速は、流量と水深から求められる断面平均流速とした。左右水路の水深は7cmとした。

c 遮蔽因子実験

水路壁や水面上の葉陰、魚巣ブロックなどタモロコが身を隠す場所を想定し、片方の水路の接合部を除く壁面を厚さ1mmの黒色アクリル板で遮蔽した。遮蔽する壁面の部位を変え、全遮蔽条件、上下遮蔽条件、左右遮蔽条件を設定した。標準条件は覆いのない開放条件とした。左右水路の水深は7cm、流速は2cm/sとした。

d 植生因子実験

ヨシ等の水生植物帯を想定した装置を片方の水路底面に設置した（Fig.4）。装置は、厚さ1cmのアクリル板に直径8mm長さ15cmの木棒を一定間隔に千鳥状に配置したものである。棒の配置間隔は、流下方向に5cm, 6cm, 8cmの3通りとした。標準条件は、これらの装置のないものとした。左右水路の水深は7cm、流速は2cm/sとした。

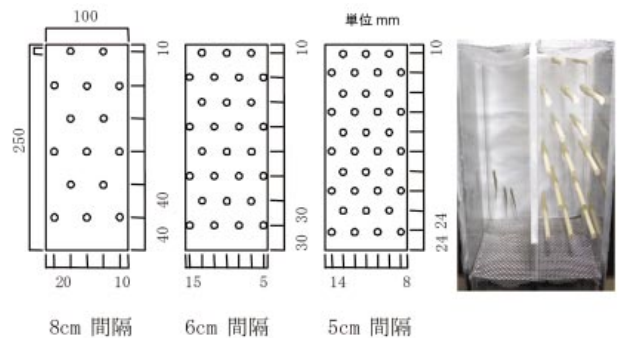


Fig.4 植生因子実験装置と水路への設置状況

Schematic diagram of apparatus for spurious vegetation

e 複合因子実験

単一因子実験で得られた各因子に対する選好強度を互いに関連付けるために実施した。水深因子、流速因子、植生因子と結果的に選好性の高かった遮蔽条件を加えて選好性の変化を実験した。各因子の選好性の高かった条件を標準条件とし、選好性の低かった条件に選好性が高い遮蔽条件の組み合わせで設定した。

4 選好強度の定式化

a 単一因子に対する選好強度の定式化

選好強度の表現には関根ら（1994）の式を利用した。実験時に右、左水路で観測される魚の分布は、環境因子に対する魚の選好強度の比によって決定されると仮定する。 $R_j$ をある環境因子  $j$  についての実験での左右水路のタモロコの個体数比、 $P_{ij}$  ( $i = \{\text{右水路, 左水路}\}$ ) を環境因子  $j$  に対する左右水路の選好強度の値であるとすると、 $R_j$ は次式となる。



$$R_j = \frac{P_{j,右}}{P_{j,左}} \quad (1)$$

単一の環境因子の値に対する選好強度 $P_j$ の関数形は任意でよいが、ここでは、単純性を重視した4種類のパターンを検討した (Fig.5)。Type1, 2は選好強度が直線的に変化するパターン、Type3は選好強度を平均  $av$ 、標準偏差  $sd$  の正規分布で表現するパターンで、Type4は離散的な因子条件毎に選好強度を定めるものである。

$R_j$ は単一因子実験から得られるため、 $P_j$ のTypeを適切に選定することにより、そのパラメータ (例えばType 1では、 $t_1, t_2, N_1, N_2$ ) を定めることができる。一方、 $R_j$ は右水路への個体数の分布率を $B_x$ とすれば次式より計算できる。

$$R_j = \frac{B_r}{1 - B_r} \quad (2)$$

Type毎の選好強度式のパラメータ値の決定にあたっては、準ニュートン法を用いた。単一因子実験から得られる分布率をもとに、最適化計算で得られた分布率の計算値と実験値 (平均値) の絶対誤差が最小となるようにパラメータを決定した。

なお、式 (1) から明らかなように、単一因子を考えた場合、Type1, 2におけるパラメータ値 ( $v_1, v_2, v_3$ ) は、相互の比率を表しているにすぎない。

選好強度は、 $v_1, v_2$ または、 $v_3$ の最大値を 1 として正規化する。

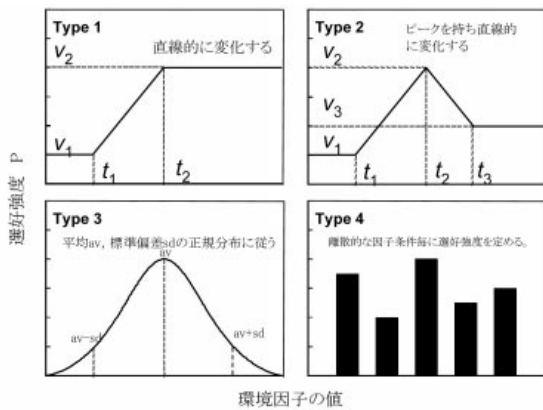


Fig.5 選好強度式のパターン (関根ら, 1994から引用)  
Patterns of preference level

b 複合因子に対する選好強度の定式化

実水域の環境条件は複数の環境因子が複合したものである。そのため、単一因子実験から得られた選好強度式を何らかの方法で統合する必要がある。

(1) 加法形, 乗法形選好強度式

関根ら (1994) は、複合した環境因子  $j$  に対する総合的な選好強度 $P^*$ の定式化として、式 (3) および式 (4)

で示される加法形, 乗法形で結合する方法について、以下に示す問題を指摘している。

加法形モデル 
$$P^* = \sum_{j=1}^J W_j P_j \quad (3)$$

乗法形モデル 
$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{W_j} \quad (4)$$

ここで、 $J$ はある環境条件を構成する因子数、 $P_j$ 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である。

