

## 砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境予測

藤原正幸\*

(水産工学研究所)

### 1. はじめに

現在全国各地でヒラメ種苗の量産体制が確立され、それに続く中間育成で全長50~60mmまで育てた後放流が行われている。しかし一般にヒラメの人工種苗は放流直後における摂餌行動や害敵に対する逃避行動などの運動性が緩慢であり、空胃率や食害による被食圧が高いことが知られている。このような現状から人工種苗の質が重要視されてきた。質を高めるためには、天然に近い環境で、ある期間飼育馴致し、その後放流することが望ましい。例えば海に囲い網を設置し、その中で1週間程度馴致した後放流した場合は、直まき放流に比べ再捕率が格段に良くなった事例が報告され、自然環境への馴致の有効性が証明されている。しかしこの方法は潮流・波浪等の自然現象に弱く、施設の設置および管理労力を要する等の難点がある。また陸上水槽での中間育成は動力を必要とするため経済的に好ましくなく、更に面積的な制約からどうしても高密度での飼育（自然環境への馴致には面積占有率は数%以下とすることが望ましい。）となり、自然環境への適応に関しては全く考慮することができない。このような背景から、省エネかつ省力化を目指し、放流海岸に池を造成し、その中でサイズおよび質（自然環境への適応力）の両面を満足させることを目的とした中間育成を実施する計画が鳥取県で進められている。中間育成池は今春（1992年）完成し、第1回目の種苗は6月頃に放流される予定である。この事業は、ヒラメという水産生物を中心に、鳥取県水産試験場（中間育成手法や馴致判定）・日本海区水産研究所（体成分分析や離底時間による馴致判定）・水産工学研究所（海水交換と水質環境）がそれぞれ得意とする分野を担当し、研究を進め、それらの成果を総合化して目的を達成しようとするものである。

水産工学研究所では、中間育成池の構造（特に海水取水構造）と造成後の池の水質環境に関する研究を実施している。本報告では主に水質環境の予測手法について報告する。

### 2. 中間育成池の構造

中間育成池の構造で最も重要な施設は、海水取入口である。維持管理費用をなるべく抑えるためには、自然エネルギーを利用して海水を取入れる必要がある。造成予定海岸において、海水交換に利用できる自然エネルギーは、潮汐・沿岸流・波浪等が考えられるが、エネルギーの大きさの点において波浪エネルギーが最も優れている。よって本中間育成池では自然エネルギーとして波浪エネルギーを選択した。原理的には図1に示す様に往復運動である波を、海水取入口の急勾配（1：2）の斜面で