加法形, 乗法形モデルとも考慮する環境因子が固定されている場合には、問題は顕在化しないが、実験により選好強度式を決める場合や環境因子を加除する場合には、式の表現上、全ての因子  $j$  に対する $P_j$ と $W_j$ を一組の値として同時に決定しなくてはならない。すなわち、複合因子実験として、水深因子・流速因子を行った場合、加法形モデルでは、

$$R_{水深・流速} = \frac{P_{右}^*}{P_{左}^*} = \frac{W_{水深} P_{水深,右} + W_{流速} P_{流速,右}}{W_{水深} P_{水深,左} + W_{流速} P_{流速,左}} \quad (5)$$

となる。左辺は実験から、右辺は定式化された選好強度式から求められるので、 $W_{水深} / W_{流速}$ は計算できる。

ところが、水深・流速複合因子実験で左右の水路の流速が等しい場合には、式 (5) は以下のようになる。

$$R_{水深} = \frac{P_{水深,右}}{P_{水深,左}} = R_{水深・流速} \Big|_{右流速=左流速} \quad (6)$$

$$\frac{P_{水深,右}}{P_{水深,左}} = \frac{W_{水深} P_{水深,右} + W_{流速} P_{流速,右}}{W_{水深} P_{水深,左} + W_{流速} P_{流速,左}} \Big|_{右流速=左流速} \quad (7)$$

一般には、 $P_{流速,右} = P_{流速,左} \Big|_{右流速=左流速}$ であるから、式 (7) は成立しない。

同様に乗法形モデルでは、水深・流速複合因子実験では、

$$R_{水深・流速} = \frac{P_{右}^*}{P_{左}^*} = \frac{(P_{水深,右})^{W_{水深}} (P_{流速,右})^{W_{流速}}}{(P_{水深,左})^{W_{水深}} (P_{流速,左})^{W_{流速}}} \quad (8)$$

$P_{流速,右} = P_{流速,左} \Big|_{右流速=左流速}$ の場合には、

$$R_{水深・流速} = \frac{P_{右}^*}{P_{左}^*} = \frac{(P_{水深,右})^{W_{水深}} (P_{流速,右})^{W_{流速}}}{(P_{水深,左})^{W_{水深}} (P_{流速,左})^{W_{流速}}} \quad (9)$$

となる。このため乗法形モデルは加法形モデルと異なり、左右水路の因子の値が同じであれば、 $R$ の算定にその因子は影響しない。そのため、影響因子を加除できることを意味するが、一般には、 $W_{水深} = 0$ であるので、上式は成立しない。単一因子実験結果を適用できないことを意味する。

(2) 修正乗法形選好強度式

関根ら (1994) は、 $W_{max}$ を因子間で最大値をとるウェ

イトとして、式(10)～(12)に示される正規化因子ウェイトによる修正乗法形選好強度式を提案している。

$$P^* = \prod_{j=1}^J (P_j)^{\frac{W_j}{W_{\max}}} \quad (10)$$

$$W_{\max} = \begin{cases} \max_{j \in V} (W_j) & V \neq \phi \\ \infty & V = \phi \end{cases} \quad (11)$$

$$V = \{j | (\exists l, r) (P_{j,l} \neq P_{j,r})\} \quad (12)$$

ここで、 $\phi$ は空集合、 $V$ は存在記号である。式(12)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。

先と同様に水深・流速複合因子実験で左右の水路の流速が等しい場合は、

$$R_{\text{水深・流速}} = \frac{(P_{\text{水深,右}})^{\frac{W_{\text{水深}}}{W_{\max}}} (P_{\text{流速,右}})^{\frac{W_{\text{流速}}}{W_{\max}}}}{(P_{\text{水深,左}})^{\frac{W_{\text{水深}}}{W_{\max}}} (P_{\text{流速,左}})^{\frac{W_{\text{流速}}}{W_{\max}}}} \quad (13)$$

となる。 $P_{\text{流速,右}} = P_{\text{流速,左}}$ 、 $P_{\text{水深,右}} = P_{\text{水深,左}}$ とすれば、 $W_{\max} = W_{\text{水深}}$ であり、

$$R_{\text{水深・流速}} = \frac{P_{\text{水深,右}}}{P_{\text{水深,左}}} = R_{\text{水深}} \quad (14)$$

となる。以上のように加法形、乗法形モデルに見られた単一因子実験や複合因子実験に対する式の不整合性は解消されている。

修正乗法形選好強度式の特徴として、正規化因子ウェイトを採用することで、新たに環境因子を付け加えても、それ以前に求めた選好強度式は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、という特徴をもつ。

### (3) PHABSIMへの適用

IFIMの中核部で生息環境の評価を受け持つモデルであるPHABSIMでは、生息環境評価指標を重み付き利用面積WUA (Weighted Usable Area) として、以下のように算定される(中村, 2000)。

$$WUA = \sum_i a_i \cdot (CSI)_i \quad (15)$$

ここで、 $i$ : 河川を類似した物理環境に区分したセル、 $a$ : 各セルの水表面積、 $CSI$ : 次式に示す各セルにおける合成適性値 (Composite Suitability Index) である。

$$CSI = SI(v) \times SI(d) \times SI(s) \times SI(e) \quad (16)$$

ここで、 $SI(v)$ 、 $SI(d)$ 、 $SI(s)$ 、 $SI(e)$ は、各セルの流速、水深、底質、その他に対する選好値である。

式(15)と式(10)の修正乗法形選好強度式を比較す

ると、両モデルとも各環境因子に対する選考強度を乗法形で結合したものであり、基本的な考え方は変わらない。式(10)の $P_j$ の最大値が1となるように正規化することにより $P^* \times a_i$ をPHABSIMにおけるWUAと同じように扱えることが可能である(楊ら, 2001)。