\* 現在愛媛大学農学部生物資源学科

碎波させ、流れを発生させるものである。この考えに基づいた施設は、岩手県種市町地先の平磯上に造成されたウニ増殖溝に利用されている。

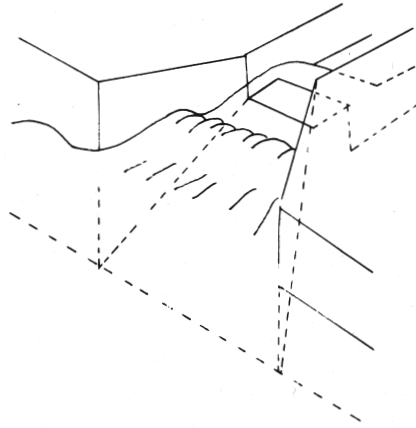


図1. 波浪エネルギー利用工法

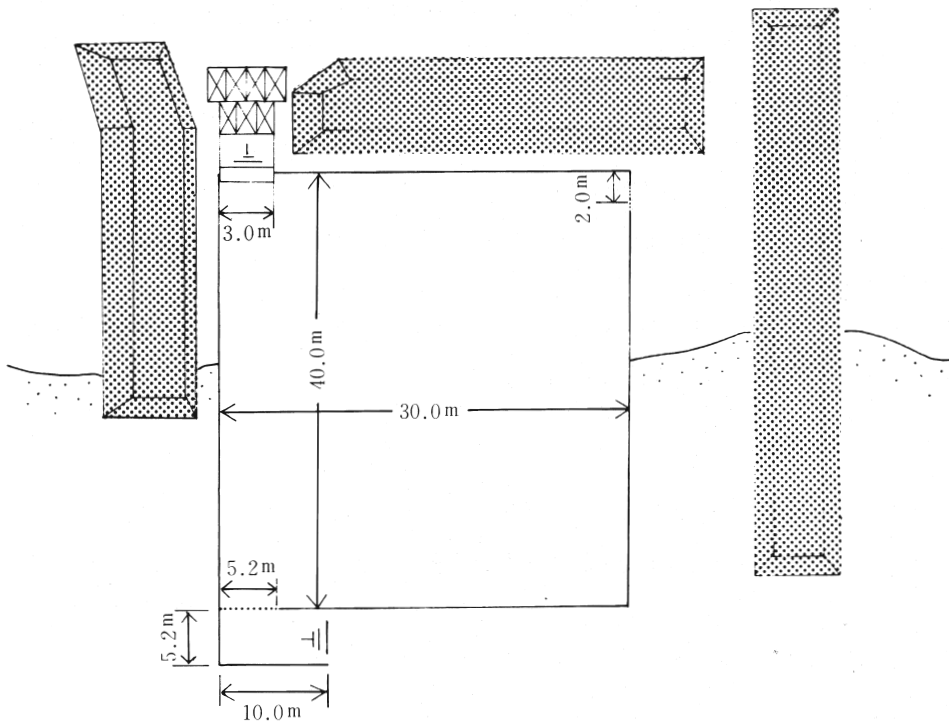


図2. 中間育成池

池全体の構造を図2に示す。水深は天然稚魚の生息域や鳥害の防止等を考慮して1mと設定した。

### 3. 水質環境予測モデル

砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境は、海象・気象等の影響を受け変動する。よってその変動（最悪の状態）をあらかじめ予測し、中間育成生物への影響を検討しておく必要がある。このような背景から中間育成池の流動、水質（水温・塩分・DO）を予測するため図3に示すシステムを考え、数値モデル（藤原ら1991）を構築し適用した。

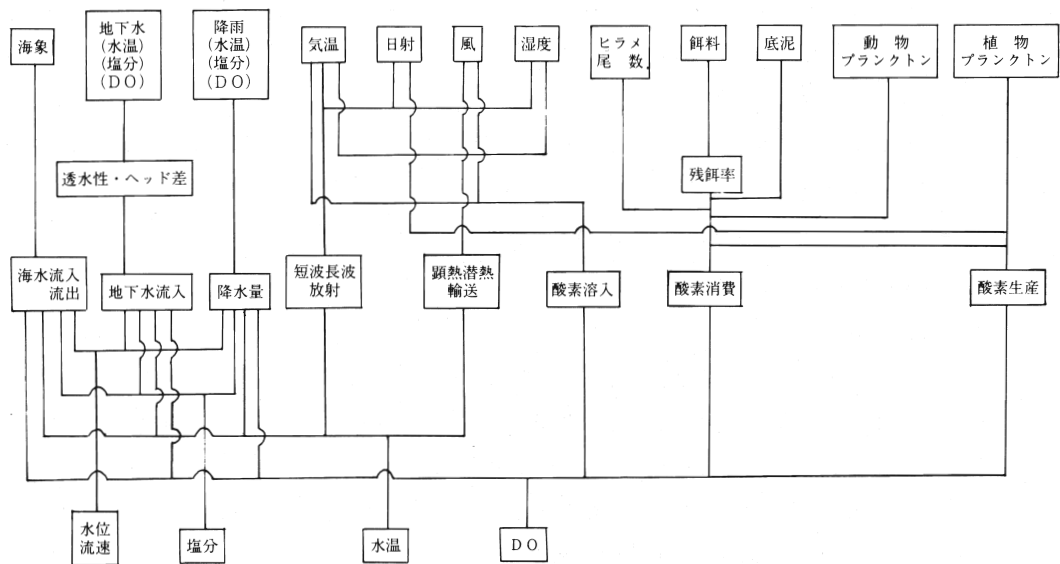


図3. 水質環境予測システム

#### (1) 海水流入

海象条件と取入口の構造から計算された流速、あるいは水位を入力する。本計算ではどれだけの流入量があれば、ヒラメの中間育成に悪影響を及ぼさない水質に維持できるかを明らかにするためにパラメータとして計算した。

#### (2) 地下水流入

海岸地下水が池の底面から湧出する可能性があり、現地観測された地下水位と透水係数から求めた湧水量を入力する。この地下水の湧出速度は池の中で分布させることも可能である。

#### (3) 降水量

降水による水質変化も計算可能である。

#### (4) 熱輸送

海面を通しての熱の出入りには、太陽からの短波放射・海面からの長波放射・蒸発による潜熱輸送・海水と大気の接触面における伝導による顕熱輸送があり、それらの収支で水温が変動する。

本計算では、上記の4種類の熱輸送形式において、バルク公式を用いた。池の側壁は断熱と仮定した。

(5) 酸素溶入

海面を通しての酸素の溶入に関しては、風速との関係で定式化されたMACKAY and YEUN (1983) の式を用いた。

(6) 酸素消費

酸素消費の要因として、ヒラメやプランクトンの呼吸、底泥の酸化そして残餌等の有機物の酸化をシステムとして組み入れたが、本計算ではヒラメの呼吸のみ分離して考え、その他の要因は、あらかじめ決定が困難なため、底泥による消費としてまとめて考えることとした。

1) ヒラメの酸素消費量

安静状態での酸素消費量については、今まで実験が重ねられ、体重と水温の関数として定式化されたものがいくつか報告されている。しかし、摂餌等の活動時における酸素消費量に関しては、実験設定が困難なためか、ほとんど知見がない状態である。よって本計算では活動時には安静時の2倍の消費量を仮定した。

2) 底泥による酸素消費量

底泥による酸素消費量に関しては、いくつかの養殖場や湾などで測定された例は報告されているが、现阶段では、底泥による酸素消費機構が完全に解明されているわけではないので、実測することが望ましい。しかし本ケースのようにまだ造成されていないもの予測には、よく似た環境と考えられる場所でのデータを援用するしかない。そこで今回の計算には造成予定海岸に築かれた10m四方の試験池での夜間の酸素減少速度から求めた値を用いた。

(7) 酸素生産

植物プランクトンの光合成により、中間育成池の溶存酸素濃度は増加する。よって酸素生産量を推定するためには植物プランクトン濃度を予測する必要がある。植物プランクトン ( $P$ ) の増殖を制限する主な要因は、栄養塩濃度 ( $N$ ) と水温 ( $T$ ) と光の強さ ( $I$ ) である。それらを制限要因とした植物プランクトン増殖モデルは、一般に以下のように表記される。

$$\frac{dp}{dt} = \mu_{max} \cdot f(N) \cdot f(I) \cdot f(T) \cdot P \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\mu_{max}$  : 最大増殖率

$P$  は一般にクロロフィル  $a$  を指標として用いることが多く、単位クロロフィル  $a$  当たりの酸素生産量が求めれば、 $P$  は酸素生産量に変換可能である。

(1)式の変数で  $I$  は実験式あるいは経験式から、そして  $T$  は本モデルで計算されるが、 $N$  に関しては新たに方程式を立てる必要がある。また(1)式は増殖に関する式であるが、プランクトンの増減を考える場合は、増殖のほかに、動物プランクトンによるグレージングや枯死等を考える必要がある。そうすると動物プランクトンやデトリタスに関する方程式も必要になってしまう。これら4個の方程式を連立させて解くことにより植物プランクトンによる酸素生産量が計算されるが、各方程式には現地観測データで同定しなければ決定が困難なパラメータが存在し、現在の

数値生態モデルの水準では設計段階での予測には使いづらい感がある。そしてこれらの要因をモデルに組み込んでも、モデルが複雑になるだけで精度の向上が保証されないため、また酸素生産を無視することにより、より危険側の想定となるため、今回の計算では酸素生産を無視した。