## 結果および考察

### 1 単一因子実験・複合因子実験結果

今回行ったすべての実験結果をFig.6に示す。一部分布率にバラツキが見られるが、左右水路の特性による分布率の違いは(●◆: 標準条件を右水路, ○◆: 標準条件を左水路に設定した時の分布率)明確ではない。そこで本研究では、4反復の平均で各条件の分布率を代表させた(Fig.7)。デ-タは、1分ごとに左右水路に入ったタモロコの個体数の比であり、45分間の平均分布率である。

以下、各実験における個体の分布率の偏りについては、二項検定で有意差を判定した。

#### a 水深因子

稚魚では、水深7cmと水深4cmの水路への分布率は、ほぼ同じだった。しかし、水深7cmと水深10, 12, 15, 18cm間の分布率は、いずれも深い側が高かった( $p < 0.001$ )。成魚の分布率は、すべての試験区で深い側が高かった( $p < 0.001$ )。

#### b 流速因子

稚魚と成魚では、分布率の傾向が異なっていた。稚魚の分布率は、どの実験においても流速の遅い側が高かった( $p < 0.001$ )。一方、成魚の分布率は、流速10cm/sと2~6cm/sの比較では、10cm/s側の水路が高く( $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ )、流速10cm/sと16cm/sの比較では、16cm/s側が高かった( $p < 0.001$ )。

#### c 遮蔽因子

稚魚、成魚ともに分布率は、開放条件よりも全遮蔽条件または上下遮蔽条件が高かった(稚魚、全遮蔽、上下遮蔽:  $p < 0.001$ ; ; 成魚、全遮蔽:  $p < 0.01$ , 上下遮蔽:  $p < 0.001$ )。しかし、開放条件と左右遮蔽条件の比較では、開放条件が高かった( $p < 0.001$ )。

#### d 植生因子

稚魚、成魚ともに開放条件と比べ植生条件の水路の分布率が高かった( $p < 0.001$ )。棒間隔と分布率の関係では、成魚は、棒間隔6cm条件の分布率が棒間隔4, 8cm条件よりも高かった。また、稚魚は、棒間隔4cmと6cm条件の分布率が棒間隔8cm条件よりも高かった(棒間隔6cm:  $p < 0.01$ , 棒間隔4cm:  $p < 0.05$ )。

#### e 複合因子

稚魚では、水深因子と流速因子で上下遮蔽条件を加えた側の水路の分布率が高くなった(水深因子:  $p < 0.001$ , 流速因子:  $p < 0.01$ )が、植生因子では両条件の分布率に差はみられなかった。成魚では、水深因子と流速因子で

上下遮蔽条件を加えた側の水路の分布率が高かったが ( $p < 0.001$ ), 植生因子では上下遮蔽条件よりも棒間隔6cm, 開放条件の分布率が高かった ( $p < 0.01$ ).

2 単一因子に対する選好強度の定式化

a 水深因子

水深因子についての選好強度式は、稚魚、成魚ともに

直線的に選好強度が増加するType1を適用した (Fig.8). 両者の選好強度式の傾向は、非常に似ている。分布率の計算値と実験値は、非常によく一致している。

本実験で使用した水路は大きさの制約から、20cm以上の水深の検討ができなかった。実際の生息環境は水深20cm以上であることも多いため、実験装置を検討して、さらに調査する必要がある。