#### 4. 基礎方程式

中間育成施設の水質が一様であると仮定すると、基礎方程式としては物質の収支式のみで比較的シンプルであるが、そうでない場合は施設内を計算の基本単位となるセルに分割し、数値シミュレーションを行うことになる。基礎となる方程式は粘性非圧縮流体の連続方程式、運動方程式、移流拡散方程式（水温・塩分・溶存酸素）、および状態方程式である。実際の計算には、セル内で積分した方程式を用いる。以下に基礎方程式系を表記する。状態方程式は水温と塩素量から密度を計算するクヌーセン式が一般に用いられる（表記は省略）。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{Dc}{Dt} = K \Delta c + R \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $\rho$  : 密度                       $p$  : 圧力                       $\mathbf{u}$  : 流速ベクトル  
 $c$  : 水質変数                       $\nu$  : 動粘性係数                       $K$  : 拡散係数  
 $R$  : 増減項                       $\nabla$  : 勾配ベクトル                       $\Delta$  : ラプラス演算子  
 $\frac{D}{Dt}$  : ラグランジュ微分

(4)式の変数  $R$  は、海面を通しての熱輸送や酸素の溶入および消費等を表現する項である。

#### 5. 計算結果および考察

計算に用いたパラメータを表1に示す。境界条件として、海水取入口から水温21.5℃・塩分31.6‰・溶存酸素 5 ml/l の海水が流入し、中間育成池陸側の1/4の領域から水温16.0℃・塩分0.3‰・溶存酸素 2 ml/l の地下水が10ton/hr（試験池での実測値からの推定値）の割合で湧出する条件を設定した。気象条件は、中間育成期間中（6月～7月上旬）で

表1. 計算に用いたパラメータ値

		パラメータ	設定値	
流動計算	水平渦動粘性係数	0.002m <sup>2</sup> /s		
	マンニングの粗度係数	0.025		
水質計算	水平乱流拡散係数	0.002m <sup>2</sup> /s		
	水温	雲量	7.5	
		風速	0 m/s	
		湿度	70%	
	溶存酸素	ヒラメによるDO消費量	0.01ml/m <sup>2</sup> /s	安静時
			0.02ml/m <sup>2</sup> /s	活動時
底泥によるDO消費量		0.01ml/m <sup>2</sup> /s		
	液相の物質移動係数	10 <sup>-6</sup> m/s	無風時	

最も気温が高くなる状態を想定した。海水流入量は、100, 200, 300ton/hr の3ケースで計算を行い、必要海水流入量を求めた。

図4(a)~(c)に各ケースの定常状態に到達した溶存酸素濃度の分布を示す。ヒラメ稚魚が健全に成育するためには、最低4 ml/l 以上の濃度が理想的であると仮定すると、海水流入量として200ton/hr 以上必要となる。海水流入量が200ton/hr の状態での塩分分布を図5に示す。海岸地下水湧出量が海水流入量に比べて小さいため、最も低いところでも30%程度で、ヒラメの成長には全く影響を及ぼさないと考えられる。また一日のうちで最も水温が高くなる状態を図6に示す。外海水温より2℃以上上昇する水域はなく、水温に関してもヒラメの成長にほとんど悪影響は及ぼさないと考えられる。