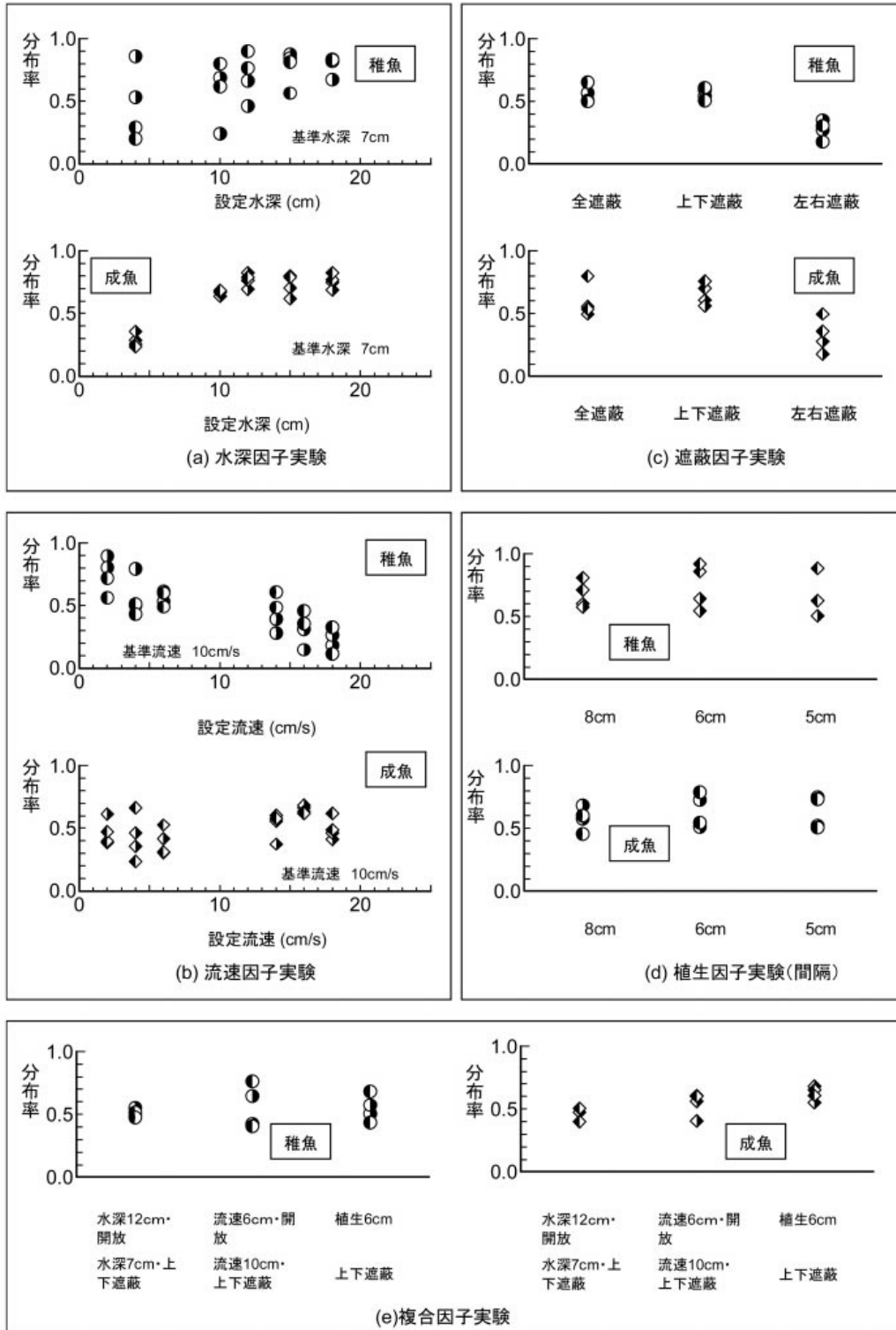


Fig.6 室内実験の結果 (全データ) ● ◆ : 標準条件を右水路 ○ ◆ : 標準条件を左水路に設定した時の分布率  
Schematic diagrams of the observed distribution ratio in single-factor and composite-factor experiments



b 流速因子

流速因子についての選好強度式は、稚魚に選好強度が直線的に増減するType2、成魚にType1を適用した ( Fig.9 )。稚魚の流速に対する選好強度は、1cm/sで最大値となり、流速の増大とともに減少した。一方、成魚の選好強度は、6cm/sの0.57から16cm/sの最大値まで増加した。このような選好性の顕著な差は、体サイズにとも

なう泳力の差が一因であると考えられる。なお、稚魚の選好強度式は、ほぼ同じ体サイズのメダカ ( 平松ら, 2001 ) と傾向がよく似ていた。

c 遮蔽因子

遮蔽因子については、Type4を適用した ( Fig.10 )。稚魚の選好強度は、開放条件の0.78に対し上下遮蔽条件が最大値となった。一方、成魚の選好強度は、開放条件の

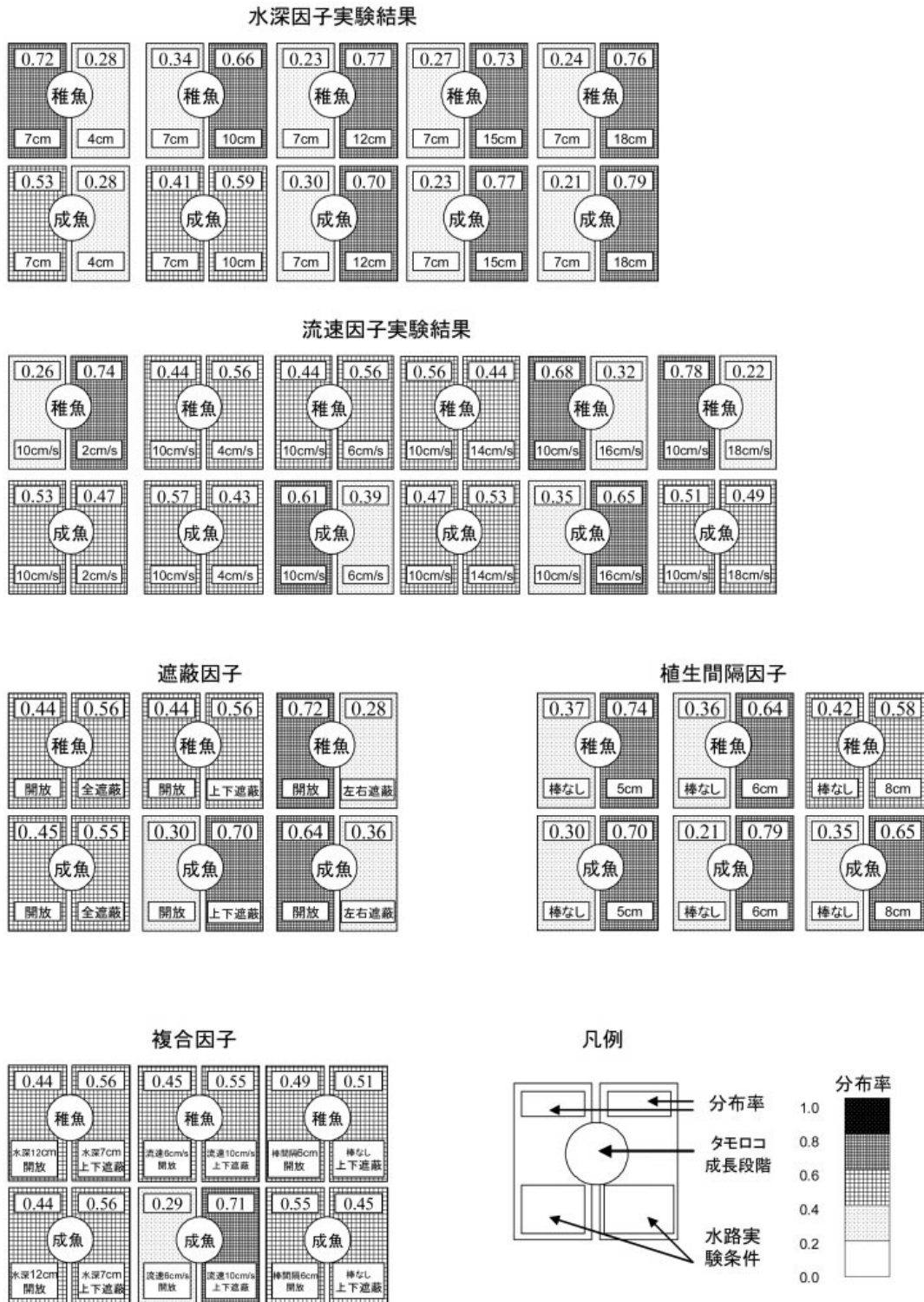


Fig.7 室内実験の結果 ( 45分間の平均分布率 )

Schematic diagrams of 45-minute averages of observed distribution ratio in single-factor and composite-factor experiments

0.42に対し、上下遮蔽条件で最大値であった。左右遮蔽条件の選好性が低かった理由は明らかでなかった。いずれにしても、捕食者などから身を隠す空間の必要性が示唆された。

d 植生因子

植生因子についての選好強度式は、稚魚、成魚ともに

棒間隔で選好強度が直線的に増減するType2を適用した (Fig.11)。稚魚、成魚ともに植生条件の選好性が高く、選好強度式はいずれも棒間隔約5cmで選好強度が最大となるType2が得られた。

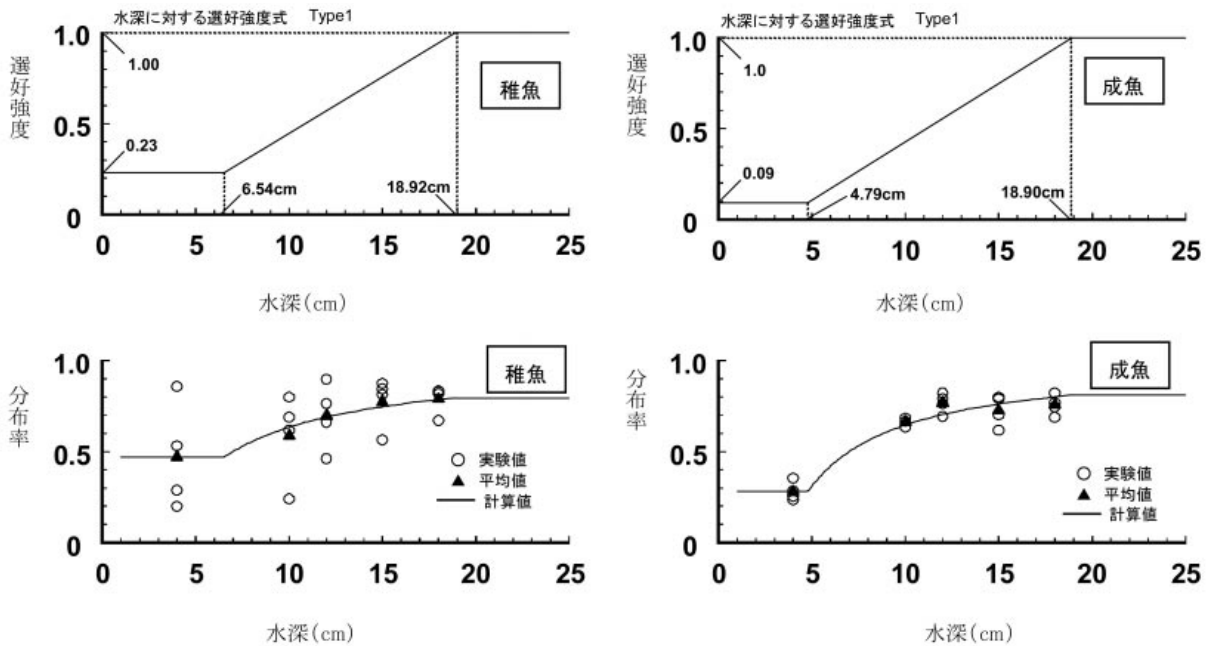


Fig.8 水深因子に関する選好曲線 (上) およびタモロコの分布率の実験値と計算値の比較 (下)

Calculated preference intensity for depth (above) and predicted distribution ratio in the depth factor experiment (below)