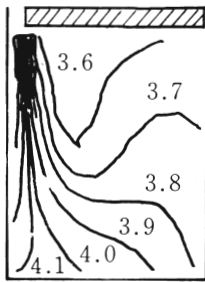


図4. (a) 溶存酸素濃度分布  
(ml/l)  
海水流入量：100ton/hr

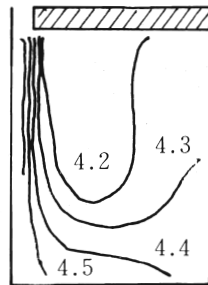


図4. (b) 溶存酸素濃度分布  
(ml/l)  
海水流入量：200ton/hr

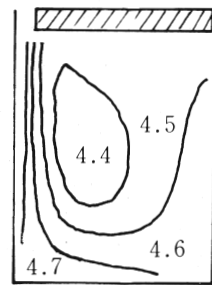


図4. (c) 溶存酸素濃度分布  
(ml/l)  
海水流入量：300ton/hr

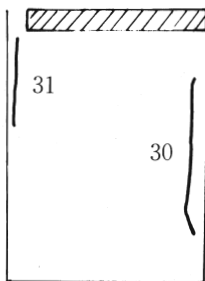


図5. 塩分分布 (%)  
海水流入量：200ton/hr

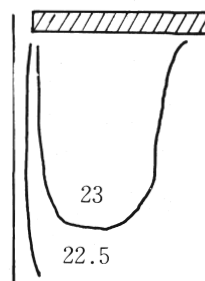


図6. 水温分布 (°C)  
海水流入量：200ton/hr

## 6. 今後の課題

本モデルの水質変数で、水温と塩分に関しては物理的要因のみで決定されるため、ある程度信頼できる結果が得られると考えられるが、溶存酸素に関しては生化学的要因が絡むため、いわゆる安全率を見込んで計算することになる。不明確な要因が多い程この安全率は大きくする必要があり、この安全率を合理的に下げることが予測精度の向上である。その中で最も問題となる要因は、底泥による酸素消費である。底泥による酸素消費機構が完全にモデル化されていない現時点では、今回のような方法で推測するしか仕方がないと思われるが、今後室内実験・現地観測を積み重ね、残餌の堆積－分解過程をモデル化することにより、現段階よりは科学的に合理的な予測が可能となるであろう。酸素生産に関しては、今回危険側の想定ということで無視したが、精度を向上させるという点では考慮する必要がある。その場合前述したようにモデルはかなり複雑になるため、第一段階としては、栄養塩は十分（投餌するため）であるという仮定で、動物プランクトンによる捕食と枯死は定数として植物プランクトンの増殖を計算することが考えられる。しかしこのようにして水質変動要因をモデル化して組込んだとしても、そのことで精度が向上しているかどうかを立証する現地観測データがなくては、自己満足で終わってしまう。またそのデータは、問題となる水質の変化のみを測定してもモデルの検証には使えない。モデルの検証には、モデル化に必要なすべての変数（溶存酸素の場合では、流入量・風速・日射量・植物プランクトン量……）が、同時に観測されている必要がある（多項目同時観測データ）。

## 7. おわりに

水質環境予測は、特に築堤式の中間育成施設において、海水取水量や形状および海水取入口の位置等の決定に不可欠であり、予測精度が高ければ高いほど、施設が合理的に設計され、事業上最も重要な経費の節減につながることになる。

全国に先駆けて造成された鳥取県泊村のヒラメ中間育成池を、今後集中的に追跡調査することによる将来の日本海側の砂浜開発への貢献は計り知れないものとなると考えられる。

最後に現地観測において御協力戴いた鳥取県水産試験場の方々に謝意を表します。

## 文 献

DONALD MACKAY and ANDREW T. K. Yeun (1983) Mass Transfer Coefficient Correlations for Volatilization of Organic Solutes from Water, *Environ. Sci. Technol.*, 17, 211–217.

藤原正幸・久保 敏・武内智行 (1991) 砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境予測モデルの開発, 平成3年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, 31–32.

### [質 疑 応 答]

土井 (富山水試) ①1,200m<sup>2</sup>×1mの1,200tの水は6時間で1回転すると考えて良いか、②データ

をとる深さは？ ③池の構造は何か。

藤原（水工研） ①場所によって異なるが、マクロ的にはそのように考えてもよい。②この予測では水深方向の平均値となるが、観測では上層と下層を測定する予定である。③海水取入口は、コンクリートで側壁は鋼矢板である。

大塚（新潟栽培セ） ①ヒラメが逃避するのを止めたり害敵生物の進入を防ぐ手だてはしてあるか。②ヒラメを放流するときにはどのようにして取り上げるのか。

藤原 ①海水取入口は構造上高くなっているため逃避することは考えられないが、害敵進入を防止するために網を設置する。排水口には、両方の目的から網を設置する。②私が聞いている範囲では排水口の網を撤去するだけであるが、鳥取水試の方ではさらに検討していると思う。

與世田（日栽協能登島） ①天然のコペ類やアミ類等の利用は考えてないか。②中間育成池内のプランクトン量の把握は行わないのか。

藤原 ①考えている。海水とともに入ってくる量に加えて、夜間は海水取入口付近に集魚燈等を設置し、アミ類等を人工的に集める方法を検討している。②プランクトン量は酸素生産、消費に大きい影響を及ぼすため、池が完成した後現地観測を行い、得られたデータを基に数値モデルに組み込む予定である。