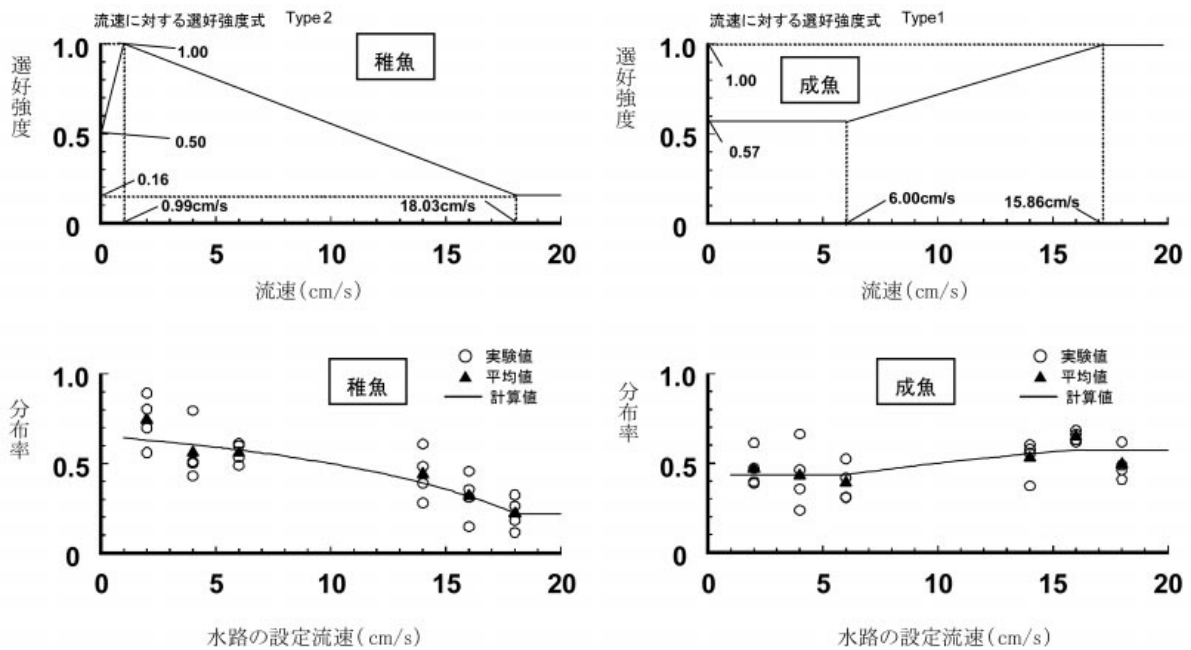


Fig.9 流速因子に関する選好曲線 (上) およびタモロコの分布率の実験値と計算値の比較 (下)

Calculated preference intensity for velocity (above) and predicted distribution ratio in the velocity factor experiment (below)



3 環境因子間のウェイト

次に、求めた選好強度式と複合因子実験結果から、各因子間のウェイトを求める。稚魚の水深・遮蔽複合因子を例にすると、左水路の条件は水深12cm，開放条件，右水路は，水深7cm，上下遮蔽であるので，式（10）より

$$R_{\text{水深・遮蔽}} = \frac{\frac{W_{\text{水深}}}{(P_{\text{水深}(7\text{cm}), \text{右}})^{W_{\text{max}}}} \cdot \frac{W_{\text{遮蔽}}}{(P_{\text{遮蔽}(上下), \text{右}})^{W_{\text{max}}}}}{\frac{W_{\text{水深}}}{(P_{\text{水深}(12\text{cm}), \text{左}})^{W_{\text{max}}}} \cdot \frac{W_{\text{遮蔽}}}{(P_{\text{遮蔽}(開放), \text{左}})^{W_{\text{max}}}}} \quad (17)$$

$P_{\text{水深}(7\text{cm})}$ ,  $P_{\text{遮蔽}(全遮蔽)}$ 等は、先に求めた選好強度式から算定できる。

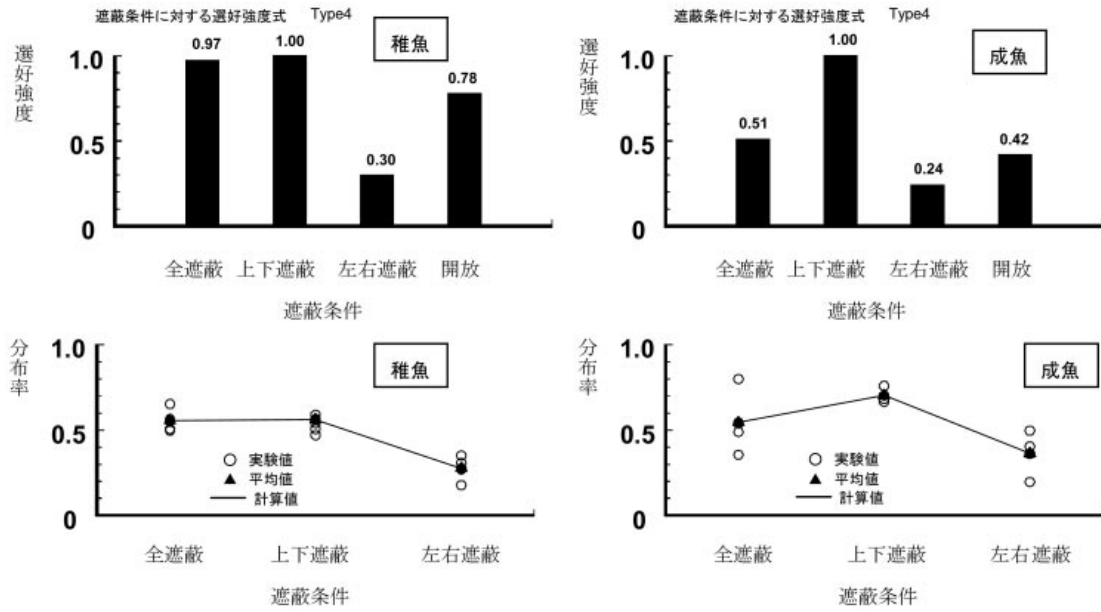


Fig.10 遮蔽因子に関する選好曲線（上）およびタモロコの分布率の実験値と計算値の比較（下）  
 Calculated preference intensity for cover (above) and predicted distribution ratio in the cover factor experiment (below)

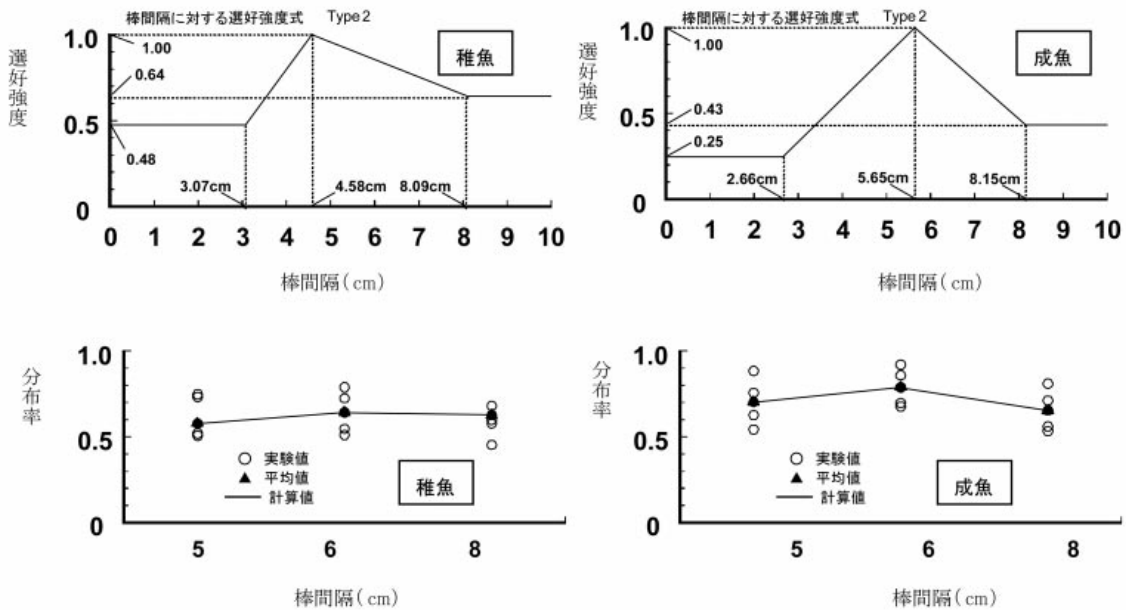


Fig.11 植生因子に関する選好曲線（上）およびタモロコの分布率の実験値と計算値の比較（下）  
 Calculated preference intensity for vegetation (above) and predicted distribution ratio in the vegetation factor experiment (below)

また、 $R_{水深・遮蔽}$  は、複合因子実験から得られる左右水路の個体数比であり、Fig.7より $R_{水深・遮蔽}=0.56/0.44$ である。式(16)は、

$$R_{水深・遮蔽} = \frac{\frac{W_{水深}}{W_{遮蔽}}}{\frac{(0.256)^{W_{水深}} (1.00)^{W_{遮蔽}}}{(0.568)^{W_{水深}} (0.778)^{W_{遮蔽}}}} = \frac{0.56}{0.44} = 1.28 \quad (18)$$

となる。 $W_{max}=W_{水深}$ 、 $W_{max}=W_{遮蔽}$ の2つの場合の計算を試行錯誤することにより、 $W_{max}=W_{遮蔽}$ 、 $W_{水深}/W_{遮蔽}=0.0067$ の値を得る。このようにして、各因子のウェイトを求め、最大値をとる因子を1として各因子ウェイト比を求めた (Table 2)。

Table 2 各環境因子のウェイト  
The relative weights between four environmental factors

環境因子	タモロコ	稚魚	成魚
水深		0.007	0.342
流速		0.075	1.00
遮蔽		1.00	0.462
植生		0.787	0.698

稚魚と成魚でウェイトが最大となる因子が異なっている。稚魚では流速因子実験の結果、分布率に明瞭な差が見られたことから、この因子のウェイトの高さが想像された。しかし、ウェイトの計算結果は、遮蔽因子と植生因子のウェイトが大きく、水深因子と流速因子のウェイトは非常に小さかった。

一方、成魚では流速因子のウェイトが最も大きく、次いで植生因子、遮蔽因子の順であった。このように、稚魚と成魚では環境因子のウェイトに顕著な違いが見られた。なお因子ウェイトは、式(10)から明らかなように因子相互の比較を示すものであり、例えば流速因子のウェイトが水深因子のウェイトに比べ十分大きい場合、水深と同時に流速条件が変化すれば、水路の魚の分布率が流速条件だけで決まることを意味している。

#### 4 生息場ポテンシャルの評価

タモロコの稚魚、成魚に対する環境因子に対する選好強度式および因子間のウェイトを求めることができた。この結果から、保全行為等で水路環境が変化する場合の生息場の総合的選好強度を生息場ポテンシャルとして扱

Table 3 生息場ポテンシャルの評価 - 試算例 -  
Assessment of habitat potential - a numerical example ?

環境因子	条件1	条件2	稚魚(単一因子P)		成魚(単一因子P)	
			条件1	条件2	条件1	条件2
水深(cm)	20	15	1.00	0.76	1.00	0.75
流速(cm/s)	16	5	0.26	0.80	1.00	0.57
遮蔽	開放	全遮蔽	0.78	0.97	0.42	0.51
植生	棒4cm間隔	植生なし	0.80	0.64	0.59	0.43
総合的選好強度 P*			0.65	0.68	0.46	0.21

い試算してみる。魚巢ブロックが設置される状況を想定し、水路の状況がTable 3に示すような条件1から条件2が変わったものとし、その場所 (PHABSIMで示されるセル)の各環境因子に対する選好強度、総合的な選好強度を算定した。稚魚に対しては、総合的な選好強度 $P^*$ が0.65から0.68に、成魚に対しては0.46から0.21に変化しており、生息環境として、稚魚に対して有効であることが想定される。

以上のように、環境因子に対する選好性を定量化し、その因子のウェイトを求めることにより、農業水路の設計や既存の農業水路の生息環境の適否を評価できることが期待される。

このような評価には、水温、餌資源、水質、底質など今回取り上げなかった環境因子についても定量評価が必要である。さらに、魚類の選好性の季節的な変動等や実験の改良等の余地がある。

今回の選好強度式や因子ウェイトを検証するために、本種の生態、特に農業水路の利用様式に関する知見や、生息環境に関する情報の蓄積が望まれる。

#### 結 言

タモロコの稚魚、成魚について、水深因子、流速因子、遮蔽因子、植生因子をとりあげU迷路型水路を用いた単一因子実験と複合因子実験を行った。関根ら(1994)の選好強度パターンと正規化因子ウェイトを用いた修正乗法形選好強度式から選好強度式の定式化を行い、以下の知見を得た。

- ・得られた選好強度式は、稚魚、成魚とも、水深因子、流速因子、植生因子について、直線的に変化するType1またはType2、遮蔽因子については、離散的な因子条件ごとに定めるType4の選好強度式を得た。
- ・それらの選好強度式から、稚魚、成魚とも共通して、水深18~19cm、上下遮蔽または全遮蔽条件、植生条件の選好性が高いことが明らかになった。しかし、流速因子に関しては、稚魚は2.0cm/s、成魚は16cm/sの選好性が高く、異なった傾向を示した。
- ・複合因子実験と得られた選好強度式を用いて修正乗法形モデルから各因子間のウェイトを求めた。稚魚では遮蔽因子、成魚では流速因子、植生因子が高かった。
- ・タモロコの生息環境として隠れ場所や植生の存在とともに、特に稚魚には流速の緩やかな空間が必要であることが示唆される。
- ・本手法、本実験装置により魚類の環境選好性の解明が行えることが示唆された。

#### 参考文献

1) 青柳兵司 (1957): 日本列島産淡水魚類総説, 大修

- 館書店, pp.131-133
- 2) 福田信二・平松和昭・森 牧人・四ヶ所四男美 (2005): 農業用水路におけるメダカの生息場選好性のあいまいさに関する数理表現, 農土論集, 239, pp.3-49
  - 3) 平松和昭・福田信二・四ヶ所四男美 (2003): ファジィ推論によるメダカの環境応答モデルの開発, 農土論集, 228, pp.65-72
  - 4) 細谷和海 (2005): タモロコ, 日本の淡水魚, 山と溪谷社, pp.298-299
  - 5) 片野 修 (1998): 水田・農業水路の魚類群集, 「水辺環境の保全 - 生物群集の視点から -」(江崎保男・田中哲夫編), 朝倉書店, pp.67-77
  - 6) Katano O., Hosoya K., Iguchi K. & Yamaguchi M. (2003): Species diversity and abundance of freshwater fishes in irrigation ditches around rice fields, *Environmental Biology of Fishes*, 66, pp.107-121
  - 7) 中川昭一郎 (2000): 圃場整備と生態系保全, 自然環境復元協会編, 農村ピオトープ, 信山社サイテック
  - 8) 中村俊六 (2000): 流量増分式生息評価法 (IFIM), 河川生態環境評価法, 玉井信行・奥田重俊・中村俊六編, 東京大学出版会, pp.174-177
  - 9) 中村守純 (1955): 関東平野に繁殖した移植魚, 日本生物地理学会会報, pp.333-337
  - 10) 中村守純 (1969): タモロコ, 日本のコイ科魚類, (財)資源科学研究所, pp.112-116
  - 11) 関根雅彦・浮田正夫・中西弘・内田唯史 (1994): 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, 土木学会論文集, No503/-29, pp.177-186
  - 12) Stalnaker, C., B.L. Lamb, J. Henriksen, K. Bovee, and J. Bartholow. (1995): The Instream Flow Incremental Methodology. A Primer for IFIM. Biological Report 29, March 19 U.S. Department of the Interior, National Biological Service, Fort Collins, Colorado, pp.1-45
  - 13) 楊継東・関根雅彦・浮田正夫・今井剛 (1999): 行動モードを考慮した魚の環境選好性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No636/-13, pp.35-45
  - 14) 楊継東・関根雅彦・浮田正夫・今井剛 (2001): 行動モードを考慮した魚の生息環境評価手法に関する研究, 土木学会論文集No671/-18, pp.13-23



# Formulation of Preference Intensity of Field Gudgeon to Environmental Factors for Habitat Assessment of Agricultural Canals

OKUSHIMA Shuji , TANAKA Yuichi , KOIZUMI Noriyuki and TAKEMURA Takeshi

## Summary

It is essential to give an environmental consideration into industrial or engineering techniques in farm land consolidation for the ecosystem conservation and for understanding the excellent native habitat for fishes around rice fields . However , the accumulation of knowledge on these issues is not enough . The present study aims to formulate preference intensity of field gudgeon with different growth stages of fry and adult by using laboratory open-channel experiments considering the four environmental factors of depth , Velocity , cover and vegetation . We employed the patterns of preference level with modified weighted product equation proposed by Sekine et.al1994 ) for the formulation . As a result , the present models well represented the preference intensities of the fish in different growth stages . The preference weight of cover factor was found to be high in the fry and that of velocity and vegetation were high in the adult fish . It is suggested that the habitats with cover and vegetation are necessary for the field gudgeon and that low-velocity is the essential habitat especially for the fry .

**Keywords :** field gudgeon, *Gnathopogon elongatus elongatus* , preference intensity, environmental factor, drainage channel, U maze type experimental channel